

106-017-7919

MOTC-IOT-105-H2DB005c

可循環式綠色能源結合港灣結構 以建構綠色港灣之發展研究(4/4)



交通部運輸研究所

中華民國 106 年 3 月

106-017-7919

MOTC-IOT-105-H2DB005c

可循環式綠色能源結合港灣結構 以建構綠色港灣之發展研究(4/4)

著者：邱永芳、李賢華、蔡立宏、黃茂信

交通部運輸研究所

中華民國 106 年 3 月

GPN: 1010600395

訂價 450 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色港灣之
發展研究. (4/4) / 邱永芳等著. -- 初版. -- 臺
北市 : 交通部運研所, 民 106. 03

面 ; 公分

ISBN 978-986-05-2065-1(平裝)

1. 港埠工程 2. 能源

443.2

106003209

可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色港灣之發展研究(4/4)

著 者：邱永芳、李賢華、蔡立宏、黃茂信

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版 > 中心出版品)

電 話：(04)26587132

出版年月：中華民國 106 年 3 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價：450 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010600395

ISBN：978-986-05-2065-1(平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色港灣之發展研究(4/4)			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-05-2065-1(平裝)	政府出版品統一編號 1010600395	運輸研究所出版品編號 106-017-7919	計畫編號 105-H2DB005c
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：邱永芳 研究人員：蔡立宏、黃茂信 聯絡電話：04-26587120 傳真號碼：04-26571329	合作研究單位：國立中山大學 計畫主持人：李賢華 協同主持人：陳陽益 研究人員：劉雨慈、謝昌翰、謝翔宇、蘇玫瑜、郭馨 地址：80424 高雄市鼓山區蓮海路 70 號 聯絡電話：07-5252000 分機 5069		研究期間 自 105 年 1 月 至 105 年 12 月
關鍵詞：綠色能源、波浪能、能源擷取			
<p>摘要：</p> <p>本研究將研究以可再生之綠能系統應用於港灣結構系統中，一方面對於結構體可產生保護作用，另一方面將負面作用之能量轉換成可資利用之能源，並有效協助建構綠色港灣系統。本研究希望能達成的目標主要有三項：1.有效建置以波浪能擷取為主之綠能系統，2.將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中，3.增進港灣構造物使用之安全及耐久性。初步以海洋能為思考，如何將波浪能量加以有效利用並對主要結構物不造成額外負荷之情況下，將此作為一波浪擷取系統在規劃及分析時之最重要課題；其次重要之課題則為將此波浪能量有效轉換為電能或其他可資利用之資源。總言之，將原作用於港灣構造之能量將被此一擷取系統所蒐集，致使作用於港灣構造之負面效果減少，使港灣碼頭之安全性因而增加，並延長港灣構造物的使用年限。研究成果所設計之波能轉換系統未來可提供交通部航港局或各港務分公司，防波堤設計參考使用。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
106 年 3 月	484	450	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，<input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE : Application of a renewable energy converting system to the enhancement of a green harbor (4/4)			
ISBN (OR ISSN) 978-986-05-2065-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010600395	IOT SERIAL NUMBER 106-017-7919	PROJECT NUMBER 105-H2DB005c
DIVISION : HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR : Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR : Yung-Fang Chiu PROJECT STAFF : Li-Hung Tsai, Mao-Hsin Huang PHONE : (04)-26587120 FAX : (04) 26571329			PROJECT PERIOD FROM January 2016 TO December 2016
RESEARCH AGENCY : National Sun Yat-sen University PRINCIPAL INVESTIGATOR : H.H Lee DEPUTY INVESTIGATOR : Yang-Yih Chen PROJECT STAFF : Yu-Ci Liu, Chang-Han Xie, Siang-Yu Xie, Wun-Yu Su, Sin Guo ADDRESS : 70 Lienhai Rd., Kaohsiung 80424, Taiwan, R.O.C. PHONE : (07) 5252000 ext.5069			
KEY WORDS : Green energy resources, Wave energy, Energy capture			
<p>ABSTRACT:</p> <p>The aim of this research is to establish a real “green port” that may contain recycled green energy system in the harbor. It means to reduce the emissions of dioxides and transmission loss of the energy. As we all know that the usage of energy in the harbor is 24 hours a day and 365 days a year due to the safety and operation requirements. If we can use the green energy as a complementary supply then the reduction in the emissions of dioxide may be achievable. Types of green energy are abundant, which include solar energy, wind energy, ocean energy and other many kinds of developments in the recycled methodology. For the application of green energy in the port, the first important factor considered is the safety of navigation of ships and then the operational function of the port. Therefore, choices for the application of green energy in the harbor might be limited. Since harbor is a place full of water, naturally, ocean energy is the first priority in the application. There are many types of methods to convert the ocean energy into useful powers such as the wave power converter, tide power converter, usage in the gradient of water temperature in deep sea and many others. Wave power converter will be the first considered and studied in this research.</p>			
DATE OF PUBLICATION March 2017	NUMBER OF PAGES 484	PRICE 450	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄	III
圖目錄	IX
表目錄	XXI
第一章 計畫背景說明分析	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 研究與當前國家施政之關聯性	1-2
1.3 研究目的及其重要性	1-3
1.4 研究內容及工作項目	1-6
1.4.1 擷取系統與港灣構造物結合可行性(法規面之探討). 1-6	
1.4.2 評估轉換系統與港灣構造物結合之影響.....	1-7
1.4.3 效能改進之實體模型之設計分析	1-9
1.5 研究方法及研究架構	1-10
第二章 綠色能源應用於港灣結構物之分析	2-1
2.1 臺灣四大港口基本簡介及波浪資料	2-1
2.1.1 基隆港基本簡介及波浪資料	2-1
2.1.2 臺中港基本簡介及波浪資料	2-3
2.1.3 花蓮港基本簡介及波浪資料	2-4
2.1.4 高雄港基本簡介及波浪資料	2-5

2.1.5 臺灣四大港口可重現波高迴歸期推估	2-7
2.2 太陽能之發展與案例分析	2-8
2.2.1 太陽能之發展	2-8
2.2.2 太陽能應用於港灣之案例分析	2-9
2.3 風能之發展與案例分析	2-11
2.3.1 風能之發展	2-11
2.3.2 臺灣四大港口風力發電比較	2-14
2.3.3 離岸風電發展現況	2-14
2.4 海洋能之發展與應用現況	2-16
2.4.1 海洋能源種類	2-16
2.4.2 波浪發電之原理及種類	2-18
2.5 波浪發電之應用	2-21
2.5.1 國際上波浪發電發展簡介	2-21
2.5.2 波浪能發電目前實際安裝運轉案例	2-25
第三章 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明	3-1
3.1 沉箱與氣流公式推導	3-1
3.1.1 理論發展簡介	3-1
3.1.2 氣室內空氣動力學	3-2
3.1.3 波浪與氣室內之空氣反應	3-6
3.1.4 空氣能量	3-7
3.1.5 波能效率	3-10
3.2 不規則波浪能WI公式推導	3-10
3.3 紊流流體力學理論	3-11

第四章 防波堤之計規範與波能擷取系統相合性探討	4-1
4.1 防波堤設計基準說明	4-1
4.1.1 防波堤規劃之基本原則	4-1
4.1.2 防波堤之佈置	4-2
4.2 防波堤設計之基本原則	4-5
4.2.1 設計條件	4-6
4.2.2 設計時波浪之決定法	4-7
4.2.3 決定設計深海波之基本原則	4-8
4.2.4 求設計波浪各要素之程序	4-9
4.2.5 碎波	4-10
4.2.6 設計波高及波長	4-12
4.2.7 水深及地盤條件	4-16
4.2.8 斷面型式	4-19
4.3 直立式防波堤設計基準說明	4-24
4.3.1 基本斷面之假定	4-24
4.3.2 外力計算	4-25
4.3.3 安定計算	4-32
4.4 波能擷取系統與防波堤共構之考慮要點	4-33
4.4.1 浪條件之考慮	4-34
4.4.2 外力條件	4-34
4.4.3 結合波能轉換系統防波堤安定性檢核	4-34
4.5 波能擷取系統與防波堤共構之設計流程	4-40
4.6 較佳化設計參考	4-41

4.6.1 定案佈置	4-41
4.6.2 決定設計條件	4-41
4.6.3 波能轉換系統需求條件	4-41
4.6.4 波能轉換系統波浪外力之決定	4-41
4.6.5 波能轉換系統功能性分析	4-43
4.6.6 形式大小數量之決定	4-43
4.6.7 假定斷面與外力計算	4-44
4.6.8 細部設計	4-44
第五章 氣流發電系統理論及設計	5-1
5.1 渦輪簡介與選用	5-1
5.2 威爾斯渦輪模型設計	5-6
5.2.1 NACA 0021 文獻數據	5-6
5.2.2 NACA0021 葉片數剖面值模擬	5-9
5.2.3 渦輪設計	5-12
5.3 出風口與氣流導流設計	5-14
5.4 直流發電系統	5-21
5.4.1 直流電的優點主要在輸電方面	5-21
第六章 實體模型設計及水工試驗規畫	6-1
6.1 模型相似理論及縮尺	6-1
6.2 實驗模型製作	6-2
6.4 實驗佈置	6-5
6.5 實驗波浪條件	6-5
6.6 實驗參數設定	6-6

6.7 實驗步驟	6-6
6.7.1 波高計量測	6-7
6.7.2 氣流速度量測	6-7
6.7.3 無負載之風扇轉速量測	6-7
6.7.4 有負載之風扇轉速與發電量量測	6-7
第七章 水工試驗結果討論與分析	7-1
7.1 水工模型於不同波浪條件下之試驗結果比較	7-1
7.1.1 波浪反射率結果比較	7-1
7.1.2 氣流速度結果比較	7-6
7.1.3 內部波高結果比較	7-12
7.1.4 能量擷取率結果比較	7-17
7.2 發電系統設計與試驗結果討論	7-23
7.2.1 威爾斯渦輪設計	7-23
7.2.2 氣流速度測試與威爾斯渦輪轉速測試	7-27
7.2.3 發電機輸出電壓試驗設置	7-36
7.2.4 輸出電壓試驗結果	7-38
7.2.5 輸出電功率試驗結果	7-47
7.3 實驗成果比較	7-55
第八章 結論與建議	8-1
8.1 本階段研究結果	8-2
8.1.1 波浪能擷取系統與港灣構造物結合在法規面之探討	8-2
8.1.2 波能轉換系統結合港灣構造對安全性之影響	8-3
8.1.3 效能改進之實體模型試驗成果	8-4

8.2 整體計畫研究結果	8-5
8.3 波能轉換系統較佳化設計原則	8-6
8.4 建議	8-7
參考文獻.....	參-1
附件一 海堤相關規範	附 1-1
附件二 波高圖	附 2-1
附件三 風速圖	附 3-1
附件四 轉速圖	附 4-1
附件五 電壓圖	附 5-1
附件六 期中報告審查意見處理表	附 6-1
附件七 期末報告審查意見處理表	附 7-1
附件八 期中簡報	附 8-1
附件九 期末簡報	附 9-1

圖目錄

圖 1.1 我國永續能源政策綱領目標(資料來源 2013 年能源局).....	1-1
圖 1.2 全球能源需求非再生與可再生能源之比例.....	1-4
圖 1.3 計畫研究流程圖	1-11
圖 2.1 基隆港地圖	2-2
圖 2.2 基隆港歷年示性波高	2-2
圖 2.3 臺中港整體規劃圖	2-3
圖 2.4 臺中港歷年示性波高	2-4
圖 2.5 花蓮港區平面圖	2-5
圖 2.6 花蓮港歷年示性波高	2-5
圖 2.7 高雄港平面總圖	2-6
圖 2.8 高雄港歷年示性波高	2-7
圖 2.10 擺盪或推升水柱體 (OWC) 波能轉換系統.....	2-19
圖 2.11 連桿作動式(左)及溯升及越波流驅動式(右)波能轉換系統	2-20
圖 2.12 波能轉換系統之設計及建造施工情形	2-24
圖 2.13 波能轉換系統岸上設施建造施工情形	2-24
圖 2.14 LIMPET 500 的整體運作模式	2-25
圖 2.15 LIMPET 500 運作時現場波浪行為	2-26

圖 2.16 PICO OWC 系統正視圖	2-28
圖 2.17 PICO OWC 系統後視圖	2-28
圖 2.18 VIZINJAM OWC 沉箱前防波堤結構.....	2-30
圖 2.19 VIZINJAM OWC 沉箱後視圖.....	2-31
圖 2.20 VIZINJAM OWC 正在建設中.....	2-31
圖 2.21 VIZINJAM OWC 整體模型圖.....	2-32
圖 2.22 SAKATA OWC 的波能發電系統.....	2-34
圖 2.23 SAKATA OWC 的沉箱施工階段.....	2-35
圖 3.1 CBWPCS 系統及其相關參數圖	3-2
圖 3.2 一個循環週期之空氣能圖(AFTER TAKAASHI1895).....	3-8
圖 4.1 防波堤設計流程圖	4-5
圖 4.2 設計波之決定程序.....	4-7
圖 4.3 碎波帶內示性波高計算圖.....	4-13
圖 4.4 碎波帶內示性波高計算圖.....	4-14
圖 4.5 淺化係數計算圖	4-14
圖 4.6 碎波帶內示性波高最大值計算圖.....	4-15
圖 4.7 示性波高最大值出現水深計算圖.....	4-15
圖 4.8 規則波之碎波連界波最高計算圖.....	4-16
圖 4.9 各種不同型式之防波堤示意圖	4-23

圖 4.10 波壓分佈圖	4-28
圖 4.11 負波壓分佈	4-29
圖 4.12 有基腳時之揚壓力	4-30
圖 4.13 安定檢討時之波壓分佈	4-31
圖 4.14 波能截取合成防波堤系統尺寸圖	4-36
圖 4.15 波浪作用於波能擷取合成防波堤系統力量分佈圖	4-37
圖 4.16 外力作用於波能截取合成防波堤系統示意圖	4-37
圖 4.17 波能擷取系統與防波堤共構之設計流程圖	4-40
圖 4.18 細部設計流程圖	4-45
圖 5.1 空氣渦輪分類圖	5-1
圖 5.2 衝擊式與反動式渦輪比較(EMOSCOP, WIKIPEDIA).....	5-2
圖 5.3 威爾斯渦輪(WELLS TURBINE)立體構造示意圖	5-3
圖 5.4 威爾斯渦輪葉片剖面	5-3
圖 5.5 威爾斯渦輪葉片受氣流時情形	5-4
圖 5.6 酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021).....	5-5
圖 5.7 NACA 0021 翼型剖面	5-6
圖 5.8 不同雷諾數阻抗係數對應揚升係數	5-7
圖 5.9 不同雷諾數攻角對應揚升係數	5-7
圖 5.10 不同雷諾數攻角對應力矩係數	5-8

圖 5.11 不同雷諾數下阻抗係數對應攻角	5-8
圖 5.12 NACA0021 攻角 0 度流場分析.....	5-9
圖 5.13 NACA0021 攻角 10 度流場分析.....	5-10
圖 5.14 NACA0021 攻角負 10 度流場分析.....	5-10
圖 5.15 NACA0021 攻角 20 度流場分析.....	5-11
圖 5.16 NACA0021 攻角負 20 度流場分析.....	5-11
圖 5.17A 單斜翼威爾斯渦輪葉片	5-13
圖 5.17B 雙斜翼威爾斯渦輪葉片	5-13
圖 5.18 3D 列印威爾斯渦輪實體模型單斜翼與雙斜翼	5-14
圖 5.19 3D 列印威爾斯渦輪葉片實體模型 II.....	5-14
圖 5.20 各種管路入口之阻抗特性	5-15
圖 5.21 導流盤與其曲率剖面	5-16
圖 5.22 馬達基座	5-16
圖 5.23 馬達上基座與導流管及曲率其剖面	5-17
圖 5.24 導流系統安裝示意圖	5-17
圖 5.25 導流盤 3D 列印成品	5-18
圖 5.26 馬達安裝基座	5-18
圖 5.27 導流管.....	5-19
圖 5.28 導流系統與馬達安裝完成圖	5-19

圖 5.29 加工過後波能轉換系統之開口	5-20
圖 5.30 以黏土補平被挖開之區域.....	5-20
圖 5.31 安裝導流系統與發電	5-21
圖 6.1 水槽試驗模型示意圖	6-10
圖 6.2 實驗水槽示意圖	6-11
圖 6.3 造波水槽	6-11
圖 6.4 造波機.....	6-12
圖 6.5 波高計	6-12
圖 6.6 訊號增幅器	6-13
圖 6.7 AD/DA 內建 ANALOG INPUT 與 OUTPUT 介面.....	6-13
圖 6.8 訊號放大器	6-13
圖 6.9 氣流速度計(產品編號：AM.4214SD).....	6-14
圖 6.10 轉速計(產品代號：RM-1501).....	6-14
圖 6.11 威爾斯風扇.....	6-15
圖 6.12 直流馬達	6-15
圖 6.13 示波器	6-16
圖 6.14 風洞導流系統	6-16
圖 7.1 無斜板模型於各波浪條件下反射率與波浪週期關係圖	7-2
圖 7.2 開口率 35% 出風口於各條件下反射率與波浪週期關係圖	7-3

圖 7.3 開口率 100% 出風口於各條件下反射率與波浪週期關係圖 ...	7-3
圖 7.4 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=4)	7-4
圖 7.5 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=6)	7-4
圖 7.6 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=8)	7-5
圖 7.7 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)	7-5
圖 7.8 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)	7-6
圖 7.9 無斜板模型於各波浪條件下氣流速度與波浪週期關係圖	7-8
圖 7.10 前牆開口率 35% 於各條件下氣流速度與波浪週期關係	7-8
圖 7.11 前牆開口率 100% 於各條件下氣流速度與波浪週期關係圖 ..	7-9
圖 7.12 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=4)	7-9
圖 7.13 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=6)	7-10
圖 7.14 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=8)	7-10
圖 7.15 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)	7-11
圖 7.16 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=12)	7-11
圖 7.17 無斜板模型各波浪條件下波高與波浪週期關係圖	7-13
圖 7.18 前牆開口率 35% 與各條件下波高與波浪週期關係圖	7-14
圖 7.19 前牆開口率 100% 與各條件下波高與波浪週期關係圖	7-14
圖 7.20 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=4)	7-15
圖 7.21 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=6)	7-15

圖 7.22 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=8).....	7-16
圖 7.23 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=10).....	7-16
圖 7.24 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=12).....	7-17
圖 7.25 無斜板模型各波浪條件下能量擷取率與波浪週期關係.....	7-18
圖 7.26 前牆開口率 35%各條件下能量擷取率與波浪週期關係.....	7-19
圖 7.27 前牆開口率 100%各條件下能量擷取率與波浪週期關係...	7-19
圖 7.28 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=4) ...	7-20
圖 7.29 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=6) ...	7-20
圖 7.30 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=8) ...	7-21
圖 7.31 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=10) .	7-21
圖 7.32 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=12) .	7-22
圖 7.33 酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021).....	7-24
圖 7.34 NACA 0021 及 NACA 0024 翼型剖面比較	7-24
圖 7.35 本研究威爾斯渦輪模型單斜與雙斜設計圖	7-25
圖 7.36 3D 列印威爾斯單斜渦輪實體模型.....	7-26
圖 7.37 3D 列印威爾斯雙斜渦輪實體模型.....	7-26
圖 7.38 3D 列印威爾斯渦輪實體模型 III.....	7-27
圖 7.39 PROVA RM-1501 轉速計	7-27
圖 7.40 威爾斯渦輪於模型進行無負載轉速試驗 (無上導管)	7-28

圖 7.41 威爾斯渦輪於模型進行有負載轉速試驗 (無上導管)	7-28
圖 7.42 開口率 35% 渦輪轉速與波浪週期關係 (無負載).....	7-32
圖 7.43 開口率 35% 單斜渦輪轉速與波浪週期關係 (無負載).....	7-33
圖 7.44 開口率 35% 雙斜渦輪轉速與波浪週期關係 (無負載).....	7-33
圖 7.45 開口率 35% 渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達).....	7-34
圖 7.46 開口率 35% 單斜渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達)	7-34
圖 7.47 開口率 35% 雙斜渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達)	7-35
圖 7.48 開口率 100% 單斜渦輪轉速與波浪週期關係(負載馬達)....	7-35
圖 7.49 開口率 100% 雙斜渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達) ..	7-36
圖 7.50 型號：RF-2060(6V 60MA)太陽能板用直流馬達	7-36
圖 7.51 電壓測試模擬電路	7-37
圖 7.52 電壓訊號接收示波器	7-37
圖 7.53 示波器畫面擷取	7-38
圖 7.54 開口率 35% 單斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係.....	7-40
圖 7.55 開口率 35% 雙斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係.....	7-40
圖 7.56 開口率 100% 單斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係.....	7-41
圖 7.57 開口率 100% 雙斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係.....	7-41
圖 7.58 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=4) ...	7-42
圖 7.59 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=6) ...	7-42

- 圖 7.60 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=8) ... 7-43
- 圖 7.61 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=10) . 7-43
- 圖 7.62 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=12) . 7-44
- 圖 7.63 不同開口率之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=4) ... 7-44
- 圖 7.64 不同開口率之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=6) ... 7-45
- 圖 7.65 不同開口率之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=8) ... 7-45
- 圖 7.66 不同開口率之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=10) . 7-46
- 圖 7.67 不同開口率之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=12) . 7-46
- 圖 7.68 開口率 35% 出風口單斜渦輪電功率與波浪週期關係 7-48
- 圖 7.69 開口率 35% 出風口雙斜渦輪電功率與波浪週期關係 7-48
- 圖 7.70 開口率 100% 出風口單斜渦輪電功率與波浪週期關係 7-49
- 圖 7.71 開口率 100% 出風口雙斜渦輪電功率與波浪週期關係 7-49
- 圖 7.72 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=4) 7-50
- 圖 7.73 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=6) 7-50
- 圖 7.74 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=8) 7-51
- 圖 7.75 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=10) 7-51
- 圖 7.76 不同開口率單斜渦輪模型率與波浪週期比較(H=12) 7-52
- 圖 7.77 不同開口率雙斜渦輪模型與波浪週期比較(H=4) 7-52
- 圖 7.78 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=6) ... 7-53

圖 7.79 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=8)... 7-53

圖 7.80 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=10). 7-54

圖 7.81 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=12). 7-54

表目錄

表 1.1 2011 年臺電統計臺灣各種能源使用情形	1-5
表 2-3 歐洲離岸風能國家的市場發展概況.....	2-15
表 2-5 LIMPET500 設計參數.....	2-26
表 2-6 Pico 設計參數.....	2-29
表 2-7 Vizhinjam 設計參數	2-33
表 2-8 Sakata OWC 設計參數.....	2-35
表 4-1 船型噸位與臨界波高對應表	4-3
表 4-2 材料間靜摩擦係數	4-17
表 4-3 材料之單為體積重量	4-17
表 4-4 容許應力之提高係數.....	4-18
表 4-5 混凝土容許應力	4-18
表 5-1 酒田港發電裝置主要參數.....	5-5
表 6-1 實驗儀器與設備一覽.....	6-8
表 6-2 模型與實體縮尺	6-8
表 6-3 模型與實體縮尺	6-9
表 6-4 波高計規格表	6-9
表 7-1 無斜板模型於不同波浪條件下之反射率結果.....	7-1

表 7-2 出風口改良模開口率 35%於不同條件下之反射率結果	7-2
表 7-3 出風口改良模開口率 100%於不同條件下之反射率結果	7-2
表 7-4 無斜板模型於不同波浪條件下之氣流速度結果.....	7-7
表 7-5 開口率 35%風口改良於不同條件下之氣流速度結果	7-7
表 7-6 開口率 100%風口改良於不同條件下之氣流速度結果	7-7
表 7-7 無斜板模型於不同條件下之內部波高結果.....	7-12
表 7-8 開口率 35%風口改良於不同條件下之內部波高結果	7-12
表 7-9 開口率 100%風口改良於不同條件下之內部波高結果	7-13
表 7-10 無斜板模型於不同條件下之能量擷取率.....	7-17
表 7-11 開口率 35%出風口於不同條件下之能量擷取率.....	7-18
表 7-12 開口率 100%出風口於不同條件下之能量擷取率	7-18
表 7-13 酒田港發電裝置主要參數.....	7-23
表 7-14 NACA 0021 翼型輪廓點位.....	7-25
表 7-15 開口率 35%不同條件下渦輪轉速(無負載).....	7-29
表 7-16 開口率 35%不同條件下單斜渦輪轉速(無負載).....	7-30
表 7-17 開口率 100%不同條件下雙斜渦輪轉速(無負載).....	7-30
表 7-18 開口率 35%不同條件下渦輪轉速(負載馬達).....	7-30
表 7-19 開口率 35%不同條件下單斜渦輪轉速(負載馬達).....	7-31
表 7-20 開口率 100%不同條件下單斜渦輪轉速(負載馬達).....	7-31

表 7-21 開口率 35%不同條件下雙斜渦輪轉速(負載馬達).....	7-31
表 7-22 開口率 100%不同條件下雙斜渦輪轉速(負載馬達).....	7-32
表 7-23 開口率 35%單斜渦輪模型對應各條件下最大電壓	7-38
表 7-24 開口率 35%雙斜渦輪模型對應各條件下最大電壓	7-39
表 7-25 開口率 100%單斜渦輪模型對應各條件下最大電壓	7-39
表 7-26 開口率 100%雙斜渦輪模型對應各條件下最大電壓	7-39
表 7-27 開口率 35%單斜渦輪模型各條件下之電功率	7-47
表 7-28 開口率 35%雙斜渦輪模型各條件下之電功率	7-47
表 7-29 開口率 100%單斜渦輪模型各條件下之電功率	7-47
表 7-30 開口率 100%雙斜渦輪模型各條件下之電功率	7-48
表 7-31 花蓮港實驗成果比較	7-56
表 7-32 高雄港實驗成果比較	7-57
表 7-33 風扇之比較	7-58

第一章 計畫背景說明分析

1.1 計畫緣起

本研究之緣起為依據中華民國科學技術白皮書 (民國 99 年 12 月 16 日行政院第 3226 次會議核定)所揭示，政府的科技施政目標為在「2020 年我國成為綠能科技與智慧生活的全球創新領航者」。依據本施政目標中之四大目標包括如「學術卓越研究」、「產業技術創新」、「國民幸福安全」、「環境優質永續」等均將與綠能相關之科技創新及產業發展列為重要之目標，而在今年政府更替後，更以綠能發展為新政府最重要的施政目標，其中包括積極推動 2014 年中所揭櫫「確保核安、穩健減核、打造綠能低碳環境、逐步邁向非核家園」之能源發展願景，全力擴大各類再生能源推廣，包括推動「千架海陸風力機」與「陽光屋頂百萬座」計畫；倡導節能生活、推動節能示範等，圖 1.1 所示為我國永續能源政策綱領目標(資料來源 2013 年能源局)。

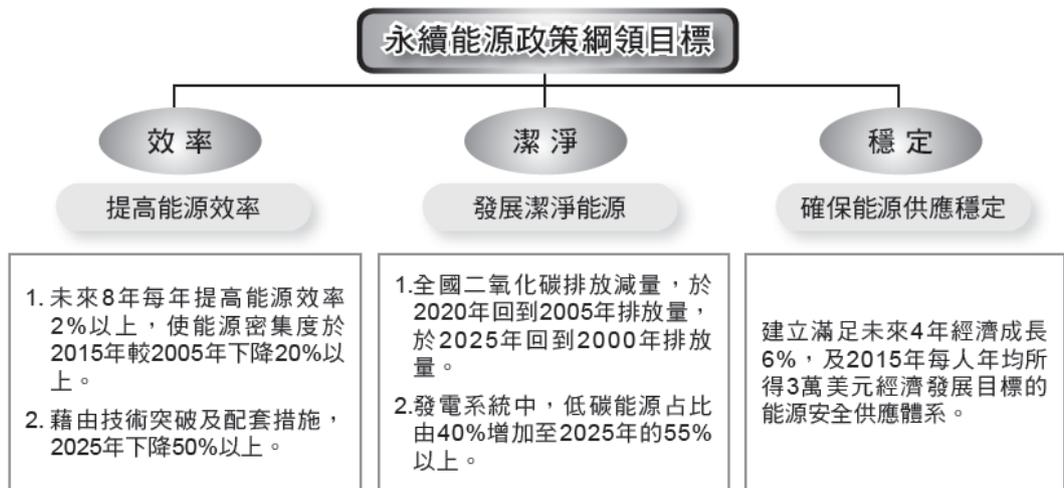


圖 1.1 我國永續能源政策綱領目標(資料來源 2013 年能源局)

綠色能源定義：綠色能源泛指能夠提供能源服務且對環境友善之能源技術，包括可再生能源及能源節約，希望藉由使用自然界循環滋生、源源不絕的能源 - 再生能源 (Renewable Energy)，創造一個生生

不息的地球。「綠色港灣」或「生態港灣」的定義在各國不一，較受人關注及引用的為 2005 年美國長堤港 (Port of Long Beach) 港務局所提出「綠色港灣」政策 (Green Port Policy)，這是一套全面性由政策落實到行動方案之機制，且具有積極、整合協調功能的方法，冀望藉此減低港埠運作時對環境所產生的負面影響 (The Port of Long Beach, n.d.)

我國在綠能產業的發展中，包括新興可再利用能源之開發、可再生能源之利用、節能材料之開發及使用、能源效率之提昇等均落後於歐美日等先進國家，因此，如何有效的將可再生能源應用於公共產業中，或發展出更有效的再生能源，應用於效率可提高的公共產業中，應是政府責無旁貸的責任。本研究以可再生之綠能系統應用於港灣結構系統中，一方面對於結構體可產生保護作用，另一方面將負面作用之能量轉換成可資利用之能源，可謂一舉兩得，並能有效的協助建構綠色港灣系統。

1.2 本研究與當前國家施政之關聯性

如前所述，海洋工程設施之投資一向非常龐大，如水深較深之防波堤每公尺造價達百萬元，堤外拋石及消波設施之費用亦所費不貲，但往往在颱風季節過去後又必須重新整修，政府投資在海岸保護的金額若減少了，不僅海岸被侵蝕、道路坍塌、民宅受損，甚至國土流失而不復再返。但同樣的工程、同樣高昂的造價、同樣在颱風來襲的時候不能完全確保其安全性，則有必要在工程設施、結構型式上做較前瞻性的研究，以探討利用非完全對抗性的結構型式，如以消能構件組成的構造替代或作為海洋及海岸設施的一部份，能有效的發揮其設計功能，並能在未來節省大量的公帑。

除了在經濟效益上可節省工程建設及維護費用。本研究屬於創新前瞻、技術開發之研究，藉由其研究成果不僅可促成學界合作研究，亦可作為政策施政之依據，以改善海洋環境品質，整體研究過程與成果不僅可培育相關人才，亦可增進公共服務設施之品質與效能，並提

供功能性較高之港灣結構物，讓臺灣進一步邁入更高品質公共建設的時代。

1.3 本研究目的及其重要性

本研究預期希望能達成的目標主要有三：

1. 有效建置以波浪能擷取為主之綠能系統

可再生之綠色能源包含甚廣，如風能、太陽能、海洋能、生質能等。若以港灣水域之特性為思考，風能及太陽能均需要較廣大之區域範圍，在應用上亦可能對於航行船隻進出港造成影響，如太陽能板之反光影響，風能裝置之風葉迴旋陰影及噪音影響等。因此初步將以海洋能為思考，尤其是對於港灣結構造成破壞之波浪能量為思考。如何將波浪能量加以有效利用，尤其是對主要結構物不造成額外負荷之情況下，將為此一波浪擷取系統在規劃及分析時之最重要課題；其次重要之課題則為將此波浪能量有效轉換為電能或其他可資利用之資源。因此，如何有效建置以波浪能擷取為主之綠能系統為本研究之第一目標。

2. 將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中：

工程構造物在設計時，除了考慮其用途及功能(objective and performance)的發揮之外，若為附屬於主結構之設施時，則同時也必須一併考慮其對主結構之影響。而港灣構造物主要包括各式碼頭構造以及防波堤構造，岸線上則有各種的倉儲系統。若要將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中，其可行之方式可能包括設置於防波堤結構或碼頭結構上。形式上則可分為以傳統或現有之結構設施作改善後，再與波浪能擷取系統相結合；另外則是重新規劃及設計新的、可結合波浪能擷取設施為一體的碼頭或防波堤系統，在新建或復建的結構中加以使用。此為本研究之第二目標。

3. 同時增進港灣構造物使用之安全及耐久性：

由於港灣構造物工程所處環境比一般陸地環境惡劣，除了水、濕氣的影響，還有各種的生物作用、化學作用，以及使用當中各種非預期中的受力行為，港灣構造物之耐久性及安全性經常受到嚴峻之考驗。由於本波浪能量擷取系統屬於被動之能量蒐集，其設計裝置於結構上之後，以能擷取最大之能量為目標，換言之，原作用於港灣構造之能量將被此一擷取系統所蒐集，致使作用於港灣構造之能量降低，港灣構造之位移、變形及受力等也將降低，港灣碼頭之安全性也因此而增加，從而延長了港灣構造物之使用年限。

根據國際能源署可再生能源工作小組，所謂綠色能源是指「從持續不斷地補充的自然過程中得到的能量來源」，舉凡如太陽能、風能、潮汐能、波浪能、地熱等，係大自然中取之不盡，用之不竭的能源，一般具有可回收或可再生的特性。但現今人類實際使用綠色能源的比例不高，根據統計，如圖 1.2 所示全球僅有 19% 的能源需求來自於可再生能源。

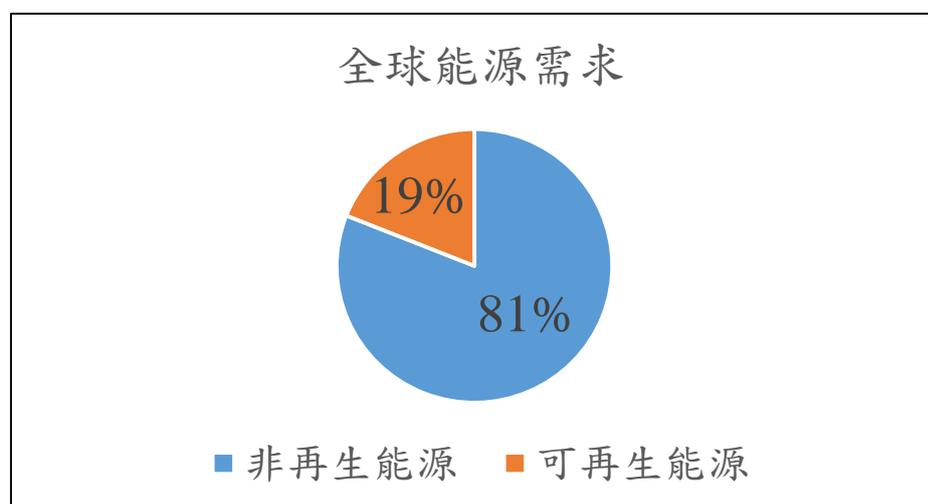


圖 1.2 全球能源需求非再生與可再生能源之比例

近年來，由於氣候變遷帶來的大自然警訊，讓各國政府紛紛開始思考節能減碳的重要性，有些國家轉而投資於核能發電希望達到減碳的效果，但此舉卻因 2011 年 3 月 11 日發生的日本福島

核災，讓許多國家原本信心十足的擴建核廠計畫再次受到質疑，因而使綠色能源受到各國學術、政府單位高度重視，使其具有更大的發展空間。

而隨著能源危機以及日漸高漲的油價，對氣候變化的憂慮，各國政府皆已紛紛表態支持綠色能源的發展，推動綠色能源的立法、激勵等，如果能多投入資源發展綠色能源，未來甚至能與傳統發電技術的成本持平，綠色能源的發展勢在必行。表 1.1 為 2011 年臺電統計臺灣各種能源使用情形，可看出臺灣仰賴火力及核能發電之比重居高不下，再生能源之發展利用雖有施行但仍佔少數，僅全部的 2.6% 左右。

表 1.1 2011 年臺電統計臺灣各種能源使用情形

類別 Item			發購電量 (百萬度) Energy Produced and Purchased (GWh)	構成比 (%)	年成長率 Growth Rate (%)
抽蓄水力 P.S. Hydro			2,889	1.4	-5.2
火力 Thermal	台電自有 Taipower		115,272	54.1	4.1
	民營電廠 IPP		39,558	18.6	1.8
	汽電共生 Cogen.		9,255	4.3	-2.6
	小 計 Subtotal		164,085	77.0	3.1
核 能 Nuclear			40,522	19.0	1.2
再生能源 Renewable Energy	慣常水力 Conv. Hydro	台電自有 Taipower	3,095	1.5	-9.9
		民營電廠 IPP	113	0.1	-2.3
		託營水力 Hydro Entrusted to Taipower	768	0.4	23.8
	風力 Wind Power	台電自有 Taipower	803	0.4	55.9
		民營電廠 IPP	730	0.3	44.0
	太陽能 Solar Energy	台電自有 Taipower	9	0.0	123.7
		民營電廠 IPP	29	0.0	1,133.5
	小 計 Subtotal		5,546	2.6	6.7
全系統合計 Total Energy Produced and Purchased			213,042	100.0	2.7

(資料來源：臺灣電力公司)

1.4 本研究研究內容及工作項目

而在本年度的研究中則更進一步，延續前階段之成果做更精進之發展，並朝向實用性設計，其具體工作項目依照以上內容，則分別敘述如下。

1.4.1 擷取系統與港灣構造物結合可行性(法規面之探討)

本工作項目中，將探討目前港灣構造物中，其在規劃設計時所使用之相關規範及設計準則，了解將波能轉換系統納入港灣構造物為一體設計時之可行性，或必須為單獨個體之結構物時，於設計準則及相關規範之適用情形。細部工作項目則包括有：現有港灣設計規範之了解、港灣設計規範與波能擷取系統之相合性及波能擷取系統融入港灣結構須滿足之規範探討。

1. 現有港灣設計規範之了解

臺灣現有港灣設計實務上，並無具約束力之具體規範，僅有由交通部所頒佈之參考規範。因此，工程實務上，各顧問公司或設計單位在進行港灣碼頭設計時，所參考之規範包括了臺灣、日本或者歐美各國之相關規範，其中又以日本的規範為大宗。臺灣的參考規範也因地緣、及同為海島地形，基本上參照日本的規範彙編而成。在參考時主要以與設置波能轉換系統相關之結構型式為主，如本研究中應用到之港灣構造為外廓防波堤，尤其為沉箱型式之防波堤構造，將為討論重點。

2. 港灣設計規範與波能擷取系統之相合性

本研究中研議之波能轉換系統，初始構想中即將其納入港灣構造物系統中，因此在設計及規劃時，必須能符合港灣設計之相關規範。在前期相關計畫中，雖未完全考慮港灣構造與波能轉換系統納入港灣構造為一體時，在規範使用上之相容性，但經初步的結構安全分析以及水工試驗之結果發現，波能轉換系統納入港灣構造物後，對於港灣構造物並不會造成安全上之顧慮。但港灣

設計時因考慮安全因素使用之設計波浪週期通常較長，而波能轉換系統為求轉換之效能，則以日常波浪做為設計基準，兩種型式的結構之間確實存在設計程序之問題。

3. 波能擷取系統融入港灣結構須滿足之規範探討

因此、如上所述，如何在港灣構造與波能轉換系統的設計中找到平衡點，或在安全性與應用性中，使得波能轉換系統在結構安全的條件下發揮應用時的最大效能。在設計時、包括環境條件、外力設定、材料之應用以及分析方法等，均須進一步檢視是否符合現行之港灣設計規範，讓波能擷取系統融入港灣結構之設計規範。

1.4.2 評估轉換系統與港灣構造結合之影響

於前階段計畫之相關研究中，因將波能轉換系統納入防波堤結構，曾針對防波堤之影響進行探討，其中包括功能性及結構本體安全性之評估。本階段中則進一步在水理理論及水工試驗中進行更深入之模擬，以了解在安全影響上的正面或負面情形。

港灣結構無論為防波堤結構或碼頭結構，本具有其設置之功能，若增加了附設之波能轉換系統，是否將增加原結構之負擔如受力增加、或結構功能減損等？如果發生以上對原結構之安全產生疑慮、或影響其原來使用之功能性時，則該附屬設施或構造之設計則有問題。根據前階段計畫研究之成果，顯示經過詳細之規劃及設計後，設置於防波堤上之波能轉換結構及設備，不至於對原結構造成影響。但本階段的研究中，將更積極探討，波能擷取系統對於原結構物在安全的促進上，具有更正面的幫助，重點包含：

- (1) 港灣結構結合波能轉換構造後之結構安全分析
- (2) 水工理論及試驗進行更深入之模擬。

1. 港灣結構結合波能轉換構造後之結構安全分析

根據前階段計畫研究之成果，顯示經過詳細之規劃及設計後，設置於防波堤上之波能轉換結構及設備，不至於對原結構造成影響。而本階段的研究中，則希望進一步了解，兩種型式的結構之間考慮設計條件之相容性後，於符合港灣設計規範的條件下，波能擷取統及轉換結構不僅不至於妨害原結構之安全及其使用功能，更希望進一步研究，波能擷取統對於原結構物在安全的促進上，具有更正面的幫助，而對於原結構功能性的改善上亦具有正面之助益。

2. 港灣結構結合波能轉換構造後水理影響更深入之模擬分析

在前階段的研究中，所建立之波浪能擷取系統為固定氣室使湧進波浪，氣室內波浪進入時之前後搖擺及上下起伏則造成空氣之震盪，再利用此震盪之氣流，經過整流及引導以推動氣旋式渦輪系統來發電。此波浪能擷取系統初步之規劃為，附設於港口外廓防波堤之外側，但在波浪引導或集中方式上並未做任何之設計。一般為了加強或集中波浪能量，在波浪入口處均有相關之設計，第二階段之研究中則將波浪之入口位置及大小等參數加以考慮，而整個波浪能擷取及波能轉換系統模型亦重新建立或修正，經水工模型試驗及數據分析後，建立了各種參數與效能間之影響關係。

當然最重要的課題為，經過前一階段之可行性評估研究後，如何搭配臺灣海洋環境及波浪特性，使得所設計之波浪能擷取及轉換系統，在保護港灣相關設施之前提下，提高其發電效能，且進一步在水理理論及水工試驗中進行更深入之模擬，以了解在安全影響上的正面或負面情形。必要時，模型亦須重新建立並進行分析。

1.4.3 效能改進之實體模型之設計分析

前階段工作中，進行了縮尺實體模型之設計及水工試驗，但設計重點偏重於縮尺試驗之進行，必須以水槽大小及試驗設備為主要考量。本階段中將以港灣實體構造為重點進行設計，包括構造型式、使用材料、受力分析等，使期能符合現行之港灣設計規範，以便未來實際應用時可資參考。

目前實例設計及分析之案例，基於能較完整取得堤防設計資料及現地踏勘之方便性，在前階段的計畫中以設置於高雄港北堤之相關案例進行了分析。而高雄港附近海域除了潮差小，波能蘊含量相對於臺前他各大港區也較低，是否最適合在未來作為波能轉換系統設置之區位，仍值得深入探討。因此，在上年度的研究中，將臺灣其他港口波能蘊藏豐富地區如花蓮港，依據當地地形、波浪等條件，進行了進一步之實例設計分析工作。而該研究之結果並與高雄港之研究案例做比較，顯示出波能較大的地點，故能獲取較大之能量，但轉換效率並無太大差異，波能蘊藏量較小的地點，亦可將波能順利轉換為電能。

以上實例設計時，固然已決定波能轉換系統的型式、大小及裝設位置，但在材料上均假定為剛體材料，只有初期在進行結構分析時，曾以鋼筋混凝土設計評估，為所依據之規範為一般建築物規範。本階段研究中將更進一步改善波能擷取系統之效能，重新在材料使用、扇葉型式、數量及進出風口系統上做更詳細之研擬。

目前大部分的港灣結構均以混凝土或鋼筋混凝土構造為主，雖有鋼構造、但也以水下之鋼板樁或鋼管樁等基礎設施較多。因此本研究中所規劃之波能擷取及轉換設施，也將以鋼筋混凝土為主要應用材料，主要考慮材料之使用量較大且與主結構之材料具一致性時，材料之結合及結構於受力時其反應也具一致性，將具有較佳之安全性。因此，將配合鋼筋混凝土之設計方法及理論分

析，以及現行港灣設計規範，以確實提高波能擷取及轉換構造之安全性。對於各港在波能轉換系統之設置考量上，可提供較佳之決策參考依據。

1.5 本研究之研究方法及研究架構

本研究在前階段研究中以回顧並參考國內外之波浪能、風能、太陽能等綠色能源利用的相關文獻，探究各種能源之效率評估及應用於臺灣海岸結構物的可行性，而後確立本研究之研究方向及主要架構，分工進行文獻整理、模型建立、初步模型靜力及動力分析等工作。

在本階段研究中，將以已確立之分析方法及初步建立之模型，進行各種參數之探討，其中包括模型本身以及與波浪條件相關之各種參數。其進行方式除了延續既有之數值分析探討之外，並將建立實體縮尺模型，進行水槽試驗，以驗證分析結果之外，同時觀察理想化數值模擬之差異。其研究架構之流程如圖 1.3 所示。

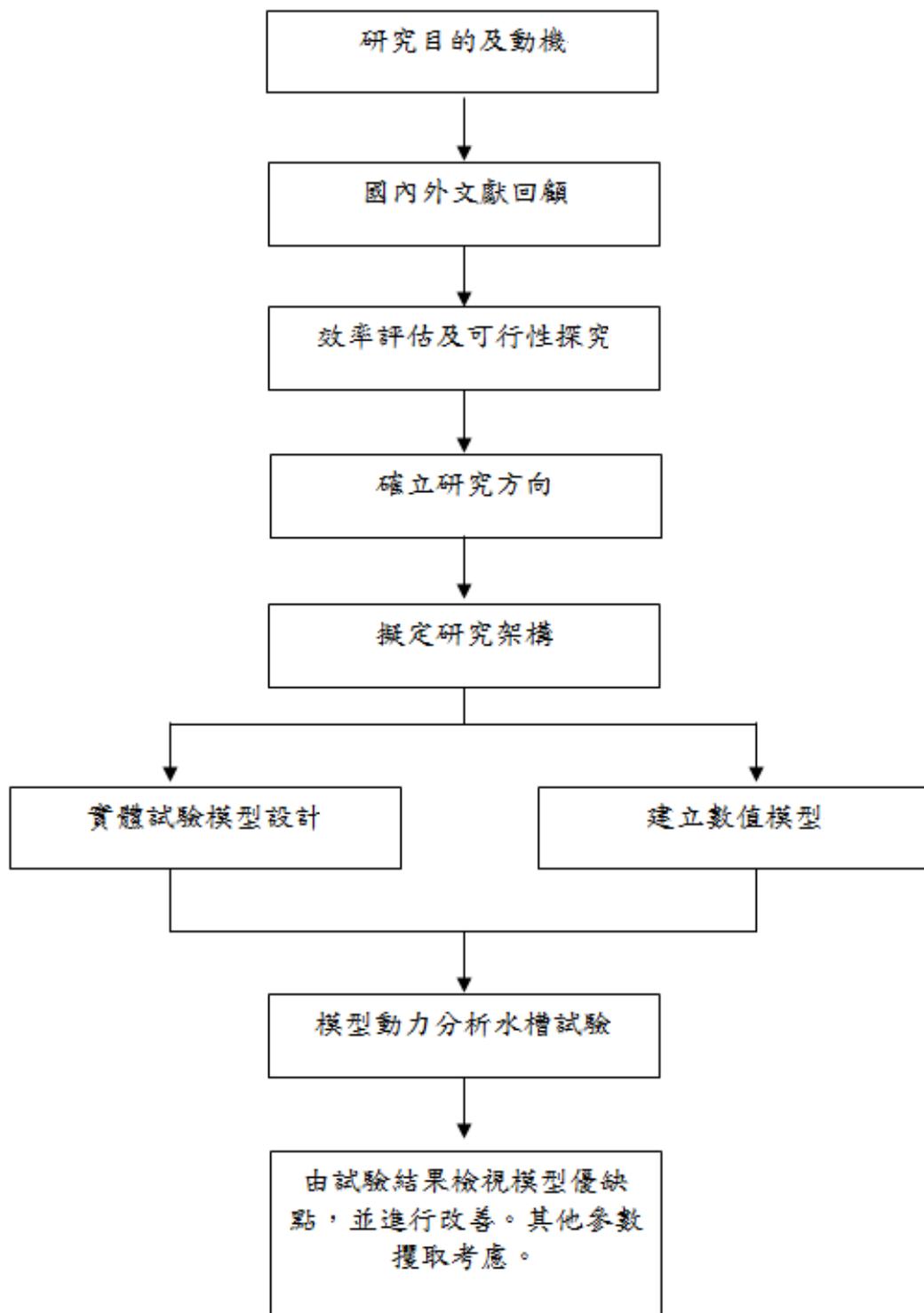


圖 1.3 計畫研究流程

第二章 綠色能源應用於港灣結構物之分析

綠色能源涵蓋之範圍甚廣，一般來說分為三個方向：1.再生能源（如太陽能、風能、波浪能、地熱、潮汐等）、2.回收能源（如廢熱、廢棄物能）3.新的能源利用技術（汽電共生、煤炭氣化複循環發電等），簡單說綠色能源需具備可恢復、可補充以及污染低的特性，而更廣義的說，綠色能源於生產或使用中能降低對於環境的影響。

而綠色能源之重要性如前述，由於人類開始意識到不可再生能源將於近代內消耗殆盡，且近年來由於工業、運輸、商業及家庭等因素大量燃燒石油及天然氣，產生過多的二氧化碳及廢熱，地球暖化的問題日益嚴重，大自然的各種災害亦接踵而至，在本世紀能源危機及溫室效應的影響下，人類舊的能源利用方式必須做出改變，因此，開發綠色能源的技術及決心勢必為近年來最重要的議題。

有關各種型式之綠色能源理論，一般較為普遍為大眾所熟知且已廣泛被利用者除了水力之外，主要為太陽能及風能；而波浪能，潮汐能及海流能等則尚屬發展階段，目前潮差利用較為著名者為韓國，將整個 Keonggi 灣圍起來，因其潮差可達 9m，發電量高達 254MW，而其他大規模利用之例子則不多。

2.1 臺灣四大港口基本簡介及波浪資料

2.1.1 基隆港基本簡介及波浪資料

基隆港是一座位於臺灣基隆市的海港，為臺灣地區四座國際商港之一，也是臺北的外港，與臺灣北部首要的海運樞紐。其管理及營運單位為臺灣港務公司基隆港務分公司。整個港區緊臨基隆市中心，運輸方面以貨櫃為主、散貨為輔，並有數條國內外客輪航線固定彎靠。至 2010 年止，基隆港為世界第 54 大貨櫃港，如圖 2.1(資料來源：Wikipedia)。

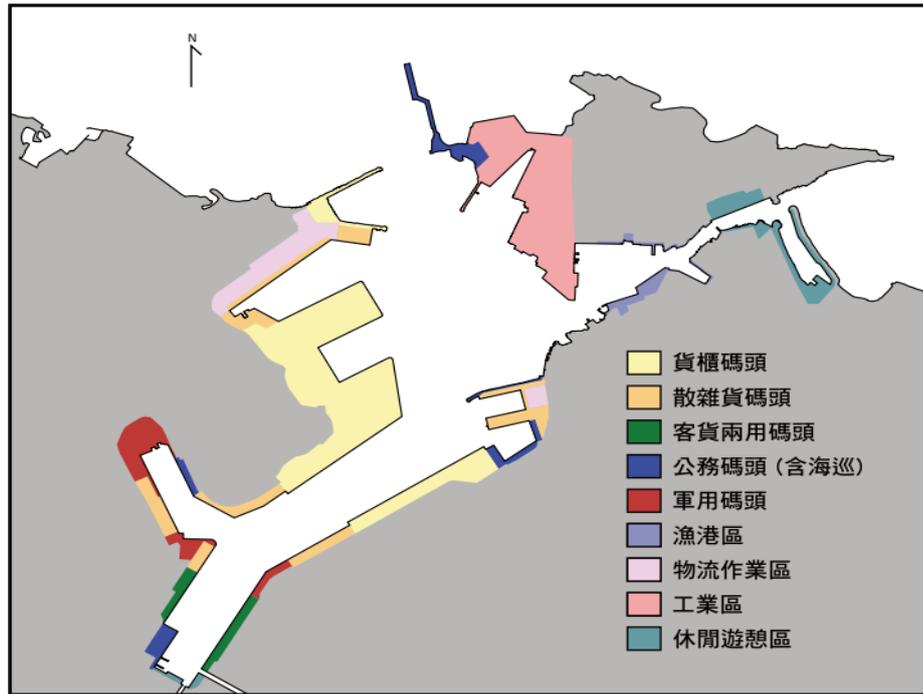


圖 2.1 基隆港地圖

下圖 2.2 為基隆港 2001-2012 年的波浪資料的統計（資料來源：交通部運輸研究所港灣技術研究中心），由此圖可了解基隆港的波浪行為，可用來作為港口結構物設計時的參考資料。

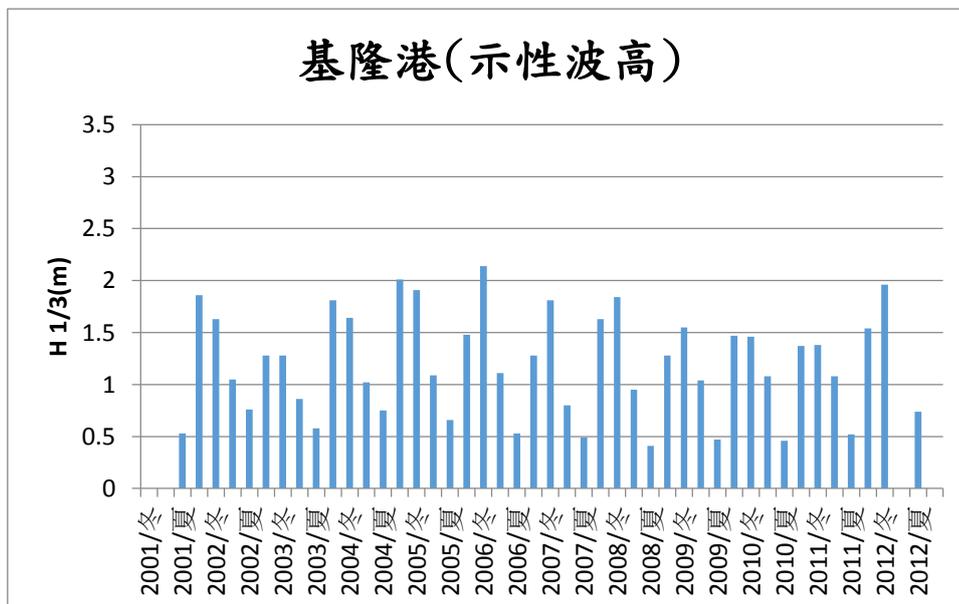


圖 2.2 基隆港歷年示性波高

2.1.2 臺中港基本簡介及波浪資料

臺中港是位於臺灣臺中市的一個國際商港，距離北部基隆港和南部高雄港各約 110 海浬。港區總面積為 3,793 公頃，水域面積 973 公頃，陸地面積 2,820 公頃；港區全境橫跨龍井區、梧棲區、清水區，港內大部分設施皆位於梧棲，管理單位為臺灣港務公司臺中港務分公司。日治時期曾有新高港的建港計畫，因二戰爆發而停頓，至 1970 年代才正式建港。目前因吞吐量大幅成長為臺灣第二大港，也是中臺灣的航運門戶。圖 2.3 為臺中港整體規劃圖(資料來源：臺中港務局)。

下圖 2.4 為臺中港 2001-2012 年的波浪資料的統計(資料來源：交通部運輸研究所港灣技術研究中心)，由此表可了解臺中港的波浪行為，可用來作為港口結構物設計時的參考資料。

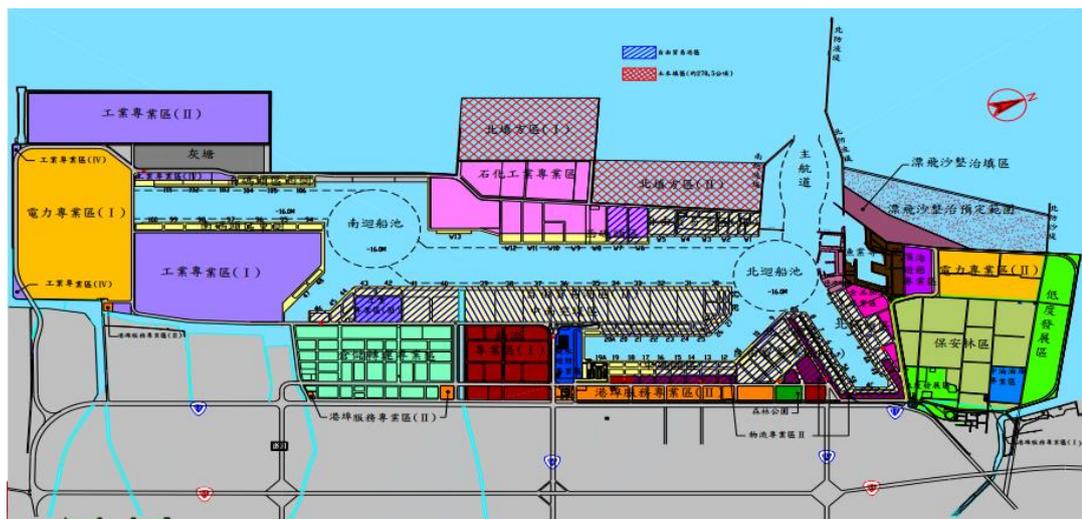


圖 2.3 臺中港整體規劃圖

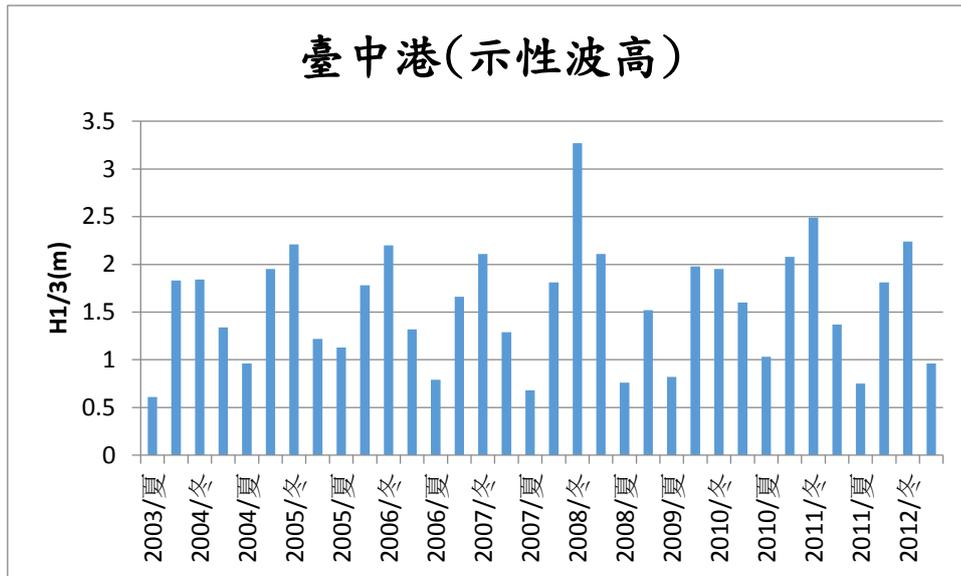


圖 2.4 臺中港歷年示性波高

2.1.3 花蓮港基本簡介及波浪資料

花蓮港，位於臺灣花蓮縣花蓮市，為臺灣的國際商港之一。東臨太平洋，西倚中央山脈，是一個由東、西防波堤合攏而成的人工港。昭和 14 年(1939 年)興建完成，民國 52 年 9 月 1 日(1963 年)開放為國際商港，成立花蓮港務局。現有碼頭 25 座，年裝卸量可達 3,400 萬噸，另有倉庫六棟十五間、堆貨場三十八處、臨時貨櫃集散站一座、港勤拖船四艘、及交通艇一艘，港埠設施極為完備，足以擔負東部地區產業發展及港埠輸運功能。該港貨源主要以區域特性之大宗貨物為主，如砂石、水泥及其熟料等。自 2012 年 3 月起由臺灣港務公司花蓮港務分公司管理。圖 2.5 為花蓮港區平面圖（資料來源：交通部運輸研究所港灣技術研究中心）。

下圖 2.6 為花蓮港 2001-2012 年的波浪資料的統計(資料來源：交通部運輸研究所港灣技術研究中心)，由此表可了解花蓮港的波浪行為，可用來作為港口結構物設計時的參考資料。



圖 2.5 花蓮港區平面圖

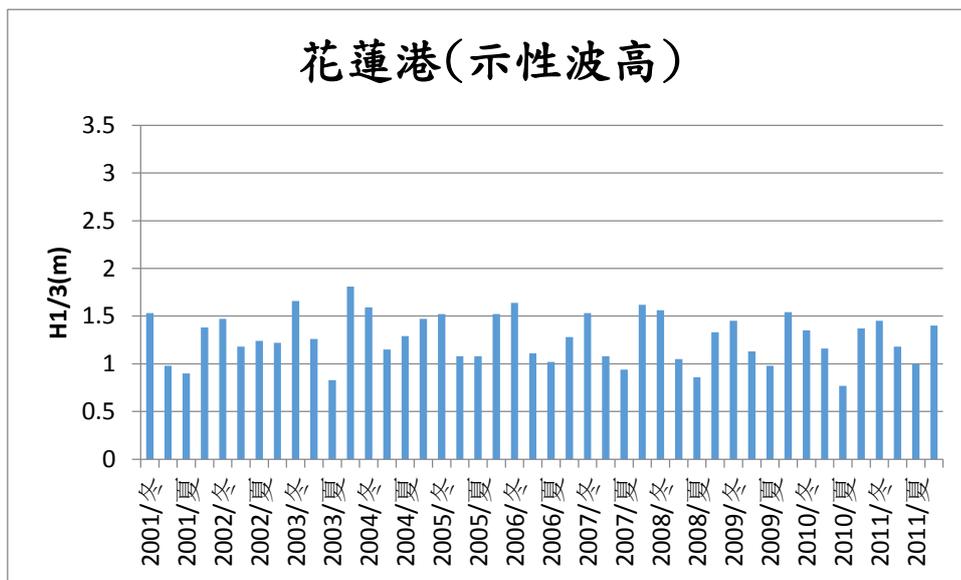


圖 2.6 花蓮港歷年示性波高

2.1.4 高雄港基本簡介及波浪資料

高雄港是一座位於臺灣高雄市的海港，為臺灣四座主要國際港之一，而且是臺灣首要的海運樞紐、與貨運進出口門戶，港口

貨物吞吐量，約佔臺灣整體港口貨物吞吐量三分之二。其毗鄰高雄市中心，港區範圍橫跨高雄市 6 個行政區，是臺灣第一大港、世界第十二大港口。高雄港的管理及營運由中華民國國營之臺灣港務公司高雄港務分公司負責，而非隸屬於高雄市政府。在 1980 年代時已經有「港市合一」的構想，由高雄市統籌管理高雄港。圖 2.7 為高雄港區平面圖

本港共有兩個港口，第一港口位於東經 $120^{\circ}15'25''$ ，北緯 $22^{\circ}37'01''$ ；第二港口位於東經 $120^{\circ}18'26''$ ，北緯 $22^{\circ}33'21''$ 。



圖 2.7 高雄港平面總圖

圖 2.8 為高雄港 2001-2012 年的波浪資料的統計，由此表可了解高雄港的波浪行為，可用來作為港口結構物設計時的參考資料。

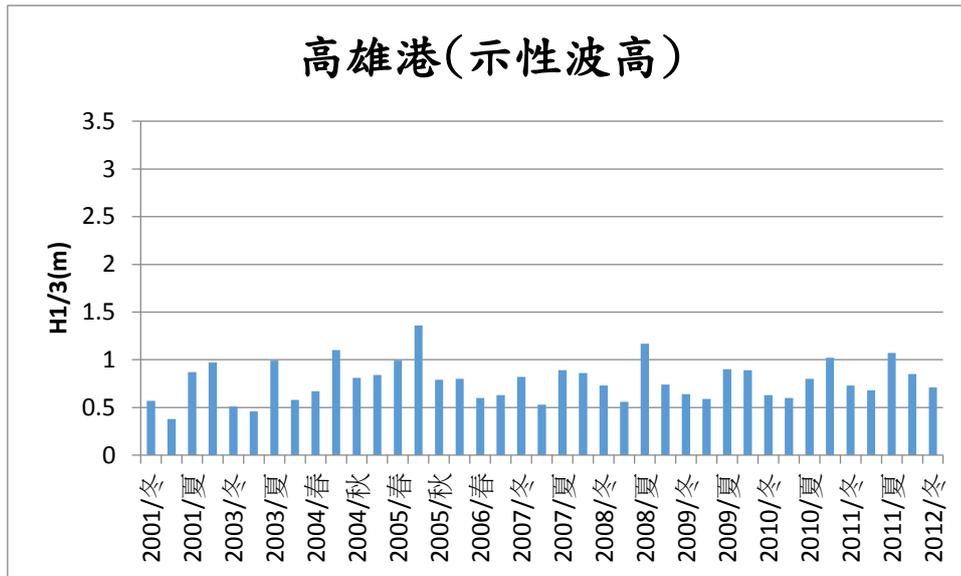


圖 2.8 高雄港歷年示性波高

2.1.5 臺灣四大港口可重現波高迴歸期推估

設計港灣或海岸結構物前，都會先決定設計波浪。設計波浪須由長期實測波浪資料或推算波浪資料來決定，對 50 年使用年限的港灣結構物的設計條件，需要利用相當長的波浪實測資料方能分析，但實際上可能常因現有紀錄的時間長度不足，無法達成。此時，需要藉由統計方法，利用有限長度的資料，去推估重現期之波浪特性，此分析技巧稱為「極值統計」。

因為臺灣颱風波浪資料常因颱風大波之因素而遺失或不完整，現多用波場模式來推算波高方法，而推算波浪資料之品質也會影響極值統計之推估，所以設計波浪決定會受模式推算波高精度影響。

1. 以半經驗推算波浪模式推算颱風波浪及探討其樣本之極值統計特性
2. 以類神經模式計算颱風波浪及探討其樣本之極值統計特性

3. 探討不同取樣樣本極值函數對統計特性之比較

(1) 極值分布函數

- a. 根據 CEM (coastal engineering manual, 2002)及往昔文獻建議長期波浪極值之適合機率分布函數為
- b. 極值 I 型分布(FT- I 型分布，又稱 Gumbel 分布)
- c. 通用極值分佈(generalized extreme value, GEV)
- d. Weibull 分佈
- e. 對數常態分佈 (lognormal distribution)

(2) 極值分布參數推定

- a. 力矩法 (method of moment, MOM)
- b. 最小二乘法 (least squared method, LSM)
- c. 最大概似法(maximum likelihood method, MLE)
- d. 加權機率法(probability weighted moment, PWM)

而本節中針對各大港口所蒐集之數據，其目的為做為波能轉換系統附設於防波堤或其他港灣構造物上時，設計之依據。其設計條件或分析評估之環境條件將區分為兩部分：一為以發電功能為主之分析評估，其所應用之條件為常時波浪條件；二為以結構安全考量為主之設計條件，即為一般海岸構造物設計所依循之 50 年迴歸期之波浪條件。依此方能計算出波能轉換系統，附設於防波堤或其他港灣構造物上時，其功能性及安全性。

2.2 太陽能之發展與案例分析

2.2.1 太陽能之發展

太陽能與煤、石油或核能相比是極具潛力的乾淨能源，它擁有幾樣特點：一是不會產生有害廢渣及氣體，對於環境沒有汙染，二是沒有地區性或是資源的限制，只要是日照充足的地方即可以使用，三是能源屬可再生能源，使用方便無危險性。

太陽能能量的轉換方式主要分為光化學轉化、太陽能光熱轉化和太陽能光電轉換三種方式。從廣義上講，風能、水能和礦物燃料等也都來源於太陽能。光化學轉換是指在太陽光的照射下，物質發生化學、生物反應，從而將太陽能轉化成電能等形式的能量。最常見的是植物的光合作用，在植物葉綠素的作用下，二氧化碳和水在光照下發生反應，生成碳水化合物和氧氣，從而完成太陽能的轉換。太陽能光熱轉化是指通過反射、吸收等方式蒐集太陽輻射能，使之轉化成熱能，如在生活中廣泛應用的太陽能熱水器、太陽能供暖房、太陽能灶、太陽能乾燥器、太陽能溫室、太陽能蒸發器、太陽能水泵和太陽能熱機等。太陽能光電轉換則是指利用光電轉換元件將太陽能轉化成電能。最常見的是太陽能電池，應用於如燈塔、微波站、鐵路信號、電視信號轉播、管路保護等野外工作臺站的供電，海島、山區、草原、雪山和沙漠等邊遠地區的生活用電及手錶、計算器、太陽能汽車和衛星等儀器設備的電源，以及太陽能發電站並聯網發電等領域。

2.2.2 太陽能應用於港灣之案例分析

於前階段的研究報告中，根據目標港口（基隆港、臺中港、高雄港及花蓮港）之日照時間、港區面積等資料，估算太陽能發電系統應用之發電量及預期成本，其結果如下：

1. 基隆港

可裝設之屋頂面積為 19 萬平方公尺，每 10 平方公尺的太陽能電池功率為 1kWp，故基隆港的設置容量大約為 19000 kWp，將值輸入經過概算，可得年發電量約為 1553 萬度，乘上折減係數 0.7 後，約為 1087 萬度；而裝設成本粗估約為 $19,000 \text{ kWp} \times 8 \text{ 萬元/kWp} = 15.2 \text{ 億元}$ 。

2. 臺中港

可裝設之屋頂面積為 76 萬平方公尺，根據設置條件第一點，每 10 平方公尺的太陽能電池功率為 1kWp，故臺中港的設置容量大約為 76000 kWp，將值輸入經過概算，可得年發電量約為 9098 萬度，乘以折減係數 0.7 後，約為 6369 萬度。而裝設成本粗估約為 $76000 \text{ kWp} \times 8 \text{ 萬元/kWp} = 60.8 \text{ 億元}$ 。

3. 高雄港

可裝設之屋頂面積為 96 萬平方公尺，根據設置條件第一點，每 10 平方公尺的太陽能電池功率為 1kWp，故高雄港的設置容量大約為 96000 kWp，將值輸入經過概算，可得年發電量約為 11843 萬度，乘以折減係數 0.7 後，約為 8290 萬度；而裝設成本粗估約為 $96,000 \text{ kWp} \times 8 \text{ 萬元/kWp} = 76.8 \text{ 億}$ 。

4. 花蓮港

可裝設之屋頂面積為 8.1 萬平方公尺，根據設置條件第一點，每 10 平方公尺的太陽能電池功率為 1kWp，故花蓮港的設置容量大約為 8100 kWp，將值輸入經過概算，可得年發電量約為 798 萬度，乘以折減係數 0.7 後，約為 559 萬度；而裝設成本粗估約為 $8100 \text{ kWp} \times 8 \text{ 萬元/kWp} = 6.4 \text{ 億元}$ 。

將各港資料整理後，並計算出各港之太陽能板發十萬度電的裝設成本，如表 2.6 所示，年平均日照時間越長的地區，裝設太

太陽能板之成本越低，例如高雄港之每十萬度裝設成本即低於其他地區。

表 2-1 各港口太陽能發電功率與成本估算

港口位置 [□]	港區總面積(公頃) [□]	屋頂覆蓋面積(萬平方公尺) [□]	年平均日照時間(小時) [□]	發電量(萬度) [□]	成本(億元) [□]	成本(萬元)/每十萬度 [□]
基隆港 [□]	572 [□]	19 [□]	1388.8 [□]	1087 [□]	15.2億元 [□]	1398萬元 [□]
臺中港	3793 [□]	76 [□]	1914.1 [□]	6369 [□]	60.8億元 [□]	954.6萬元 [□]
高雄港 [□]	17678 [□]	96 [□]	2315.2 [□]	8290 [□]	76.8億元 [□]	926.4萬元 [□]
花蓮港 [□]	308 [□]	8.1 [□]	1597.7 [□]	559 [□]	6.4億元 [□]	1144.9萬元 [□]

2.3 風能之發展與案例分析

2.3.1 風能之發展

風能是因空氣流做功而提供給人類的一種可利用的能量。空氣流具有的動能稱風能。空氣流速越高則動能越大。人們可以用風車將風的動能轉化為機械能推動發電機，以產生電力，方法為透過傳動軸，將轉子（由空氣動力推動的扇葉組成）的旋轉動力傳送至發電機。到 2008 年為止，全世界以風力產生的電力約有 94.1 百萬千瓦，供應的電力已超過全世界用量的 1%。風能雖然對大多數國家而言還不是主要的能源，但在 1999 年到 2005 年之間已經成長了四倍以上。

風的能量主要由風力而來，風能可以通過風車來提取。當風吹動渦輪時，風力帶風車動繞軸旋轉，使得風能轉化為機械能。

而風能轉化量直接與空氣密度、渦輪掃過的面積和氣流速度的平方成正比。渦輪因需要提取能量而令風減速，這限制了渦輪的速度。1919年，德國物理學家阿爾伯特認為，不管如何設計渦輪，渦輪最多只能提取風中 59% 的能量。現今正在運作的渦輪所能達到的極限約為 30%，此推進器類型為 turbines。其實際效率範圍從 1% 到 20%，類型為渦輪機，像是一個三維垂直軸為 35% 的渦輪 Darrieus 或 Gorlov 渦輪。

風能的應用具有許多的優點，主要如風能的發展漸趨成熟，使成本降低，於各種再生能源中相當具經濟競爭力及發展潛力；風能設備多為立體化設施，對於環境之衝擊較小；風能之空氣污染及碳排放低；風力發電可以為分散式發電，沒有大型發電設施過於集中的風險問題。

但相對的，風力發電運作時可能干擾鳥類活動，且因風力之供應是間歇性的，所以風力發電可能在某些區域的運作效率不高，如臺灣於用電量較高的白天及夏季常面臨風力較短缺的問題。另外尚有需大量土地面積以及發電機組會發出噪音等問題，但都可藉由技術的發展來解決這些問題，如使用小型發電機組結合結構物設計的概念或低噪音機種的普及。

臺灣的風力發電雖然自民國 89 年就開始發展，但其成長速度極其緩慢，統計至民國 100 年底止，累計裝置容量至達 564MW，2010 年原居世界排名第 24 名，2011 年退步一名，現排名第 25 名（統計資料來源：Global Wind Energy Council）。表 2.7 為臺灣各風力發電場址發電機機型及發電量一覽。

表 2-2 臺灣各風力發電場址發電機機型及發電量一覽

風力發電場址	廠牌-機型	瓦數(kw)	數量
石門	Vestas-V47	660	6
香山	Gamesa-G80	2000	6
王功	Enercon-E70	2300	10
金門	Vestas-V47	660	6
林口	Vestas-V80	2000	3
中火	Zephyros-Z72	2000	3
雲麥	Vestas-V80	2000	23
澎湖	Enercon-E40	600	8
觀園	GE-1.5s	1500	20
臺中港	Zephyros-Z72	2000	18
四湖	Vestas-V80	2000	14
澎湖	Enercon-E44	900	6
大潭	GE-1.5s	1500	3
	Enercon-E70	2300	2
	Vestas-V80	2000	3
彰工	Vestas-V80	2000	31

(資料來源：臺灣電力公司網站)

2.3.2 臺灣四大港口風力發電比較

根據前階段之研究計畫書中，針對其港區面積以及設計兩種不同之風機安裝方式，並參考小型風機之運作效率，計算各港之風能潛力差別，依分析結果顯示，臺中港之港區條件最適合風能發電，高雄港則為四個案例港口中最不適宜風能發電的港口。基隆港與花蓮港之風能潛力差異不多，但其發電量估算仍不及臺中港的 20%。

2.3.3 離岸風電發展現況

國際間離岸風能的發展源自 1990 年瑞典建立第一個離岸風力發電應用試驗案例。截至 2011 年底，根據 EWEA 統計，全球離岸風力發電裝置容量累計已達 4,096MW，其中歐洲的離岸風力發電裝置容量為 3,813MW，而擁有 2,093.7MW 裝置容量的英國持續為全球離岸風力發電的領導者，緊追在後則是裝置容量達 857.3MW 的丹麥。2011 年共有 9 個離岸風場開始商轉，總增加的裝置容量為 2,910MW，德國佔有七座離岸風場提供 2,272MW 裝置容量，英國佔有兩座離岸風場提供 638MW 裝置容量。目前國際間離岸風電發展較集中於歐洲，幾個主要發展國家（丹麥、德國、英國）的市場發展概況、發展動力與激勵措施彙整於表 2.8，以茲比較。

表 2-3 歐洲離岸風能國家的市場發展概況

國家	市場發展概況	發展動力與激勵措施
丹麥	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1990 年進行離岸風電研發。 ➤ Horns Rev 及 Nysted 示範風場奠定產業領先地位。 ➤ 2002 年政府放緩再生能源發展速度撤銷 3 個示範項目 ➤ 2008 年丹麥政府與在野黨達成 Energy Policy Agreement，2012 年預計完成 Anholt 400MW 離岸風場興建，將成為丹麥最大離岸風電廠。 	<p>政府態度積極、本土風力機產業成熟、周邊產業支援性強、民眾大力支持、競爭性招標（含躉購電價及額外補貼費）。</p>
德國	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 北海屬寶貴野生動植物棲地，故須規劃在離岸深海區。 ➤ 雖有 2030 年達 25GW 離岸風場累計容量目標，目前僅 Alpha Ventus 深水風場(60MW)正式商轉。註：Emden (Enercon, 4.5MW)及 Rostock (Nordex, 2.5MW)兩個風場屬淺水試驗性質。 ➤ 目前 1.7GW 離岸風場獲得批准，但尚有 4.8GW 等待輸配電設備的審批。 	<p>政府態度積極、社會對風電大力支持、陸域風場飽和、躉購電價 0.13 歐元/度、2015 年投入運轉者另有 0.02 歐元/度獎助。</p>
英國	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2000 年興建第一個離岸風場 Blyth。 ➤ Round1~3 及共計 33GW 已公開招標完畢，2020 年可望全部完成商轉。2016 年預計進行 Round4 約 29GW 招標。 	<p>政府態度積極推出離岸風電產業策略、陸域風場潛力不大、市場一次性購買電價、可再生能源憑證、免收氣候變化稅、稅收分離。</p>

在國內離岸風力發電技術的研發上，由於過去的研發計畫多集中在陸上風場調查技術與風力機關鍵元件技術開發，在離岸風力發電系統技術與產業推動方面則尚待起步。能源局與工研院於 95 年在嘉義外傘頂外海示範場址，建立國內第一座離岸高 60m 的氣流速度觀測塔，以進行風場與海象調查。工研院能環所陸續完成「風力發電開發環境建構計畫」年度系列研究，已建立全國陸海域風能觀測技術以及前述氣流速度觀測塔的量測資料應用，

並建置風力發電開發資訊暨行政服務系統，且與英國 BMT 公司協力完成離岸風力發電系統的建置準則(Guideline)。工研院機械所則完成「MW 級風力機設備產業技術開發計畫」系列研究，針對陸上型 2MW 風力發電機組進行設計、研製與認證發展等工作，並於增速齒輪箱、葉片、控制系統與電力轉換器部分進行產業連結，亦提出我國風力機產業發展策略。工研院太電中心完成「再生能源設備產業推動計畫」系列研究，箇中的風力發電設備分項部分，已完成輪轂與轉軸鑄件開發、機座系統開發、塔架/法蘭/扣件系統開發、2MW 葉片開發。國家實驗研究院則完成「臺灣離岸風能發電研究計畫-可行性評估及研發規劃」，以中長期計畫目標，規劃建置「無人觀測平臺」、「離岸風機示範工程」及「離岸風能研究實驗場」，並建立抗颶耐震型離岸風機設置的關鍵技術。

2.4 海洋能之發展與應用現況

2.4.1 海洋能源種類

表 2.9 可看出各個不同海洋能源發電種類的優劣勢，簡易評論，海流發電及海洋溫差發電所耗費成本過大，不易付諸實行；潮汐發電對環境之影響較大，需詳細評估後才可推動；波浪發電的部分以臺灣東北角龍洞的波能最高達 11.56kW/m，其次較高者為澎湖、東吉島、國光平臺與成功測站，均達 9kW/m 以上。以目前波浪發電技術，若開發時主要以發電為唯一之功能時，通常波浪能量大於 10Kw/m 就具有開發價值。因此，東北角海域、鵝鑾鼻外海、花蓮外海、以及澎湖西北海域均具有波浪發電之潛能，但若發電為附加價值時，主結構體之經費大幅降低下，若能兼具保護結構體並強化其功能性時，則波浪能量之條件將大為降低，其值得開發之臨界點雖有賴於經濟性，但若附加之發電功能具優勢之間接價值，如強化原結構物之功能性、延長結構物壽命、具

環境保護價值(如減碳效益等)，則附加性質之波浪發電系統即具有相當之開發價值。

表 2-4 各種海洋能種類比較分析表

	優勢	劣勢
海流發電	黑潮流經臺灣週邊，海流速度及流量大，在蘇澳外海、花蓮外海、綠島及蘭嶼年平均流速在 1.2m/s 以上，具有 GW 級的潛力發電裝置容量。	<ol style="list-style-type: none"> 1.合適開發之場址水深均大於 100m，且離岸距離在 20 公里以上。 2.缺乏長期之觀測資料。 3.大水深之海流發電機架設方法尚未確定，造成建廠成本和經濟效益分析具不確定性。 4.國際上之研發已漸步入商品化階段，產業競爭力優於我國。 5.發電設備受到嚴峻海況之衝擊挑戰，其設備於不同場址之安全性仍具有不確定性。 6.東部地層有滑動的危險性。
潮汐發電	金門、馬祖潮差可達 5m，雖已接近經濟型理想發電潮差，但對環境之影響較大，應詳細評估後再推動。	<ol style="list-style-type: none"> 1.離島地區無天然峽灣可供建壩；臺灣本島的平均潮差小且海岸地形不適合開發。 2.我國整體可開發之潮汐潛能僅在 10MW 之規模，市場過小，不易吸引相關產業投入。 3.對生態環境之衝擊較劇烈，恐引起環保團體之抗爭。 4.臺灣尚無任何潮汐電廠建造經驗，難以與中、法、加等國相匹敵。
海洋溫差發電	<ol style="list-style-type: none"> 1.夏季發電量達峰值，符合我國用電型態。 2.具有 3.2GW 以上淨裝置發電容量，相關產值高達 192 億美元。 3.80%相關產業技術能量可於國內培植。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.大型化電廠建置成本高，資金不易聚集。 2.國際上尚無商業行電廠。 3.大管徑冷水管製作技術、鋪設、維修不易。 4.關鍵元件研發製作能力尚未建立，如：熱交換器。 5.國內尚無大型化 OTEC 之開發經驗與能力。 6.臺灣海域每年約有 3-5 次之颱風威脅。

<p>波浪發電</p>	<p>1.臺灣具先進造船技術有利於波浪發電裝置載臺的建造。 2.臺灣東北部有較大之波能，離岸地區可達10kW/m 以上。</p>	<p>1.國內進行海洋能源利用需面對嚴峻的颱風及地震等自然環境之考驗。 2.與國內海域其他使用者的利益衝突及相關環保議題的未定性。</p>
--------------------	--	---

以上所述各種海洋能源之應用中，於港灣構造結合應用時，以波浪能源之開發較為適合。因此針對不同型式波浪發電或波浪能源轉換系統之原理進一步加以闡述。

2.4.2 波浪發電之原理及種類

波浪發電是波浪能利用的主要方式，除此之外，波浪能還可以用於抽水、供熱、海水淡化以及製氫等。波浪能利用的關鍵是波浪能轉換裝置。通常波浪能要經過三級轉換：第一級為受波體，它將大海的波浪能吸收進來；第二級為中間轉換裝置，它優化第一級轉換，產生出足夠穩定的能量；第三級為發電裝置，與其它發電裝置類似。

1. 浮筒及浮塢式(the Hosepump)波能轉換系統：

該能量轉換系統之原理為利用浮筒，於波浪上下震盪作用時，驅動發電機制或轉輪以達到發電之效果。圖 2.9(左)中所示即為點震盪式之發電機制示意圖，圖中上方之浮筒隨著波浪之作用上下震盪時則帶動連桿，使下方之發電設備能夠動作而發電。

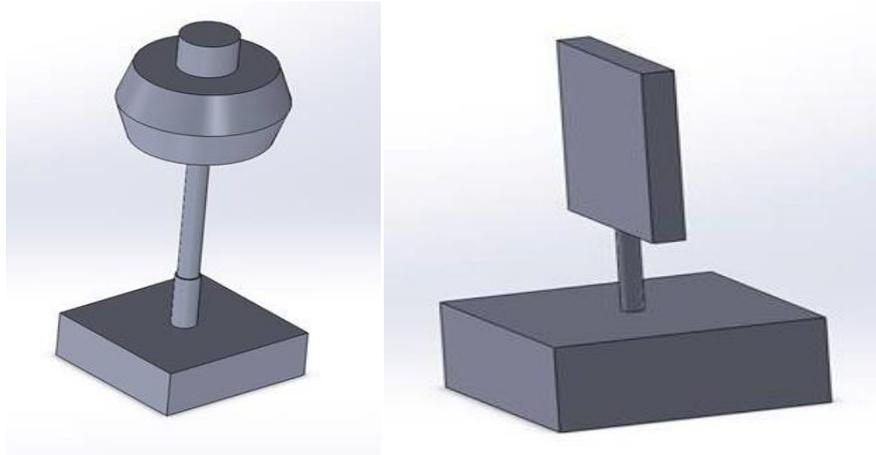


圖 2.9 浮筒及浮塢式(左)及搖擺浮板式(右)波能轉換系統

2. 搖擺浮板式(the oscillating surge converter)波能轉換系統：

該能量轉換系統之原理為利用浮板，於波浪前後推進作用時，驅動發電機制或轉輪以達到發電之效果。圖 2.9(右)中所示即為搖擺浮板式之發電機制示意圖，上方之浮板隨著波浪 surge 之作用時前後搖擺則帶動連桿，使下方之發電設備能夠動作而發電。
3. 擺盪或推升水柱體(OWC)波能轉換系統：

該能量轉換系統之原理為利用或限制於一定範圍內之水柱，於波浪前後推進及上下震盪作用時，驅動氣室內之空氣或水柱，進而帶動發電機制或轉輪以達到發電之效果。如圖 2.10 中左側所示即為涵蓋一定範圍之氣室或水柱空間。而該構造物可以為固定式或浮動式。

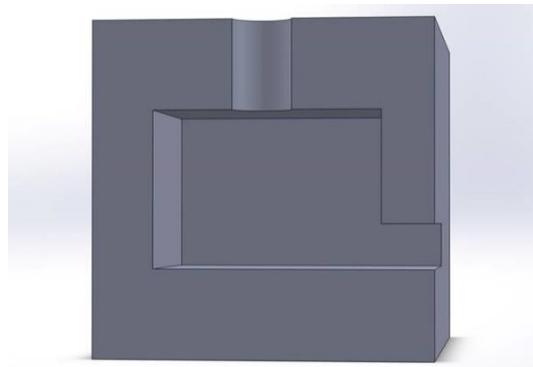


圖 2.10 擺盪或推升水柱體 (OWC) 波能轉換系統

4. 連桿作動式(Pelamis or Attenuator)波能轉換系統：

是一系列鏈結之浮筒，當波浪穿越此系統並牽動連接點，浮筒連動油壓幫浦，並經由能量穩定輸出系統驅動液壓馬達。其型式如圖 2.11(左)所示為兩節相連之浮筒，必要時可以多節相連，在海中如海蛇浮游，此多節連結型式時亦稱為海蛇式。

5. 溯升及越波流驅動式(Overtopping and Terminator)波能轉換系統：

是一種利用海水溯升及越波作用時，其海水進入於構造物內大型水槽，再透過水流作用帶動轉輪或渦輪驅動系統，達到發電之效果。如圖 2.11(右)中左方所示即為大型水槽構造物，由右側溯升及越過之海水，收集於水槽再由左側之孔洞往下驅動發電裝置。而該構造物可以為固定式或浮動式。

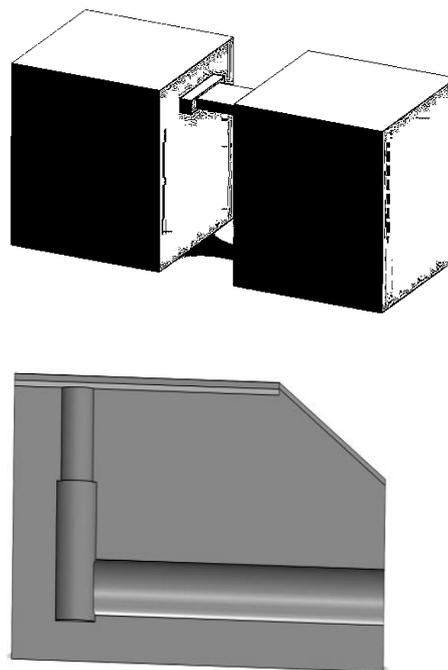


圖 2.11 連桿作動式(左)及溯升及越波流驅動式(右)波能轉換系統

2.5 波浪發電之應用

2.5.1 國際上波浪發電發展簡介

國際上從事波浪發電開發的國家有英國、日本、美國、加拿大、丹麥、挪威、蘇俄、以色列及中國等國。世界第一個波浪發電裝置雖然是 1964 年日本發明的 60W 航標燈，但因盛行風的方向及廣大的大西洋等因素，英國的波浪能源開發在世界上名列前茅。

澳洲發展出一種雙通道渦輪，此渦輪設計較一般的威爾斯渦輪更具效率，此渦輪將被裝置於震盪水柱式(OWC 式)發電系統，此系統利用拋物線束制水道，將入射波的波前聚焦至海岸線之設備區來擷取較大能量。而在歐洲如丹麥，則發展出由許多創新元件構成之新裝置：Wave plane - 是一種楔型構造，波可由水道進入螺旋槽，此可產生一渦流驅動渦輪機，其型式接近溯升及越波流驅動式 (Overtopping and Terminator) 波能轉換系統。1999 年時已設計出 1/15 的模型，並在丹麥日德蘭半島外海測試運轉中。其中水道入口設計為利用一對曲線反射式閘門，可以將集合波浪超過至坡槽，再將水式放置低位之渦輪機。同時一個 1/4 原型已進行設計，並預定設置於峽灣區，全尺寸裝置非常龐大，預估尖峰發電量為 4 MW。

日本在波浪能源轉換之研究上也相當積極，日本早在 1980 年代即由其運輸省主導開發具備水柱振動型之波能轉換系統。該系統結合了波浪發電以及防波堤沉箱，此種沉箱能使用於防波堤以及護岸，除了具備防波以及攔砂機能，還能對波能量加以利用。波力發電沉箱由被稱為空氣室的中空部分，以及支撐空氣室的一般沉箱兩部分構成。空氣室的前壁能作為幕牆，也具備能讓波浪進入空氣室的開口。波浪侵入後空氣室的水位會變低或變高，空氣室內的空氣就會被壓縮或是膨脹，噴嘴(管口)內會產生氣流，

波浪的動力(動能)被轉換為空氣的動力(動能)。此種方法能透過吸收波能量發揮低反射型的防波機能。

此沉箱防波堤的開發，由日本運輸省主導，並且由港灣技術研究所，第一港灣建設局以及沿岸開發技術研究中心協力實施。運輸省港灣技術研究所在昭和 57 年(1982)開始進行了為期五年的基礎研究，該研究案之領導研究員為高橋重雄。另外，沿岸開發技術所研究中心在昭和 60 年和 61 年(1985-1986)協同 20 家民間企業進行了包含波能量利用系統以及可能性調查的具體調查研究。運輸省第一港灣建設局為了使波力發電沉箱實用化，在酒田港的防波堤實施了波力發電沉箱的現場實證實驗，並由世界著名之海岸工程研究學者合田良實帶領之團隊進行實證試驗。經過日本港灣技術研究所的研究，其成果整理如下：

1. 關於波力發電沉箱的耐波設計法的研究

波力發電沉箱是波能量變換裝置也同時是防波堤。本研究透過模型實驗來調查波力發電沉箱作為防波堤的機能以及耐波安定性。根據實驗結果，波力發電沉箱防波堤的反射率在 30%~60%，和一般的直立消波沉箱防波堤大致相同，但是程度略高。另外，越波量不但少，作用的波力也和直立消波沉箱防波堤同樣程度。以模型實驗為基礎，提出了包含空氣室的壁面設計以及波力發電沉箱的耐波設計法的提案。

2. 關於波力發電沉箱的能量變換機能的研究

(1) 空氣出力的研究

波浪動力會透過空氣室轉換為空氣的動力。此一過程的理論並經由研究案「熱力·波動法」的實驗檢証過。另外，此一理論亦被擴展到適用於擁有(如現實海洋般)不規則和方向分散性的波上面。研究成果中亦找出，最適合空氣室的相關參數(機械的尺寸法，重量等要素)。概括的來說，空氣室的維度在波長的 10%到 20%程度，空氣噴嘴(管

口)的開口率在 1/100~1/250 是比較理想的，只要符合此條件，空氣動能的變換率就能達到 70% 以上

(2) 關於渦輪機的研究

空氣的動能經由渦輪機轉變成渦輪機動能。「熱力·波動法」之研究案中亦包含了渦輪機的實驗，不但能夠預測渦輪機的出力，還能基於此理論設計渦輪機。

(3) 大型模型的發電實驗

為了進行包含發電機在內的總合性檢討，在現場製作了 1/3 比例的模型進行了發電實驗。透過此實驗，不只能檢証波力發電裝置的設計法，亦能檢討異常波浪時的保護對策裝置。

有關波浪結合沉箱防波堤之研究，日本港灣研究所在大量經費及人力挹注下，為相關研究中成果較為完整者。本研究案中亦將其相關研究成果做為重要參考資料。較為遺憾者有下列幾點：

- (一)日本與該研究相關之報告，大部分為日文報告，雖可翻譯為中文，但需增加經費且甚為費時。
- (二)日本之研究報告有關波能轉換試驗者，均甚為簡略(可能因技術機密因素)，且以概述性方式作成果說明，參考價值較低。
- (三)其理論分析說明雖有較詳細資料，但使用之理論較屬一般熟知且較為簡易之理論，在模擬分析上可能較失準確性。

這十幾年來，波浪發電設施在中國的研究發展則更為積極，不僅在發展研究上設有專責單位，每年投入大量經費從事研究發展，並已有全尺寸之發電設備投入應用。其中包括東北地區、山東、浙江、廣東等沿海地區，均建有相關之發電實質設施。圖 2.12 中所示即為一種波能轉換系統之設計及建造施工情形，其位置為廣東省沿海一潮汐及波浪均適合之處所；該設施為浮筒震盪引導之水道，設計概念為，連結發電裝置之浮筒，在固定軌道上作動

時能產生較大之功率。圖 2.13 中所示則為該波能轉換系統之岸上設施正在建造施工情形。

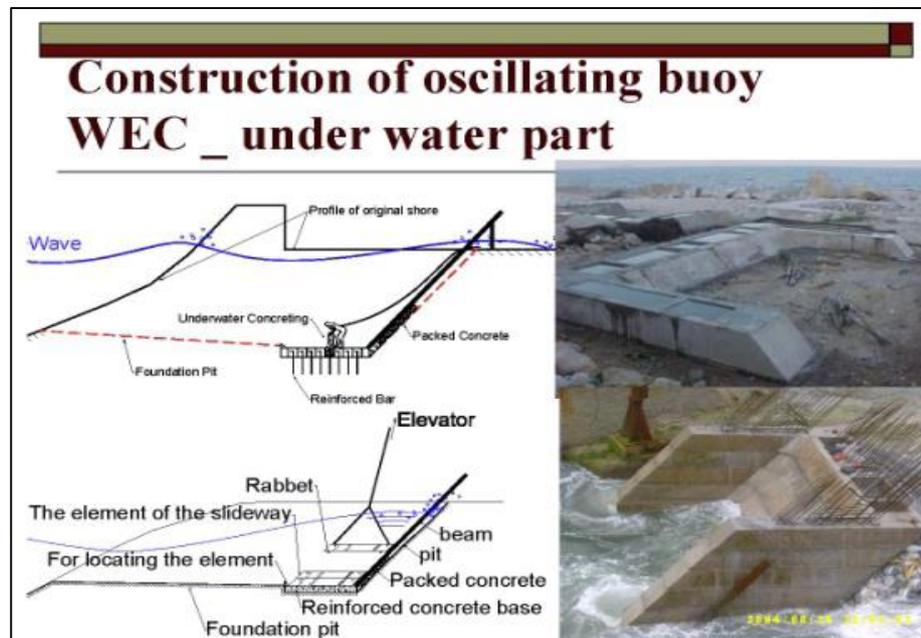


圖 2.12 波能轉換系統之設計及建造施工情形

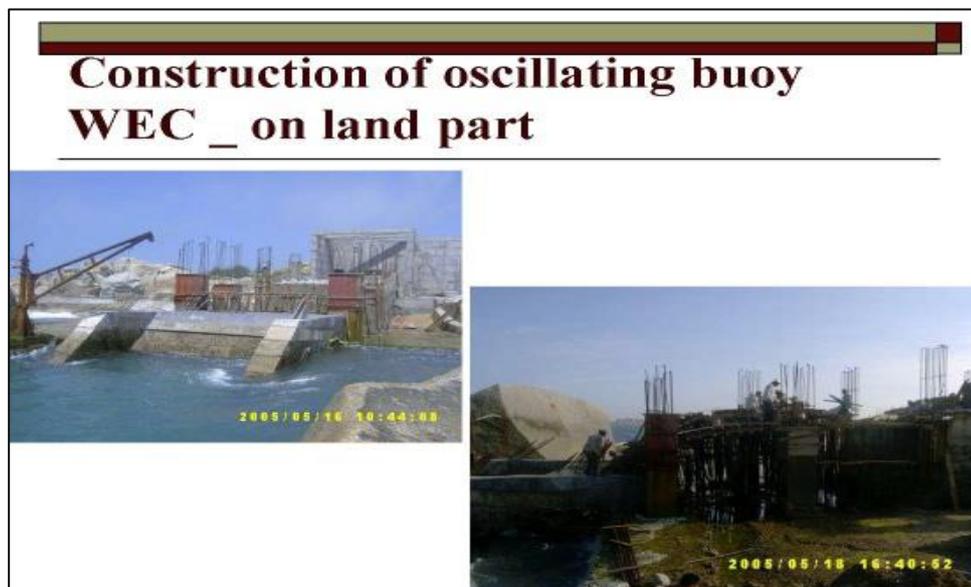


圖 2.13 波能轉換系統岸上設施建造施工情形

我國臺電公司於民國 76 年曾進行本省地區波浪發電先驅計畫，進行波浪發電系統之研究，調查評估臺灣沿岸波浪發電之潛

能、波浪發電的初步可行性研究以及電廠概念設計。於民國 84 年亦曾辦理「核能四廠進水口防波堤設置波浪發電可行性評估及初步設計」，評估研究計畫之存活率與發電效益。但均無後續之相關發展。

能源局於 97 年開始的三年「海洋能源發電系統評估與測試」計畫中將進行波浪潛能和特性調查分析，以分析波浪發電潛能並作為系統開發和利用的詳實資料庫，並評估國外合適機組引進可行性，並採取技術自行研發設計波浪發電系統。

2.5.2 波浪能發電目前實際安裝運轉案例

1. LIMPET500(Land Installed Marine Pneumatic Energy Transformer – 500kW)是為一 OWC 系統建造於海岸線上，靠近 Portnahaven (位於艾雷島)。於 1998 年開始建造，2000 年八月底完工開始啟用，如圖 2.14 至 2.15，而表 2.5 為 LIMPET500 設計參數。

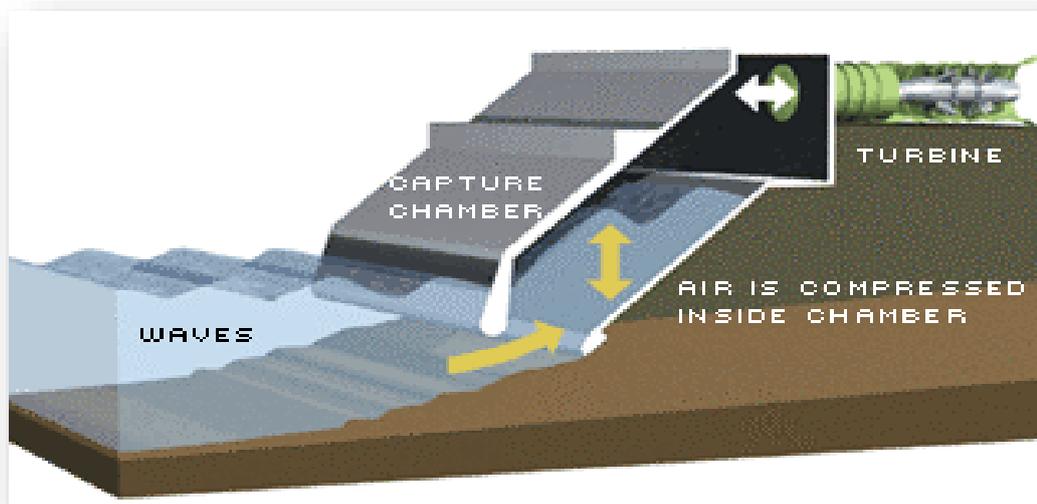


圖 2.14 LIMPET 500 的整體運作模式



圖 2.15 LIMPET 500 運作時現場波浪行為

表 2-5 LIMPET500 設計參數

Geometry (幾何條件)		波浪條件	
Total Width (防波堤寬度)	21.0m	Depth at lip (覆蓋深度)	6.0m
No. of Chambers (氣室數量及寬度)	3 x 6.0m	Design Wave Height, Hs max (設計最大示性波高)	4.4m
Chamber Angle (氣室角度)	40° to horiz.	Design Wave Period (設計波浪週期)	13.4s
Lip depth below MWL (堤體水面下深度)	2.3m	Return period (回歸週期)	n/a waves depth limited
Total Height above MWL (平均水線以上高度)	12.8m	Max design wave pressure (最大設計波力)	600kN/m ²
Turbine(渦輪機)		Generator(發電機)	

Turbine Dia. (渦輪機直徑)	2.6m	Type (型號)	F3GTS 400 G8G
Nominal operating speed (額定運行速度)	1050rpm	Power at Generator Terminals (發電機功率)	2 x 250kw
No. of Turbines (渦輪機數量)	2	Duty Type (運作型態)	continuous inverter driven(連續式)
Arrangement (排列方式)	In line, contra rotating (渦輪反向旋轉並呈直線排列)	Rotor Type (轉子類型)	Wound rotor (繞線轉子) (but used with rotors shorted)
Blade Form (葉片型式)	NACA 12	Rated Voltage (額定電壓)	400V
Number of blades (葉片數量)	7	Rated Speed (額定轉速)	1016rpm
Blade Chord (葉片大小)	320mm	Max test speed (最大轉速)	1500rpm
Hub to tip ratio(轂尖比)	0.62	Inertia Generator Load(轉動慣量)	11.5 kgm ² 1300kgm ²

2. Pico 是一 400kw 的 OWC 系統建造於靠近亞速爾群島的 Porto Cachorro 的一小自然溝壑中；於 1996 年始建造，1998 年完成，隔年啟用，如圖 2.16、2.17 而表 2.11 為 Pico 設計參數。



圖 2.16 PicoOWC 系統正視圖



圖 2.17 PicoOWC 系統後視圖

表 2-6 Pico 設計參數

Geometry (幾何條件)		波浪條件	
Total Width(防波堤寬度)	12.0m	Depth at lip (覆蓋深度)	8m
No.of Chambers (氣室數量及寬度)	1 x 12.0m	Design Wave Height, Hs max(設計最大示性波高)	7.5m
Chamber Angle(氣室角度)	60° to horiz.	Design Wave Period (設計波浪週期)	12s
Lip depth below MWL (堤體水面下深度)	2.5m	Return period (回歸週期)	n/a waves depth limited
Total Height above MWL (平均水線以上高度)	15m	Max design wave pressure(最大設計波力)	700kN/m ²
Turbine(渦輪機)		Generator(發電機)	
Turbine Dia. (渦輪機直徑)	2.3m	Type (型號)	Induction, Wound Rotor, Kramer
Nominal operating speed (額定運行速度)	750-1500rpm	Power at Generator Terminals (發電機功率)	400kw
No. of Turbines (渦輪機數量)	1	Duty Type (運作型態)	50Hz, 8 Pole
Arrangement (排列方式)	Horiz. axis (呈水平排列)	Rotor Type (轉子類型)	Wound slip ringsr (繞線滑環)
Blade Form (葉片型式)	3D symmetrical NACA15 at root and NACA12 at tip	Rated Voltage (額定電壓)	400V
Number of blades (葉片數量)	8	Rated Speed (額定轉速)	1400rpm
Blade Chord	375mm	Max test speed	1500rpm

(葉片大小)		(最大轉速)	
Hub to tip ratio (轂尖比)	0.59	Inertia (轉動慣量)	600kgm ²

3. Vizhinjam 是為一 150kW 的 OWC 系統建造於印度 Trivandrum 的哈瓦漁港之防波堤上，建於 1991 年。如圖 2.18 至圖 2.21 而表 2.12 為 Vizhinjam 設計參數



圖 2.18 Vizhinjam OWC 沉箱前防波堤結構



圖 2.19 Vizhinjam OWC 沉箱後視圖

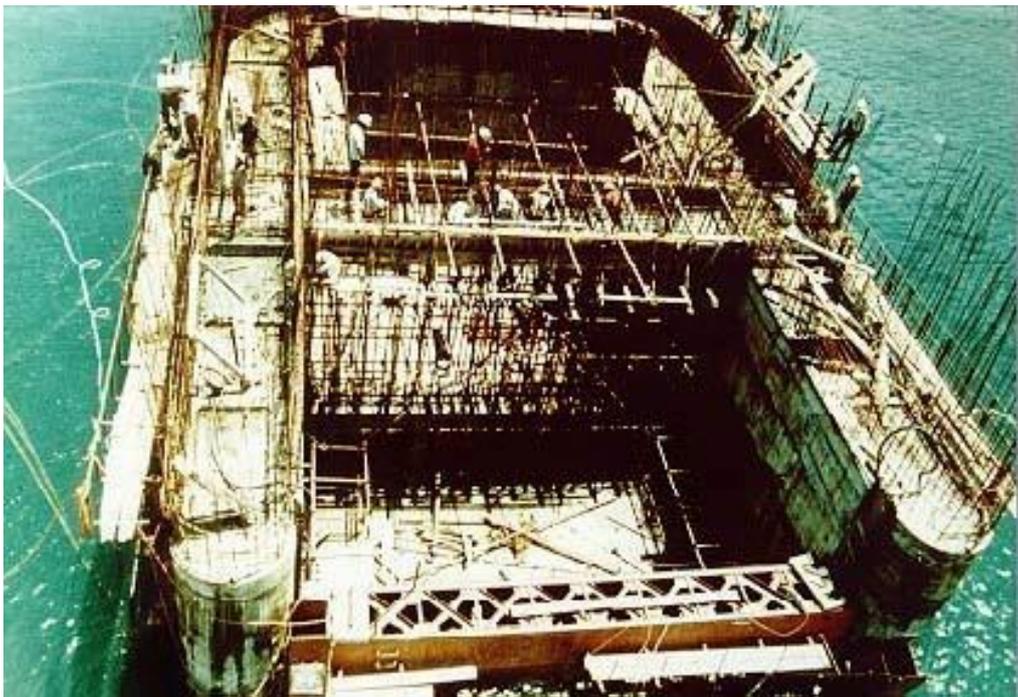


圖 2.20 Vizhinjam OWC 正在建設中

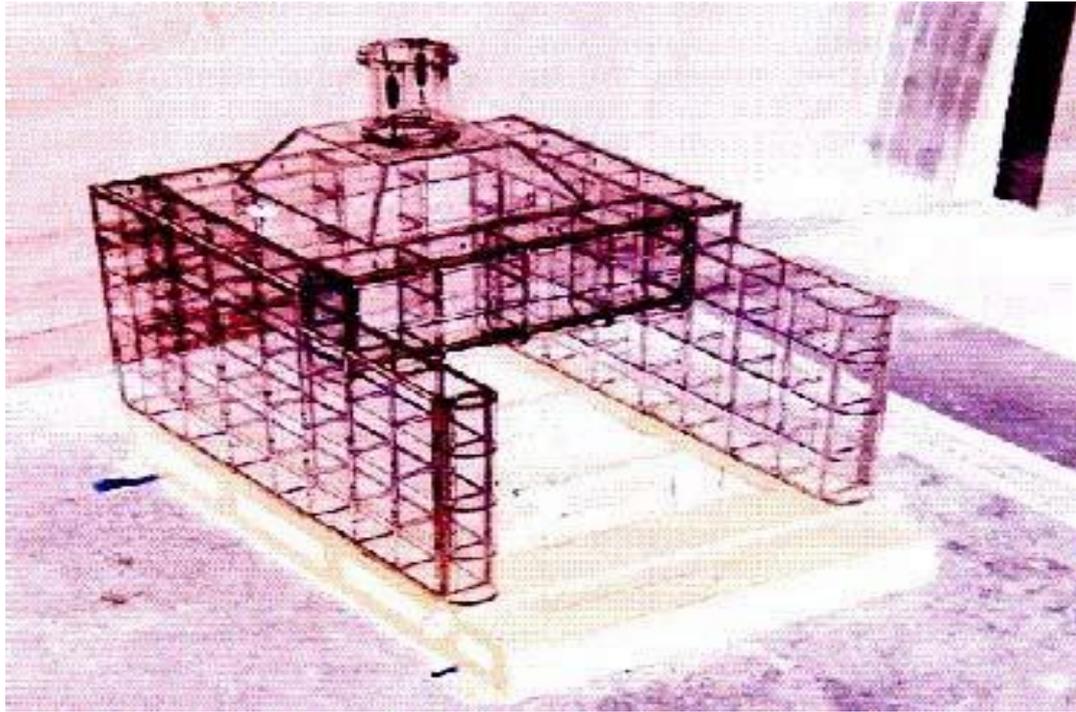


圖 2.21 Vizhinjam OWC 整體模型圖

表 2-7 Vizhinjam 設計參數

Geometry (幾何條件)		波浪條件	
因文獻內資料未完整提供，故以下部分參數有缺失。			
Total Width (防波堤寬度)	14.0m	Depth at lip (覆蓋深度)	10.2m
No. of Chambers (氣室數量及寬度)	1 x 10.0m	Design Wave Height, Hs max (設計最大示性波高)	7m
Chamber Angle (氣室角度)	vertical.	Design Wave Period (設計波浪週期)	8 to 12s
Lip depth below MWL (堤體水面下深度)	1.1m	Return period (回歸週期)	None.
Total Height above MWL (平均水線以上高度)	14.5m	Max design wave pressure (最大設計波力)	1000kN/m ²
Turbine(渦輪機)		Generator(發電機)	
Turbine Dia. (渦輪機直徑)	None.	Type (型號)	None.
Nominal operating speed (額定運行速度)	None.	Power at Generator Terminals (發電機功率)	None.
No. of Turbines (渦輪機數量)	2	Duty Type (運作型態)	None.
Arrangement (排列方式)	None.	Rotor Type (轉子類型)	None.
Blade Form (葉片型式)	NACA0021	Rated Voltage (額定電壓)	None.
Number of blades (葉片數量)	8	Rated Speed (額定轉速)	None.
Blade Chord	380mm	Max test speed	None.

(葉片大小)		(最大轉速)	
Hub to tip ratio (轆尖比)	0.6	Inertia (轉動慣量)	None.

4. Sakata OWC 建造於日本酒田港，是其港口防波堤的一部分，有五個氣室，但經過測試只有三個氣室能用於能源生產，該設備於 1989 年開始運作，安裝了 60kW 的渦輪發電機模組，如圖 2.22、2.23 而表 2.13 為 Sakata OWC 設計參數。

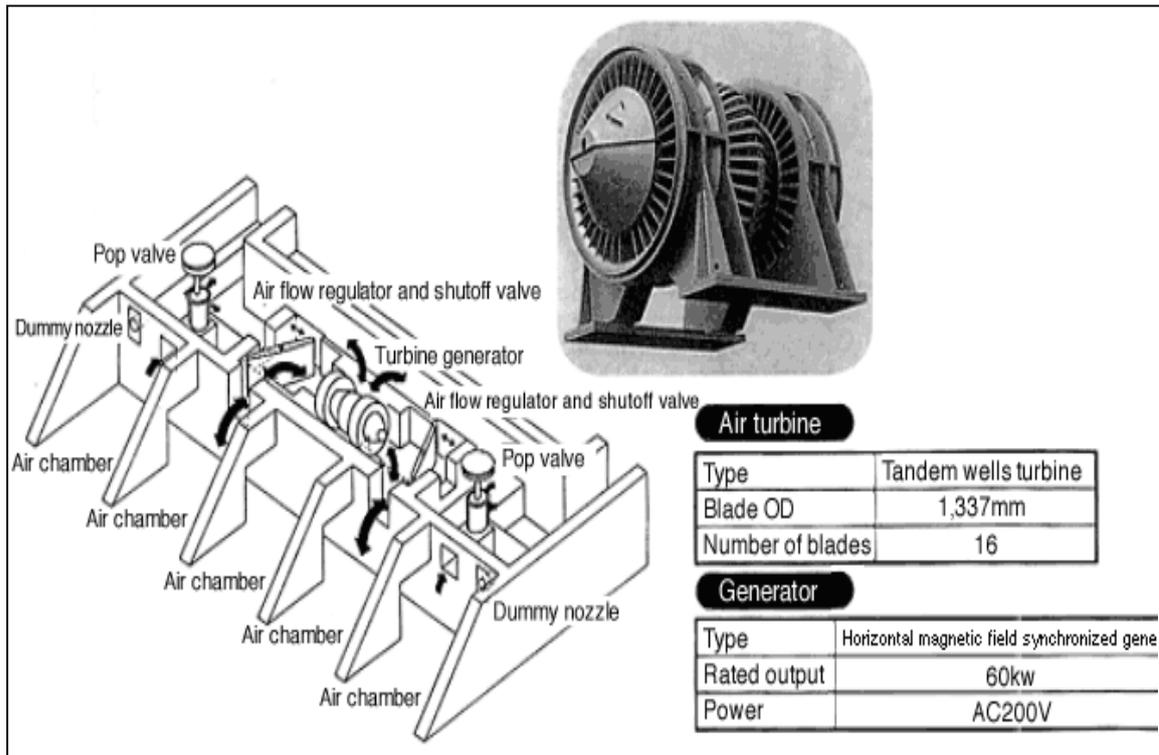


圖 2.22 Sakata OWC 的波能發電系統



圖 2.23 Sakata OWC 的沉箱施工階段

表 2-8 Sakata OWC 設計參數

Geometry (幾何條件)		波浪條件	
因文獻內資料未完整提供，故以下部分參數有缺失。			
Total Width (防波堤寬度)	20.0m	Depth at lip(波長)	18.0m
No. of Chambers (氣室數量及寬度)	5 x 3.0m	Design Wave Height, Hs max (設計最大示性波高)	15.3m
Chamber Angle (氣室角度)	Wave chamber – vert, air45 ⁰	Design Wave Period (設計波浪週期)	14.5s
Lip depth below MWL (堤體水面下深度)	3m	Return period (回歸週期)	None.
Total Height above MWL (堤體水面上高度)	12.5m	Max design wave pressure (最大設計波力)	None.
Turbine(渦輪機)		Generator(發電機)	
Turbine Dia.	1.337m	Type	None.

(渦輪機直徑)		(型號)	
Nominal operating speed (額定運行速度)	None.	Power at Generator Terminals (發電機功率)	60kW
No. of Turbines (渦輪機數量)	None.	Duty Type (運作型態)	50Hz, 8 Pole
Arrangement (排列方式)	None.	Rotor Type (轉子類型)	None.
Blade Form (葉片型式)	None.	Rated Voltage (額定電壓)	200V
Number of blades (葉片數量)	16	Rated Speed (額定轉速)	None.
Blade Chord (葉片大小)	None.	Max test speed (最大轉速)	None.
Hub to tip ratio (轂尖比)	None.	Inertia (轉動慣量)	None.

第三章 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明

以沉箱堤為基礎波浪發電系統所採用之波能轉換系統，目前應用較多之原理為利用一密閉氣室，藉由波浪進入氣室後之震盪，鼓動氣室內氣流至一開口處加速流動，以驅動發電機之葉輪，藉此而發電。故其基本原理中，主要為波浪於氣室內外之變化，及其震盪後鼓動氣流之變化等。故所使用之理論主要為波浪理論、氣流理論及其與能量之關係。以下則將較傳統之波浪分析理論，以及計算流體應用上較複雜之非穩態 Navier Stoke's Equation in Energy Conservation form 分別介紹之。

3.1 沉箱與氣流公式推導

3.1.1 理論發展簡介

與防波堤或護岸結構相互結合之發電設施，其型式為直接利用波浪力、水流力或空氣壓力來驅動相關之發電設備。發電設備中大部分亦以傳統渦輪式發電系統為主，日本運輸省所推動之波浪發電之相關研究中所開發者，即為利用水柱內波能能量變化造成空氣壓力變化而帶動機械能的波力發電裝置，而此發電裝置則結合於沉箱結構中。根據其研究結果，此種沉箱主要功能為使用於防波堤以及護岸，但外加此波浪發電裝置後、除了具備原來之防波以及攔砂機能，還能對波能量加以利用，甚至於對於原防波堤結構具有降低波浪力，而增加其耐久性之附加功效。

圖 3.1 為波力發電沉箱防波堤的概念圖。波力發電沉箱之主體構造包括中空部分之空氣氣室，以及支撐空氣室的一般沉箱兩部分構成。空氣室的前壁能作為幕牆，具備能讓波浪進入空氣室的開口。波浪侵入後空氣室的水位隨波浪作用而震盪變低或變高，空氣室內的空氣則隨水位高低而產生壓力變化，該氣壓則驅動氣流經由噴嘴(管口)內流出，波浪的動力(動能)被轉換為空氣的動力

(動能)。此種方法亦能透過吸收波能量發揮低反射型的防波機能，進而增加構造物之耐久性。

本章中即根據日本港灣技術研究中心之研究成果，進一步修正並改良後，使其於較小波浪作用下能發揮較佳之發電功能。首先建立結合沉箱結構波能轉換發電系統模型，以公式推導如下，再以數值方法進行實例演算。

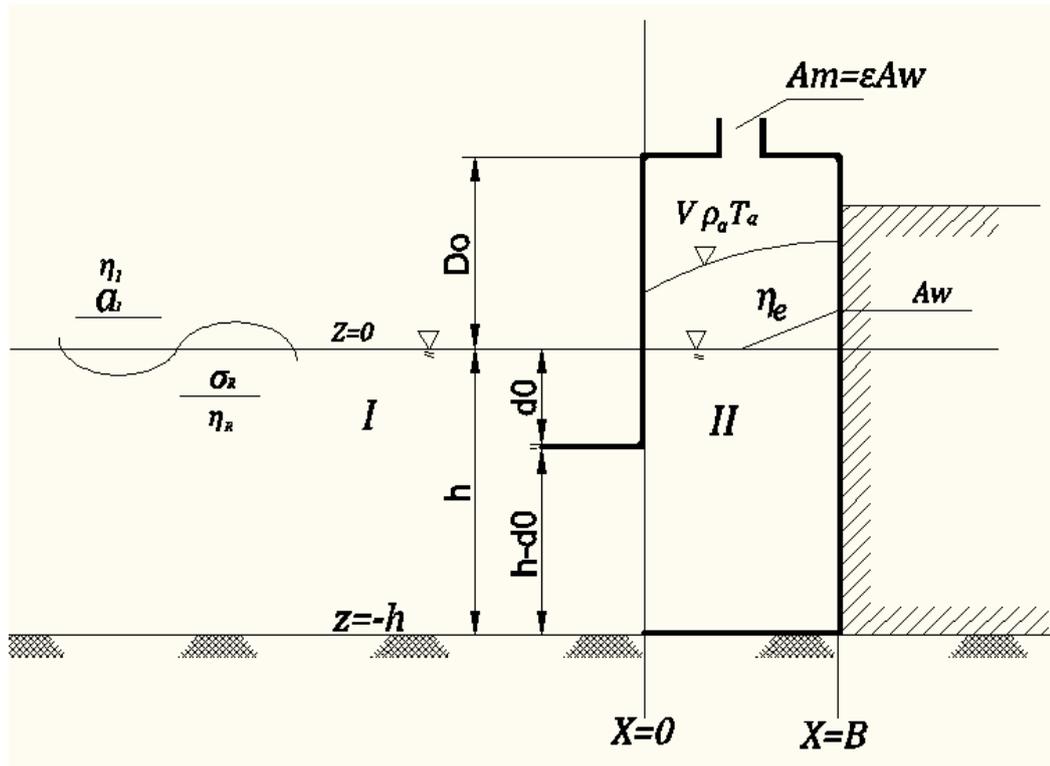


圖 3.1 CBWPCS 系統及其相關參數圖

3.1.2 氣室內空氣動力學

假設氣室內之氣體為理想氣體，則其 State equation 為：

$$\frac{P}{\rho_a} = RT_a \quad (3-1)$$

P：為大氣壓力

ρ_a ：氣室內空氣密度

R : 為理想氣體常數

T_a : 為氣室內溫度

氣室中質量連續方程式可表示為：

$$\frac{d(\rho_a V)}{dt} + \dot{m} = 0 \quad (3-2)$$

式中、 V 為體積， \dot{m} 為空氣質量的流出速率，其定義如下

$$\dot{m} = \rho_e C_d \varepsilon A_w W_p \quad (3-3)$$

W_p : 噴嘴空氣速率

C_d : 排出係數

ε : 噴嘴開口速率

A_w : 開口水斷面截面積

ρ_e : 空氣密度，流出時 $\rho_a = \rho_e$ ，流入時 $\rho_0 = \rho_e$

ρ_0 : 大氣空氣密度

其中 W_p 隨著溫度變化如下公式：

$$W_p = \pm \varphi \sqrt{2C_p |T_a - T_0|} \quad (3-4)$$

φ : 速率參數

c_p : 定壓下單位熱量(=1005J/kg K)

T_a : 氣室內空氣溫度

T_0 : 大氣空氣溫度

T_e : 空氣溫度，流出時 $T_a = T_e$ ，流入時 $T_0 = T_e$

將(3-1)式代入(3-2)式可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V}{RT_a} \right) + \dot{m} = 0$$

(3-5)

由空氣室中能量守恆定律，可進一步推導出公式如下：

$$p_a \frac{dV}{dt} + C_v \frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V}{RT_a} \right) + \dot{m} C_p T_e = 0$$

(3-6)

c_v ：定體積下單位熱量(=717.1J/kg K)

式(3-5)及(3-6)為非線性微分方程式，為求解此微分方程組，假設其中 V 、 T_a 、及 p_a 等變數於時間之變量相當微小，並可將其表示為非線性週期性的函數如下

$$V^* = V - V_0 = -A_w a_0 \sin \sigma t$$

(3-7)

$$T^* = T_a - T_0 = \alpha T_0 \sin \sigma(t + \tau)$$

(3-8)

$$p^* = p_a - p_0 = \lambda p_0 \sin \sigma(t + \tau)$$

(3-9)

其中 σ 為角度擺盪頻率， t 為時間， τ 為時間的相位差， λ 、 α 為振幅，可用以下公式推得

$$\alpha = (\gamma - 1) \frac{a_0}{D_0} \cos \sigma \tau$$

(3-10)

$$\lambda = \gamma \frac{a_0}{D_0} \cos \sigma \tau$$

(3-11)

$$\cos \sigma \tau = \pm \sqrt{1 + K^2} - K$$

(3-12)

其中 K 與 γ 、 ε_e 值為

$$K = \varepsilon_e^2 (\gamma - 1) \frac{c_p T_0}{(\sigma D_0)^2} \frac{D_0}{a_0}$$

(3-13)

$$\gamma = c_p/c_v$$

(3-14)

$$\varepsilon_e = c_d \varphi \varepsilon$$

(3-15)

3.1.3 波浪與氣室內之空氣反應

η 為氣室內水面高度，其中 η_I 入射波時高度， η_R 為反射波時高度， η_T 為駐波時高度，以微小振幅波表示如下：

$$\eta_I = a_I \sin(\sigma t - kx - \Phi_I) \quad (3-16)$$

$$\eta_R = a_R \sin(\sigma t + kx - \Phi_R) \quad (3-17)$$

$$\eta_T = a_T \cos k(x - B) \sin \sigma t \quad (3-18)$$

其中 a 為振幅， Φ 為相位差(下標 I 為入射波， R 為射波， T 為駐波以此類推)， k 為波數。基於整體水流體積連續，當水流(波浪)進入入水口 $x=0$ 時必須滿足下列公式：

$$a_I \sin(\sigma t - \Phi_I) - a_R \sin(\sigma t - \Phi_R) = a_T \sin k B \cos \sigma t \quad (3-19)$$

考慮壓力於 $x=0$ 時之連續：

$$a_I \sin(\sigma t - \Phi_I) + a_R \sin(\sigma t - \Phi_R) = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_0) p^* + a_T \sin k B \cos \sigma t \quad (3-20)$$

其中

$$f(kh, kd_0) = \frac{2 \cosh kh \sinh k(h-d_0)}{\cosh k(h-d_0) \sinh k(h-d_0) + k(h-d_0)} \quad (3-21)$$

將(3-19)、(3-20)整合相加後，可得到空氣室內空氣反應與入射波之關係式如下：

$$2a_I \sin(\sigma t - \Phi_I) = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_0) p^* + a_T (\sin kB \cos \sigma t + \cos kB \sin \sigma t)$$

(3-22)

其中有效振幅 a_0 可表達為

$$a_0 = \frac{\sin kB}{KB} a_T$$

(3-23)

代入方程式(3-10)、(3-11)及(3-12)，方程式(3-22)可進一步改寫為下式：

$$a_I = \frac{1}{2} a_0 \sqrt{[\{A_0 f(kh, kd_0) \sin \sigma t \cos \sigma t + kB\}^2 + \{A_0 f(kh, kd_0) \cos^2 \sigma t + \frac{KB}{\tan kB}\}^2]}$$

(3-24)

以及

$$\Phi_I = \tan^{-1} \left\{ -\frac{A_0 f(kh, kd_0) \sin \sigma t \cos \sigma t + kB}{A_0 f(kh, kd_0) \cos^2 \sigma t + kB / \tan kB} \right\}$$

(3-25)

其中

$$A_0 = \frac{\gamma p_0}{\rho_w g D_0}$$

(3-26)

當入射波之振幅或波高及其週期為已知時，有效振幅 a_0 及相位差 σt 可以利用數值方法求解方程式(3-12)及(3-24)，其中並輔以式(3-13)、(3-21)及(3-26)等相關參數之求算。

3.1.4 空氣能量

波浪作用於氣室內空氣質量所產生之能，可表示為空氣壓力與氣室內體積變化之乘積

$$W_a dt = p_a dV \quad (3-27)$$

或進一步改寫為氣室內空氣體積與有效水面高 η (為計算時氣室寬度內之平均水位高) 之關係如下：

$$W_a dt = -A_w p_a d\eta = -A_w p_a \frac{d\eta}{dt} dt \quad (3-28)$$

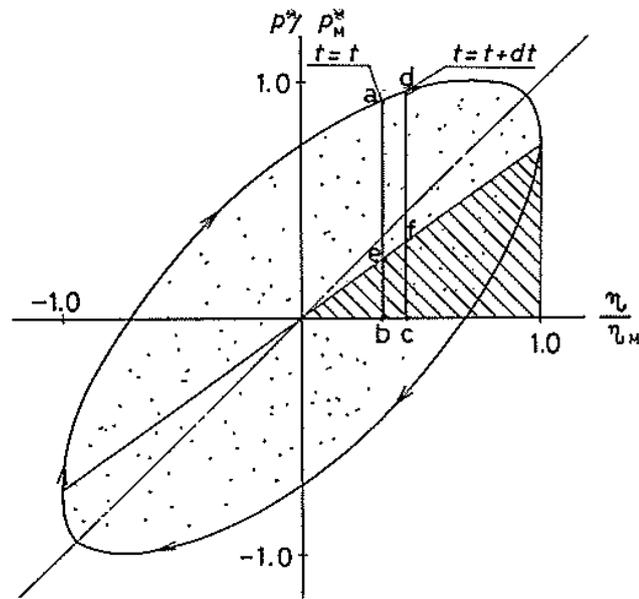


圖 3.2 一個循環週期之空氣能圖(after Takahashi 1895)

由(3-28)式中發現，空氣能與氣室內水面高之時間變化為負關係，相關參數並可繪製成圖 3.2。若換算成平均空氣能 $\overline{W_a}$ ，其於一個週期之變化可計算如下：

$$\overline{W_a} = -\frac{1}{T} \int_0^T p_a dV \quad (3-29)$$

平均空氣能於一個週期之量為圖 3.2 中橢圓形內之面積，上式可另表達為與氣壓與水位高之關係：

$$\overline{W_a} = 0.5 \sigma A_w \eta_M p_M^* \sin \sigma \tau \quad (3-30)$$

將(3-7)、(3-9)代入，(3-30)重新寫成

$$\overline{W}_a = \frac{1}{2} \frac{\gamma p_0 \sigma A_w}{D_0} a_0^2 \sin \sigma \tau \cos \sigma \tau$$

(3-31)

而在氣壓具最大值之情況下，可獲得最大空氣能量 W_{am} 。令
 $\sigma \tau = \pi/2$

$$W_{am} = \sigma A_w \eta_M p_M^*$$

(3-32)

3.1.5 波能效率

對規則波而言，每一週期單位波峰寬之波能傳遞公式如下：

$$W = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g \quad (3-33)$$

其中 ρ_w 是水密度， g 是重力加速度， H 是水位高度， C_g 是波群速率，若考慮 K_s 淺化係數可得：

$$W_I = \frac{\rho_w g}{32\pi} H^2 T / K_s^2 \quad (3-34)$$

在深水 $K_s=1$ ，代入方程式為 $W_I = 0.955 H^2 T$ 。

從波能轉換由波浪到氣室內之空氣能，期能量擷取率定義為 $\overline{\text{EFF}}$ ， $\overline{W_a}$ 為平均氣能， $\overline{W_I}$ 為平均波能，結合(3-31)到(3-33)式可得

$$\overline{\text{EFF}} = \overline{W_a} / \overline{W_I} = \frac{\gamma p_0}{\rho_w g D_0} \frac{B \sigma}{C_G} \frac{a_0^2}{a_I^2} \sin \sigma \tau \cos \sigma \tau \quad (3-35)$$

其中 B 為氣室前後距離， D_0 為氣室空氣高度

3.2 不規則波浪能 W_I 公式推導

若波浪為不規則時，一般用波譜型式來描述，故不規則波之波浪能亦以波譜型式描述如下：

$$W_I = \rho_w g \int_0^\infty S(f) C_g(f) df \quad (3-36)$$

其中、 $S(f)$ 為波譜方程式，若考慮淺水效應，加入 K_s 淺水參數

$$W_I = \frac{\rho_w g^2}{4\pi} \int_0^\infty S(f) f^{-1} K_s(f)^{-2} df \quad (3-37)$$

而在深水區，則不規則波能為

$$W_I = \frac{\rho_w g^2}{4\pi} \int_0^\infty S(f) f^{-1} df$$

(3-38)

以上各式中，最重要的則為波譜之選擇，將各種不同波譜代入時，則將得到不一之不規則波波能。

3.3 紊流流體力學理論

在前述 3.1 節中所介紹之理論中，在空氣動力學中主要用了空氣熱力學，而在波浪型為中則應用了大家所熟知的微小振幅波理論，在入射波、反射波及氣室內之駐波行為均以此假設之。實際上、當波浪進到狹小的氣室內後，由於巨大之入射能量造成水體於氣室內激盪，部分水流甚至混入空氣中，已非平穩之波動作用，較簡略之微小振幅波理論，實無法適確描述氣室內空氣與水間之行為。因此本研究中採用較為複雜之分析理論，並藉由數值方法之模擬分析，希望能得出較佳之分析結果。

本研究中應用之數值分析中，所使用之流體模型為紊流模型 (Turbulence model)，在數值分析過程中包括有四種紊流模型，其中最廣為被採用的為 $k-\varepsilon$ 模型，也是本研究採用的紊流模型。

紊流 (Turbulence)，為流體的一種流動狀態。當流速很小時，流體分層流動，互不混合，稱為層流；當流體逐漸增加流速，流體的流線開始出現波波狀的擺動，擺動的頻率及振幅隨流速的增加而增加，當流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，流場中有許多小漩渦，則形成紊流，或稱為擾流或亂流。

形成紊流之過程變化可以用雷諾數來量化。雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中流速的擾動會因黏滯力而衰減，流體流動穩定，為層流；反之，若雷諾數較大時，慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，流速的微小變化容易發展、增強，形成紊亂、不規則的紊流流場。流態轉變時

的雷諾數值稱為臨界雷諾數。臨界雷諾數與流場的參考尺寸有密切關係。

紊流為流體在流動域內隨時間與空間的波動組成，是一種三維、非穩態且具有較大規模的複雜過程。流體的性質對紊流形式有很大的影響，當流體慣性力相對黏性力不可忽略時，紊流就會發生，通常用雷諾數標定為式中， ρ 和 μ 為流體的密度和黏度； v 和 L 為平均速度和特徵長度。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3-39)$$

雷諾數小，意味著流體流動時各質點間的黏性力佔主要地位，流體各質點平行於管路內壁有規則的流動，呈層流流動狀態。雷諾數大，意味著慣性力佔主要地位，流體呈紊流狀態，雷諾數 $Re < 2000$ 為層流狀態， $Re > 4000$ 為紊流狀態， $Re = 2000 \sim 4000$ 為過度狀態。在不相同流動狀態下，流體的運動規律、流速的分布等都是不相同，因而管道內流體的平均流速 v 與最大流速 v_{max} 的比值也是不相同。因此，雷諾數的大小決定了黏性流體的流動特性。

本研究中應用之數值模型稱為「雙方程模型」，為將速度與長度分開求解而得傳輸模型，其典型模型為 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型。雙方程模型為模擬計算中使用頻率最高的紊流模型，其在數學方程和求解精度之間，有一個比較好的平衡點。 $k-\varepsilon$ 模型適合絕大多數的工程紊流模型，其中 k 為紊流動能，定義為速度波動的變化量，其單位為 m^2/s^2 。 ε 為紊流動能耗散，即指速度波動耗散的速率，其單位是單位時間的紊流動能，如 m^2/s^3 。

$k-\varepsilon$ 模型是在系統方程式裡引入兩個新變量。

連續方程式為

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3-40)$$

動量方程為

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla \cdot p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (3-41)$$

式中， B 為體積力總合； μ_{eff} 為有效黏度； p' 是修正壓力。其表示式分別為

$$\begin{aligned} \mu_{eff} &= \mu + \mu \\ p' &= p + \frac{2}{3} \rho k \end{aligned} \quad (3-42a, b)$$

式中， μ_t 為紊流黏度， k - ε 模型假設紊流黏度與紊流動能和紊流動能耗散有關，即

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-43)$$

k 、 ε 值直接從紊流動能和紊流動能耗散方程中求解，紊流動能方程為

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3-44)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3-45)$$

式中， $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε 為常數。 P_k 是黏性力和浮力的紊流產物，其方程式為

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (3-46)$$

對於非壓縮流體， $\nabla \cdot U$ 值比較小，對於整個方程式結果影響不大。對於可壓縮流體，僅在有較大速度的情況下， $\nabla \cdot U$ 值較大。

在波浪衝擊數值計算過程中， k 、 ε 值會越變越大，而當網格比較細密時，情況可能會更加惡化，式中 $3\mu_t$ 就是為了防止這種情況的發生。RNG k - ε 模型是 k - ε 模型的修正方程，其基於 N-S 方程組的再歸一化。紊流生成和紊流耗散方程與 k - ε 模型相同，但其常數係數由 $C_{\varepsilon RNG}$ 替換 C_{ε} 。

紊流動能耗散方程式變為

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (3-47)$$

式中

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1.42 - f_n \quad (3-48)$$

$$f_n = \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{4.38})}{(1 + \beta_{RNG} \eta^3)}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}} \quad (3-49a,b)$$

第四章 防波堤之計規範與波能擷取系統相合性探討

基於波浪能擷取系統將可能與港灣構造物如防波堤相互結合成一體構造，本階段計畫中將於法規面，特別於設計規範中來加以探討其結合為一體之可行性。在本章中，將探討目前港灣構造物中，其在規劃設計時所使用之相關規範及設計準則，了解將波能轉換系統納入港灣構造物為一體設計時之可行性，或必須為單獨個體之結構物時，於設計準則及相關規範之適用情形。以下所探討之工作項目則包括有：

1. 現有港灣防波堤設計規範之了解，
2. 港灣設計規範與波能擷取系統之相合性，
3. 波能擷取系統融入港灣結構須滿足之規範探討。

其中有關現行港灣防波堤設計相關之規範或準則，主要參考交通部現行「港灣結構防波堤設計基準」。

4.1 防波堤設計基準說明

規劃防波堤時，須充分考量其與水域設施、繫靠設施以及其他設施間之關係，同時防波堤構築後對附近水域、設施、地形、流況、其他環境之影響以及該港之未來發展方向等均應加以充分考量。

防波堤規劃之基本原則應檢討防波堤之佈置、對周圍地形之影響、對水域環境之影響。為決定防波堤之佈置，依需要應檢討自然條件、港內靜穩度、操船之容易度、港內水質、建設費以及維修費、港灣之將來發展計畫。

4.1.1 防波堤規劃之基本原則

1. 防波堤之功能為確保港內之靜穩、維持水深、防止海岸之破壞及保護港灣設施以及背後土地免受波浪、暴潮、海嘯等之影響。所以防波堤具多功能者，因此，在規劃時須考慮其功能能否充分發揮。

2. 規劃防波堤時，須充分考慮其對附近水域、設施、地形、流況等之影響而決定其配置及斷面，通常防波堤所引起之影響如下：
 - (1) 在砂質海岸設置外廓設施時，由於周圍會產生淤積或侵蝕，因而引起地形變化。
 - (2) 隨防波堤之構築，在港外側，由於反射波將使波浪增大。
 - (3) 在港內側，由於新設防波堤之繞射、越波、反射波及局部發生之波浪，或隨港內水域形狀之改變所致副振動之發生等亦有可能擾亂港內靜穩度。
 - (4) 隨防波堤之構築，而使周邊潮流或河川之流入狀況改變，而致局部水質惡化。
3. 由於防波堤若破壞，將對港內船舶、繫泊設施以及背後設施等之安全有重大影響，因此，防波堤之設計以及施工時，除須充分檢討其安全性外，亦須充分考慮將來之維修。

4.1.2 防波堤之佈置

為決定防波堤之佈置，依需要應檢討自然條件、港內靜穩度、操船之容易度、港內水質、建設費以及維修費、港灣之將來發展計劃。防波堤之主要目的為維持港內之靜穩，使船能安全航行、繫泊、順利裝卸，以及保護港內設施，因此佈置應考慮、以下事項：

1. 防波堤之法線應能對最多最強之波浪，產生有效遮蔽。
 - (1) 港口應儘量減少波浪之入侵，且應避開波浪最多最強之方向。
 - (2) 港口應具不妨礙航行之有效寬度及容易航行之方向，使船辦得以安全進出。港口有效寬度，並非單指港口防波堤構造物間之水面直線距離，乃指具有一定水深之航道寬度而言。

- (3) 港口附近之潮流流速應儘量小，橫過港口潮流之速度，一般應為 2~3 節以下。
- (4) 航道及泊地應能減少防波堤產生之反射波及集中波之影響。
- (5) 確保充分之水域面積，使船得以安全停泊與裝卸。但上述功能亦有彼此矛盾者，例如，為使港內之靜穩港口寬愈狹窄愈好，但將使航行不便，另外最多方向之波浪與最強波浪之方向常不一定一致。此類情形須綜合檢討船身自之使用條件、工程費、施工維修之難易等而決定。
- (6) 有關港內所需靜穩度可以下表作為參考：

表 4-1 船型噸位與臨界波高對應表

船 型	裝卸臨界波高
小型船	0.3 m
中大型船	0.5 m
超大型船	0.7 ~ 1.5 m

註：小型船：未滿 500 總噸

超大型船：大於 50000 總噸

- 2. 須留意港內外海水之交換。
- 3. 防波堤建設時，須考慮自然條件、施工條件，並應檢討其經濟性，特別要考慮以下之事項：
 - (1) 避免使波浪集中之佈置。
 - (2) 避開地質不良之地區並儘量選擇容易施工之位置。
 - (3) 儘量利用半島或島之有利地形。

- (4) 在砂質海岸應採用漂沙不易進港布置。
 - (5) 應考慮防波堤完成後對附近地區之影響。
4. 防波堤之配置應不妨害港灣之將來發展。
 5. 在暗礁之周圍除受折射之影響波高增大外，在陡坡上之防波堤亦有可能受衝擊波力作用，因此，防波堤設置在淺灘上或其後時，反而需要更大的結構物，應予注意。
 6. 孤立於外海之島式防波堤，其長度若為侵襲波波長之數倍以下時，因受兩端繞射波之影響，防波堤背後之波高分佈會有相當的變動而影響水域穩定性。

4.2 防波堤設計之基本原則

防波堤設計應考慮下列各項因素：

1. 設計條件
2. 斷面型式
3. 施工法
4. 工程費

防波堤之斷面設計，一般依以下順序進

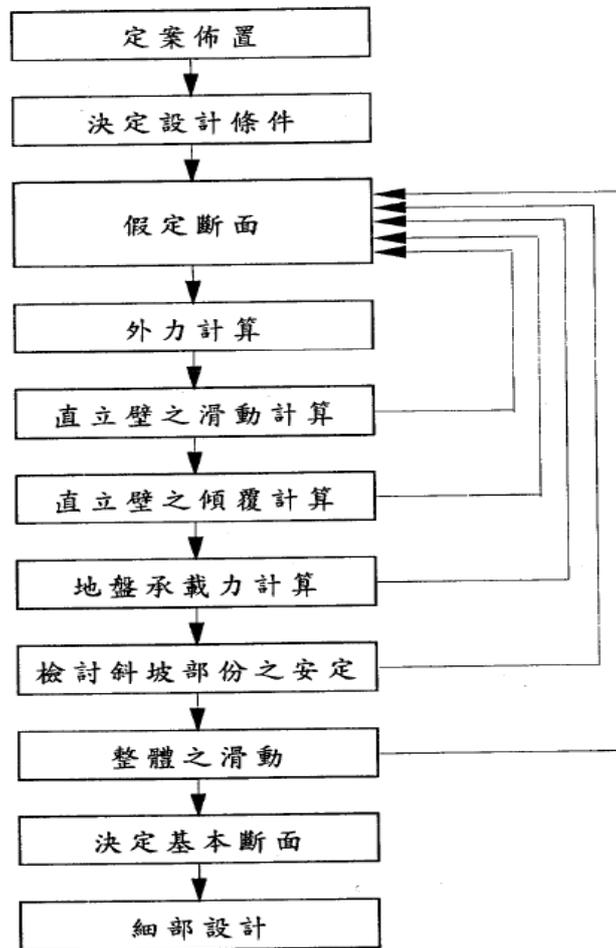


圖 4.1 防波堤設計流程圖

4.2.1 設計條件

1. 潮位

波力之計算所採用之潮位，為對結構物為最危險時之潮位。防波堤斷面與基本水準位、朔望平均高低潮位、平均水位、以往最高（低）潮位、大潮高潮位、各地中等潮位等關係必須確實明瞭，基本水準位與施工用基準位之關係亦需瞭解。另外如有暴潮持續時間及發生或然率等資料則更佳。計算波力時之設計潮位，在不受暴潮影響之港灣用朔望平均高低潮位，受暴潮影響之港灣，將上述資料加上適當之偏差即可，且以對結構物最不安定之狀況檢討。對於圓弧滑動之計算，多採用朔望平均高低潮位，對沉陷計算時，一般多採用平均水位。

2. 風

風之資料主要為進行波浪推算所需，另外亦為設置燈塔時計算風壓所必需。

- (1) 推算暴潮及波浪所使用之海面風場（不同地點之風速、風向）須由氣象單位推算，最好有海上實測資料作參考。
- (2) 作用於結構物之風，須以過去 30 年以上期間之岸邊實測統計資料作為決定設計風速之標準。

3. 波浪

防波堤之設計時所採用之波浪，應依實測抑或推算所得之波浪資料加以適當地統計處理，並考慮波浪之變形而加以設定。

設計時所需考慮波浪之各種因素為波高、波向、波長、週期等，波浪之持續時間雖亦影響防波堤穩定之因素，惟目

前仍未充分明瞭。因此，關於面對外海防波堤之損害，特別是堤基部之損害，係受長時間波浪往復作用之影響應予注意。又施工中結構物可能受損故必須決定施工時波浪之各種因素。

4.2.2 設計時波浪之決定法

1. 設計時波浪之決定程序，可以圖 4.2 表示。

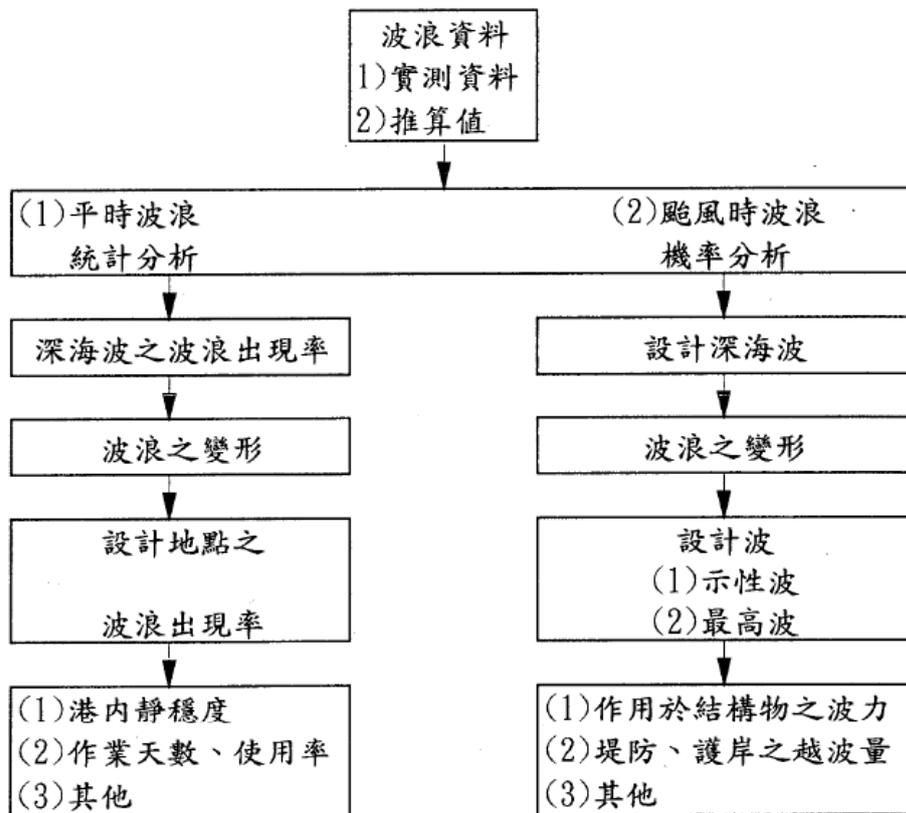


圖 4.2 設計波之決定程序

2. 以推算所得之波浪資料，須以過去長期間(原則上 30 年以上)之颱風或假想颱風等之波浪推算值為準，亦或以平時波浪為對象，採用 5 年以上連續之氣象資料所進行之推算值為準。

3. 波浪之統計處理分為以颱風時之波浪及平常時波浪為對象，並且應以各別適當之方法，前者主要為選定結構物之設計深海波，後者主要為計算靜穩日數，使用率時所需要。
4. 所謂波浪之變形係指深海波進行到結構物設置地點亦或須要波浪資料之地點時所受之各種變形如折射、繞射、反射、淺化、碎波等。
5. 以上設計時所採用波浪之決定程序，須充分考量波浪之不規則性，同時應盡可能以不規則波來處理。

4.2.3 決定設計深海波之基本原則

1. 防波堤設計時所考慮之深海波，係依相當長期間之波浪實測值亦或依 30 年以上之氣象資料所得之推算值，並以實測資料加以修正再經由適當之統計處理，並檢討發生概率之結果，亦或根據假設之颱風所計算得之波浪推算值而決定。
 - (1) 實測資料最好是有相當長時間（10 年以上）之資料，但如資料不足時，亦可利用大約 30 年以上之氣象資料所得推算值，並以實測資料修正後使用。
 - (2) 由氣象資料所求得之推算值以實測資料修正時，實測資料最少應有 3 年以上，同時必須包含颱風時之波浪資料。但是若觀測資料中有數十年 才會發生之異常氣象，其值又大於推算值，亦或係屬非常特殊之時候，可以參考自然條件相近之鄰近地區實測資料加以取捨。
 - (3) 若該地區全無實測資料亦或係屬非常特殊之情況，可參考自然條件相似之附近地區實測資料。
 - (4) 若在氣象資料推算期間以外之時期，有特別異常紀錄之時，須對此加以考慮。
 - (5) 以假設颱風進行推算時，須充分檢討颱風過去之規模、颱風路徑等，並對此種颱風之發生概率加以檢討。若以

實測資料推算深水波時，由於實測波高受折射或淺化之影響，因此須除以折射係數或淺化係數，換算成深海波高，此時亦須考慮波向之變化。

- (6) 由實測資料所得示性波高在實測地點水深之 0.5 倍以上時會由於受碎波之影響，因此應先進行深海波之推算，由推算所得之深海波，考慮波浪之變形，計算實測地點之示性波再與實測值相比以確定推算值之準確性。
 - (7) 設計深海波，應根據再現期與結構物之使用年數加以求取，但發生概率應如何取捨，受結構之功能、重要性、投資效果所影響通常很難決定，須依各個場合，由主管工程人員依實際狀況而決定，在此，所謂發生概率為在使用期間內發生波浪較大於某個假設再現期波高，至少出現一次之概率。
 - (8) 決定設計深海波時應參考設計對象結構物相鄰之現有結構之外力 及以往相關災害紀錄。
2. 如港址颱風侵襲機會甚低，季風設計波浪可能大於颱風設計波浪，由於兩種波浪極端值出現機率截然不同宜分別估計颱風與季風時設計波浪後，取其大者。
 3. 深海波之各種因素，須以帶給結構物影響之 16 方位之各方向分別加以檢討後再決定。但若波高明顯甚小，對結構物之影響甚小之方位可以除外，此時波向以不規則之成份波內最大能量之波浪方向為主方向。

4.2.4 求設計波浪各要素之程序

1. 依設計深海波之決定方針決定深海波，同時考慮波浪之折射、繞射、淺化以及碎波等變形而採用對結構物亦或其背後設施最不利作用之波浪。
 - (a) 若無合適之推算法可同時考慮波浪之折射、繞射、淺化、碎波變形等，則以下法決定設計波。首先，考慮、波浪

之折射、繞射等平面地形之影響求取相當深水波，再對此相當深水波考慮淺化及碎波之波高減衰效果，而決定設計目標地點之設計波各要素。

- (b) 隨設計對象結構物、波向及週期亦有可能成為重要因素，應對此詳細檢討。
 - (c) 以各來襲方向深海波所求得目標地點之波高，須將其波向在適當的範圍內加以修正，而以其中最不利條件之波向作為設計目標地點之波向。
2. 目標地點之特殊條件，例如若有由外部產生之反射波亦或轉角部所致波高增加之影響時亦應考慮。
 3. 對於以上所求之波浪，求取波力、越波以及其他對結構物之波浪作用。
 4. 依波浪作用之各條件進行檢討，由於潮位低時，亦有可能波力為最大，因此須對假想之各種潮位加以檢討。
 5. 以上之計算應對深海波之各個來襲方向進行，而以波浪作用為最大或帶給結構物或其背後設施最不利之作用者為設計波。

4.2.5 碎波

1. 當水深為相當深水波高之大約 3 倍以下之地點，應考慮、碎波所致波高之變化。
2. 碎波所致波高之變化，應考慮波浪之不規則性，並可依圖 4.3 與圖 4.4 求取，這些圖為合田依碎波之理論模式，計算得到之不規則波波高變化。
3. 圖中點線右側區域之波高變化，可依圖 4.5 淺化係數加以計算，點線左側區域，由於因碎波所致波高之變化顯著，因此須以此圖決定波高。

4. 海底坡度取水深與相當深水波高之比 $\frac{h}{H_0}$ ，在 1.5~2.5 之範圍內之平均坡度為準。
5. 圖中波高比值雖分得很細，但實際之波浪其 $\frac{H_{1/3}}{H_0}$ 之比的絕對值因讀數時可能有 ± 0.1 之出入，故須充分加以考慮。
6. 水深在相當深水波高之 0.5 倍程度以下之地點，海流之能量遠較波浪產生之水位變化影響為大，因此在計算此地點作用於結構物之波力時，希望能採用水深為相當深海波高 0.5 倍地點之波高。
7. 通常以碎波理論模式計算波高變化時，須以電腦進行計算，但是考慮現象之變動性及綜合之精確度，可以採用以下之簡便公式計算波高變化：

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' & (h/L_0 \geq 0.2) \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0', K_s H_0'\} & (h/L_0 < 0.2) \end{cases} \quad (4.1)$$

式中

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 0.028(H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20(\tan \theta)^{1.5}] \\ \beta_1 &= 0.52 \exp[4.2 \tan \theta] \\ \beta_{\max} &= \max\{0.92, 0.32(H_0'/L_0)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

淺化靜數 K_s 可以圖 4.5 求取， $\tan \theta$ 為海底坡度，同樣的，最高波 H_{\max} 之概略式如下：

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H_0' & (h/L_0 \geq 0.2) \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0', 1.8K_s H_0'\} & (h/L_0 < 0.2) \end{cases} \quad (4.3)$$

式中

$$\beta_o^* = 0.052(H_o'/L_o)^{-0.38} \exp[20(\tan \theta)^{1.5}]$$

$$\beta_{1'}^* = 0.63 \exp[3.8 \tan \theta]$$

$$\beta_{\max}^* = \max\{1.65, 0.53(H_o'/L_o)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\} \quad (4.4)$$

8. 如果碎波帶內示性波高之最大值 $(H_{\frac{1}{3}})_{\text{peak}}$ 為碎波波高的話，碎波指標曲線可以用圖 4.6 表示另外如果示性波高為最大時之水深 $(h_{\frac{1}{3}})_{\text{peak}}$ 為碎波水深的話，碎波水深可用圖 4.7 表示。

9. 圖 4.8 為規則波之碎波臨界波高，根據此圖可計算採用規則波之水工模型試驗等之碎波界限波高中之曲線為式 2-1-5 之近似值。

$$\frac{H_b}{L_o} = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_o} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right] \right\} \quad (4.5)$$

式中 $\tan \theta$ 為海底坡度

另外圖 4.7 為第 1 次碎波點之臨界波高在水深較淺處，由於碎波使水位上昇水深增加因此碎波帶內臨界波高推定時，須考慮水位上昇之影響。

4.2.6 設計波高及波長

設計計算所採用之波高 H 及波長 L 為最大波之波高及波長。最大波之波長為與示性波週期相對應之波長，波高應採用以下之最大波高。

1. 最大波高不受碎波之影響時

$$H_d = H_{\max} = 1.8 H_{1/3}$$

式中： $H_{1/3}$ ：堤前水深之性波高(m)

2. 最大波高受碎波之影響時 H_d =(考慮不規則碎波變形之 H_{max})，但此時之最大波為堤前方海側 5 倍 $H_{1/3}$ 距離處之水深 h_b 處之值。

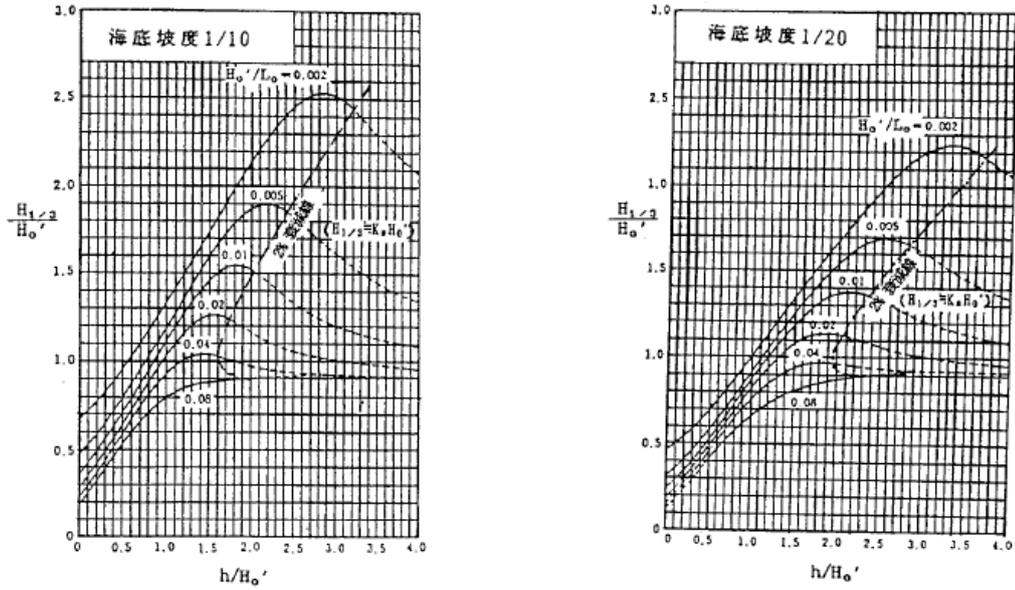


圖 4.3 碎波帶內示性波高計算圖

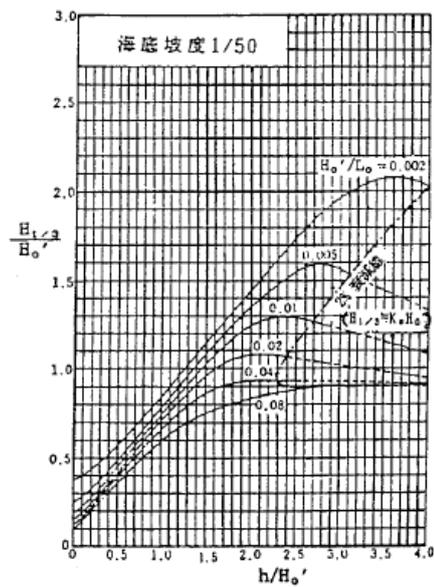
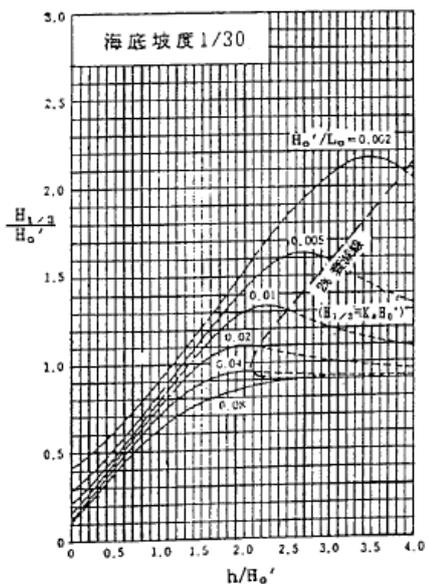


圖 4.4 碎波帶內示性波高計算圖

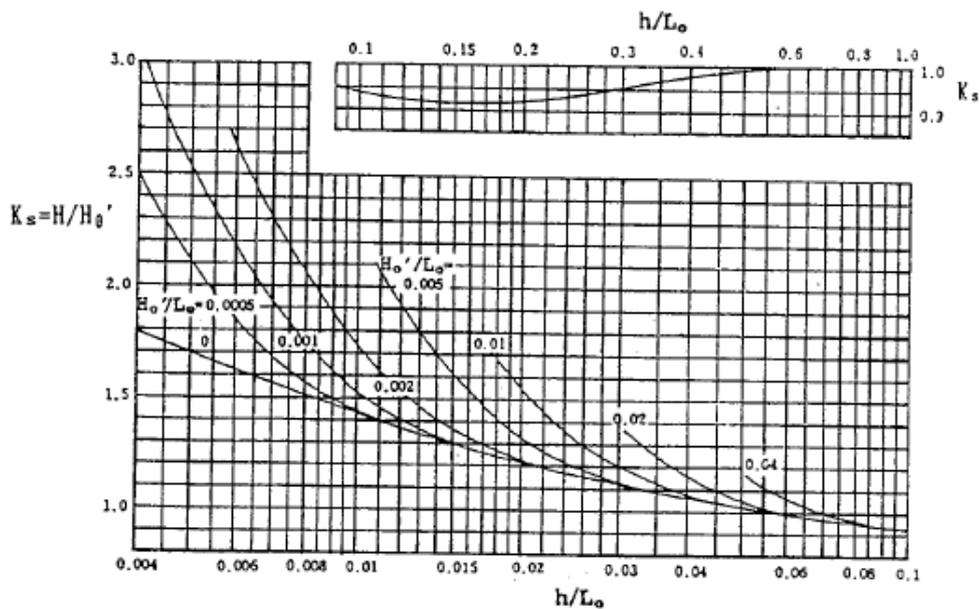


圖 4.5 淺化係數計算圖

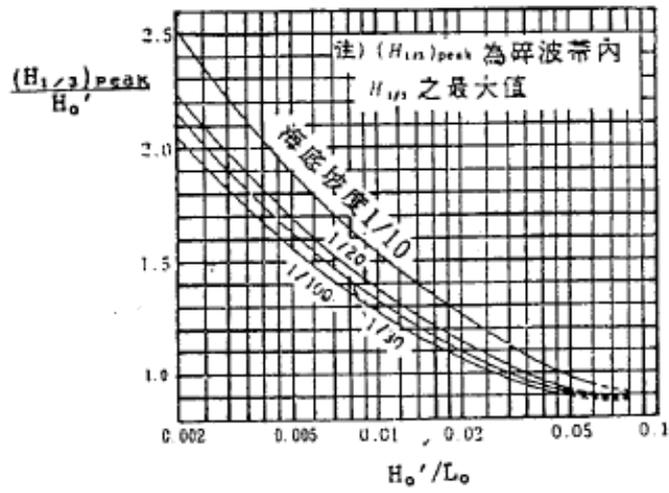


圖 4.6 碎波帶內示性波高最大值計算圖

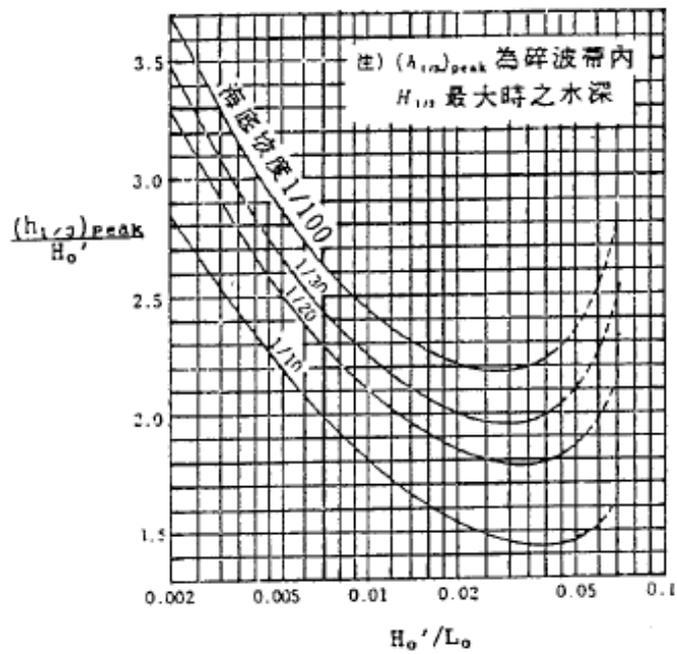


圖 4.7 示性波高最大值出現水深計算圖

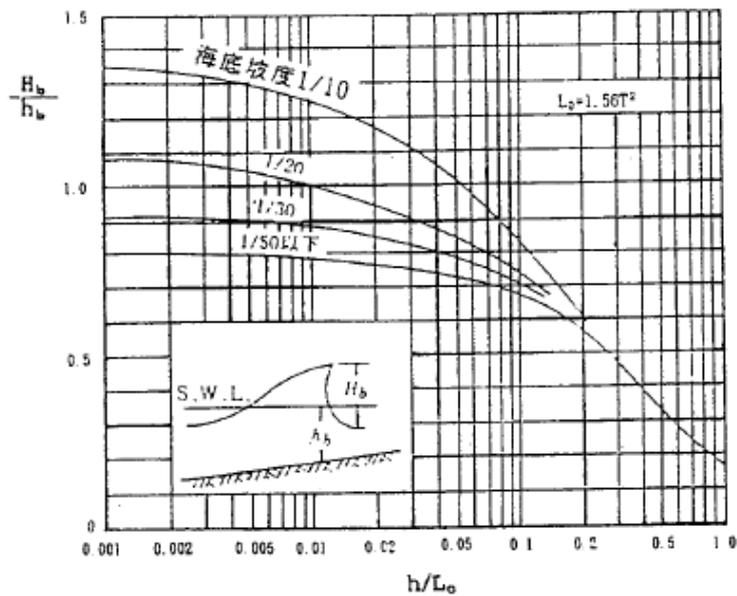


圖 4.8 規則波之碎波連界波最高計算圖

4.2.7 水深及地盤條件

水深為決定防波堤之設置深度，因此最好能有不同時期之水深圖，以便掌握該地區之水深變化；地盤條件影響基礎之安定，應作充分之地質調查。

防波堤之設置水深，對結構物之型式、施工性及經濟性有很大的影響，因此在設計時應有充分的水深測量資料。地盤則以堤身安定所須之地盤強度與計算堤體下陷之壓密特性較為重要，在設計時海底深度、地層斷面、各層單位體積重量、內摩擦角、粘著力、預壓荷重、體積壓縮係數、壓密係數等應由土壤試驗決定。若缺乏鑽探資料易造成設計條件之錯誤判斷，因此在進行土質調查時，所需之鑽孔數及鑽孔深度必需注意。

1. 地震

水深較深時，應考慮地震之影響。

2. 其他

防波堤構築後若有可能產生沖刷、侵蝕、淤積時，應考慮可能產生的影響。此外，在水深較深時應考慮地震之影響。必要時應考慮風壓、土壓、地震力、船隻之牽引力、撞擊力、漂流物之撞擊力、水流等之影響。另外計算時所採用之摩擦係數、單位體積重量、容許應力等如下：

表 4-2 材料間靜摩擦係數

材 料	靜止摩擦係數
混凝土與混凝土	0.5
混凝土與岩層	0.5
水中混凝土與岩層	0.7~0.8
混凝土與拋石	0.6
拋石與拋石	0.8
木材與木材	0.5(乾)~0.2(濕)

表 4-3 材料之單為體積重量

(單位：t/m³)

材 料	單位體積重量
鋼	7.85
無筋混凝土	2.3
鋼筋混凝土	2.45
瀝青混凝土	2.3
石材	2.6
砂、小石子、塊石(乾)	1.6
砂、小石子、塊石(濕)	1.8
砂、小石子、塊石(飽和狀態)	2.0
砂、小石子、塊石(水中)	1.0

表 4-4 容許應力之提高係數

種類	荷重及外力之組合	提高係數
無筋混凝土及	考慮地震之影響時	1.33
鋼筋混凝土	考慮風力之影響時	1.25

表 4-5 混凝土容許應力

		容許應力(kg/cm ²)				
		公 式	混凝土設計強度(kg/cm ²)			
			fc'=140	fc'=175	fc'=210	fc'=280
彈性模數比	n	$\frac{2.04 \times 10^6}{14900\sqrt{f_c'}}$	12	10	9	8
撓曲應力：fc						
最外纖維壓應力	fc	0.45fc'	63.0	78.8	94.5	126.0
最外纖維拉應力(用於純混凝土基腳與)	fc	0.42 $\sqrt{f_c'}$	4.97	5.56	6.09	7.03
剪應力：v(用以衡量斜拉力距離支承面d處)						
樑無腹筋者	ν_c	0.29 $\sqrt{f_c'}$	3.43	3.84	4.20	4.85
格柵無腹筋者	ν_c	0.32 $\sqrt{f_c'}$	3.79	4.23	4.64	5.35
構材有垂直或斜向腹筋或彎起腹筋與垂直肋筋併用者	ν	.33 $\sqrt{f_c'}$	15.7	17.6	19.3	22.3
版與基腳(周邊剪力)	ν_c	0.53 $\sqrt{f_c'}$	6.27	7.01	7.68	8.87
承壓應力：fc						
全部面積承壓		0.25fc'	35.0	43.8	52.5	70.0
1/3或以下局部面積承壓*		0.375fc'	52.5	65.6	78.8	105.0

*註：承壓面積在1/3以上而非全部時，容許承壓應力可按比例計算。

資料來源：中國國家標準CNS 3035〔鋼筋混凝土建築設計規範〕

4.2.8 斷面型式

選擇防波堤之斷面型式時，應考慮各種斷面型式之特性，且必須就下列各項做比較研究後決定之。

- (a) 佈置條件
- (b) 自然條件
- (c) 利用條件
- (d) 施工條件
- (e) 工程費
- (f) 工期
- (g) 重要性
- (h) 材料供應條件
- (i) 維修之難易

重力式防波堤之種類可依斷面型分類如下：

1. 斜坡堤

斜坡堤是以塊石或消波塊堆成者，堤身兩側成斜面，使波浪衝上斜坡時受斜坡表面凹凸不平之阻礙及堤身之孔隙使波能減衰，並阻其侵內堤內水域，以維護水面穩靜。斜坡堤依所用材料可分為下列各類：

(1) 拋石斜坡堤

因受石塊大小限制，僅適用於波力較小之處。如用於波力較大之處，在波面土應加放消波塊保護層。

(2) 拋消波塊斜坡堤

採用重量大之消波塊可獲得堤身需要之安定度。施工時需要廣大之消波塊製作場地。

2. 直立堤

壁面垂直安放於海底之結構物，最主要為反射波之動能，此種型式稱為直立堤。

各種直立堤構造之特性：

(1) 沉箱式直立堤

此種以沉箱作為主體，且成為沉體之結構物，故對抗波力作用甚強。沉箱可以乾工法製造，施工確實，故可縮短在海上之工作天。沉箱內可用廉價之材料填充，以節省工程費。缺點為需沉箱製造設備，大型起重機等之巨大費用。同時沉箱之下水、搬運、安放等受水深之限制。又氣候不良天數較多之處其工作天受限制。沉箱安放後應在短時間內填充並澆築封頂混凝土，否則易受波浪之衝擊而破壞。又施工較複雜，如基礎之整平、拋石、沉箱安放、填充砂料、澆築上部混凝土等各項工程項目繁多。

(2) 方塊式直立堤

該型以混凝土方塊疊積成為主體。優點為施工確實與容易，施工設備亦簡單。缺點為方塊與方塊間不能完全結合成為一體，比沉箱缺乏整體性。施工時海上工作期間較長，需要製造大量方塊之工地。如最下層不成為一體時，地盤反力之分佈實際如何不甚明瞭。

(3) 空心方塊直立堤

用中空型塊，塊體內填充石料或混凝土即成為直立堤。優點為底部摩擦較沉箱大，抗滑動安全率高。堤體內用價廉材料填實，可節省工程費。缺點為缺乏整體性，又對開底直立堤之計算方法尚未確定。

(4) 混凝土單塊直立堤

係現場澆注之混凝土單塊堤。優點為可成為堅強之結構物，基礎雖不平，現場亦可施工，不需要複雜之施工設備。惟該堤僅使用於地層堅固之處，故檢定岩質地盤甚為重要，因疏忽此點而肇致災害之實例甚多。又對水中混凝土之施工不易切實控制，易生不良之後果，故應特別注意。缺點為如將來需要搬移時，不能再加利用。該型直立堤不能作大型防波堤之用，僅用於水深較淺或規模較小之防波堤。

3. 合成堤

合成堤為上部直立堤下部拋石堤所組合而成。直立堤部份放置於拋石堤之頂部，拋石堤同時作為直立堤部份之基礎。與波高相比斜坡拋石面較淺時，與斜坡堤之功能相近。反之，水較深波高較小則與直立堤之功能相似。因兼具拋石堤及直立堤之優點，適用於水深波力大之處所。合成堤依直立堤部份型式可分為下列各種：

- (1) 沉箱式合成堤
- (2) 方塊式合成堤
- (3) 空心方塊合成堤
- (4) 混凝土單塊合成堤

4. 消波塊覆蓋堤

直立堤及合成堤前面拋消坡塊時，即成為消波塊覆蓋堤。

5. 直立消波塊堤

此為將一般之混凝土單塊製作成各種型式之直立消波塊所堆置而成，亦有單體者，由於型式種類很多，因此須充分調查其消波特性而使用。

6. 消波沉箱堤

將沉箱前牆開孔並設置一消波室即成消波沉箱堤，主要功能為減輕反射及堤體重量。

7. 上部斜面沉箱堤

將沉箱高於水面部份及胸牆混凝土改成斜面即成上部斜面沉箱堤，主要係利用作用於直立堤之波力與斜面之波力不同時發生以減小作用於堤體之水平力，因上市安全性較高，但相對越波所致港內傳遞波較大。

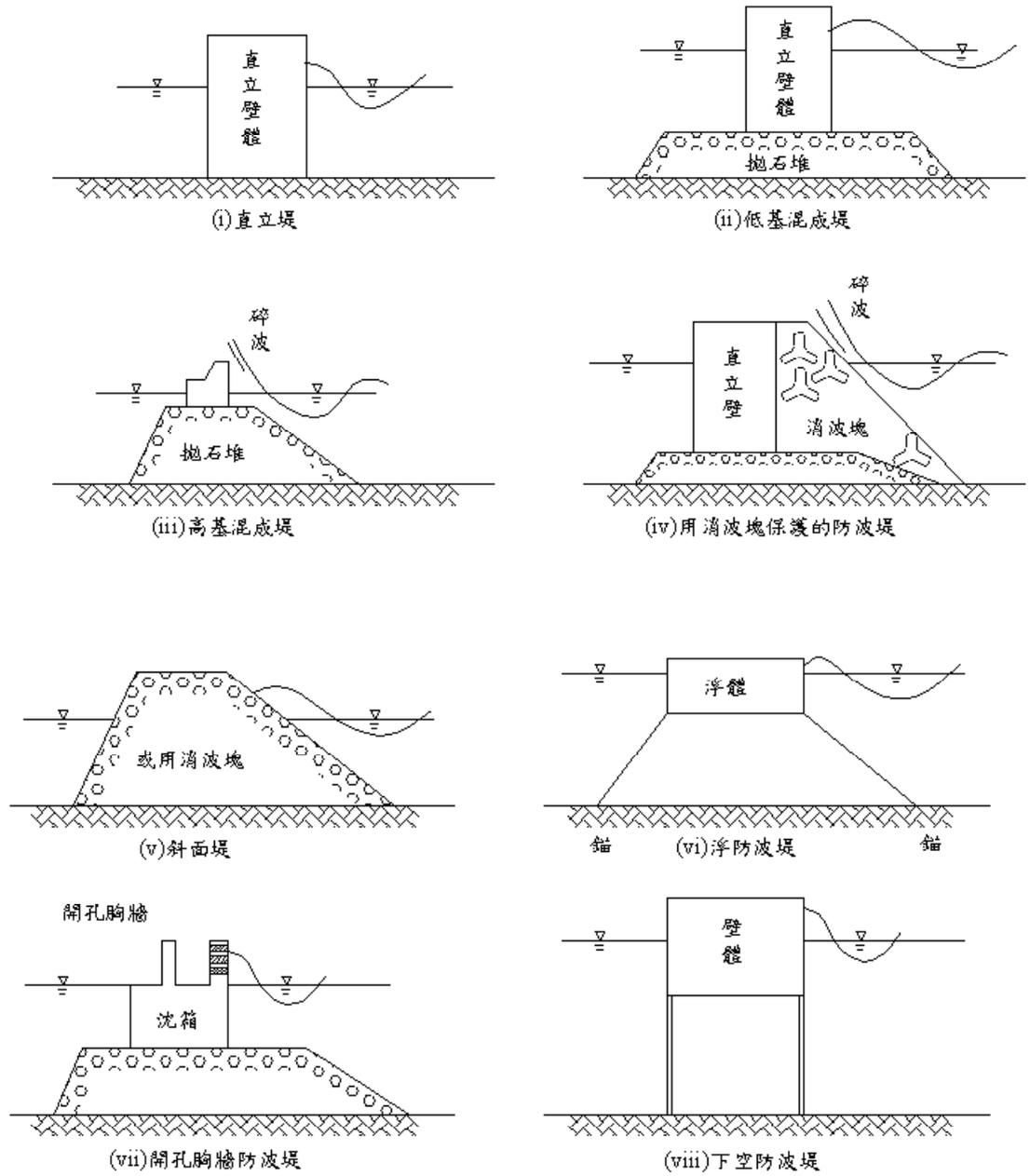


圖 4.9 各種不同型式之防波堤示意圖

4.3 直立式防波堤設計基準說明

基於目前規劃之波能轉換系統，其所依附之港灣構造物將以具直立岸壁防波堤為主，本節中節錄直立式防波堤之設計基準作為參考，其他型式防波堤及進一步之詳細內容則請酌參附件一 3.3.3 直立堤。

4.3.1 基本斷面之假定

1. 堤頂高

直立堤之堤頂高應在朔望平均高潮位加上示性波高 ($H_{1/3}$) 之 0.6 倍以上。

- (1) 堤頂高程應考慮港內之利用，所需要之靜穩度、利用天數以及背後港灣設施之保護等而決定。
- (2) 現有防波堤大多以下列數值為標準而決定堤頂高：
 - (a) 大型船出入之港灣，若防波堤背後水域廣闊，且容許少量之越波，同時不需考慮暴潮之影響時，堤頂高取朔望平均高潮位上 $0.6H_{1/3}$ 即可。
 - (b) 防波堤背後之泊地停泊船身自為小型船隻，而且泊地面積狹小，須阻止越波之侵入時，堤頂高取朔望平均高潮位上 $1.25H_{1/3}$ 。
- (3) 大型船隻出入之港灣，即使防波堤背後水域廣闊，若接近設計波之波浪來襲頻繁，且持續時間長，以朔望平均高潮位上 $0.6 H_{1/3}$ 之堤頂高，因越波之影響將使港灣之活動受限，這種情況，最好堤頂高能較朔望平均高潮位上 $0.6 H_{1/3}$ 為高。
- (4) 在須考慮、暴潮影響之港灣，可由過去之記錄，將朔望平均高潮位加上暴潮偏差作為設計潮位以求取堤頂高。

(5) 為保護海水浴場之防波堤或其他如為取水使用等特殊用途之防波堤，應充分了解防波堤設置之目的，決定頂高此時採用較本章為低之值亦可。

2. 堤面場鑄混凝土厚度

波高 2 公尺以上時，堤面場鑄混凝土厚度至少應有 1 公尺以上；波高小於 2 公尺時，堤面場鑄混凝土厚度最少須在 50 公分以上。

雖然決定直立堤堤面場鑄混凝土厚度之方法仍未確立，但如太薄將會受損，初步值可經由實例決定。堤體為方塊時上部混凝土有壓頂作用，對防止方塊之移動甚為有效，故宜採用重實之混凝土。

3. 堤體寬度

堤體所需寬度依據作用波壓力而決定。

4. 其他

方塊型直立堤最上層之方塊、空心方塊以及沉箱頂部之高度為使於堤面施工，至少須在平均水面以上。

沉箱頂之高度較低時，沉箱安放後填砂以及吊放混凝土蓋版，頂部混凝土之打設作業將受限制，因此通常取朔望平均高潮位以上之高度。

4.3.2 外力計算

防波堤之安定計算時，須考慮波力、靜水壓、浮力、自重等外力，必要時亦應檢討地震力。以外力而言，除波力之外，隨需要應考慮風力、地震力、動水壓、漂流物之衝撞力、土壓等。堤頭設置燈塔時，須考慮作用於燈塔之風壓力、地震力。

A. 波力

作用於防波堤之波力應考慮防波堤之型式、海底地形、水深以及波浪之各項因素，而以水工模型試驗或以計算公式加以計算，此時須充分考量波浪之不規則性。

以下本文所稱水工模型試驗應以最大比例尺為之，且不得小於 1/49。安定計算時，由於對直立部最危險之波浪與計算覆蓋材料重量時所採用之波浪有時不一樣，須予注意。

對潮位而言，由於對直立部最危險之潮位與計算覆蓋材料重量時所採用之潮位有時不一樣，須予注意。

隨結構物之型式，波力大致可分以下幾種：

1. 作用於壁狀結構物之波力。
2. 作用於覆蓋石（塊）之波力。
3. 作用於海中結構之波力。
4. 作用於水面附近結構物之波力。

因各種結構物型式，其作用波力之計算不同，因此須依實際狀況採用合適之計算法。某些結構物之作用波力尚不明確，宜以模型試驗加以檢討。

實際之波浪，其波高週期均不規則，隨著水深或海底地形，有非碎波或碎波後之波浪作用在結構物上，波力計算時，應依設計條件，以帶給結構物最嚴重影響之波浪來探討，此時須充分考慮波浪之不規則性以及因斷面型式對波力產生之特性。

通常對波高而言愈大波高之波浪，帶來愈大之波力，因此，以到達結構物之不規則波群中之最高波作為波力估算之依據即可，但對作用於坡面之護坡石塊等之安定性，剛性較低之柱狀結構物以及浮體結構物上之波力，則應考慮不規則波浪連續作用之影響。

以模型試驗進行波力之檢討時，須充分考慮、結構物之破壞情況，而採取適當之測定法，另外亦須充分考量現場波浪之不規則性，特別是以規則波進行試驗時，原則上須包含對最高波之檢討。

1. 作用於直立壁之波力

作用於直立壁之波力，因受潮位、水深、海底地形、結構物之斷面形狀、法線形狀等而改變，因此須予考慮而加以適當計算。特別海底坡度陡處或位於高堤基上面之直立壁，由於會產生強大衝擊波壓之作用須充分留意其發生條件以計算波力。

(1) 影響直立壁波力之因素

影響作用於直立堤波力之主要因素為波浪之週期、波高、波向、潮位、水深、海底坡度、堤基高程及堤基寬度、堤基坡度、直立堤之堤頂高以及堤底水深等。此外，特別在延長線上有轉角時，往往會受較直線部較大之波力，須特別考慮、此法線形狀之影響。另外，直立堤前面以消波塊覆蓋時，消波塊之特性，頂端高程及寬度等均有影響。

(2) 波力之種類

作用於直立堤之波力，就波浪之形態而言，可分為重複波力、碎波後之波力等，但其變化應為連續性者。重複波力為與水深相比波高較小之波浪所產生，波壓之時間變化較緩，隨著波高之增大，作用之波力亦大。碎波後之波力通常位於直立堤稍微海側破碎之波浪，將會產生最大之波力，因此除在非常淺之區域外，在直立堤前方碎波之碎波力較距直立堤很遠處碎波之作用力為大，特別在坡度很陡之海底面上之直立堤，或坡度雖緩但堤

基很高之直立堤土，碎波作用時，會產生強大之衝擊碎波壓，應特別留意。

2. 作用於直立壁之重複波力及碎波波力

(1) 合田公式

作用於直立壁之最大波力以及當時之揚壓力應以下列之方法加以計算。

(a) 波峰作用時前面波壓

在靜水面之波壓為最大值 P_1 ，靜水面上 η^* 高度上波壓為0，水底下波壓為 P_2 之直線分佈，考慮直立壁底面至頂端為止之波壓分佈詳如圖 4.10 所示。

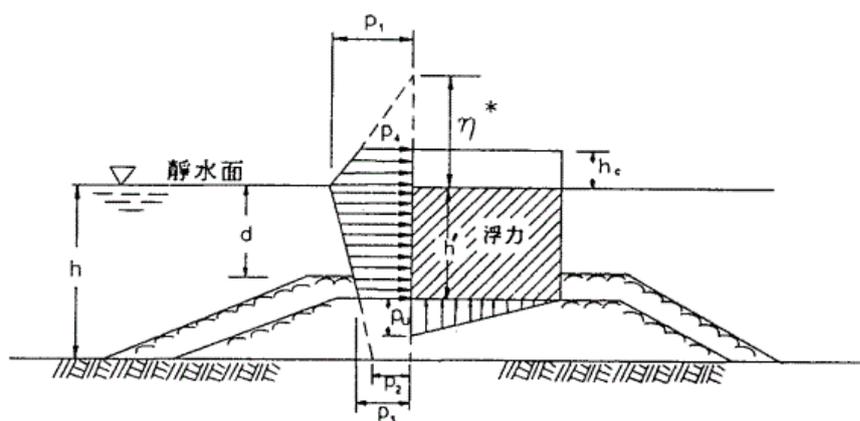


圖 4.10 波壓分佈圖

在此所表示之波力計算公式為合田根據波壓試驗結果以及對現場防波堤之適用成果加以考察，並加上修正波向效應所提出之公式稱為合田公式。依此，不須區別重複波或碎波，可直接求得作用於直立壁之波力。但對坡度很陡之海底面上之直立壁或高拋石基礎上之直立壁，強大衝擊波壓作

- 用之條件來說，對波力之估算可能偏低，因此在應用時，對衝擊波壓發生之危險性須予以留意。
- (b) 波谷作用時當堤面波谷作用時，所產生之負波力，可依據水工模型試驗亦或相關之計算公式加以計算。

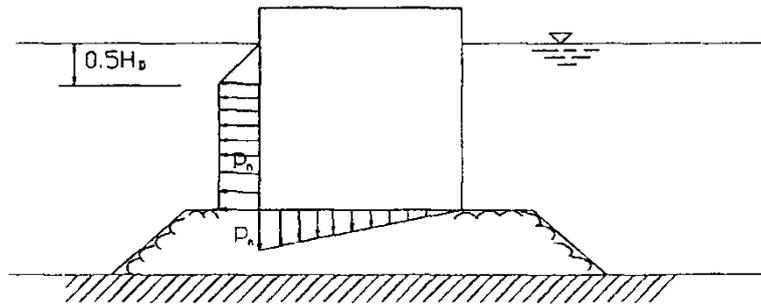


圖 4.11 負波壓分佈

- (c) 揚壓力作用於直立壁底面之揚壓力成前趾 P_u 後趾為 0 之三角形分佈。

$$P_u = 1/2(1 + \cos\beta) \alpha_1 \alpha_3 W_0 H_d$$

此時之浮力僅考慮靜水中之體積部份。當沉箱有基腳時，在波浪之作用側基腳之上面有往下作用之波力以及底面前趾有 P_u 後趾為 0 之揚壓力作用，但儘管如此，通常其合力與無基腳時之揚壓力並無很大之差別，因此，如圖 4.12 所示，可忽視基腳而以無基腳之情況計算揚壓力。

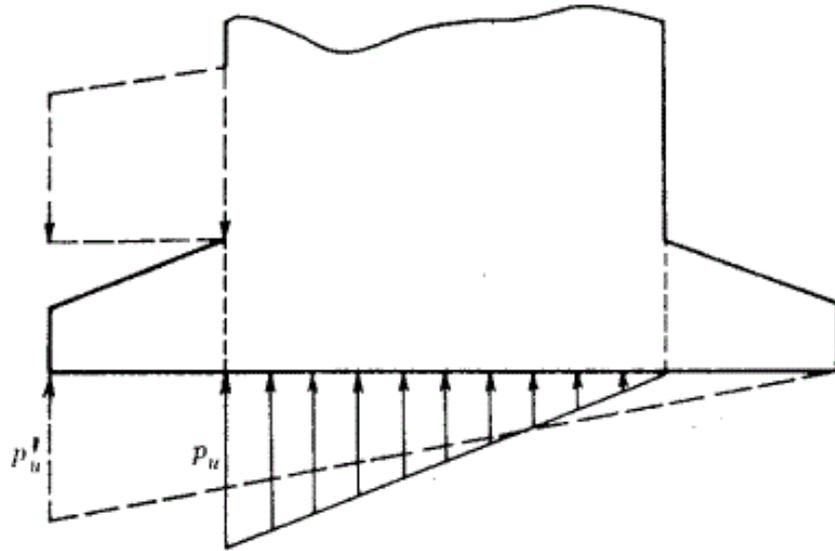


圖 4.12 有基腳時之揚壓力

3. 衝擊碎波力

當衝擊波有可能發生時，原則上以水工模型試驗進行檢討。對於有可能產生強大衝擊波壓的斷面形狀及構造應儘可能避免採用，在海底坡度較陡無法避免之時，應加上適當之消波塊以緩和波力之作用。

4. 作用於直立消波塊堤之波力

作用於直立消波塊堤之波力同作用於直立消波沉箱之波力。

- (1) 作用於直立消波塊堤之波力，如圖 4.13，浮力為考慮靜水時之排除體積。作用於直立消波塊各段以及上部結構之揚壓力為考慮、堤體前面揚壓力計算面位置為與波力強度相等之強度，堤體後端為 0 之三角形分佈。
- (2) 斜向入射波之波力減小效果，特別在未有試驗驗證時，不予考慮。

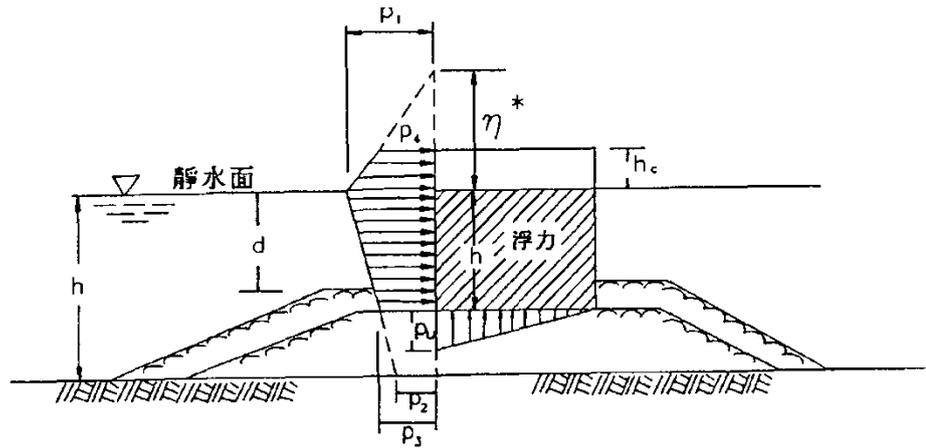


圖 4.13 安定檢討時之波壓分佈

B. 靜水壓

堤內外之靜水面有高差時，應考慮相當於水位差之靜水壓。

C. 浮力

靜水面以下之堤體應考慮、浮力，另外，堤內外之靜水面有高差時，將兩側之水位相連，浮力為作用於該連線水面以下之堤體。

D. 自重

堤體之自重，以假設斷面各材料之單位體積重量加以計算。

E. 地震力

地震時之動水壓，以考慮堤體之傾覆以及基礎承载力之安定計算時為標準。

1. 地震時之動水壓，依下法計算。

在水中之結構物及結構物內部部份空間或全部盛以水時，須考慮地震時的動水壓力。

- (1) 動水壓力之計算，須考慮結構物之特性，結構物之剛性，整體之安定條件等。
- (2) 結構物內部的空間盛以液體時，須考慮該液體之動態壓力。
- (3) 現在所用的動水壓力計算法係依據定常振動所求得的動水壓力。若考慮其他外力等的相位關係時，設計上須採用不規則振動求取其動水壓力。

2. 作用於堤體之動水壓力

4.3.3 安定計算

防波堤之安定計算主要包括了直立部之安定計算，堤基部之安定計算，以及整體堤防結構之安定計算。以下僅就直立部之安定計算作一說明，其餘請酌參附件。

A. 直立部之安定計算

直立堤之堤體、合成堤之直立部、斜坡堤之上部結構、消波塊覆蓋堤之直立部等之滑動、傾覆及底面承载力之檢討應以滑動之安全率，在波壓作用時 1.2 以上，地震時 1.0 以上為標準；另外，傾覆之安全率在波壓作用時為 1.2 以上，地震時為 1.1 以上為標準。

以模型試驗能確認堤體之安全時，滑動之安全率小於 1.2 亦可。

1. 滑動

堤體之滑動檢討必須滿足下式：

$$F \leq \frac{f_* \cdot V}{H}$$

上式中

v ：作用於堤體之垂直合力(t/m)

H ：作用於堤體之水平合力(t/m)

f_* ：堤底與基礎之摩擦係數

F ：安全係數，平常時 1.2 以上，地震時 1.0 以上

2. 傾倒

堤體之傾倒檢討必須滿足下式：

$$F \leq \frac{V \cdot l_V}{H \cdot l_H}$$

上式中.

l_V ：作用於堤底之垂直合力 (t/m)

l_H ：作用於堤體之水平合力(t/m)

V ：堤體後趾與堤體垂直合力作用線間之距離(m)

H ：堤體底面至水平合力作用線間之高(m)

F ：安全係數，平時為 1.2 以上，地震時為 1.1 以上

4.4 波能擷取系統與防波堤共構之考慮要點

本研究中研議之波能轉換系統，初始構想中即將其納入港灣構造之防波堤系統中，因此在設計及規劃時，必須能符合港灣設計之相關規範。在前期相關計畫中，雖未完全考慮港灣構造與波能轉換系統納入港灣構造為一體時，在規範使用上之相容性，但經初步的結構安全分析以及水工試驗之結果發現，波能轉換系統納入港灣構造物後，對

於港灣構造物並不會造成安全上之顧慮。但港灣設計時因考慮安全因素使用之設計波浪週期通常較長，而波能轉換系統為求轉換之效能，則以日常波浪做為設計基準，兩種型式的結構之間確實存在相容性之問題。

4.4.1 浪條件之考慮

為了符合港灣構造設計基準，目前初步規劃波能結構系統之構造安全基準將與所附屬之結構物一致。另外亦可將置入波能轉換系統之防波堤視為另一種型式之防波堤，設計時、功能性分析則分別考慮兩種結構之滿足條件，但在安全性分析時則一體考慮。因此、例如波浪條件在波能轉換系統設計時，將分別有功能性分析時之波浪條件，以及安全性分析時之波浪條件。功能性分析時之波浪條件將以日常波浪做為設計基準，而安全性分析時之波浪條件原則上將與防波堤設計時之回歸週期波浪條件一致。

4.4.2 外力條件

當防波堤結合了波能轉換系統後，基本上所有的環境外力條件亦將與防波堤設計時所要求的相同；除了靠海側波浪作用的方式與傳統防波堤有些許差異之外。其中包括碎波之考慮，因波浪作用在波能轉換系統氣室內，並在其間產生震盪作用，在轉換成機械能後進而消耗波浪之能量。原則上經過適當設計，結合波能轉換系統之防波堤，其反射波能量將大幅降低。

4.4.3 結合波能轉換系統防波堤安定性檢核

由於防波堤安定性檢核時，主要以靜力分析為主，當防波堤結構結合波能轉換系統後，其分析方法不至於改變，固可以利用同樣的分析方法分別進行直立壁體之安定性檢核、堤基安定檢核，以及整體結構之安定檢核。

1. 滑動

堤體之滑動檢討必須滿足下式：

$$F \leq \frac{f_* \cdot V}{H}$$

上式中

v ：作用於堤體之垂直合力(t/m)

H ：作用於堤體之水平合力(t/m)

f_* ：堤底與基礎之摩擦係數

F ：安全係數，平常時 1.2 以上，地震時 1.0 以上

2. 傾倒

堤體之傾倒檢討必須滿足下式：

$$F \leq \frac{V \cdot l_V}{H \cdot l_H}$$

上式中.

l_V ：作用於堤底之垂直合力 (t/m)

l_H ：作用於堤體之水平合力(t/m)

V ：堤體後趾與堤體垂直合力作用線間之距離(m)

H ：堤體底面至水平合力作用線間之高(m)

F ：安全係數，平時為 1.2 以上，地震時為 1.1 以上

以下為本研究之波能轉換合成防波堤系統之安定檢核分析，合成防波堤之尺寸如圖 4.14 所示，本案例分析時使用兩種外力；

第一為傳統防波堤設計時所使用之合田公式(Goda)計算之外力分布，使用合田公式時之假設條件為，前牆開口處不受力；但本研究仍假設前牆開口處受力。第二為利用數值分析方法(Ansys)考慮氣室外壓力之變化。兩種外力計算所得之分布情形如圖 4.15 所示，兩種外力作用於波能轉換合成防波堤所受波浪立之分佈如圖 4.16。

合成防波堤系統之安定檢核分析之過程，依照前述規範直立堤之分析，必須滿足頃倒分析及滑移分析之檢核，以下則為分析過程。

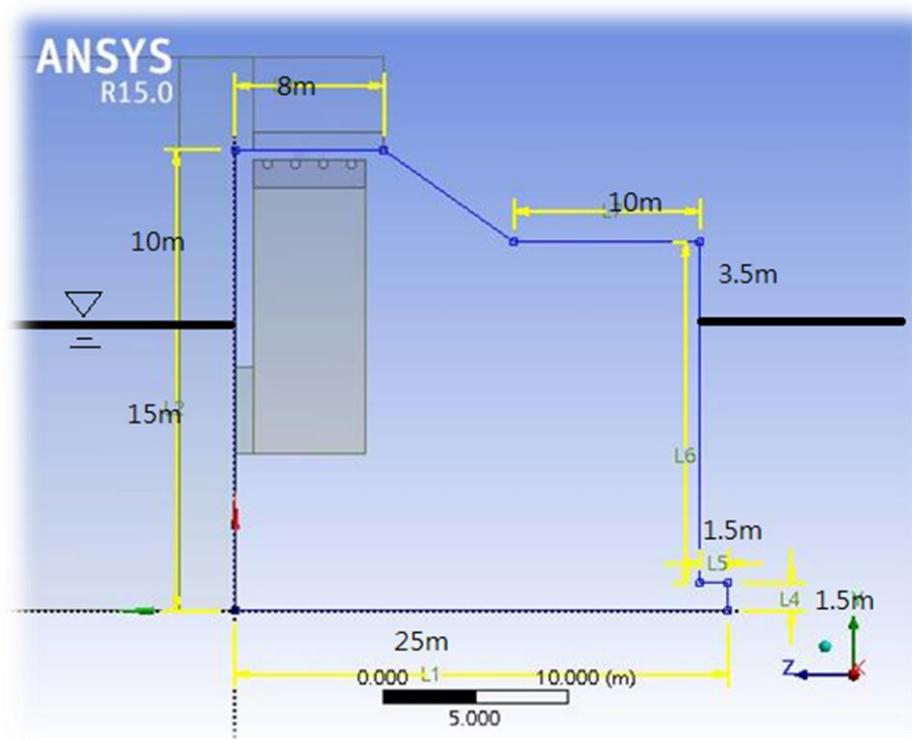


圖 4.14 波能截取合成防波堤系統尺寸圖

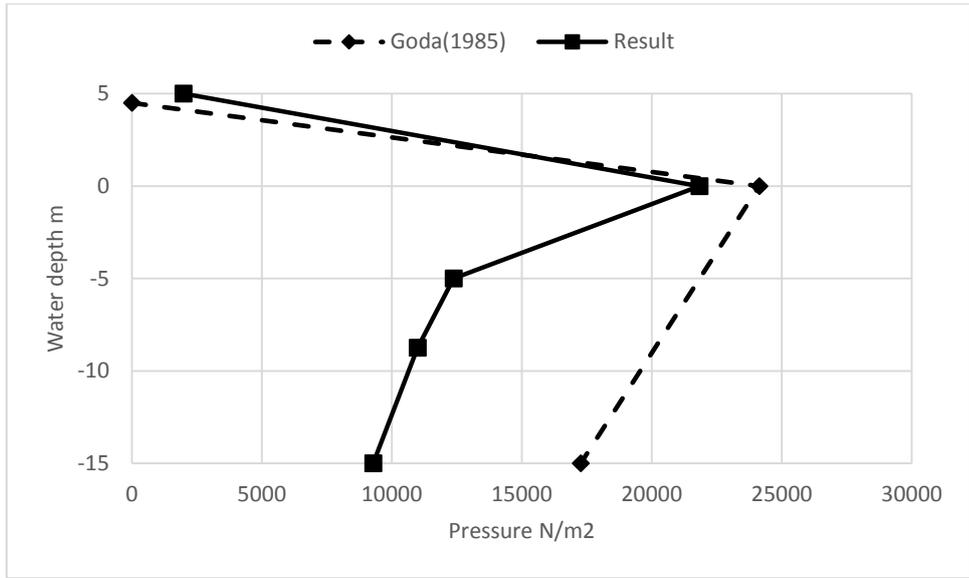


圖 4.15 波浪作用於波能擷取合成防波堤系統力量分佈圖

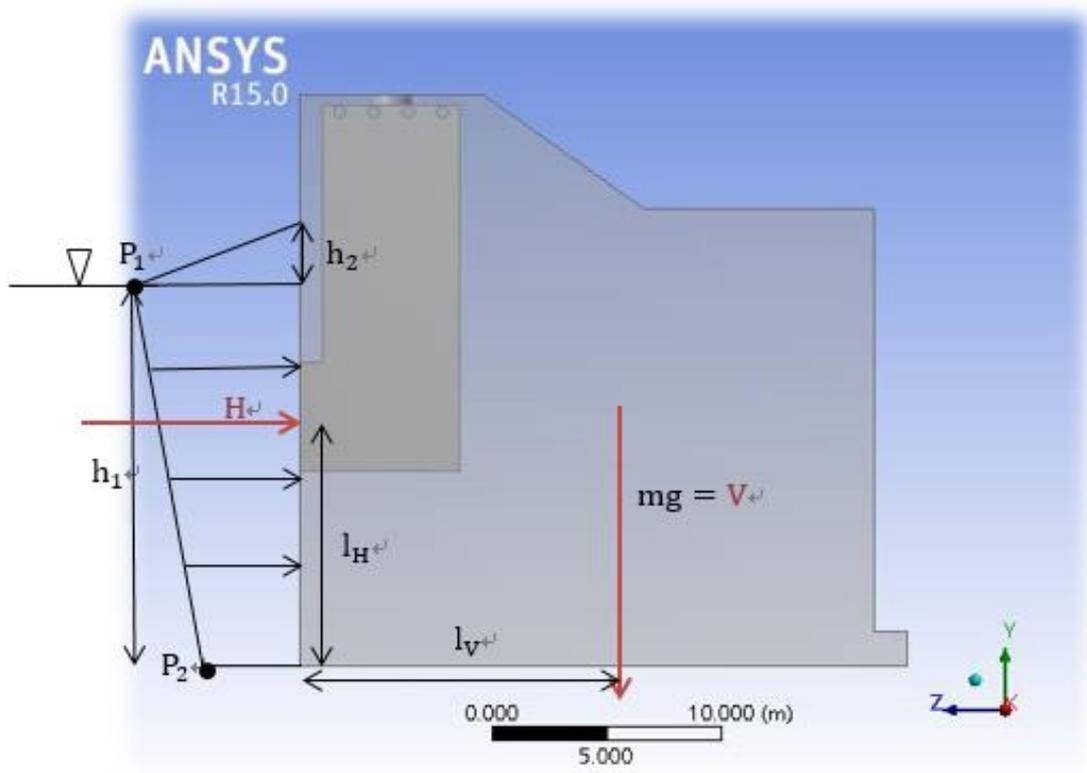


圖 4.16 外力作用於波能截取合成防波堤系統示意圖

(1) 計算條件：

合田公式計算出之側向力：Goda

數值方法計算出之側向力：Ansys

混凝土單位體積重：2.45 ($\frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$)

合成堤單位截面之面積：427.75(m²)

(2) 計算過程

獲得水面之壓力：P₁

獲得水底之壓力：P₂

海水深度：h₁

波浪做用於高於海面之高度：h₂

壁體底面與基礎之摩擦係數：f_{*}

堤體後趾與堤體垂直合力作用線間之距離：l_V

堤體底面至水平合力作用線間之高：l_H

作用於堤底之垂直合力：V

作用於堤體之水平合力：H

(3) 側向力計算結果

每米寬合成壁體重：V=427.75×2.45=1047.99 ($\frac{\text{tonf}}{\text{m}}$)

$$\text{側向合力} = \frac{(P_1 + P_2) \times h_1}{2} + \frac{P_2 \times h_2}{2}$$

合田公式計算出之側向力： $P_1=24133(\frac{N}{m^2})$ ， $P_2=17271(\frac{N}{m^2})$

數值方法計算出之側向力： $P_1=21837(\frac{N}{m^2})$ ， $P_2=9285(\frac{N}{m^2})$

將以上數值代入側向合力公式，得側向作用力 H_1 、 H_2

合田公式計算出之單位側向力： $H_1=37.458(\frac{tonf}{m})$

數值方法計算出之單位側向力： $H_2=29.088(\frac{tonf}{m})$

(4) 壁體滑動檢核

$$F \leq \frac{f_* \cdot V}{H}, \text{ 在標準狀況下假設 } f_* = 0.6$$

以合田公式計算出之側向力分析出滑動安全數值

$$F = 16.79 \geq 1.2$$

以數值方法計算出之側向力分析出滑動安全數值

$$F = 21.62 \geq 1.2$$

(5) 壁體傾覆檢核

$$F \leq \frac{V \cdot l_V}{H \cdot l_H}, l_V = 8.6m, l_H = 8.74m \text{ (Goda 公式)}, 10.53m \text{ (數值方法)}$$

以合田公式計算出之側向力分析出傾覆安全數值

$$F = 27.53 \geq 1.2$$

以數值方法計算出之側向力分析出傾覆安全數值

$$F = 29.43 \geq 1.2$$

以上分析得出，結合波能截取系統之合成防波堤在兩種受力方式之安全性分析皆大於標準值 1.2，故符合安全性之要求。

4.5 波能擷取系統與防波堤共構之設計流程

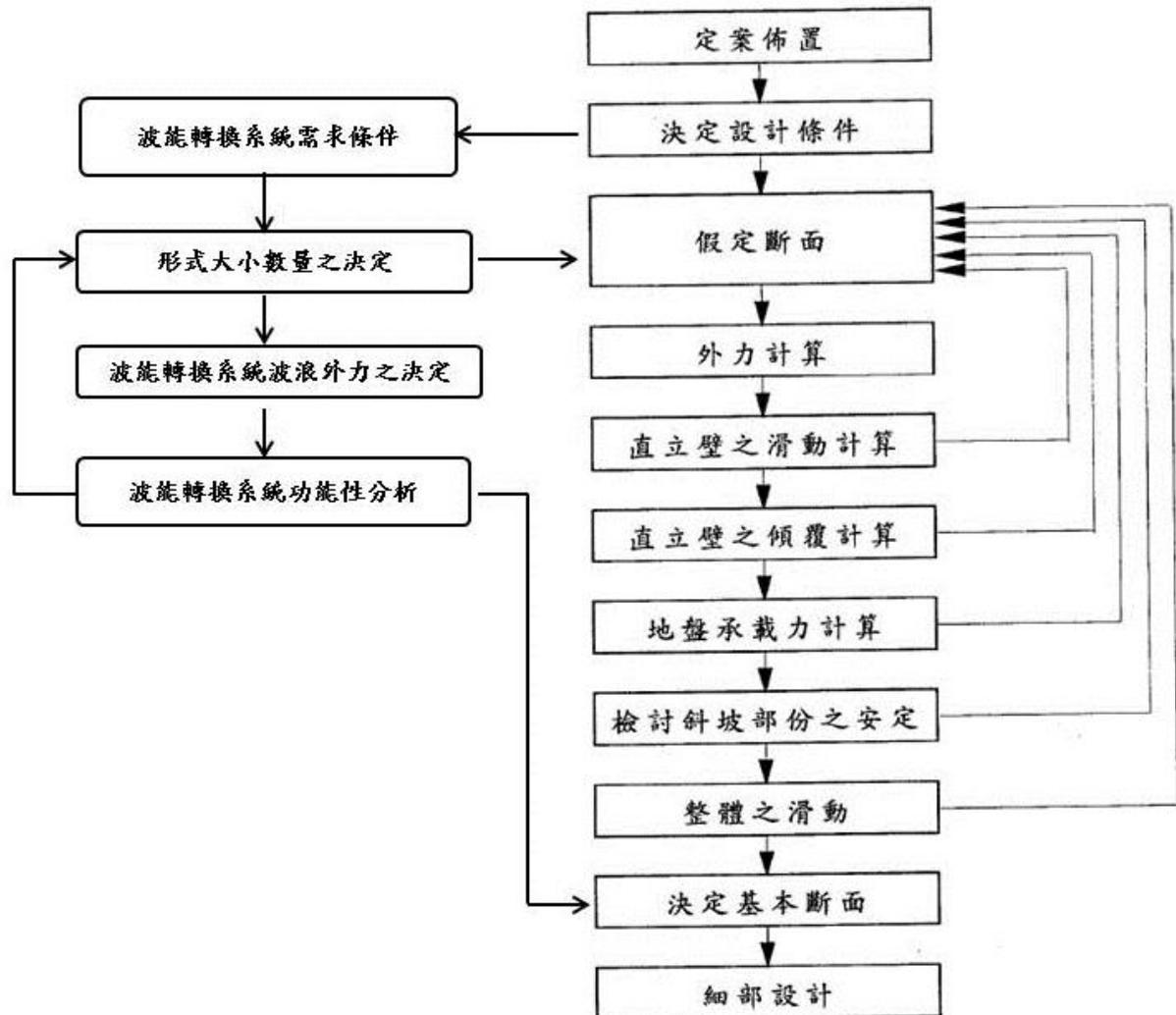


圖 4.17 波能擷取系統與防波堤共構之設計流程圖

4.6 較佳化設計參考

4.6.1 定案佈置

以各地區之歷年統計的波浪資料預先計算其能量多寡，並決定其使用方式及目的(緊急用電儲存、岸區照明等)，選定設置的地點。依照地點不同需選定施做的工法與機具。

4.6.2 決定設計條件

依照現地之條件可分為自然環境條件及設計目的條件兩大類。自然環境條件包含：現地海水水深、海床坡度、潮差、波浪示性週期、波浪示性波高、地震力之影響、颱風之影響、土壤承载力等。設計目的包含使用目的、電力儲存方式、發電機組條件、風扇渦輪設計、前牆開口率等。以花蓮港為設計範本，部分現地資料可參考第五章。

4.6.3 波能轉換系統需求條件

海水水深不可過深以避免施工過於困難。設置位置不可離港區過遠，避免維護難度過高。波浪條件需謹慎考慮，避免波浪過大造成系統損壞，或波浪過小造成系統無法使用。

4.6.4 波能轉換系統波浪外力之決定

波力特性

1. 正向力特性

結構物等柱體所受之正向波力，其基本假設波力為拖曳力(drag forces)與慣性力(inertial forces)之線性疊加結果。其中，拖曳力乃因流體黏滯性所引起，黏滯效應對柱體產生邊界層摩擦阻力及水流分離，在流體通過柱體後形成 wake，進

而使柱體前後端產生壓力差，此壓力差即為形狀阻力。拖曳力與拖曳係數、及水粒子流速之平方成正比，拖曳力係數實際上會受到流場黏性、渦度及紊流等因素之影響。

慣性力則包含虛質量力和流體質量力兩部分，其與水粒子加速度成正比，慣性力係數可以勢能理論得知其大小，一般對柱體其值取 2，對球體其值取 1.5。

2. 側向力特性

在波浪場中，垂直柱體除受與波浪進行方向平行之正向力作用外，柱體同時受與波浪進行方向垂直之側向力作用。在無限流場中，定義無因次 K_c 數，用來描述一個在振盪流場中的物體，所受到的阻力相對慣性力之間的關係， K_c 數的定義如下

$$K_c = \frac{VT}{L}$$

其中

V 為流速振盪的振幅（若是物體振盪的情形，則為物體速度的振幅）

T 為振盪的週期

L 為物體的特徵長度，若物體為一圓柱，其特徵長度為其直徑。

當 K_c 值很小時，柱體附近之流線幾乎接近理想流體之狀態，隨著 K_c 值遞增，流體會於柱體之分離點產生分離現象，進而在柱體後方產生渦流。

當生成之渦流對稱時，柱體左右兩側之壓力大小一致時，則側向力幾乎趨近於零；當 K_c 值持續遞增時，柱體後方之渦流將不再對稱，進而產生所謂的渦流剝離，此時在柱體左右

兩側會產生壓力差，此即為側向力生成之主因，側向力為一振動力之形式。

4.6.5 波能轉換系統功能性分析

波能轉換系統之功能有截能與消波兩大功能。在截能方面需考慮系統的氣室長度、沒水深度、前牆開口率、出風口大小、渦輪葉片、發電機組等因素。在消能方面則是藉由氣室內的空氣壓縮與系統前牆承受波浪力來達到消能之作用。

4.6.6 形式大小數量之決定

為了施工之便利，選擇於現有防波堤前端進行波能擷取系統的設置，除考慮施工之便利性，也可以減少建築材料的運送成本，另一方面減少電力透過電纜傳送時的能量消耗。形式上目前的選擇方法有許多種，目前學術界研究方向主要以氣室長度、沒水深度、前牆開口率變化、出風口大小等。

1. 氣室長度：倘若氣室設計過長，波浪進入系統中不能即時提供空氣的壓縮，反之，氣室太短則無法讓波浪產生駐波疊加，因此目前本研究建議氣室長度應小於示性波長的三分之一為設計。
2. 沒水深度：沒水深度的設計也會影響整個系統性能，若沒水深度不足則無法提供足夠的氣動壓力推動渦輪機組，故沒水深度設計建議以現地最低低潮位向下一點五倍之示性波高為設計。
3. 前牆開口率：系統水面下開口率減少，通水面積減少造成流速變大，導致雷若數變大而紊流現象明顯，然而因為紊流的影響會讓波浪在系統之間的能量消散加劇，使其波形遭到破壞，較不易產生駐波的現象，也因此開口率的設計建議參考現地的是性波長期波浪情況設計。

4. 系統出風口搭配氣室之設計：系統設計建議以奇數個氣室搭配一個出風口，出風口的開口不應太小每一個出風口搭配數個相通的氣室為一個系統，系統之間彼此獨立，機組系統設計高度建議高於防波堤，對於往後使用期間的系統維護能有較方便的施工性。其他有關於系統的設計，將受限於堤岸的長度，以不影響生態及航運為主，其間系統設置方向也將考量現地之波向進行設計，已讓發電機組擷取波能的效率達到最大輸出功率。

4.6.7 假定斷面與外力計算

考慮港內所需要的靜穩度、利用天數及背後港灣設施保護等之利用來決定，在須考慮暴潮影響的港灣可由過去記錄作為設計之參考，將朔望平均高潮位加上暴潮偏差作為設計潮位以求取堤頂高。直立堤之堤頂高應在朔望平均高潮位加上示性波高之 0.6 倍以上，堤體所需寬度依據作用波壓力而決定，進行設計時須考量於波浪作用下及施工時之安全性，研擬斷面需考量斷面寬度、基礎厚度及護基方塊之重量，以得最佳穩定斷面。各項外力包含滑動、傾覆、乘載力與斜坡安定之計算可以參考第四章及附件 1 之法規做為設計的依據。

4.6.8 細部設計

出風口設計可參考圖 4.18 與本研究第八章之導流系統，可在低波能支狀況產生整流之效果，集中氣流而產稱較高之風速，並在高波能之條件下產生消能之作用，使整個系統更為穩定。風扇設計可參考第六章的風扇設計，其成果可參考第七章之圖表。

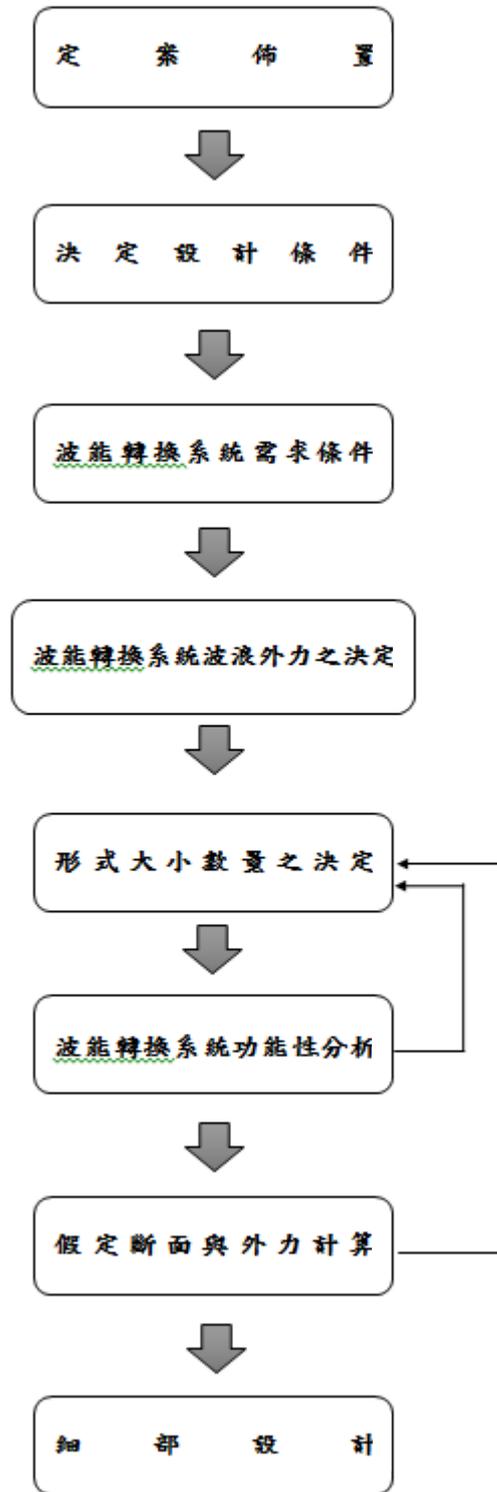


圖 4.18 細部設計流程圖

第五章 氣流發電系統理論及設計

5.1 渦輪簡介與選用

應用於波浪能擷取系統中的渦輪一直不斷的在發展演變，從最開始的常規渦輪至自整流式的渦輪機，其研究及改良仍在進行中，一般常用的渦輪種類可概略分成兩種，一為衝擊式渦輪(Impulse turbine)，另一類為反動式渦輪(Reaction turbine)，空氣渦輪的分類如圖 5.1，其運作方式及特性如圖 5.2。衝擊式渦輪之作用原理為流體撞擊渦輪葉片造成推動的力量，推動葉片造成渦輪旋轉，該渦輪具有較低的啟動風速，但只能接受單一方向之氣流；反動式渦輪的作用原理為流體通過葉片時因葉片之幾何條件造成上方氣流與下方氣流速度的差異而產生之壓力差，推動葉片造成渦輪旋轉，該渦輪需要較高的啟動風速，但可以接受不同方向之氣流。

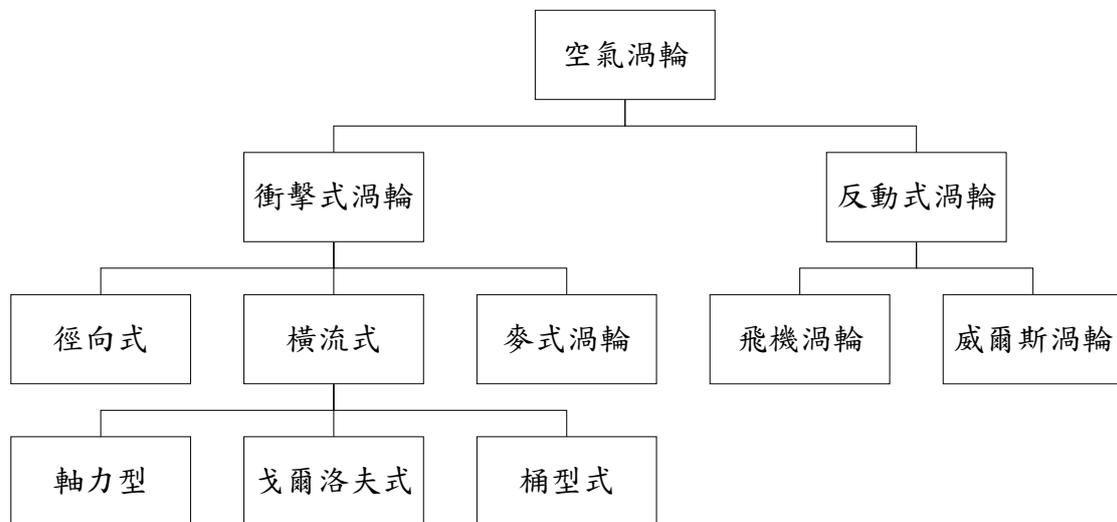


圖 5.1 空氣渦輪分類圖

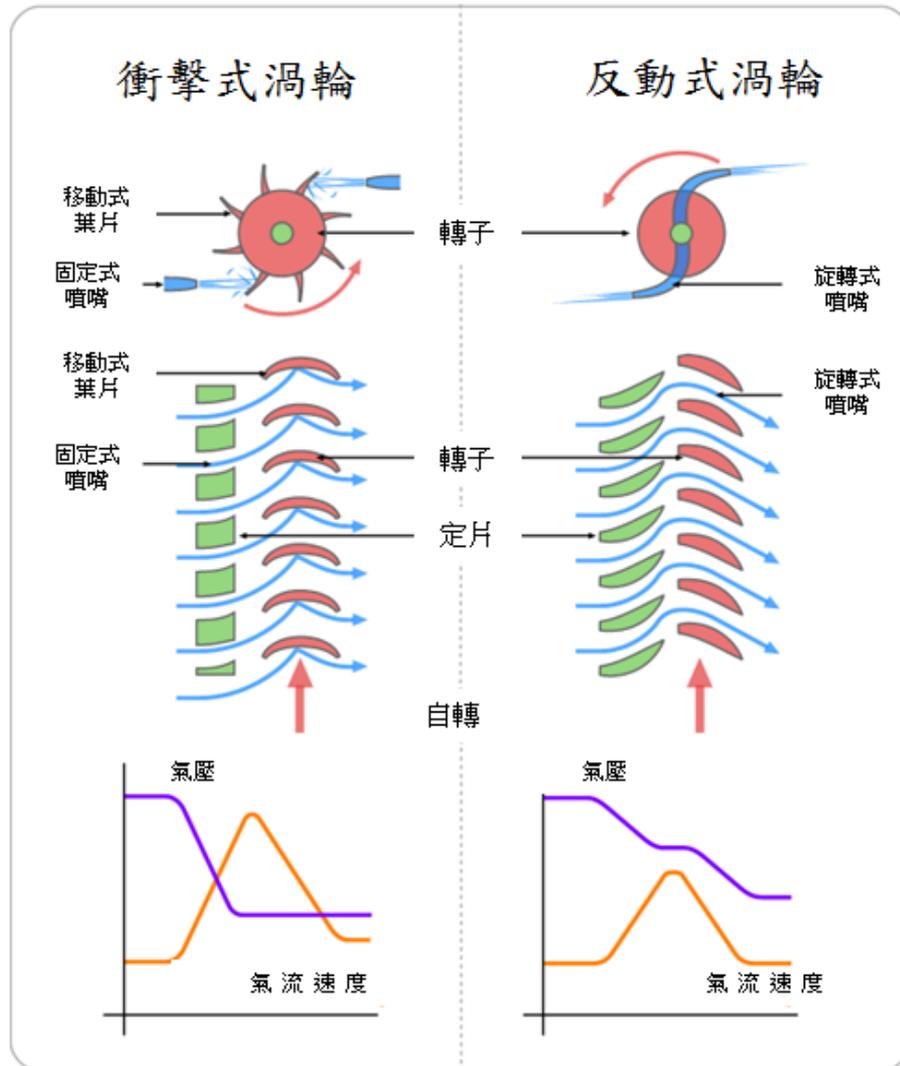


圖 5.2 衝擊式與反動式渦輪比較(Emoscopes, wikipedia)

最先使用於震盪水柱式波浪發電系統中的渦輪為一種具有整流閘的簡易衝擊式渦輪，整流閘的用意旨在將震盪水柱式波浪發電系統中的雙向氣流整合成單向氣流，但也導致了氣流動能的損失、設計趨於複雜化以及設備維護的困難等問題，促使往後的震盪水柱式波浪發電系統研究開始偏向採用無需整流系統的渦輪。

因此，許多具自整流功能的渦輪於 1970 年代開始出現，威爾斯渦輪(Wells turbine)即為此時期的產物(5.3)，而由於它的應用方便以及成本等考量，在 1976 年開始廣泛的使用於各種型式的波浪能量擷取系統中。

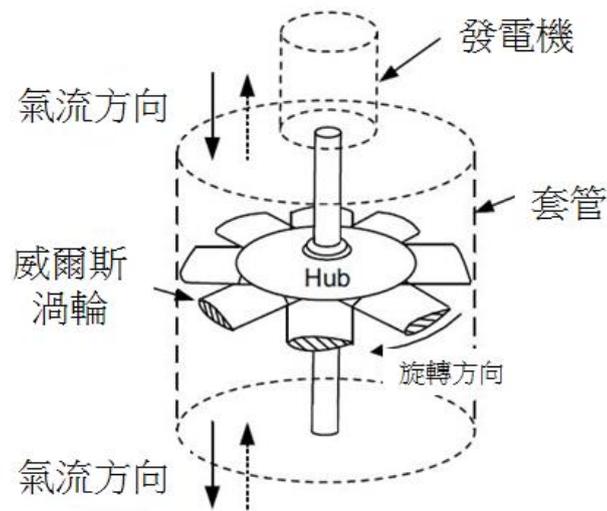


圖 5.3 威爾斯渦輪(Wells turbine)立體構造示意圖

威爾斯渦輪(Wells turbine)為一種雙向式葉片設計(見圖 5.4)，常見於水力與風力發電的應用，因為其特殊的葉片設計，當葉片受氣流影響時，大部分的氣流會往轉軸的斜面流動，少部分的氣流則流向葉片外沿，葉片上的合力以靠近轉軸的斜面較大，因此無論風力由哪邊吹入，此種渦輪都保持相同的旋轉方向，圖 5.5 為威爾斯渦輪葉片受氣流時示意圖。

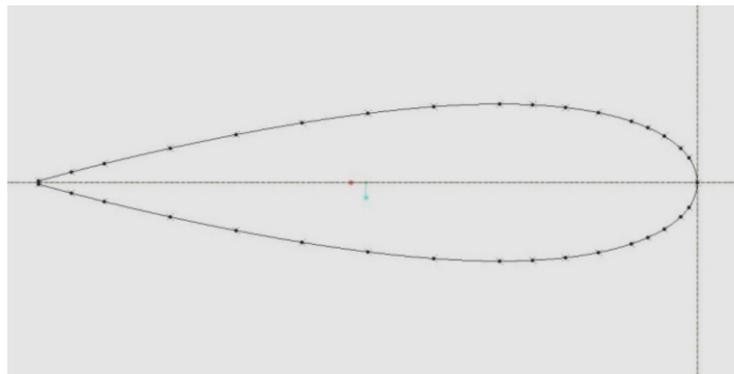


圖 5.4 威爾斯渦輪葉片剖面

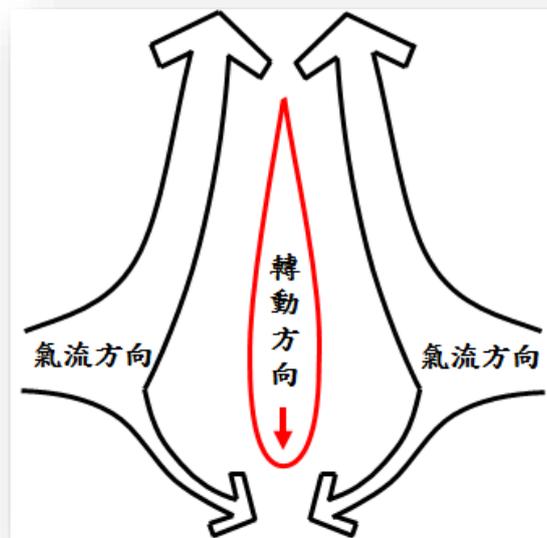


圖 5.5 威爾斯渦輪葉片受氣流時情形

而渦輪轉動能可由下式估算：

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho(V_1)^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho(V_2)^2$$

$$\Delta P = \frac{1}{2}(V_1^2 - V_2^2)$$

P：氣體壓力

ρ ：氣體密度

V：氣流速度

本研究始啟動時參考之日本震盪水柱式波浪發電系統實際應用案例—酒田港波浪發電系統現地長期實驗中也是採用威爾斯渦輪做為主要之發電機渦輪，其文獻提供之發電裝置參數如表 5.1。且因本研究中水工模型之尺寸較小，使用衝擊式渦輪的設計有其難度，因此此部分規劃係以威爾斯渦輪為主要考量。

表 5-1 酒田港發電裝置主要參數

波浪條件	示性波高：2m 週期：8 sec
渦輪種類	Tandem Wells Turbine NACA 0021
渦輪直徑	1.337 m
發電功率	60kw @ 1800 rpm
渦輪轉速範圍	500 – 2400 rpm
發電電壓	AC 200V 50Hz
起始發電轉速	500 rpm

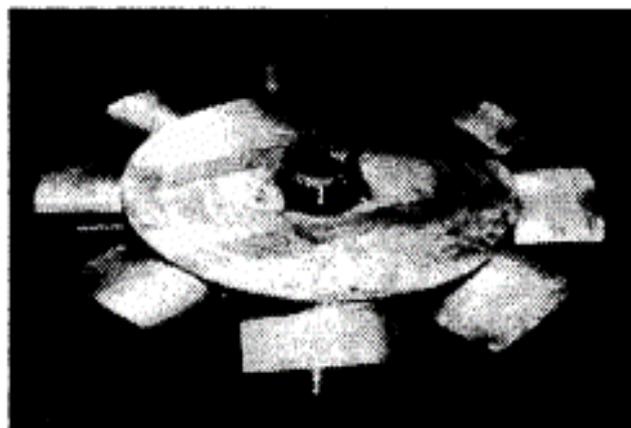


圖 5.6 酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021)

5.2 威爾斯渦輪模型設計

5.2.1 NACA 0021 文獻數據

參考美國航空諮詢委員會(NACA)，還原編號 NACA0021，整理出揚升係數、阻抗係數、力矩在不同雷諾數與攻角間之關係(圖 5.8 至圖 5.11)，因 NACA0021 之對稱設計，在攻角為 0 時葉片在 y 方向之合力為零，無揚升力與力矩作用。但若攻角改變時，會因葉片上下表面流體流速的改變產生壓力差，與流體作用於葉片表面，使得葉片產生揚升力與力矩作用。葉片之阻抗係數則是因流體流動方向之投影面積為主要變因，但在攻角為正負 5 度時並無明顯的上升，可視為定值。

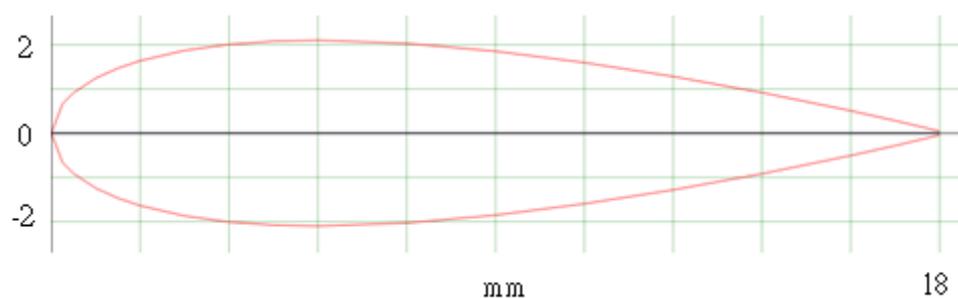


圖 5.7 NACA 0021 翼型剖面

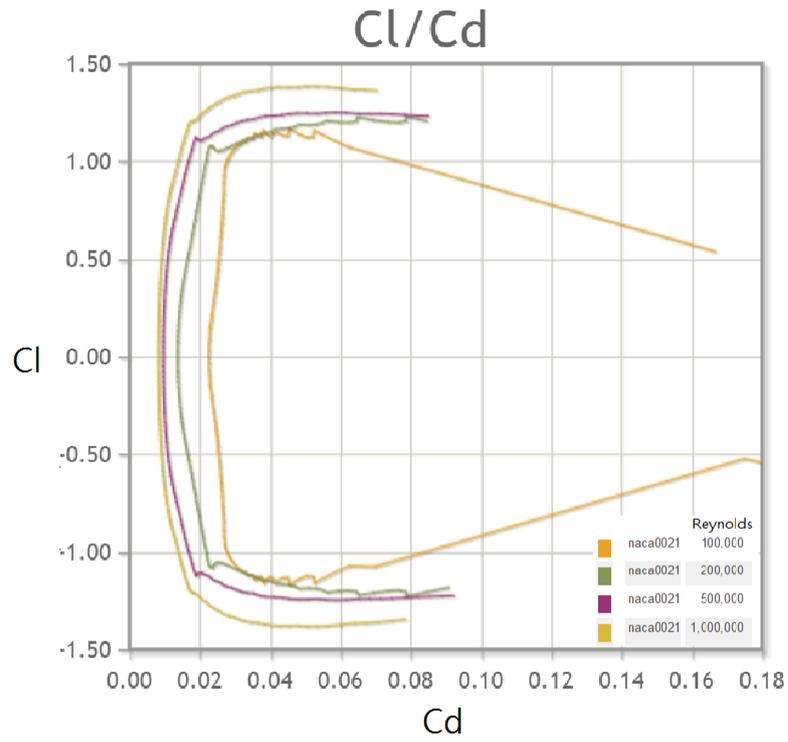


圖 5.8 不同雷諾數阻抗係數對應揚升係數

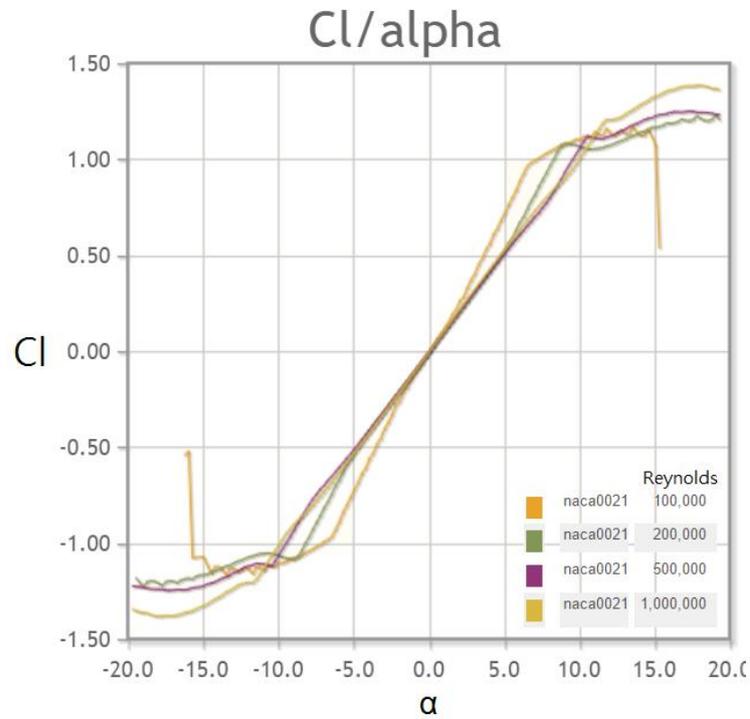


圖 5.9 不同雷諾數攻角對應揚升係數

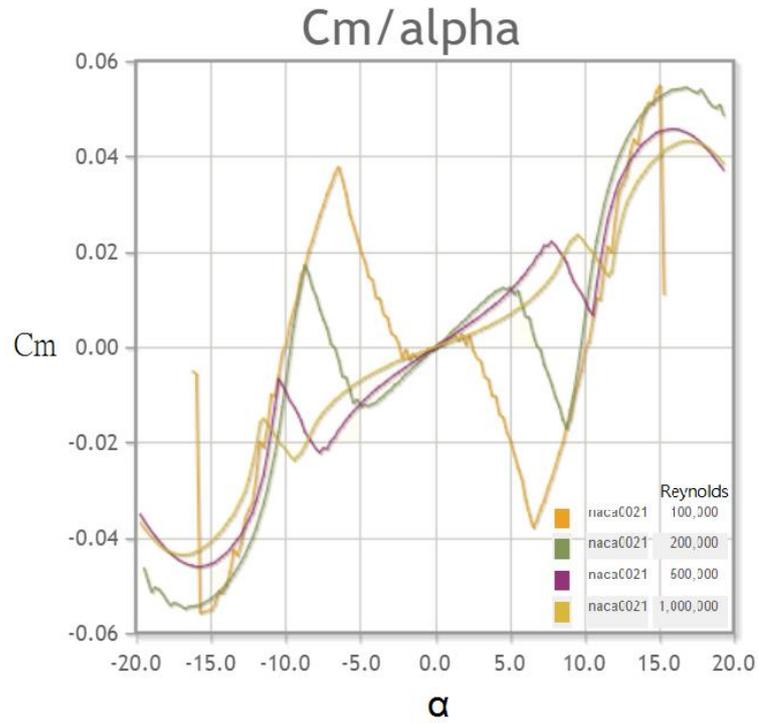


圖 5.10 不同雷諾數攻角對應力矩係數

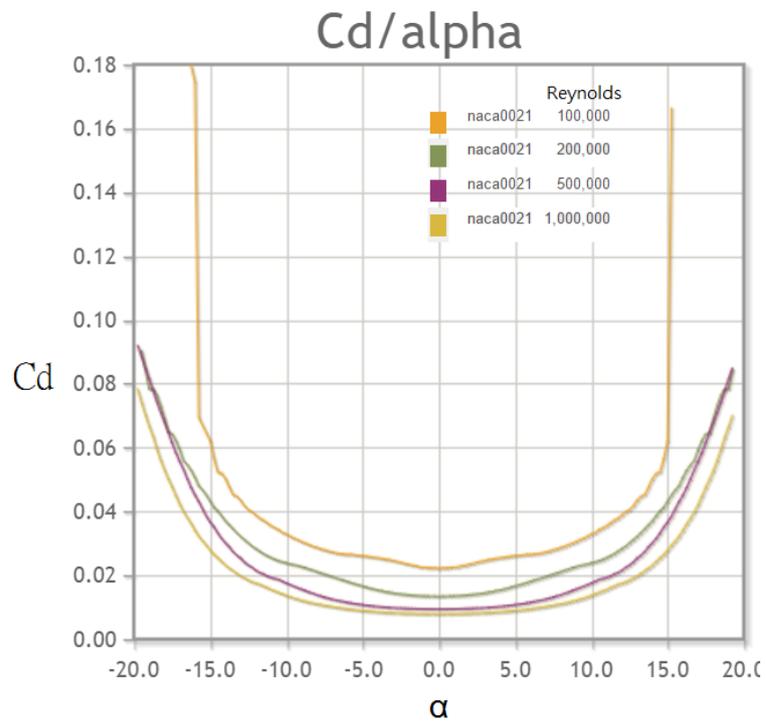


圖 5.11 不同雷諾數下阻抗係數對應攻角

5.2.2 NACA0021 葉片數剖面值模擬

以 ANSYS 軟體模擬 NACA0021 與 NACA0021 剖面在攻角 0 度、正負 10 度、正負 20 度在向同流速下之流場情況，之後會與 NACA0024 比較何種頁面設計適合在本系統使用。以此模擬可看出 NACA0021 剖面在各攻角下之流場變化。可以看出在攻角為 0 度時流場為上下對稱的狀態，這代表葉片是處於合力為 0 的狀態，因此渦輪不會轉動。當攻角出現時背風面的流速加快，根據伯努力方程式速度較快的區域會產生較小之壓力，因此葉片產生壓力差而推動葉片使渦輪轉動。

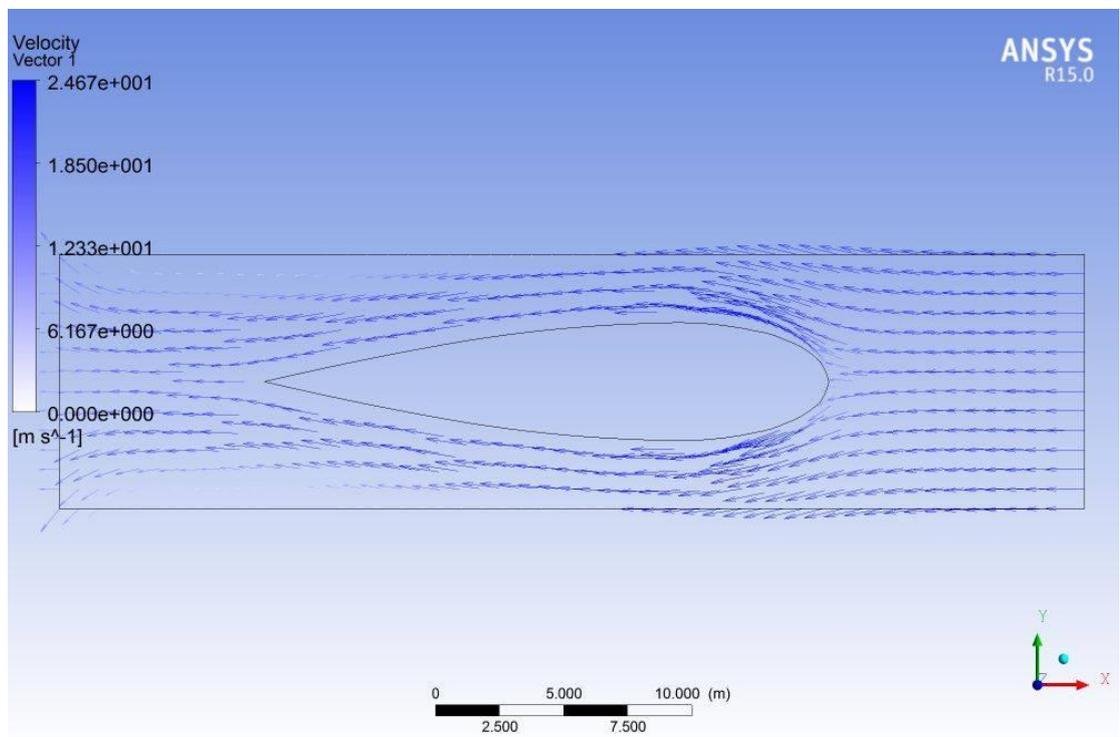


圖 5.12 NACA 0021 攻角 0 度流場分析

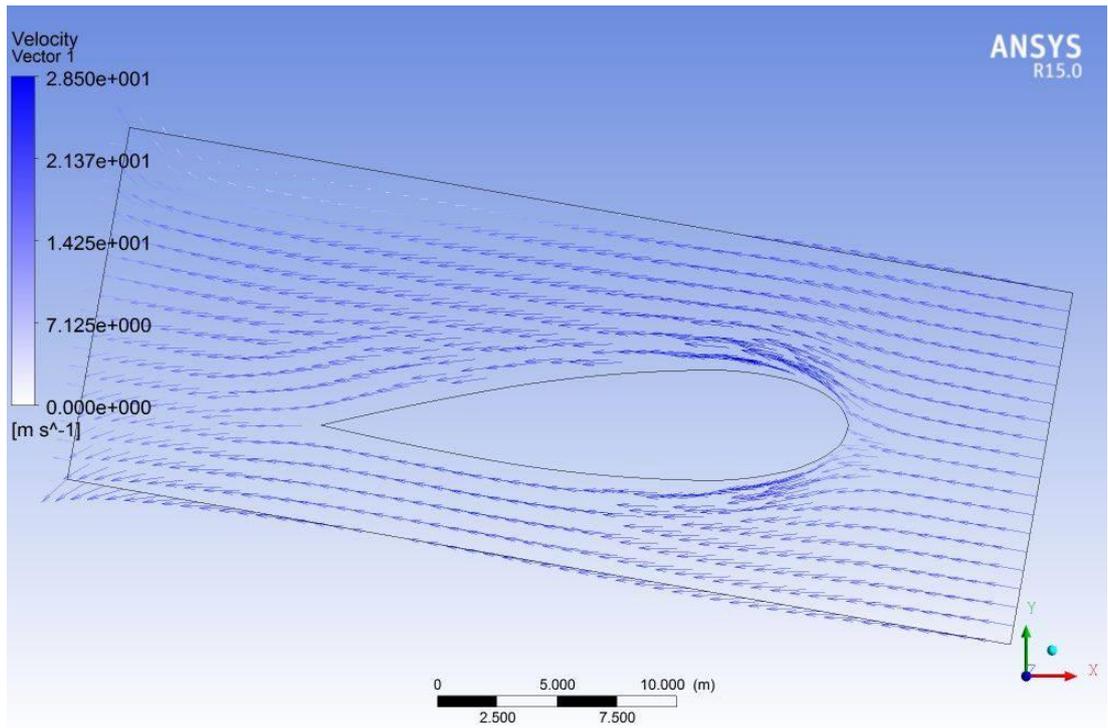


圖 5.13 NACA 0021 攻角 10 度流場分析

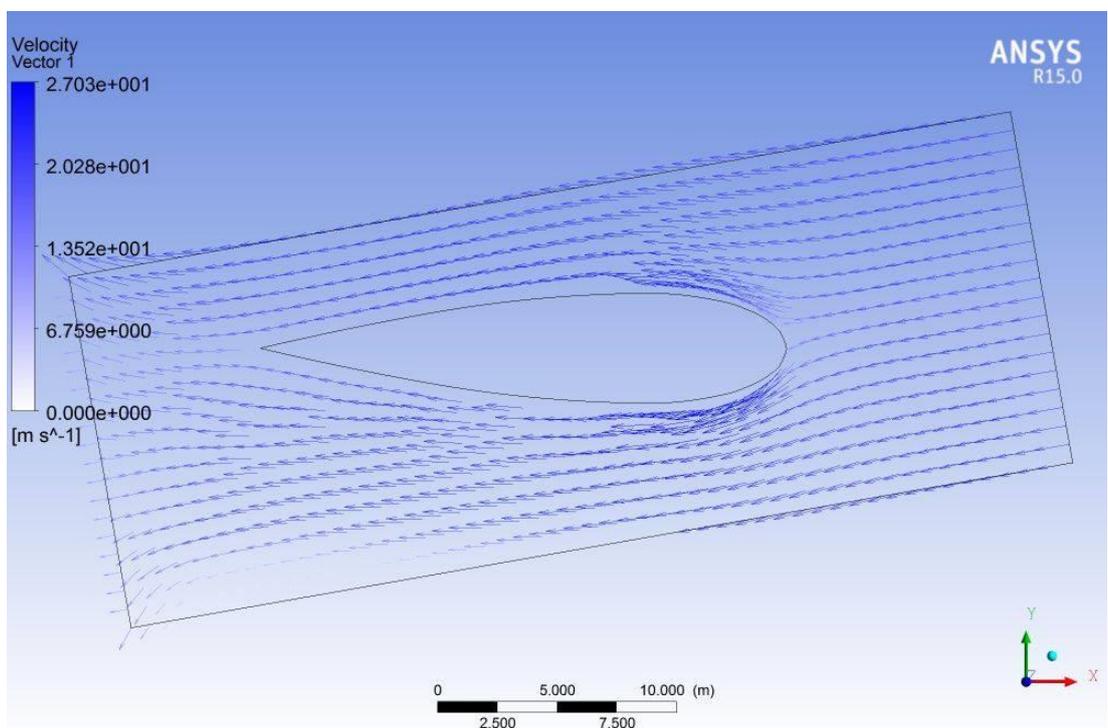


圖 5.14 NACA 0021 攻角負 10 度流場分析

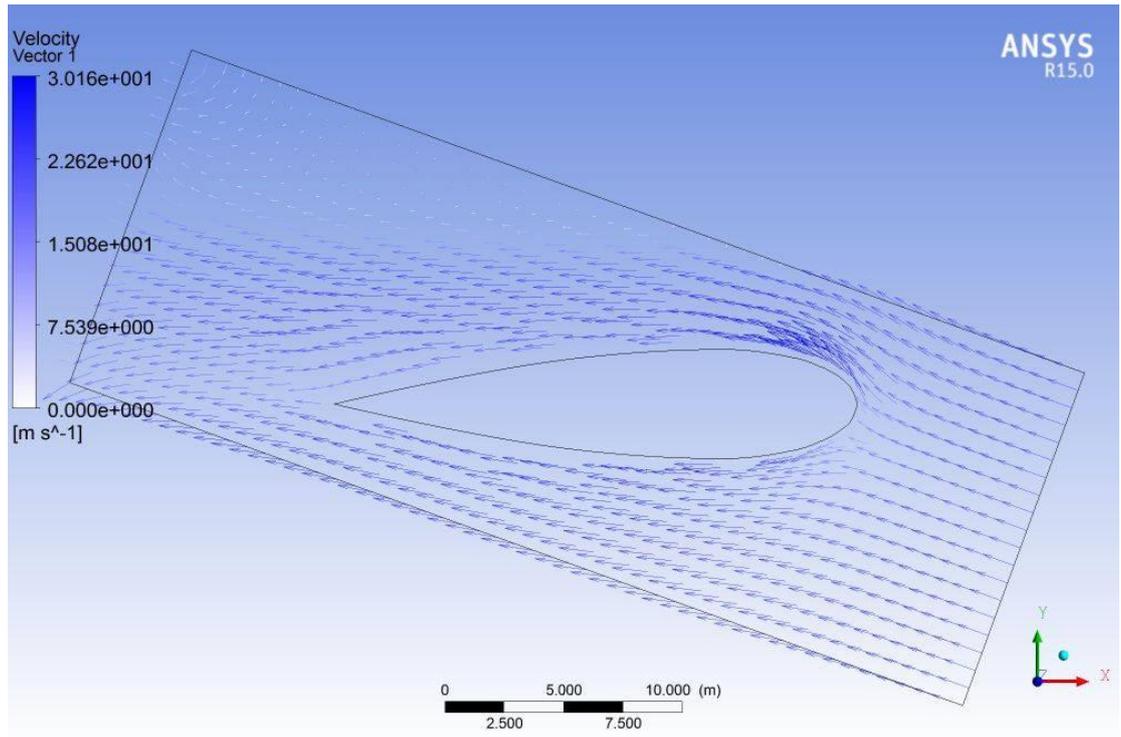


圖 5.15 NACA 0021 攻角 20 度流場分析

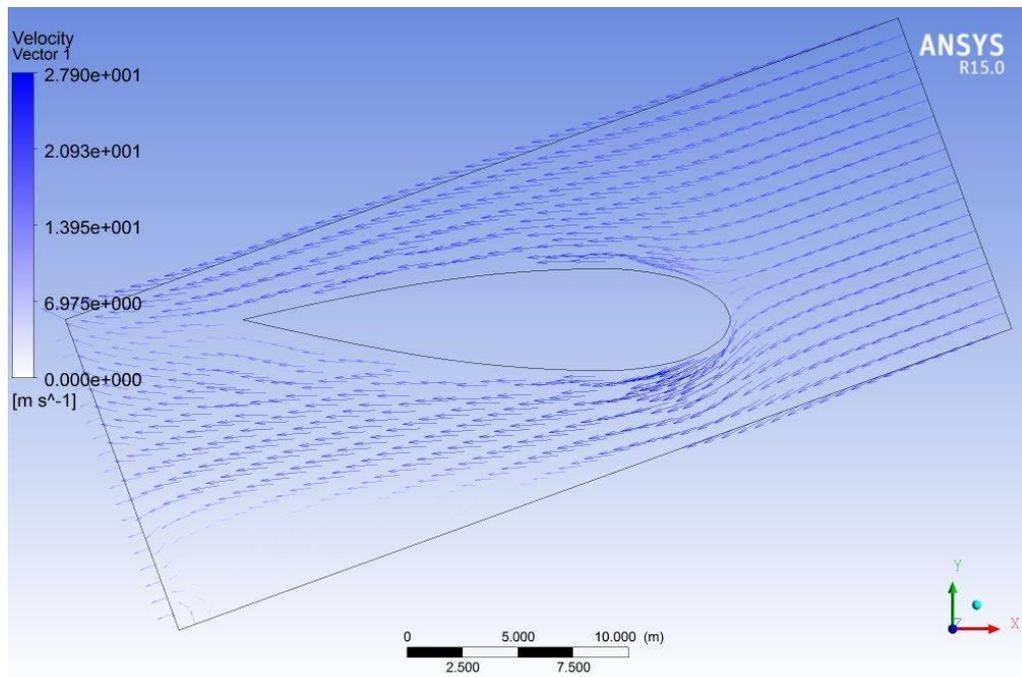


圖 5.16 NACA 0021 攻角負 20 度流場分析

5.2.3 渦輪設計

根據文獻奇數葉片之渦輪設計與增加葉片受風面積有助於提高渦輪之轉速與發電效能，設計兩種葉片型式，第一種為較典型之雙斜翼設計(圖 5.17a)、第二種為變形式雙斜翼(圖 5.17b)，觀察何種渦輪幾何可提高渦輪轉速。

雙斜翼為一種較為傳統的渦輪葉片設計，單斜翼則是改良其部分設計，包含較小的迎風面積、較長的尾翼設計、葉片的最末端距離軸心較遠，表示單斜翼具有較低的啟動風速、較多的有效受風面積、對於軸心可產生較大的力矩。

渦輪的轉動為一種動態平衡的表現，偶數葉片具的受力較為對稱有比奇數葉片安定的動態平衡，原因在於受力較為對稱，這也代表偶數葉片所造成的震動與噪音較奇數葉片來的小，但也造成偶數葉片需要較大的啟動風速與轉速較低的現象；奇數葉片則相反，具有較低的啟動風速與較高的轉速，但具有較大的震動與噪音。雖奇數葉片渦輪具有上述之缺點，但結構材料與設計可以削弱陣動與噪音帶來的衝擊，故選擇奇數葉片之渦輪設計。

根據本研究之水工模型上方氣流孔大小(70 mm)設計威爾斯渦輪尺寸，於 SketchUp 軟體建立渦輪模型，設計尺寸如圖 5.17a 及 5.17b 所示，再以 3D 列印方式製作成品，成品圖如圖 5.18、圖 5.19。

初步測試結果發現，單斜翼之設計有助於提升轉速且具有減小啟動風速之現象，但確實結果仍需要往後之實驗來驗證。

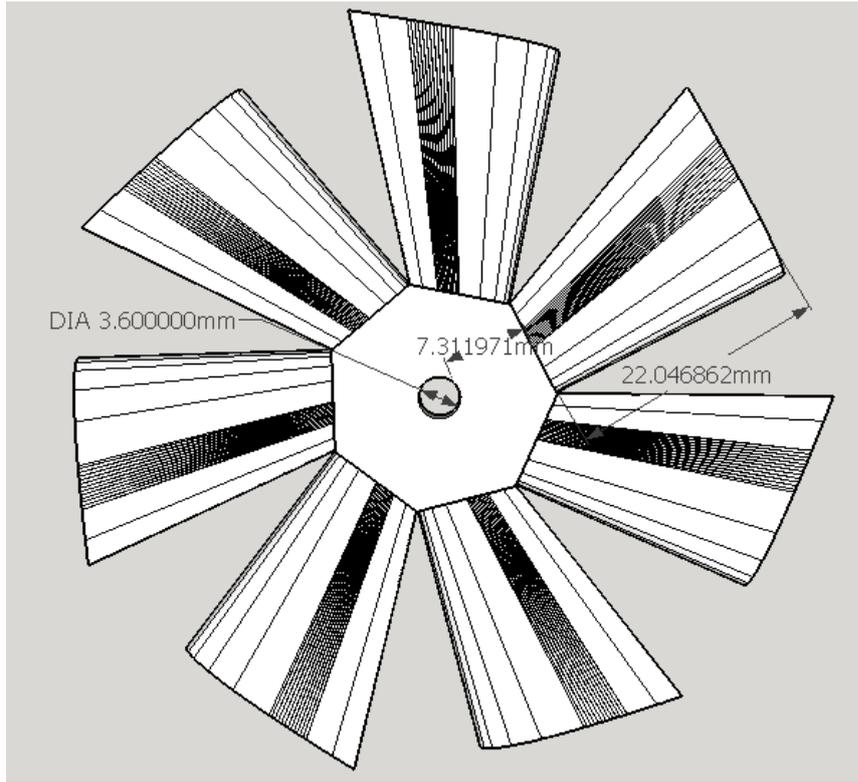


圖 5.17a 單斜翼威爾斯渦輪葉片

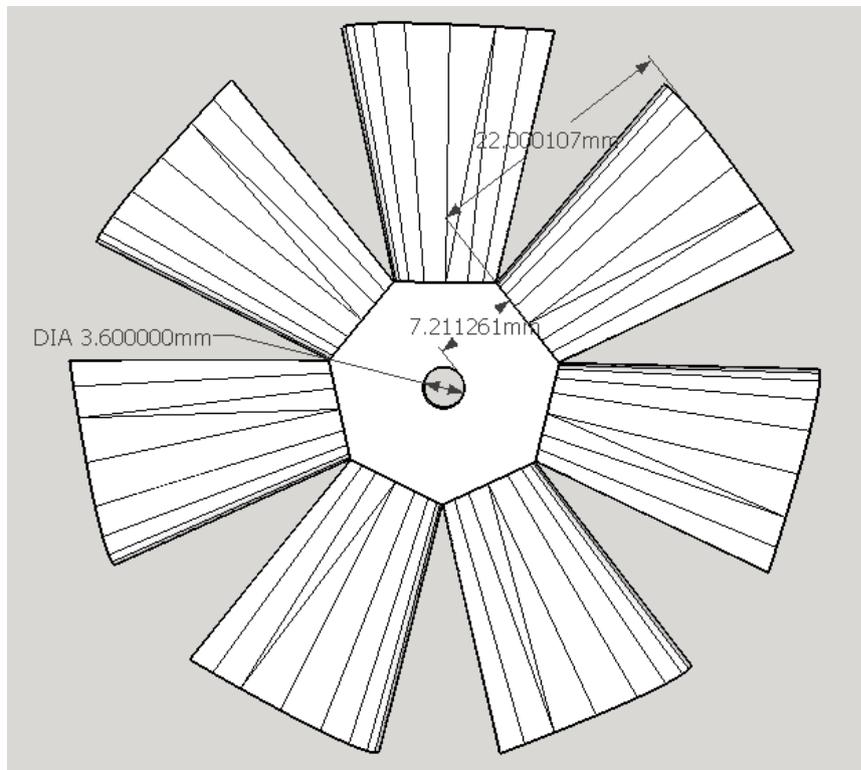


圖 5.17b 雙斜翼威爾斯渦輪葉片

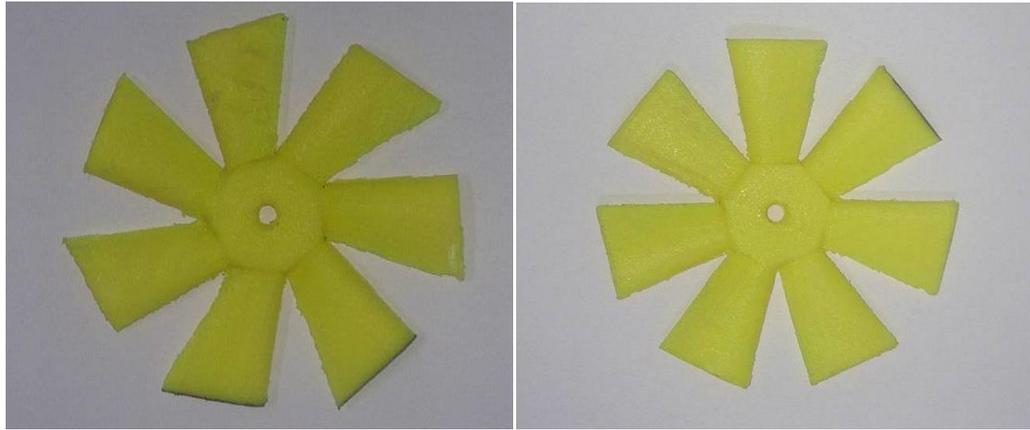


圖 5.18 3D 列印威爾斯渦輪實體模型單斜翼與雙斜翼

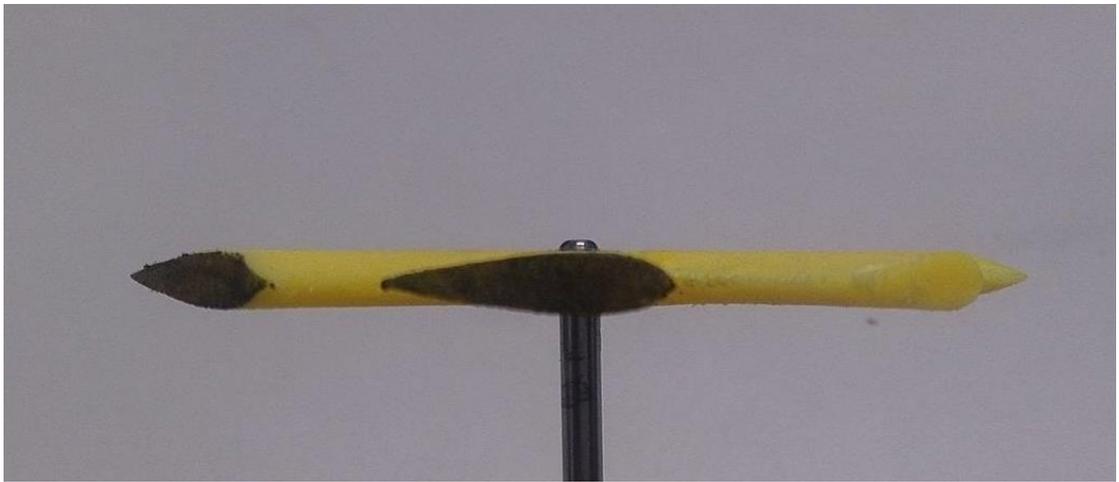


圖 5.19 3D 列印威爾斯渦輪葉片實體模型 II

5.3 出風口與氣流導流設計

根據文獻設計製作導流管，目的在於削弱氣流吸入與排出時之渦流現象，以減少氣流之能量損失。根據圖 5.20(a)為直壁式出風口設計，當其管壁厚度(t)與出風口直徑(D)的比值大於 0.05 時可得最小壓損係數(K)0.5。圖 5.20(b)為斜壁式出風口設計，當斜壁與外壁夾角為 60 度時管壁厚度(t)與出風口直徑(D)的比值為 0.25 時可得最小壓損係數(K)0.1。圖 5.20(c)為曲面式出風口設計，當曲壁之曲率半徑(r)與出風口直徑(D)的比值大為 0.1 時可得最小壓損係數(K)0.06。因 3D 列印機可以克服出風口管壁加工難度與成本，故以圖 5.20(c)為設計參考，設

計出風口與導流盤之管壁曲率。本研究之波能轉換系統因實驗縮尺的原故，出風口直徑為 7 公分，最佳管壁曲率則應大於 0.7 公分可得最小壓損係數 0.06。

以 SketchUp 繪製導流盤(圖 5.21)、馬達安裝基座(圖 5.22)、導流管(圖 5.23)。整體導流系統安裝樣式如圖 5.24 所示，最後以 3D 列印機印製各項元件，包含導流盤(圖 5.25)、馬達安裝基座(圖 5.26)、導流管(圖 5.27)。

安裝導流系統必須擴大原波能轉換系統之出風口，將原波能轉換系統的頂板切割出邊長為 10 公分的正方形洞口，並在上方加裝一有直徑為 9 公分之出風口邊長為 12 公分之正方形的可拆卸式的壓克力板頂板如圖 5.29 所示，在導流系統安裝之前以黏土補平被開挖頂板造成之空隙之部分，以防止漏風與維持原系統的完整性(圖 5.30)，最後再將導流系統安裝於波能轉換系統之頂板，整體導流系統與波能轉換系統安裝如圖 5.31 所示。

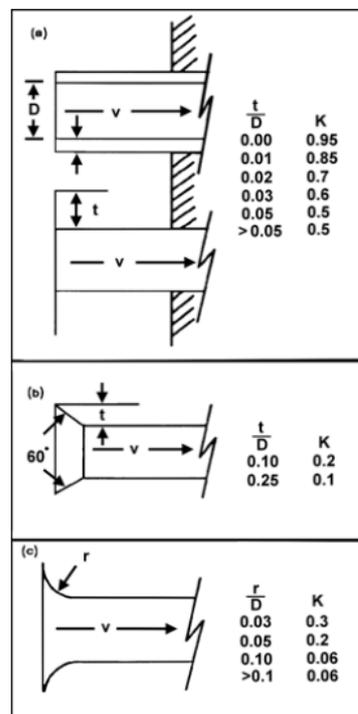


圖 5.20 各種管路入口之阻抗特性

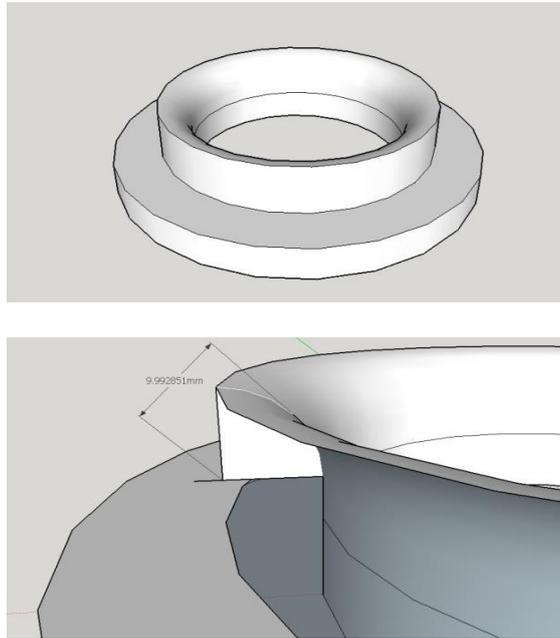


圖 5.21 導流盤與其曲率剖面

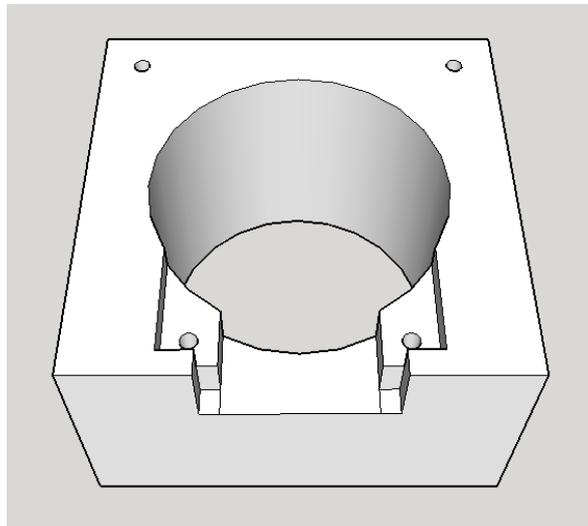


圖 5.22 馬達基座

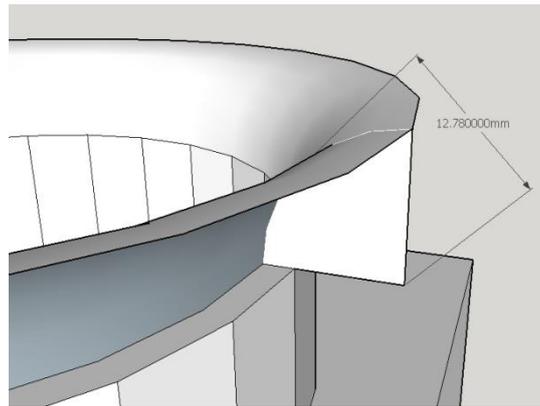
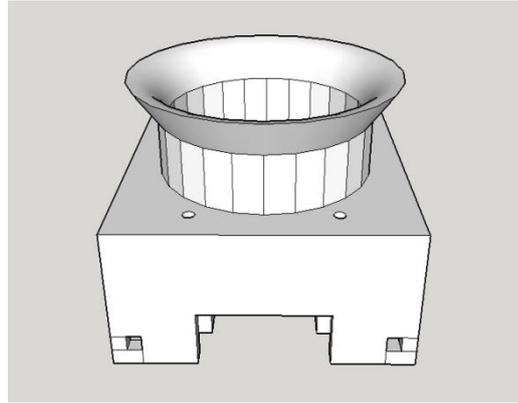


圖 5.23 馬達上基座與導流管及曲率其剖面

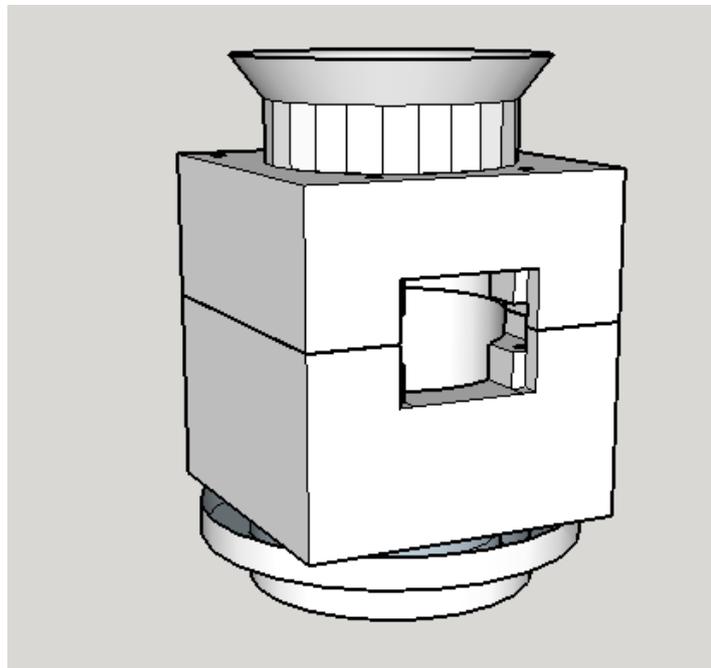


圖 5.24 導流系統安裝示意圖



圖 5.25 導流盤 3D 列印成品

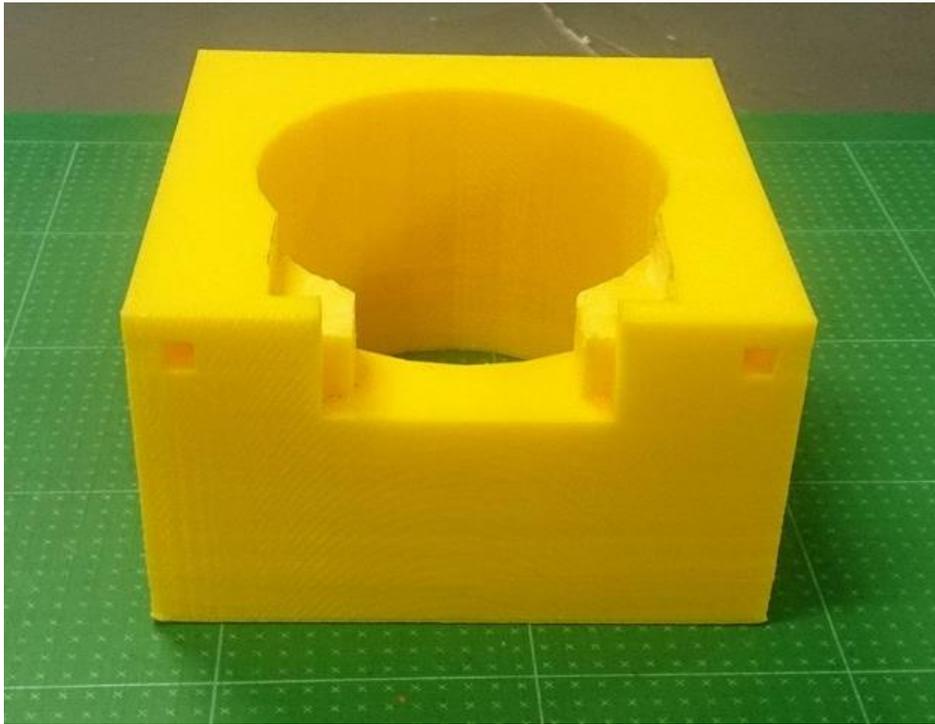


圖 5.26 馬達安裝基座

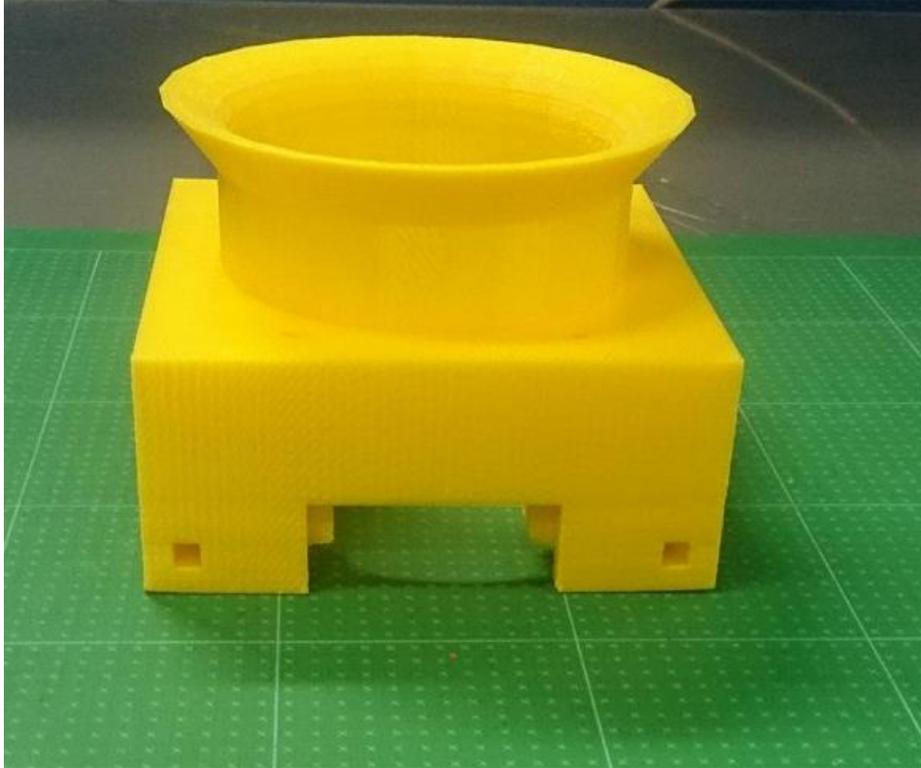


圖 5.27 導流管



圖 5.28 導流系統與馬達安裝完成圖



圖 5.29 加工過後波能轉換系統之開口

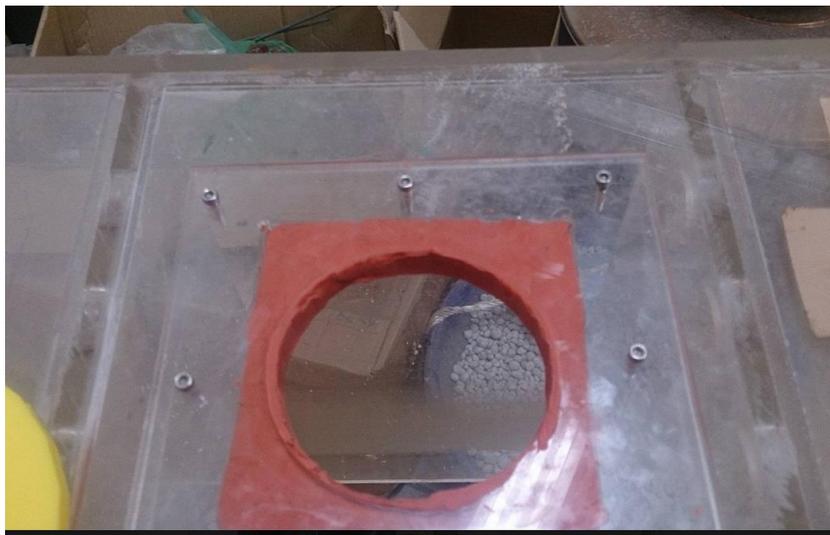


圖 5.30 以黏土補平被挖開之區域



圖 5.31 安裝導流系統與發電

5.4 直流發電系統

延續第三期計畫使用直流發電馬達，並驗證風扇葉片之改良是否可有效提升發電系統之效能。

5.4.1 直流電的優點主要在輸電方面

輸送相同功率時，直流輸電所用線材僅為交流輸電的二分之一支三分之一，直流輸電採用兩線製，以大地或海水作迴線，與採用三線製三相交流輸電相比，在輸電線載面積相同和電流密度相同的條件下，即使不考慮趨膚效應，也可以輸送相同的電功率，而輸電線和絕緣材料可節約1/3。

在電纜輸電線路中，直流輸電沒有電容電流產生，而交流輸電線路存在電容電流，引起損耗，在一些特殊場合，必須用電纜輸電。例如高壓輸電線經過大城市時，採用地下電纜；輸電線經過海峽時，要用海底電纜。由於電纜芯線與大地之間構成同軸電容器，在交流高壓輸線路中，空載電容電流極為可觀。一條 200kV 的電纜，每千米的電容約為 $0.2\mu\text{F}$ ，每千米需供給充電功率約 $3 \times 10^3 \text{kw}$ ，在每千米輸電線路上，每年就要耗電 $2.6 \times 10^7 \text{kw} \cdot \text{h}$ 。而

在直流輸電中，由於電壓波動很小，基本上沒有電容電流加在電纜上。

直流輸電時，其兩側交流系統不需同步運行，而交流輸電必須同步運行。交流遠距離輸電時，電流的相位在交流輸電系統的兩端會產生顯著的相位差；並聯網的各系統交流電的頻率雖然規定統一為 50Hz ，但實際上常產生波動。這兩種因素引起交流系統不能同步運行，需要用複雜龐大的補償系統和綜合性很強的技術加以調整，否則就可能在設備中形成強大的循環電流損壞設備，或造成不同步運行的停電事故。在技術不發達的國家裡，交流輸電距離一般不超過 300km 而直流輸電線路互連時，它兩端的交流電網可以用各自的頻率和相位運行，不需進行同步調整。

直流輸電發生故障的損失比交流輸電小。兩個交流系統若用交流線路互連，則當一側系統發生短路時，另一側要向故障一側輸送短路電流。因此使兩側系統原有開關切斷短路電流的能力受到威脅，需要更換開關。而直流輸電中，由於採用可控矽裝置，電路功率能迅速、方便地進行調節，直流輸電線路上基本上不向發生短路的交流系統輸送短路電流，故障側交流系統的短路電流與沒有互連時一樣。因此不必更換兩側原有開關及載流設備。

第六章 實體模型設計及水工試驗規畫

階段性完成數值模擬研究後，根據模型相似理論設計實體模型及並進行相關水工試驗規劃，檢視數值模擬之成果與水工模型試驗之結果並進行相關探討及比較。

6.1 模型相似理論及縮尺

在水工模型試驗的設計與規劃中，模型(model)與實體(prototype)必須同時滿足幾何相似(geometric similarity)、運動相似(kinematic similarity)及動力相似(dynamic similarity)。就動力相似而言，結構物在實際海洋中所受的外力有，浮力、重力、慣性力、流阻力及纜繩彈性張力等，但是可以同時考慮這些外力的動力相似條件並不存在，所幸，這些外力中只有少數是主導結構物運動，因此可由流場中的主要作用力來決定採用之動力相似參數，其餘的外力則盡可能地減低它的影響，在本研究的問題中，其最重要的外力為重力及慣性力，故可由福祿數(Froude similarity)為動力相似為主要依據，如下所示：

$$F_r = \sqrt{\frac{\text{inertial force}}{\text{gravity force}}} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

其中 V 為流速， g 為重力加速度， L 為長度，則模型(model)與實物原型(prototype)的關係如下：

$$\left[\frac{V}{\sqrt{gL}} \right]_m = \left[\frac{V}{\sqrt{gL}} \right]_p$$

其中下標 m 表示模型(model)；下標 p 表示原型實體(prototype)。

假設本文定義之模型比例縮尺(scale ratio)為 λ ，則 λ 表示如下所示：

$$\lambda = \left(\frac{L_m}{L_p} \right)$$

由模型與實體之關係式，(6.2)式，可以推導出下列物理量的比例縮尺關係式：

$$\text{面積縮尺} : \frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = \lambda^2$$

$$\text{週期縮尺} : \frac{T_m}{T_p} = \sqrt{\lambda}$$

$$\text{波高縮尺} : \frac{H_m}{H_p} = \lambda$$

$$\text{質量縮尺} : \frac{M_m}{M_p} = \frac{\rho_m \times L_m^3}{\rho_p \times L_p^3} = N_D \lambda^3$$

$$\text{波浪力縮尺} : \frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m \times g_m}{M_p \times g_p} = \frac{\rho_m \times L_m^3 \times g_m}{\rho_p \times L_p^3 \times g_p} = N_D \lambda^3$$

其中 N_D 為密度縮尺比例，因為海水與淡水的密度相近，因此假設 $N_D = 1$ ，而模型與實體所受重力相同，故可假設 $g_m = g_p$ 。有了上述相似理論後便可開始模型之製作，在決定模型尺寸前還需考量整體試驗設備。本實驗所使用的試驗水槽長 35 公尺、寬 1 公尺、高 1.2 公尺，試驗建議水深為 0.5 公尺至 0.8 公尺。考慮花蓮港現地實際水深為 15 公尺及本單位實驗室之規模，設計以 1/25 縮尺進行水工模擬試驗。

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{25}$$

6.2 實驗模型製作

根據福祿數(Froude number)相似理論方可開始實施模型之製作。實際水深為 15 公尺，模型試驗水深為 0.6 公尺，故本實驗採 1/25 為縮尺。設計防波堤式震盪水柱模型，共包含 4 個氣室其總長為 26cm、寬為 4 個氣室寬(81cm)加上左右兩邊擋水板(5cm*2)，總寬為 91cm、

高 100.5cm，如圖 6.1 所示。材質為壓克力板，厚度 1cm 方形，接縫處均用防水膠接合以避免透水。

6.3 實驗儀器及設備

本實驗是利用國立中山大學海洋環境及工程學系水工實驗室中之斷面水槽，其實驗儀器設備如下：

(1) 造波水槽(wave tank)與造波機(wavemaker)

斷面水槽長 35 公尺、寬 1 公尺、高 1.5 公尺，水槽前端配置活塞式規則造波機一部，以 AC 伺服馬達，藉由數位類比卡(AD/DA) 控制造波板前後運動。而水槽末端有孔隙率約 98% 不鏽鋼消波斜板三片其反射率為 8%，並設有雙向造流系統，最大流速可達 20cm/m，兩側為透明之強化玻璃，可以目視波浪狀況，底床為光滑之不鏽鋼底板。本實驗模型設置於造波板前 20 公尺處，由造波機造出規則重力前進波，如圖 6.3 至圖 6.4 所示。

(2) 電容式波高計

本實驗使用五支波高計，其中一支波高計放置於造波板前 8 公尺，而其中三支分別放置於模型前端 1.6 公尺、1.15 公尺及 0.7 公尺處，還有一支波高計放置於模型氣室內部。

由擷取之波高差數據經換算轉換，分別求得實驗所造出入射波、反射波及模型氣室內部之波高，可精確記錄波高變化，如表 6-4 及圖 6.5 所示。

(3) 訊號增幅器(Amplifier)

為六頻道式之波高增幅器，用來供應波高計電源與放大波高計量得水位變化的電壓訊號，輸出電壓範圍為 0~5V，如圖 6.6 所示。

(4) 資料擷取器

為數位類比擷取卡(AD/DA),採用研華 PCI.1810.HG 內建 16 個類比輸入、(Analog input)頻道與 2 個類比輸出 (Analog output)頻道,可用來擷取波高計的資料與輸出訊號控制造波機運動,如圖 6.8 所示。

(5) 電腦

共二部各安裝一張 AD/DA 卡,其中一部用來控制造波機,另一部用來擷取波高計、張力、電壓資料與攝影機的影像。

(6) 氣流速度計

測量範圍:5.1 至 25 公尺/秒,1.8 至 72 公里/小時,9.7 至 38.8 哩/小時 40 至 3940 英尺/分鐘,如圖 6.9 所示。

(7) 轉速計

測量範圍:10.00-99999 轉/分鐘,準確度 0.04%±2 dgts,如圖 6.10 所示。

(8) 威爾斯渦輪

無論風力由哪邊吹入,此種渦輪都保持相同的旋轉方向,兩種幾何設計,一組安裝於馬達發電,另一組則測試轉速,如圖 6.11 所示。

(9) 電動馬達

直流馬達,量測負載轉速及初步發電使用,如圖 6.12 所示。

(10) 示波器

型號 TDS2002B，量測範圍：波道 2，頻寬 60MHz，取樣頻率 1.0GS/s，如圖 6.13 所示。

(11) 風洞導流系統

整體系統分成 3 部分，導流底盤、馬達基座、上部氣流口。導流系統設計目的在於減緩氣流進出時的壓損與渦流現象，如圖 6.14 所示。

6.4 實驗佈置

首先架設模型於造波水槽內，波高計位置分別距造波機 10m，以及 18.4m、18.85m、19.3m 之處，模型中心點離造波板的水平距離為 20m，而第 5 支波高計則置於模型氣室內部中間距離造波機 20m 處，氣流速度計則置於模型氣室上方出風口處，實驗水槽示意圖如圖 6.2 所示。Goda(1976)兩點法建議的波高計設置相關位置可由下式表示：

$$L_{min} = \frac{\Delta l}{0.45} < L < \frac{\Delta l}{0.05} = L_{max}$$

上式中，波高計間隔 Δl 與波長 L 兩者關係， Δl 不能為半波長整數倍，波高計與結構物之距離為 $x > 0.1L$ 。

6.5 實驗波浪條件

設計實驗波浪條件時，需盡量滿足數值模擬簡化後之波浪場條件，以免因非線性效應過大，而造成影響。郭(1995)在海洋工程中提到線性波理論的限制

$$\frac{L^2 H}{h^3} \ll \frac{32\pi^2}{3}$$
$$\frac{H}{L} < \frac{1}{16} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

其中 L 為波長， H 為波高， h 為水深， $\frac{L^2 H}{h^3}$ 為 Urell 參數， $\frac{H}{L}$ 為波浪尖銳度(wave steepness)。

6.6 實驗參數設定

本實驗使用模型，尺寸長、寬、高各為 26cm、81cm、100.5cm 及前牆開口率 35% 與 100%，單斜翼與雙斜翼渦輪各兩組，實驗有三組不同週期，五組不同波高，有無負載轉速以及花蓮港與高雄港示性波高與週期，如表 6-2 所示，對同一試驗模型，將進行 17 組不同波浪參數之實驗。

1. 改變參數

週期(T) 1.2、1.6、2 sec，波高(H)4、6、8、10、12 公分，花蓮港週期(T)1.6 sec，波高(H)5.2 公分，高雄港週期(T)1.75 sec，波高(H)6.25 公分，前牆開口率 35 及 100。

2. 固定參數

結合防波堤式坡能轉換系統模型之相關尺寸參數，如表 8-3 所示。此為初步設計之縮尺模型，待初步試驗結果分析後，將依經費所能提供之最大範圍進行相關尺寸之改變，其中較為重要者將包括：(1)進水口位置、大小及與之尺寸關係變化；(2)氣孔數量、大小與氣室大小及數量之尺寸關係變化；(3)沒水深度及波高尺度關係變化；(4)氣室沿著入射波浪縱深與波長之尺度關係變化等。

6.7 實驗步驟

打開儀器暖機，由於儀器開起時機械內部運轉會使得儀器內溫度慢慢升高，因此待儀器開機至少 30 分鐘(儀器安定時間)後儀器內部溫度趨於穩定時再開始儀器操作，可避免溫度變化影響造成儀器的訊號不穩定。

本實驗所蒐集數據主要為波高資料、氣流速度資料。分析時除了瞭解氣室內為波高變化及通氣口氣流速度變化外，波浪之反射率與傳統沉箱式碼頭之差異亦將予以考慮。

6.7.1 波高計量測

將水注入實驗水深，分別率定波高計及量測波高，設定輸入波高及週期造出的規則波，利用資料擷取系統得波高計上所量測到的電壓值，擷取頻率為 32Hz，記錄時間為 60 秒。

波高率定：架設波高計於設計位置，調整波高計的沒水深度，確保實驗中所量測的最高水位(波峰)與最低水位(波谷)的電壓值於有效線性範圍內(0 ~ 5 v)，利用抽水馬達控制水位，分別紀錄 4 次不同水位下的對應的穩定電壓值，做水位與電壓的一次線性回歸線完成率定。

6.7.2 氣流速度量測

將氣流速度計設置於波能轉換沉箱氣室上方之導流系統內，擷取量測到的氣流速度值，並於試驗後進行數據的讀取分析。

6.7.3 無負載之風扇轉速量測

將威爾斯風扇架設於波能轉換沉箱氣室上方出氣口，轉速計則架設於氣口上方 15cm 處，其中一片扇葉黏貼轉速計反光貼片，以轉速計記錄數值，並於試驗後進行數據的讀取分析。

6.7.4 有負載之風扇轉速與發電量量測

將威爾斯風扇與馬達架設於於波能轉換沉箱氣室上方出氣口，轉速計則架設於氣口上方 15 公分處，其中一片扇葉黏貼轉速計反光貼片，使轉速計得以記錄數值，馬達串聯電組、Led 燈泡並和示波器並聯量得電壓讀數，並於試驗後進行數據的 7 讀取分析。

表 6-1 實驗儀器與設備一覽

實驗設備與儀器	數量
造波水槽與造波機	1 座
電容式波高計	1 臺
訊號增幅器	5 支
資料擷取器	1 組
電腦	2 部
氣流速度計	1 支
轉速計	1 支
威爾斯渦輪	4 支
電動馬達	1 組
示波器	1 部
風洞導流系統	1 組

表 6-2 模型與實體縮尺

Parameter	Prototype	Model 103-1
花蓮港波浪條件 (模型縮尺 1/25)	8sec / 1.3m	1.6 sec / 5.2cm
高雄港波浪條件 (模型縮尺 1/16)	7sec/1m	1.75sec/6.25cm
週期 T(sec)	6sec 8sec 10sec	1.2 sec 1.6sec 2 sec
波高 H(cm/m)	1 m 1.5 m 2 m 2.5 m 3 m	4 cm 6 cm 8 cm 10 cm 12 cm

表 6-3 模型與實體縮尺

parameter	Model 103-1	Model 104-1
模型總長	26 cm	
模型總寬	81+10 cm	
模型總高	100.5 cm	
氣室下方開口寬×高	19cm×19cm	19cm×53.5cm
氣室內部長	24 cm	
沒水深	6 cm	
出風口直徑	7 cm	
氣室連通洞直徑	2 cm	

表 6-4 波高計規格表

線性度	0.5% FS
反應時間	2ms
線性度斜率溫度效應	< 0.01% (25°C ~ 31°C)
穩定度	500 mv/24H
量測波高範圍	0.005m ~ 0.45m
訊號電纜線最大長度	100m
輸出訊號	0 ~ 5V

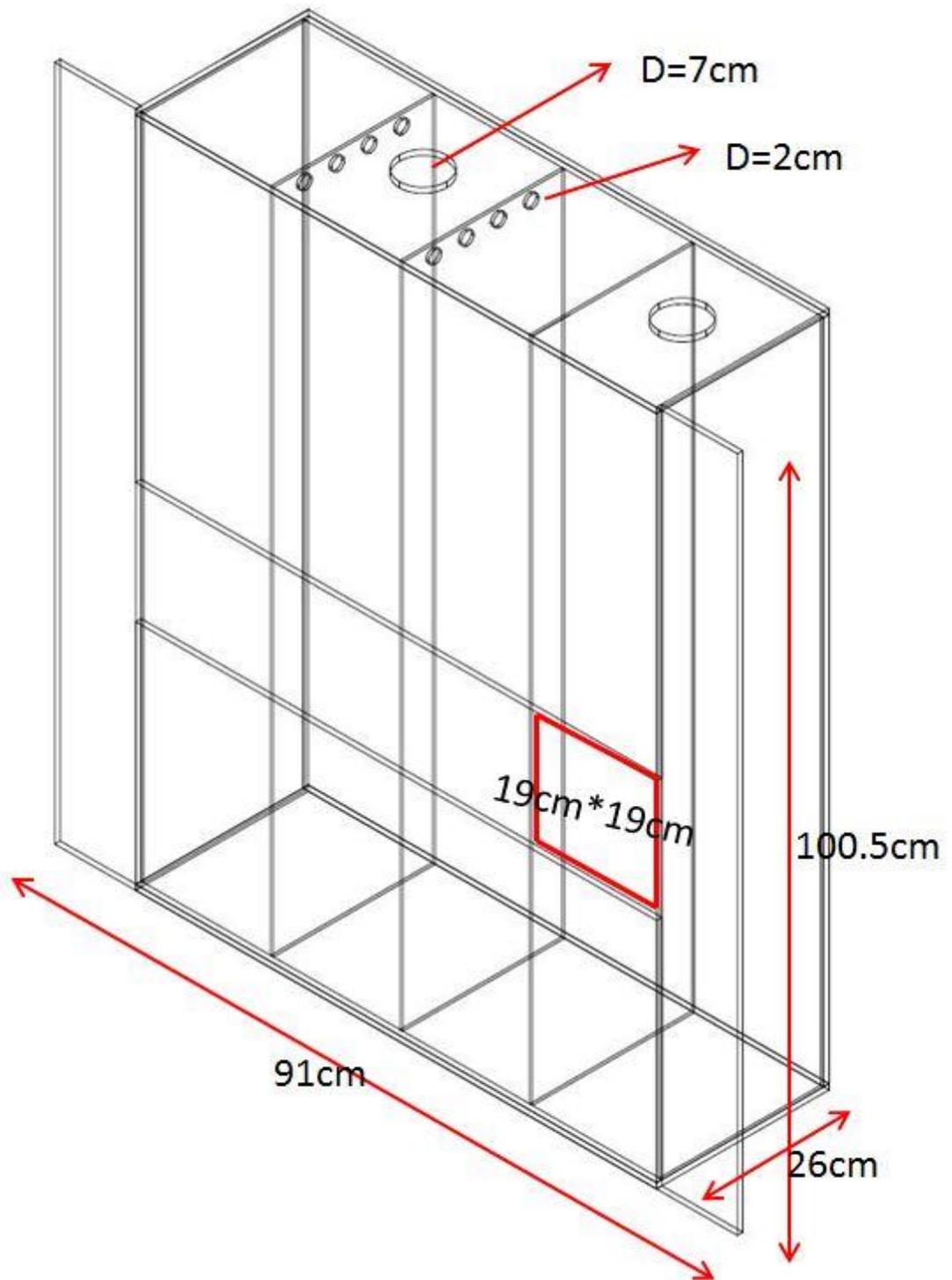


圖 6.1 水槽試驗模型示意圖

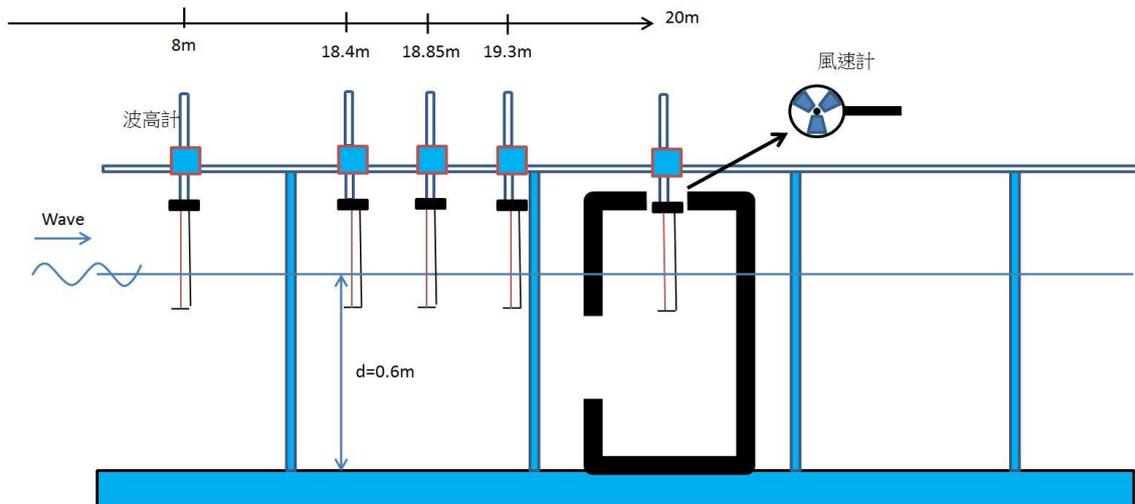


圖 6.2 實驗水槽示意圖



圖 6.3 造波水槽



圖 6.4 造波機



圖 6.5 波高計



圖 6.6 訊號增幅器

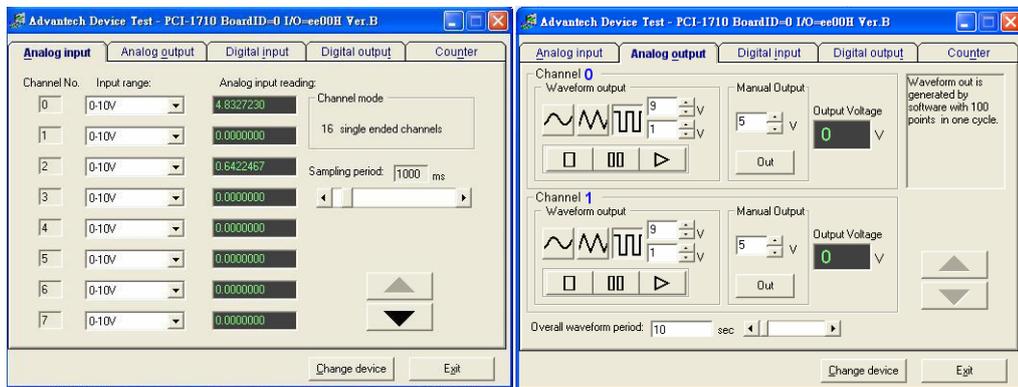


圖 6.7 AD/DA 內建 Analog input 與 output 介面



圖 6.8 訊號放大器



圖 6.9 氣流速度計(產品編號：AM.4214SD)



圖 6.10 轉速計(產品代號：RM-1501)

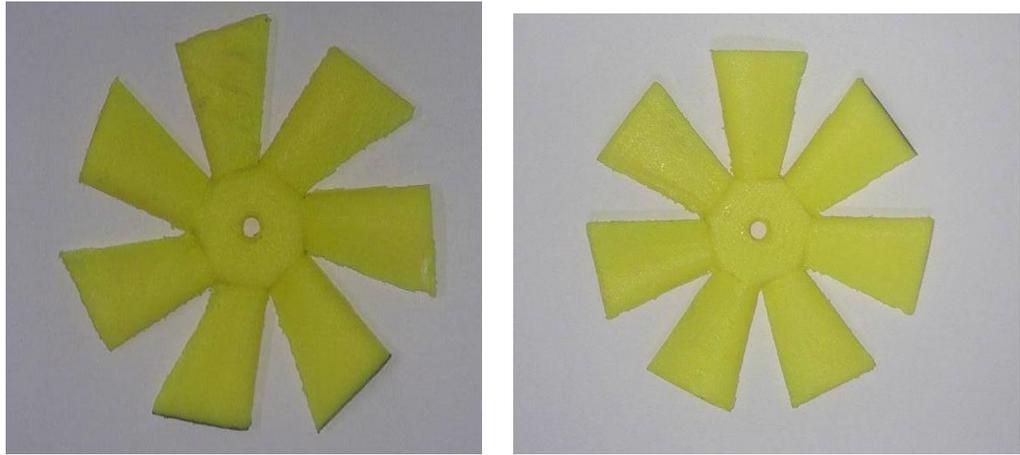


圖 6.11 威爾斯風扇



圖 6.12 直流馬達

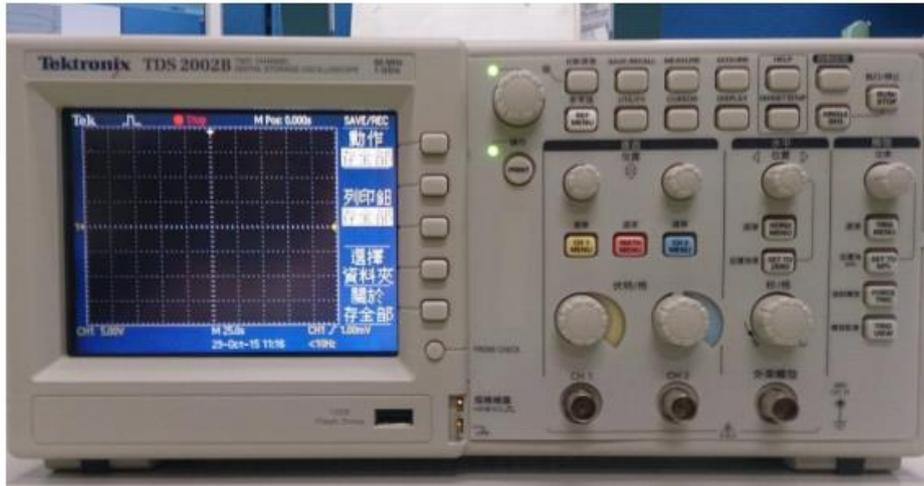


圖 6.13 示波器



圖 6.14 風洞導流系統

第七章 水工試驗結果討論與分析

7.1 水工模型於不同波浪條件下之試驗結果比較

7.1.1 波浪反射率結果比較

第四期 15 組波浪條件測試，各個模型所表現的反射率試驗並與第三期比較其結果如下表 7-1~表 7-3，並整理兩種比較圖，圖 7.1~7.3 為單一種模型隨著波浪條件變化的反射率試驗結果比較，圖 7.4~圖 7.8 則為不同模型的反射率試驗結果比較，無斜板模型的極值出現於週期 1.2 及 1.8 處。出風口感良後，反射率趨近穩定，無較大的變化。前牆開口率的部分，波浪條件在週期為 1.2~1.6 間與入射波高為 12 時，開口率 100%之反射率皆小於開口率 35%，在不同波高之狀況下浮動值較大。

表 7-1 無斜板模型於不同波浪條件下之反射率結果

反射率 $K_r(\%)$		波高 $H(\text{cm})$				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1	47.8	57.3	58.9	59.7	61.3
	1.2	32.0	45.1	54.9	55.0	56.7
	1.4	54.7	50.2	49.5	48.0	48.8
	1.6	56.5	64.8	65.9	62.0	62.0
	1.8	79.2	74.7	72.6	73.0	71.9
	2	71.7	65.4	67.1	65.2	61.6

表 7-2 出風口改良模開口率 35%於不同條件下之反射率結果

反射率 Kr(%)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	47.9565	34.28306	34.20778	33.0701	35.79969
	1.6	34.85556	33.98268	37.74023	38.28405	41.59344
	2	43.94977	49.11204	44.96441	45.35437	53.47261

表 7-3 出風口改良模開口率 100%於不同條件下之反射率結果

反射率 Kr(%)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	20.02778	20.6402	24.50861	27.32907	30.84267
	1.6	24.29314	24.30511	28.83001	31.95196	32.90549
	2	27.71818	29.38032	31.03205	33.73548	42.88996

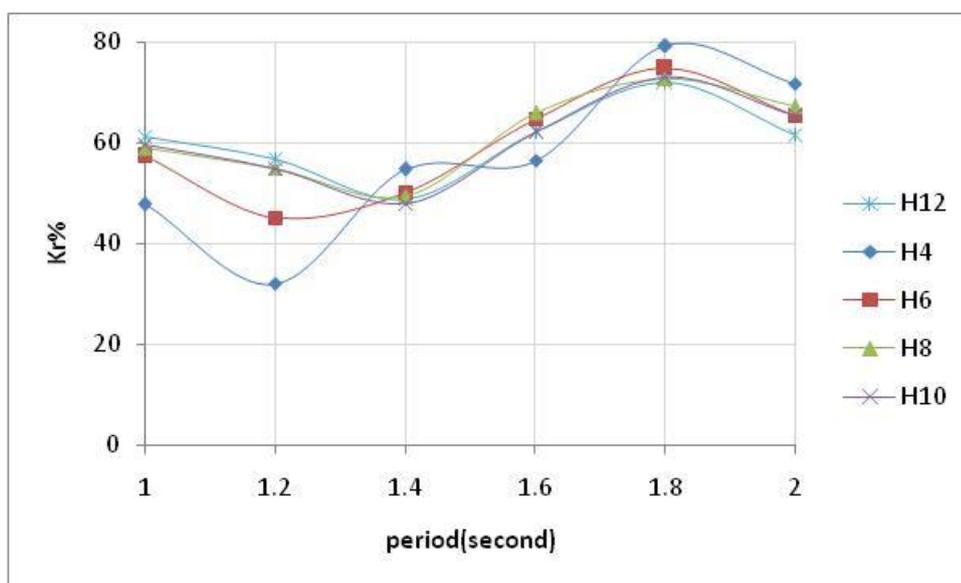


圖 7.1 無斜板模型於各波浪條件下反射率與波浪週期關係圖

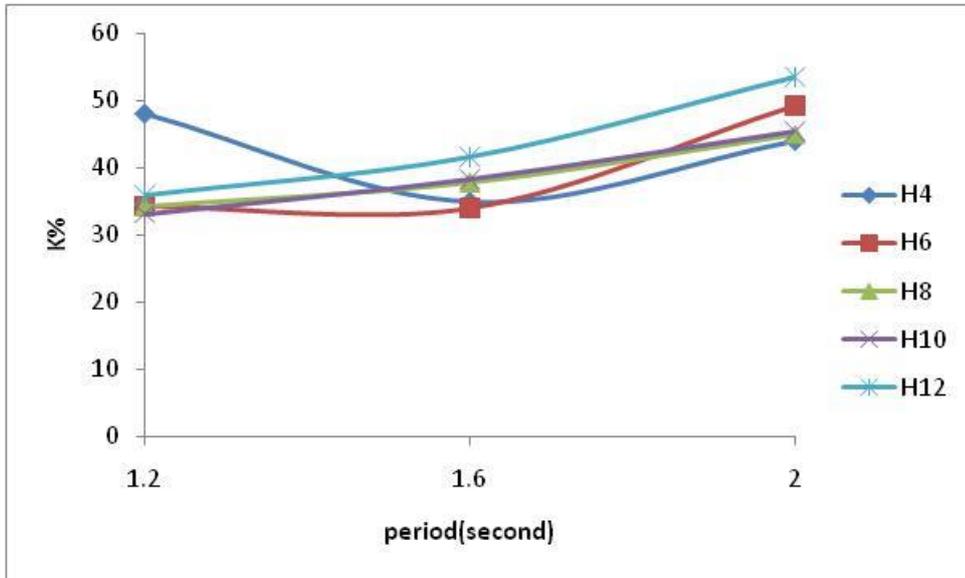


圖 7.2 開口率 35%出風口於各條件下反射率與波浪週期關係圖

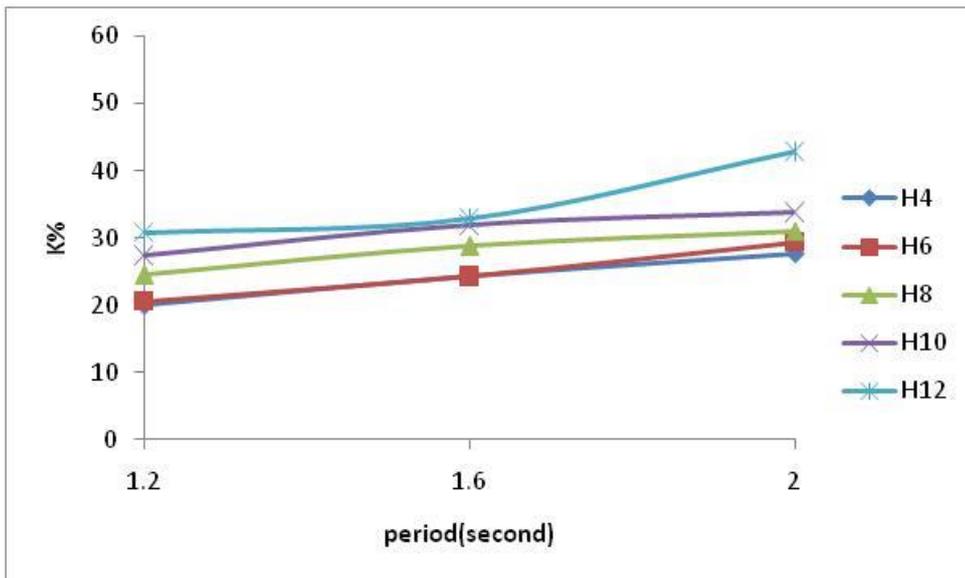


圖 7.3 開口率 100%出風口於各條件下反射率與波浪週期關係圖

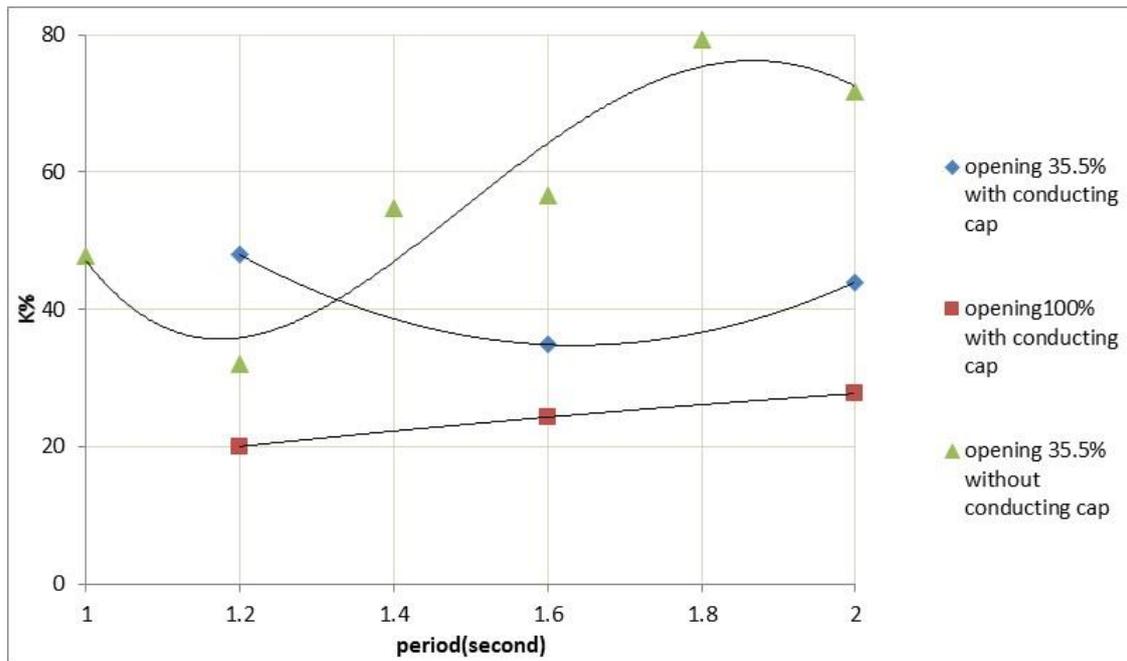


圖 7.4 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=4)

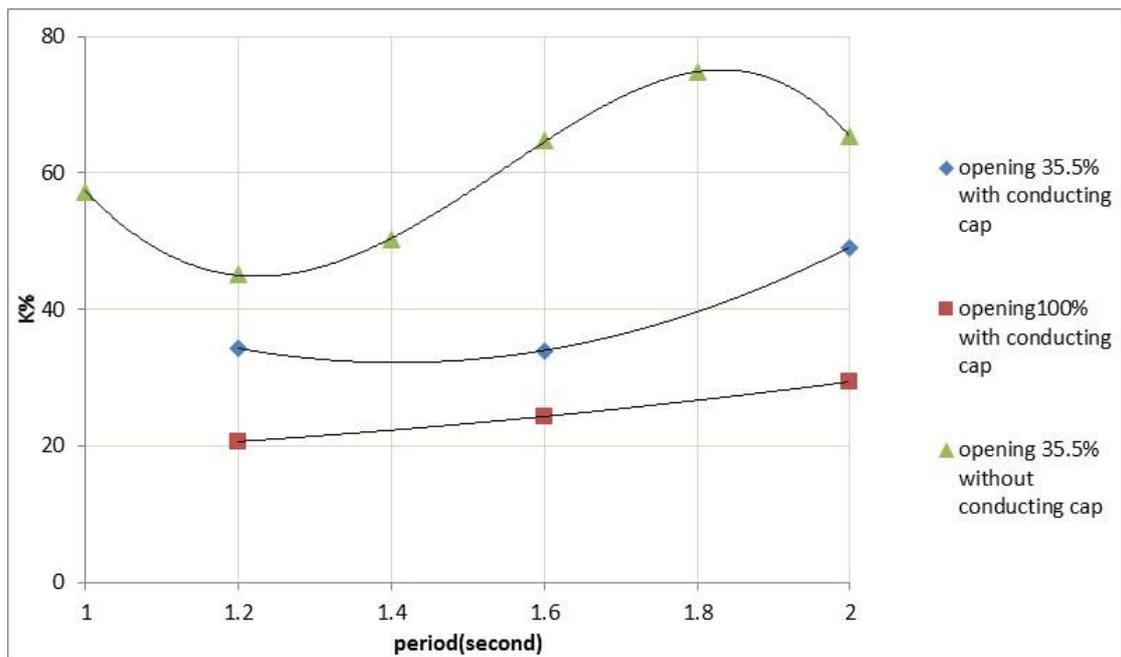


圖 7.5 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=6)

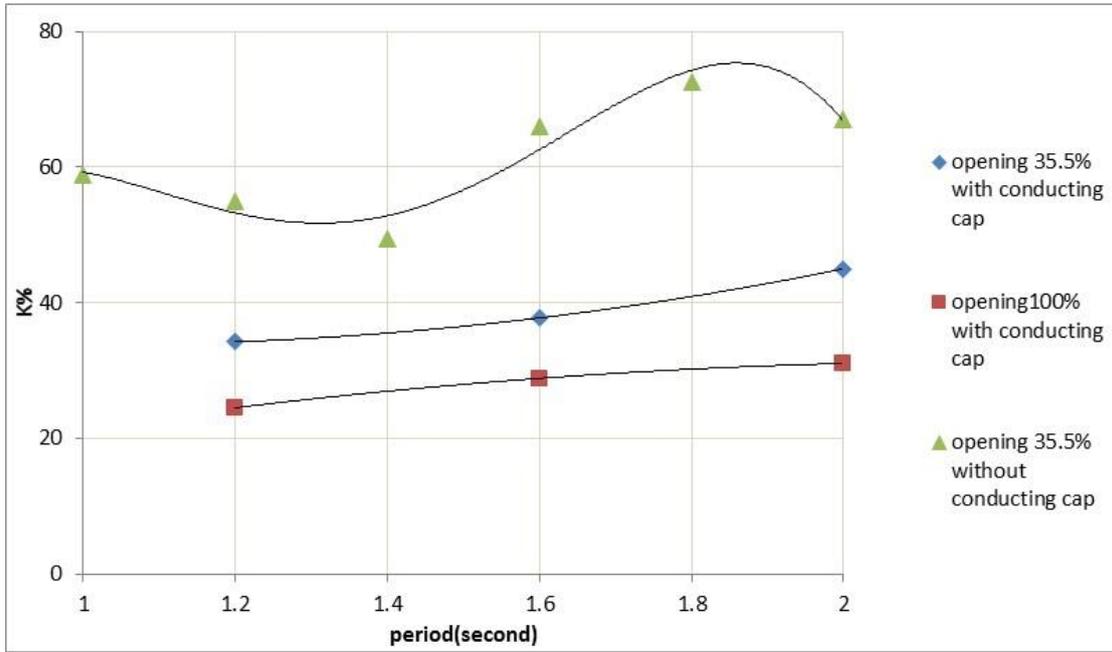


圖 7.6 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=8)

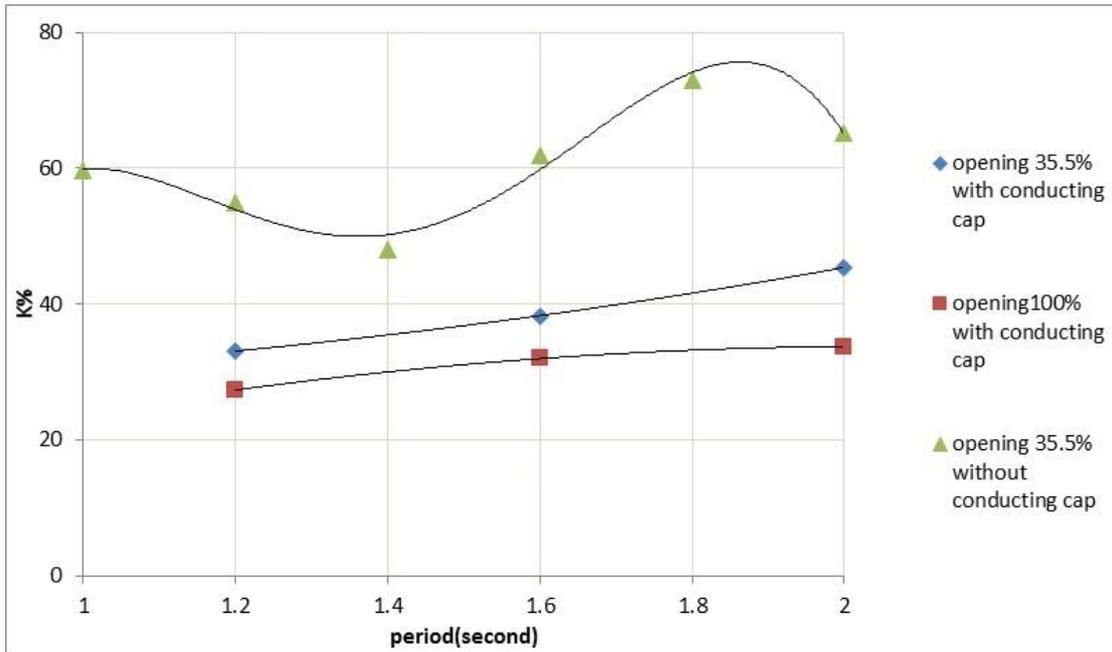


圖 7.7 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)

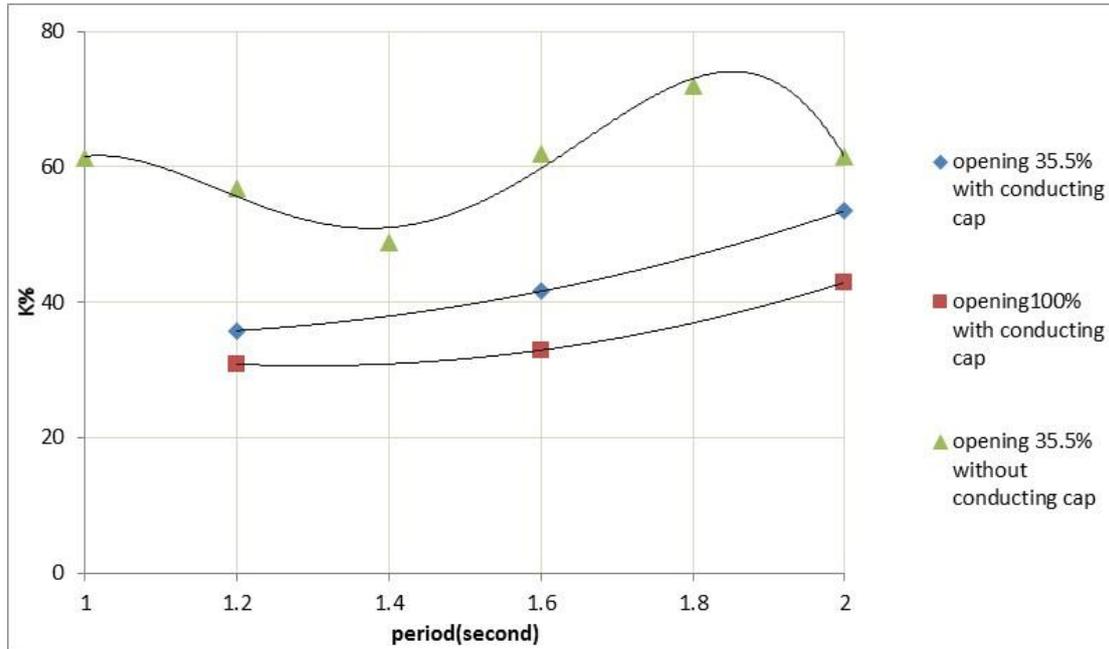


圖 7.8 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)

7.1.2 氣流速度結果比較

第四期 15 組波浪條件測試，各個模型所表現的氣流速度試驗並與第三期比較其結果如下表 7-4~表 7-6，並整理兩種比較圖，圖 7.9~7.11 為單一種模型隨著波浪條件變化的氣流速度試驗結果比較，圖 7.12~圖 7.16 則為不同模型的反射率試驗結果比較，可看出各模型都在週期 1.2 時有較佳的氣流速度表現，並於週期 1.8 左右時有最低值出現，後又有上升趨勢。在前牆開口率的改變上，實驗結果顯示前牆開口率 100% 時具有較大的氣流速度之現象，但在波浪週期為 2 秒的波浪條件下此現象則會相反。

表 7-4 無斜板模型於不同波浪條件下之氣流速度結果

氣流速度(m/s)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1	5.52	7.17	8.23	8.81	9.38
	1.2	6.19	8.11	9.88	12.53	12.85
	1.4	5.42	7.18	8.6	9.96	11.32
	1.6	5.9	8.1	9.57	10.41	11.49
	1.8	4.01	5.53	6.89	8	8.76
	2	6.64	8.24	8.35	10.18	14.85

表 7-5 開口率 35%風口改良於不同條件下之氣流速度結果

氣流速度(m/s)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	7.11	9.08	11.19	12.60	12.49
	1.6	5.41	7.38	8.84	10.28	11.03
	2	5.75	8.075	8.68	8.85	10.43

表 7-6 開口率 100%風口改良於不同條件下之氣流速度結果

氣流速度(m/s)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	8.38	11.23	13.78	16.20	19.32
	1.6	5.63	7.73	9.14	9.54	10.11
	2	6.45	7.62	7.82	8.64	8.91

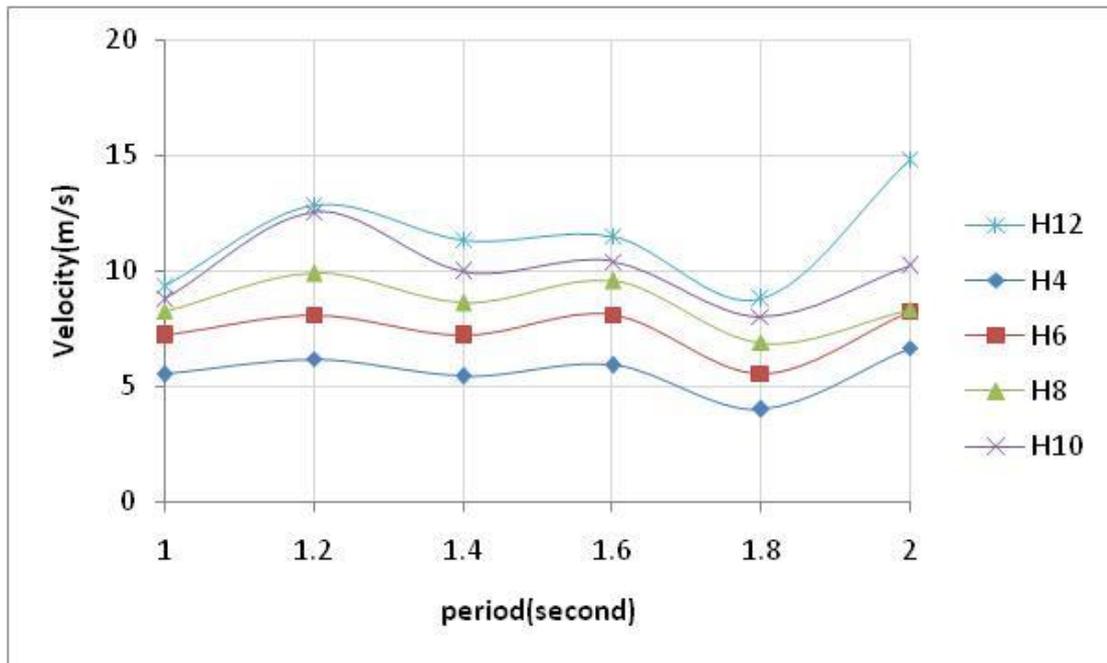


圖 7.9 無斜板模型於各波浪條件下氣流速度與波浪週期關係圖

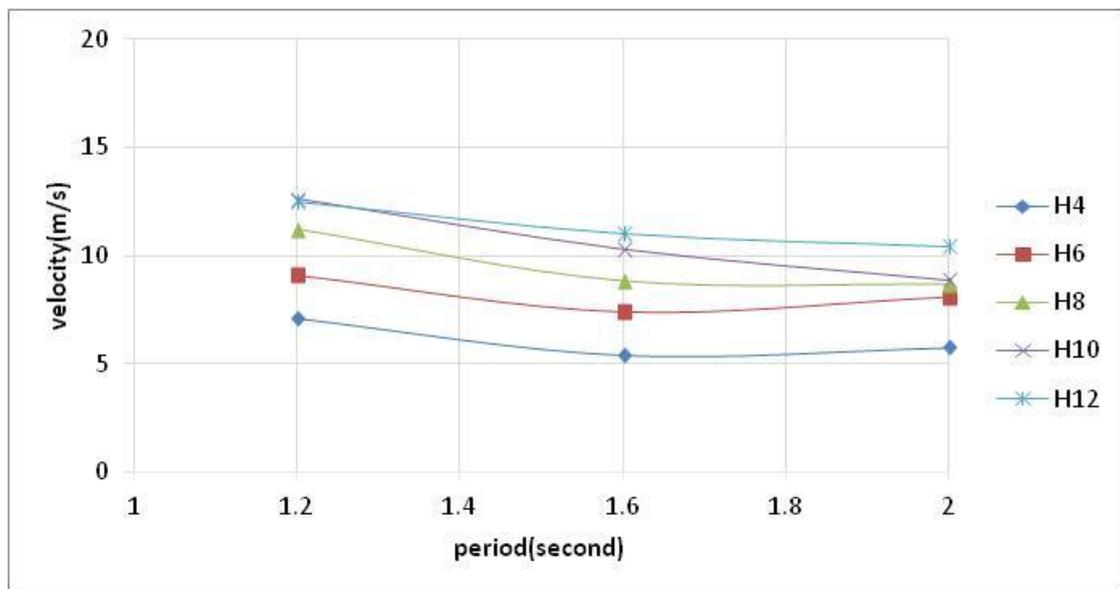


圖 7.10 前牆開口率 35%於各條件下氣流速度與波浪週期關係

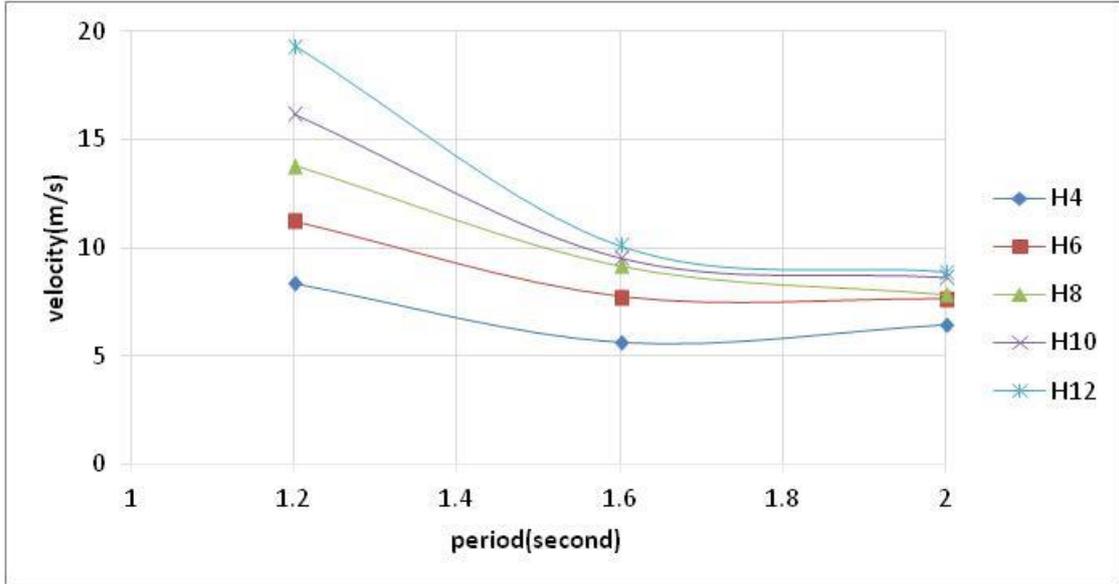


圖 7.11 前牆開口率 100%於各條件下氣流速度與波浪週期關係圖

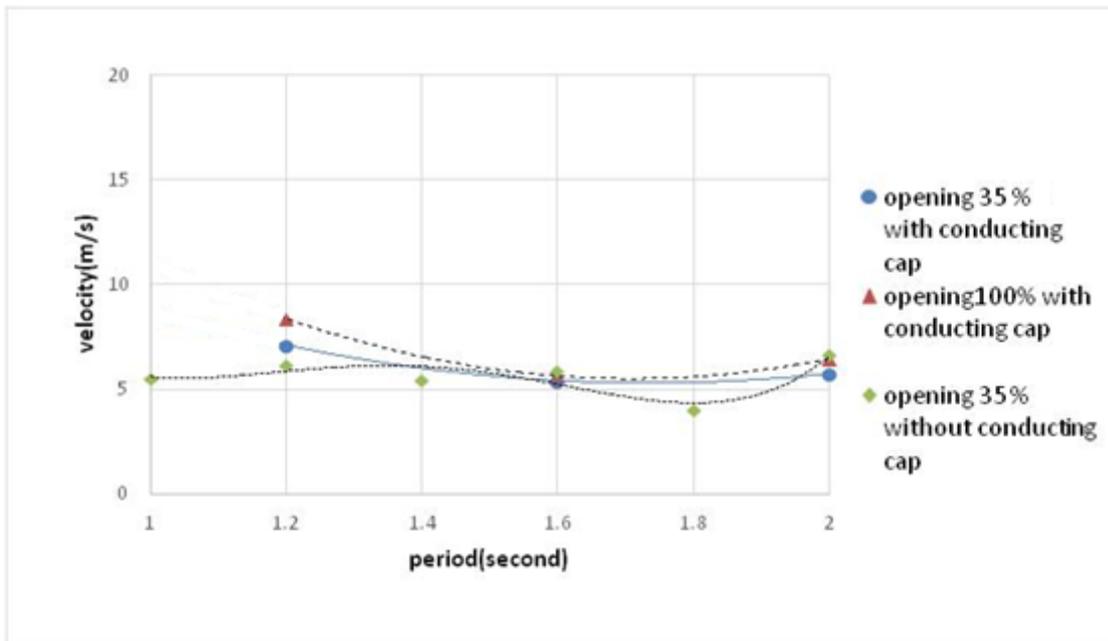


圖 7.12 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=4)

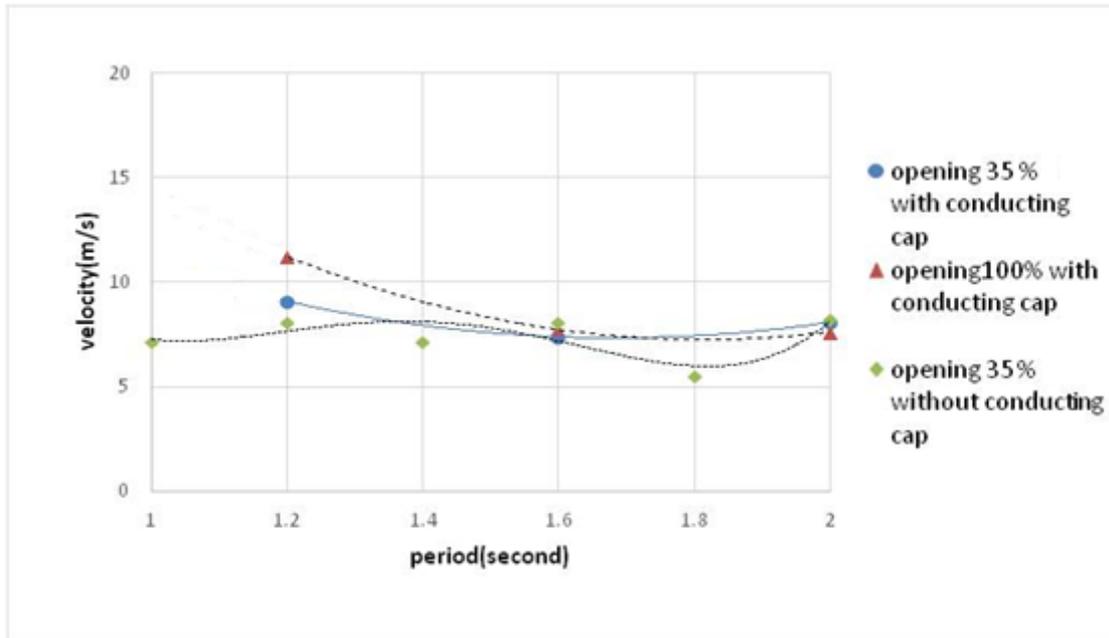


圖 7.13 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=6)

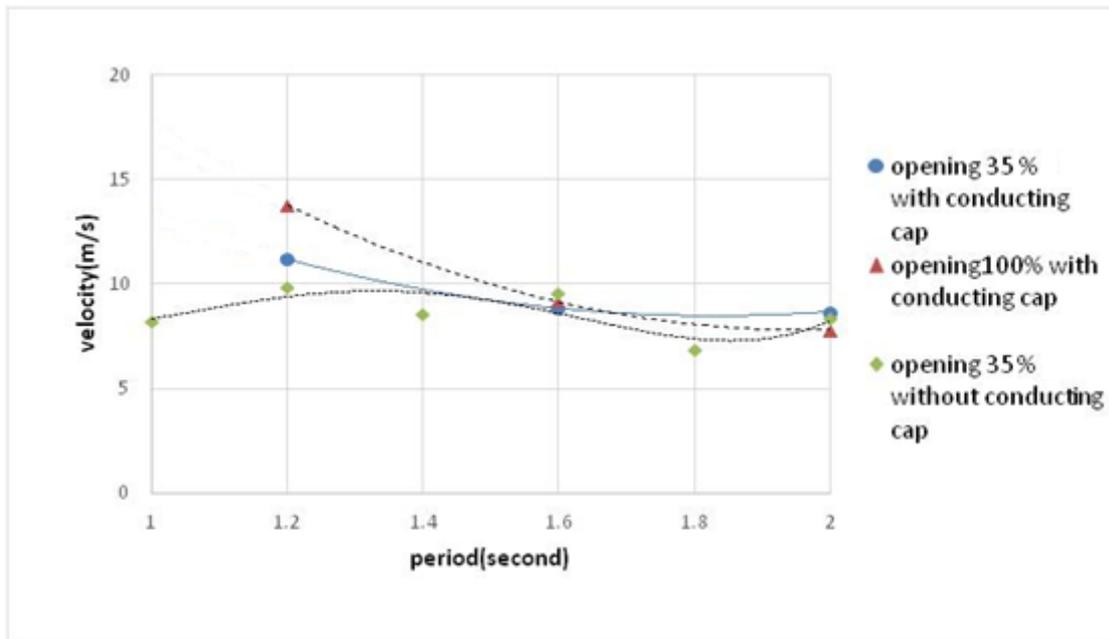


圖 7.14 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=8)

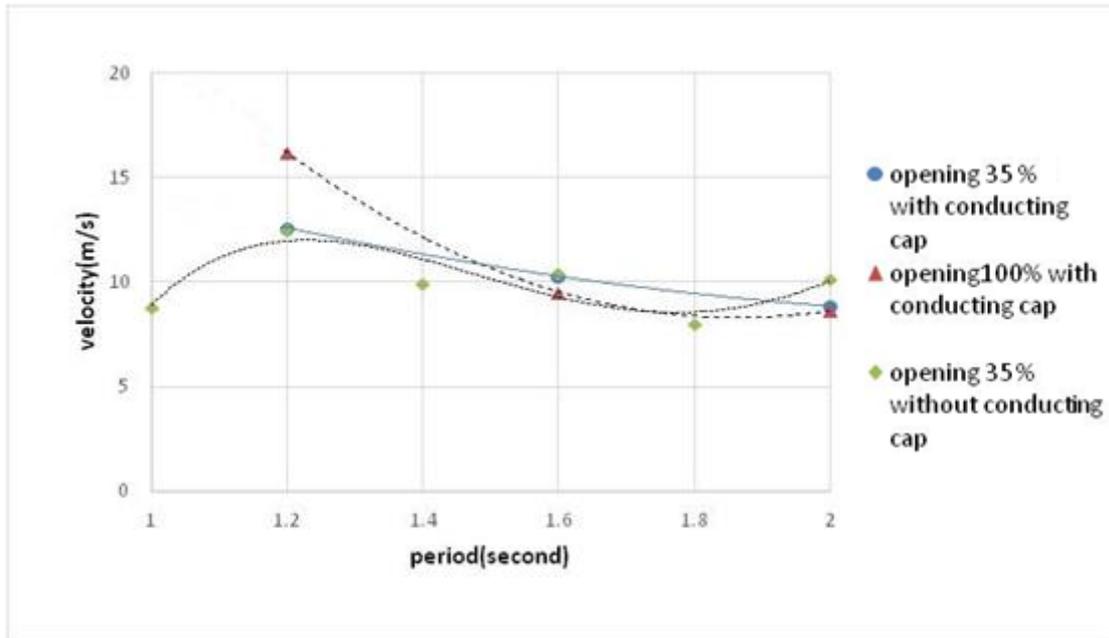


圖 7.15 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)

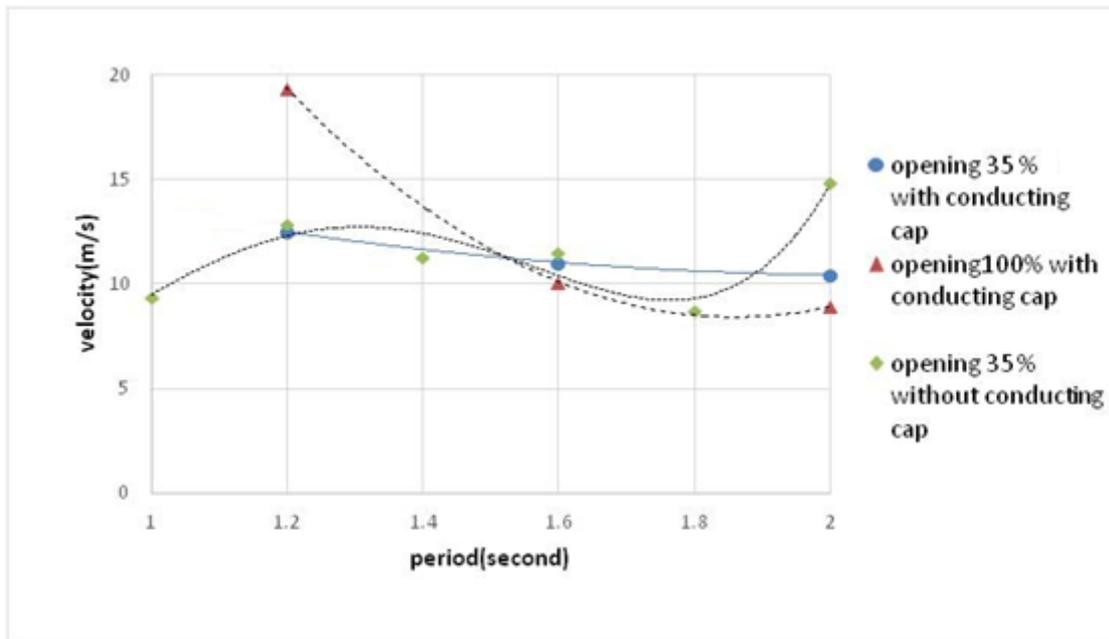


圖 7.16 不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=12)

7.1.3 內部波高結果比較

第四期 15 組波浪條件測試，各個模型所表現的內部波高試驗並與第三期比較其結果如下表 7-7~表 7-9，並整理兩種比較圖，圖 7.17~7.19 為單一種模型隨著波浪條件變化的內部波高試驗結果比較，圖 7.20~圖 7.24 則為不同模型的內部波高試驗結果比較，內部波高的極值出現在週期 1 及週期 2，由週期 1 的組別開始緩緩上升，於週期 2 出現最大值，三種模型皆有同樣趨勢。

表 7-7 無斜板模型於不同條件下之內部波高結果

內部波高(cm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1	5.43	7.14	8.78	9.71	9.68
	1.2	7.43	8.79	10.97	13.40	14.72
	1.4	6.93	9.38	11.31	13.05	14.71
	1.6	8.14	11.06	13.57	15.88	17.99
	1.8	5.92	8.23	10.47	10.51	14.75
	2	11.28	15.46	19.64	23.01	25.38

表 7-8 開口率 35%風口改良於不同條件下之內部波高結果

內部波高(cm)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	8.35	10.58	12.86	14.86	16.40
	1.6	7.54	10.68	13.49	15.87	18.25
	2	10.36	14.60	18.91	22.92	26.90

表 7-9 開口率 100%風口改良於不同條件下之內部波高結果

內部波高(cm)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	10.54	13.99	17.44	19.94	21.45
	1.6	10.41	10.56	13.52	16.25	18.80
	2	10.45	15.37	20.42	25.10	26.71

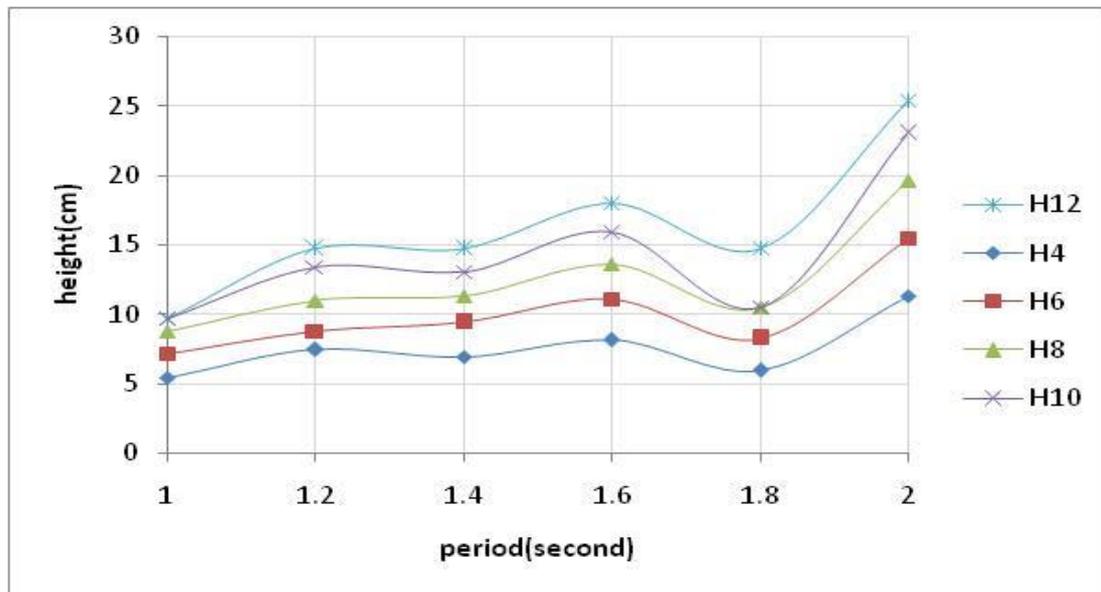


圖 7.17 無斜板模型各波浪條件下波高與波浪週期關係圖

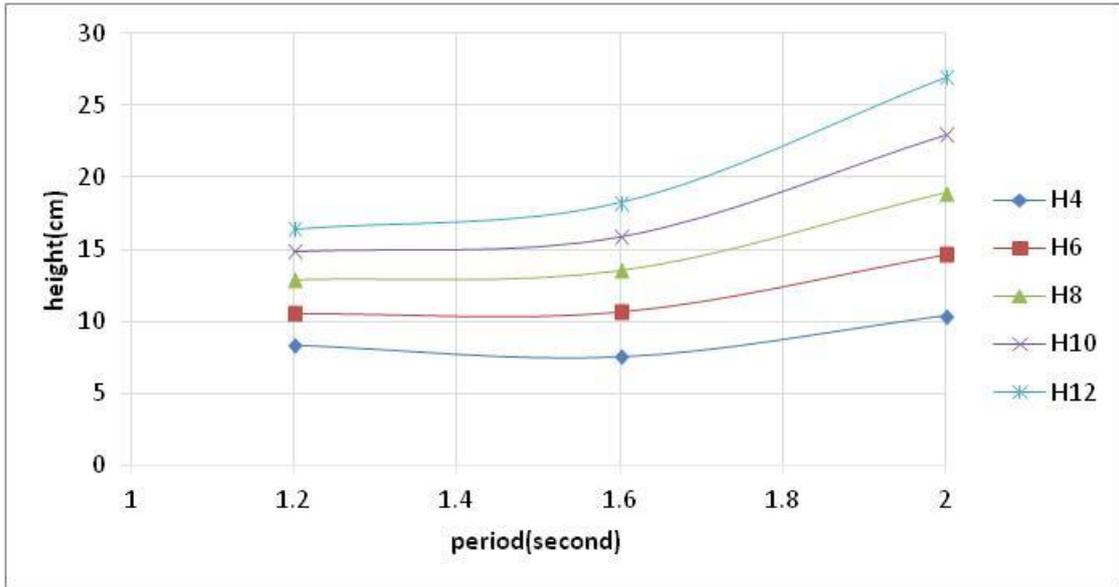


圖 7.18 前牆開口率 35%與各條件下波高與波浪週期關係圖

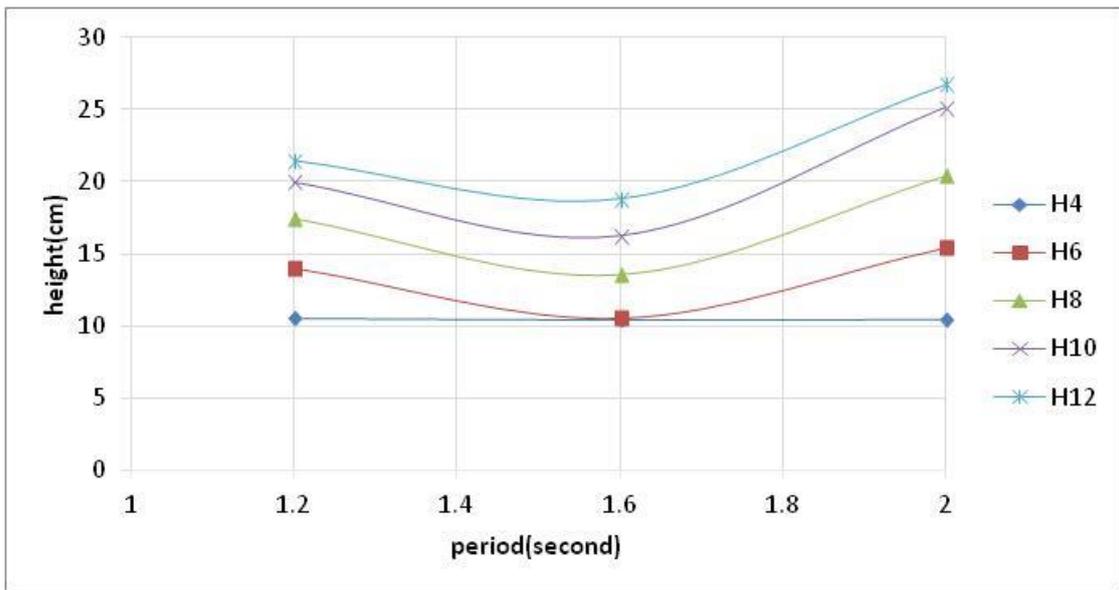


圖 7.19 前牆開口率 100%與各條件下波高與波浪週期關係圖

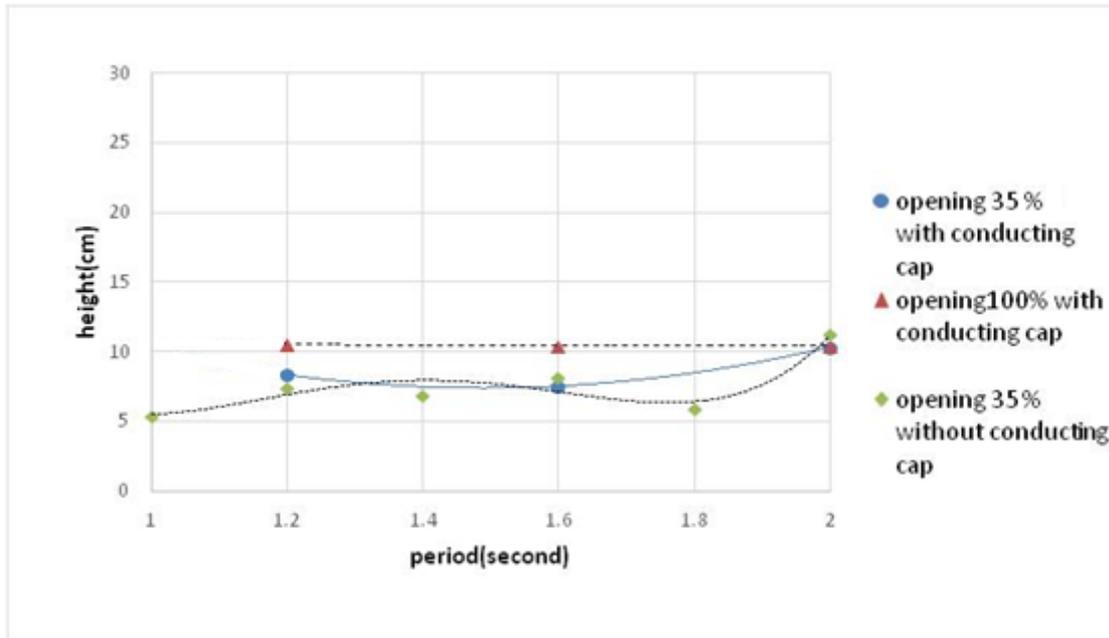


圖 7.20 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=4)

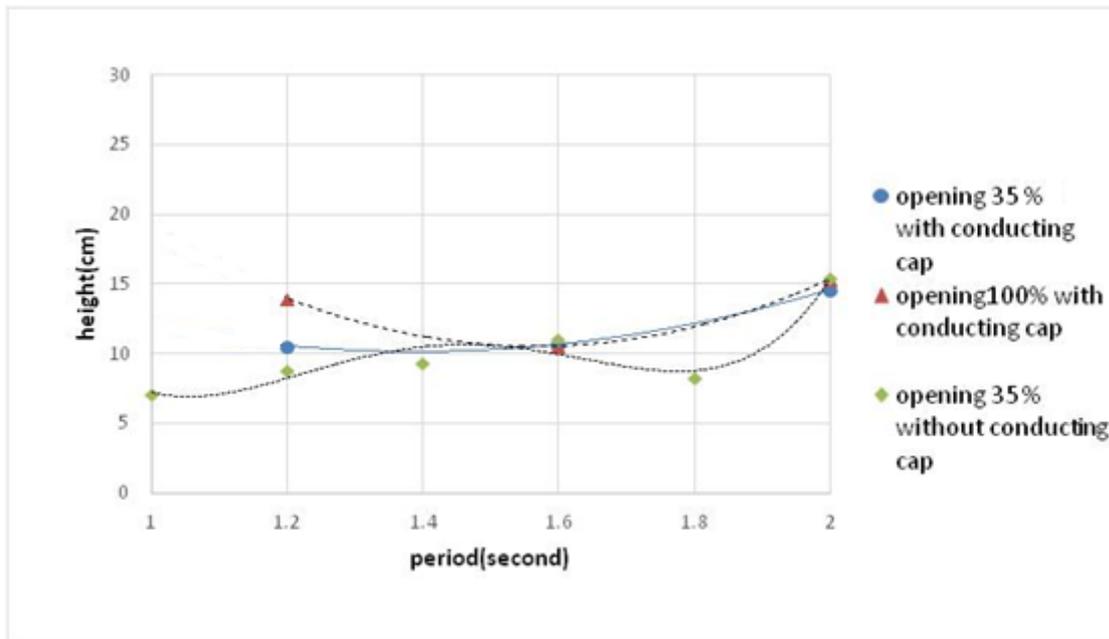


圖 7.21 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=6)

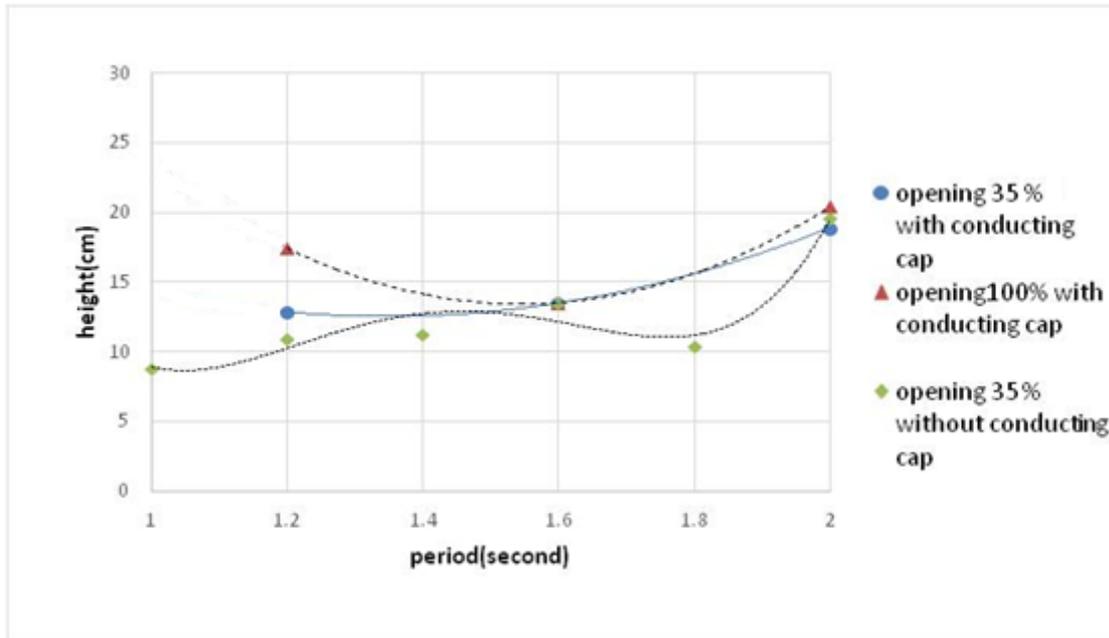


圖 7.22 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=8)

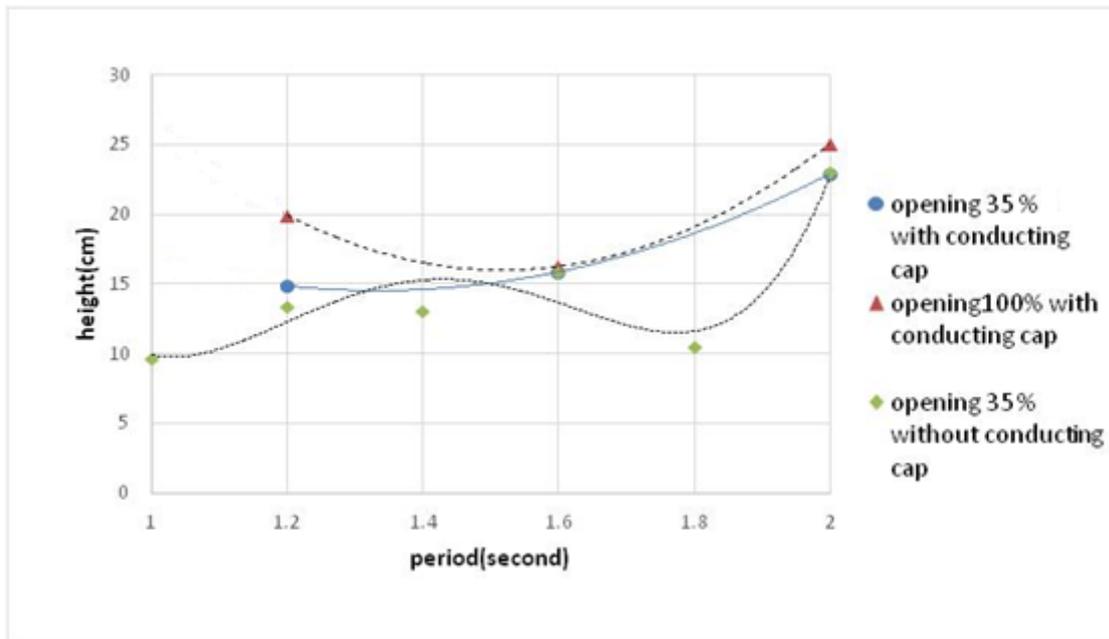


圖 7.23 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=10)

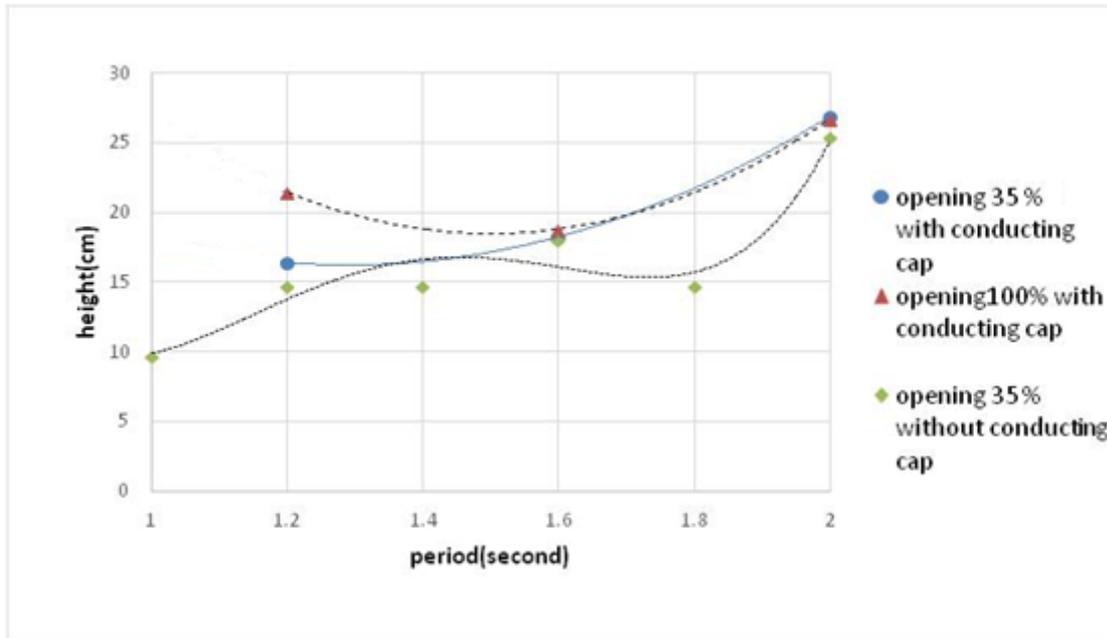


圖 7.24 不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較(H=12)

7.1.4 能量擷取率結果比較

第四期 15 組波浪條件測試，各個模型所表現的能量擷取率試驗並與第三期比較其結果如下表 7-10~表 7-12，並整理兩種比較圖，圖 7.25~7.27 為單一種模型隨著波浪條件變化的能量擷取率試驗結果比較，圖 7.28~圖 7.32 則為不同模型的能量擷取率試驗結果比較，由圖之趨勢線可看出能量擷取率同樣於週期 1.2 時有較佳的表現，週期 1.8 時有最低值出現。

表 7-10 無斜板模型於不同條件下之能量擷取率

能量擷取率 氣流速度能/入射波能		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1	0.17	0.17	0.14	0.11	0.09
	1.2	0.21	0.21	0.21	0.28	0.21
	1.4	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	1.6	0.16	0.18	0.17	0.14	0.13
	1.8	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
	2	0.21	0.17	0.10	0.12	0.26

表 7-11 開口率 35%出風口於不同條件下之能量擷取率

能量擷取率 氣流速度能/入射波能		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	0.313	0.293	0.307	0.280	0.190
	1.6	0.117	0.134	0.127	0.130	0.110
	2	0.121	0.164	0.114	0.076	0.087

表 7-12 開口率 100%出風口於不同條件下之能量擷取率

能量擷取率 氣流速度能/入射波能		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	0.51	0.55	0.57	0.60	0.70
	1.6	0.13	0.15	0.14	0.10	0.09
	2	0.19	0.14	0.08	0.07	0.05

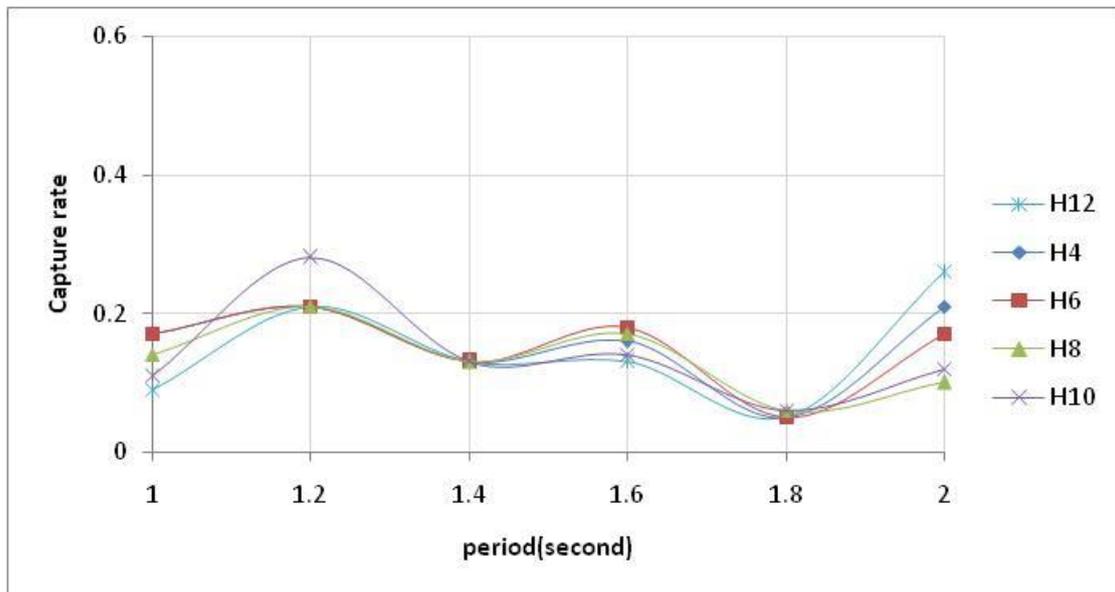


圖 7.25 無斜板模型各波浪條件下能量擷取率與波浪週期關係

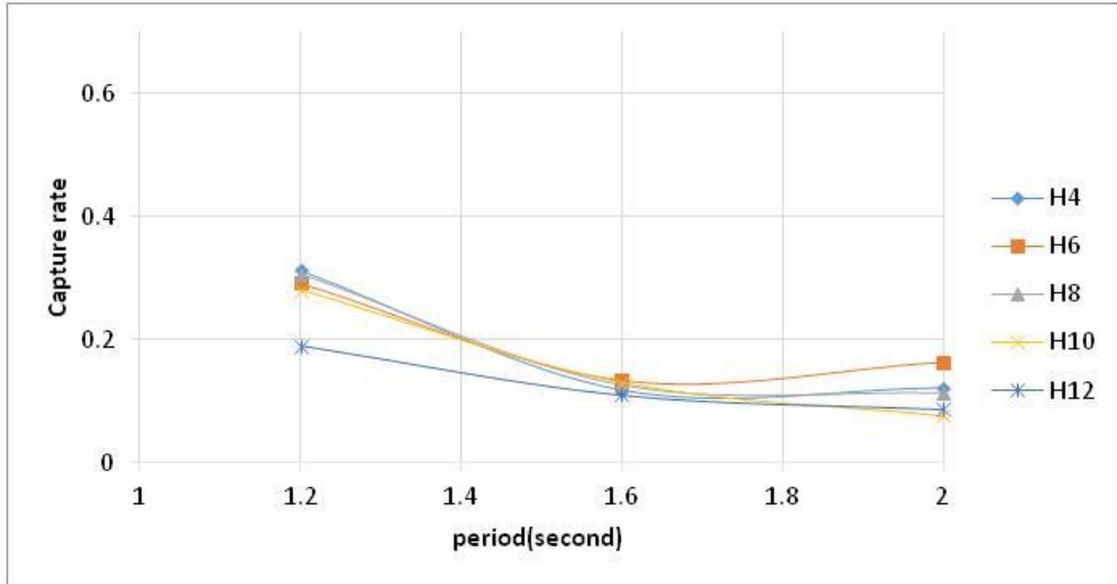


圖 7.26 前牆開口率 35%各條件下能量擷取率與波浪週期關係

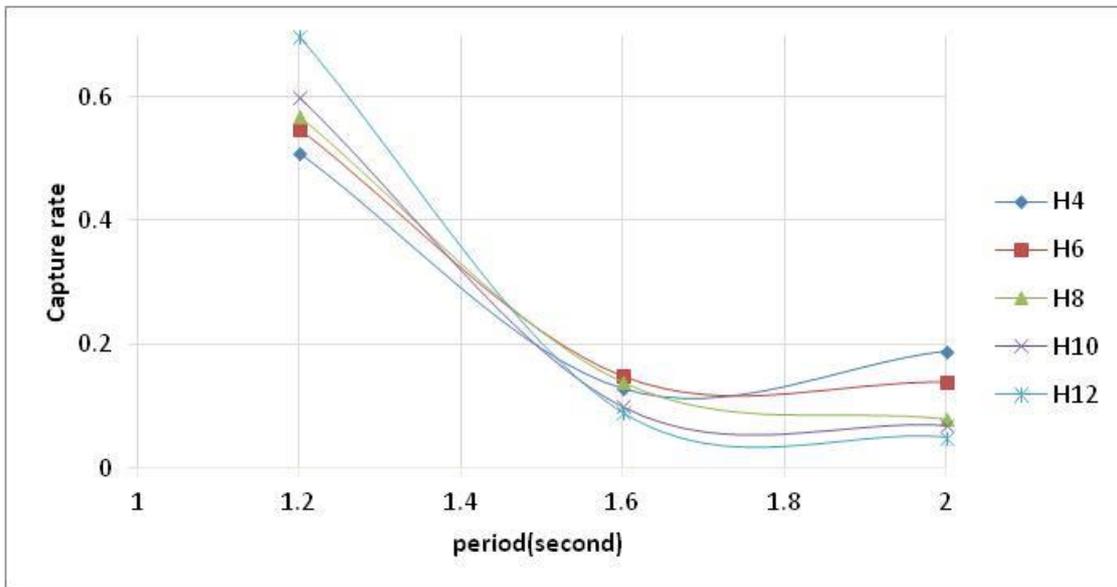


圖 7.27 前牆開口率 100%各條件下能量擷取率與波浪週期關係

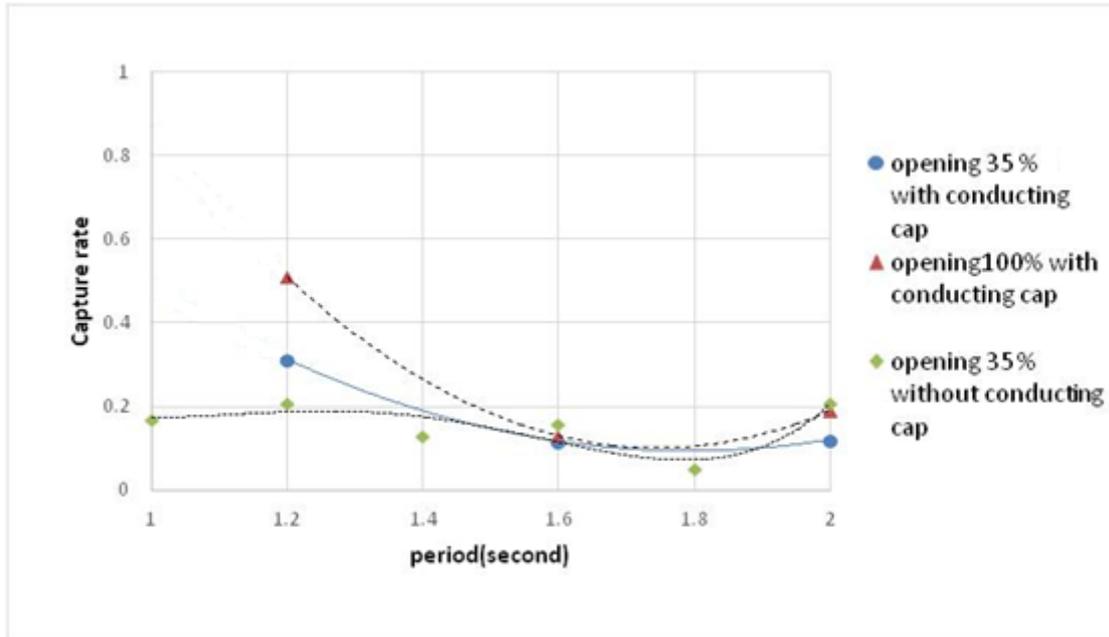


圖 7.28 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=4)

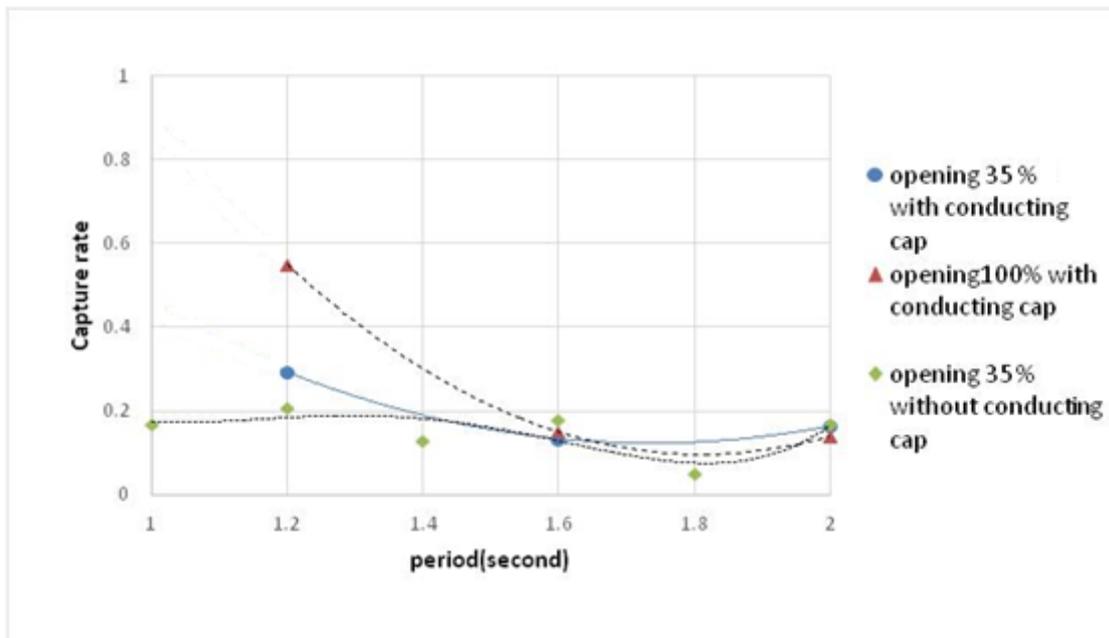


圖 7.29 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=6)

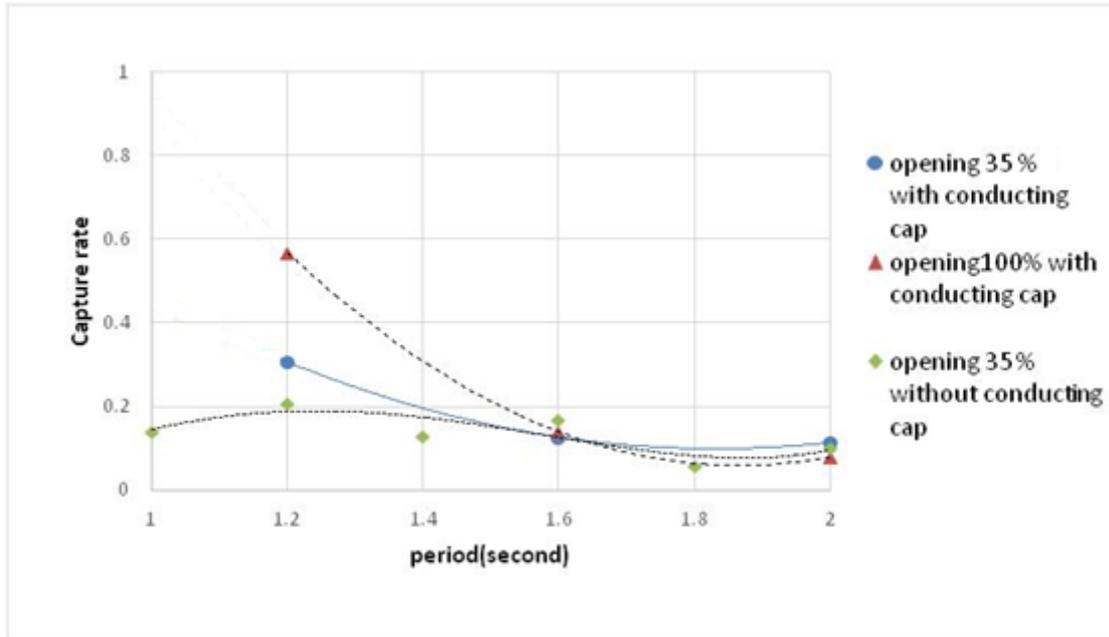


圖 7.30 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=8)

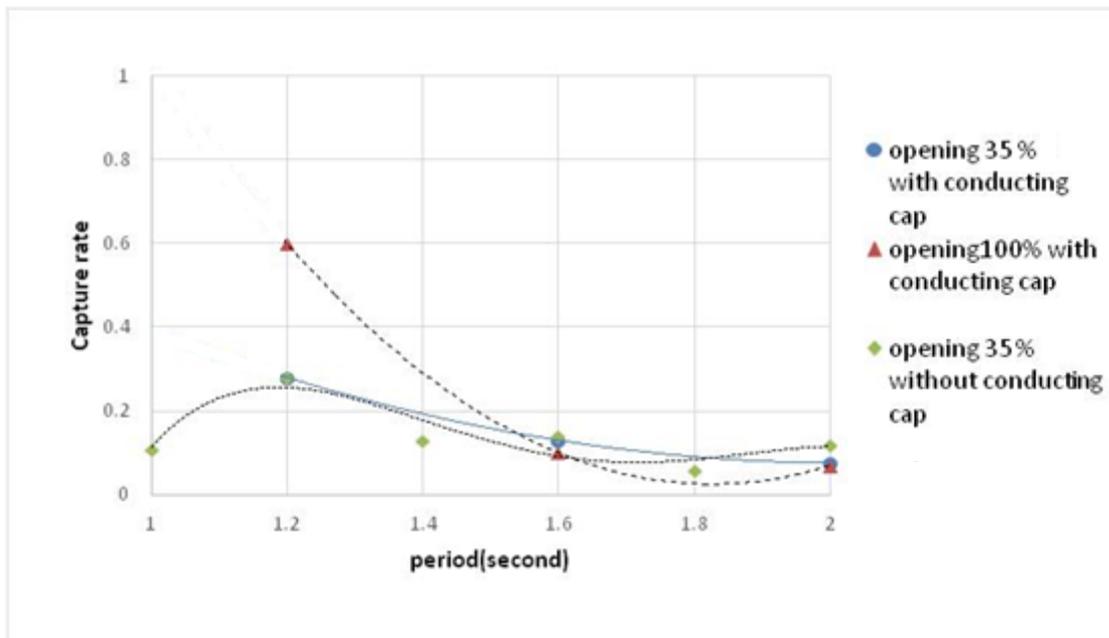


圖 7.31 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=10)

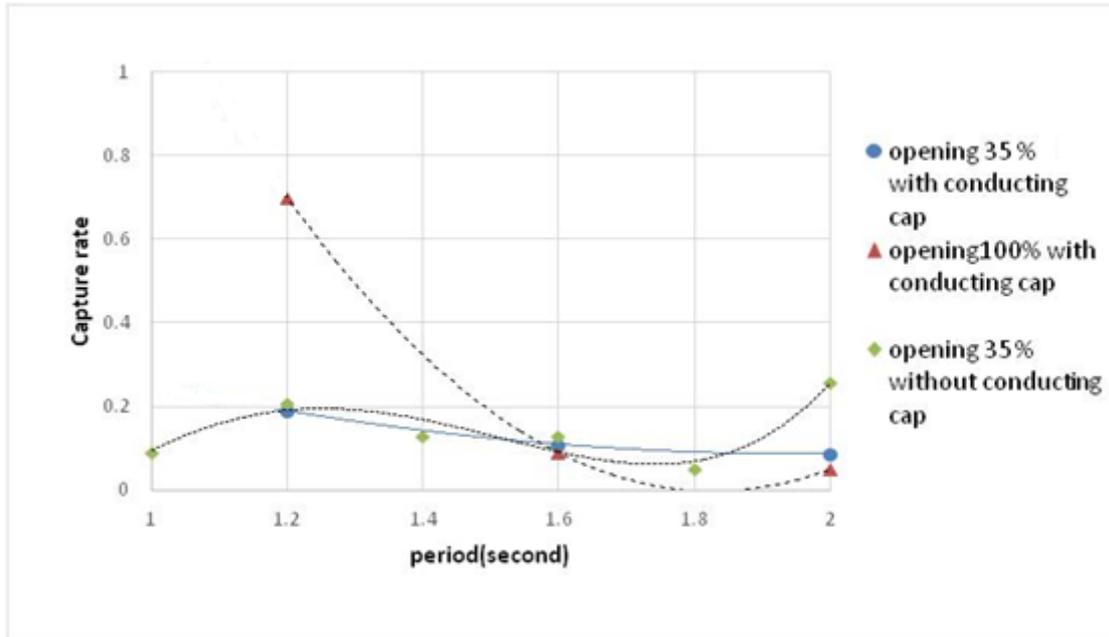


圖 7.32 不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=12)

7.2 發電系統設計與試驗結果討論

7.2.1 威爾斯渦輪設計

應用於波浪能擷取系統中的渦輪簡略可分為常規渦輪，適用於單一氣流方向或單一轉動方向，而另一種則為自整流式的渦輪機，可將系統中的不規則向氣流整合成單一方向氣流，常見之方法為使用整流閥，但也帶來了氣流動能的損失、設計趨於複雜化以及設備維護的困難等問題，因此使用自整流式的葉扇漸漸成為此種系統環境中的主流應用。

而本研究始時參考日本震盪水柱式波浪發電系統實際應用案例—酒田港波浪發電系統現地長期實驗中，採用威爾斯渦輪做為主要之發電機渦輪（圖 7.33），其文獻提供之發電裝置參數如表 7-13。且因本研究中水工模型之尺寸較小，使用衝擊式渦輪的設計有其難度，因此此部分規劃也以威爾斯渦輪為主要考量。

本期計畫改良渦輪之項目為扇葉數目、扇葉受風面積、扇葉幾何形狀，以提升渦輪效能。

表 7-13 酒田港發電裝置主要參數

波浪條件	示性波高：2m 週期：8 sec
渦輪種類	Tandem Wells Turbine NACA 0021
渦輪直徑	1.337 m
發電功率	60kw @ 1800 rpm
渦輪轉速範圍	500 – 2400 rpm
發電電壓	AC 200V 50Hz
起始發電轉速	500 rpm

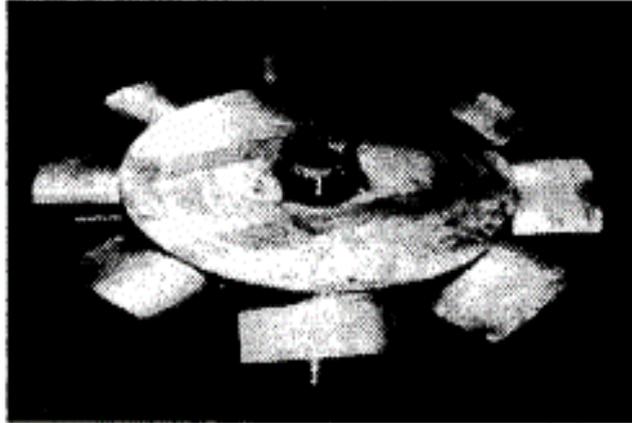


圖 7.33 酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021)

本研究使用之渦輪模型設計參照伊利諾大學⁽¹⁹⁾翼型資料庫中之 NACA 0021 翼型作為參考，與酒田港所用之翼型相同（剖面圖比較如圖 7.66），於 AUTO CAD 系統中建立葉片曲線（圖 7.34），表 7-14 為 NACA 0021 翼型輪廓點位，葉片數則根據文獻⁽¹⁶⁾選用 7 片做為實驗研究模型。

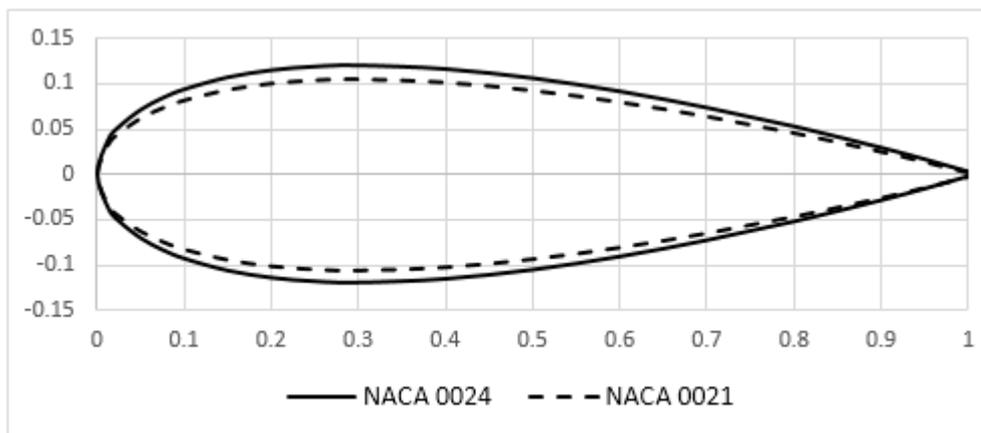


圖 7.34 NACA 0021 及 NACA 0024 翼型剖面比較

表 7-14 NACA 0021 翼型輪廓點位

Point	X	Y	Point	X	Y
1	0	0	10	0.30	0.12004
2	0.0125	0.03788	11	0.40	0.11607
3	0.025	0.05229	12	0.50	0.10588
4	0.05	0.07109	13	0.60	0.09127
5	0.75	0.084	14	0.70	0.07328
6	0.10	0.09365	15	0.80	0.05247
7	0.15	0.10691	16	0.90	0.02896
8	0.20	0.11475	17	0.95	0.01613
9	0.25	0.11883	18	1.00	0.00252

於 AUTO CAD 軟體建立葉片剖面及立體圖後，根據本研究中之水工模型上方氣流孔大小(70 mm)設計威爾斯渦輪尺寸，設計尺寸如圖 7.76 所示，再以 3D 列印方式製作成品，成品如圖 7.35~圖 7.38。

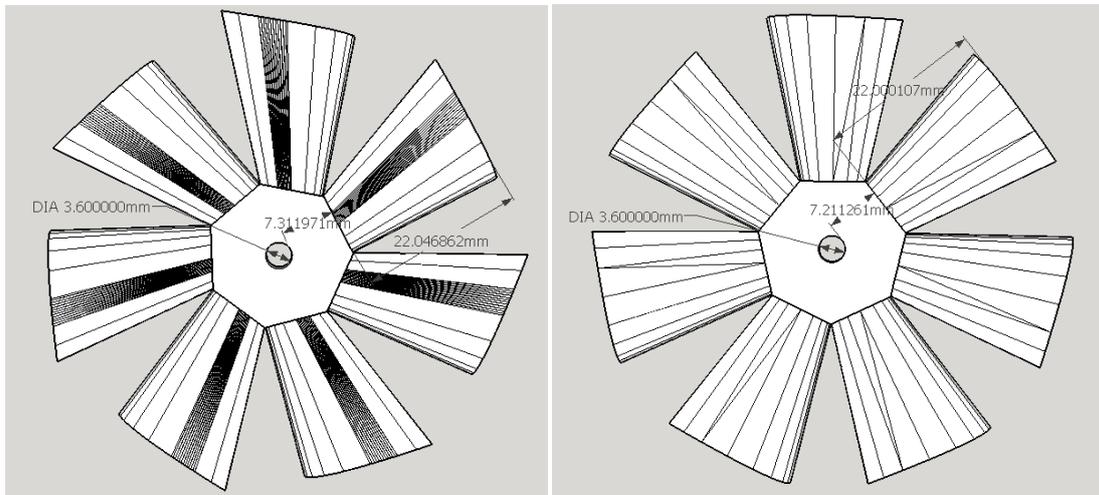


圖 7.35 本研究威爾斯渦輪模型單斜與雙斜設計圖

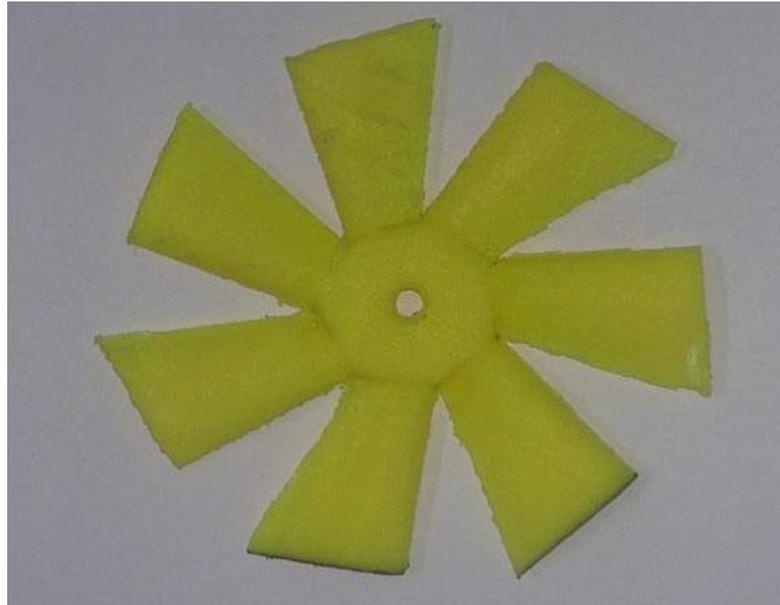


圖 7.36 3D 列印威爾斯單斜渦輪實體模型



圖 7.37 3D 列印威爾斯雙斜渦輪實體模型

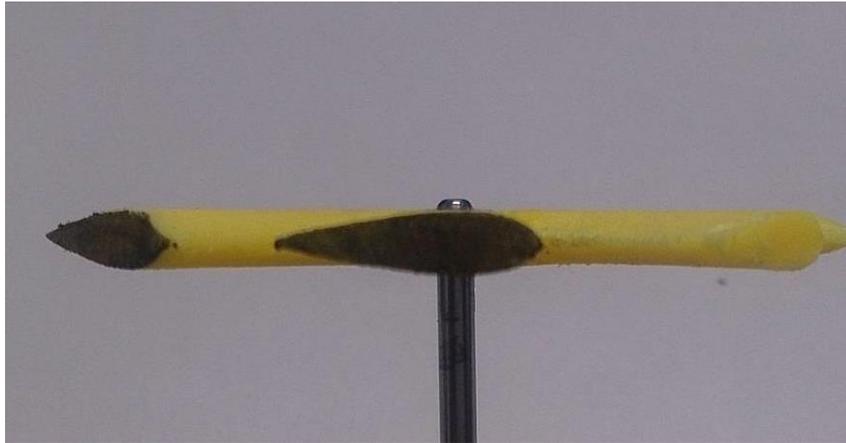


圖 7.38 3D 列印威爾斯渦輪實體模型 III

7.2.2 氣流速度測試與威爾斯渦輪轉速測試

根據前節所設計製作的導流系統與渦輪，進行轉速與風速間之測試實驗，使用 PROVA 公司出產之轉速計 RM-1501 (圖 7.39) 進行測試，將導流系統與威爾斯渦輪安裝於水工模型氣流出口處 (圖 7.40、7.41)，以本階段計畫規劃之 15 組波浪條件產生之風速帶動渦輪旋轉，並由轉速計進行轉速測試。



圖 7.39 PROVA RM-1501 轉速計



圖 7.40 威爾斯渦輪於模型進行無負載轉速試驗（無上導管）

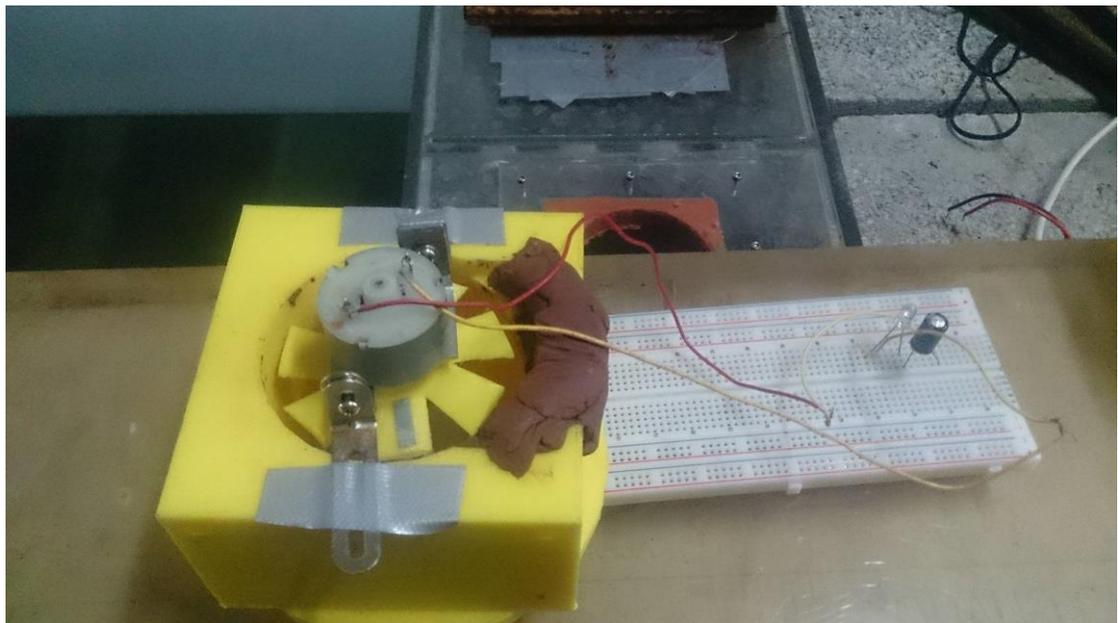


圖 7.41 威爾斯渦輪於模型進行有負載轉速試驗（無上導管）

第三期計畫風速測試環境為前牆開口率 35%、無出風口導流系統，以 30 組波浪條件進行。第四期計畫風速測試環境為前牆開口率 35% 及 100 且具有出風口導流系統，以 15 組波浪條件進行。由表 7-15~表 7-22 可知導流系統可使低波浪能條件之氣流速度增加，面對高波浪能則氣流速度降低。這顯示出導流系統可使整個波能擷取系統

變得更加穩定，在低波浪能時可以穩定發電，高波浪能時則可產生更有效的消波現象。

無負載轉速測試環境為無斜板水工模型，前牆開口率微 35 及 100，並加裝出風口導流系統，風扇中裝設軸承以確保軸心在風扇轉動時無任何摩擦力產生。由圖可知在低波能之波浪條件時單斜與雙斜風扇比傳統風扇具有更好轉動狀況，可推測此單斜與雙斜較傳統風扇有更為穩定的轉動狀況。

在有負載的狀況，由表及圖可知傳統風扇在低波浪能條件時幾乎無法轉動，而單斜與雙斜風扇卻可以穩定轉動產生電能。

由圖 7.42~圖 7.44 可知在無負載之狀況下單斜與雙斜之轉動效能遠比傳統風扇來得高，其中又以單斜更為突出。由圖 7.45~圖 7.49 可看出因傳統發電系統無加裝導流系統，在波能較高之情況會有較高的風速進而產生較高的轉速。但在低波能時新的發電系統仍可以持續且穩定的發電。其中又以前牆開口率 100% 之單斜渦輪發電系統更為明顯。

表 7-15 開口率 35% 不同條件下渦輪轉速(無負載)

轉速(RPM)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1	2441	3275	3938	4234	4586
	1.2	2751	3887	3757	5383	5189
	1.4	2494	3458	4249	4510	4999
	1.6	2173	3277	4091	4724	5821
	1.8	1185	2194	3076	3589	4412
	2	2559	3708	4509	4580	4484

表 7-16 開口率 35%不同條件下單斜渦輪轉速(無負載)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	4469	6918	10095	10987	11510
	1.6	4992	7640	9399	10849	11944
	2	6229	9224	11405	12558	13705

表 7-17 開口率 100%不同條件下雙斜渦輪轉速(無負載)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	2997	4499	6966	8000	8579
	1.6	3189	4908	6467	7890	8510
	2	3896	6052	8007	8755	9664

表 7-18 開口率 35%不同條件下渦輪轉速(負載馬達)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1	0	1070	3157	4702	4334
	1.2	154	2258	5148	6304	6877
	1.4	160	1739	4208	5601	6773
	1.6	30	2158	5027	6191	7350
	1.8	0	800	1447	3141	4796
	2	662	2712	5332	6675	7478

表 7-19 開口率 35%不同條件下單斜渦輪轉速(負載馬達)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	3154.2	4725.7	5106.9	5370.6	5987.7
	1.6	2989.9	4584.8	4986.6	5403.7	6174.
	2	4046.5	4835.2	5275.8	5765.4	6816.1

表 7-20 開口率 100%不同條件下單斜渦輪轉速(負載馬達)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	2851.0	5227.1	7542.9	7584.3	8202.4
	1.6	3106.9	5680.7	6886.9	7823.1	8527.9
	2	3935	7059	7353	7496	8124

表 7-21 開口率 35%不同條件下雙斜渦輪轉速(負載馬達)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	619.4	2339.8	4698.2	5347.2	5831.9
	1.6	479.4	2222.0	4335.0	5316.5	5784.9
	2	992.3	3551.	5123.2	5611.0	6348.9

表 7-22 開口率 100%不同條件下雙斜渦輪轉速(負載馬達)

轉速(rpm)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	642.7	2641.3	4947.7	5283.5	5525.0
	1.6	779.0	3037.8	4666.6	5804.9	6340.8
	2	1401.5	4634.7	4970.5	6089.4	6533.8

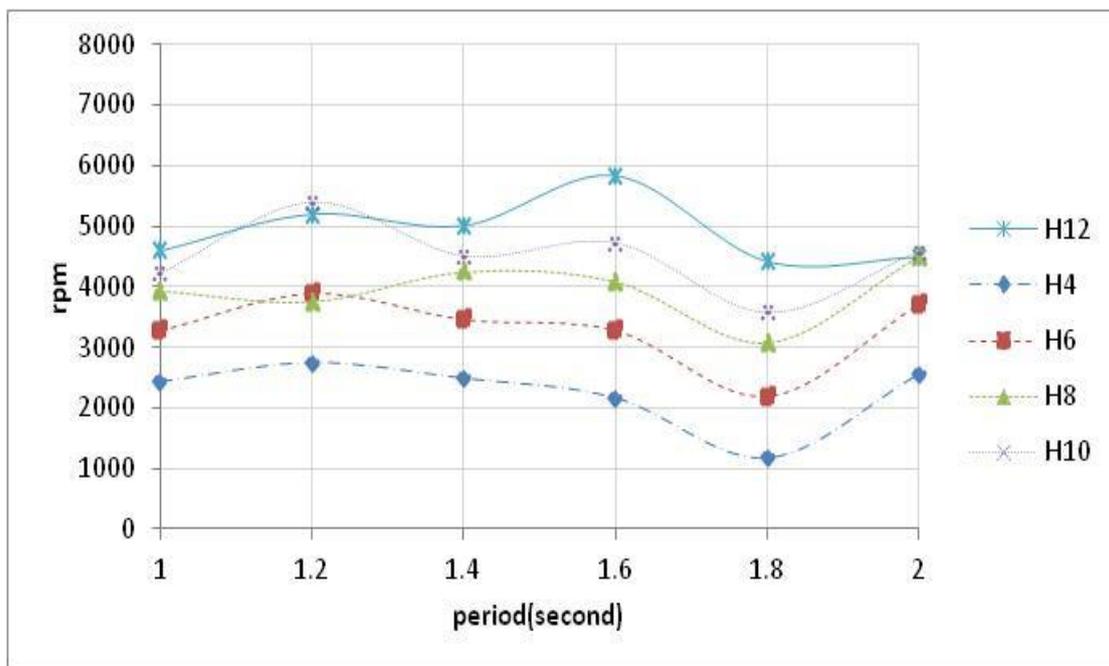


圖 7.42 開口率 35%渦輪轉速與波浪週期關係 (無負載)

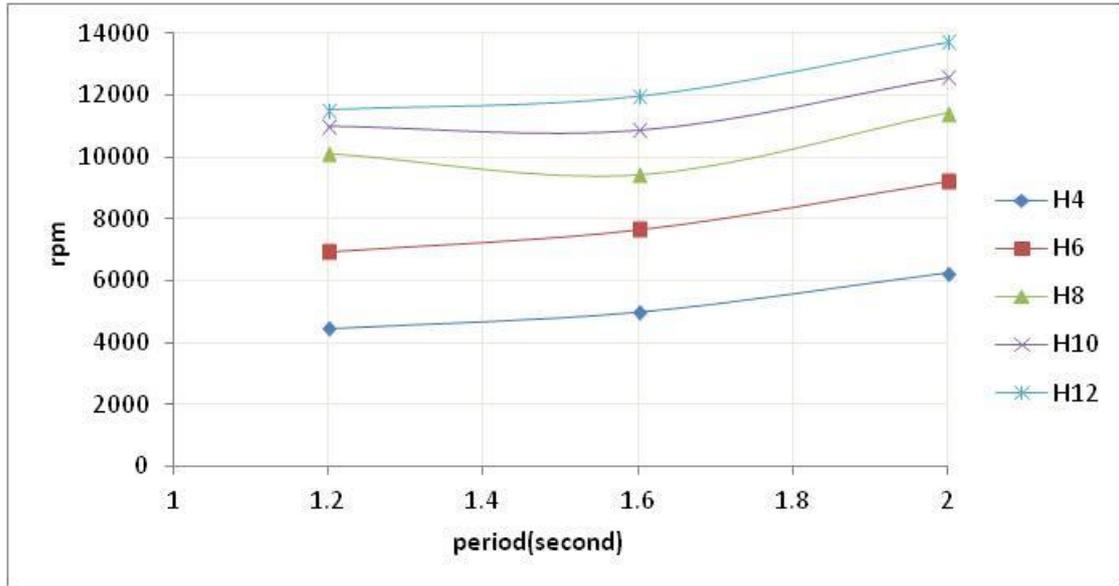


圖 7.43 開口率 35%單斜渦輪轉速與波浪週期關係 (無負載)

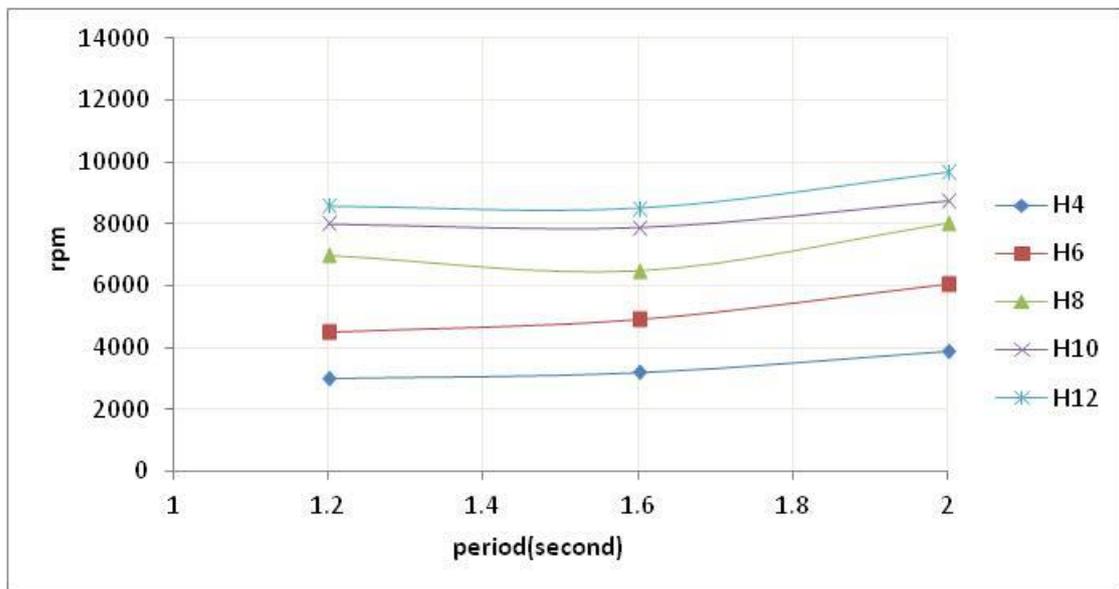


圖 7.44 開口率 35%雙斜渦輪轉速與波浪週期關係 (無負載)

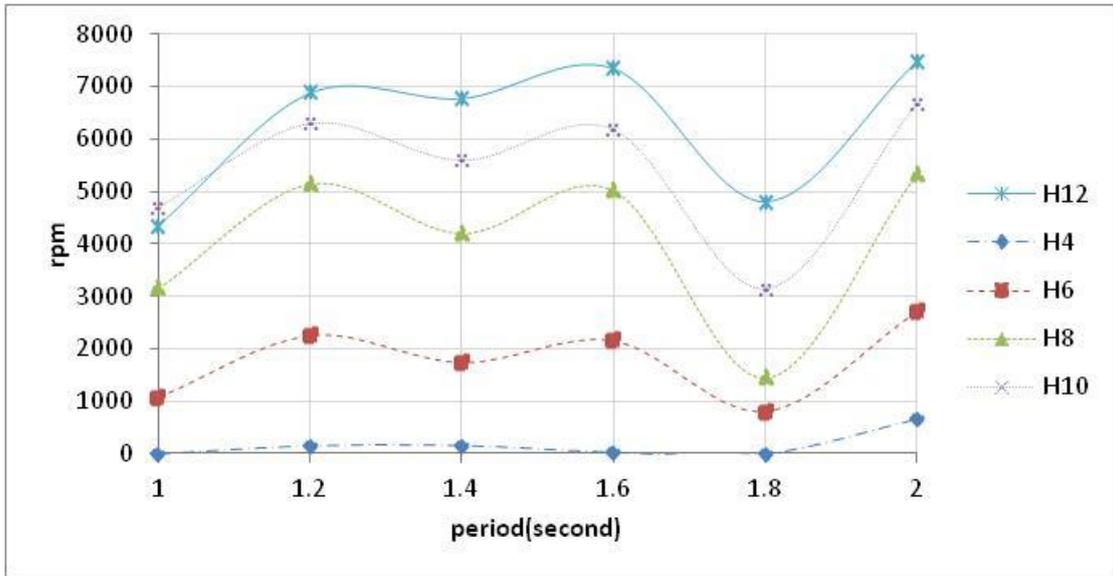


圖 7.45 開口率 35% 渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達)

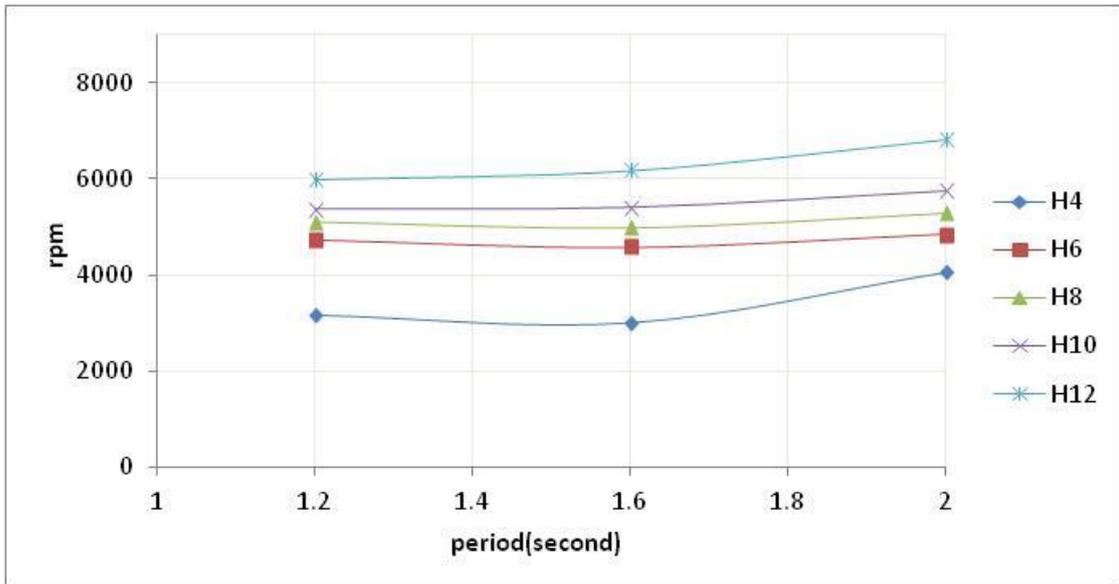


圖 7.46 開口率 35% 單斜渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達)

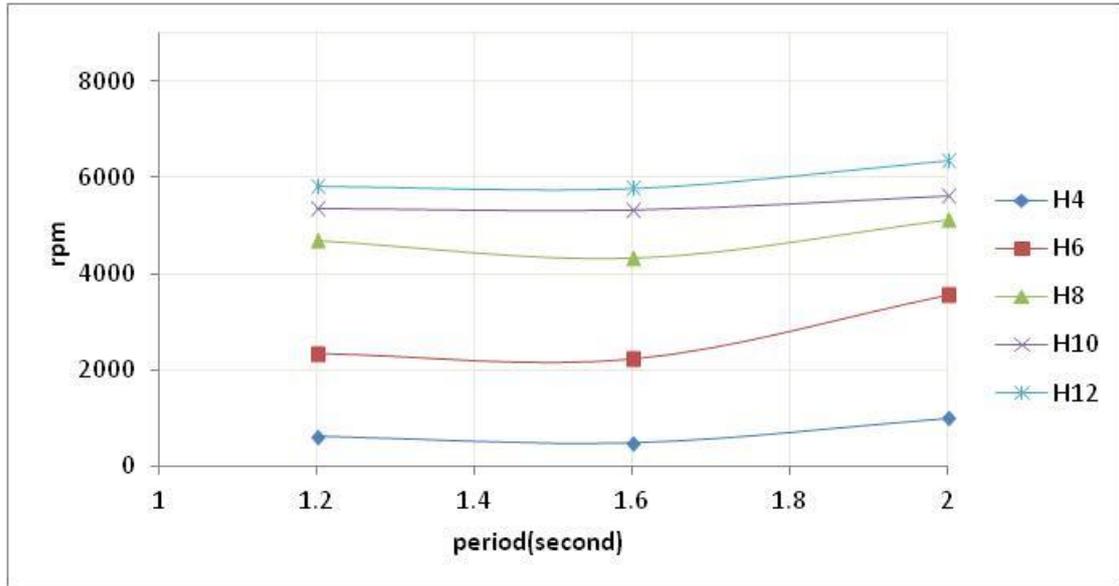


圖 7.47 開口率 35%雙斜渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達)

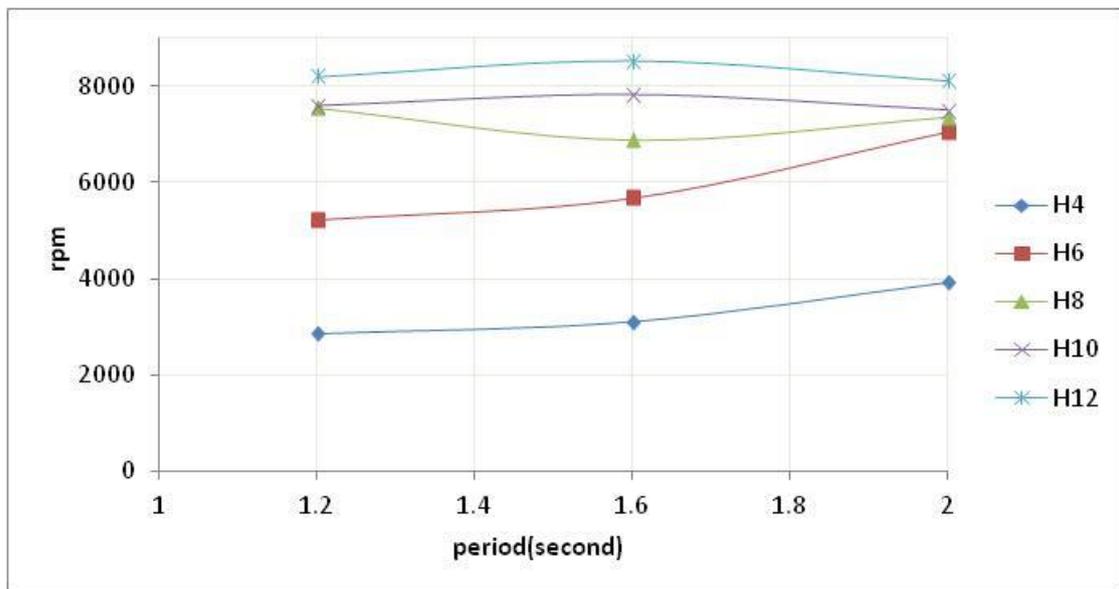


圖 7.48 開口率 100%單斜渦輪轉速與波浪週期關係(負載馬達)

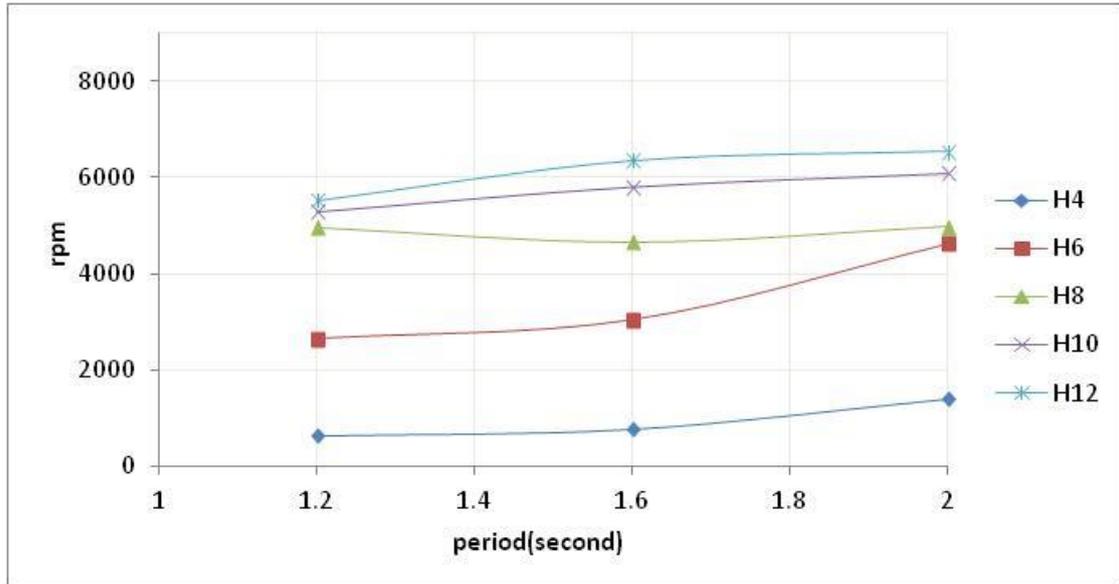


圖 7.49 開口率 100%雙斜渦輪轉速與波浪週期關係 (負載馬達)

7.2.3 發電機輸出電壓試驗設置

本研究中所使用之發電機原為市售之太陽能板用直流馬達(型號：RF-2060，如圖 7.50)，將其裝上威爾斯扇葉後做為試驗發電機使用，因發電機輸出為直流電，不須串接橋式整流器，將其串聯 3V 470 μ F 電容、980 Ω 電阻作為簡單模擬電路(如圖 7.51)，外接示波器紀錄其電壓歷時狀況(如圖 7.52)，圖 7.53 為示波器擷取畫面。



圖 7.50 型號：RF-2060(6V 60mA)太陽能板用直流馬達

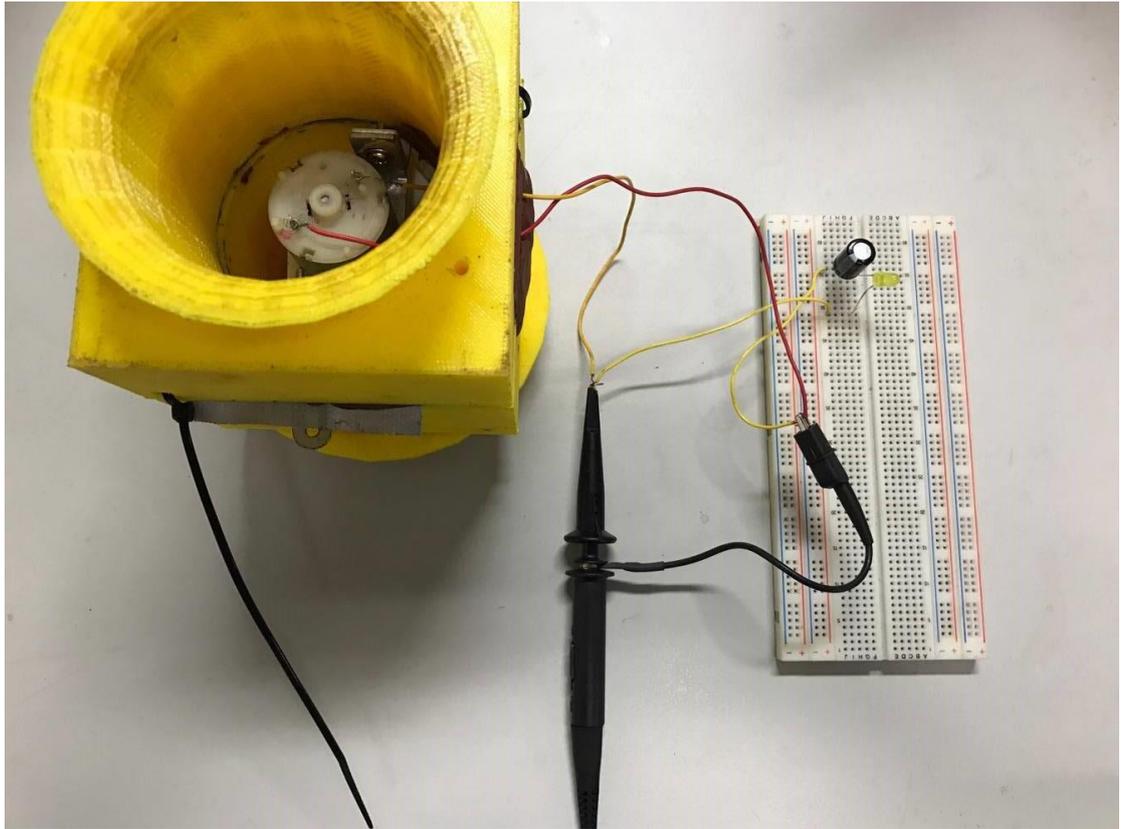


圖 7.51 電壓測試模擬電路

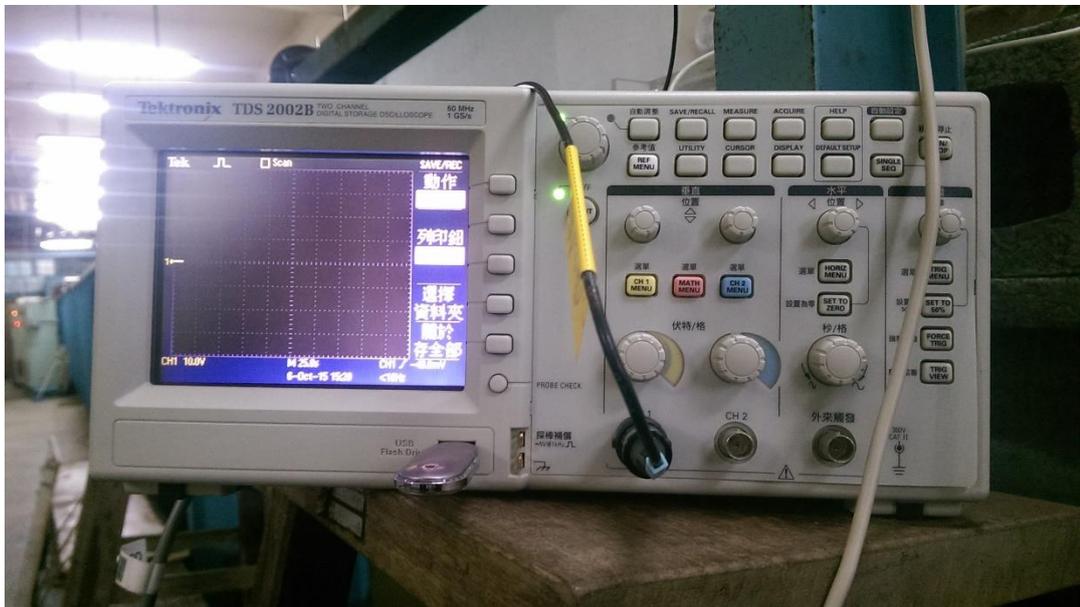


圖 7.52 電壓訊號接收示波器



圖 7.53 示波器畫面擷取

7.2.4 輸出電壓試驗結果

下表 7-23~表 7-26 為最大電壓表現，圖 7.54~圖 7.57 為各波浪條件下最大電壓與波浪週期關係圖，圖 7.58~圖 7.67 為同一波高條件下不同斜板或前牆開口率之最大電壓表現。其中前牆開口率 100% 所產生之電壓皆大於前牆開口率 35%。且單斜渦輪皆大於雙斜渦輪。發電極質皆在週期 2 時發生。

表 7-23 開口率 35% 單斜渦輪模型對應各條件下最大電壓

電壓(V)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	7.2	10.6	11	11.4	12.8
	1.6	7.2	10.2	11	11.4	13.4
	2	9.6	11	11.4	12.4	14.4

表 7-24 開口率 35% 雙斜渦輪模型對應各條件下最大電壓

電壓(V)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	1.6	5.4	10.6	12.2	13.2
	1.6	1.4	5.4	10	12	12.8
	2	2.4	8.4	11.4	12.4	14.2

表 7-25 開口率 100% 單斜渦輪模型對應各條件下最大電壓

電壓(V)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	6.6	12.2	17.4	17.2	18.6
	1.6	7.4	13.6	15.4	17.2	18.6
	2	9.8	17	16.8	18.6	20.4

表 7-26 開口率 100% 雙斜渦輪模型對應各條件下最大電壓

電壓(V)		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1.2	1.6	6	11.4	12.4	13
	1.6	2	7.2	10.8	13.2	14.6
	2	3.4	11.2	11.6	14.6	16.2

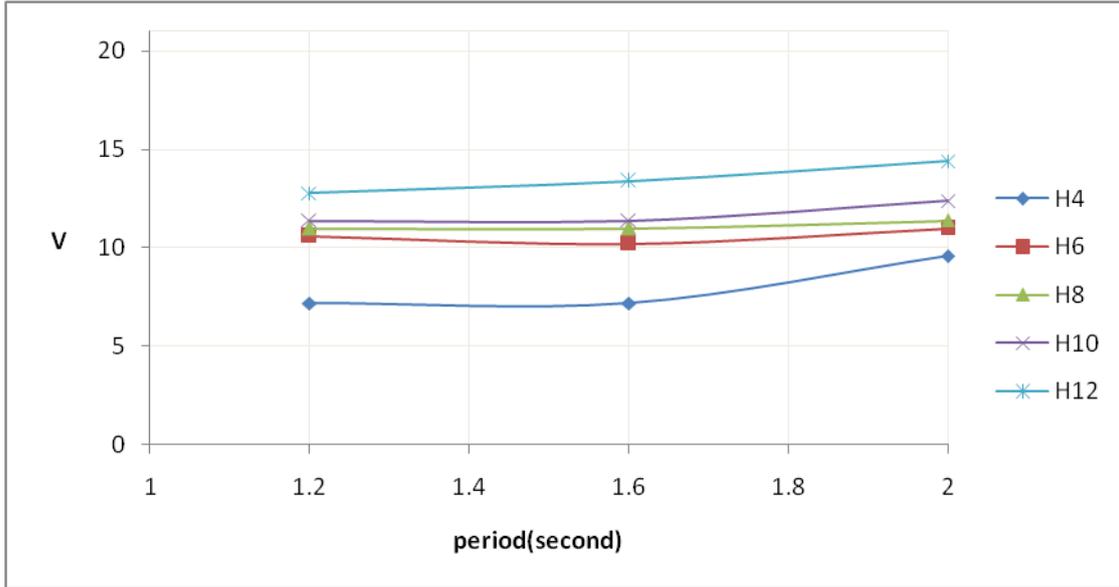


圖 7.54 開口率 35%單斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係

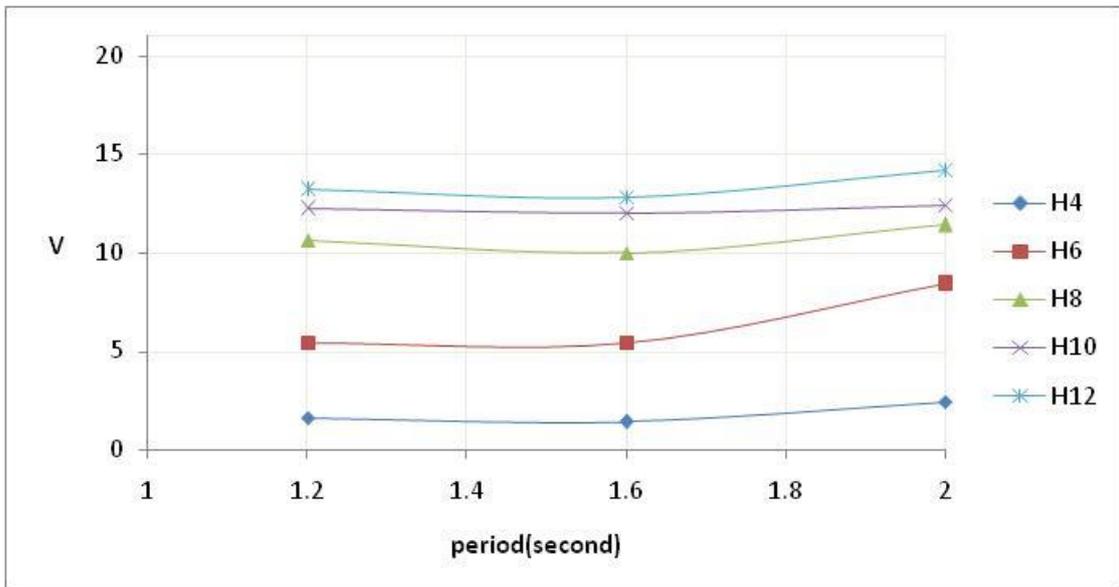


圖 7.55 開口率 35%雙斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係

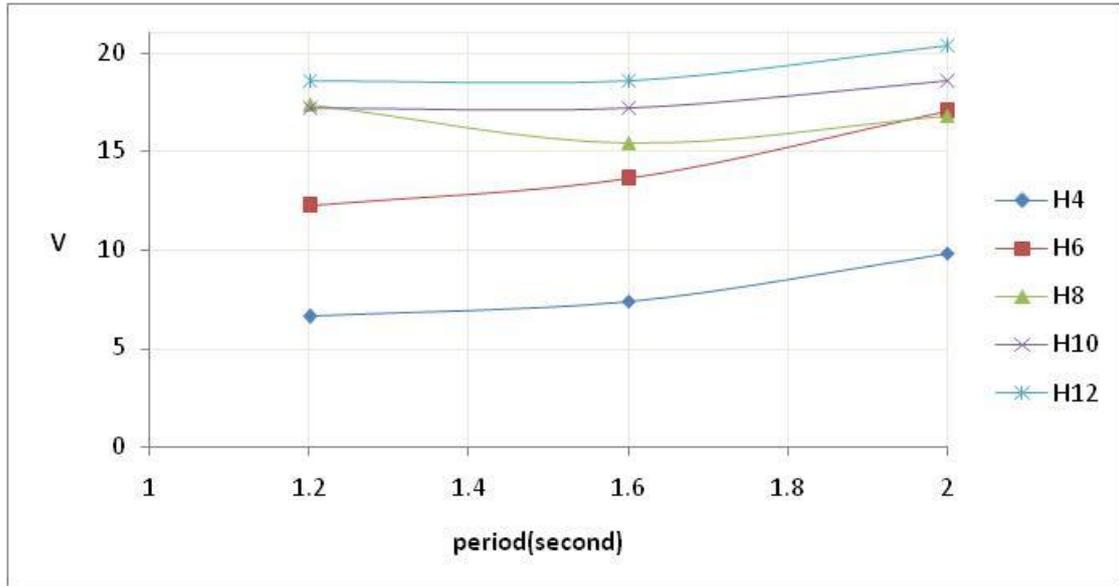


圖 7.56 開口率 100%單斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係

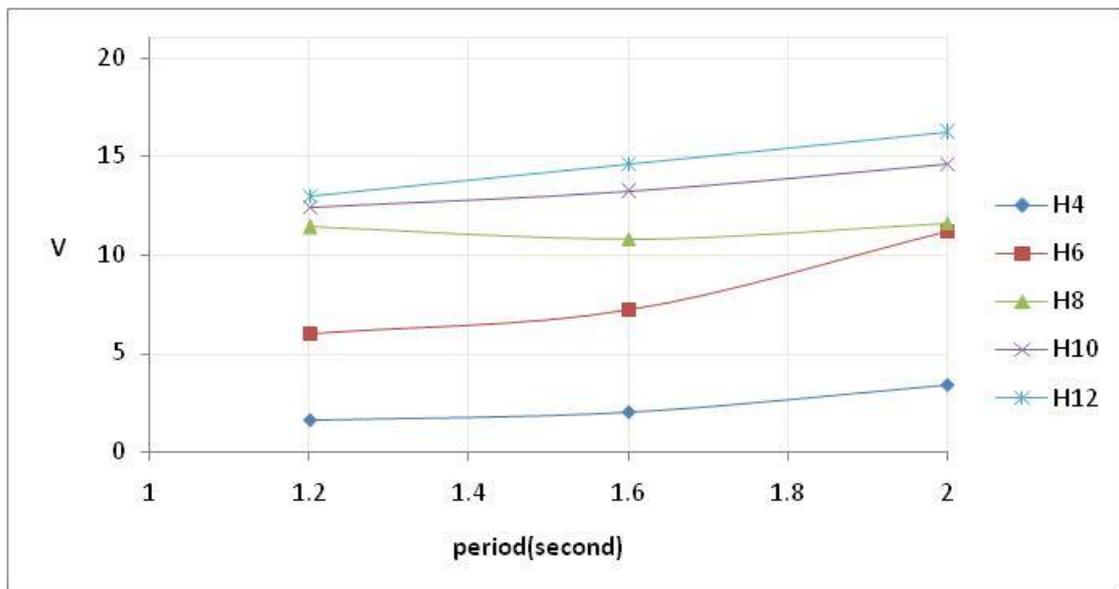


圖 7.57 開口率 100%雙斜渦輪模型最大電壓與波浪週期關係

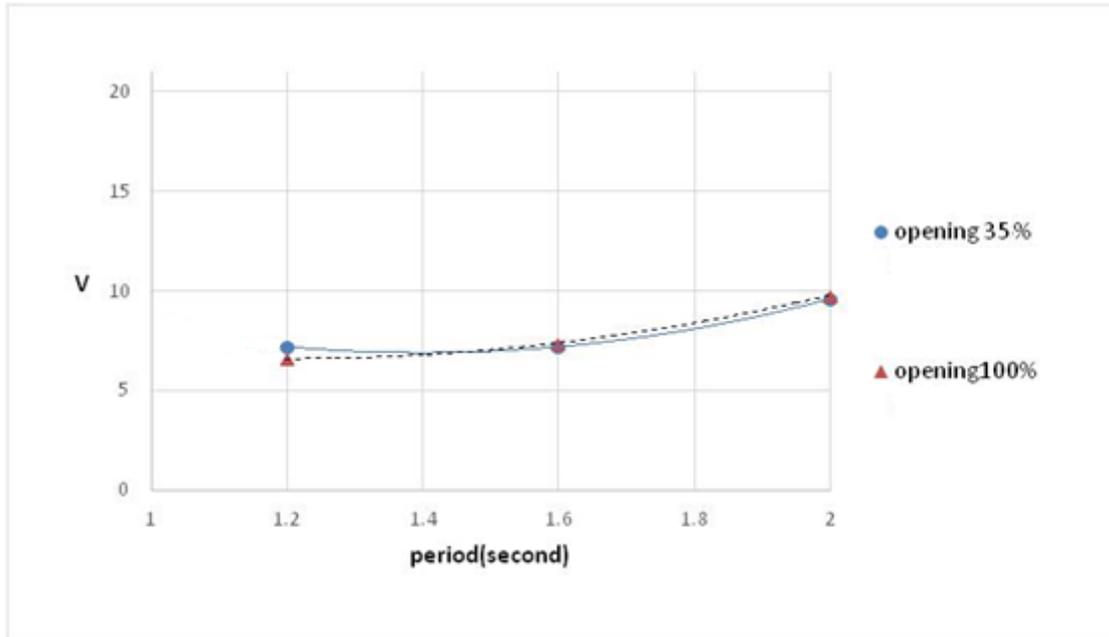


圖 7.58 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=4)

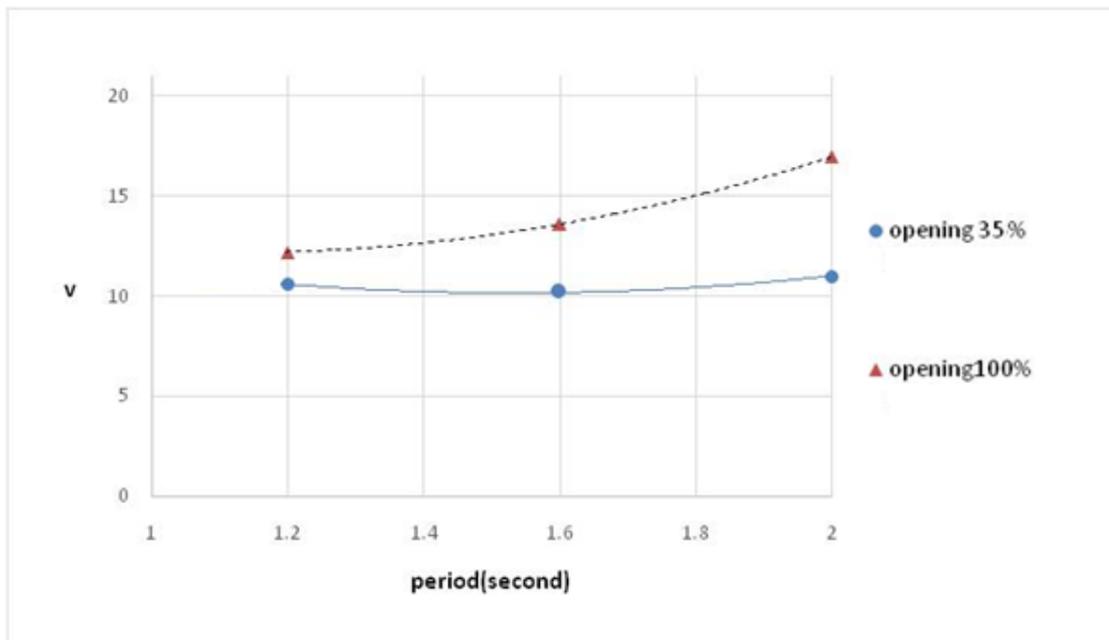


圖 7.59 不同開口率之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=6)

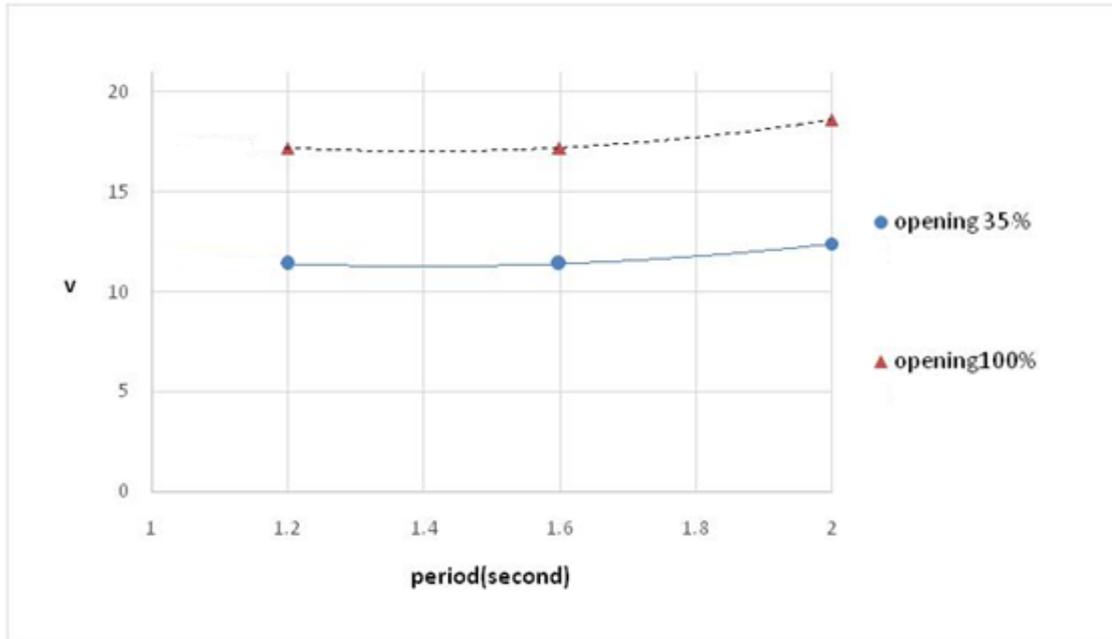


圖 7.60 不同開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=8)

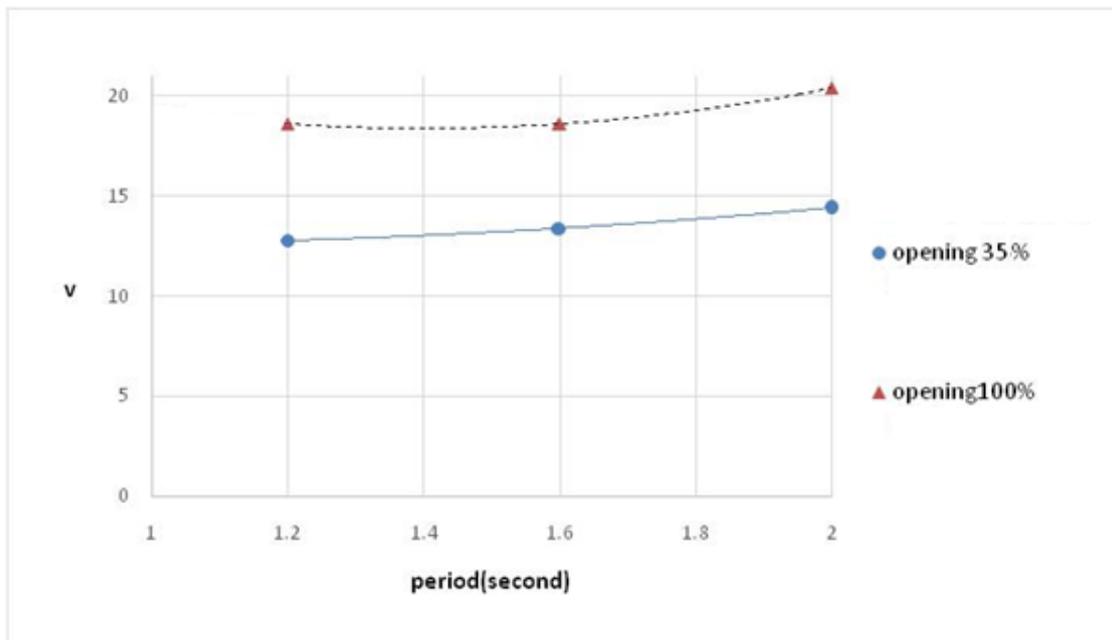


圖 7.61 不同開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=10)

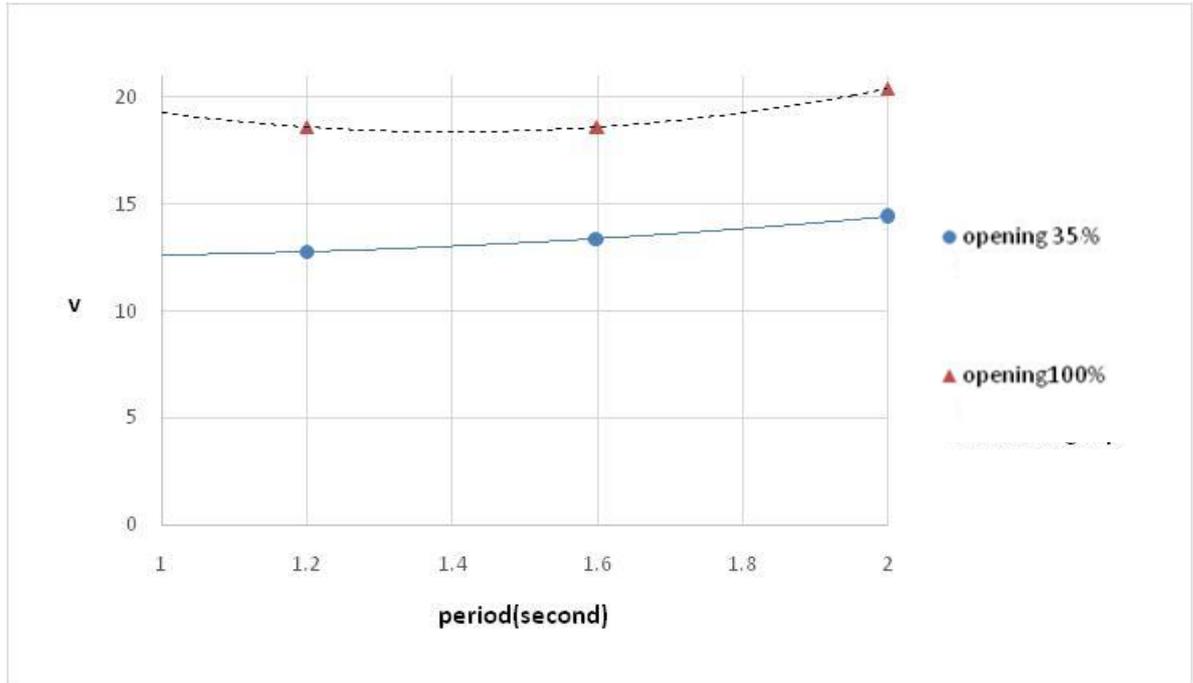


圖 7.62 不同開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=12)

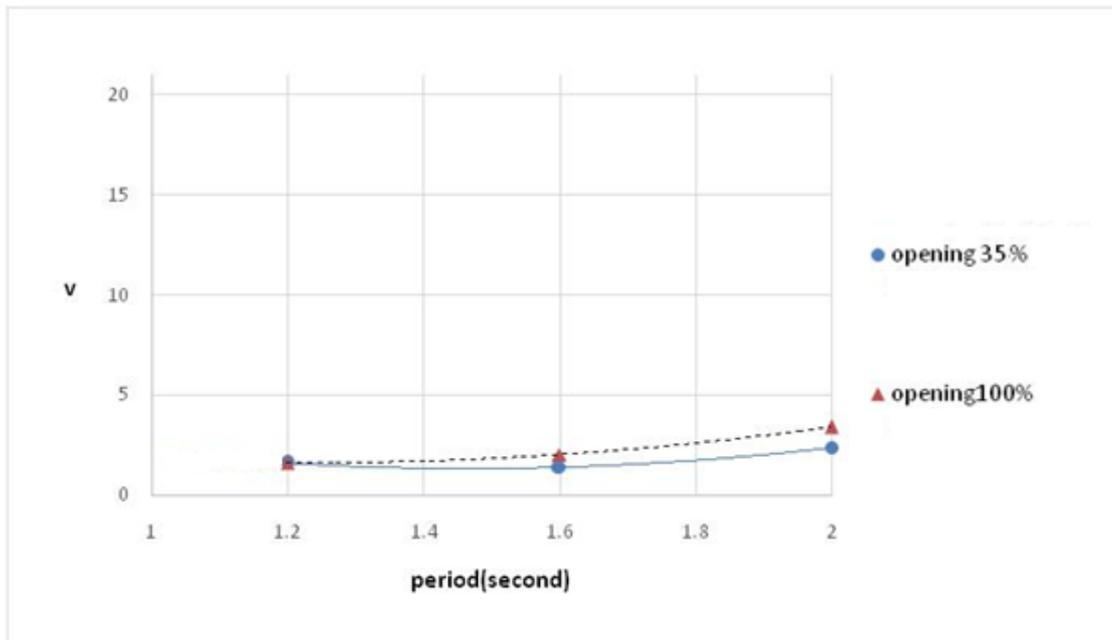


圖 7.63 不同開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=4)

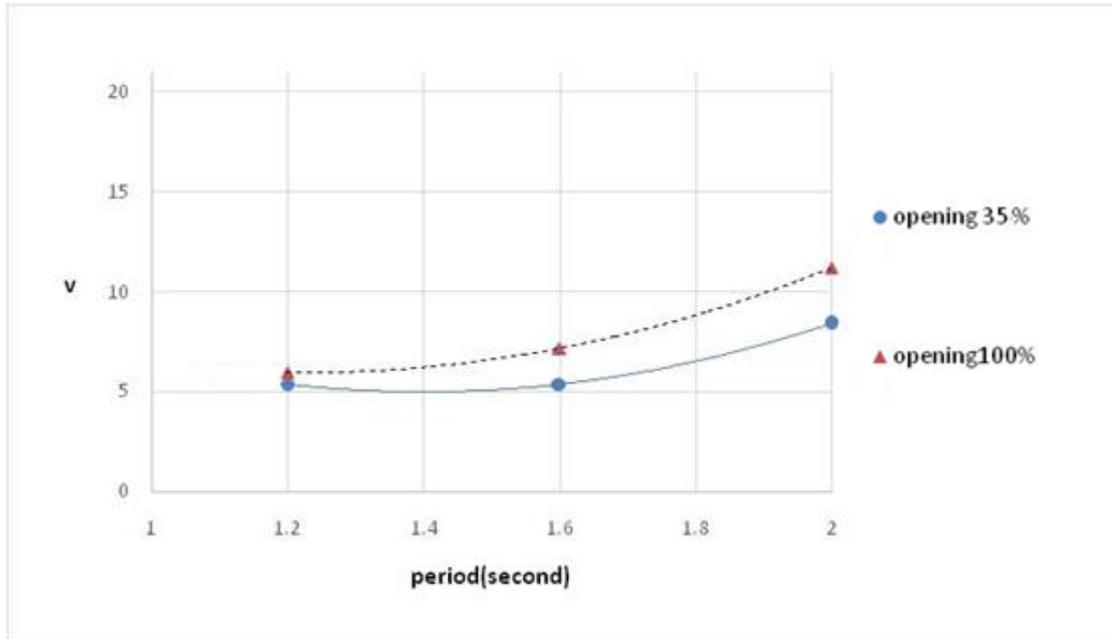


圖 7.64 不同開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=6)

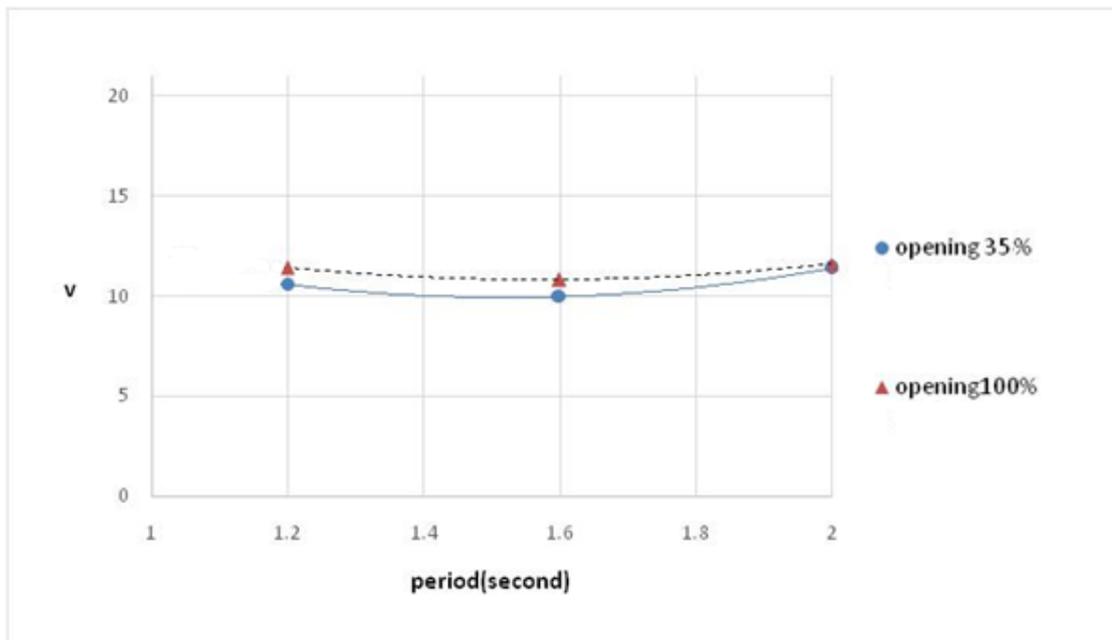


圖 7.65 不同開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=8)

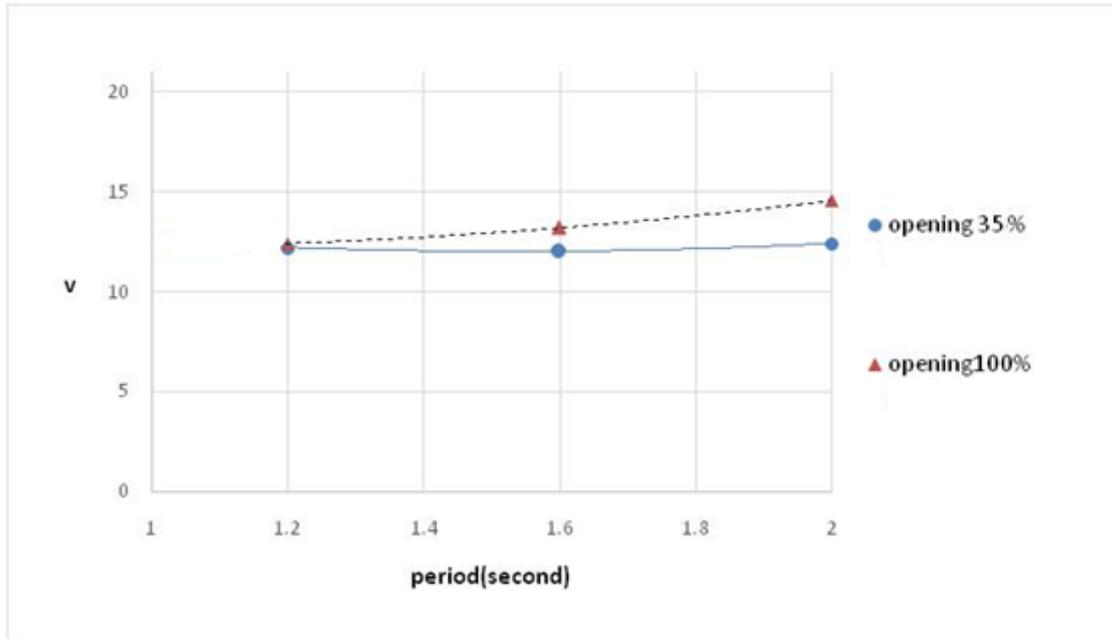


圖 7.66 不同開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=10)

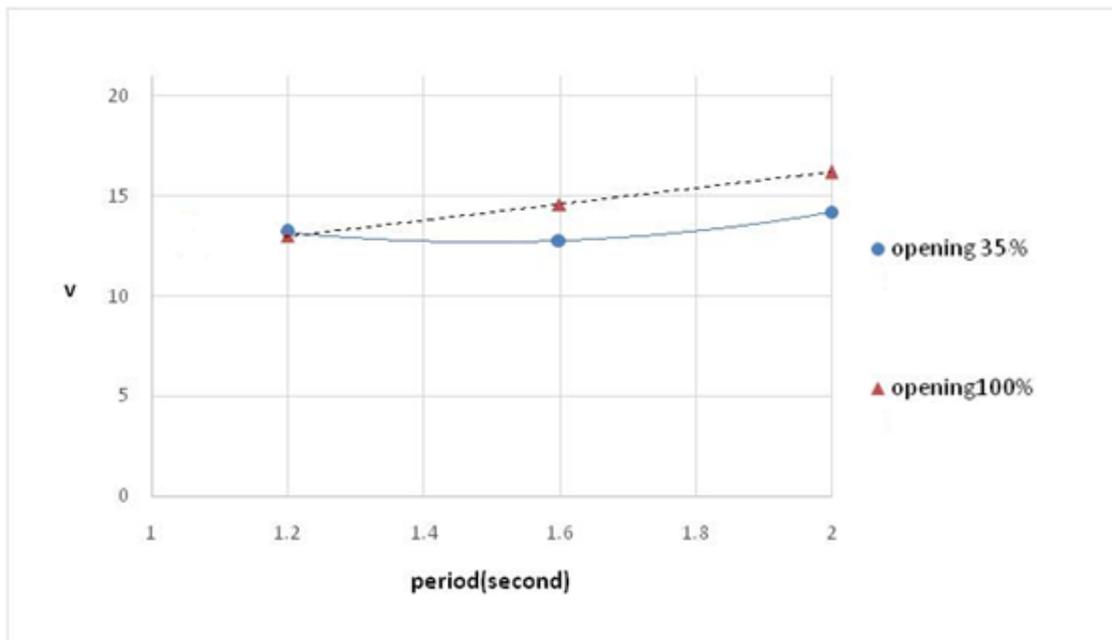


圖 7.67 不同開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=12)

7.2.5 輸出電功率試驗結果

表 7-27~表 7-30 為經過電功率公式 $P=V^2/R$ ($R=980\Omega$) 計算之各種模型波浪條件下之電功率，圖 7.68~圖 7.70 則為各波浪條件下電功率與波浪週期關係圖，圖 7.71~圖 7.81 為同一波高條件下不同斜板或前牆開口率之電功率。其中以前牆開口率 100%單斜渦輪發電系統之電功率最高。

表 7-27 開口率 35%單斜渦輪模型各條件下之電功率

電功率(W/s)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	0.052	0.114	0.123	0.132	0.167
	1.6	0.052	0.106	0.123	0.132	0.183
	2	0.094	0.123	0.132	0.156	0.211

表 7-28 開口率 35%雙斜渦輪模型各條件下之電功率

電功率(W/s)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	0.002	0.029	0.114	0.152	0.178
	1.6	0.002	0.03	0.102	0.147	0.167
	2	0.005	0.07	0.132	0.156	0.206

表 7-29 開口率 100%單斜渦輪模型各條件下之電功率

電功率(W/s)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	0.044	0.152	0.309	0.302	0.353
	1.6	0.056	0.189	0.242	0.302	0.353
	2	0.098	0.295	0.288	0.353	0.425

表 7-30 開口率 100%雙斜渦輪模型各條件下之電功率

電功率(W/s)		波高 H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期 T(sec)	1.2	0.003	0.037	0.133	0.157	0.172
	1.6	0.004	0.053	0.119	0.178	0.217
	2	0.012	0.128	0.137	0.218	0.268

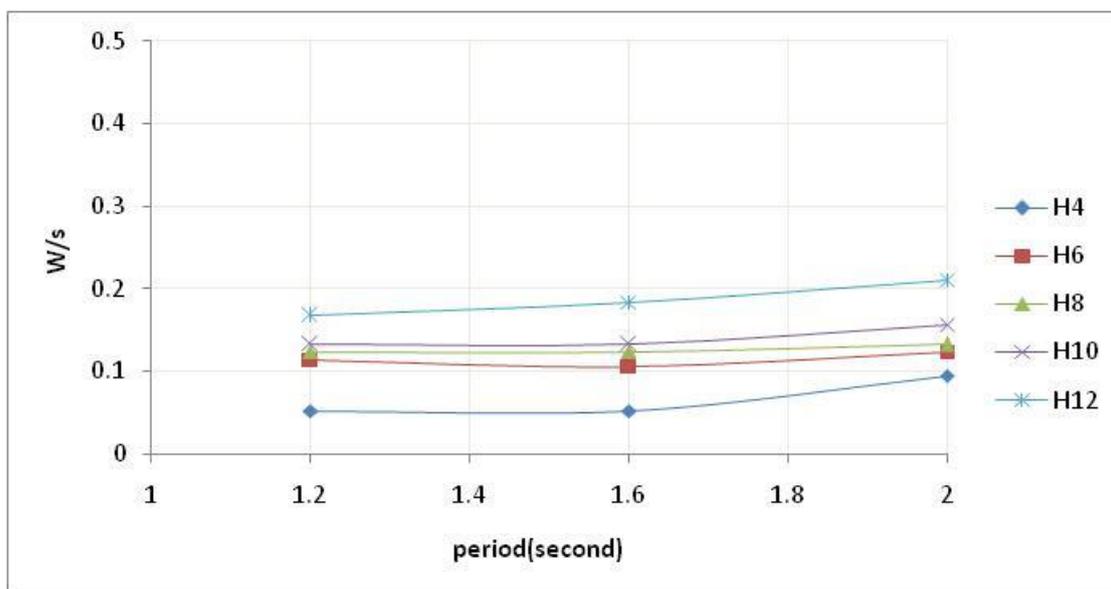


圖 7.68 開口率 35%出風口單斜渦輪電功率與波浪週期關係

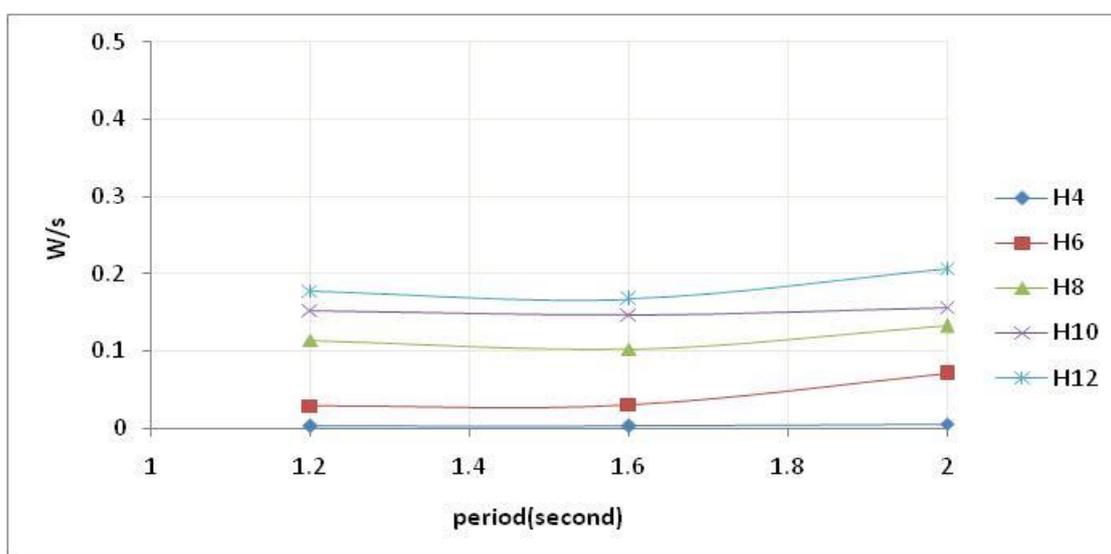


圖 7.69 開口率 35%出風口雙斜渦輪電功率與波浪週期關係

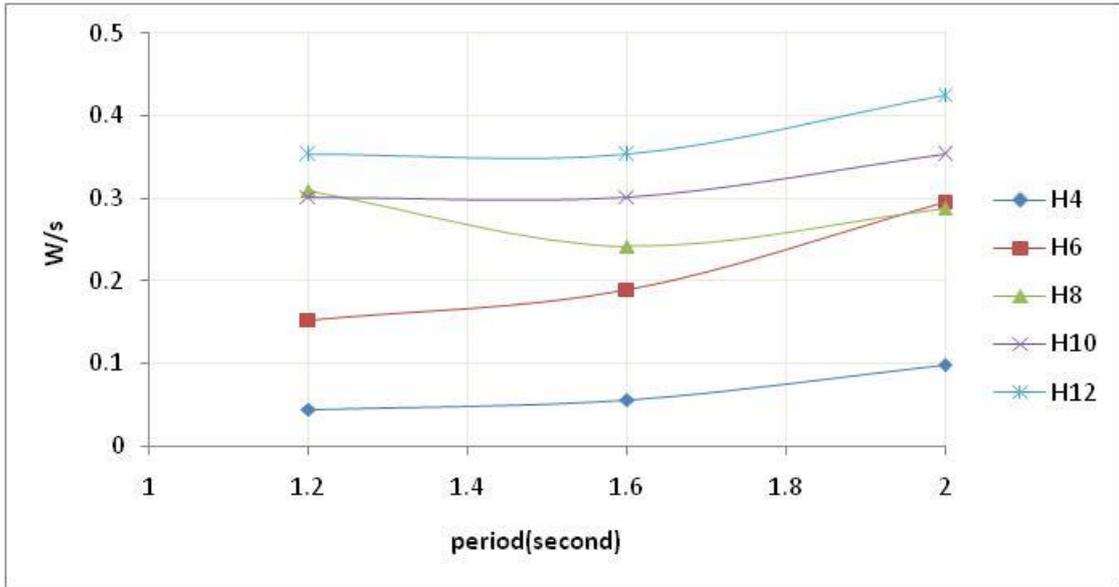


圖 7.70 開口率 100%出風口單斜渦輪電功率與波浪週期關係

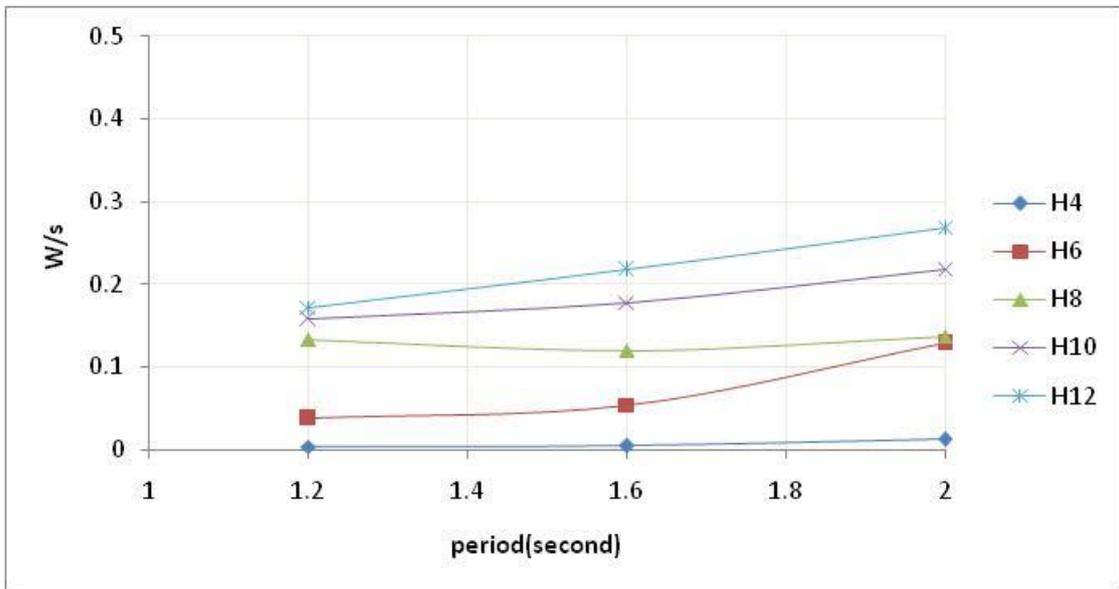


圖 7.71 開口率 100%出風口雙斜渦輪電功率與波浪週期關係

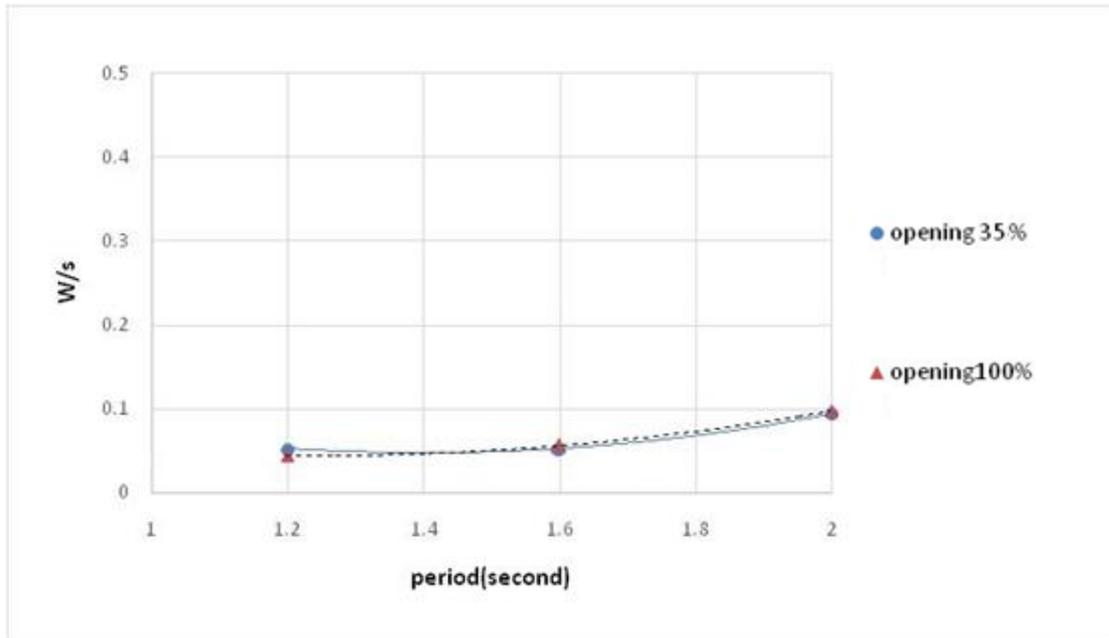


圖 7.72 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=4)

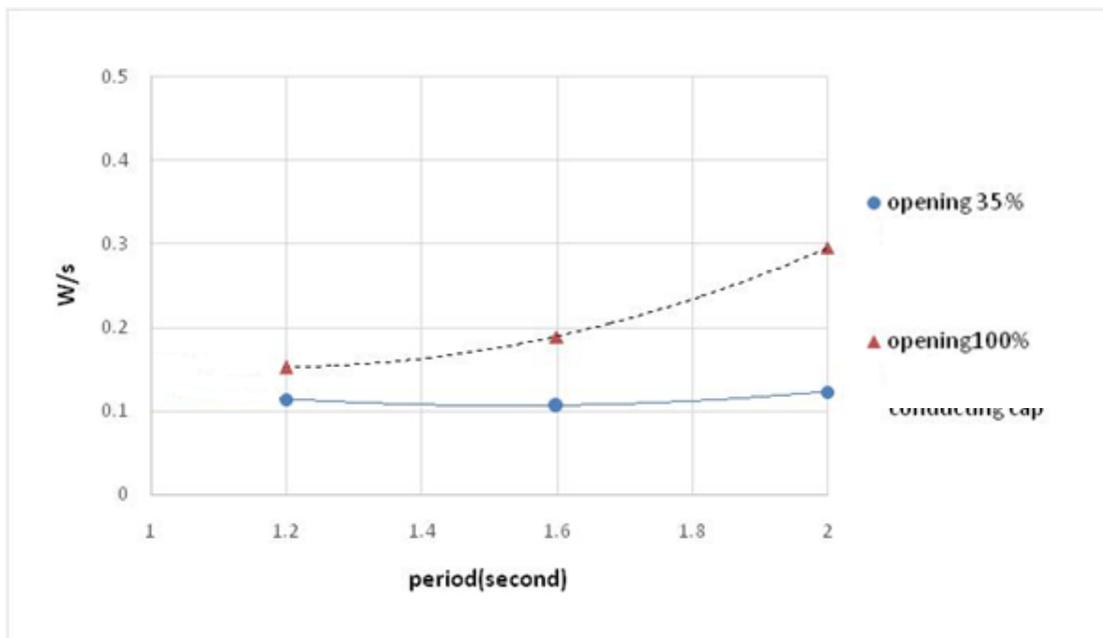


圖 7.73 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=6)

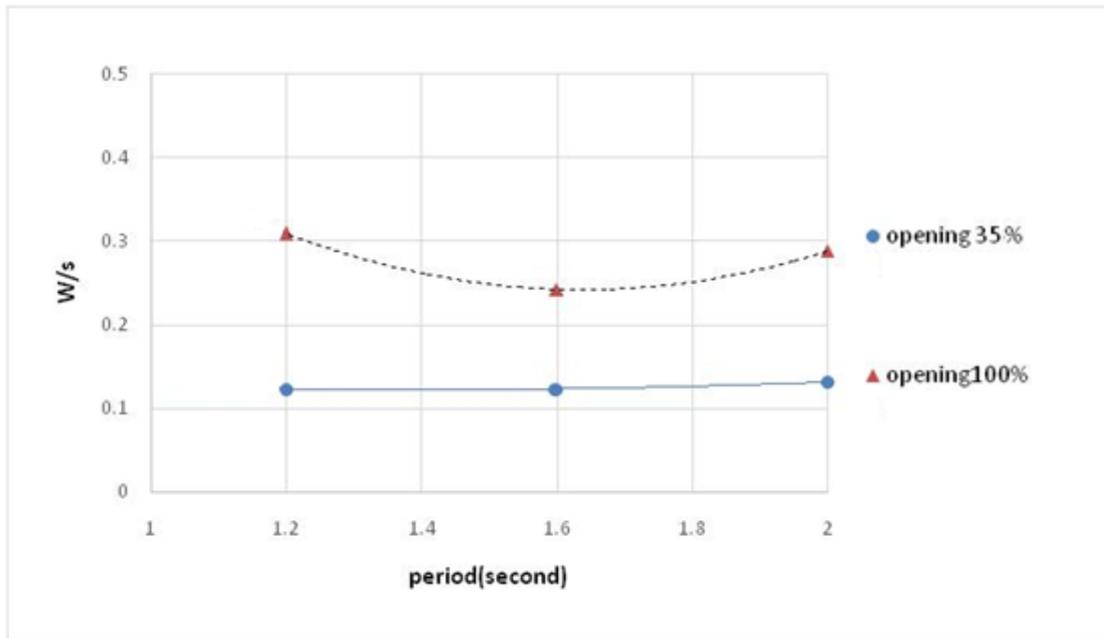


圖 7.74 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=8)

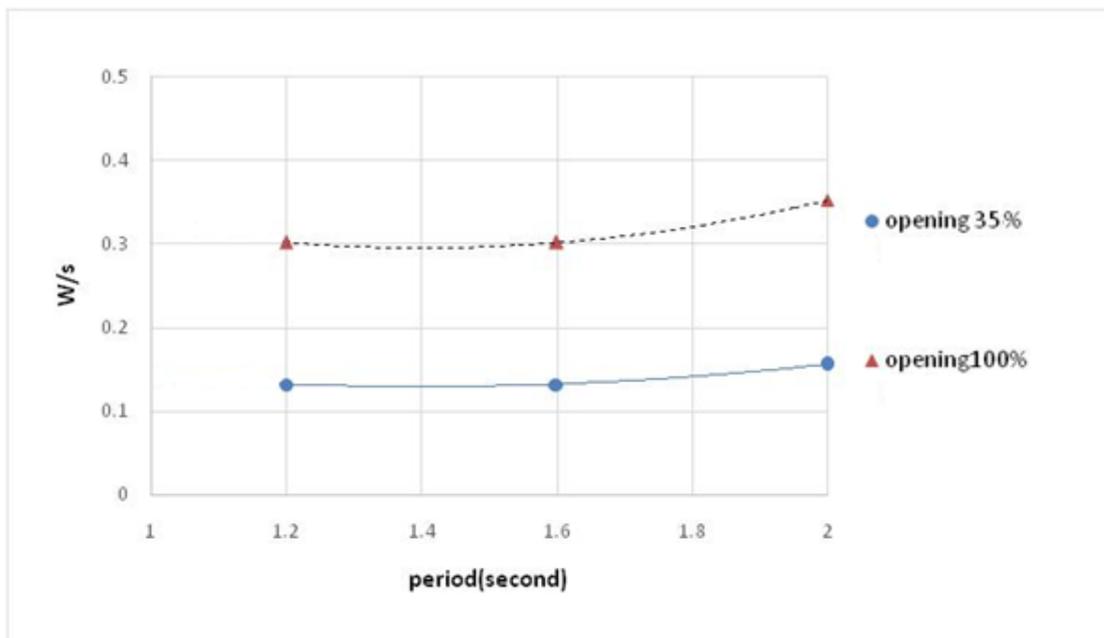


圖 7.75 不同開口率單斜渦輪電功率與波浪週期比較(H=10)

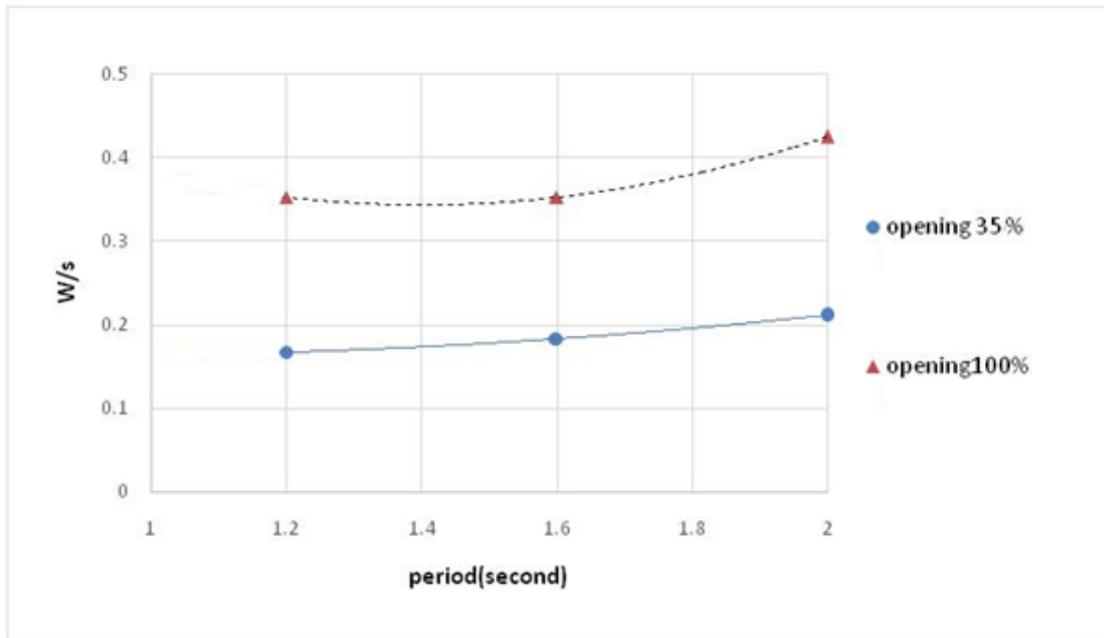


圖 7.76 不同開口率單斜渦輪模型率與波浪週期比較(H=12)

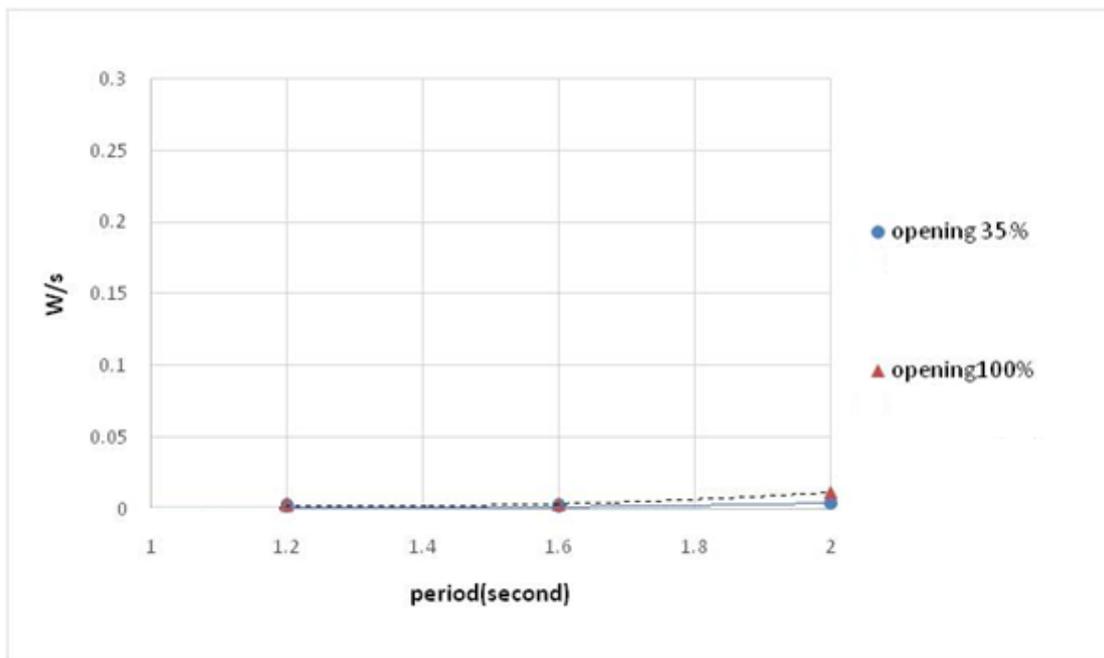


圖 7.77 不同開口率雙斜渦輪模型與波浪週期比較(H=4)

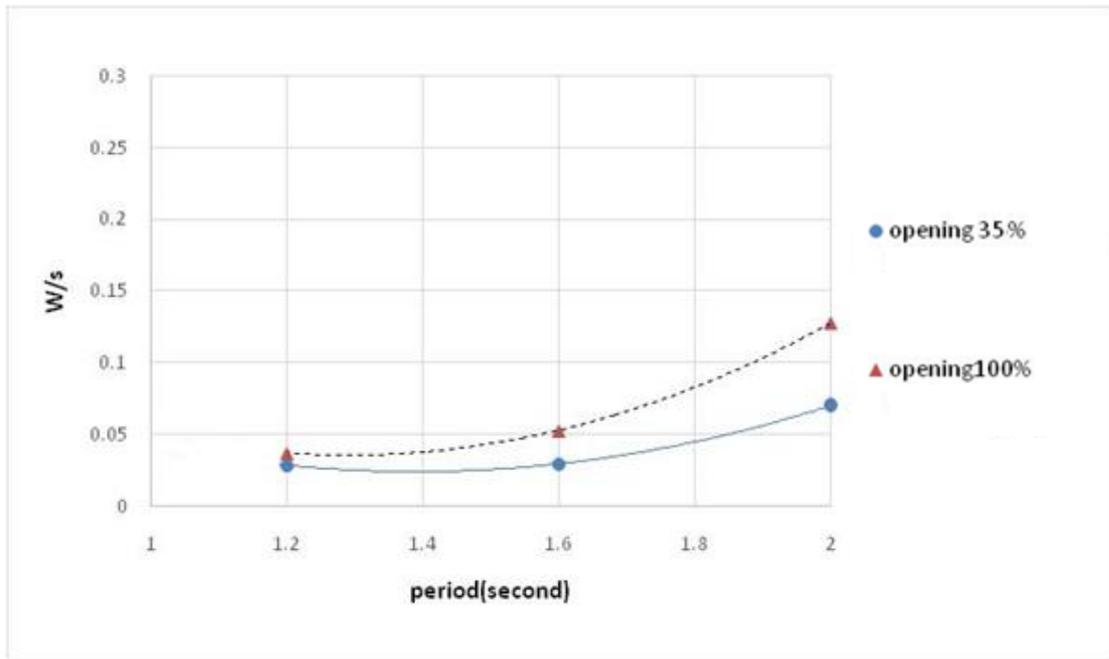


圖 7.78 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=6)

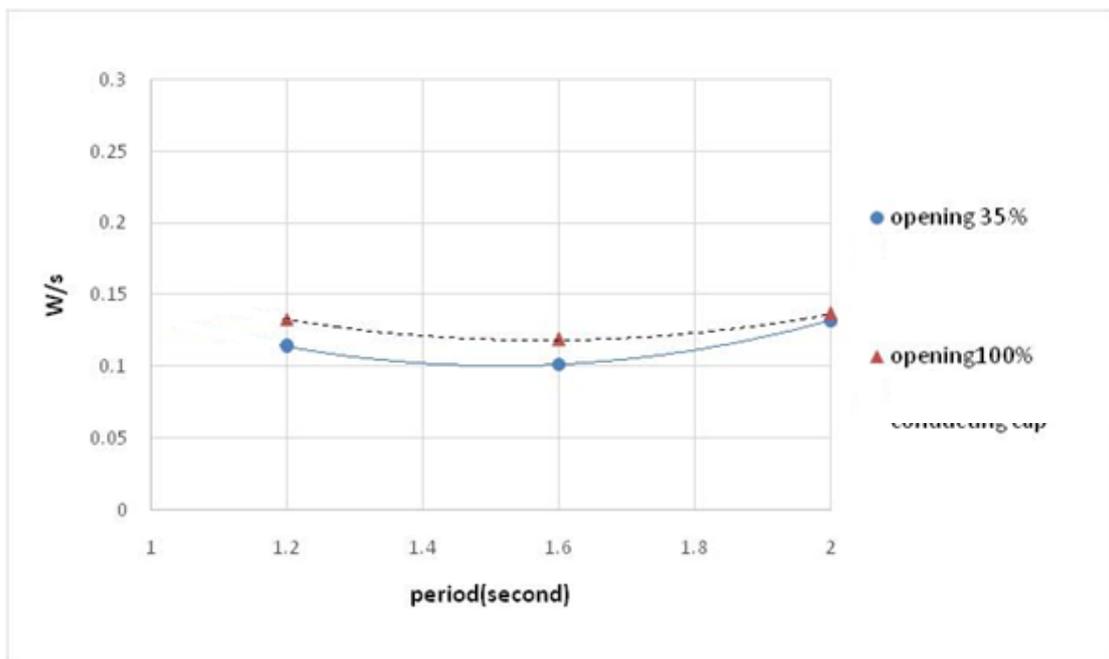


圖 7.79 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=8)

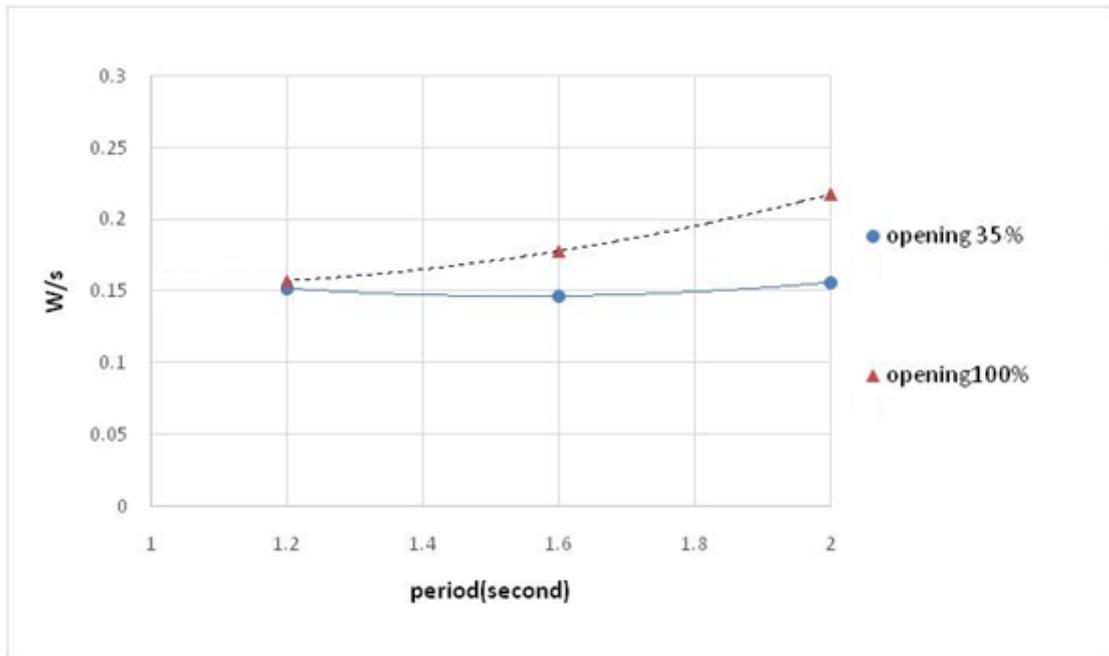


圖 7.80 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=10)

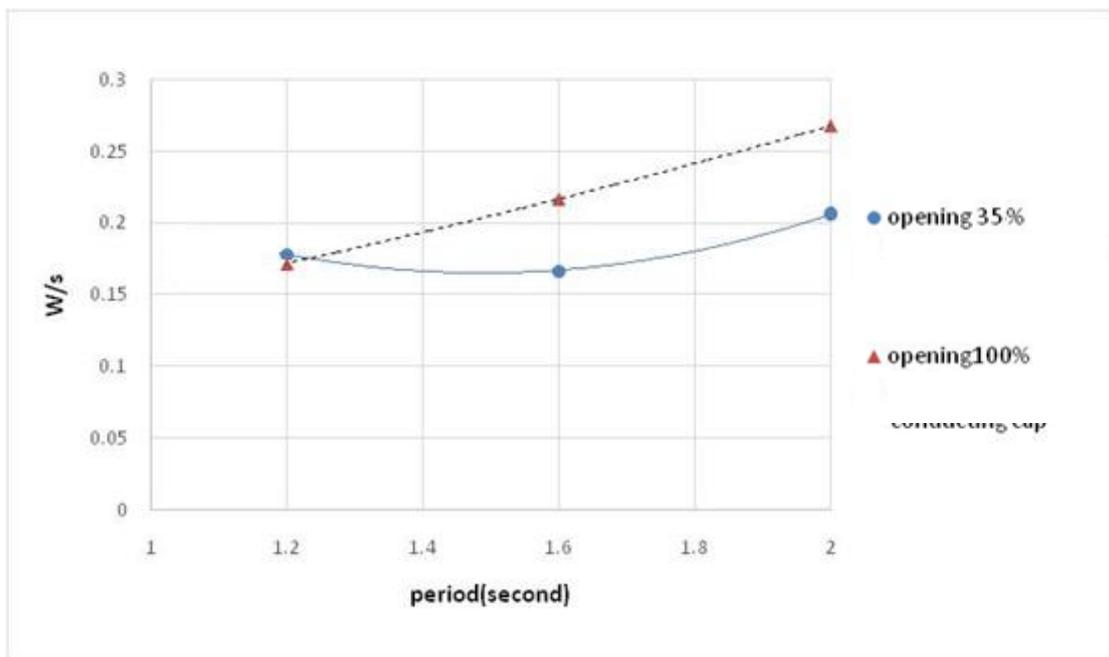


圖 7.81 不同開口率雙斜渦輪模型電功率與波浪週期比較(H=12)

7.3 實驗成果比較

由表 7-31 與表 7-32 可知前牆開口率之增加會導致反射率的增加氣流速度與能量擷取率的下降導致發電效能之下滑，但由 15 阻波浪實驗資料可以看出在波浪週期小於 1.6 秒或波高條件大於 6 公分時，前牆開口率 100%之效能將大幅增加以至於超過前牆開口率 35%。在渦輪系統方面，新式渦輪系統之發電效能遠高於傳統渦輪，其中單斜渦輪發電效能又高於雙斜渦輪系統；原因在於單斜渦輪之有效受風面積較大且風阻面積較小，新式渦輪與傳統渦輪之特性由表 7-33 所示。導流系統在面臨低波能之狀況時具有整流並集中氣流之特性；在面臨高波能之狀況時則可以產生消能之作用，進而保護波能擷取系統與發電渦輪。

表 7-31 花蓮港實驗成果比較

縮尺 25 : 1	水工試驗			
	前牆開口率 35%		前牆開口率 100%	
	單斜	雙斜	單斜	雙斜
週期 T	1.6 s			
波高 H	5.2 cm			
波長	3.2788 m			
蓋水面積	1824 cm ²			
迎波面開口面積	19*19 cm ²		19*53.5 cm ²	
入射波浪總能	8.2625 J			
反射率 Kr	46.7%		49.0%	
風口面積	38.5 cm ²			
氣流速度	6.5 m/s		6.45 m/s	
氣流速度能	1.00J		0.98J	
能量擷取率 (入射波能轉風能)	12.1%		11.9%	
負載轉速(rpm)	4672.81	1541.196	7496.38	3360.932
最大電壓(V)	11.2	3.8	11	5.4
電工率(W/s)	0.128	0.014735	0.123469	0.029755

表 7-32 高雄港實驗成果比較

縮尺 16 : 1	水工試驗			
	前牆開口率 35%		前牆開口率 100%	
	單斜	雙斜	單斜	雙斜
週期 T	1.75 s			
波高 H	6.25 cm			
波長	3.7122 m			
蓋水面積	1824 cm ²			
迎波面開口面積	19*19 cm ²		19*53.5 cm ²	
入射波浪總能	13.514 J			
反射率 Kr	50.3%		50.1%	
風口面積	38.5 cm ²			
氣流速度	8.8 m/s		8.7 m/s	
氣流速度能	2.72J		2.63J	
能量擷取率 (入射波能轉風能)	20.1%		19.5%	
負載轉速(rpm)	5965.824	3311.621	5734.52	3360.932
最大電壓(V)	14.2	7.8	13.2	8
電工率(W/s)	0.205755	0.062082	0.177796	0.065306

表 7-33 風扇之比較

	偶數扇葉(6片)	積數扇葉(7片)	
	原風扇	單斜風扇	雙斜風扇
相對迎風面積	小	中	大
相對尾翼設計	短	長	中
相對末端距離軸心	近	遠	中
相對啟動風速	大	小	中
相對有效受風面積	小	大	中
相對轉速	慢	快	中
相對噪音	小	大	
相對震動	小	大	

第八章 結論與建議

本研究之目標為結合港灣構造物，發展綠能與產業共生之機制，同時延長港灣結構物之使用年限或維修現有防波堤時可參考之方式。其方法為藉由瞭解海洋波浪與海洋結構互制作用之機制，建立起港灣結構與海洋波浪間之友善關係，波浪作用於港灣結構，可能造成結構破壞的能量，本研究不僅能消散波浪能量，還能進一步加以利用轉換成有用的能源如電能，並藉由波能擷取系統之改善，或氣流速度之提升而改善系統發電效率，該能源之利用除了可轉換成電力之外，亦能將波浪能轉化為其他型式之能源儲存使用。

可再生之綠色能源包含甚廣，如風能、太陽能、海洋能、生質能等。若以港灣水域之特性為思考，風能及太陽能均需要較廣大之區域範圍，在應用上亦可能對於航行船隻進出港造成影響，如太陽能板之反光影響，風能裝置之風葉迴旋陰影及噪音影響等。因此初步將以海洋能為思考，尤其是對於港灣結構造成破壞之波浪能量為思考。如何將波浪能量加以有效利用，尤其是對主要結構物不造成額外負荷之情況下，將為此一波浪擷取系統在規劃及分析時之最重要課題；其次重要之課題則為將此波浪能量有效轉換為電能或其他可資利用之資源。因此，如何有效建置以波浪能擷取為主之綠能系統為本研究之第一目標。

1. 將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中：

工程構造物在設計時，除了考慮其用途及功能(objective and performance)的發揮之外，若為附屬於主結構之設施時，則同時也必須一併考慮其對主結構之影響。而港灣構造物主要包括各式碼頭構造以及防波堤構造，岸線上則有各種的倉儲系統。若要將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中，其可行之方式可能包括設置於防波堤結構，或碼頭結構上。形式上則可分為以傳統或現有之結構設施作改善後，再與波浪能擷取系統相結合；另外則是重新規劃及設計新的、可結合

波浪能擷取設施為一體的碼頭或防波堤系統，在新建或復建的結構中加以使用。此為本研究之第二目標。

2. 同時增進港灣構造物使用之安全及耐久性：

由於港灣構造工程所處環境比一般陸地環境惡劣，除了水、濕氣的影響，還有各種的生物作用、化學作用，以及使用當中各種非預料中的受力行為，港灣構造物之耐久性及安全性經常受到嚴峻之考驗。由於本波浪能量擷取系統屬於被動之能量蒐集，其設計裝置於結構上之後，以能擷取最大之能量為目標，換言之、原作用於港灣構造之能量將被此一擷取系統所蒐集，致使作用於港灣構造之能量降低，港灣構造之位移、變形及受力等也將降低，港灣碼頭之安全性也因此而增加，從而延長了港灣構造物之使用年限。

本階段的研究重點除了包含波能擷取系統之發電理論、波浪擷取系統與現有防波堤之相容性分析、波浪擷取系統之結構安全性分析之外，更將著重於出風口導流系統之改善研究、風扇渦輪之基本研究與改善、以及結合以上改進措施後，進行波能擷取系統之水槽實驗，並以結合於港灣構造物波浪能擷取之系統之研究為主。另外、則是將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中後，在現行相關法規之適用檢討。若要將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中，其可行之方式可能包括設置於防波堤結構，或碼頭結構上。形式上則可分為以傳統或現有之結構設施作改善後，再與波浪能擷取系統相結合；另外則是重新規劃及設計新的、可結合波浪能擷取設施為一體的碼頭或防波堤系統，在新建或復建的結構中加以使用。

8.1 本階段研究結果

8.1.1 波浪能擷取系統與港灣構造物結合在法規面之探討

本工作項目中探討了目前港灣構造物中，其在規劃設計時所使用之相關規範及設計準則，並了解將波能轉換系統納入港灣構

造物為一體設計時之可行性，或必須為單獨個體之結構物時，於設計準則及相關規範之適用情形。其細部工作項目則包括有：1. 現有港灣設計規範之了解，2. 港灣設計規範與波能擷取系統之相合性，3. 波能擷取系統融入港灣結構須滿足之規範探討。

臺灣現有港灣設計實務上，並無具約束力之具體規範，僅有由交通部所頒佈之參考規範。因此、工程實務上，各顧問公司或設計單位在進行港灣碼頭設計時，所參考之規範包括了臺灣、日本或者歐美各國之相關規範，其中又以日本的規範為大宗。臺灣的參考規範也因地緣、及同為海島地形，基本上參照日本的規範彙編而成。在參考時主要以與設置波能轉換系統相關之結構型式為主，本研究中應用到之港灣構造為外廓防波堤，尤其為沉箱型式之防波堤構造。

本研究中蒐集了以上所述之臺灣現行規範，並針對有影響的部分進行分析及檢討，發現港灣設計規範與波能擷取系統之設計雖有差異，但整體相合性並無太大問題。經結構安全分析以及水工試驗之結果發現，波能轉換系統納入港灣構造物後，對於港灣構造物並不會造成安全上之顧慮。但港灣設計時因考慮安全因素使用之設計波浪週期通常較長，而波能轉換系統為求轉換之效能，則以日常波浪做為設計基準，兩種型式的結構之間若以防坡堤之安全考慮為主時，則須增加波能轉換結構之安全係數。

8.1.2 波能轉換系統結合港灣構造對安全性之影響

港灣結構無論為防波堤結構或碼頭結構，本具有其設置之功能，若增加了附設之波能轉換系統，是否將增加原結構之負擔如受力增加、或結構功能減損等？如果發生以上對原結構之安全產生疑慮、或影響其原來使用之功能性時，則該附屬設施或構造之設計則有問題。本階段的研究中，在波能擷取系統對於原結構物在安全的促進上，進行了港灣結構結合波能轉換構造後之結構安全分析。其分析過程則依照目前港灣構造物中，其在規劃設計時所使用之相關規範及設計準則進行。

根據分析結果顯示經過詳細之規劃及設計後，設置於防波堤上之波能轉換結構及設備，不至於對原結構造成影響。兩種型式的結構之間考慮設計條件之相容性後，於符合港灣設計規範的條件下，波能擷取統及轉換結構不僅不至於妨害原結構之安全及其使用功能，波能擷取統對於原結構物在安全的促進上，具有更正面的幫助，而對於原結構功能性的改善上亦具有正面之助益。

8.1.3 效能改進之實體模型試驗成果

在前階段的研究中，所建立之波浪能擷取系統為固定氣室使湧進波浪，氣室內波浪進入時之前後搖擺及上下起伏則造成空氣之震盪，再利用此震盪之氣流，經過整流及引導以推動氣旋式渦輪系統來發電。此波浪能擷取系統初步之規劃為，附設於港口外廓防波堤之外側，但在波浪引導或集中方式上並未做任何之設計。一般為了加強或集中波浪能量，在波浪入口處均有相關之設計。本階段研究中，則在進氣口及氣流導引功能上作進一步的改善，另外在渦輪系統如葉片數量及渦輪型式上亦作了相關改善措施。

為了解扇葉的旋轉特性設計轉速試驗，並配合前階段水工試驗所擷取之出口氣流速度，得出本研究威爾斯渦輪扇葉之轉速與氣流速度關係，系統在無負載時之起動風速 $<4\text{m/s}$ ，最大轉速可達 5079.68RPM ，而在負載馬達後，其啟動風速提高至 5.5m/s ，但其最大轉速可達 8000RPM 以上。

而在輸出電壓與電功率趨勢與渦輪轉速為正相關，電壓輸出最大可達 27.6V ，於本系統中即為每秒 0.777 瓦特的電功率輸出，本研究模型寬約為 1m ，假設於 100m 的防波堤裝設本模型，以最大輸出電功率估算，每秒可產出 $0.777\times 100=77.7\text{w}$ ，則每日可提供 $77.7(\text{w})\times 60\times 60\times 24(\text{sec})=6,713\text{kw}$ 的電量。

8.2 整體計畫研究結果

在前期的研究成果中，進行了各種可再生性綠色能源應用於港灣構造之相關分析，其中已完成之具體成果包括：

1. 風能及太陽能是否適用於港灣構造之可行性分析。
2. 參照國外案例設計波浪能擷取系統模型結合防波堤，發想建構新型防波堤。
3. 針對新式防波堤的設計，進行 ANSYS 數值模擬了解其在波浪作用下之反射率、能量擷取率等，也針對設施的安全性進行分析。
4. 實際製作了包含各種參數變化的波浪能擷取系統模型，於中山大學水工試驗所中進行實驗，其結果並與模擬結果對照，印證出分析之結果與試驗數據，兩者兼具有相同的趨勢。根據此部分成果，以數值模擬方式來進行實體設計參數優化(或較佳化)的分析應具有相當之可行性。
5. 參照高雄港及花蓮港區之波浪條件、水深資料、防波堤位置等，進行結合防波堤之波能轉換系統模擬分析及試驗，以了解在臺灣現有港灣碼頭及海洋環境條件下，波能轉換系統結合港灣構造後，實際波能轉換之效能。
6. 整體來說，於數值模擬分析時，高雄港及花蓮港區兩港口在反射率、能量擷取率的分析結果都相當接近。但因為花蓮港入射波浪較大，因此造成了花蓮港的出口氣流速度有較佳的表現，試驗結果仍以花蓮港之表現為佳。
7. 參考日本實際應用於港灣中之波能轉換系統案例，設計了一概念性之波能轉換系統，其為傳統型利用震盪水柱在密閉氣室內，推動空氣使快速流動，以帶動發電機之渦輪進而達成發電之目的。

8.3 波能轉換系統較佳化設計原則

1. 基礎設計

根據第四章之波堤之基礎設計理論來設計波能擷取系統，以確保其強度與耐久性。

2. 長度設計

根據現有防波堤之長度決定波能擷取系統之長度，或作為離岸堤之使用。

3. 寬度設計

設計寬度應小於適性波長之三之一，以確保波能之有效利用。

4. 高度設計

波能擷取系統之高度應與防波堤切齊或高於防波堤，以便後續維修工作的方便性。

5. 前牆沒水深度

設計之沒水深度為最低潮水位再向下 1.5 倍之示性波高，以確保在最低潮位時亦可以穩定發電。

6. 前牆開口率與出風口設計

出風口大小需與發電渦輪對應，前牆開口率須與出風口互相搭配，應先確認出風口大小後再決定前牆開口率。

7. 風扇設計

風扇設計推薦使用奇數型風扇設計，葉片幾何以單斜為主要設計，亦可使用更為優秀的扇葉設計。

8. 維護管理

波能擷取系統設置於海岸區域，鹽分較高、腐蝕性強，發電機組與風扇渦輪需要較高的維護。渦輪及發電機組需要重視定期檢測銹蝕與生物附著之情況，以延長發電機組的使用時間。

8.4 建議

本波能轉換系統除了將波能轉換成其他能量如電能之外，並具有消能之功能；因此在應用上建議可配合消波功能，設置於波浪作用較大處如防波堤，或無防波設施之港口外廓。

本研究目前僅止於水槽試驗室之模型試驗階段，實際應用之前，建議宜有更完備的全尺寸模型現地試驗，以示範綠能設施搭配相關港區或臨海設施之防浪、防波設施進行。

本研究成果中顯示本波能轉換系統在造波水槽中，能成功不間斷的產生電能，且能準確估出波能轉換成氣流能之效率，但對於電能轉換之估算則受限於使用之發電系統，建議未來如無全尺寸之模型研究，亦宜有更大尺寸之模型研究，較能顯示時自發電之效率。

本系統所產出之電能為連續但較不穩定，需考慮電力之儲存方式。發電系統建議使用直流式發電，在儲存與使用方面也更為直接，且直流電系統之維修較為簡單，在高鹽之環境更為適用。

本波能轉換系統應用於面對入射波時，將有較佳效率；但亦容易受到波浪帶來各種物質之影響，如砂石、浮木或各種於海上常見之漂流物。因此、應用時宜考慮相關之防護措施，以延長設施之使用壽命。

本波能轉換系統設置於高鹽度及高濕度之環境，設計實宜考慮環境影響，尤其在材料使用及未來維護上，如風扇系統建議使用抗蝕材質，並定期更換維護。

參考文獻

1. Badhurshah, R. and Samad, A., 2012, Bi-directional flow turbines for wave energy extraction, Proc. National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power (FMFP2012), Dec 13-15, Gujarat, India.
2. Gorban, Alexander N. Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. Journal of Energy Resources Technology. 2001.December, 123 : 311–317
3. [http : //airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il](http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il)
4. [http : //m-selig.ae.illinois.edu/](http://m-selig.ae.illinois.edu/)
5. Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report
6. Paolo Boccotti, Comparison between a U-OWC and a conventional OWC, Ocean Engineering, Vol. 34, 2005, pp 799–805.
7. REN21 , Renewables 2011 : Global Status Report ◦
8. S Takahashi, H Nakada, H Ohneda, "Wave Power Conversion by a Prototype Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port", 23rd
9. Shinya Okuhara, Manabu Takao, Akiyasu Takami, Toshiaki Setoguchi, Wells Turbine for Wave Energy Conversion, Open Journal of Fluid Dynamics, 2013, 3, 36-41.
10. T Karthikeyan, Abdus Samad, Rameez Badhurshah, Review of air turbines for wave energy conversion, 2013 International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy
11. 藍振洋，波浪發電原理與系統開發，工業技術研究院。

12. 李順晴、吳俊樺、鄭先良，鐵板燒機臺排風管路排氣過程模擬，中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會論文集，2007，CSME-358-363
13. 林繼謙，岸基震盪水柱式波浪發電系統之設計，國立成功大學系統及船舶機電工程學系碩士論文，2008。
14. 林啓聖、鐘智印、郭玉樹，振盪水柱波浪發電防波堤受力及氣流反應，第34屆海洋工程研討會論文集，2012，P.797-802。
15. 林志遠、戴明杉、林坦霆、王永正、張達元，”小型威爾斯渦輪葉片設計改良與製造驗證”，全國精密製造研討會論文集，2012。
16. 謝榮華，90年，波浪作用下垂直與水平柱體受力行爲及減力設施之實驗研究
17. 交通部運輸研究所，”高雄港觀測波浪資料專刊(2001~2008年)(下冊)，2009。
18. 交通部運輸研究所，”高雄港觀測波浪資料專刊(2001~2008年)(上冊)，2009。
19. 交通部運輸研究所，臺中港觀測波浪資料專刊(1994~2008年)(上冊)，2009。
20. 交通部運輸研究所，臺灣港灣構造物動態資訊管理系統建置之研究(4/4)，2013。
21. 交通部運輸研究所，花蓮港觀測波浪資料專刊(1990~2008年)(上冊)，2009。
22. 交通部運輸研究所，花蓮港觀測波浪資料專刊(下冊)(1990~2008年)，2009。
23. 交通部運輸研究所，基隆港觀測波浪資料專刊(1999~2008年)(下冊)，2009。

24. 交通部運輸研究所，基隆港觀測波浪資料專刊 (1999~2008年)(上冊)，2009。
25. 交通技術標準規範港灣類工程設計部，港灣構造物設計基準，防坡堤設計基準及說明，2006。
26. 英華威風力發電集團 Infravest，臺灣風力發電發展現況。

附件一 海堤相關規範

基本設計

3.1 基本斷面之假定

3.1.1 直立堤

1. 堤頂高

直立堤之堤頂高應在朔望平均高潮位加上示性波高($H_{1/3}$)之 0.6 倍以上。

- (1) 堤頂高程應考慮港內之利用，所需要之靜穩度、利用天數以及背後港灣設施之保護等而決定。
- (2) 現有防波堤大多以下列數值為標準而決定堤頂高：
 - (a) 大型船出入之港灣，若防波堤背後水域廣闊，且容許少量之越波，同時不需考慮暴潮之影響時，堤頂高取朔望平均高潮位上 $0.6H_{1/3}$ 即可。
 - (b) 防波堤背後之泊地停泊船身自為小型船隻，而且泊地面積狹小，須阻止越波之侵入時，堤頂高取朔望平均高潮位上 $1.25H_{1/3}$ 。
- (3) 大型船隻出入之港灣，即使防波堤背後水域廣闊，若接近設計波之波浪來襲頻繁，且持續時間長，以朔望平均高潮位上 $0.6H_{1/3}$ 之堤頂高，因越波之影響將使港灣之活動受限，這種情況，最好堤頂高能較朔望平均高潮位上 $0.6H_{1/3}$ 為高。
- (4) 在須考慮、暴潮影響之港灣，可由過去之記錄，將朔望平均高潮位加上暴潮偏差作為設計潮位以求取堤頂高。
- (5) 為保護海水浴場之防波堤或其他如為取水使用等特殊用途之防波堤，應充分了解防波堤設置之目的，決定頂高此時採用較本章為低之值亦可。

2. 堤面場鑄混凝土厚度

波高 2 公尺以上時，堤面場鑄混凝土厚度至少應有 1 公尺以上；波高小於 2 公尺時，堤面場鑄混凝土厚度最少須在 50 公分以上。雖然決定直立堤堤面場鑄混凝土厚度之方法仍未確立，但如太薄將會受損，初步值可經由實例決定。堤體為方塊時上部混凝土有壓頂作用，對防止方塊之移動甚為有效，故宜採用重實之混凝土。

3. 寬度

堤體所需寬度依據作用波壓力而決定。

4. 其他

方塊型直立堤最上層之方塊、空心方塊以及沉箱頂部之高度為使於堤面施工，至少須在平均水面以上。沉箱頂之高度較低時，沉箱安放後填砂以及吊放混凝土蓋版，頂部混凝土之打設作業將受限制，因此通常取朔望平均高潮位以上之高度。

3.1.2 合成堤

1. 堤頂高

直立堤部份之堤頂高依照直立堤(3.1.1)之方法決定，但若堤基可能產生沉陷之情況，應加上餘裕，提高頂高，或採用容許加高又不影響安全之結構。通常防波堤下陷有下列各種原因：

- (1) 基礎地盤之壓實下陷。
- (2) 基礎石料被吸出。
- (3) 拋石基礎向橫側方向滑動。
- (4) 因拋石與方塊之重量而使堤基陷入地層。
- (5) 防波堤本身及砂質地盤之壓密。

其中(1)項可由「地盤沉陷」求取。(2)(3)(4)(5)則隨直立堤部份之重量，拋石層之厚度等而變化。預加厚度之方法，有將拋石層加厚法或頂部加厚等，設計時須充分考量其利弊得失。

2. 堤基

- (1) 堤基之頂高應檢討施工條件及經濟性後選擇一最適宜之高度。
- (2) 堤基厚度最少須在 1.5 公尺以上，以避免沖刷之影響。
- (3) 堤基之堤肩寬度，在港外側依波高之情況採用足夠之寬度，波浪較大之處最少應在 5 公尺以上。港內側堤肩寬度採用港外側寬度之 2/3 即可。
- (4) 水深極深堤基部份，或波浪小且有充分之堆石重量處之外，在直立堤海側應至少安放兩個以上之護基方塊，陸側應至少放置一個以防止沖刷，護基方塊應緊靠直立堤。
- (5) 堤基部之形狀，可能會導致異常強大衝擊波壓作用於直立堤之危險，因此最好能採不發生衝擊波壓之堤基形狀，堤基部之頂面應儘可能的深此對直立壁之安定較有利，另外堤基部之厚度可使直立堤之荷重分佈較廣，所以應將直立堤之基礎整成水平，此外堤基可防止波浪之沖刷效果，原則上厚度應在 1.5 公尺以上。堤基部之堤肩寬度，除應確保堤體之圓弧滑動及對偏心傾斜載重能滿足安全率外，在波浪較大處，港外側至少須有 5 公尺以上之寬度。而堤基之坡度，係由安定計算決定，港外側坡度緩於 1：2，港內側坡度緩於 1：1.5。

3. 堤面場鑄混凝土厚度

堤面場鑄混凝土厚度或沉箱安放高程以及堤體高程依直立堤(3.1.1)為準。

4. 堤體寬度

堤體所需寬度依據作用波壓力而決定。

5. 其他

- (1) 為增加直立堤之滑動抵抗亦有在背後堆放石塊之情形，此時，因越波很容易引起散亂，因此石塊須互相模牢，必要時，可用混凝土方塊或消波塊加以覆蓋。
- (2) 基礎地盤軟弱，很明顯地下陷或拋石陷入地層量多時，應改良地盤，如拋石底部用沉床，以分散堤體重量等。

3.1.3 斜坡堤

1. 堤頂高

堤高依照直立堤(3.1.1)。

2. 堤體寬度

- (1) 堤寬在採用消波塊時，以三個以上並排為準。
- (2) 越波嚴重時，堤頂部之覆蓋材會不安定，因此須有充分堤寬，本文之值為對應於 $0.6H_{1/3}$ 程度之堤高所應有之堤寬。雖然如此斜坡堤之堤寬，隨覆面保護材料之特性、波浪條件等而不同，應以水工模型試驗加以確定。
- (3) 堤寬除應滿足安定計算上所需寬度外，並應考慮施工上方便。

3. 護坡坡度

護坡坡度應由安定計算決定，拋石堤之以港外側坡度緩於 1:2，港內側坡度緩於 1:1.5，消波塊覆蓋時 1:1.3~1:1.5 之例較多。另外，在港外斜坡之坡度與覆蓋材之重量改變時，此改變點應在靜水面下 $1.5H_{1/3}$ 以下。

4. 其他

斜坡堤之基礎依需要應設置防止沖刷及吸出設施。

3.1.4 消波塊覆蓋堤

1. 堤頂高

(1) 直立壁之頂高，參照直立堤(3.1.1)。

消波塊覆蓋堤與直立堤、合成堤相比，越波及傳遞波將會較小。

(2) 消波塊之頂高，最好能與直立堤之頂高相同。

(a) 消波塊對減低波壓、減少越波及傳遞波反射波有相當效果，為掌握此種效果，應以模型試驗來判斷。

(b) 消波塊之頂高若較直立部之頂高低很多時，有可能使甚大之波力作用於直立部，相反，若較直立部之頂高太多，頂端之消波塊將會不安定。

2. 堤面場鑄混凝土厚度

堤面場鑄混凝土厚度以及沉箱等之安放高度，依直立堤(3.1.1)。堤基之厚度依合成堤(3.1.2)之方法決定。

3. 堤體寬度

(1) 消波塊覆蓋部之堤寬，以消波塊二個以上並排為準。

(2) 消波塊之施工頂部，若消波塊未能完全覆蓋於直立部時，此部份可能會有甚大之波力作用，應予注意。

4. 其他

消波塊基部附近，依情況應設置防止沖刷及吸出設施。

3.1.5 直立消波塊堤

1. 直立消波塊堤

須充分調查其消波性能，選定適當的消波塊，依需要進行水工模型試驗而設計。

- (1) 直立消波塊堤為將具有消波功能之特殊方塊(直立消波塊)加以直接堆積成消波塊式直立堤或合成堤。由於現有各種直立消波塊被開發，因此使用時須充分調查其消波功能等，而選擇適當之型塊。
- (2) 直立消波塊堤之反射率，隨波浪之週期有較大之不同，因此須充分考慮其影響而加以決定。決定反射率時，最好進行水工模型試驗，但亦可參考以往實驗值而加以決定。
- (3) 直立消波塊堤，除一體構造之大型方塊外，一般使用於波高較小之內灣或港內。

2. 堤頂高

- (1) 直立消波塊堤之堤頂高，除參考直立堤(3.1.1)外，並應考慮為滿足其功能所需之高度以及消波設施之高度後決定。消波設施之頂高，應考慮消波效果而決定。
- (2) 直立消波塊堤與合成堤相比，雖然越波以及傳遞波較小但較消波塊覆蓋堤為大，因此堤頂高須充分考慮堤後側之利用條件而決定。另外，決定堤頂高時，須確保頂部混凝土施，工上所需之厚度。

3. 其他

直立消波塊堤之消波效果，隨直立消波塊部之頂端以及下端之高度而變化。但是，至少頂端高應在朔望平均高潮位加上設計示性波高($H_{1/3}$)之 0.5 倍以上。另外下端深度最好能在朔望平均低潮位下，加上設計示性波高($H_{1/3}$)之 2 倍以上之深度。

3.1.6 消波沉箱堤

1. 消波沉箱堤

須充分調查消波功能後選定合適之構造，應進行水工模型試驗而設計。

- (1) 消波沉箱為前面有透水牆與消波室，藉此發揮消波效果之沉箱。隨各部份尺寸可組合形成多種之構造。在選擇消波沉箱構造型式時，須對構造物之消波功能、耐波性等特性加以充分調查，並考慮設計條件、利用條件、工程費等，而選擇適宜的構造物。
 - (2) 消波沉箱堤在選擇適當的構造時，一般與現有之直立堤相比，具有以下之特長：
 - (a) 可減輕反射波。
 - (b) 減輕越波、傳遞波。
 - (c) 可減緩波力，特別是對高基等以往沉箱堤會有強大衝擊碎波力作用之場合，消波沉箱堤之場合，波力不會明顯增加。此外，促進氣泡之混入、海水之曝氣能力，消波室可當作魚礁使用等特長。
2. 由透水牆與消波室所形成消波部份之構造及尺寸
- 須考慮、該構造物之消波特性，潮位變化等，使消波對象波之反射率在目標反射率以下。
3. 消波對象波浪條件之決定
- 消波沉箱堤一般為減輕反射波為目的而採用之場合較多，但消波之目的必須明確，再據此決定消波對象之波浪條件以及目標反射率。特別是消波沉箱堤之反射率隨波浪之週期會有顯著之變化，因此，波高、週期之特性須加以調查、決定消波對象波浪之條件。
4. 消波部尺寸之決定
- (1) 消波部之構造以及尺寸，除消波功能外，與越波、傳遞波及波力亦有關係，須考慮這些特性加以決定。
 - (2) 消波沉箱的反射率，除波浪、潮位、水深之條件外，隨前面透水牆之構造、消波室之寬度、消波室之高度與上部有無封版，以及堤基之高度等而變化，須充分檢討此影響，使欲消波之波浪反射率，能在目標反射率以下，而適當地

決定消波部之構造尺寸。由消波功能面上來說，消波室頂端予以提高或開放為佳。

3.1.7 上部斜面沉箱堤

上部斜面沉箱堤，須對波浪的傳遞特性等加以充分調查，選定適當形狀，應進行水工模型試驗等而設計。

1. 上部斜面沉箱堤除可減少水平波力外，同時主要為利用作用於斜面壁之波力使堤體安定之防波堤。
2. 由於上部斜面堤與通常之直立堤相比，傳遞波高較大，因此須考慮港內靜穩度而決定堤頂高，上部斜面沉箱堤在朔望平均高潮位上 $1.0H_{1/3}$ 之堤頂高相當於直立堤之 $0.6H_{1/3}$ 程度。

3.2 沉箱

3.2.1 構材尺寸決定之原則

在設計沉箱各構材形狀及尺寸時，應考慮下列各項因素：

1. 沉箱製作設備之能力

- (1) 沉箱製作臺之寬度及強度
- (2) 起重機之能量
- (3) 混凝土澆置能量
- (4) 下水能力

諸如吃水深度、塢門寬度、水深、浮沉箱塢能量、下水臺車強度。

(5) 製作時千斤頂位置

沉箱之製作，以儘可能使用現有設施為原則。如採用新設施或局部改善原有設施，應併同整體工程作經濟上之檢討。

2. 沉箱製作時作業上所需要之構材最小尺寸

- (1) 沉箱各部份之名稱如國 3-2-1，通常其隔間之尺寸，以隔牆中心距離不超過 5 公尺為原則，而後視沉箱之大小，倒牆厚度約為 30~50 公分，底版厚約為 50~80 公分，隔牆

厚度約為 15~30 公分，水平及垂直拖肩 15~30 公分，封了頁混凝土 50~80 公分。

- (2) 隔牆間距之決定，應考慮內模板之通用性。由於模板之互相通用，可減少模板組數及堆置場地。
- (3) 設計時應滿足『混凝土之容許應力度』、及本『設計外力』、『構材之設計』之規定事項。

3. 沉箱吃水與安放位置水深及堤基高度之關係

安放沉箱之餘裕水深應慎重決定。為考慮沉箱偏斜、搖擺、小波及吃水計算誤差等影響之最小限度，沉箱吃水與拋石基礎頂面之差通常應在 0.5m 以上。為使沉箱安放作業時間不受限制，以避免配合潮位與夜間作業，沉箱設計所考慮、之安放潮位通常在平均水位附近。

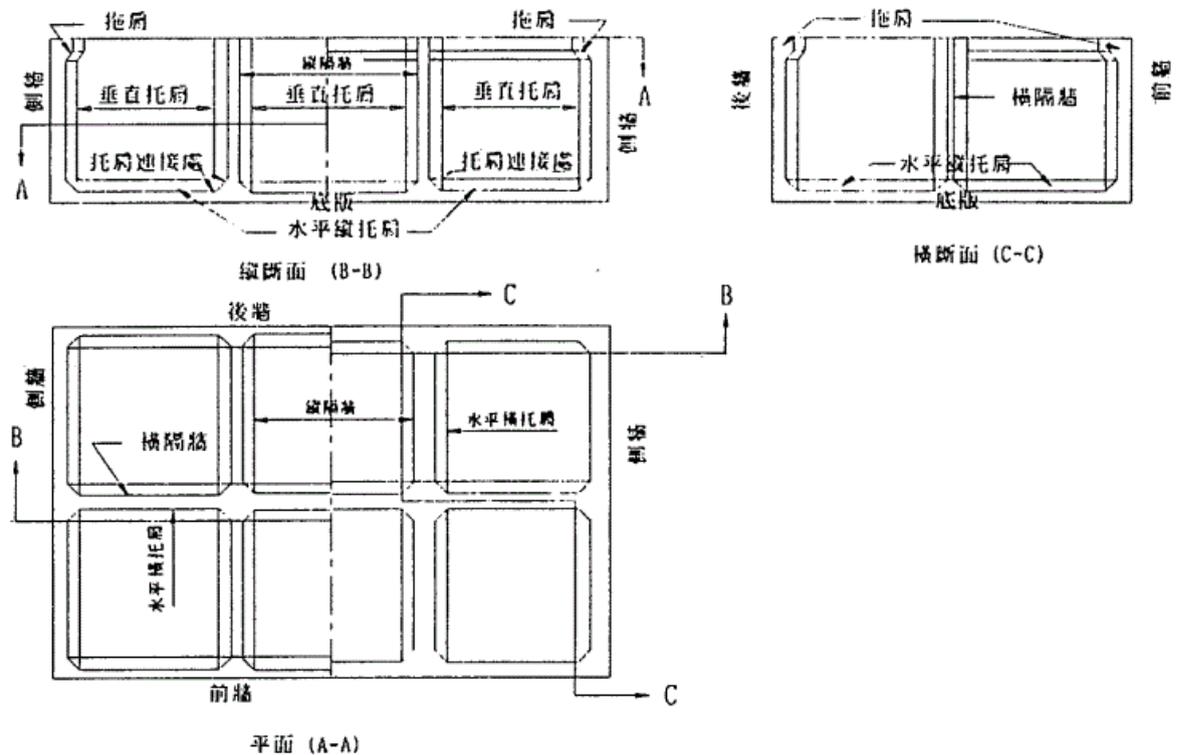


圖 3-2-1 沉箱各部份之名稱

4. 沉箱在漂浮中之穩定
5. 拖航及安放作業條件，如潮流、波浪、風等

沉箱之長度一般愈長愈經濟。但如過長，因潮流及波浪之影響可能使拖航及安放作業困難。安放後之填充作業，於拖放後應即進行填充作業。

6. 沉箱安放後之作業條件，如填充及上部結構施工之關係

沉箱之高度，以安放後封頂混凝土可用乾工法施工，須考慮波浪不使模板受損，填充作業要求，至少應在平均水面以上，一般皆在高水位以上。

7. 拖放問題

8. 不均勻沉陷問題

沉箱之長度如過大，當頂起(Jack-Up)或發生不均勻沉陷時，應檢討受扭曲之影響。加強頂緣可增加沉箱之剛性，並且具抵抗不均勻沉陷及波浪之效果。加強頂緣在施工上雖不便，但於波浪強大處有其需要，可用混凝土填充。

3.2.2 漂浮穩定

為使沉箱本身漂浮時不致有傾覆或傾斜之現象，應做穩定計算。為保持沉箱之穩定，應滿足公式(3-2-1)之條件(圖 3-2-2)。

$$\frac{I}{V} - \overline{CG} = \overline{GM} > 0 \dots\dots\dots(3-2-1)$$

式中：

- V : 排水容量(m³)
- I : 吃水面對長軸之斷面慣性矩(m⁴)
- C : 浮心
- G : 重心
- M : 傾心

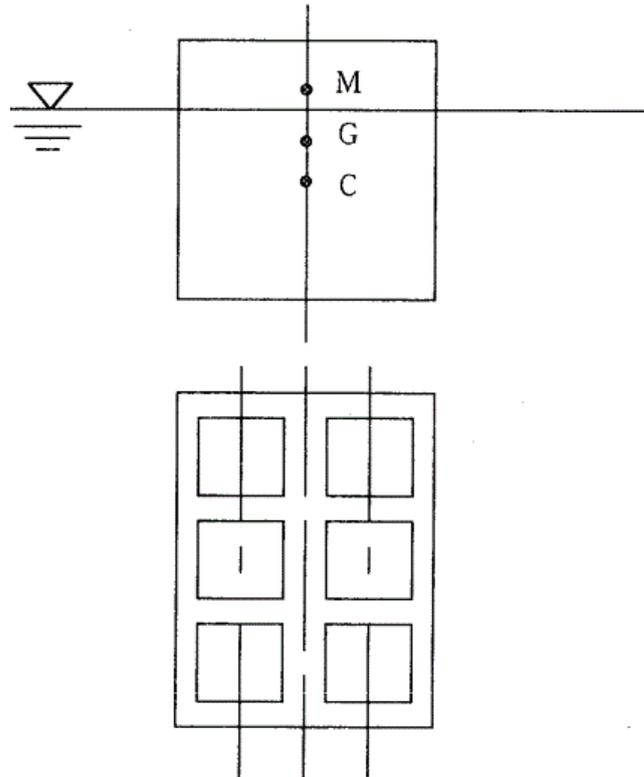


圖 3-2-2 沉箱漂浮穩定

通常為安全起見 GM 之值最好能取吃水之 5% 以上。

1. 內填壓艙物拖航時

以公式 3-2-2 計算之。

(1) 壓艙物為水之狀態下拖航時

$$\frac{1}{V'}(I' - \sum i) - \overline{C'G'} > 0 \dots\dots\dots(3-2-2)$$

(2) 壓艙物為砂、石或拋混凝土等時

$$\frac{I'}{V'} - \overline{C'G'} > 0 \dots\dots\dots(3-2-3)$$

i : 各內隔間水面平行於沉箱回轉軸中線之斷面慣性矩(m⁴)

V'、I'、C'、G' : 加壓艙物時之各個值或位置。

通常為安全起見 GM 之值最好能取吃水之 5% 以上。

2. 僅單側有基腳之沉箱

須加壓艙以保持平衡如圖 3-2-3 所示，以式 3-2-4 計算之：

$$W_1L_1 + WL_w = FL_f \dots\dots\dots(3-2-4)$$

式中：

- W_1 : 壓艙物重量 (t)
- W : 沉箱重量(包括基腳重) (t)
- F : 作用於沉箱浮力(包括基腳) (m)
- L_1 : 沉箱外牆緣至 W_1 作用點之距離 (m)
- L_w : 沉箱外牆緣至 W 作用點之距離 (m)
- L_f : 沉箱外牆緣至 F 作用點之距離 (m)

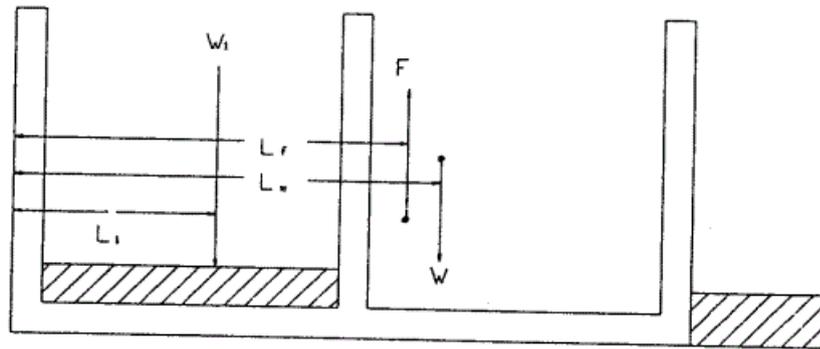


圖 3-2-3 加入壓艙物時之安定

3.3 外力計算

防波堤之安定計算時，須考慮波力、靜水壓、浮力、自重等外力，必要時亦應檢討地震力。

以外力而言，除波力之外，隨需要應考慮風力、地震力、動水壓、漂流物之衝撞力、土壓等。堤頭設置燈塔時，須考慮作用於燈塔之風壓力、地震力。

3.3.1 波力

作用於防波堤之波力應考慮防波堤之型式、海底地形、水深以及波浪之各項因素，而以水工模型試驗或以計算公式加以計算，此時須充分考量波浪之不規則性。

以下本文所稱水工模型試驗應以最大比例尺為之，且不得小於 $\frac{1}{490}$

安定計算時，由於對直立部最危險之波浪與計算覆蓋材料重量時所採用之波浪有時不一樣，須予注意。

對潮位而言，由於對直立部最危險之潮位與計算覆蓋材料重量時所採用之潮位有時不一樣，須予注意。

隨結構物之型式，波力大致可分以下幾種：

1. 作用於壁狀結構物之波力。
2. 作用於覆蓋石(塊)之波力。
3. 作用於海中結構之波力。
4. 作用於水面附近結構物之波力。

因各種結構物型式，其作用波力之計算不同，因此須依實際狀況採用合適之計算法。某些結構物之作用波力尚不明確，宜以模型試驗加以檢討。

實際之波浪，其波高週期均不規則，隨著水深或海底地形，有非碎波或碎波後之波浪作用在結構物上，波力計算時，應依設計條件，以帶給結構物最嚴重影響之波浪來按討，此時須充分考慮波浪之不規則性以及因斷面型式對波力產生之特性。

通常對波高而言愈大波高之波浪，帶來愈大之波力，因此，以到達結構物之不規則波群中之最高波作為波力估算之依據即可，但對作用於坡面之護坡石、塊等之安定性，剛性較低之柱狀結構物以及浮體結構物上之波力，則應考慮不規則波浪連續作用之影響。

以模型試驗進行波力之檢討時，須充分考慮、結構物之破壞情況，而採取適當之測定法，另外亦須充分考量現場波浪之不規則性，特別是以規則波進行試驗時，原則上須包含對最高波之檢討。

1. 作用於直立壁之波力

作用於直立壁之波力，因受潮位、水深、海底地形、結構物之斷面形狀、法線形狀等而改變，因此須予考慮而加以適當計算。特別海底坡度陡處或位於高堤基上面之直立壁，由於會產生強大衝擊波壓之作用須充分留意其發生條件以計算波力。

(1) 影響直立壁波力之因素

影響作用於直立堤波力之主要因素為波浪之週期、波高、波向、潮位、水深、海底坡度、堤基高程及堤基寬度、堤基坡度、直立堤之堤頂高以及堤底水深等。此外，特別在延長線上有轉角時，往往會受較直線部較大之波力，須特別考慮、此法線形狀之影響。另外，直立堤前面以消波塊覆蓋時，消波塊之特性，頂端高程及寬度等均有影響。

(2) 波力之種類

作用於直立堤之波力，就波浪之形態而言，可分為重複波力、碎波後之波力等，但其變化應為連續性者。重複波力為與水深相比波高較小之波浪所產生，波壓之時間變化較緩，隨著波高之增大，作用之波力亦大。碎波後之波力通常位於直立堤稍微海側破碎之波浪，將會產生最大之波力，因此除在非常淺之區域外，在直立堤前方碎波之碎波力較距直立堤很遠處碎波之作用力為大，特別在坡度很陡之海底面上之直立堤，或坡度雖緩但堤基很高之直立堤土，碎波作用時，會產生強大之衝擊碎波壓，應特別留意。

2. 作用於直立壁之重複波力及碎波波力

(1) 合田公式

作用於直立壁之最大波力以及當時之揚壓力應以下列之方法加以計算。

(a) 波峰作用時前面波壓

在靜水面之波壓為最大值 P_1 ，靜水面上 η^* 高度上波壓為 0，水底下波壓為 P_2 之直線分佈，考慮直立壁底面至頂端為止之波壓分佈詳如圖 3-3-1 所示。

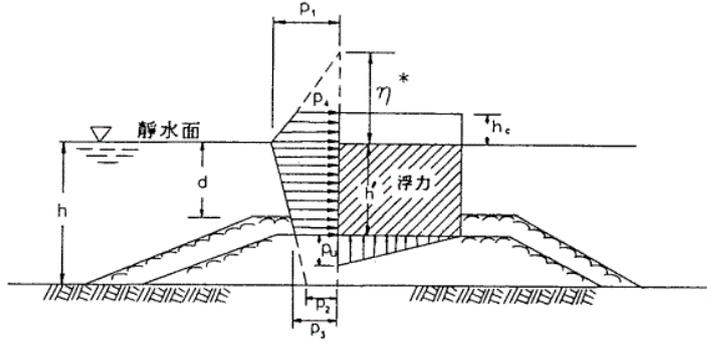


圖 3-3-1 波壓分佈圖

其各項波壓計算如下：

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) H_d \dots\dots\dots (3-3-1)$$

$$P_1 = 1/2(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta) \omega_0 H_d \dots\dots (3-3-2)$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2\pi h / L)} \dots\dots\dots (3-3-3)$$

$$P_3 = \alpha_3 P_1 \dots\dots\dots (3-3-4)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + 1/2 \left[\frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right]^2 \dots\dots\dots (3-3-5)$$

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_d}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_d} \right] \dots\dots\dots (3-3-6)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h / L)} \right] \dots\dots\dots (3-3-7)$$

式中 η^* : 靜水面上波壓強度為0之高度(m)

P_1 : 靜水面之波壓強度(t/m^2)

P_2 : 海底面之波壓強度(t/m^2)

P_3 : 直立壁底面之波壓強度(t/m^2)

h : 直立壁前之水深(m)

h_b : 直立壁前方海側5倍示性波高距離處之水深(m)

h' : 直立壁底面之水深

d : 護基方塊或覆坡石(塊)中水深較小者(m)

ω_0 : 海水單位體積重(t/m^3)

H_d : 設計波高(m)

L : 水深 h 處之設計計算所使用之波長(m)

$\min(a,b)$: a 或 b 中較小者

β : 堤法線之垂線與波浪主方向線 $\pm 15^\circ$ 範圍中修正之角度。

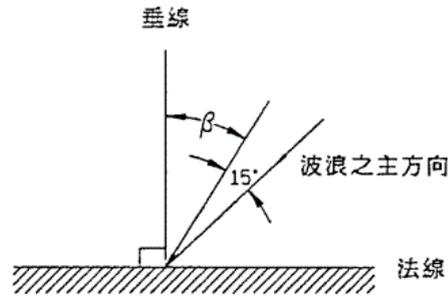


圖 3-3-2 波浪入射角之取法

在此所表示之波力計算公式為合田根據波壓試驗結果以及對現場防波堤之適用成果加以考察，並加上修正波向效應所提出之公式稱為合田公式。依此，不須區別重複波或碎波，可直接求得作用於直立壁之波力。但對坡度很陡之海底面上之直立壁或高拋石基礎上之直立壁，強大衝擊波壓作用之條件來說，對波力之估算可能偏低，因此在應用時，對衝擊波壓發生之危險性須予以留意。

本公式之波壓為以靜水時為基準計算波浪之作用所產生之波壓力。波浪作用以前之靜水壓依需要另外考慮。另外，本公式之波壓為以靜水時為基準計算波浪之作用所產生之波壓力。波浪作用以前之靜水壓依需要另外考慮。另外本公式主要以檢討直立壁堤體之安定性之波力為對象，特別是在碎波之作用時，並不一定是表示各位置之局部最大波壓，在作構材之檢討時，此點須特別留意。

由於本公式可表示每個波浪之作用波力因此，須以最大波為對象。由於不規則波群中最大波之出現為概率性的，因此很難加以明確決定。但由本公式對現場防波堤之適用性來看，波長以示性波週期相對應之波長，波高則在不產生碎波變形之處，以示性波高之 1.8 倍為準。若採用其他值時，須充分檢討最大波之出現機率，而採用適當之值。至於最大波是否受碎波之影響，則以求取碎波之最大波高圖為境界，較此為深時不受碎波之影響，較淺則可

考慮為受碎波之影響。另外，最大波壓以簡單式求取時， h 以 h_b 代入即可。

(b) 波谷作用時

當堤面波谷作用時，所產生之負波力，可依據水工模型試驗亦或以下之計算公式加以計算。

堤面波谷作用時，堤體之負波壓如圖 3-3-3 所示，在靜水面為 0，靜水面下 $0.5 H_d$ 為 P_n ，至底面為止均為不變之直線分佈波壓向海側作用。

$$P_n = 0.5 w_o \times H_d \quad (3-3-8)$$

式中：

P_n ：波壓強度

w_o ：水之單位體積重量(t/m^3)

H_d ：設計波高(m)

另外，作用於底面之負揚壓力，如圖 3-3-3，前趾為 P_n 後趾為 0 之三角分佈為向下作用之負揚壓力。

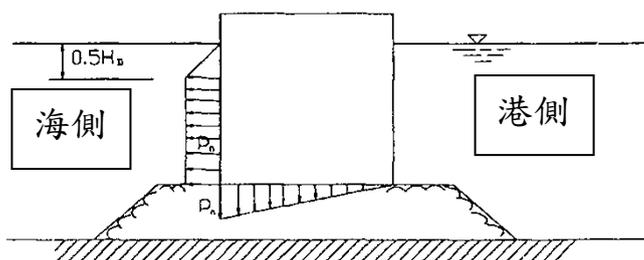


圖 3-3-3 負波壓分佈

(c) 揚壓力

作用於直立壁底面之揚壓力成前趾為 P_u 後趾為 0 之三角形分佈。

$$P_u = \frac{l}{2(1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 w_o \times H_d} \quad (3-3-9)$$

此時之浮力僅考慮靜水中之體積部份。

當沉箱有基腳時，在波浪之作用側基腳之上面有往下作用之波力以及底面前趾有 P_u 後趾為 0 之揚壓力作用，但儘管如此，通常其合力與無基腳時之

揚壓力並無很大之差別，因此，如圖 3-3-4 所示，可忽視基腳而以無基腳之情況計算揚壓力。

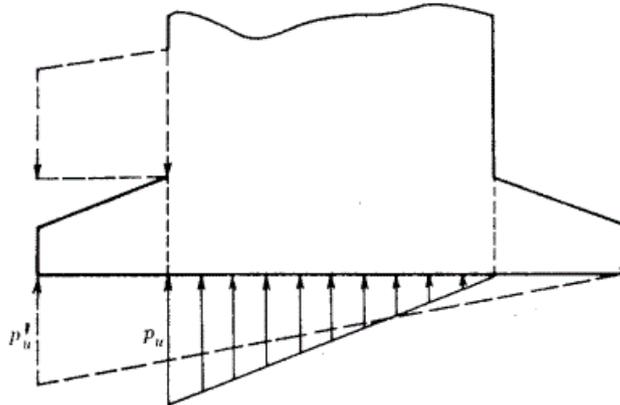


圖 3-3-4 有基腳時之揚壓力

(2) 其他理論式或計算式之適用性

本文所提之合田波力計公式，由重複波至碎波波力之適用界限並無區別，同時具相當之精確度，可連續加以求取，相當方便，因此以此為準。如與水深相比波高很小，很明顯地為重複波波力作用時，可採用精度較高之重複波理論式。但此時須充分考量現場波浪之不規則性，同時須以最高波來檢討。

另外，依據現有防波堤之實績，可確定適用性之時，以下之計算式亦可採用。

(a) 廣井公式

此式所採用之波高 H_d 為堤體設置位置之進行波之示性波高。

I. 波峰時之水平波壓

(i) $\frac{d}{H_{1/3}} \geq 2$ (重複波) 時

如圖 3-3-5 所顯示，除 Sa1nflou 之概算式所計算之波壓外，再考慮、部份碎波壓作為波壓分佈。

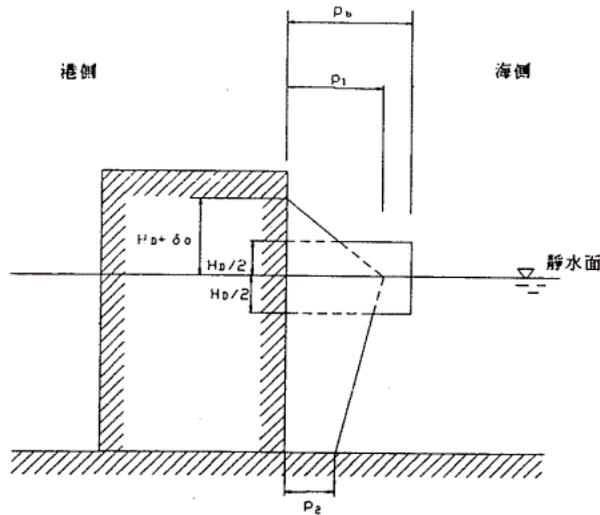


圖 3-3-5 考慮部份碎波波壓之 Sainflou 波壓分佈

P_b ：廣井公式之碎波波壓(t/m^2)

在靜水面上 $H_d/2$ 以及靜水面下 $H_d/2$ 之範圍

P_1, P_2 為 Sainflou 之概略式計算之重複波波壓(t/m^2)

$$\begin{aligned}
 P_1 &= (P_2 + \omega_0 h) \left(\frac{H_d + \delta_0}{h + H_d + \delta_0} \right) \\
 P_2 &= \frac{\omega_0 H_d}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \\
 \delta_0 &= \frac{\pi H_d^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}
 \end{aligned} \tag{3-3-10}$$

式中：

P_1 ：堤體靜水面之波壓強度(t/m^2)

P_2 ：堤體底部之波壓強度(t/m^2)

ω_0 ：海水之單位體積重量(t/m^3)

δ_0 ：水位上昇量(m)

h ：堤體前面水深(m)

H_d ：設計波高(m)

L ：水深 h 處示性波波長

當堤體高程小於 $H + \delta_0$ 時，以及有堤基時，其前端寬度 B_1 較波長 L 之 $1/2$ 短時，波壓分佈依此，而作用範圍則由直立壁之頂端至底面為止，若 B_1 較 L 長時，則將拋石基礎當作海底地形之一部分，計算所採用之波高以及波長均

為拋石基礎上端之水深。此外，SaInflou 之概略式，對重複波壓不作波向修正。

(ii) $\frac{d}{H_{1/3}} < 2$ (碎波) 之時

依式(3-3-11)廣井公式計算之平均波壓強度為堤底至靜水面上 $1.25H_d$ 或堤頂二者較低者(如圖 3-3-6)。

$$P_b = 1.5 \omega_0 H_d \cos^2 \beta \quad (3-3-11)$$

式中：

P_b ：碎波之波壓強度(t/m^2)

ω_0 ：海水之單位體積重量(t/m^3)

H_d ：設計波高(m)

β ：結構物之法線與波浪之主方向 $\pm 15^\circ$ 的修正之入射角。

但是，當 $\frac{d}{H_{1/3}} \geq 2$ 重複波之時，若修正波向使部份碎波壓之強度較 SaInflou 之波壓強度為小時，應採用 SaInflou 式。

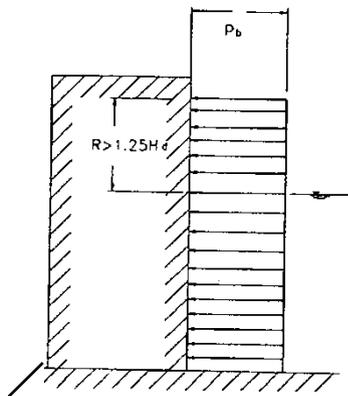


圖 3-3-6 廣井式之波壓分佈

II. 揚壓力

(i) 頂端很高不產生越波時

結構物頂端在靜水面上較 $H_d + \delta_0$ (重複波時) 或 $1.25H_d$ (碎波時) 為高時，可考慮為不產生越波。靜水面以下之部份受浮

力之作用外，作用於直立部底面之揚壓力亦應考慮。

揚壓力之強度為堤前趾為 P_u ，後趾為 0 之三角形分佈，堤體前趾之揚壓力強度可以式 (3-3-12)，(3-3-13) 計算。

➤ 重複波作用時 ($d \geq 2H_{1/3}$)

$$P_u = \frac{\omega_o H_d}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \quad (3-3-12)$$

但如有拋石基礎時應取與作用於堤體底面之水平波壓值相同。

➤ 碎波作用時 ($d < 2H_{1/3}$)

$$P_u = 1.25 \omega_o \times H_d \quad (3-3-13)$$

式中：

P_u ：堤體前趾之揚壓力強度 (t/m^2)

H_d ：設計波高 (m)

h ：堤前水深 (m)

L ：水深 h 處之示性波波長 (m)

ω ：海水單位體積重量 (t/m^3)

(ii) 堤頂低產生越波時

結構物之頂端低會產生越波時，結構物之全部均受浮力作用，而揚壓力則已包含在浮力中。

(b) 伊藤計算公式

計算合成堤直立部滑動量的期待滑動量公式，係伊藤依據不規則波的滑動試驗結果，將由重複波至碎波連續之波高與波壓關係，以式 3-3-14 表示 (如圖 3-3-7)。

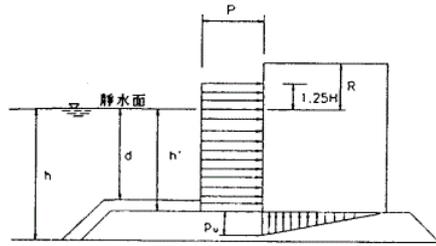


圖3-3-7 波壓及揚壓力之分佈

$$P=0.7 \omega_0 \quad (H/d \leq 1)$$

$$P=\left\{0.7+0.55\left(\frac{H}{d}-1\right)\right\} \omega_0 H \quad (H/d > 1) \quad (3-3-14)$$

式中

P ：波壓強度(平均分佈)以及前趾之揚壓力強度(三角形分佈)(t/m^2)

ω_0 ：海水單位體積重量(t/m^3)

H ：堤體設置位置之波高(m)

d ：堤基上之水深(m)

本計算式中設計所採用之波高 H 為最大波高 H_{max} ，其與合田式之 H_{max} 之取法相同但由(3-3-14)式之第2式可知，堤基上之水深 d 小而波高很大時，波壓強度將會顯著變大，在 $d=0$ 之極端情況，將成無限大，因此在適用時應注意。此外式(3-3-14)為根據波向為直角時之試驗結果，而伊藤之原始論文對波向之修正並未提及，但亦有對式(3-3-14)之右邊第二項乘以 $\cos^2\beta$ 修正波向。

III. 衝擊碎波力

當衝擊波有可能發生時，原則上以水工模型試驗進行檢討。對於有可能產生強大衝擊波壓的斷面形狀及構造應儘可能避免採用，在海底坡度較陡無法避免之時，應加上適當之消波塊以緩和波力之作用。

(i) 衝擊波壓之特性

衝擊碎波作用時之最大波壓，隨著條件可達波高相當之靜水壓($1.0W_0H_d$)之數倍至數十倍，此已由模型試驗等顯示出。但僅管如此，其作用時間很短，為局部性，只要條件稍微變化其變動亦很顯著。另外，由於為衝擊性之緣故，隨著結構物之力學特性對安定性或構材應力之效果亦不同，因此，對衝擊波壓無法以一般之計算法求得，須對各個力學條件相對應之模型試驗，對波力進行檢討。

(ii) 衝擊波壓之發生條件

衝擊波壓之發生原因很多，很難加以確定。由各種試驗結果，當結構物法線之垂直線與波向之交角 β 在 20° 以內，同時又有以下之情況時，則易造成衝擊碎波壓。

➤ 海底地形很陡時

當海底坡度較 $1/30$ 為陡時，在直立壁之稍微海側處之相當深海波波形尖銳度在 0.03 以下(包含碎波時)很容易產生衝擊波壓。

➤ 高基礎時

海底坡度雖平緩，但因基礎之形狀亦會導致衝擊波壓，此時除波浪之條件外，若基礎拋石較高，而且前肩寬度相當廣亦或斜坡坡度平緩，在拋石基礎之斜坡面或斜坡肩部附近如有水柱狀之碎波衝擊時會產生衝擊波壓。海底坡度較 $1/50$ 為緩時，若拋石基礎高 h 呈上之水深與設置水深比大於 0.6 時，不會產生強大之衝擊波壓。

(iii) 對策工法

若強大之衝擊波壓作用於直立壁時，其前面投入消波塊加以保護，將使作用波力顯著減小。特別為高基拋石基礎時，若有充分之消波塊加以保護可防止衝擊波壓之發生，另外，直立堤採用適宜之消波沉箱，或斜面沉箱等異型沉箱，有時亦可避免衝擊波壓之作用。

(iv) 以模型試驗檢討波力

以模型試驗進行衝擊波壓的檢討，須考慮衝擊波壓對結構物之反應特性。如直立堤整體之安定性，須以堤體之滑動試驗來檢討，胸牆等構材強度則以應力測定實驗檢討。

IV. 作用於消波塊覆蓋堤的波力

作用於消波塊覆蓋之直立壁的波力，隨著消波塊之頂高、寬度、消波塊之特性等而變化，故應以水工模型試驗亦或迫切地計算法加以計算。

(i) 直立壁前方投入消波塊等設置消波設施時，作用於堤體之波力將產生變化，其變化程度，除隨來襲波之特性外，更依消波設施之頂高、寬度、消波塊之種類、填充石之有無及消波設施，之構造而不同，通常直立堤在重稜波作用時波力之變化並不大，但在強大的衝擊波壓作用時，隨消波塊之覆蓋，波力將有相當程度之減少，但儘管如此，僅在消波塊有充分之寬度與頂高時，波力方有減小效果。特別於消波塊之頂部較設計潮位低時，經常會使波力增大，此點須注意。

(ii) 消波塊充分覆蓋直立壁時之波力計算式由於作用於消波塊充分覆蓋直立壁之波力，隨

消波塊之構造而變化，因此，應依模型試驗加以計算為原則。若消波塊之頂端與直立壁之頂高相同，且波浪作用時亦能確保消波塊之安定，則作用於直立壁之波力，可依以下修正合田式加以計算(如圖 3-3-8)。

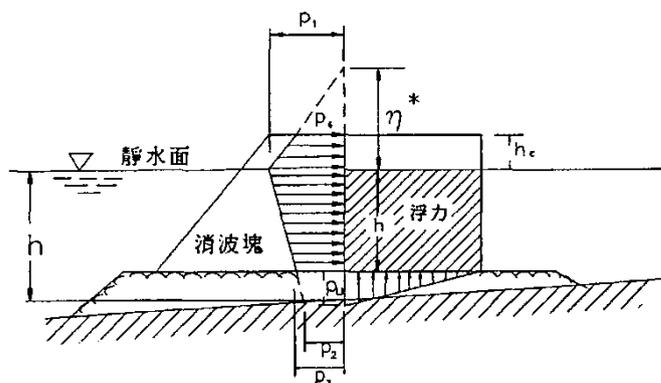


圖 3-3-8 消波塊充分覆蓋時之波壓分佈

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.75(1 + \cos\beta)\lambda H_d \\ P_l &= 1/2(1 + \cos\beta)\lambda\alpha_1 \cdot w_0 H_d \\ P_u &= 1/2(1 + \cos\beta)\lambda\alpha_1\alpha_3 w_0 H_d \end{aligned} \quad (3-3-15)$$

式中：

η^* ：靜水面上波壓強度為 0 之高度(m)

P_l ：靜水面之波壓強度(t/m^2)

P_u ：底面前趾之揚壓力強度(t/m^2)

β ：直立壁法線之垂直線與波浪主方向
±15°範圍內最危險方向所成角度

λ ：因消波塊覆蓋之波壓遞減率

α_1 ：式(3-3-5)之係數

α_3 ：式(3-3-6)之係數

w_0 ：海水單位體積重量

H_d ：設計波高(最高波高 H_{max} (m))

消波塊覆蓋所致波壓遞減率 λ ，為隨覆蓋之程度及波浪條件而決定之係數，對於消波塊充分覆蓋時之直立壁安定性等之檢討，一般採用 $\lambda=0.8$ 者為多，但斜坡堤上部工，直立堤之底面在靜水面附近時， λ 之值隨週期會有較大之變化，週期較長時須注意亦有 $\lambda=1.0$ 之情形

(iii) 森平式

當消波塊充分覆蓋時，而且示性波在碎波帶受碎波之影響而減小時，亦可使用以下森平等所提之方法。式(3-3-16)之平均波壓強度為由直立堤之底部至靜水面上 $1.0H_{1/3}$ 或直立壁頂端二者較低者為準 (國 3-3-9)

$$P=1.0 w_0 H_{1/3} \quad (3-3-16) \text{ 式中：}$$

P ：作用於消波塊覆蓋時之直立壁的平均波壓強度(t/m^2)

w_0 ：海水單位體積重量(t/m^3)

$H_{1/3}$ ：設計示性波高(m)

揚壓力為包含於作用於堤體之浮力中。但如頂高較 $1.0H_{1/3}$ 為高時，對揚壓力之估算可能偏高。對於斜向入射波之波力，可以式(3-3-17)計算

$$P=1.0 w_0 H_{1/3} \cos\beta \quad 0 \leq \beta \leq 45^\circ$$

$$P=0.7w_0 H_{1/3} \quad \beta > 45^\circ \quad (3-3-17)$$

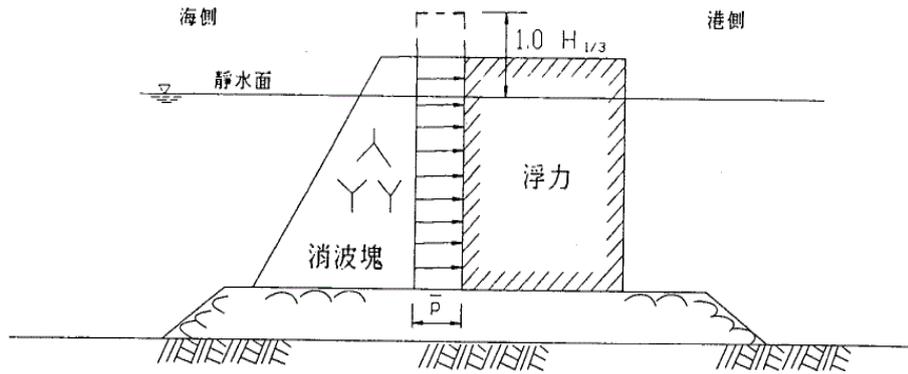


圖 3-3-9 消波塊充分覆蓋時之波壓分佈(森平式)

V. 作用於直立消波塊堤之波力

作用於直立消波塊堤之波力同作用於直立消波沉箱之波力。

(i) 作用於直立消波塊堤之波力，如圖 3-3-10，浮力為考慮靜水時之排除體積。作用於直立消波塊各段以及上部結構之揚壓力為考慮、堤體前面揚壓力計算面位置為與波力強度相等之強度，堤體後端為 0 之三角形分佈。

(ii) 斜向入射波之波力減小效果，特別在未有試驗驗證時，不予考慮。

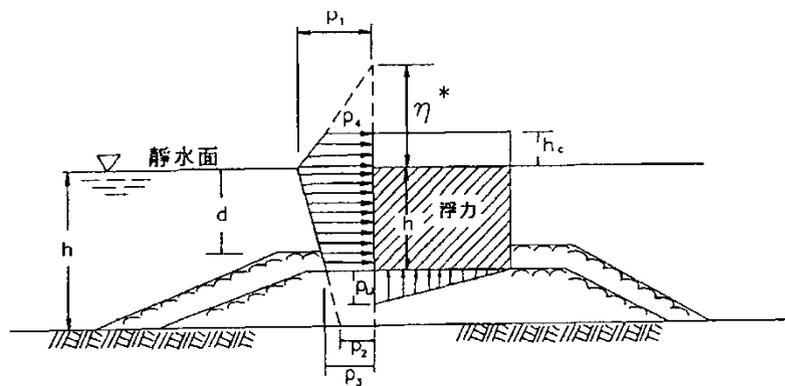


圖 3-3-10 安定檢討時之波壓分佈

VI. 作用於直立消波沉箱之波力

作用於直立消波沉箱之波力由於隨消波部之構造而變化，因此應依水工模型試驗或適當的計算式加以計算。

(i) 作用於直立消波沉箱之波力

作用於直立消波沉箱之波力與一般的直立堤相同，除隨波浪、潮位、水深、海底地形、拋石基礎形狀等而變化外，並依消波部之構造，產生複雜之變化，無法以一般計算法加以確定，因此結構物除充分可信賴之計算法以外，必須依各個條件進行水工模型試驗加以檢討，此時除安定性之檢討所用之波力外，作用於構材之波力亦須充分加以檢討，另外，消波室中有上封版及無封版時波力之發生形態亦異，須予以注意。

(ii) 消波室中無上封版時，安定性檢討所用之波力

作用於直立消波沉箱之波力，隨消波部之構造條件而不同，因此甚難加以統一規定，消波室中無上封版時，安定性之檢討所使用之波力，可將合田式加以修正而使用(如圖 3-3-11)。

$$\begin{aligned}\eta^* &= 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_1 H_d \\ P_1 &= 1/2(1 + \cos\beta)(\alpha_1 + \\ &\lambda_2 \alpha_2 \cos^2\beta)\lambda_1 \times w_0 H_d \\ P_u &= 1/2(1 + \cos\beta)\lambda_1 \alpha_1 \times \alpha_3 \times w_0 H_d\end{aligned}\quad (3-3-18)$$

式中

η^* ：靜水面上波壓強度為 0 之高度(m)

P_1 ：靜水面上波壓強度(t/m^2)

P_u ：不考慮消波部之沉箱主體部底面前端之揚壓力強度

β : 直立壁法線之垂線與由波浪之主方向上的。範圍最危險方向所成角度

λ_1, λ_2 : 直立消波沉箱之構造等之波壓修正係數

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 同前之靜、數

w_0 : 海水之單位體積重量(t/m^3)

H_d : 設計波高(最高波高 H_{max})

修正係數 λ_1, λ_2 隨結構物給予適宜之值，曲面開孔沉箱之場合 $\lambda_1=1.0, \lambda_2=0$

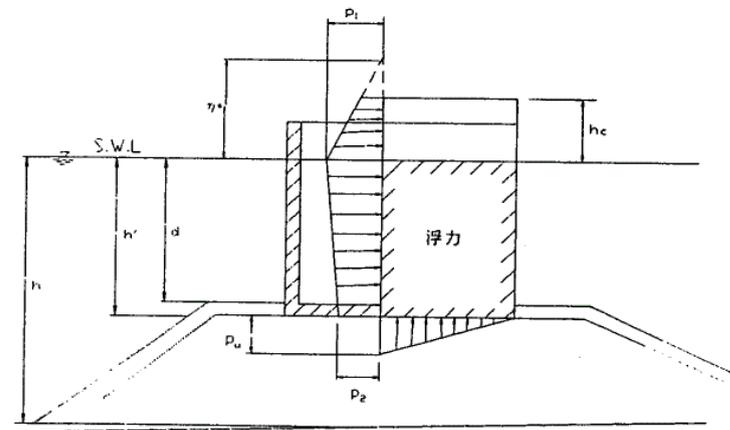


圖 3-3-11 安定性檢討時所用波壓分佈

(iii) 消波室有上封版時安定性檢討所使用之波力

消波室頂部固有上封版而密閉時，由於波浪之作用，上部之空氣被壓縮之瞬間產生衝擊壓，特別在在構材之設計時所採用之波力更應考慮，雖然此衝擊壓可經由開設適當之空氣孔加以減輕，但若閉口部太大，由於波面將會直接作用，反而會使波力變大，此須要注意。

VII. 作用於上部斜面堤之波力

作用於上部斜面沉箱堤之波力，應依水工模型試驗或適當地計算式加以計算。作用於上

部斜面堤之波力，原則上以水工模型試驗決定，若有困難時，可以下法求出。(如圖 3-3-12)

$$\text{水平成分波力 } P_h = P_1 + P_2 \sin^2 \theta \quad (3-3-19)$$

$$\text{垂直成分波力 } P_v = 1/2 P_2 \sin 2\theta$$

式中

P_1 ：以合田波壓式所計算作用於上部斜面沉箱堤之下部直立部之波力。

P_2 ：以合田波壓式所計算作用於投影於上部斜面垂直部之波力。

θ ：斜面部之坡度。

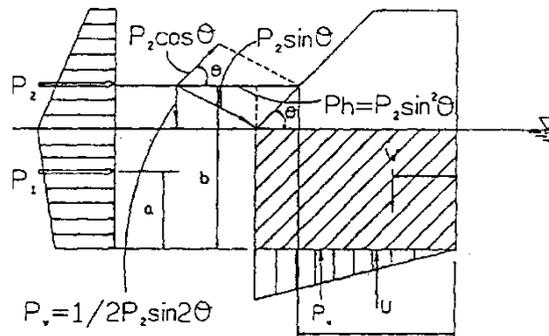


圖 3-3-12 作用於上部斜面沉箱堤之波力

VIII. 考慮法線形狀影響之波力計算

對波向而言法線成凹狀時，須考慮計算入反射波相互干涉所致波力之增大。此時，進行波之波高，須乘上受法線形狀之影響的增加率作為設計波高。

(i) 法線形狀所致波高變化與蛇行災害

通常法線不連續時，由於波浪之反射以及繞射效果，將使沿法線之波高分佈成不一致，伊藤、谷本就受災防波堤之滑動狀況大多呈波狀分佈，而稱此為蛇行災害，其原因之一為沿法線之波高分佈不同，影響作用波力。像此種波高

之局部變動傾向，特別對有凹狀之隅角之法線特別顯著。

(ii) 考慮法線形狀影響的波力計算法

目前為止考慮法線形狀影響之波力計算法尚無完整成果，應依條件以模型試驗加以檢討。但由於波力之增大與法線形狀之波高增大有相當之對應關係，因此如式(3-3-20)，設計波高應隨影響之程度予以比例增加，而波力計算則依合田式即可。

$$H'_d = \min \{ K_c H_d, K_{cb} H_b \} \quad (3-3-20)$$

式中：

H'_d ：考慮、法線形狀之影響，計算波力時之波高

K_c ：法線形狀之影響所致波高增大率

$$K_c \geq 1.0$$

K_{cbL} 碎波臨界波高之增大率極限值

$$K_{cb} \cong 1.4$$

H_d ：未考慮法線形狀影響時之設計波高

H_b ：示性波高 5 倍距離海側處之碎波臨界波高(m)

式(3-3-20)之波高增大率 K_c ，一般可以式(3-3-21)表示，在波浪不破碎之條件下，根據沿法線之重複波高之分佈加以決定。

$$K_c = H_s / \{ H_i (1 + K_r) \}$$

式中：

H_s ：堤前之波高(m)

H_i ：入射波高(m)

K_r ：堤之反射率

此時，以規則波來處理沿法線之波高增加率將會有很顯著地變動結果，另外隨入射波的週期或入射方向，會有敏銳之影響，因此須考慮過期以及入射方向之不規則性。但如此求得之 K_c 值會沿法線變動，亦會產生 $K_c < 1.0$ 之值，故不能因此而將設計波高加以打折。

式(3-3-20)右邊第 2 項為考慮法線形狀之影響，使波高增大受水深限制之影響碎波臨界波高 H_b ，當最大波高受碎波之影響範圍內有直立堤時，可以採用碎波中考慮波浪之不規則性之碎波變形之最大波高 H_{max} 即可，若較為海側時，則採規則波之碎波指標之值即可。碎波臨界波高之增大率之桂限 K_{cb} 值仍未充分了解，但依以往之試驗成果取 1.4 即可。

3.3.2 靜水壓

堤內外之靜水面有高差時，應考慮相當於水位差之靜水壓。

3.3.3 浮力

靜水面以下之堤體應考慮、浮力，另外，堤內外之靜水面有高差時，將兩側之水位相連，浮力為作用於該連線水面以下之堤體。

3.3.4 自重堤體之自重

以假設斷面各材料之單位體積重量加以計算。

3.3.5 地震力

地震時之動水壓，以考慮堤體之傾覆以及基礎承载力之安定計算時為標準。

1. 地震時之動水壓，依下法計算。

在水中之結構物及結構物內部部份空間或全部盛以水時，須考慮地震時的動水壓力。

- (1) 動水壓力之計算，須考慮結構物之特性，結構物之剛性，整體之安定條件等。
- (2) 結構物內部空間盛以液體時，須考慮該液體之動態壓力。
- (3) 現在所用的動水壓力計算法係依據定常振動所求得之動水壓力。若考慮其他外力等之相位關係時，設計上須採用不規則振動求取其動水壓力。

2. 作用於堤體之動水壓力

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} K \omega_o \sqrt{hy} \dots\dots\dots(3-3-22)$$

- 上式中 P_{dw} : 作用於堤體前之動水壓力(t/m²)
 K : 震度
 ω_o : 水之單位體積重量(t/m³)
 y : 水面至欲求動水壓力點止之深度(m)
 h : 堤體前面之水深(m)

另外，動水壓之合力以及作用位置可依(3-3-23)式加以計算

$$P_d = \pm \frac{7}{12} K \omega_o h^2 = \left(\int_0^h \frac{7}{8} K \omega_o \sqrt{hy} dy \right) \quad (3-3-23)$$

$$h_d = \frac{3}{5} h$$

- 上式中 P_d : 水壓力之合力(t/m)
 h_d : 水面至動水壓合力作用點之距離(m)

3.4 安定計算

3.4.1 直立部之安定計算

直立堤之堤體、合成堤之直立部、斜坡堤之上部結構、消波塊覆蓋堤之直立部等之滑動、傾覆及底面承载力之檢討應以滑動之安全率，在波壓作用時 1.2 以上，地震時 1.0 以上為標準；另外，傾覆之安全率在波壓作用時為 1.2 以上，地震時為 1.1 以上為標準。

以模型試驗能確認堤體之安全時，滑動之安全率小於 1.2 亦可。

1. 滑動

堤體之滑動檢討必須滿足下式：

$$F \leq \frac{fW}{P} \dots\dots(3-4-1)$$

上式中

W ：作用於堤體之垂直合力(t/m)

p ：作用於堤體之水平合力(t/m)

f ：堤底與基礎之摩擦係數

F ：安全係數，平常時 1.2 以上，地震時 1.0 以上

2. 傾倒

堤體之傾倒檢討必須滿足下式

$$F \leq \frac{Wt}{Ph} \quad (3-4-2)$$

上式中

W ：作用於堤底之垂直合力(t/m)

P ：作用於堤體之水平合力(t/m)

t ：堤體後趾與堤體垂直合力作用線間之距離(m)

h ：堤體底面至水平合力作用線間之高(m)

F ：安全係數，平時為 1.2 以上，地震時為 1.1 以上

3. 基礎承载力之檢討

(1) 作用於堤體之底面反力作用於堤體之底面反力可依下式計算：

偏心距 $e \leq \frac{1}{6}b$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \left(1 + \frac{6e}{b}\right) \frac{V}{b} \\ P_2 &= \left(1 - \frac{6e}{b}\right) \frac{V}{b} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3-4-3)$$

偏心距 $e > \frac{1}{6}b$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{2}{3} \frac{V}{\left(\frac{b}{2} - e\right)} \\ b' &= 3\left(\frac{b}{2} - e\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3-4-4)$$

偏心距 e 由下式求之。

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{b}{2} - x \\ x &= \frac{M_w - M_h}{V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3-4-5)$$

式中：

P_1 ：前端反力(t/m)

P_2 ：後端反力(t/m)

- v : 垂直合力(t)
- H : 水平合力(t)
- e : 全合力之偏心距(m)
- b : 底版寬度(m)
- M_w : 垂直合力對 A 點之力矩(t-m)
- M_h : 水平合力對 A 點之力矩(t-m)

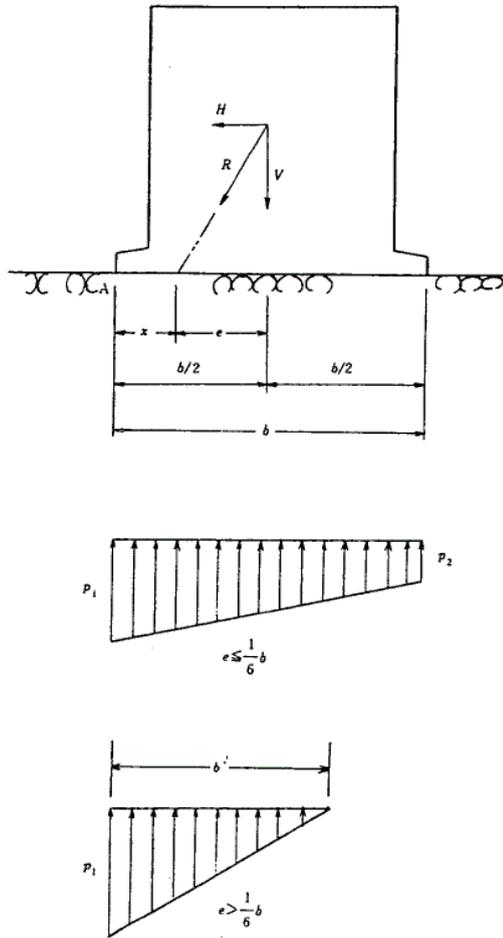


圖 3-4-1 底面反力分佈圖

(2) 礎承載力

(a) 設置於砂質地層基礎之容許承載力，以公式(3-4-6)計算。

$$q_a = \frac{1}{F}(\beta\gamma_1 BN_r + \gamma_2 DN_q) + \gamma_2 D \dots\dots(3-4-6)$$

式中：

q_a ：容許承载力(考慮水中部份所受之浮力)(t/m^2)

B ：基礎之最小寬度(圓形基礎時為直徑)(m)

D ：基礎之設置深度(m)

γ_1 ：基礎底面以下地層土壤之單位體積重量(在地下水位以下者，用浸水單位體積重量)(t/m^3)

γ_2 ：基礎底面以上地層土壤之單位體積重量(在地下水位以下者，用浸水單位體積重量)(t/m^3)

F ：安全係數

重要結構物：2.5 以上其他結構物：1.5 以上

N_r, N_q ：承载力係數(圖 3-4-2)

β ：基礎形狀係數(表 3-4-1)

表 3-4-1 基礎形狀係數

基礎底面形狀	連續形	正方形	圓形	矩形
β	0.5	0.4	0.3	$0.5 \sim 0.1(\frac{B}{L})$

B ：長方形之短邊(m)

L ：長方形之長邊(m)

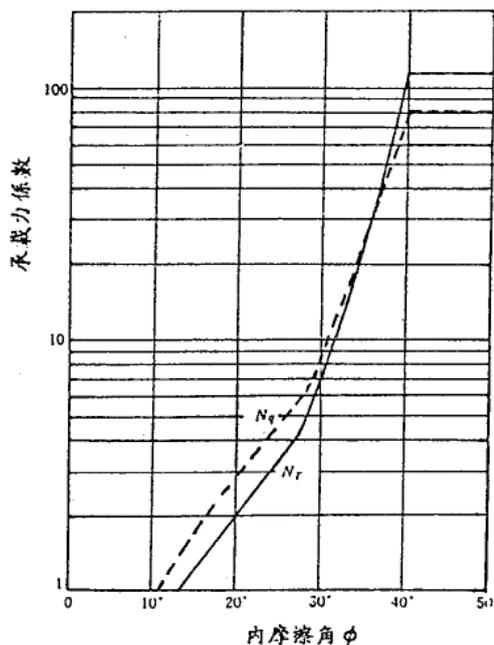


圖 3-4-2 承载力係數

(b) 粘性土壤地層中基礎之容許承載力以公式(3-4-7)求之。

$$q_a = N_c \frac{C_0}{F} + \gamma_2 D \quad (3-4-7)$$

式中：

q_a ：容許承載力(應考慮水中部份所受之浮力)(t/m^2)

N_c ：承載力係數(參照圖 3-4-3)

C_0 ：基礎底面土壤之粘著力(t/m^2)

γ_2 ：基礎底面以上地層土壤之單位體積重量(在地，下水位以下者，用浸水單位體積重量)(t/m^3)

D ：基礎之設置深度(m)

F ：安全係數

重要結構物：2.5 以上

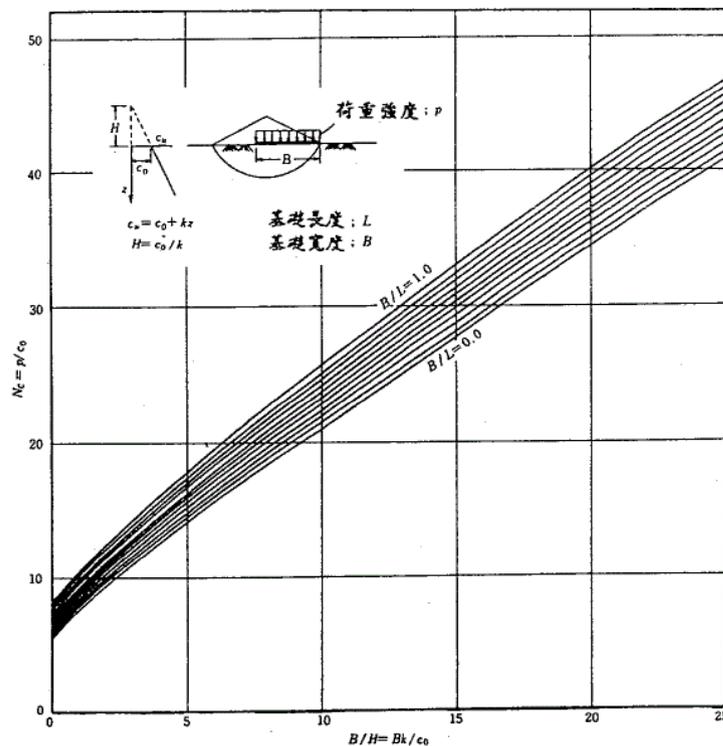


圖 3-4-3 承載力係數 N_c

(3) 承受偏心傾斜載重之基礎承載力

重力式防波堤，受自重、土壓、地震力以及波力等外力之作用，這些合力通常偏心而且傾斜，因此在檢討基礎承載力時，須以偏心傾斜荷重檢討。此時由於

一般之重力式結構物為在基礎地盤上有拋石堤基所形成之複合層構造，因此檢討時須充分反映此特性。以往係採用將各種承载力計算法加以組合進行檢討，但是根據室內模型試驗、現場試驗以及現有防波堤之安定性之綜合解析結果，由於可確定以 Bishop 法之圓弧滑動計算較能將現象予以完整表示，因此目前以此法為準。承受偏心傾斜荷重之基礎承载力檢討，以 Bishop 之圓弧滑動解析為準。但對於其他之計算法，若在相同之設計條件下，可確定有充分之承载力實績時，亦可依該法計算。

(a) Bishop 法之圓弧滑動計算

此法為圓弧滑動計算法中分割法之一種，將在一般圓弧滑動計算中所忽視之分割片間之內力加以考慮，此法與一般之圓弧滑動計算法相比精度較高，但在水平之砂質地盤中，承受垂直荷重作用時，此法之安全率會過大。因此僅在偏心傾斜荷重作用時才採用此法。在此所謂偏心傾斜荷重，為荷重之傾斜率在 0.1 以上者。滑動面之起點為如圖 3-4-4 所示與荷重作用點較近之基礎端相對稱之點，此時作用於堤體底面之垂直荷重如圖 3-4-4(b)(c) 般，將其換算成作用於堤底面前趾與滑動面起點間之等分佈荷重，水平力作用於堤體底面。但是在計算地震時，拋石基礎以及地盤上不考慮地震力，安全率與通常之圓弧滑動計算相同，以剪力抵抗所致之抵抗彎矩與外力以及土之重量所致滑動彎矩之比加以表示。收集現有防波堤之受災以及無受害例加以解析之結果，在波壓以及地震時，以 Bishop 法達到安全率在 1.0 以上的話，可確定拋石基礎以及地盤之安定性。因此此時安全率以 1.0 為標準。但依現場試驗之結果，由於基礎之變形隨時間之進行傾向很明顯，對於長時間作用之荷重可預測其變位將很大，為避免此變位之增加，對受長期荷重作用之碼頭，其安全率以 1.2 為標準。

有關地震時，由於防波堤之災例較少，同時受害之程度亦小，其理由為地震震動方向機率對港內側與港外側作用幾乎相等，而且荷重僅為短期間之作用不致產生太大變位，因此對一般之防波堤，不須進行地震時之承载力檢討，但對於特別在地震時之安定會造成頗大問題之防波堤，能以動態解析進行詳細之檢討較佳。

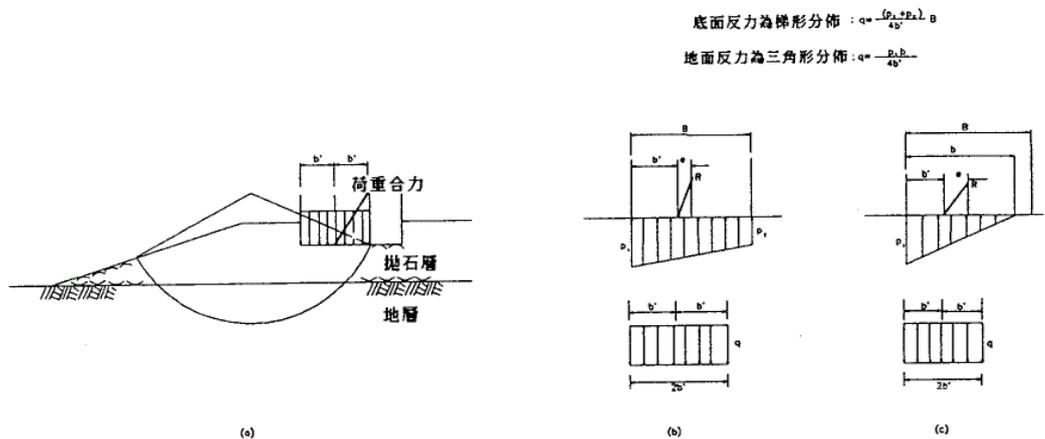


圖 3-4-4 Bishop 法之荷重條件

(b) 以往承载力計算式

以往基礎承载力之計算，為將各種承载力之計算法加以組合進行檢討，其中最具實際者為荷重分散法與三建法之組合，以及荷重分散法與片山、內田法之組合二種。不論何種組合，均為藉調整拋石以及基礎地盤之強度常數而使結構物之特性重現。因此對目前為止無實際之結構物即不適合採用此方法，僅能適用於具充分承载力實際之設計條件時。

(i) 荷重分散法

此為不考慮拋石寬度影響之檢討方法，以往最常被使用於作為複合層地盤承载力之按討時。對其適當寬度之拋石基礎如堤體寬度在 20m 左右範圍時具充分之實績，但是堤體寬度較 10m 小時，可能會有危險之結果。

檢討方法為由二階段所構成，第一階段為檢討拋石基礎上面。首先求取拋石基礎上面之底面反力分佈，並比較此分佈之最大應力度 P_1 與容許底面反力 $q_{ta}(\frac{t}{m^2})$ ，如 $P_1 \leq q_{ta}$ 即可，通常容許底面反力採用 $40 \sim 50t/m^2$ 一定值之例較

多，第二階段進行基礎地盤承载力之檢討，首先為求得基礎地盤上面之荷重分佈，將拋石基礎上面之底面反力分佈以應力加以分散，此方法如圖 3-4-5 所示般分散角度取 30° ，此時基礎地盤上面之荷重分佈成梯形，其最大應力 $P'_1(t/m^2)$ 可由式 3-4-8 求取。

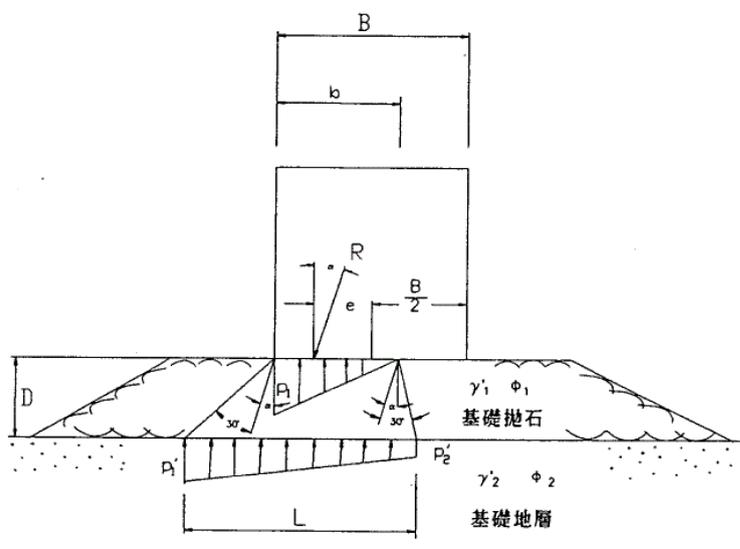


圖 3-4-5 荷重分佈

$$P'_1 = \frac{b}{L} P_1 + \gamma'_1 D \quad (3-4-8)$$

式中：

R：荷重之合力(t/m)

α ：之傾斜角(度)

e：之偏心率(m)

γ'_1 ：：拋石之水中單位體積重量(t/m^3)

D：拋石基礎之厚度(m)

B：拋石基礎上面之堤體寬度(m)

b：在拋石基礎上面之底面反力分佈寬度(m)

三角形分佈： $b = 3\left(\frac{B}{2} - e\right)$ (3-4-9)

梯形分佈： $b=B$

L：基礎地盤上之荷重分佈寬度(m)

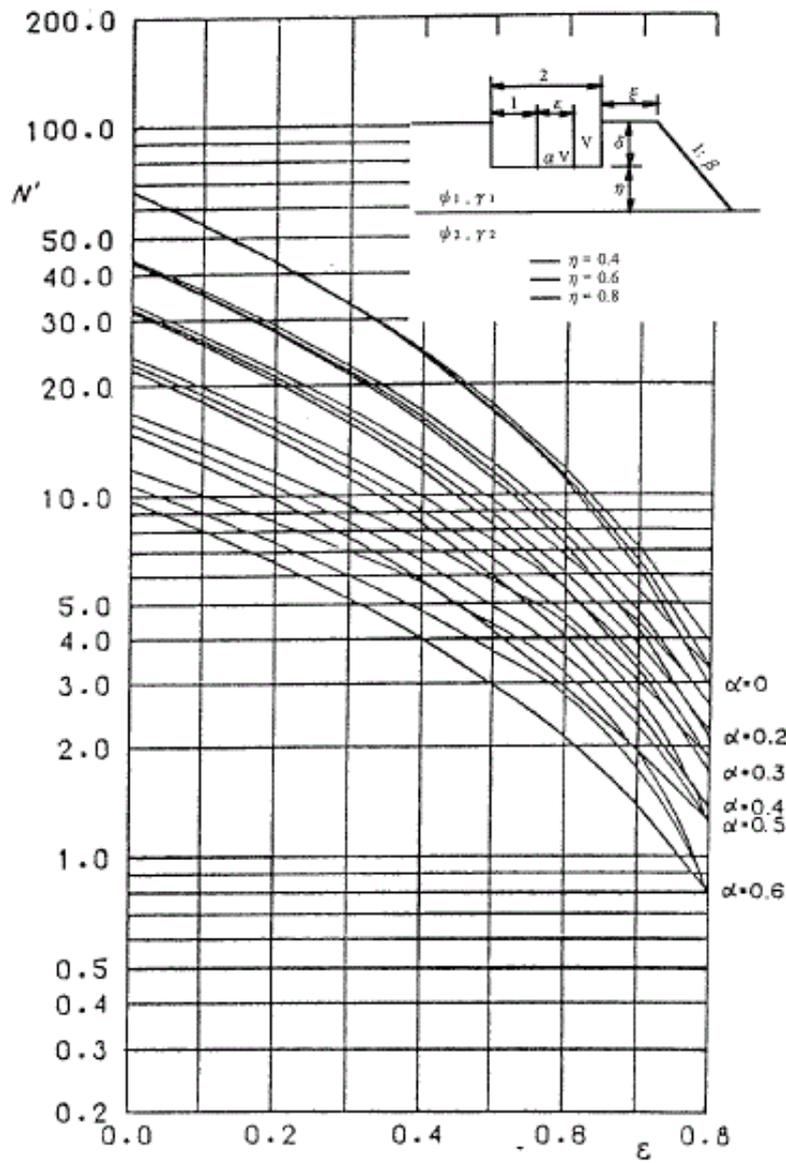
$$L=b+D\{\tan(30^\circ + \alpha) + \tan(30^\circ - \alpha)\} \quad (3-4-10)$$

基礎地盤為砂質土時，將 P_1' 與式(3-4-6)之 q_a 相比較，若 $P_1' \leq q_a$ 則安全，式(3-4-6)計算 q_a 之時，堤體寬度 B 要採用 L，拋石基礎寬度很大之時，基礎之設置深度 D 雖採用拋石厚度 D，但其他場合要忽略設置深度之影響。而且基礎地盤之內部摩擦角 ϕ_2 ，使用與平常土壓計算時相同之值。基礎地盤為粘性土時，採用式(3-4-7)並以同樣之方法加以檢討。以上第一階段與第二階段必須同時滿足才行。另外堤體寬度很大之防波堤，沉箱底面之容許反力亦有採用 q_{ta} 為 $60t/m^2$ 之例。

(ii) 以圓弧滑動計算之方法

此方法為以往日本第三港灣建設局所採用之方法，

如圖 3-4-6(a)所示，假設圓弧滑動面，並以分割法進行圓弧滑動計算。滑動面之起點為對稱於荷重作用點較近端之點，此時作用於堤體底面之垂直荷重如圖 3-4-6(b)(c)般，換算成作用於堤體底面前趾與滑動面始點間之等分佈荷重，此荷重為垂直作用到滑動面為止，水平力作用於堤體底面。另外，此圓弧滑動面之始點，在以上述之假設進行時，可確定較其他以任何點為始點之圓有更小之安全率。地盤之內摩擦角一般採用較通常土壓計算所使用之內摩擦角大 5 之值，安全率則與一般之圓弧滑動計算相同，以剪力抵抗力所產生之抵抗彎矩與外力以及土塊重量所致之滑



$\xi \neq \infty, d \neq 0$
 時之近似式 $N = N'(1+x)$

$\beta = 1.5$ 時	$x = -0.280 - 0.147\alpha - 0.0195\varepsilon - 0.324\eta + 0.0728\xi + 0.669d$
$\beta = 2.0$ 時	$x = -0.292 - 0.120\alpha + 0.0266\varepsilon - 0.288\eta + 0.0682\xi + 0.726d$

$(\phi_1 = 45^\circ, \phi_2 = 45^\circ, \xi = \infty, d = 0, r' = r_2/r_1 = 1)$

圖 3-4-7 片山、內田法承受偏心傾斜荷重之複合層地盤上帶狀基礎之承載力

另外，片山、內田建議採用此法時之內摩擦角採用較通常土壓計算所用之內部摩擦角大 5° 之值，此時安全率在平常時及異常時均為 1.0 以上即可。

3.4.2 堤基部之安定計算

1. 合成堤以及斜坡堤

須檢討堤基部之整體滑動、部份滑動及材料重量。

滑動之檢討以對通過港內側所有之直線滑動面進行(如圖 3-4-8)，滑動之安全率應在 1.2 以上。此時所須考慮、之外力為波力、靜水壓、浮力、自重。

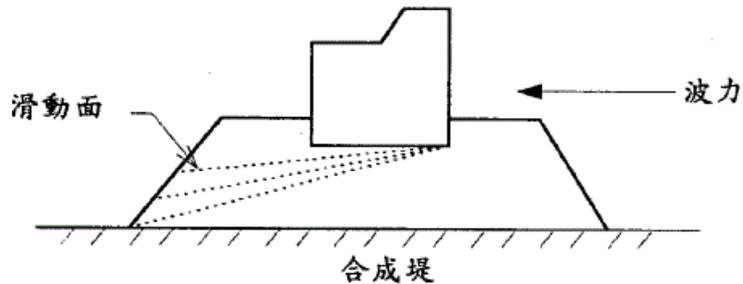


圖 3-4-8 斜坡部之滑動面

當假設直線滑動面時，對直線滑動面之破壞安全率可以式 (3-4-12) 計算(如圖 3-4-9)

$$F = \frac{\sum\{CL + (W' \cos \alpha - P \sin \alpha) \tan \phi\}}{\sin \alpha \sum W' + \cos \alpha \sum P} \dots\dots(3-4-12)$$

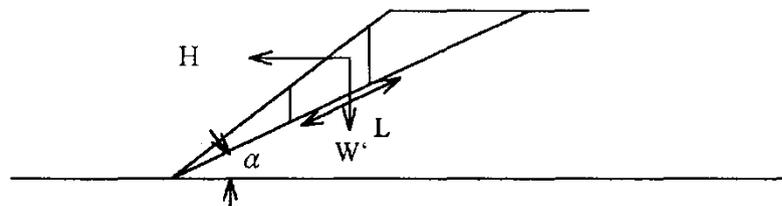


圖 3-4-9 直線滑動面

式中：

F：滑動全率

c：土壤之黏著力(t/m^2)

ϕ ：土壤之內部摩擦角(度)

L：分割片之底邊長(m)

w：分割片之有效重量(水中部份為水中重量)(t/m)

α ：分割片之底邊傾斜度

H：作用於斜面之水平力(水壓、地震力、波壓等)(t/m)直線滑動之安全率，以平時 1.2 以上，地震時 1.0 以上為標準

2. 覆蓋塊石所需重量以及層厚

覆蓋塊石除應對波力有充分安全之重量外，並應有使內部材料不被吸出之厚度。

覆蓋層非為亂拋，而為整放及砌石之時，可由主管工程師之判斷加以決定所需重量，亂拋時，層厚以 2 層為標準。(1)斜坡堤之覆蓋材料所需重量，可依 Hudson 公式計算求出。

受波力作用之斜坡面結構物之表面斜坡，護坡塊石或型塊所需重量可依式(3-4 國 13)加以計算。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \dots\dots\dots(3-4-13)$$

式中：

w：拋石亦或混凝土塊之最小重量(t)

γ_r ：塊石或混凝土塊之空中單位體積重量(t/m³)

S_r ：塊石亦或混凝土塊對海水之比重 $S_r = \gamma_r / \gamma_w$

α ：坡面與水平面之角度

γ_w ：海水之單位體積重量(t/m³)

H：設計波高，為構造物設置水深處之示性波高($H_{1/3}$)

K_d ：依覆蓋材及破壞率所決定之係數。但是對在靜水面下 1.5H 深之覆蓋石可以採用比式 3-4-13 為輕之重量。(如圖 3-4-10)

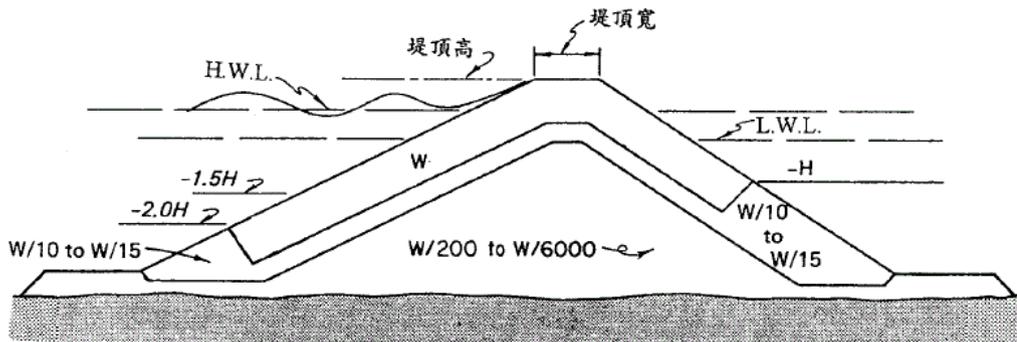


圖 3-4-10 斜坡堤標準斷面

(1) 設計波高

由於本計算式為根據規則波之試驗結果所提出者，因此，對於實際之不規則波之作用適用性，究竟應使用何種

波高即為一問題，但在拋石抑或型塊所構成之結構物中，並非由不規則波群之最高波 H_{\max} 之單一波之作用而導致破壞，而係由大小波浪之連續作用而逐漸形成破壞，此與以往之實績相比較，Hudson 式之波高 H ，應代表不規則波群之規模。因此應採用坡面設置位置之示性波高為準。但當水深在相當深水波高之 0.5 倍以下時，可以使用相當深水波高之 0.5 倍水深處之示性波高。

(2) K_d 值及破壞率

係數 K_d 在 Hudson 式中為表示拋石或型塊之種類、堆積方式、波浪特性等之影響係數，其值隨這些因素而變化，同時隨容許破壞程度亦會不同。因此，設計採用之 K_d 值，須根據模型試驗之結果加以適當決定。但在採用示性波相對應之規則波的試驗結果與不規則波試驗結果相比較時，不規則波之作用較規則波較具破壞之傾向，因此試驗應以不規則波進行。破壞率為在充分之作用時間內，目標區域內之石塊或型塊之移動總數或傾覆個數之百分比，表 3-4-2 為美國陸軍工程兵團海岸工程研究中心(CERC)之 1984 年版之各種覆蓋材之 K_d 建議值。圖 3-4-11 為 Hudson 公式之護坡材料重量計算圈。圖 3-4-12 為對單位體積重量不同之材料所應考慮之修正係數。至於目前在日本，根據實際港灣工程所採用之 K_d 值(堤身部)加以整理如表 3-4-3。由於不考慮堆放層數或堆放方式，以及不區分碎波及非碎波，因此即使是同一種混凝土塊其 K_d 值有一適用範圍。

(3) 堤頭部重量之加成

由於堤頭部承受各方向來襲之波浪，所以斜坡覆蓋材往背面傾覆翻倒之危險較大，因此，堤頭部所使用之拋石及混凝土消波塊須使用較 Hudson 式計算值為大之重量。

雖然 Hudson 建議堤頭部拋石應增加 10%、混凝土塊增加 30% 之重量，但此種程度依然不足，至少須使用較 Hudson 式之重量大 1.5 倍之拋石以及混凝土塊。

(4) 水面下覆蓋材重量

由於斜坡堤水面下波浪作用較弱，因此在靜水面下 $1.5 H_{\frac{1}{3}}$ 以

下處可使用重量較小之覆蓋材。

(5) 對波向之修正

有關波向之影響檢討例較少，尚未充分了解，故除以試驗加以確認者外，通常對波向不加以修正。

(6) 混凝土塊之強度

異型混凝土塊除對設計波之作用須確保所要之重量外，型塊本身亦須有充分之結構強度。

(7) 暗礁上消波塊之安定性

暗礁上消波塊之安定性受暗礁、斜坡寬度之距離以及暗礁土之水深等之影響很大，因此須充分考慮而設計。

表 3-4-2 各種塊石及混凝土塊之 K_d 值

名稱	層數	堆積法	堤身		堤頭		坡度 $\cot \theta$
			Kd		Kd		
			碎波	未碎波	碎波	未碎波	
塊石							
圓滑塊石	2	亂拋	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5~3.0
圓滑塊石	3	亂拋	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5~3.0
菱角塊石	2	亂拋	2.0	4.0	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2.0
					1.3	2.3	3.0
菱角塊石	>3	亂拋	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5~3.0
菱形塊及 (Tetrapod) 四角塊 Quadripod	2	亂拋	7.0	8.0	5.0	6.0	1.5
					4.5	5.5	2.0
					3.5	4.0	3.0
鼎形塊 (Tribar)	2	亂拋	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
					7.8	8.5	2.0
					6.0	6.5	3.0
鼎形塊	1	整砌	12.0	15.0	7.5	9.5	1.5~3.0
道拉斯塊 (Dolos)	2	亂拋	15.5	31.8	8.0	16.0	2.0
					7.0	14.0	3.0
修飾方塊 (Modified cube)	2	亂拋	6.5	7.5	-	5.0	1.5~3.0
六腳塊 (Hexapod)	2	亂拋	8.0	9.5	5.0	7.0	1.5~3.0

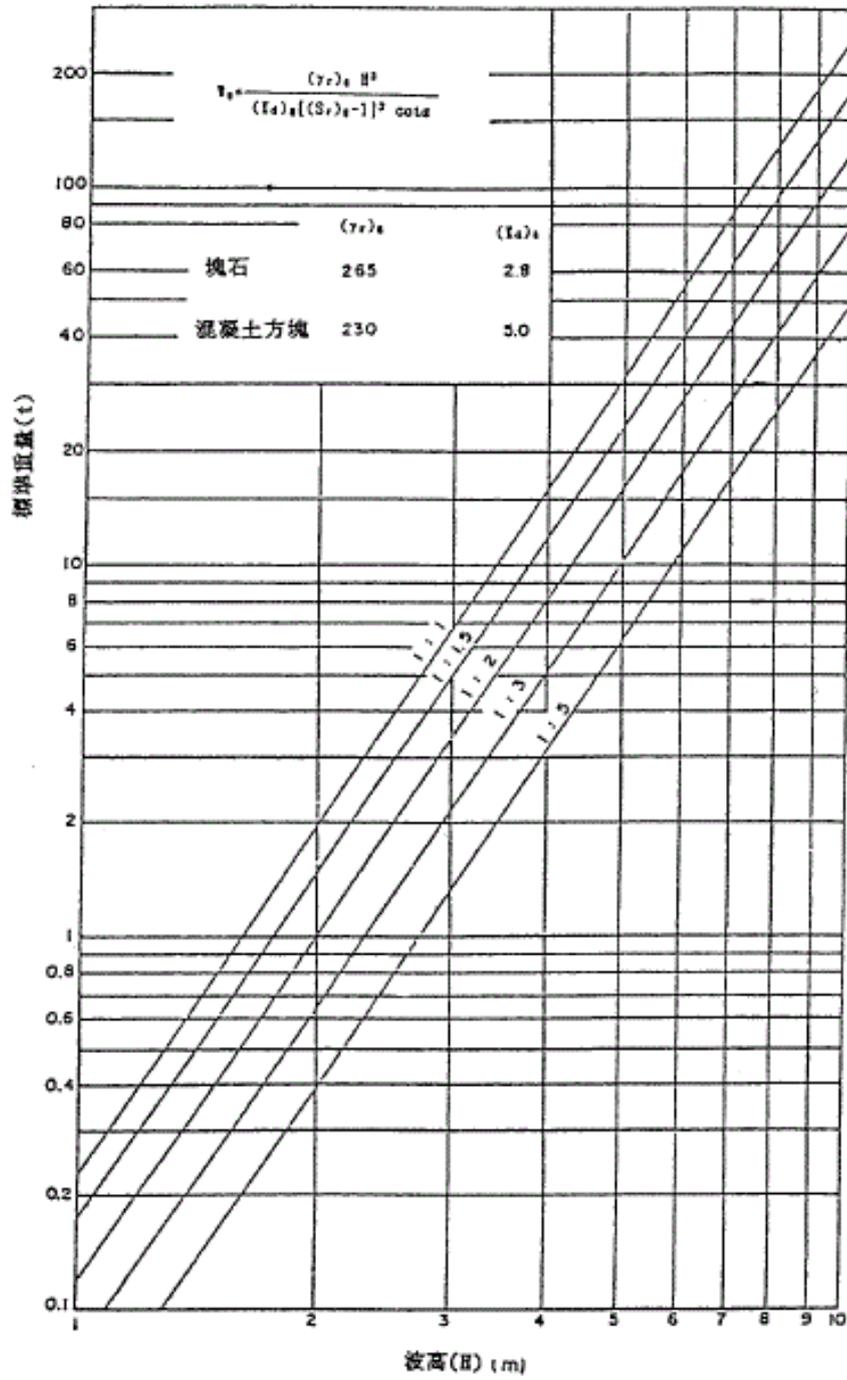


圖 3-4-11 護坡塊重量計算圖

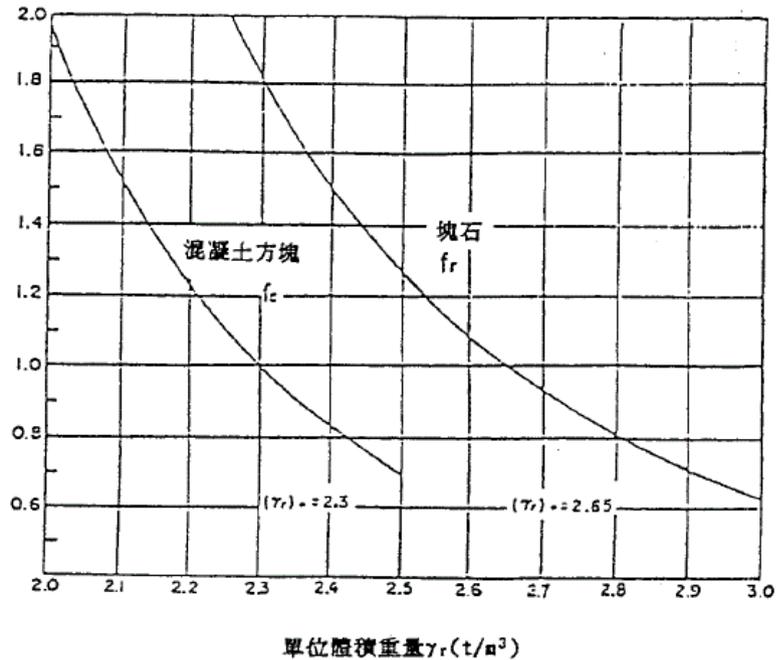


圖 3-4-12 護面塊重量計算圖(比重修正係數)

表 3-4-3 日本使用之消波塊 K_d 值

名稱	K_d 值範圍
中空三角形塊	7.6
菱形塊	7.2~8.3
道拉斯塊(Dolos)	20.0~22.0
六腳塊	7.2~8.1

(8) 頂端高程低的斜坡堤之安定性

背後無壁面之支撐，而且堤頂高程低之斜坡堤之消波塊，頂端面特別於背後側之消波塊容易破壞須特別注意。

(a) 陡坡上之消波塊的安定性

海底坡度陡同時又有呈卷狀之碎波時，隨消波塊之形會有強力之波力作用，須將此加以考慮，而進行適宜之檢討。

(b) 合成堤拋石基礎之覆蓋石以及方塊所需重量

合成堤拋石基礎覆蓋材為維持安定所需之重量，依波浪因素及設置水深、拋石基礎厚度、前肩寬、斜坡坡度等

之基礎形狀、覆蓋材之種類及堆積方式等而不同，特別在波浪因素與拋石基礎形狀對 Hudson 式之影響甚為顯著，應將此加以考量，須以符合條件之模型試驗結果亦或根據合適之計算式加以計算，亦須充分注意波浪之不規則性影響。

合成堤之拋石基礎覆蓋材所需重量可依式(3-4-14)加以計算。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (3-4-14)$$

式中：

w：石塊或混凝土塊所需重量(t)

rr：石塊或混凝土塊之空氣中單位體積重量(t/m³)

S_r：石塊或混凝土塊對海水之比重 S_r=r_r/r_w

H：設計波高

N_s：因波浪條件、拋石基礎形狀、覆蓋材之特性等而決定之安定係數。通常應依條件而以模型試驗加以決定，或以圖 3-4-13 或由 Tanimoto 公式估算之。

$$N_s = \max \left\{ 1.8, 1.3 \frac{1-k}{K^{1/3}} \frac{h'}{H^{1/3}} + 1.8 \exp \left[1.5 \frac{(1-k)^2}{K^{1/3}} \frac{h'}{H^{1/3}} \right] \right\}$$

$$K = \frac{\frac{4\pi h'}{L'}}{\sinh\left(\frac{4\pi h'}{L'}\right)} \sin^2\left(\frac{2\pi B_1}{L'}\right)$$

其中

h'：塊石所在位置水深

L'：為在h'處之波長

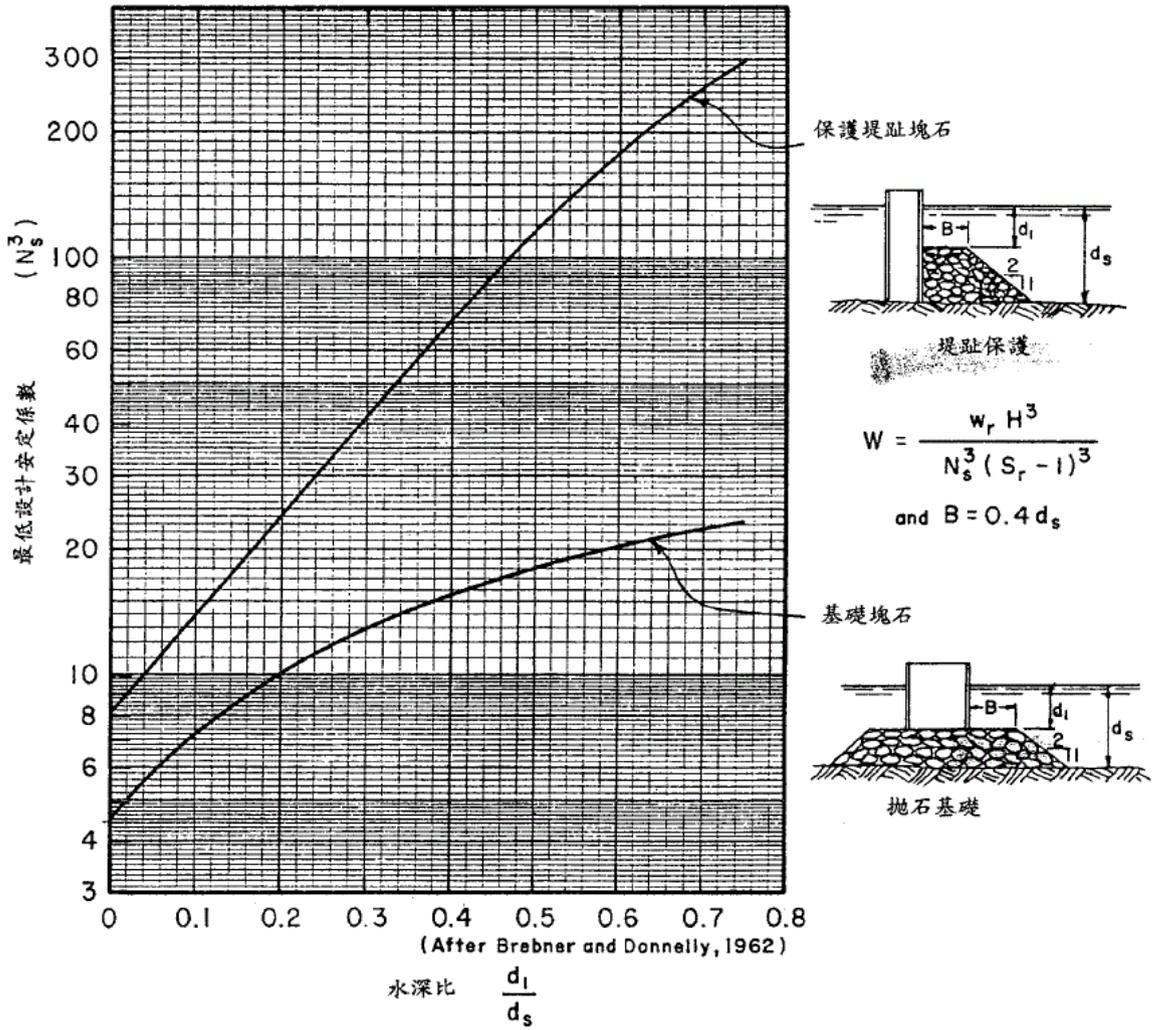


圖 3-4-13 護基以及拋石基礎覆蓋石之安定係數

此公式為在作坡面覆蓋材之安定性檢討時，所使用之公式。依美國陸軍工程兵團海岸工程研究中，BrebneL&Donnelly 將其作為直立堤之拋石基礎所需重量計算之基本式後被廣泛地使用。由於在理論上之驗證具有相當程度之可靠性，因此可以此式作為計算合成堤拋石基礎覆蓋材所需重量之計算。但安定係數 N_s 隨水深、波浪條件、拋石基礎形狀、覆蓋材之特性等而不同，因此須依條件以模型試驗等加以決定，另外，設計計算所使用之波高通常為示性波高，模型試驗應以不規則波來作。

3. 內部材料所需重量

合成堤覆蓋材下之拋石及型塊所需重量，以覆蓋材重量之 $1/20$ 以上為原則，其下之石塊重量，則再為其 $1/20$ 以上為原則。但斜坡堤應在 $1/10 \sim 1/15$ 以上為佳。

3.4.3 堤體整體之安定計算

在軟弱地層上構築防波堤時，須對堤體進行圓弧滑動以及沉陷之檢討，若不安定時，則進行地層改良等對策。

1. 圓弧滑動之安全率

在不受波壓作用時為 1.3 以上，受波壓作用時為 1.0 以上為準。另外，對受波壓時之圓弧滑動，若能以 Bishop 法確認偏心傾斜載重之安定性時不必檢討。

2. 堤體整體安定計算所採用之潮位，為其安全率最小時之潮位。

3. 沉陷量

雖然防波堤即使發生沉陷對其功能並無影響，但在現實上，因返復荷重所致之殘留變位之累積，會產生較大之不均勻沉陷危險，將導致堤體之損傷，因此依需要應進行沉陷之檢討。基礎地層僅由砂層構成，雖會有瞬間沉陷，但此種沉陷大多為在施工中所發生，而基礎地層存在粘土層時，完成後因壓密沉陷將持續慢慢進行，不論如何，當結構物為大型時，沉陷亦將變大，將損害結構物之功能，

特別隨沉陷，結構物之傾斜太大時，此種傾向更強，瞬間沉陷所致構造物之傾斜量，可以假設地層之彈性係數，將地層當作彈性體來檢討，壓密沉陷所

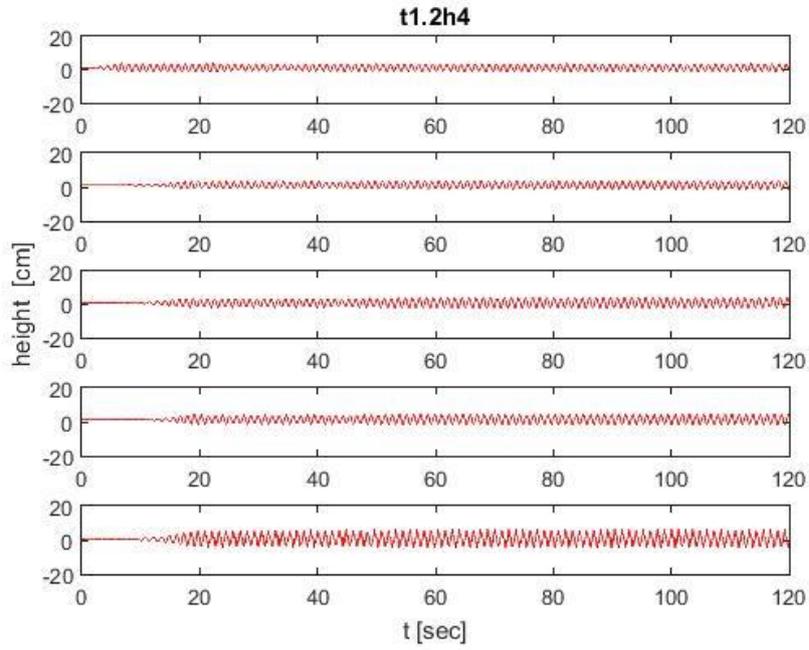
致構造物之傾斜量應依壓密理論之計算法加以檢討，另外為進行詳細之解析時，可用有限元素法進行數值解析。

3.4.4 堤頭、轉角處之安定計算

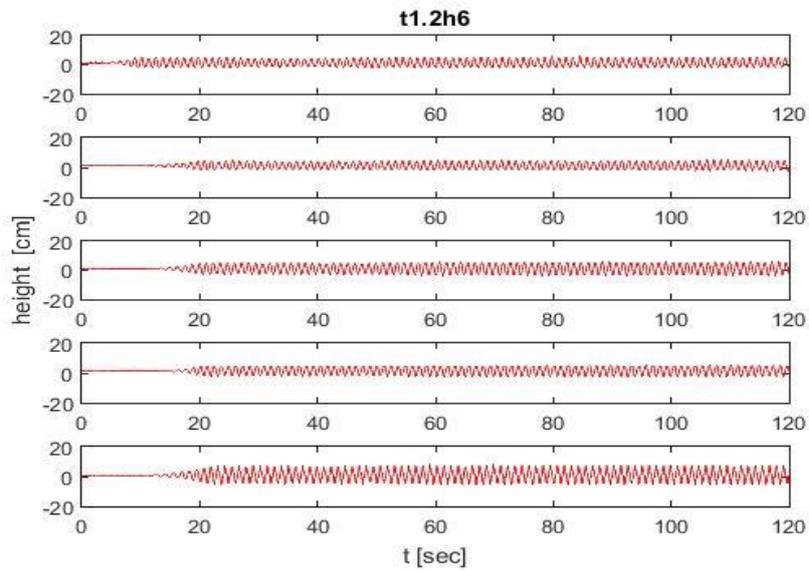
1. 堤頭之消波塊以及覆蓋方塊應較堤幹部之覆蓋材料重量為大。直立堤或合成堤之堤頭部與堤幹部相比，由於基礎之沖刷與作用之波力仍有不明之處，覆蓋材之重量，最好採用較堤幹部為大。另外，斜坡堤或消波塊覆蓋堤之堤頭應採用較堤幹部大 1.5 倍以上之覆蓋材構築成圓形。
2. 在軟弱地層亦應檢討防波堤法線方向之滑動。此時，可考慮側向摩擦抵抗，但安全率以 1.3 以上為標準
3. 堤頭設置燈塔時須就作用之地震力、波力以及風壓力進行安定計算。堤頭部設置燈塔時，應使燈塔設置後堤體仍屬安全。另外為維持燈塔之功能，亦應考慮設置必要之附屬設施。
4. 轉角處之設計時，須考慮波高之增大。

在轉角處之直立堤、合成堤之法線形狀，除能使波浪集中外，由法線各方來之反射波之重合，使周邊之波高增加，亦有造成受害之例，因此在決定法線形狀以及安定計算時，須充分檢討。

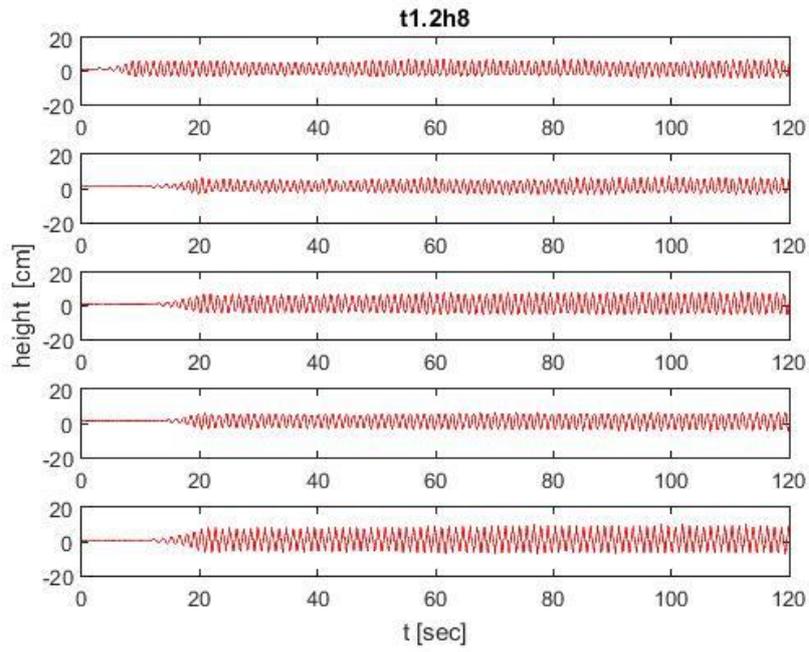
附件二 波高圖



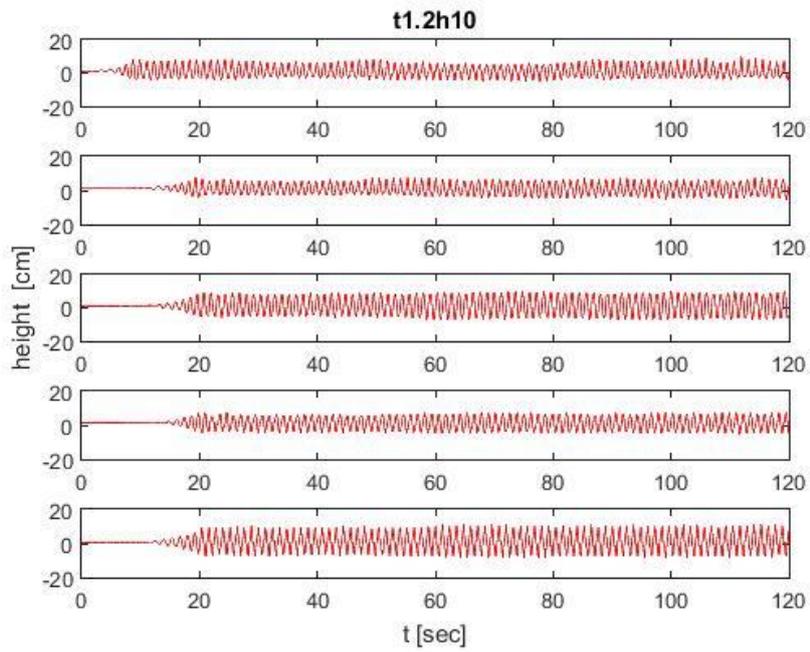
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 波高圖



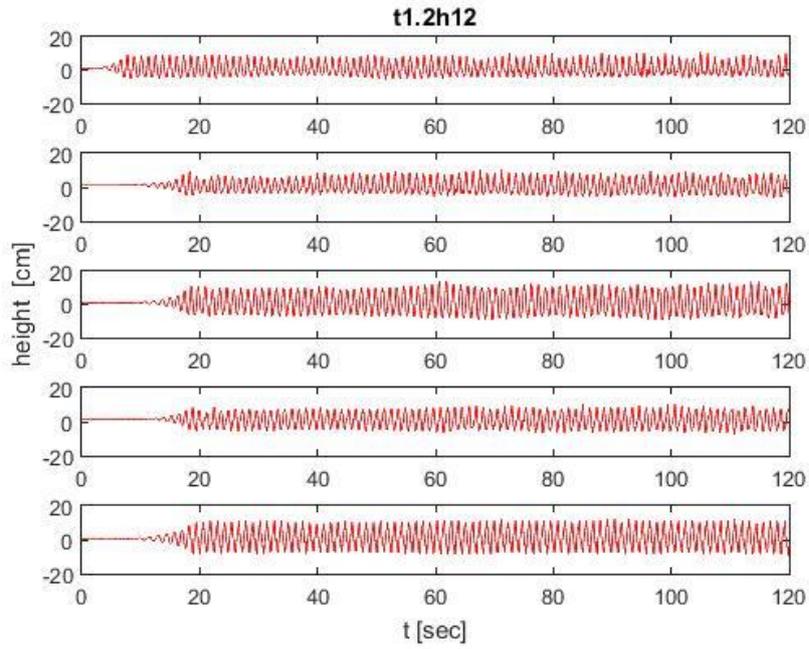
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 波高圖



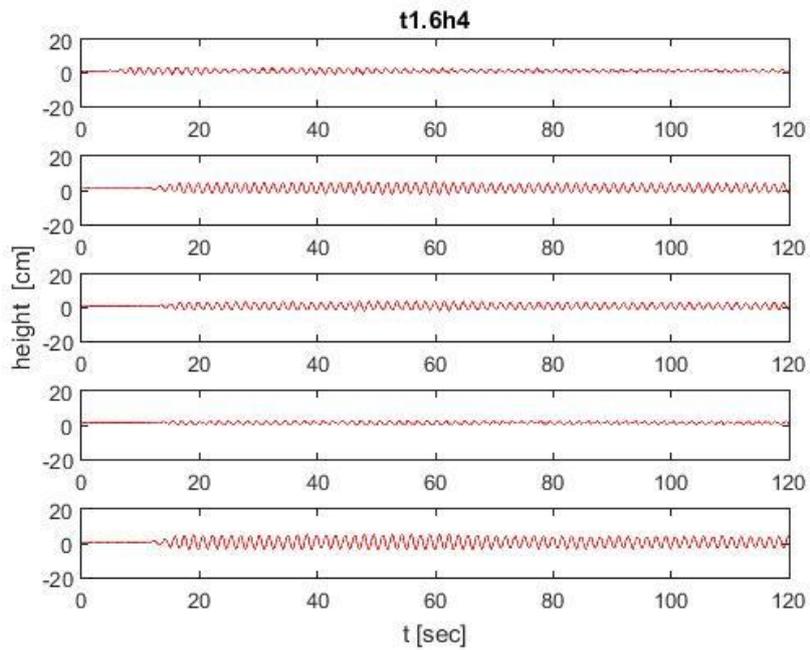
前牆開口率 35%週期 1.2 波 8 波高圖



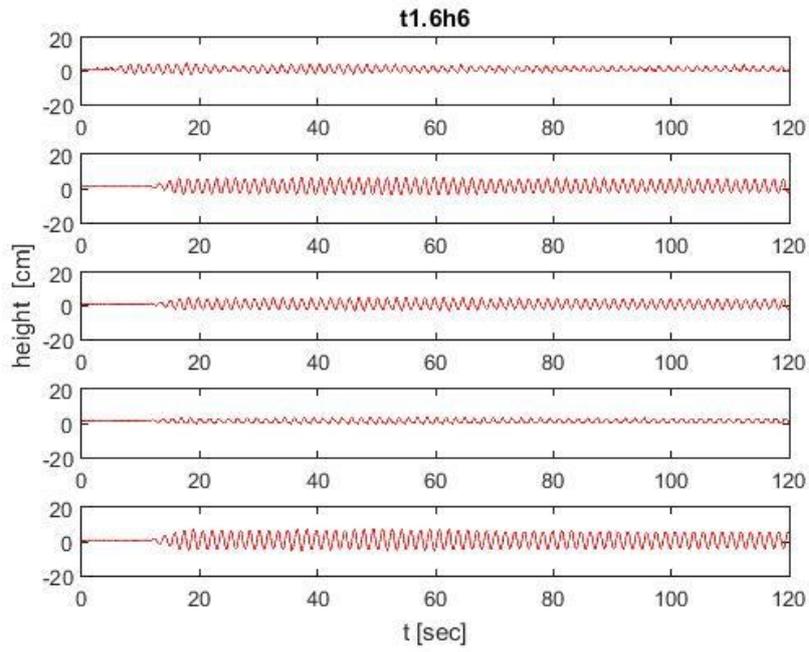
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 10 波高圖



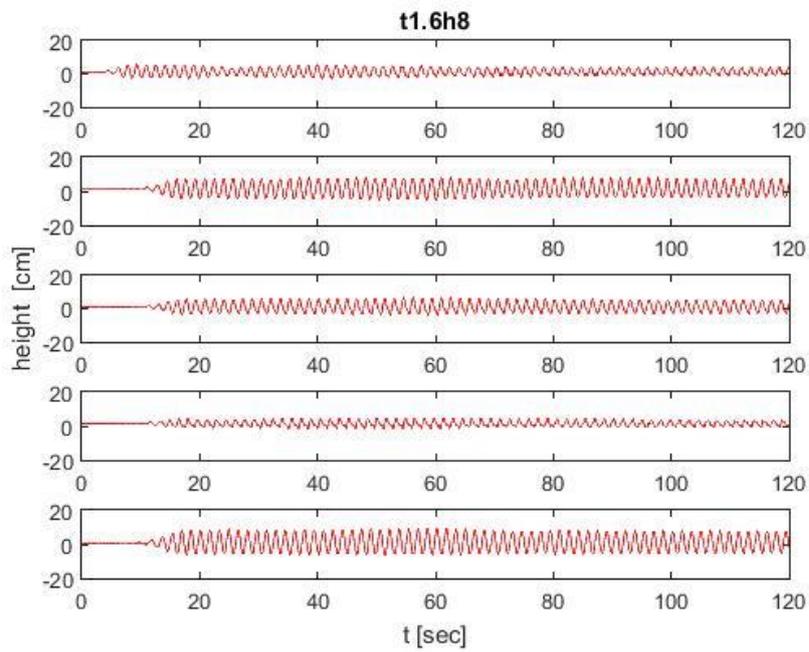
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 12 波高圖



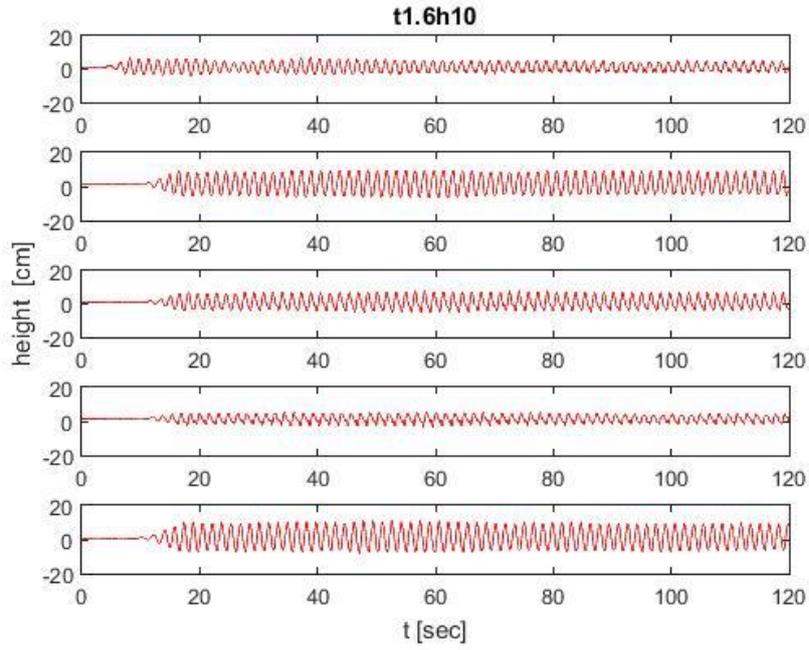
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 波高圖



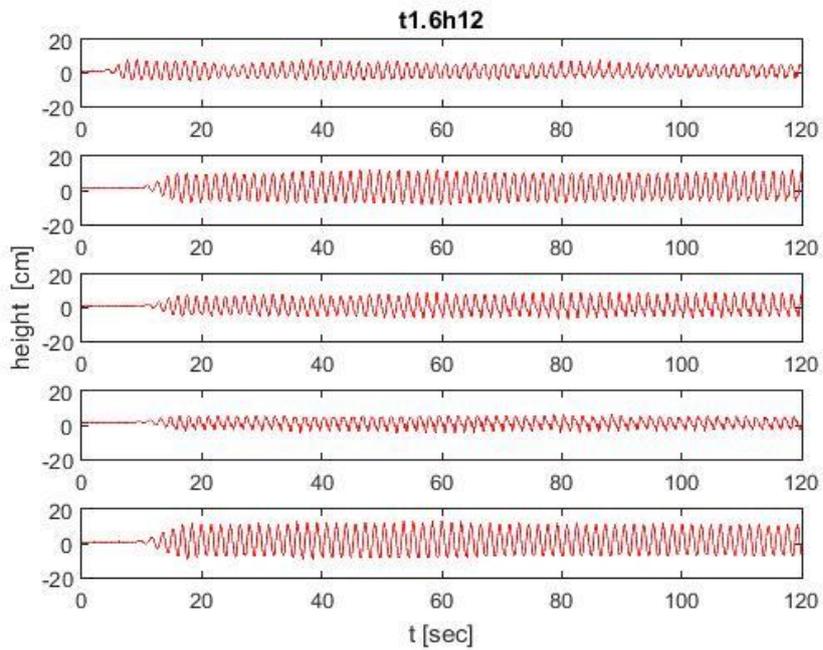
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 波高圖



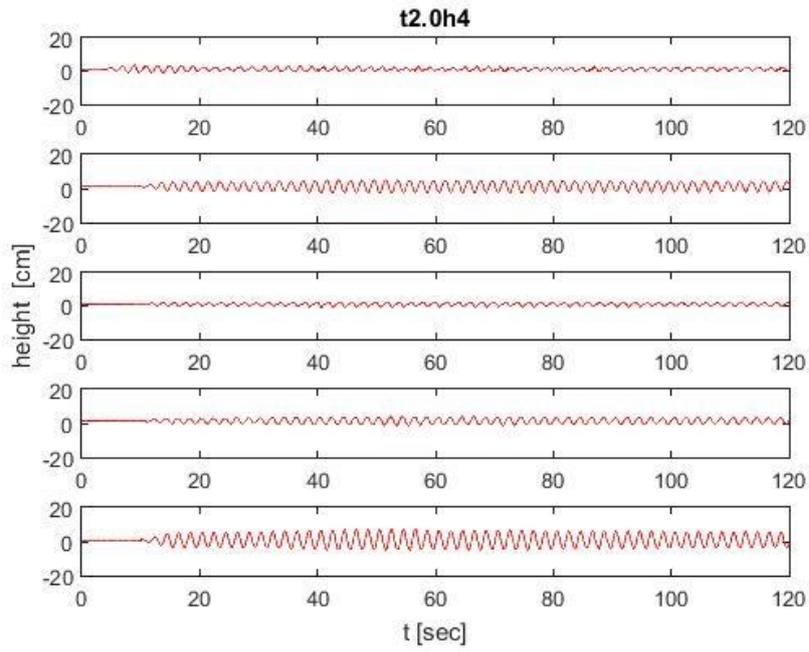
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 波高圖



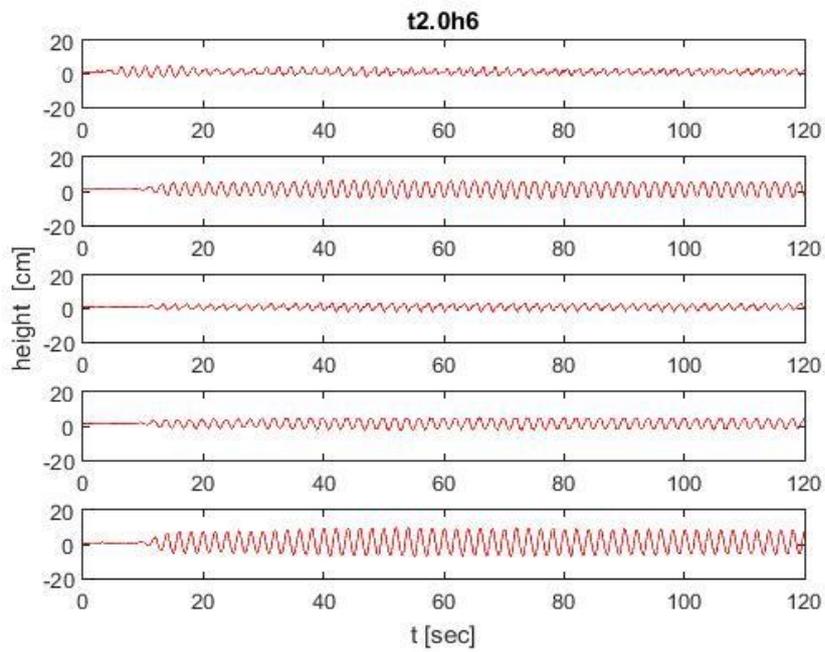
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 波高圖



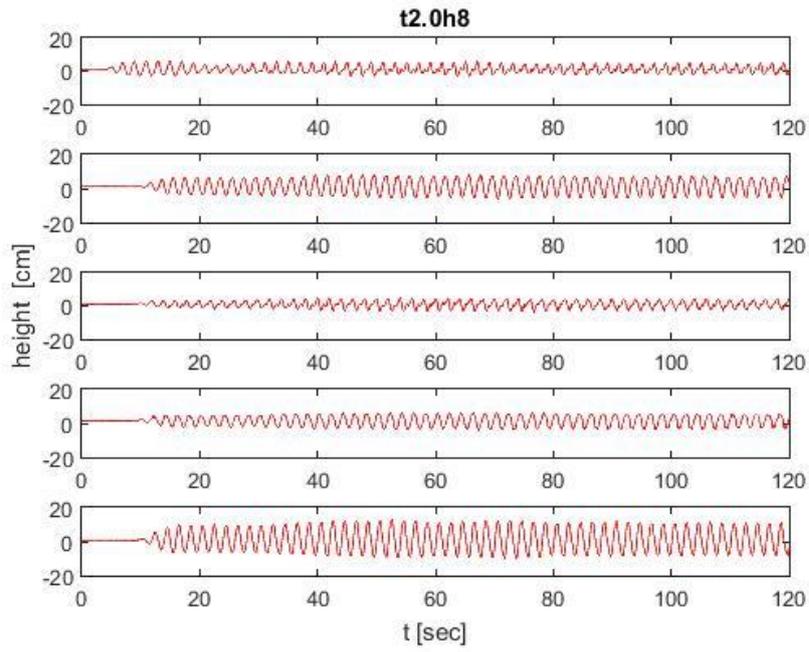
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 波高圖



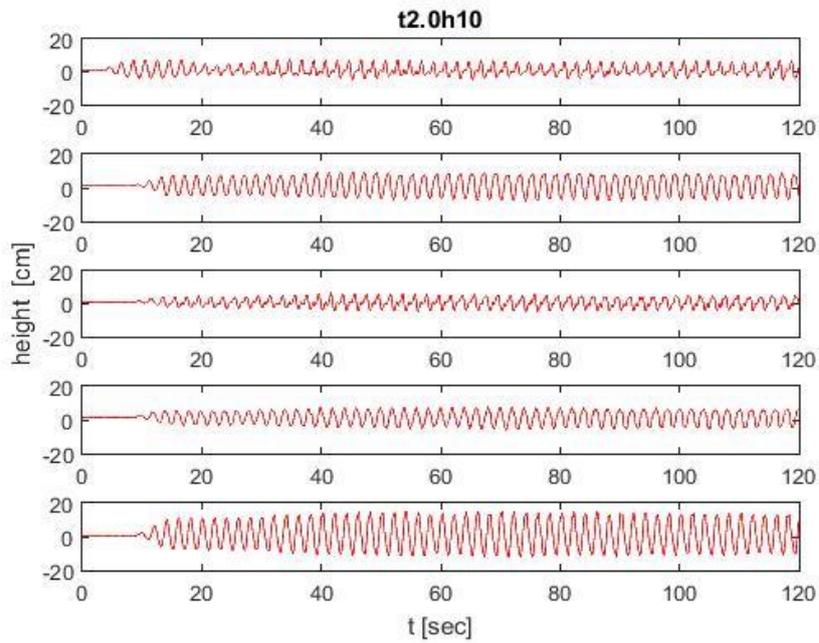
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 波高圖



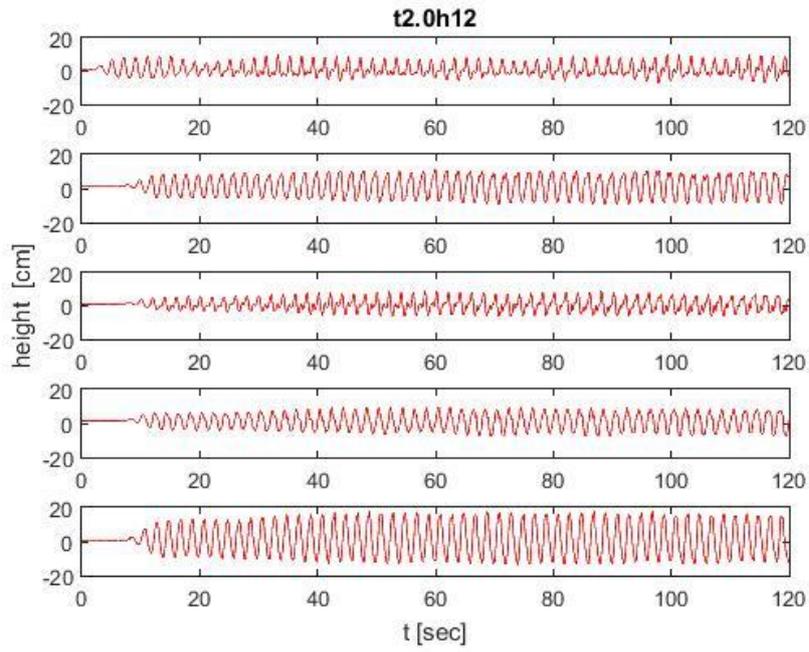
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 波高圖



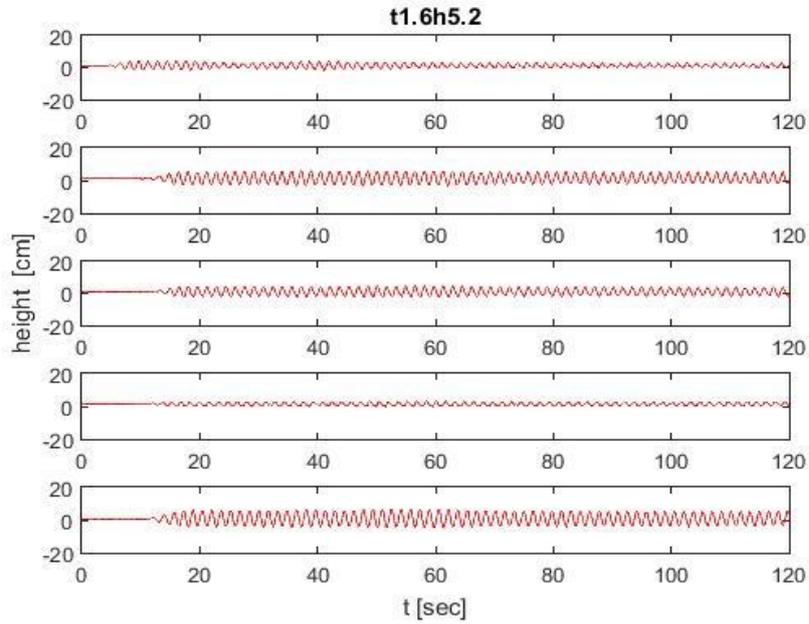
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 波高圖



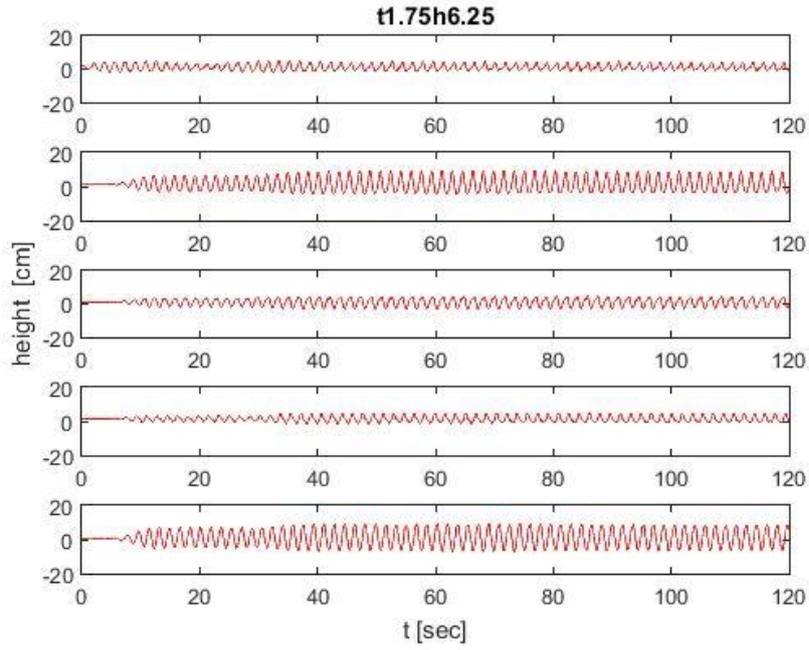
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 波高圖



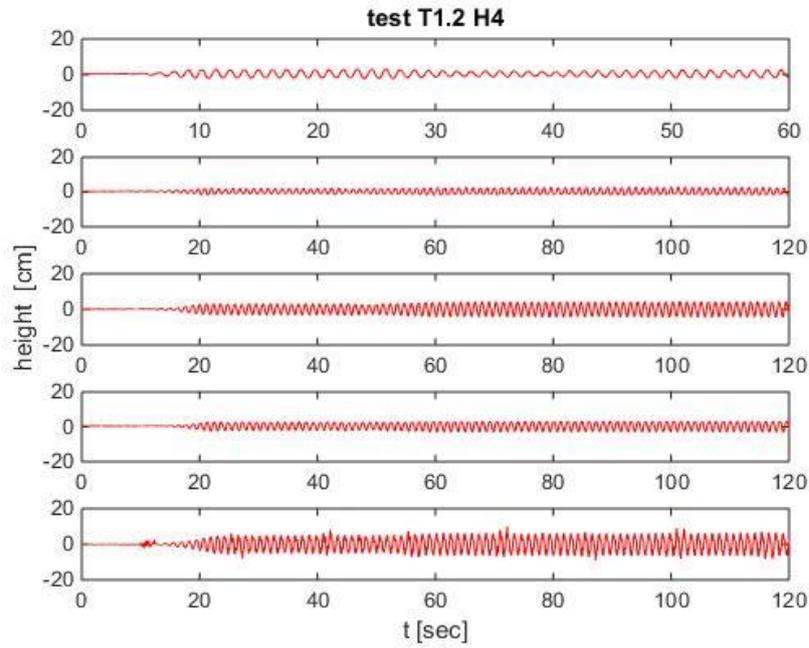
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 波高圖



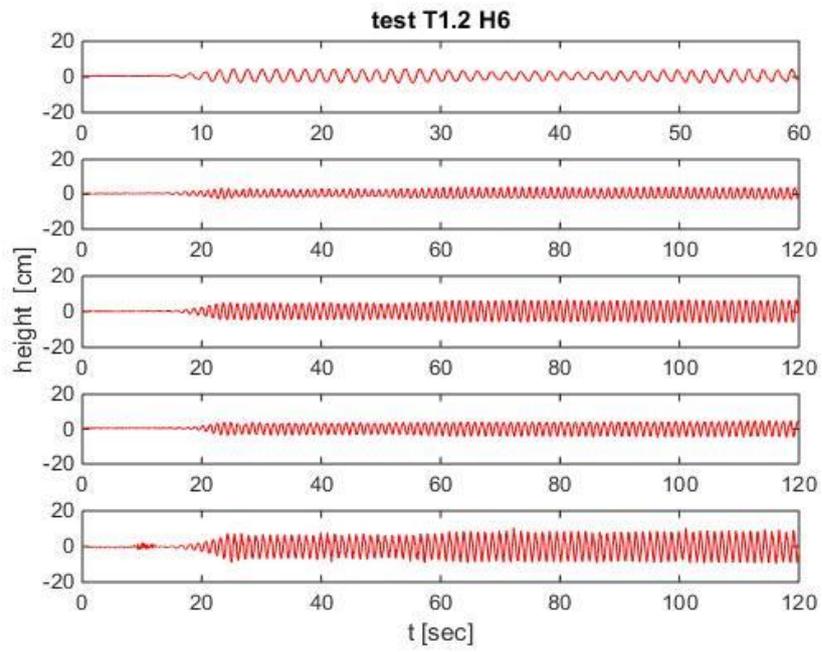
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 波高圖



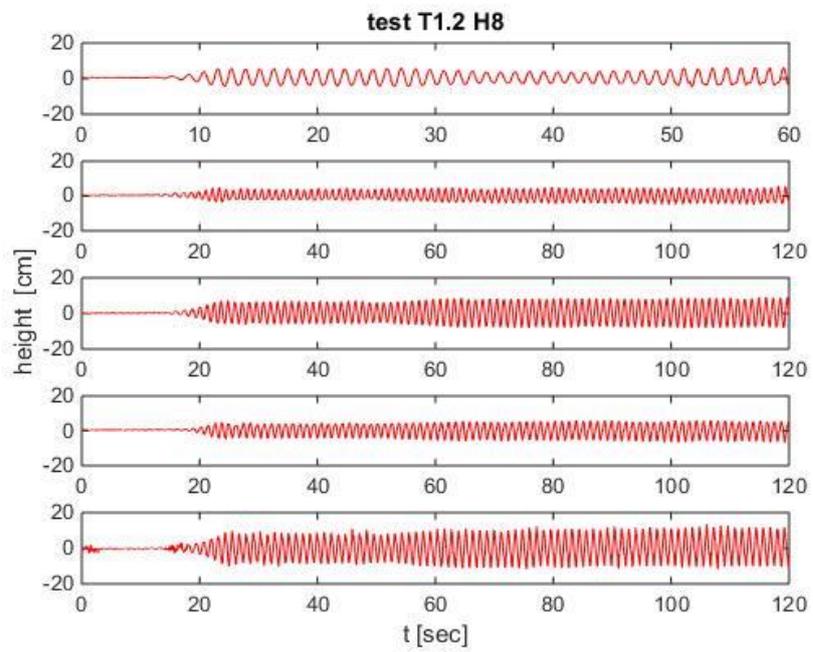
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 波高圖



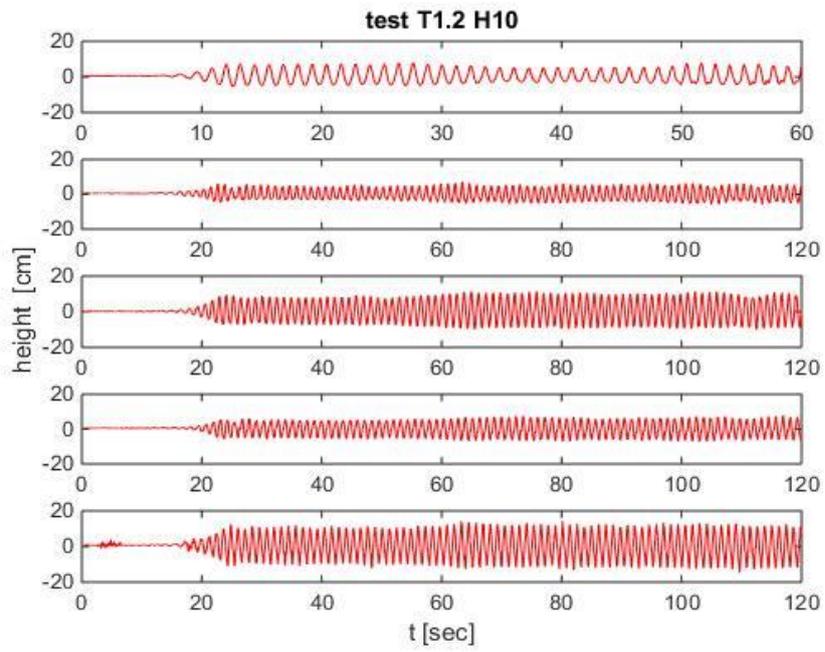
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 4 波高圖



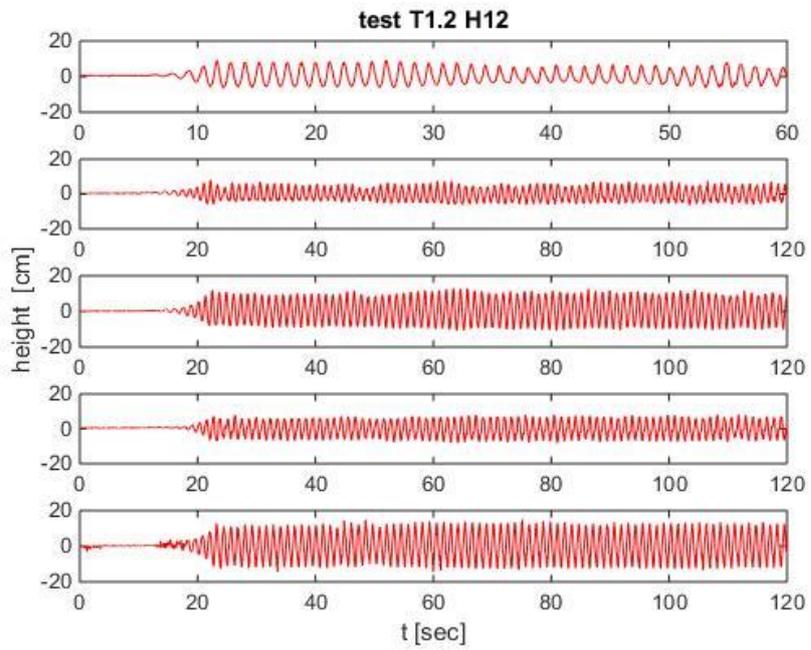
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 6 波高圖



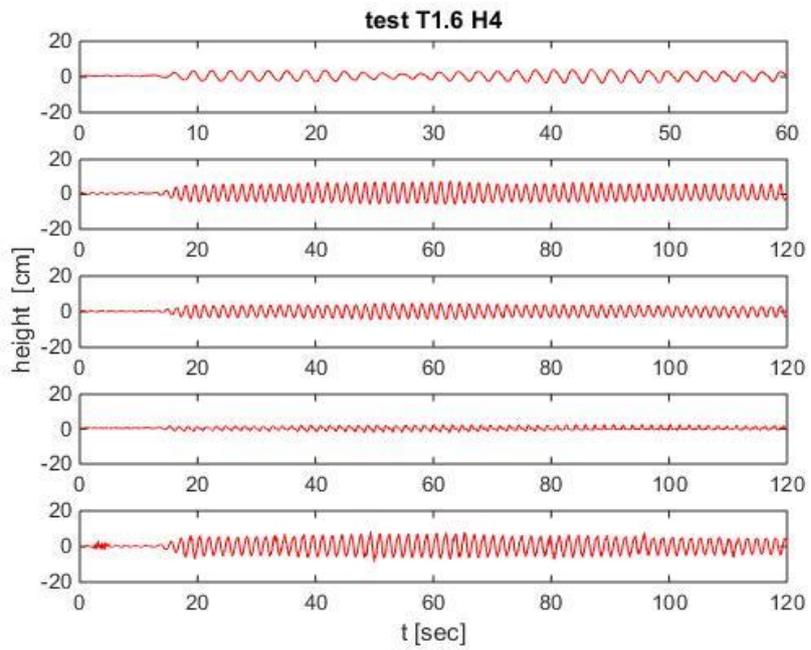
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 波高圖



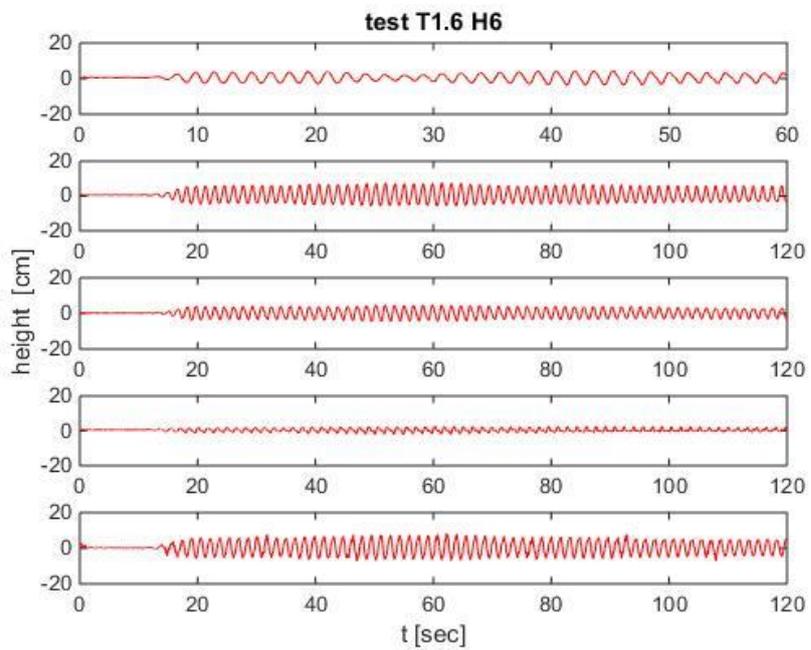
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 10 波高圖



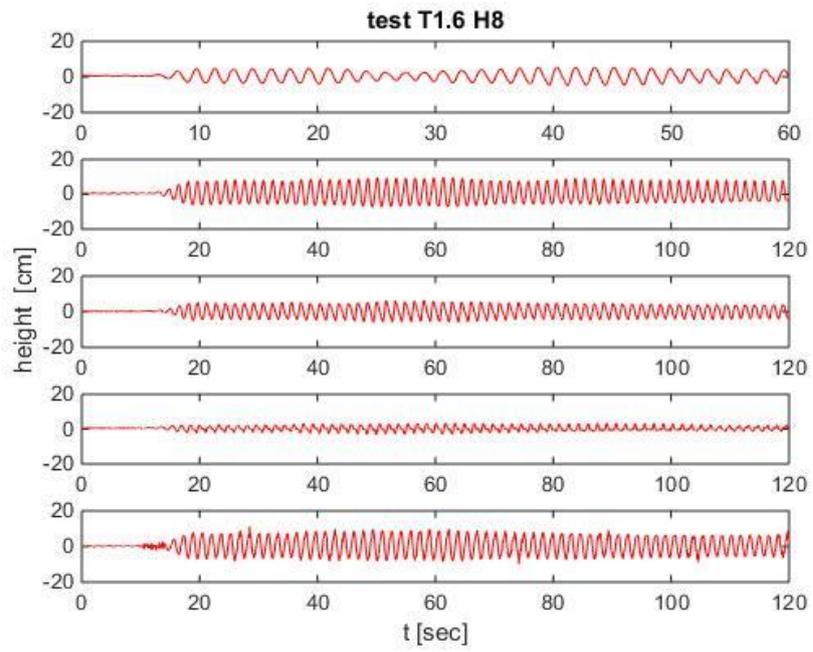
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 12 波高圖



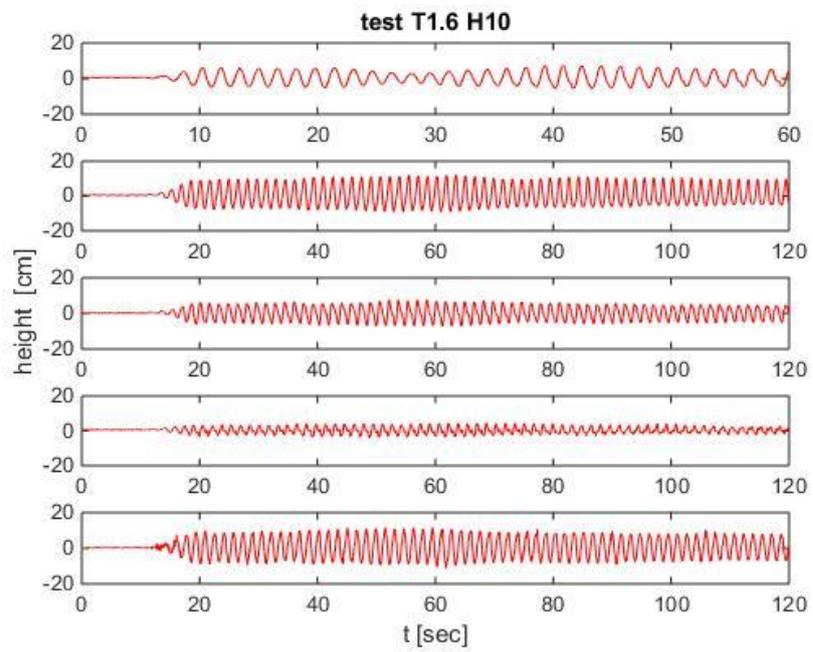
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 4 波高圖



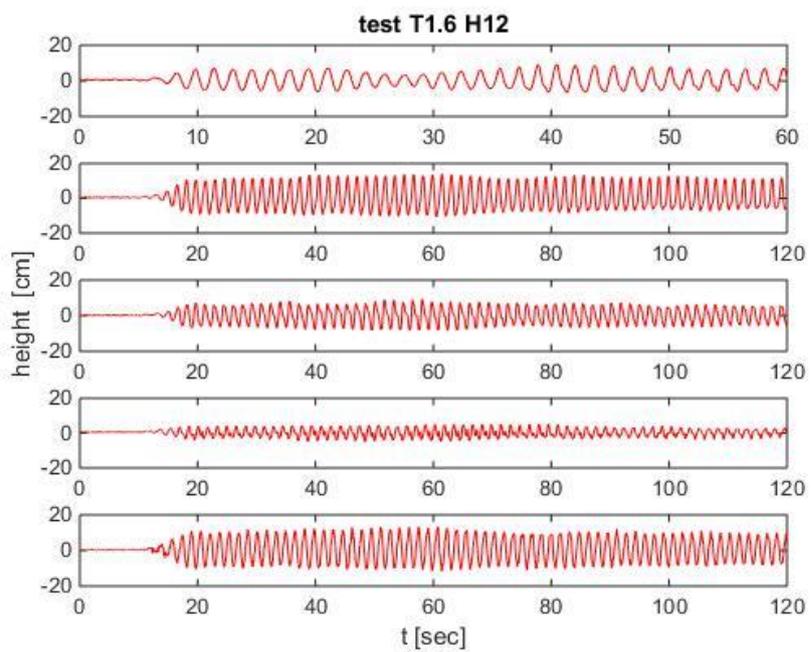
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 6 波高圖



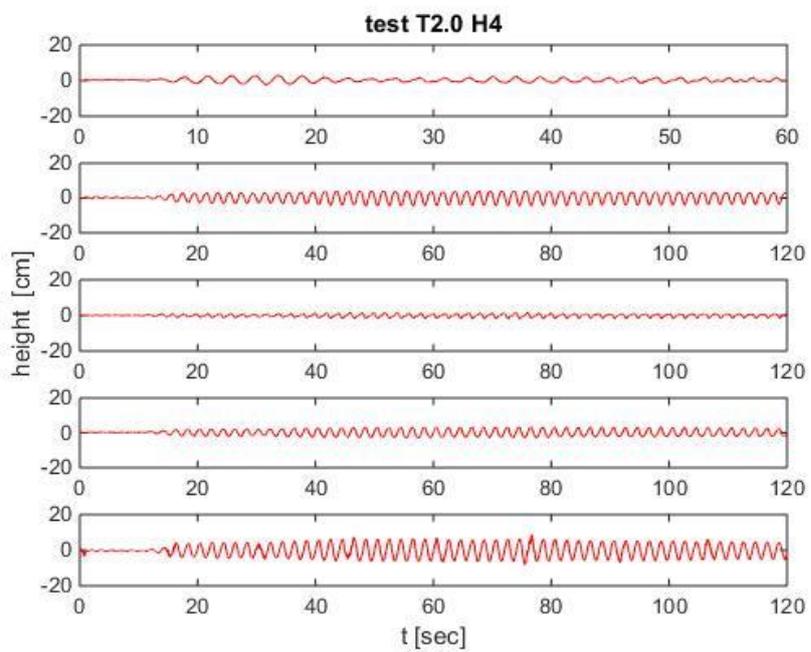
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 8 波高圖



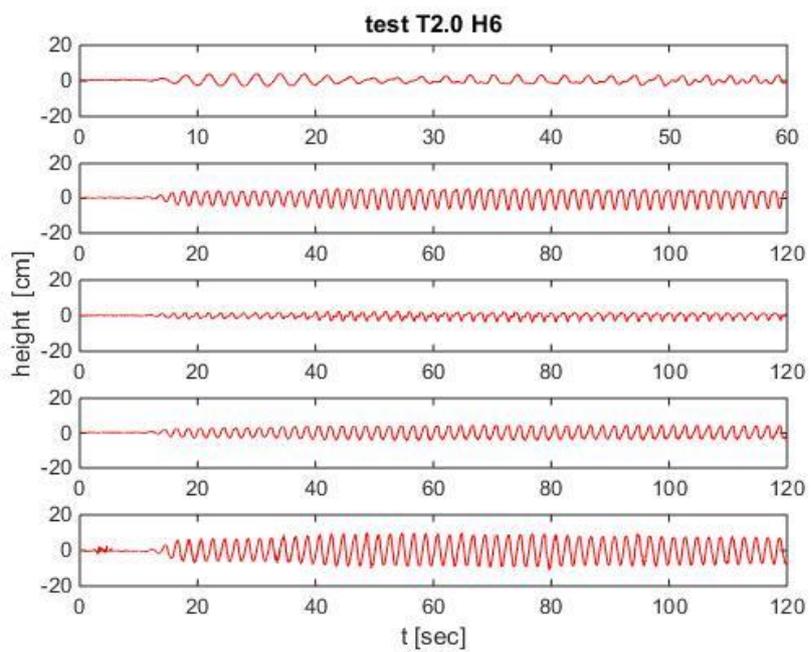
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 10 波高圖



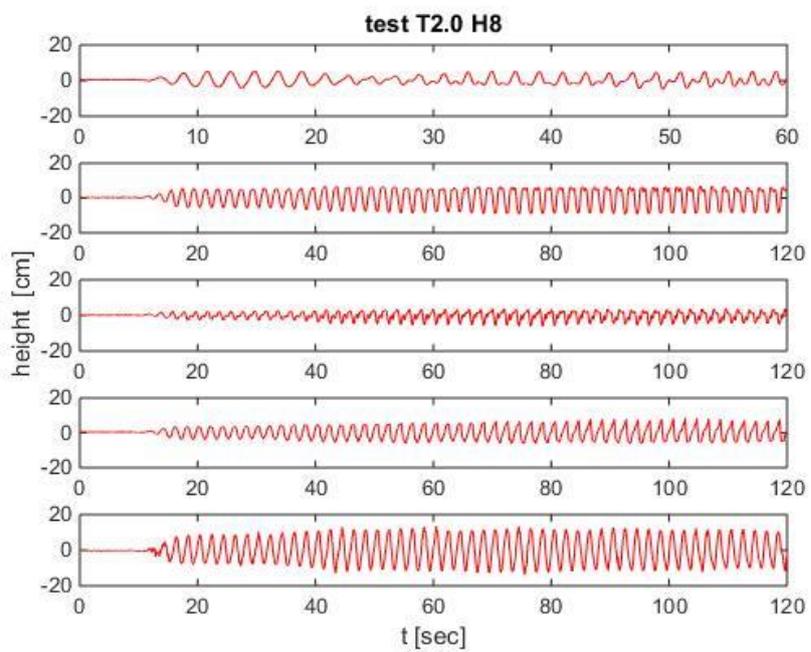
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 12 波高圖



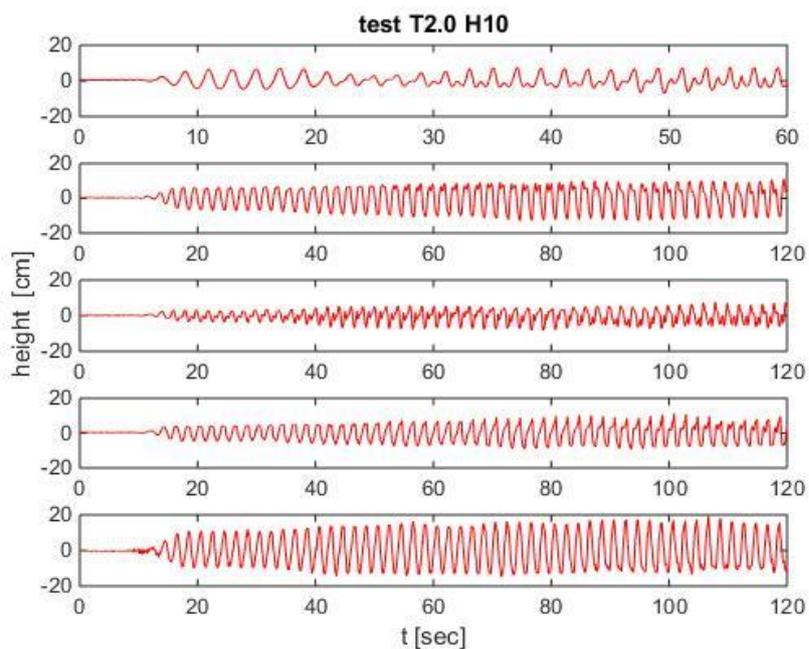
前牆開口率 100%週期 2 波高 4 波高圖



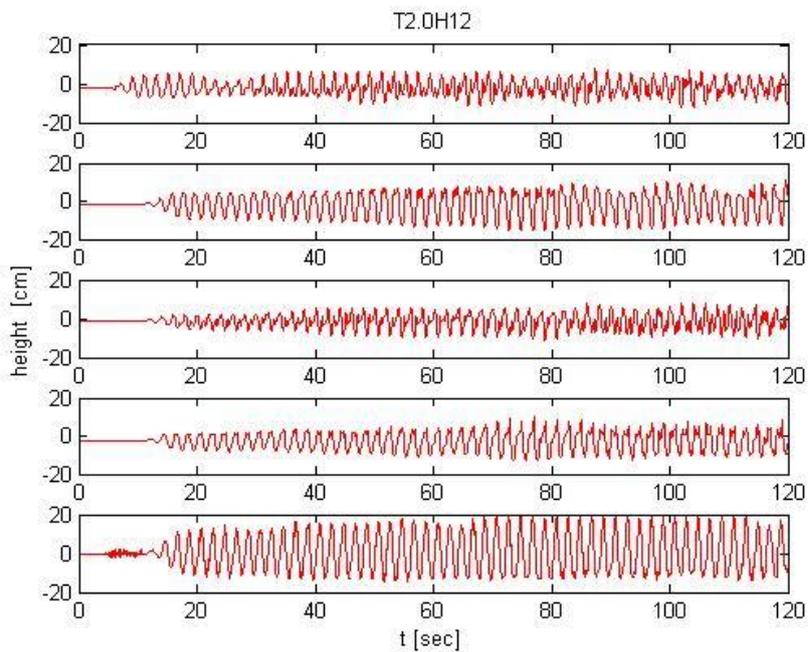
前牆開口率 100%週期 2 波高 6 波高圖



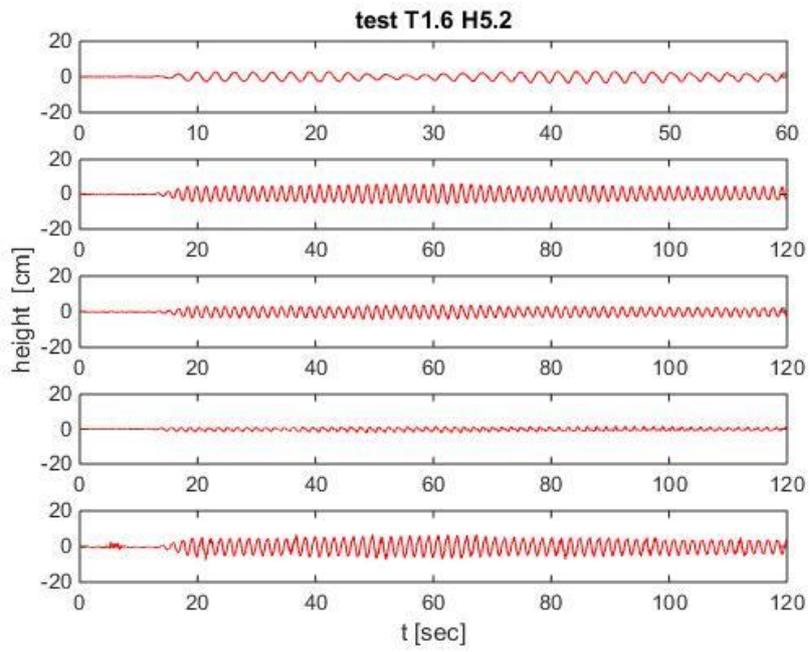
前牆開口率 100%週期 2 波高 8 波高圖



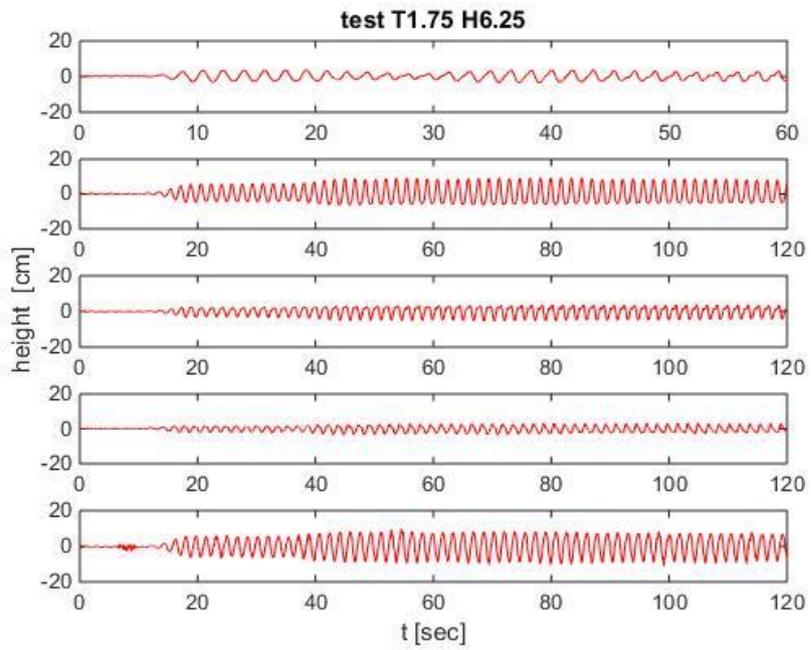
前牆開口率 100%週期 2 波高 10 波高圖



前牆開口率 100%週期 2 波高 12 波高圖

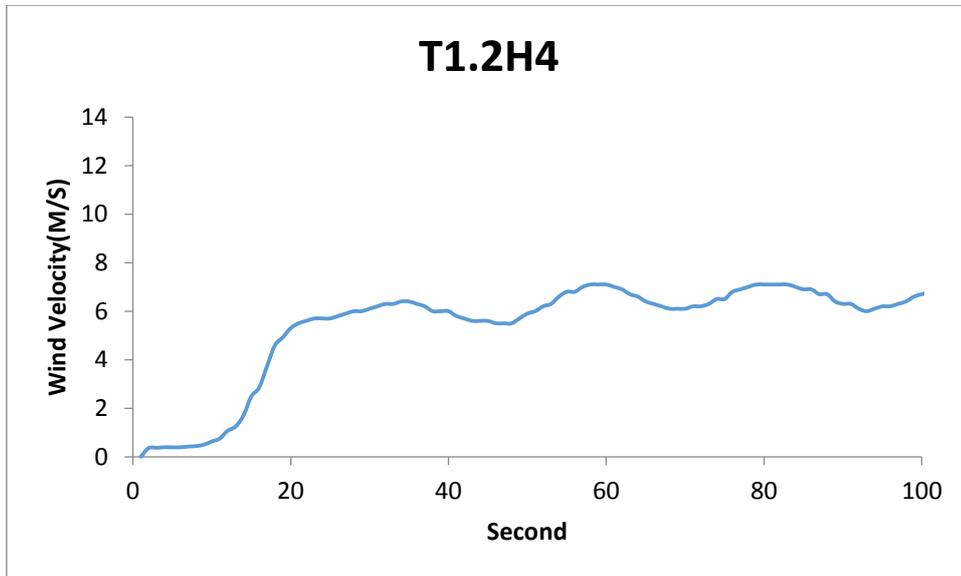


前牆開口率 100%週期 1.6 波高 5.2 波高圖

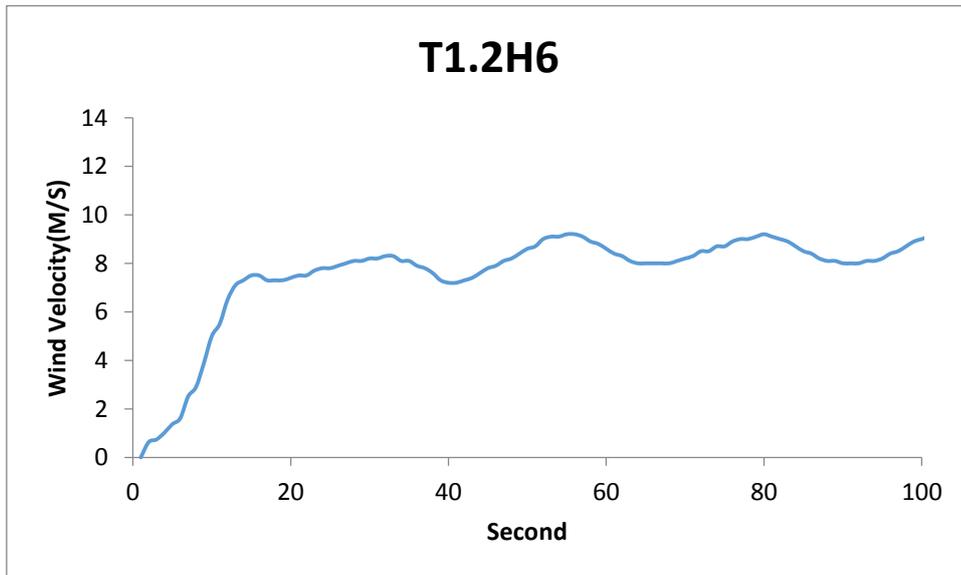


前牆開口率 100%週期 1.75 波高 6.25 波高

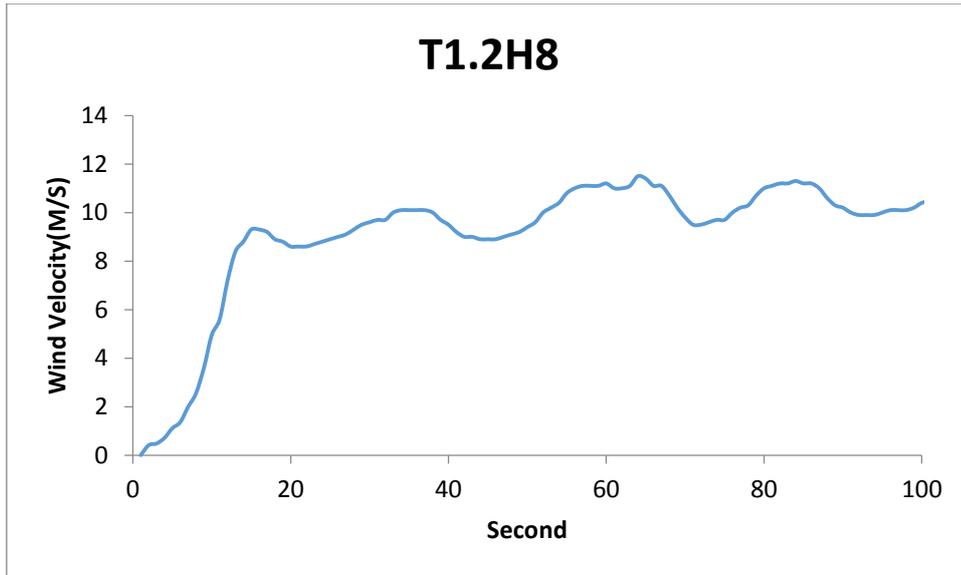
附件三 風速圖



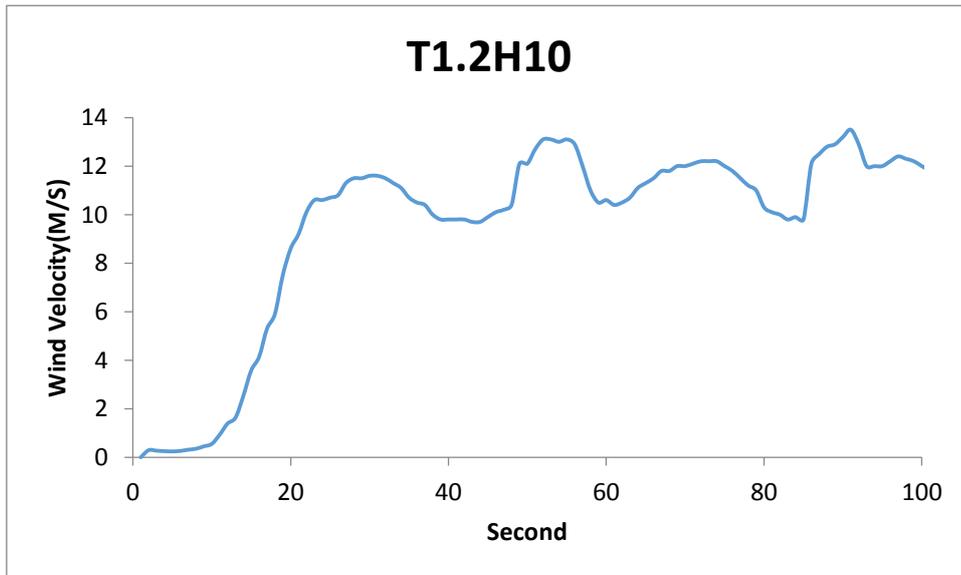
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 風速圖



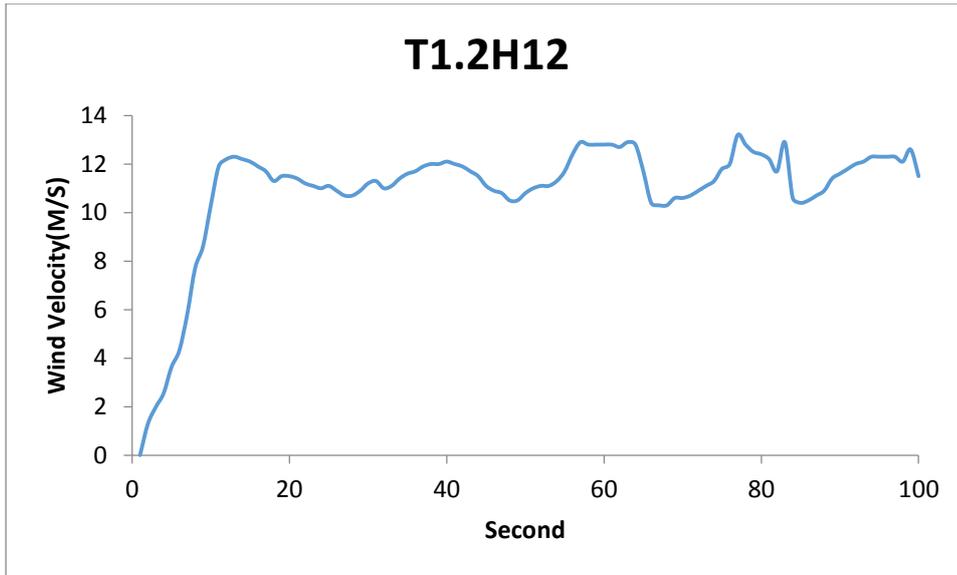
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 風速圖



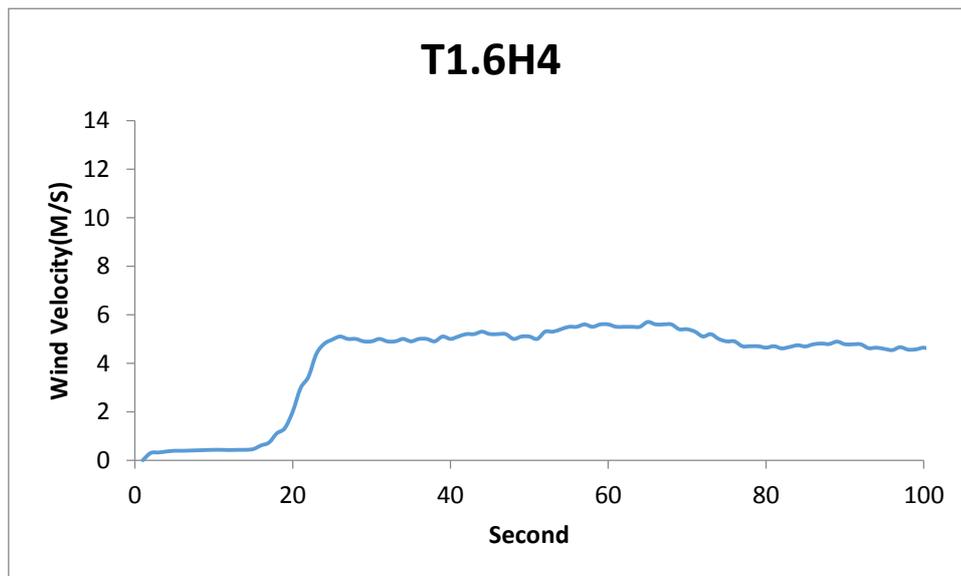
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 8 風速圖



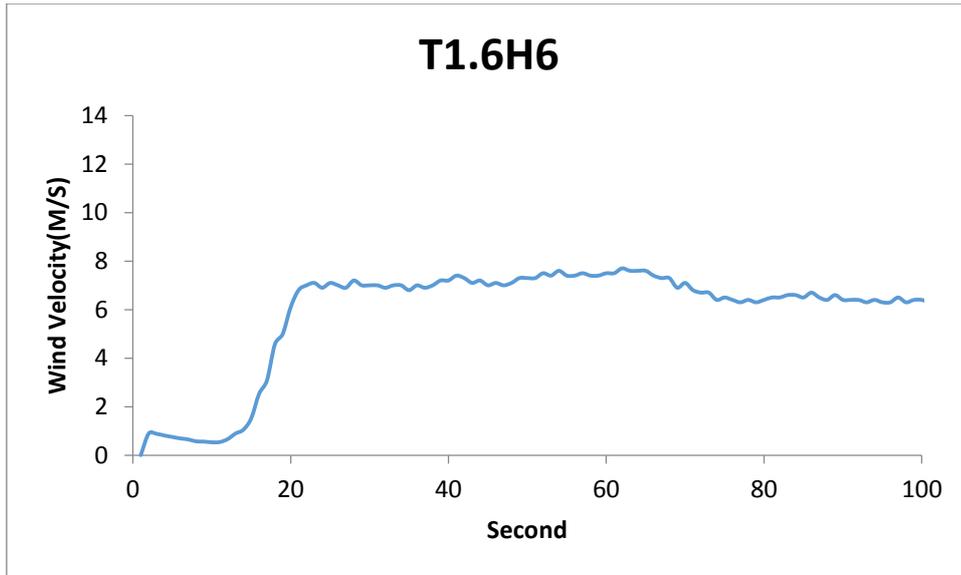
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 10 風速圖



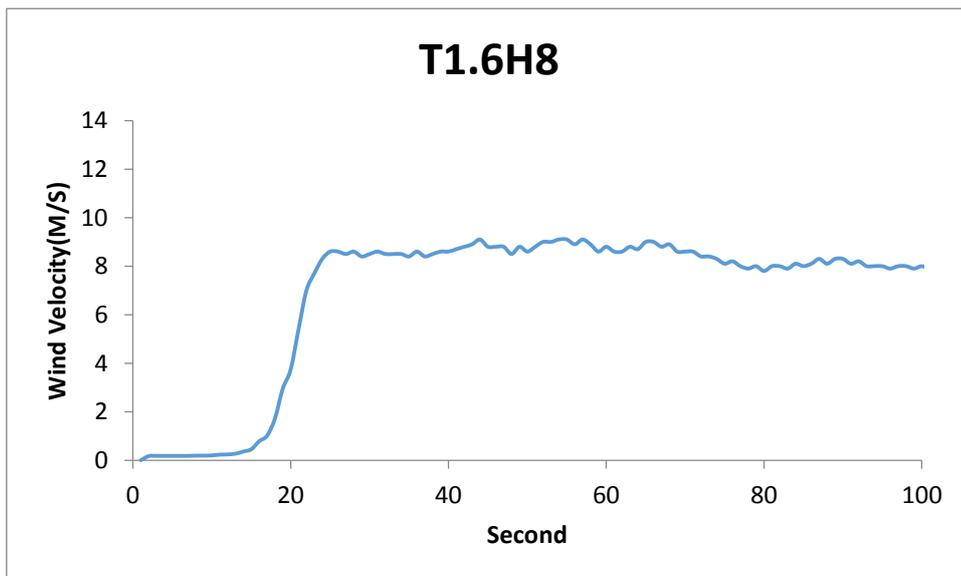
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 12 風速圖



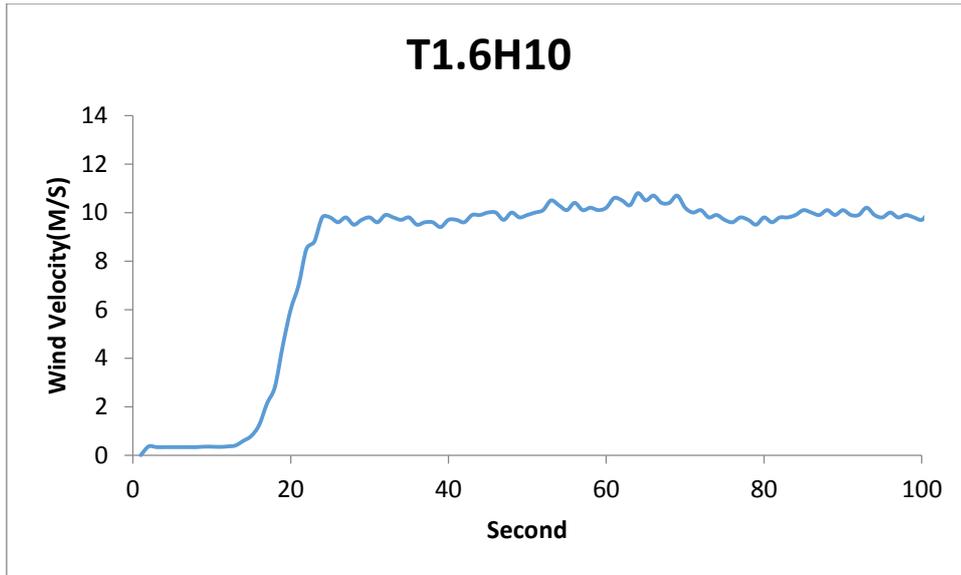
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 風速風速圖



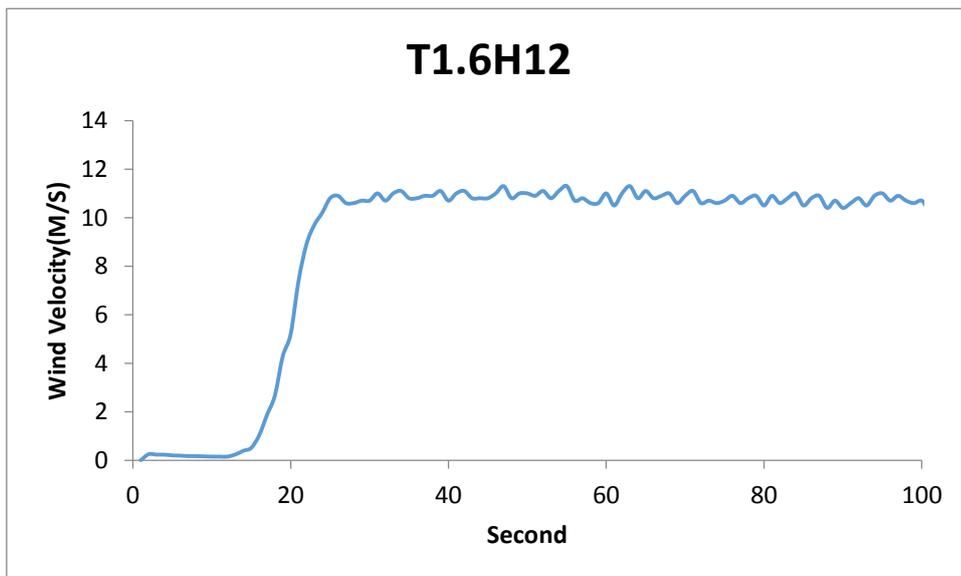
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 風速圖



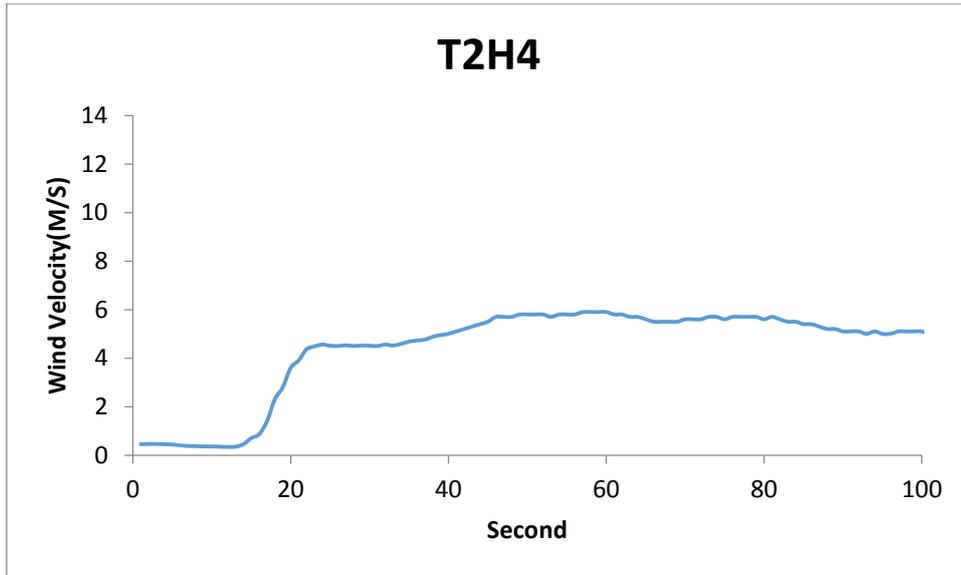
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 風速圖



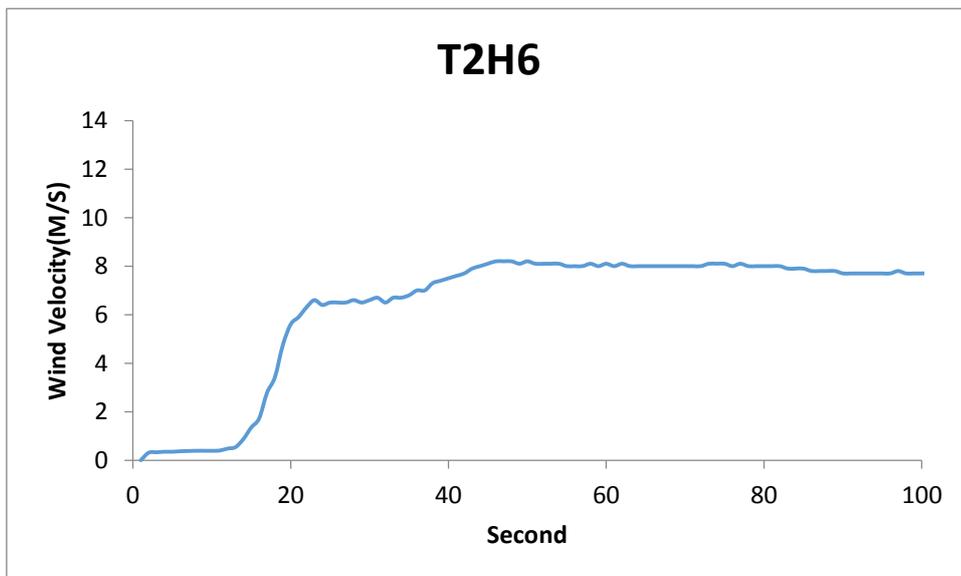
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 風速圖



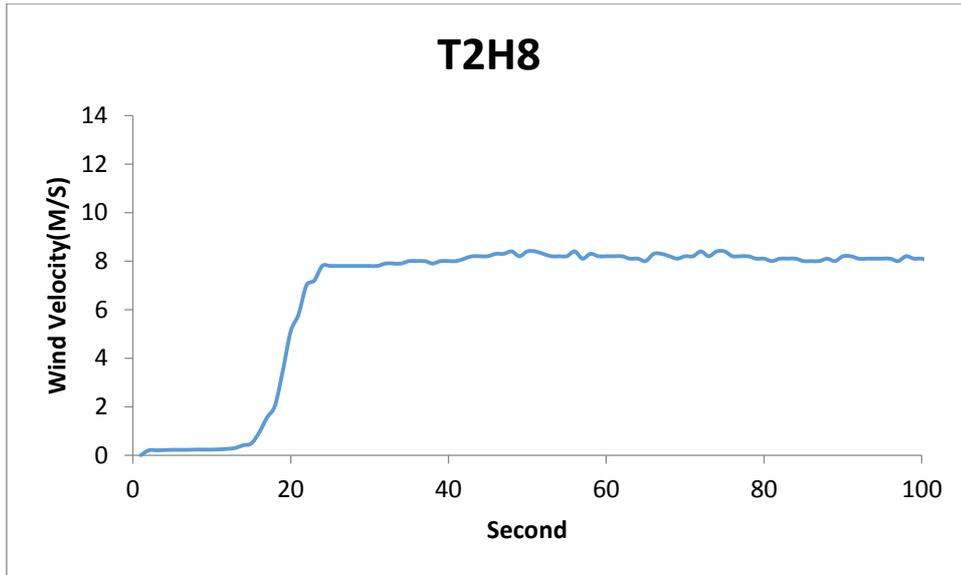
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 風速圖



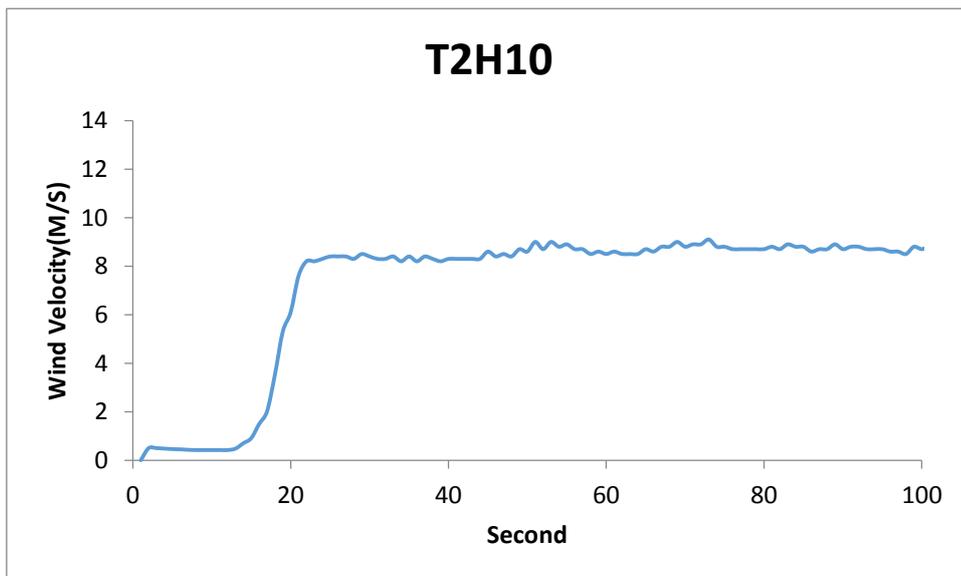
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 風速圖



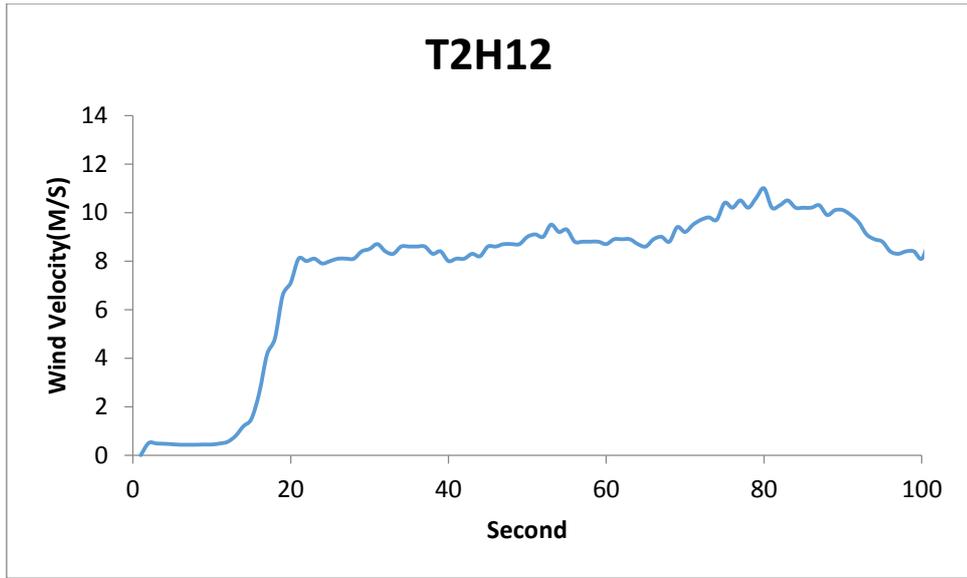
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 風速圖



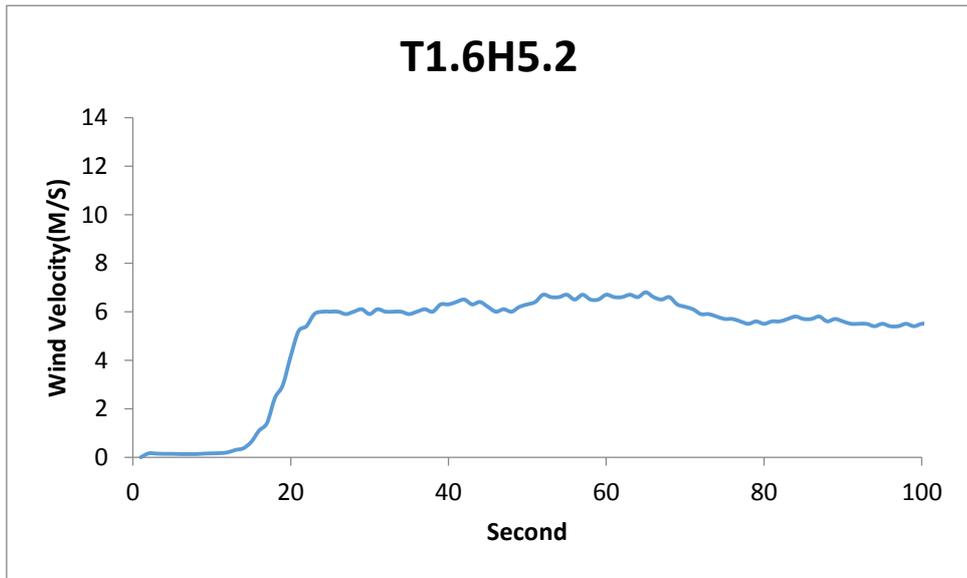
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 風速圖



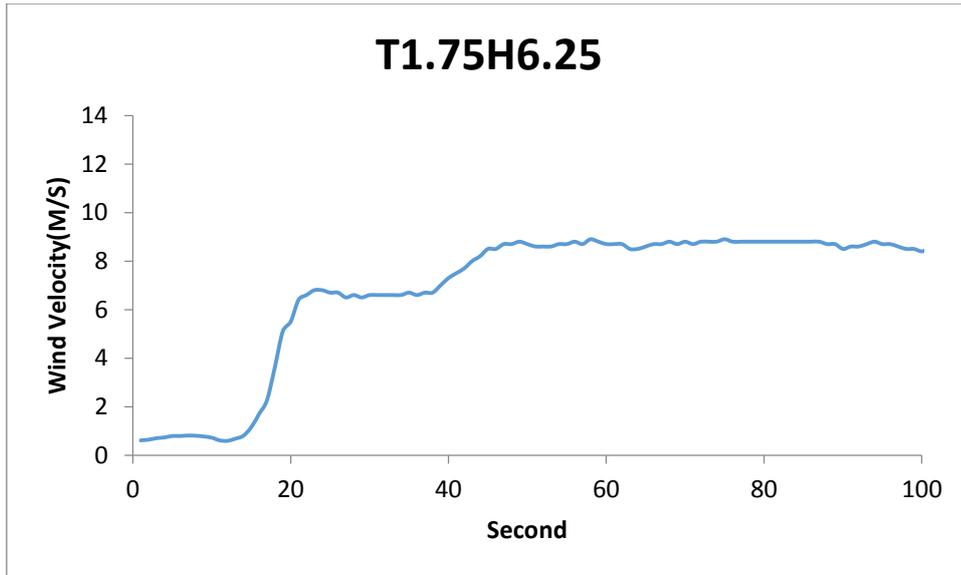
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 風速圖



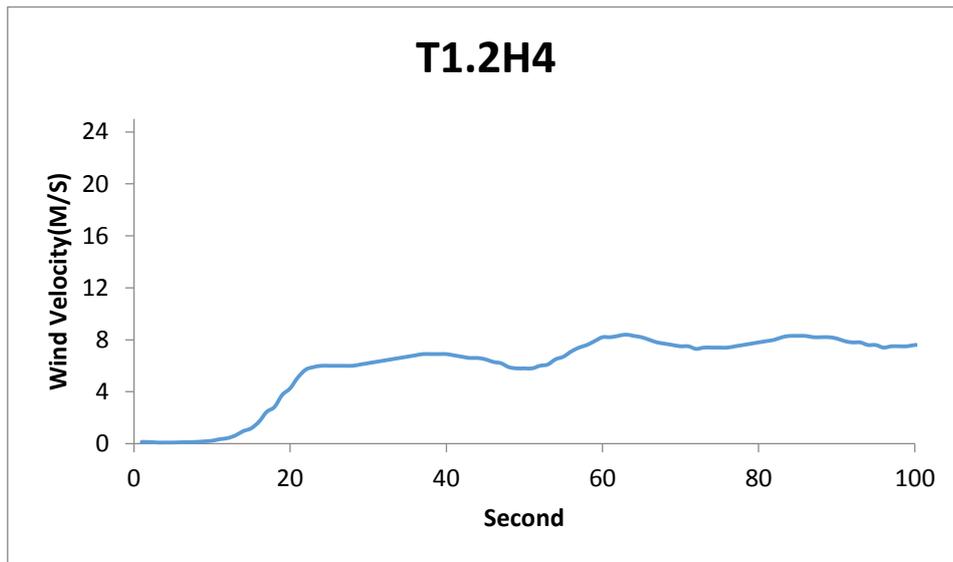
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 風速圖



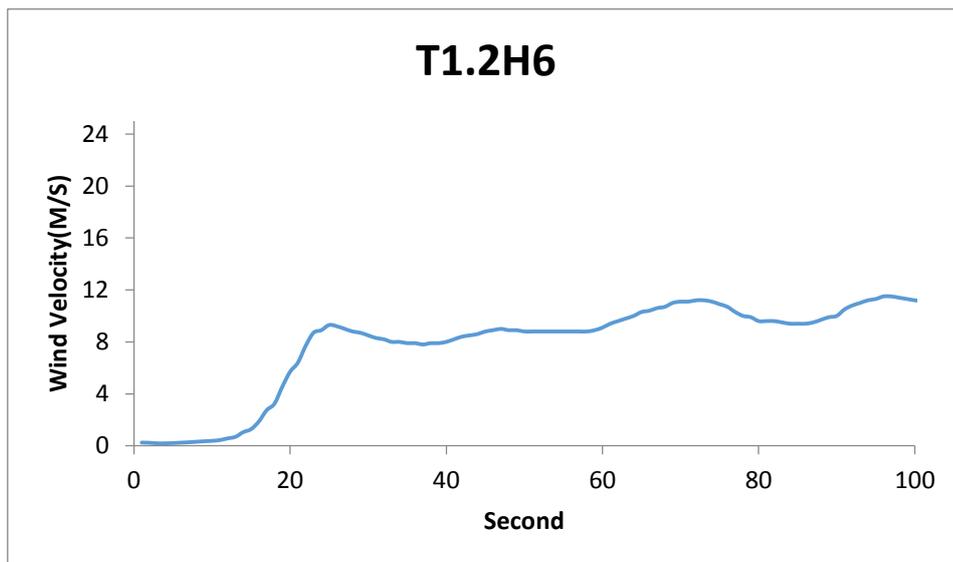
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 風速圖



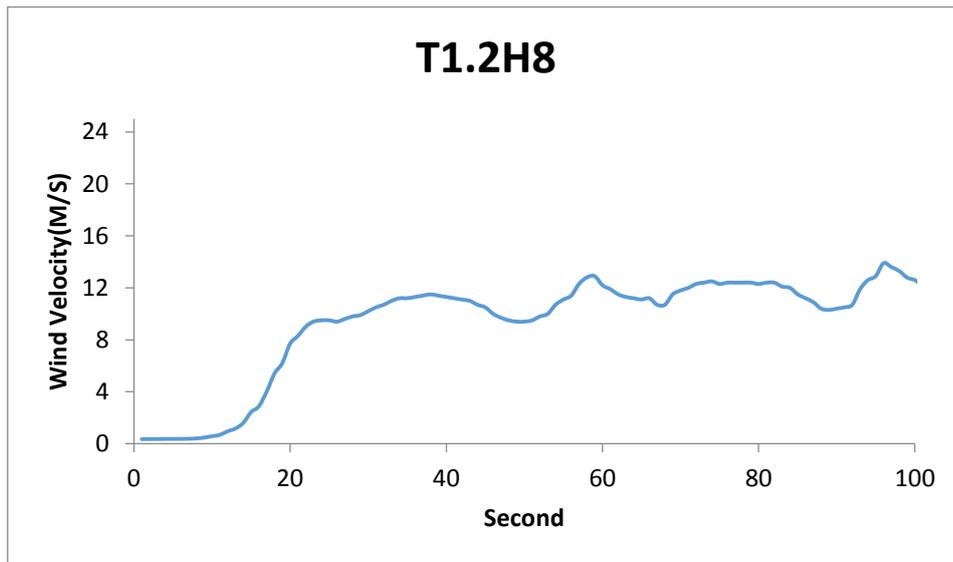
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 風速圖



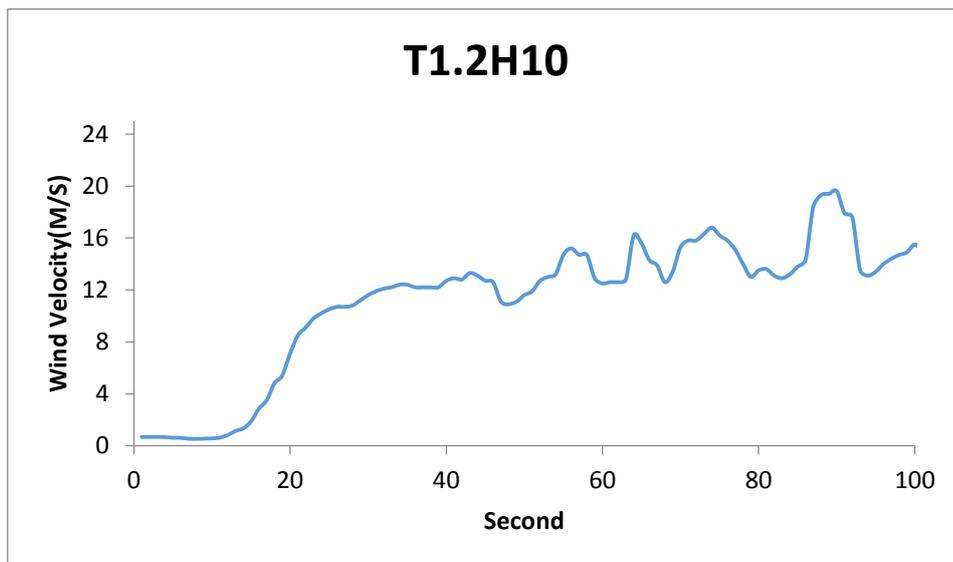
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 4 風速圖



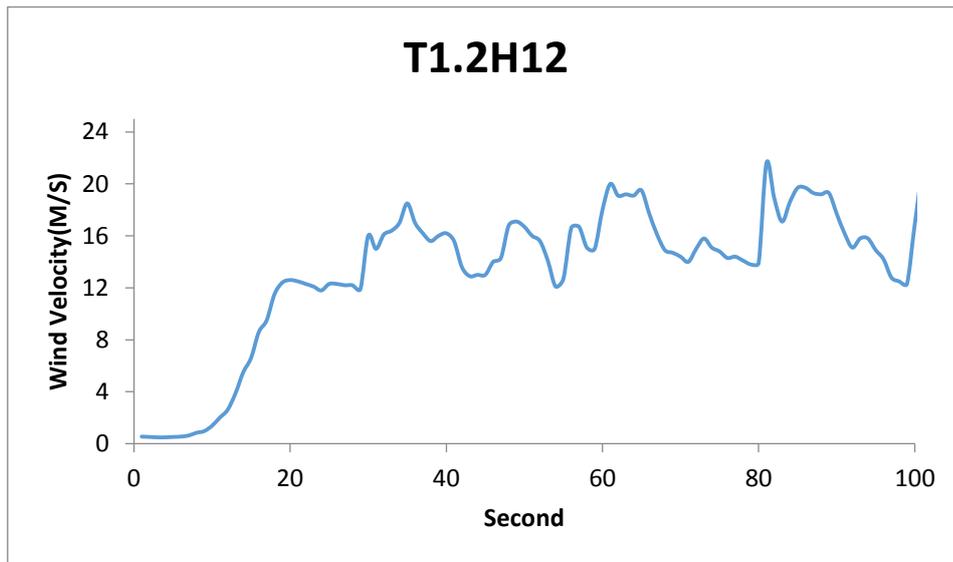
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 6 風速圖



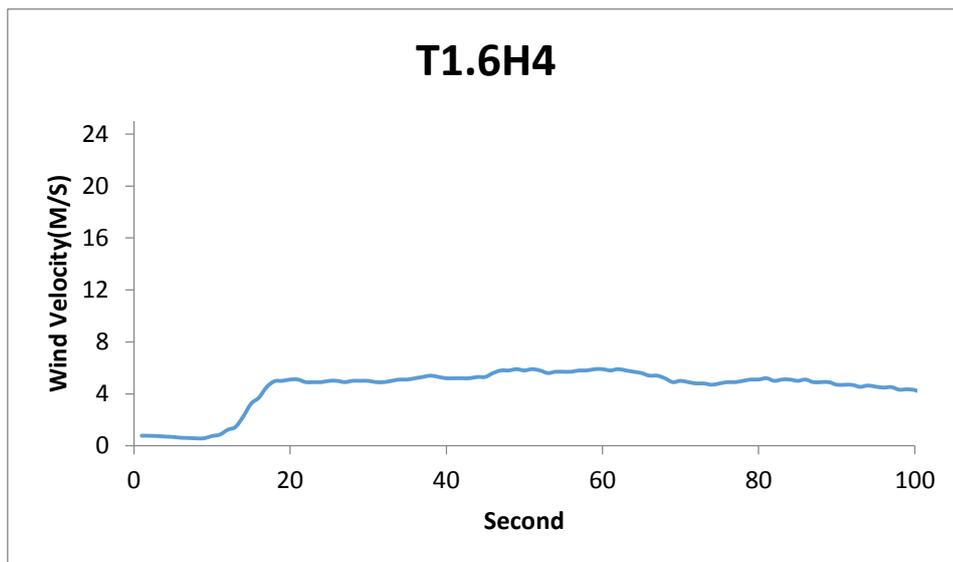
牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 風速圖



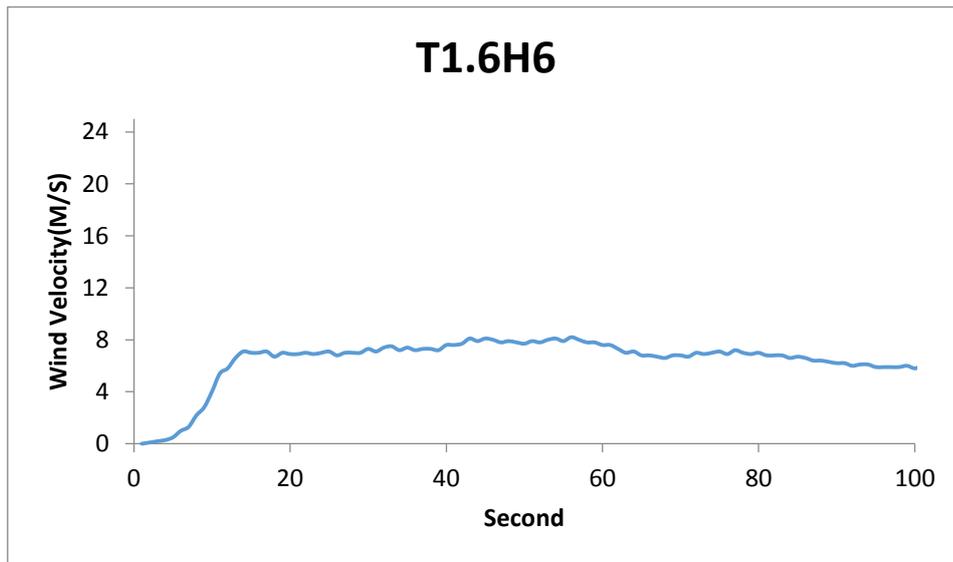
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 10 風速圖



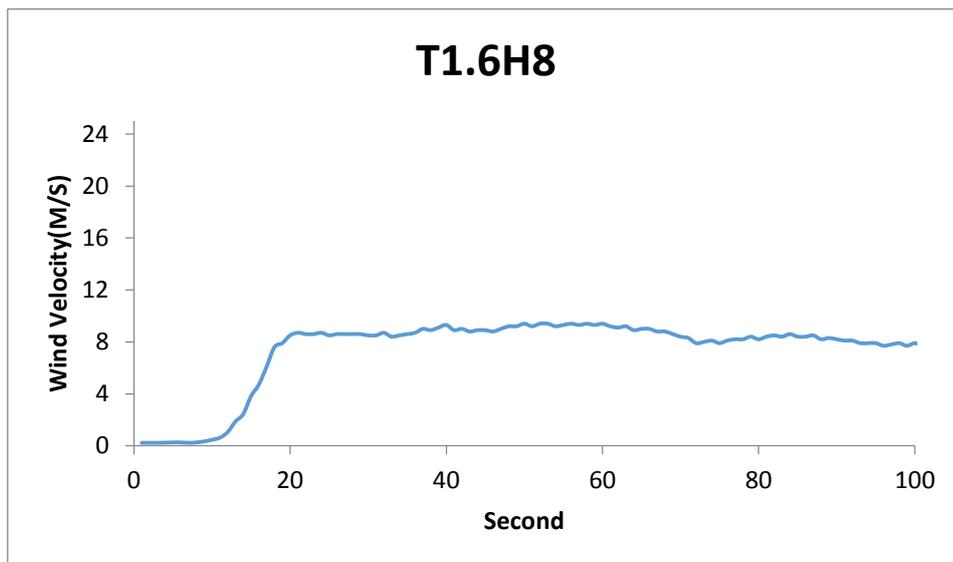
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 12 風速圖



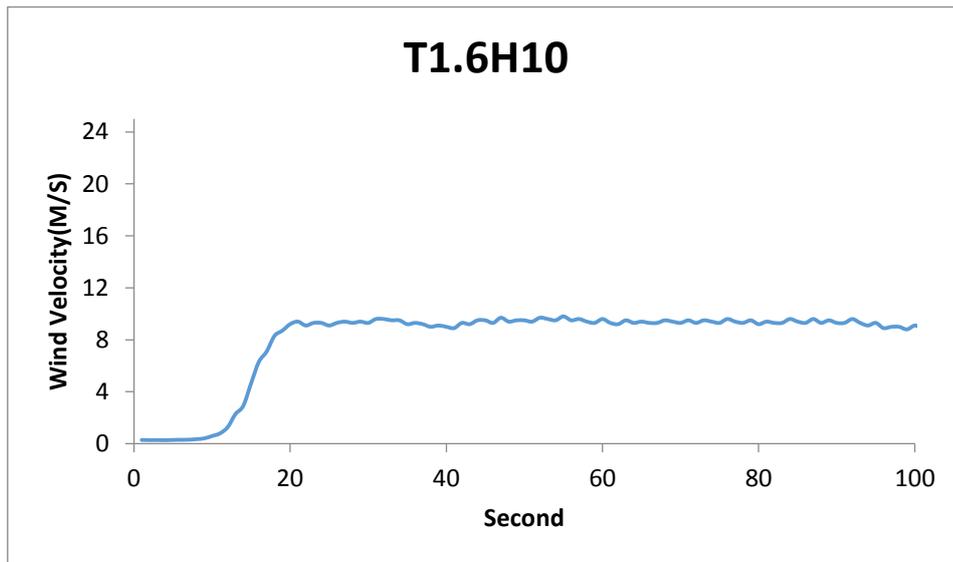
前牆開口率 100%週期 1.6 高 4 風速圖



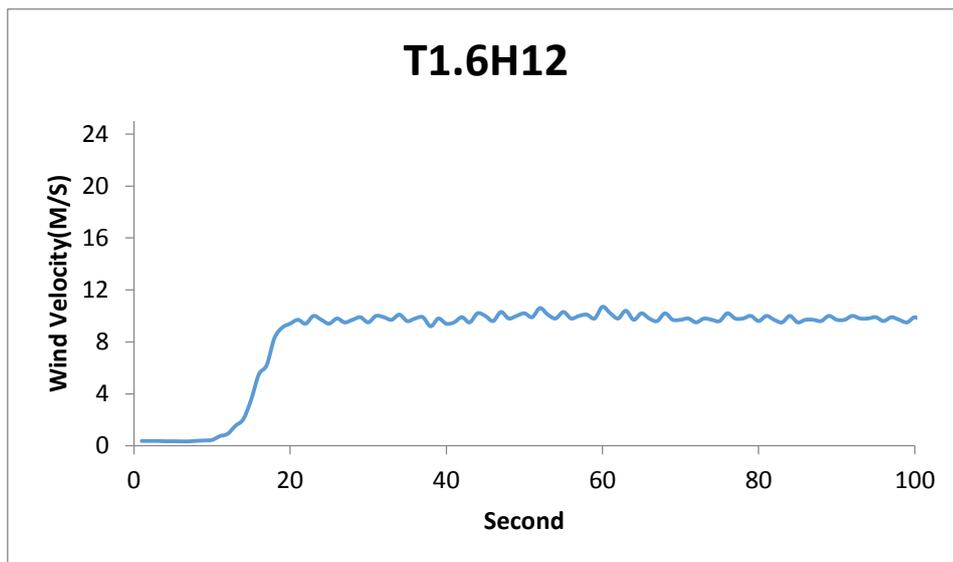
前牆開口率 100%週期 1.6 高 6 風速圖



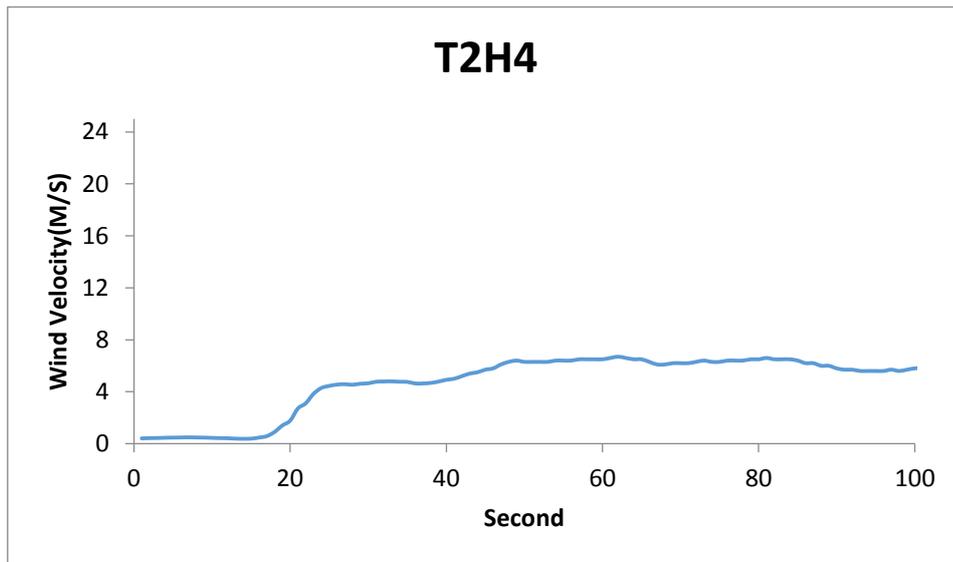
前牆開口率 100%週期 1.6 高 8 風速圖



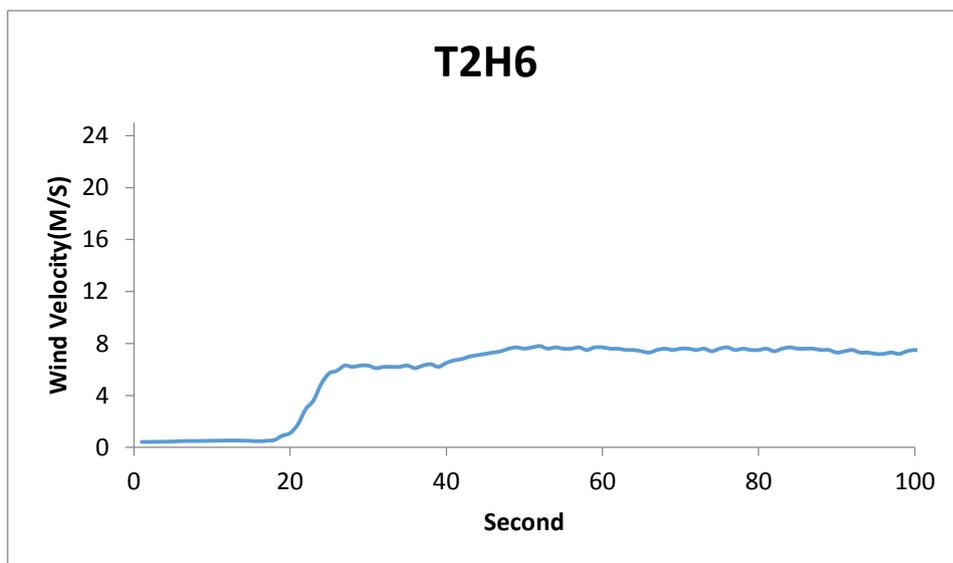
前牆開口率 100%週期 1.6 高 10 風速圖



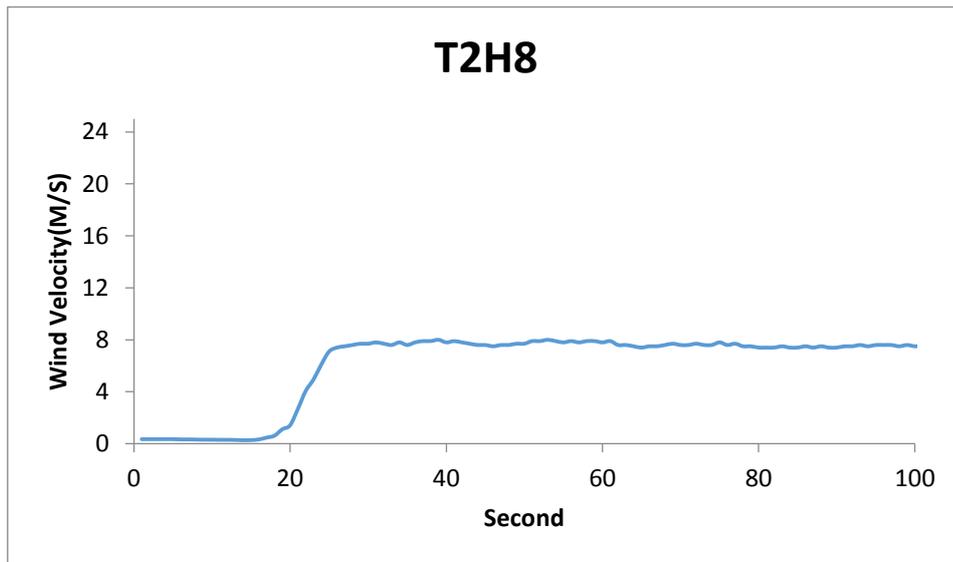
前牆開口率 100%週期 1.6 高 12 風速圖



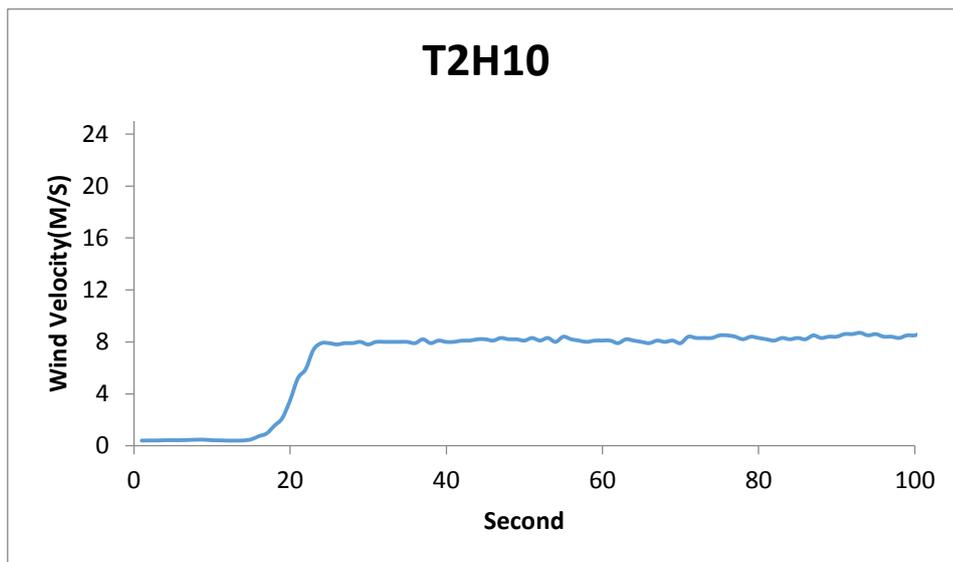
前牆開口率 100%週期 2 波高 4



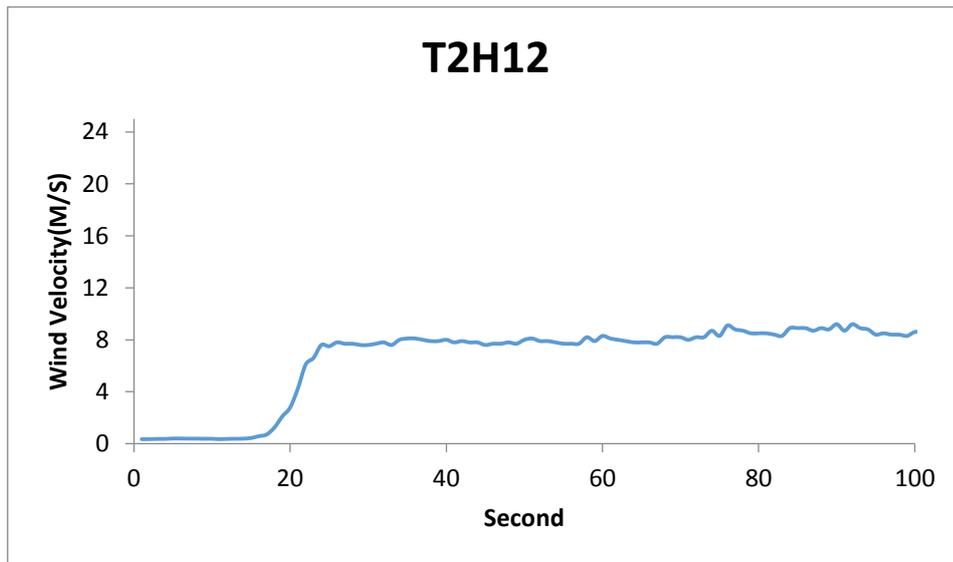
前牆開口率 100%週期 2 波高 6



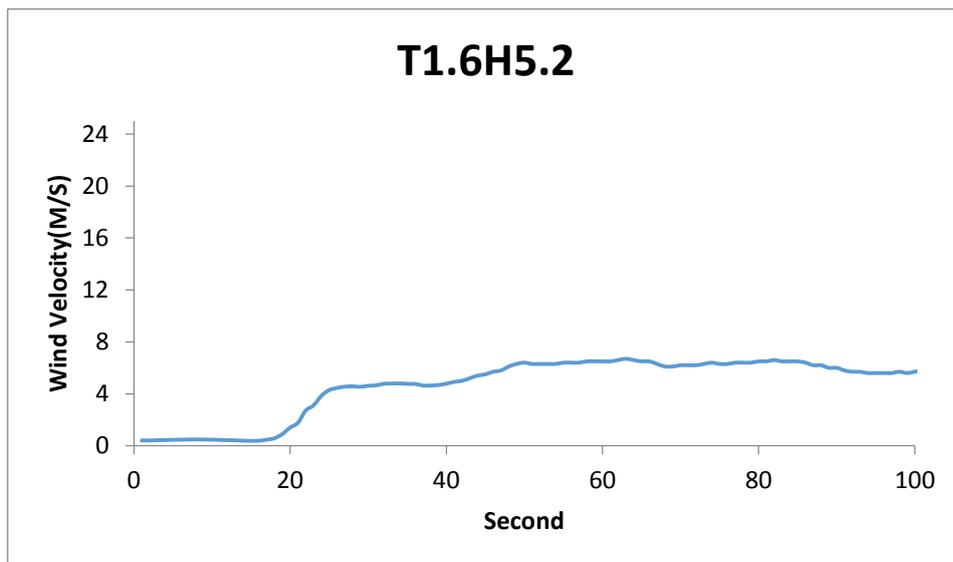
前牆開口率 100%週期 2 波高 8



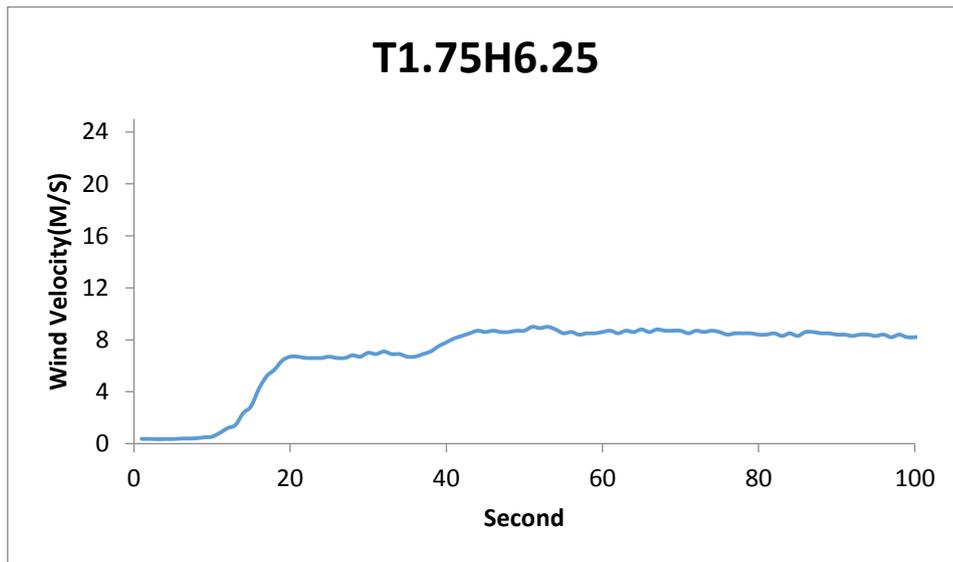
前牆開口率 100%週期 2 波高 10



前牆開口率 100%週期 2 波高 12

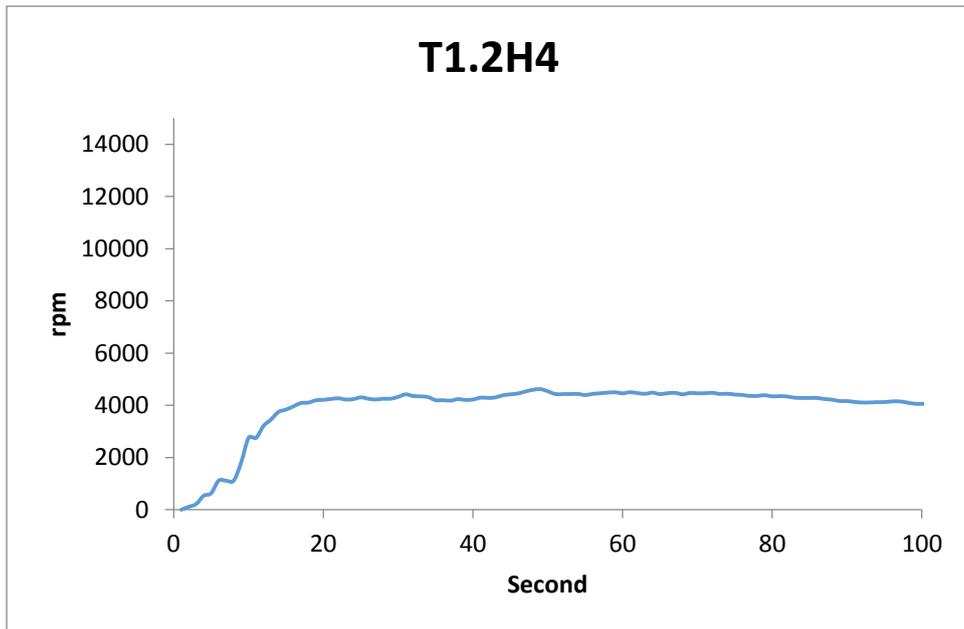


前牆開口率 100%週期 1.6 波高 5.2

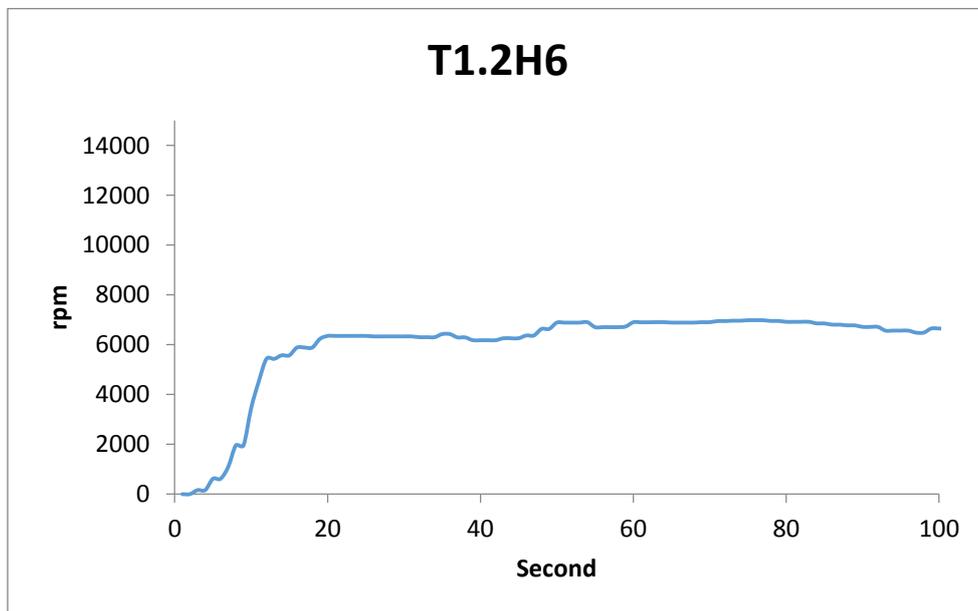


前牆開口率 100%週期 1.75 波高 6.25

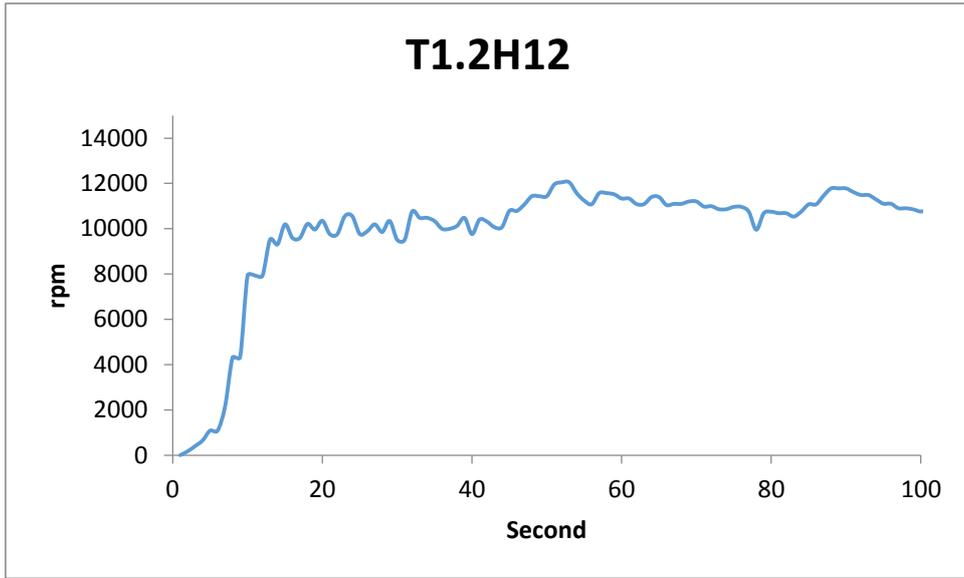
附件四 轉速圖



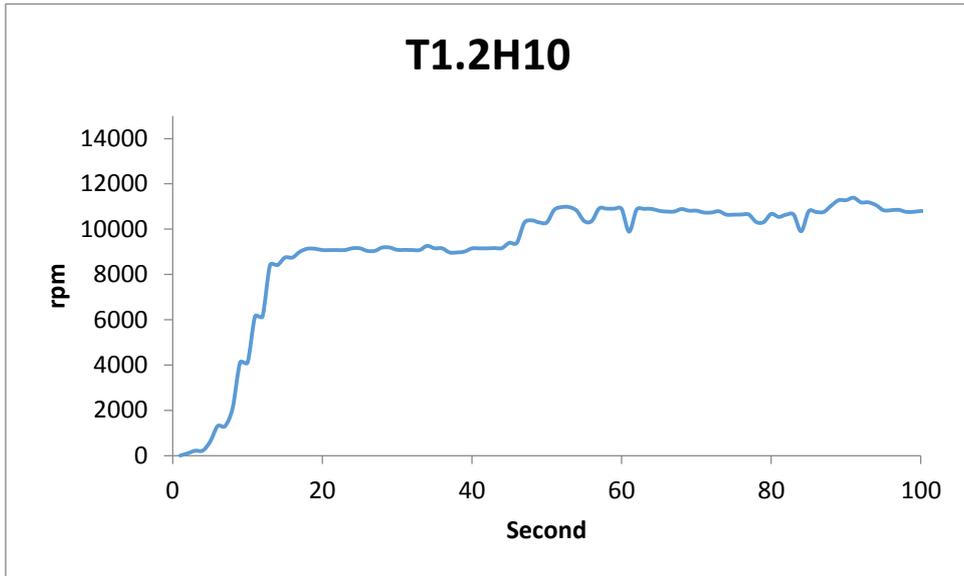
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 之單斜無負載轉速



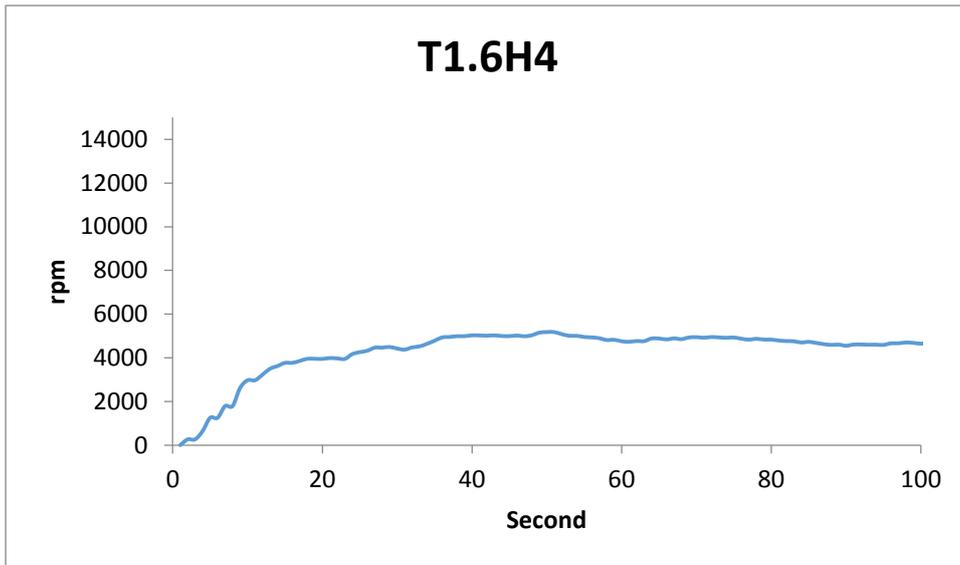
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 之單斜無負載轉速



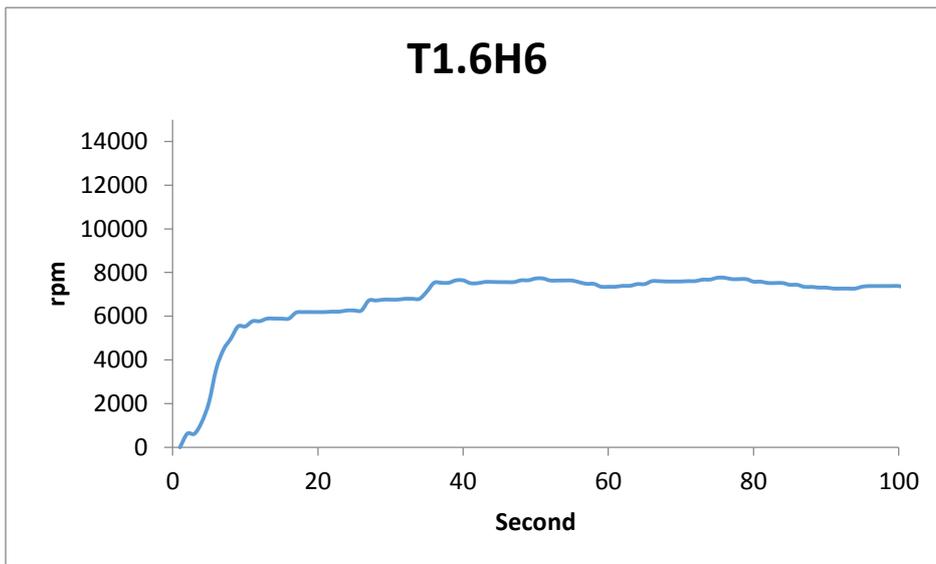
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 8 之單斜無負載轉速



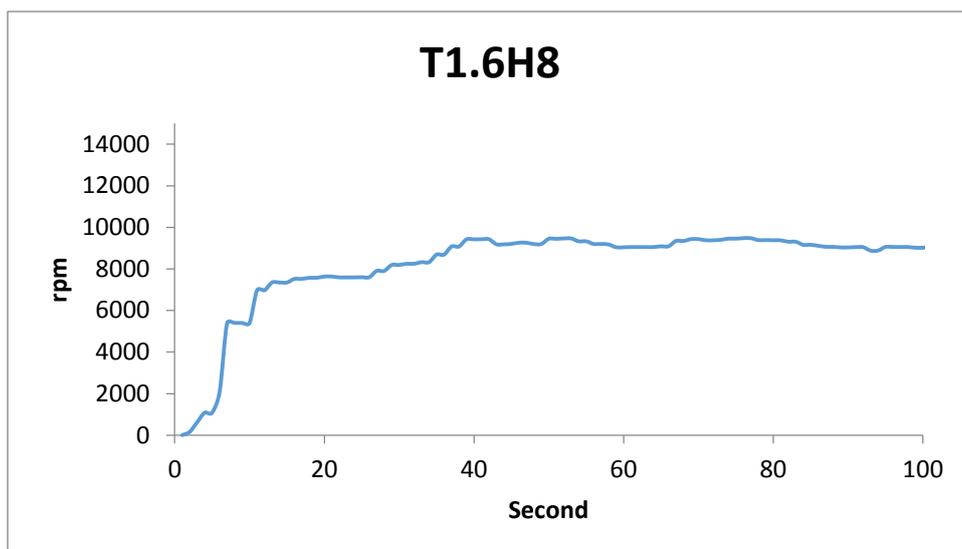
前牆開口率 35%1.2 波高 10 之單斜無負載轉速



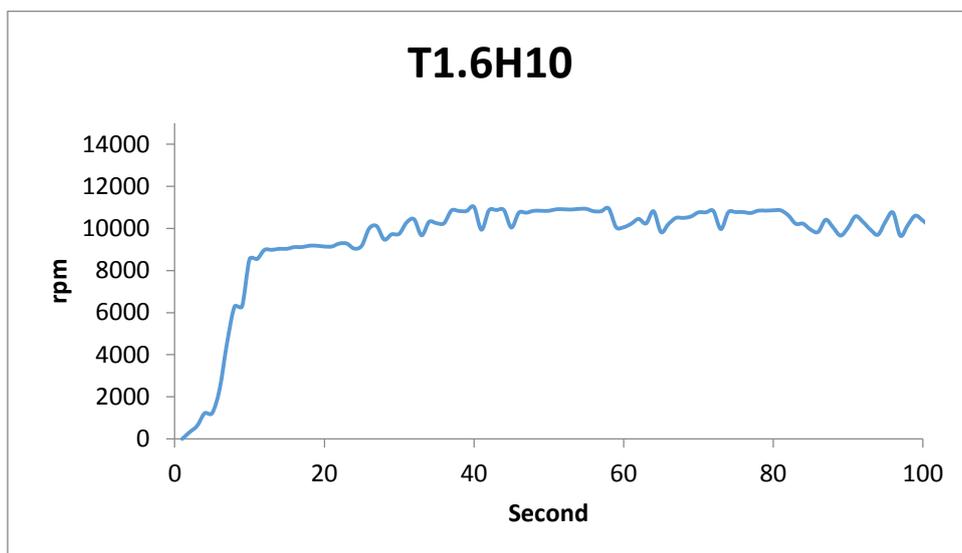
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 之單斜無負載轉速



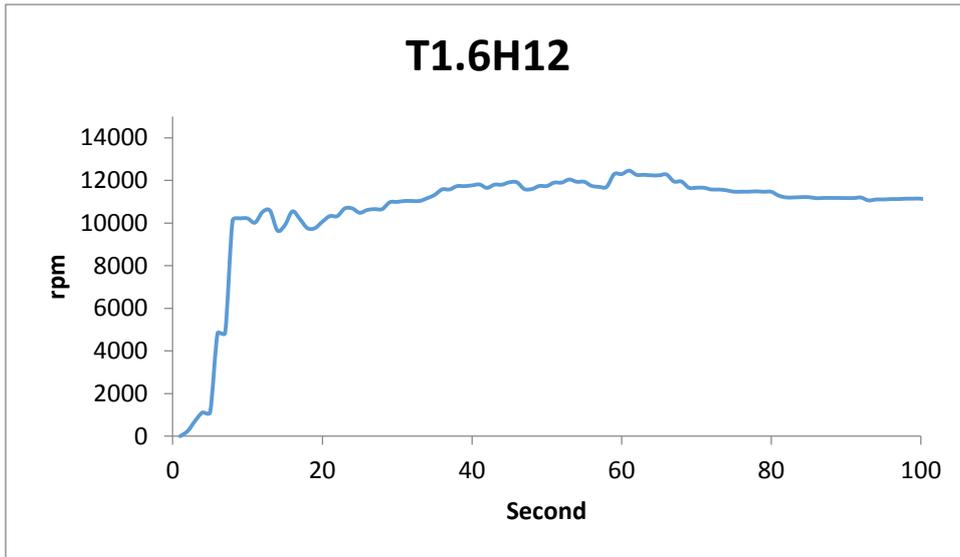
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 之單斜無負載轉速



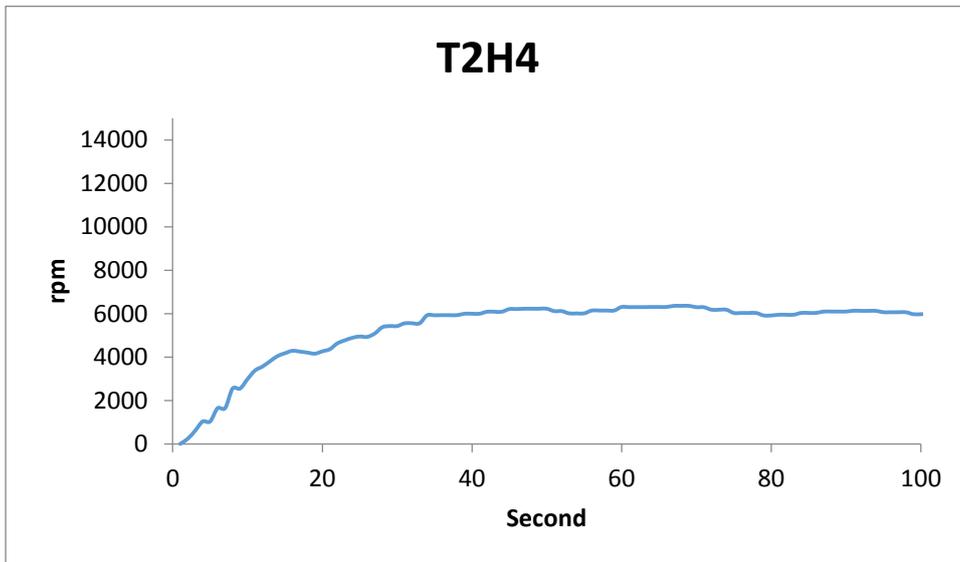
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 之單斜無負載轉速



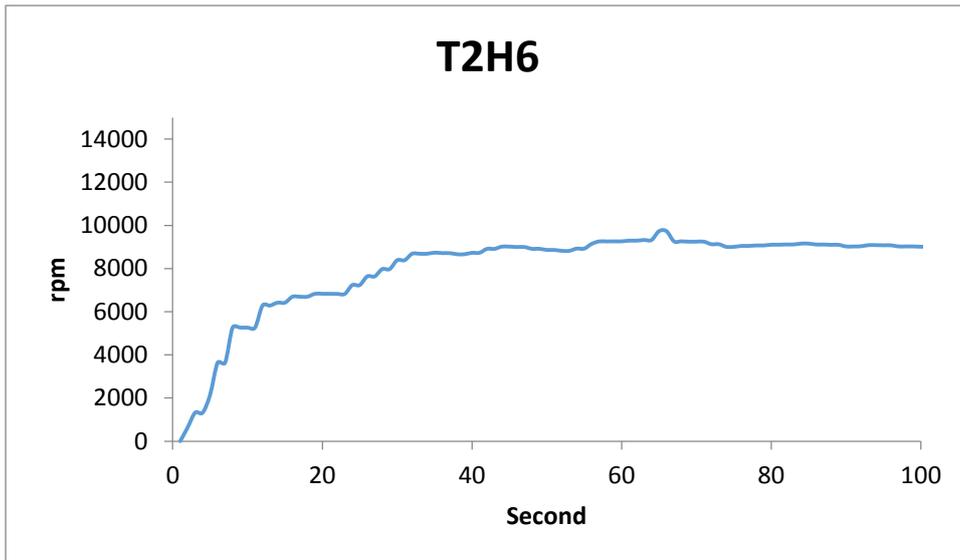
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 之單斜無負載轉速



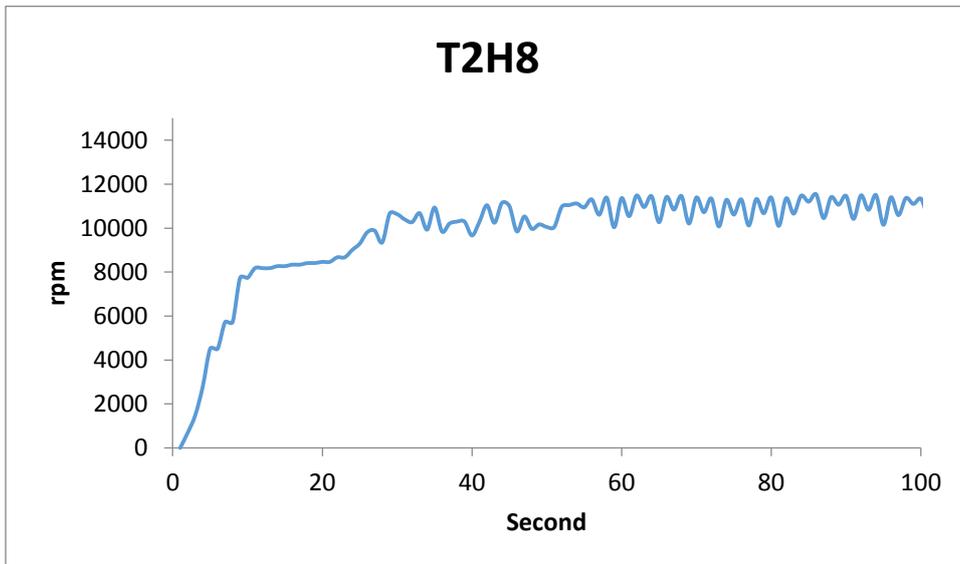
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 之單斜無負載轉速



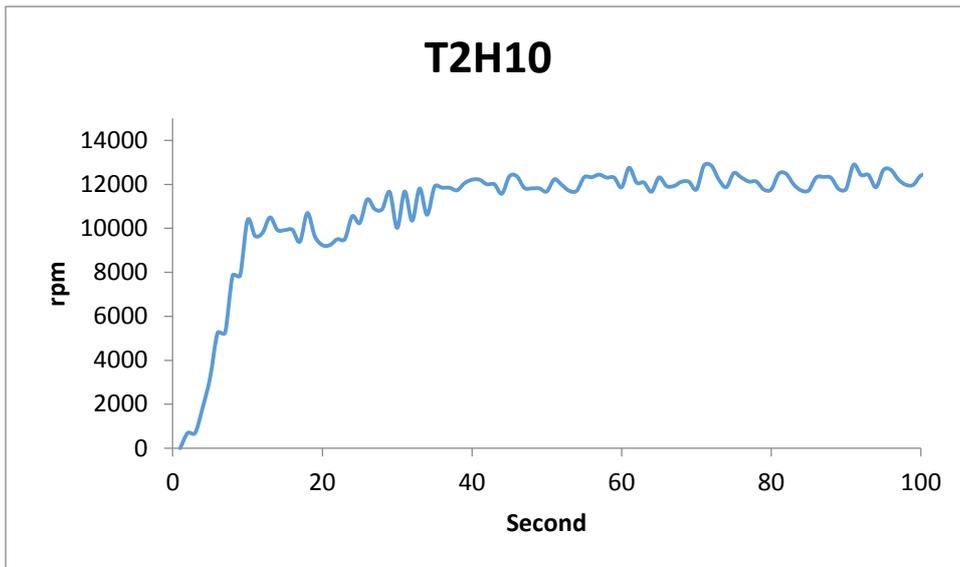
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 之單斜無負載轉速



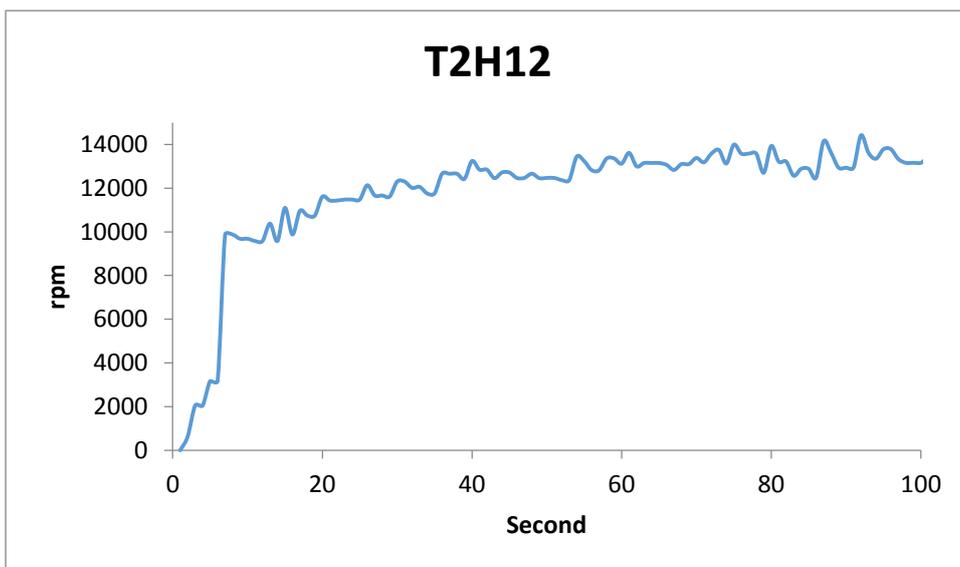
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 之單斜無負載轉速



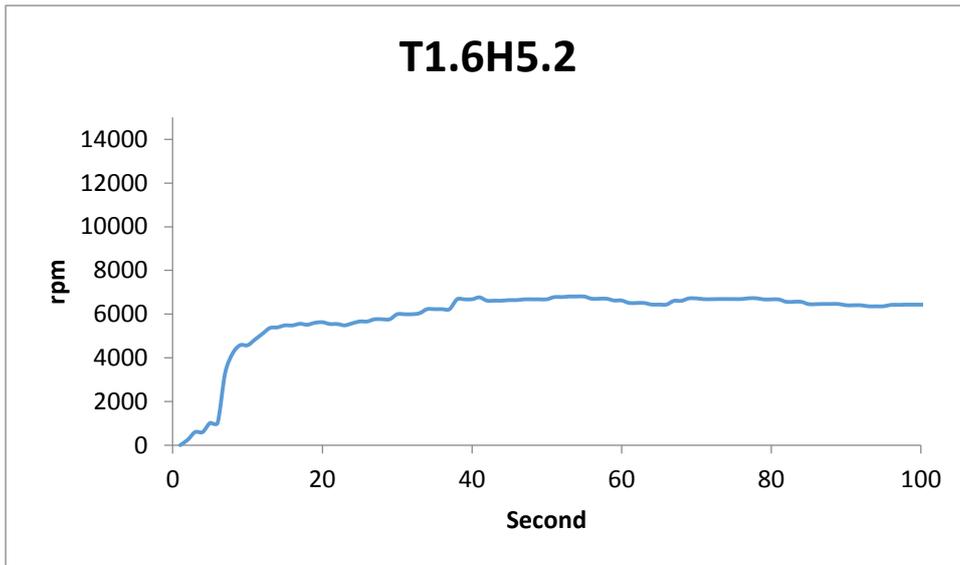
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 之單斜無負載轉速



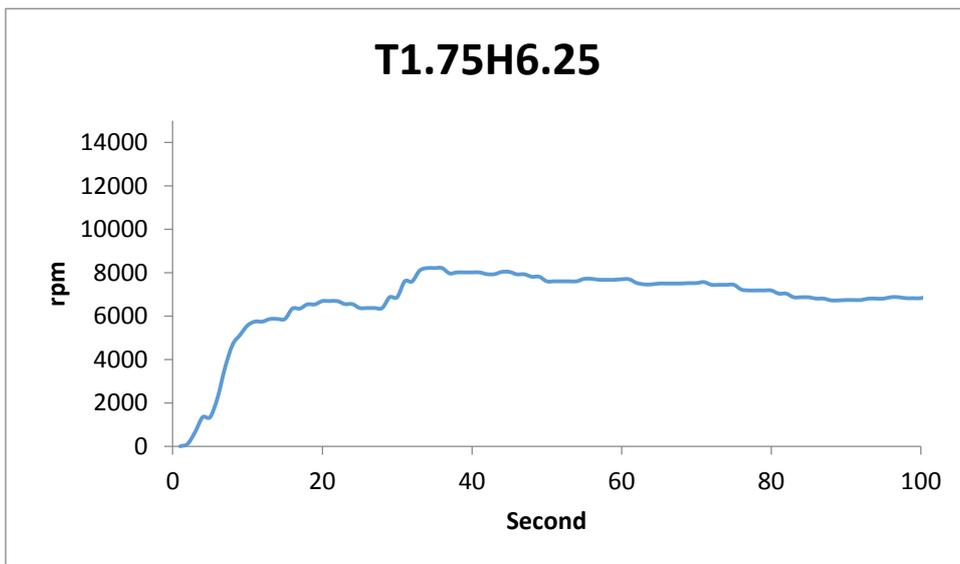
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 之單斜無負載轉速



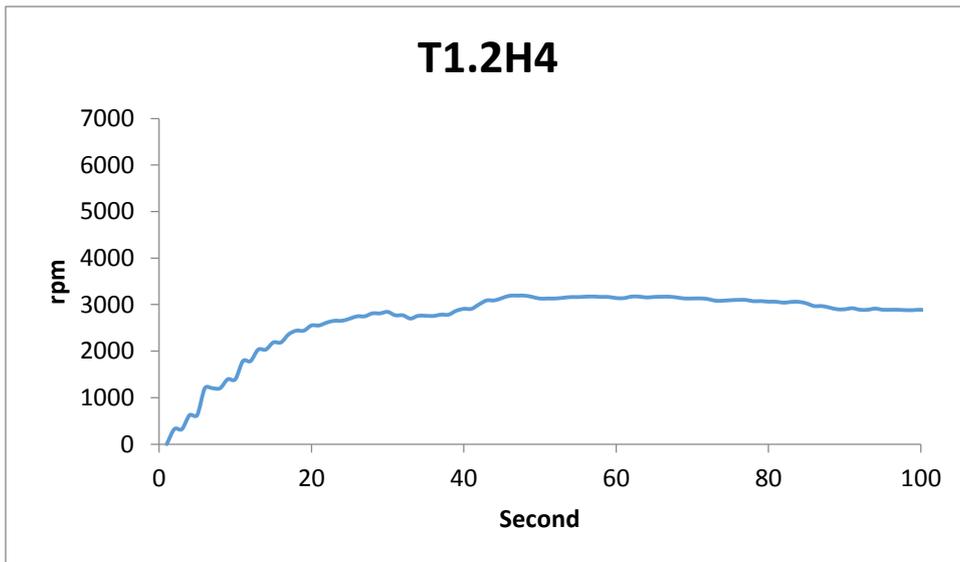
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 之單斜無負載轉速



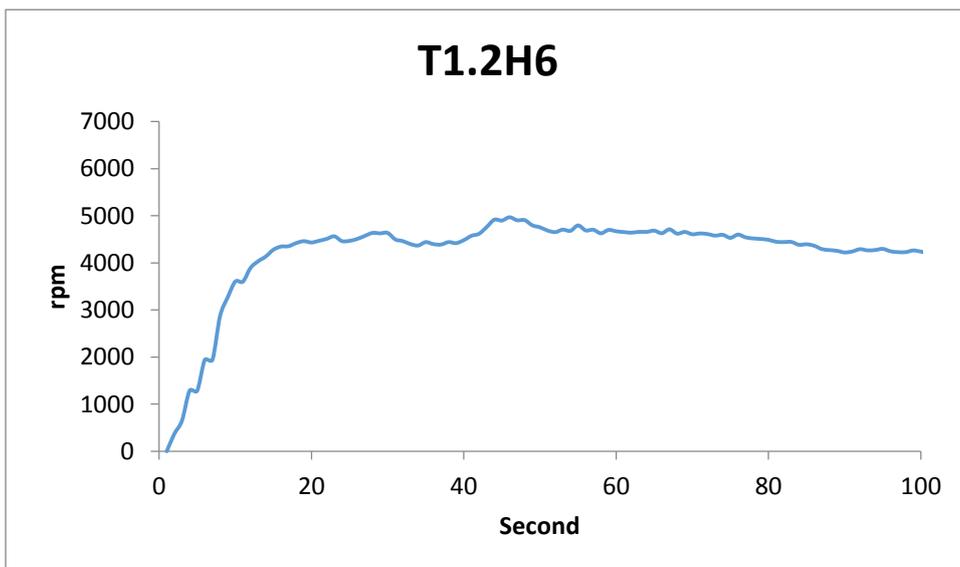
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 之單斜無負載轉速



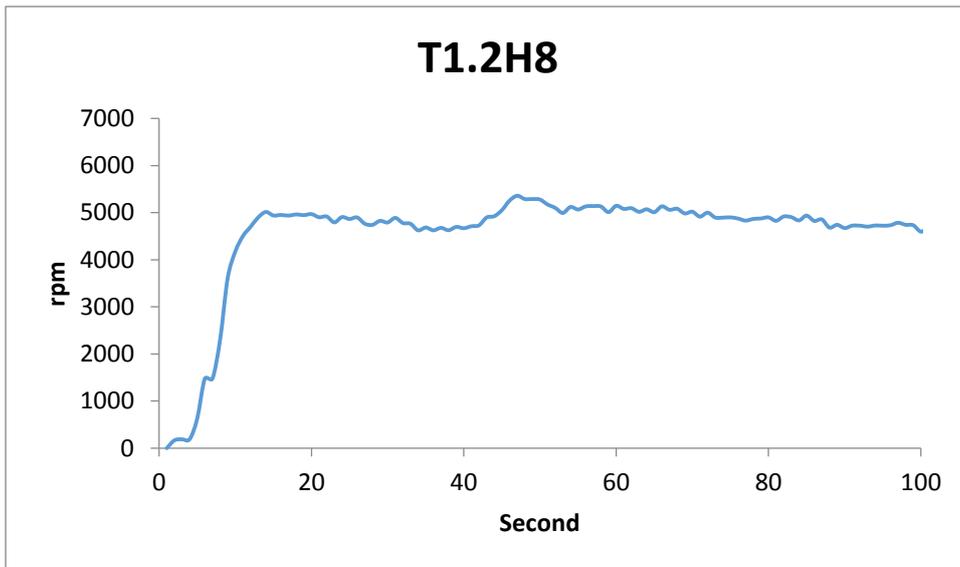
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 之單斜無負載轉速



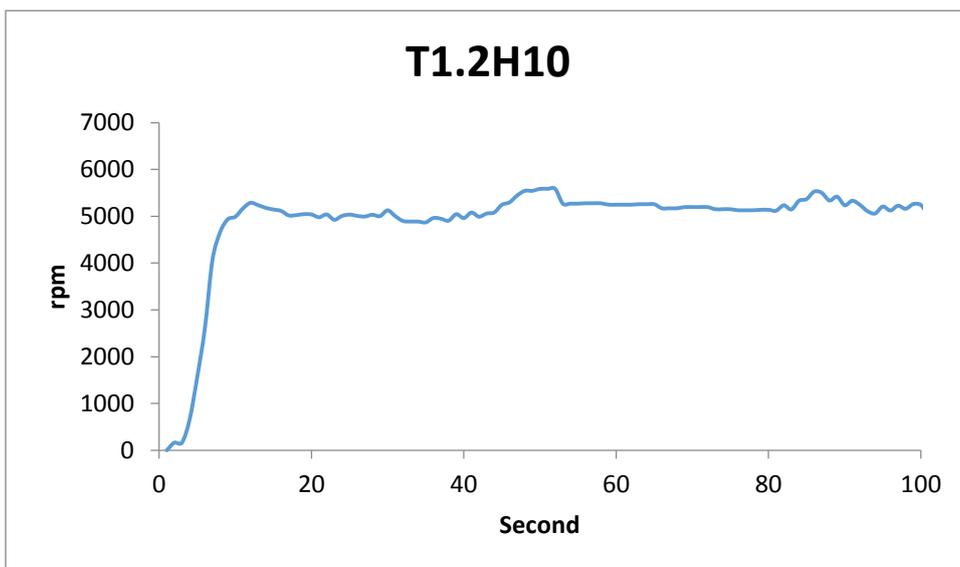
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 之單斜直流負載轉速



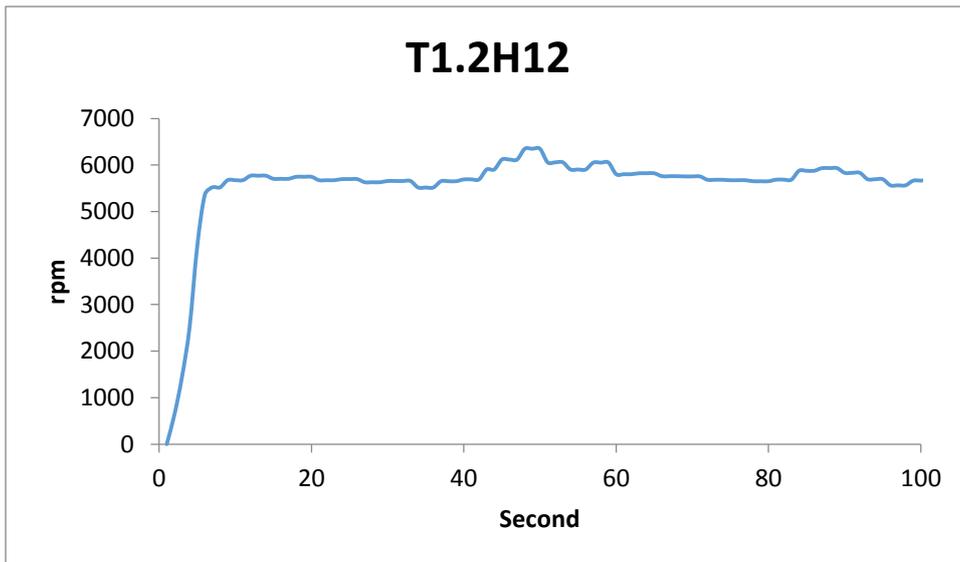
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 之單斜直流負載轉速



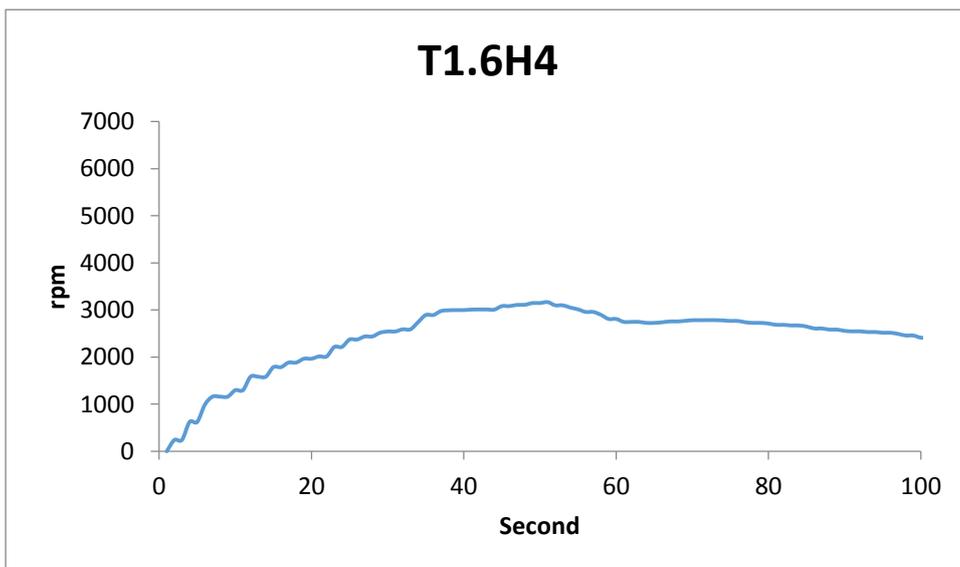
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 8 之單斜直流負載轉速



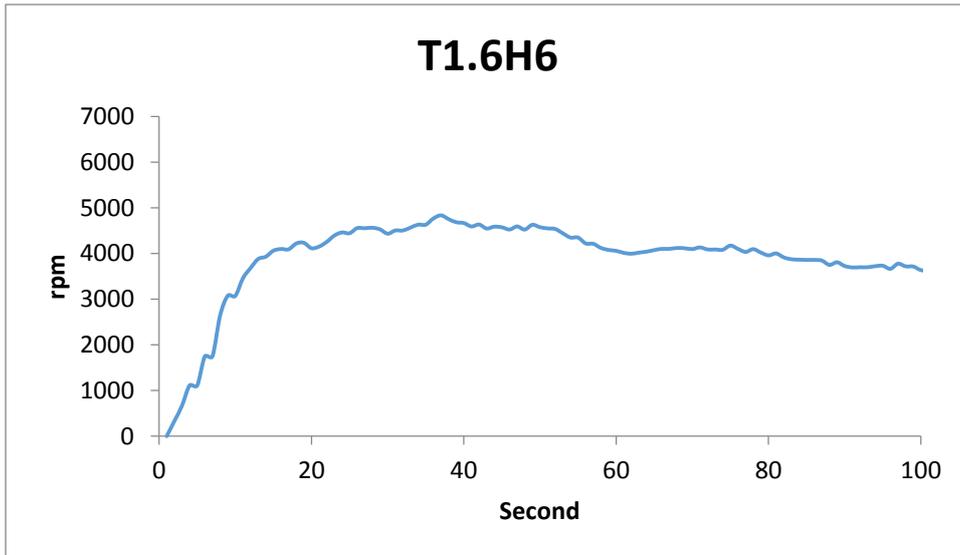
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 10 之單斜直流負載轉速



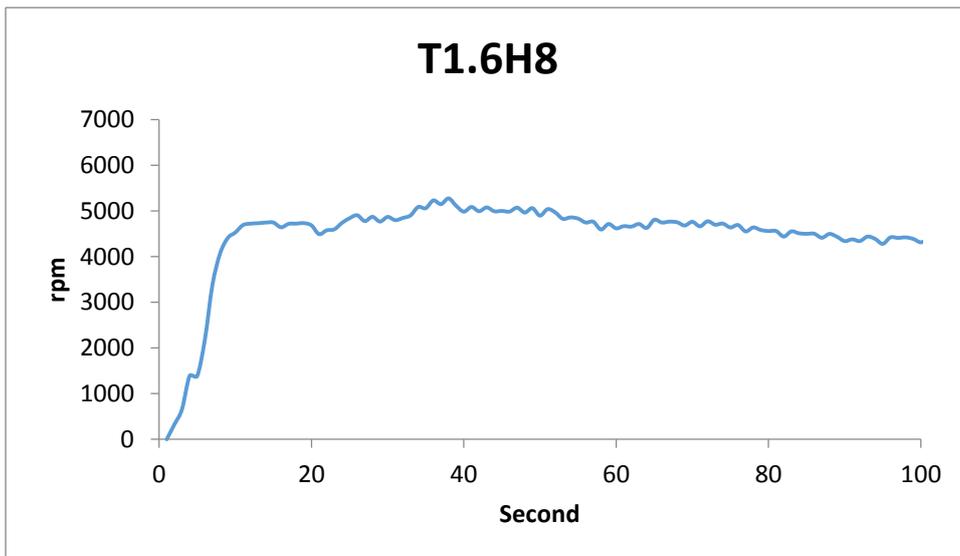
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 12 之單斜直流負載轉速



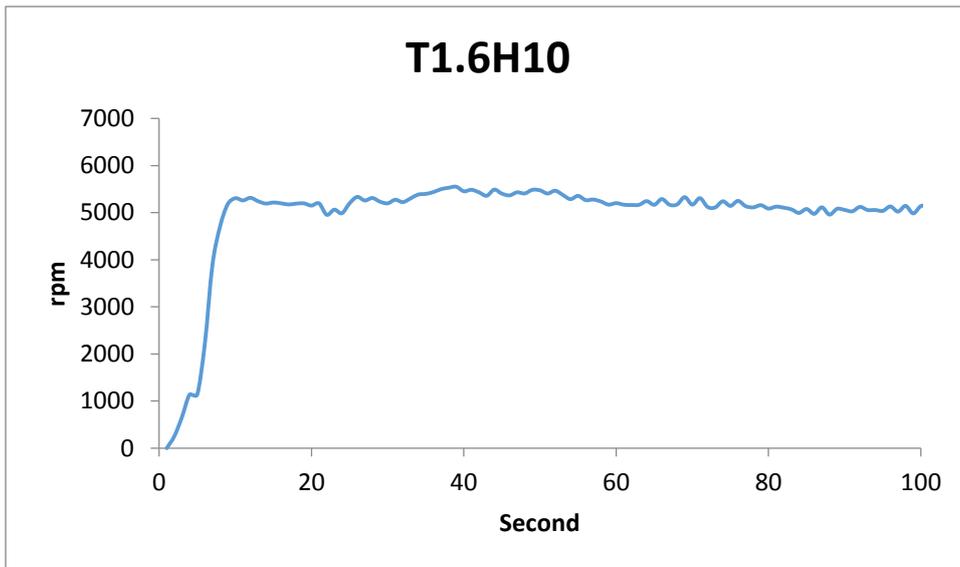
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 之單斜直流負載轉速



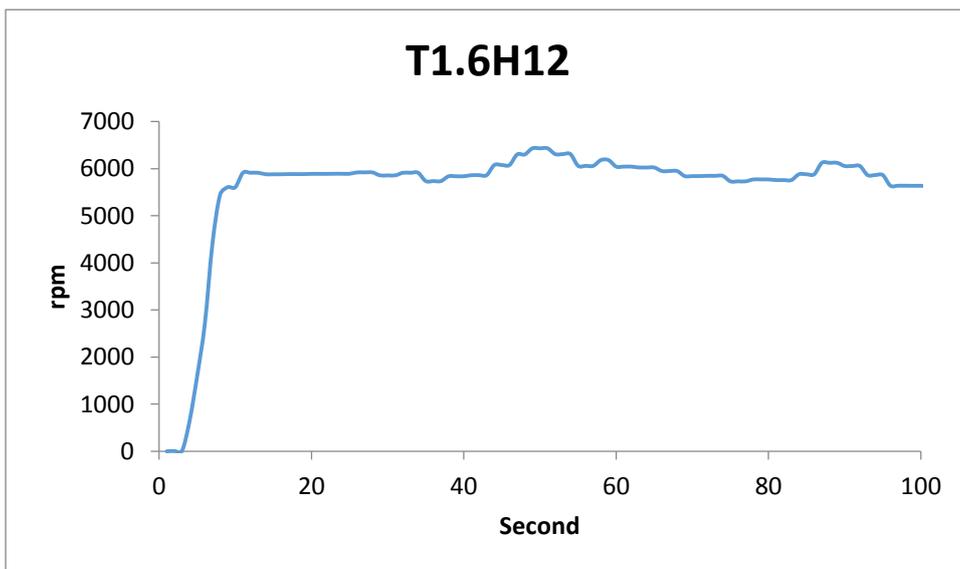
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 之單斜直流負載轉速



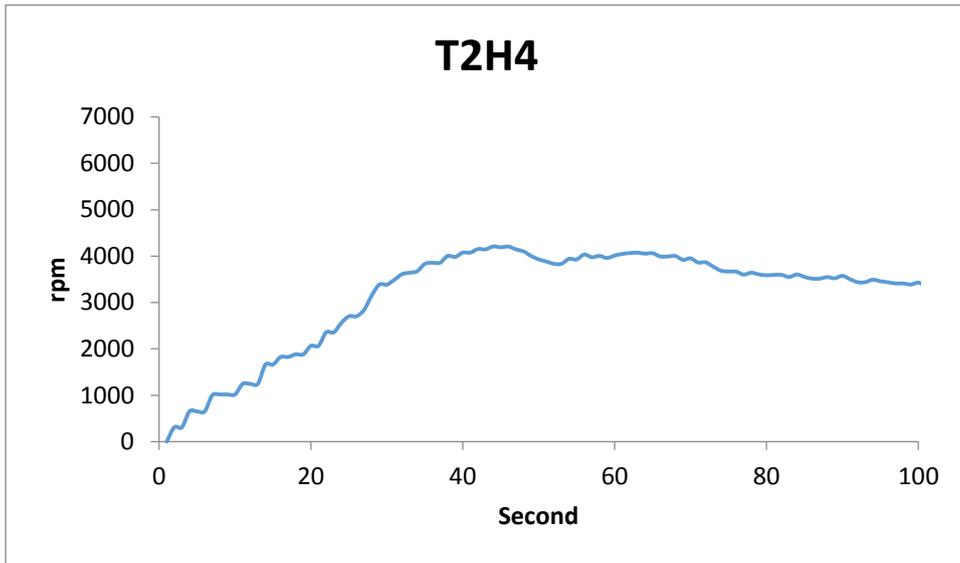
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 之單斜直流負載轉速



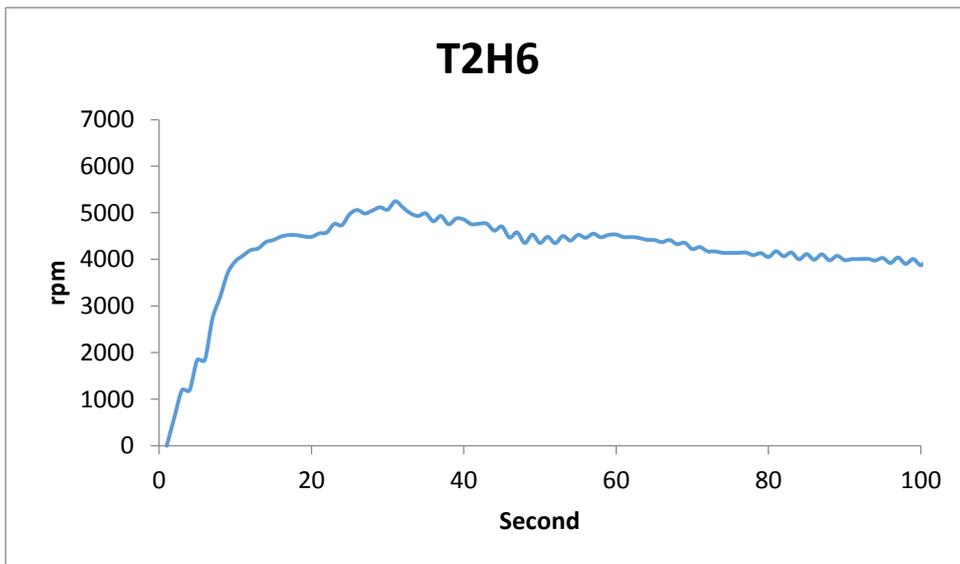
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 之單斜直流負載轉速



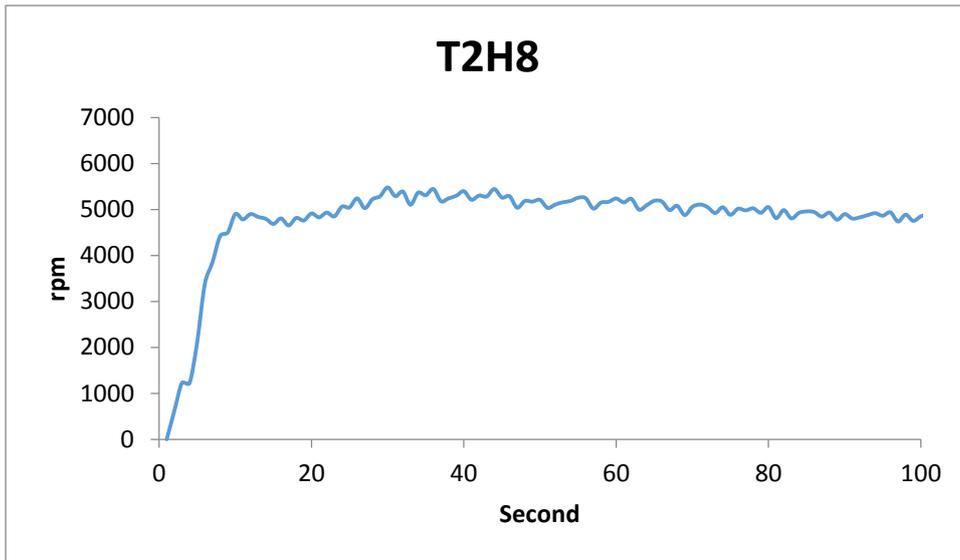
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 之單斜直流負載轉速



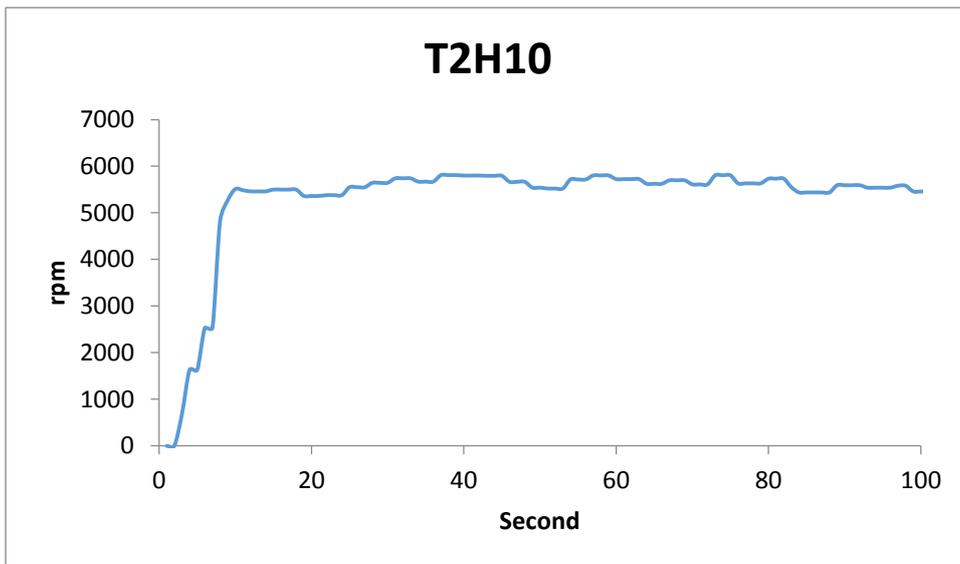
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 之單斜直流負載轉速



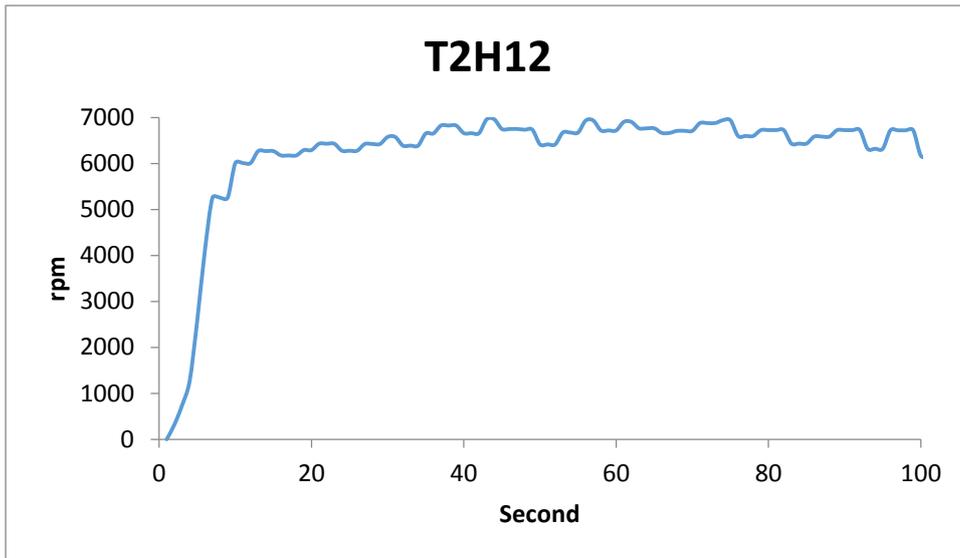
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 之單斜直流負載轉速



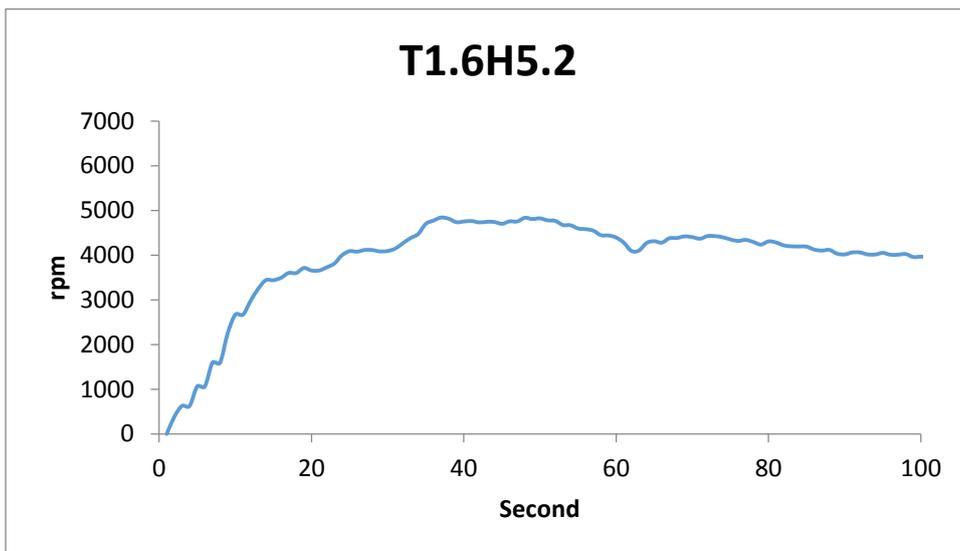
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 之單斜直流負載轉速



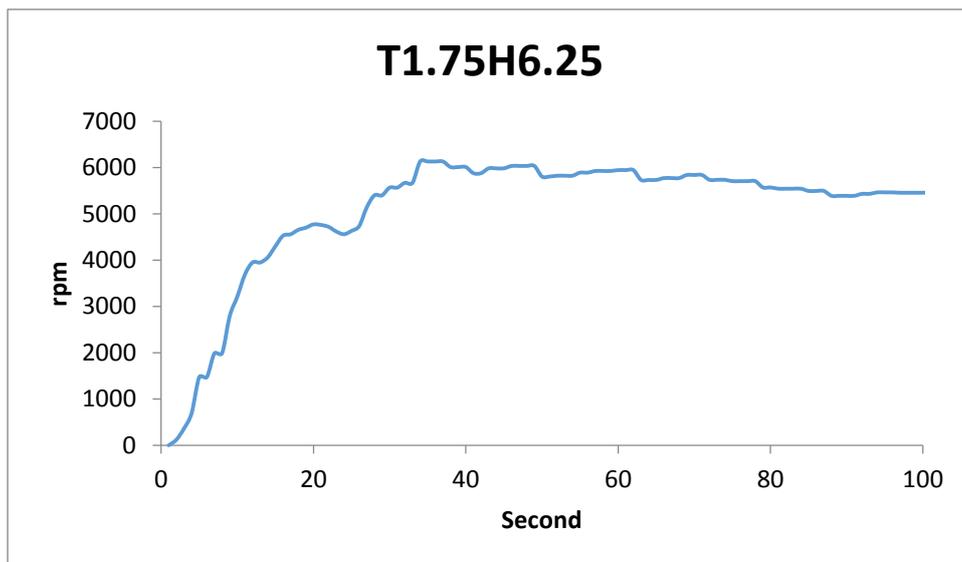
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 之單斜直流負載轉速



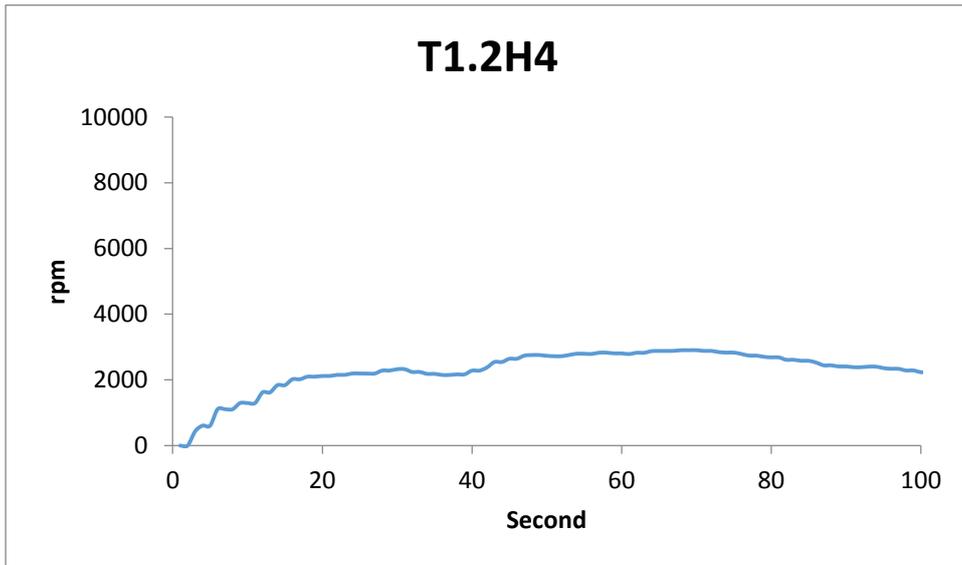
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 之單斜直流負載轉速



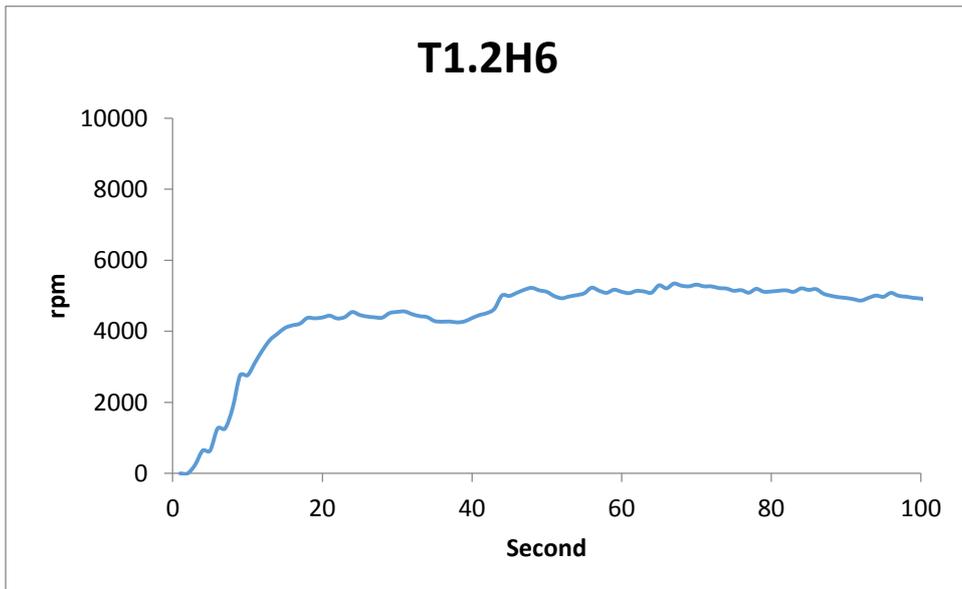
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 之單斜直流負載轉速



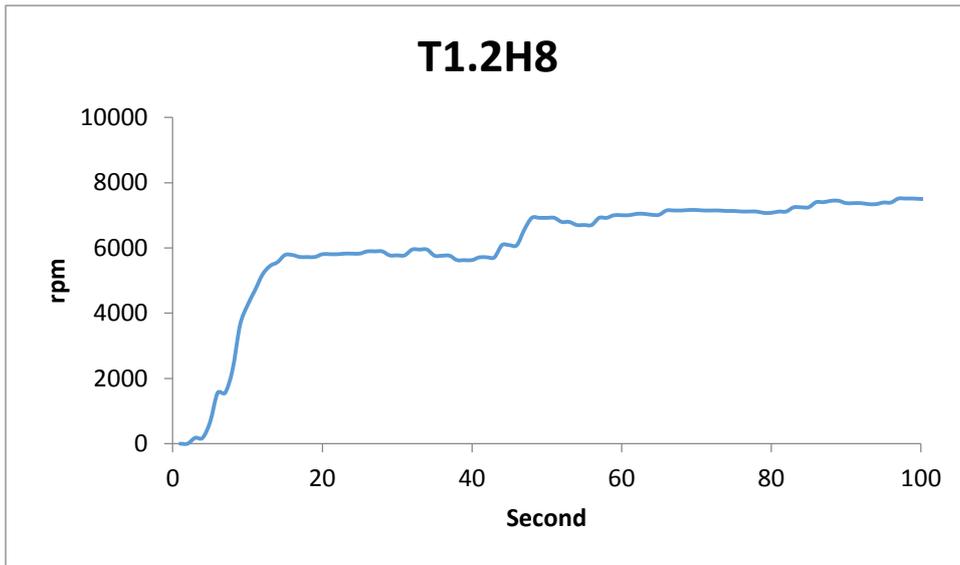
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 之單斜直流負載轉速



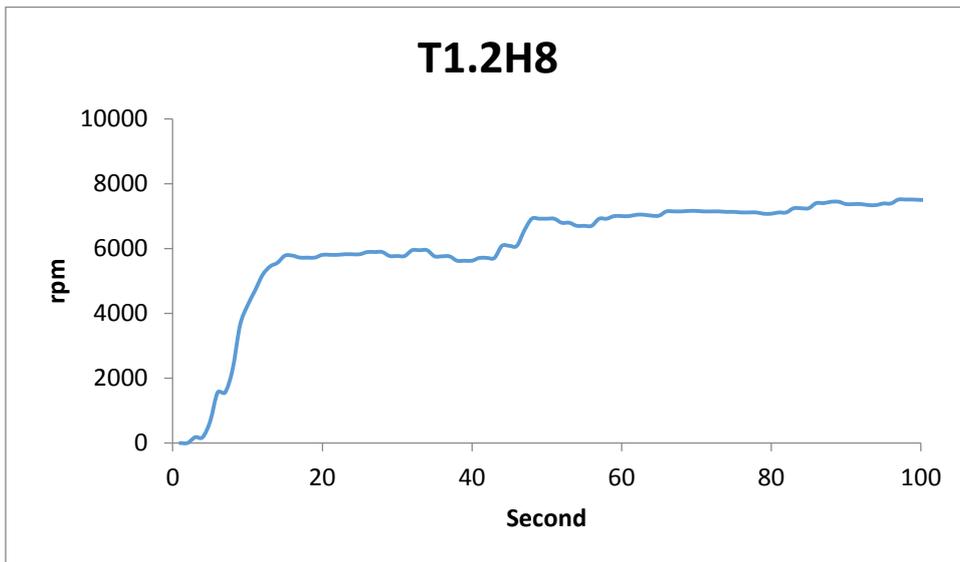
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 4 之單斜負載轉速



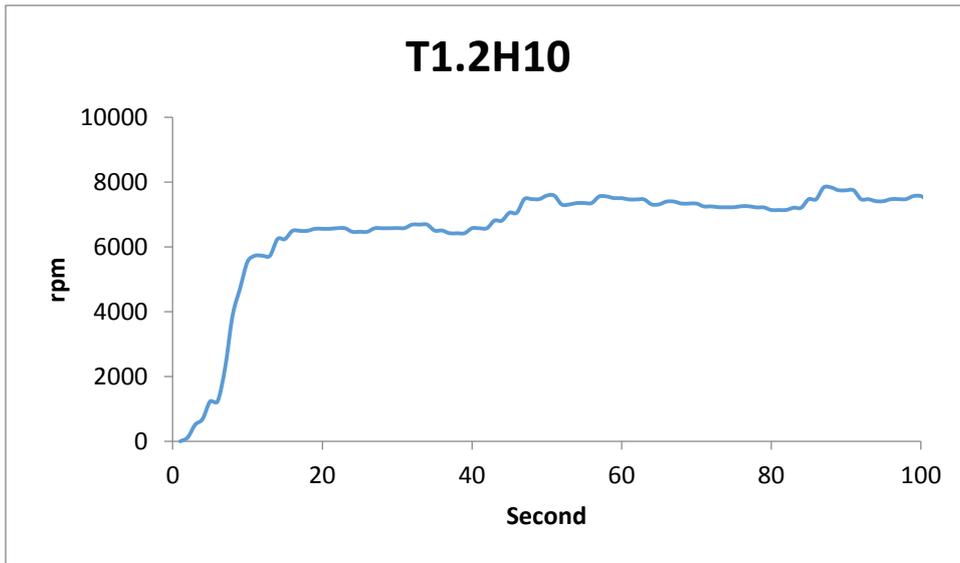
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 6 之單斜負載轉速



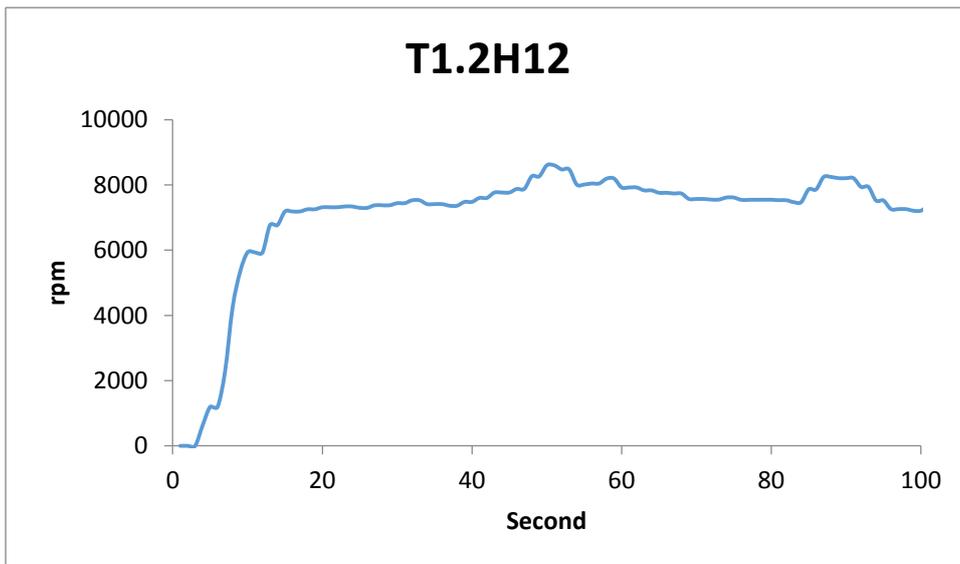
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 之單斜負載轉速



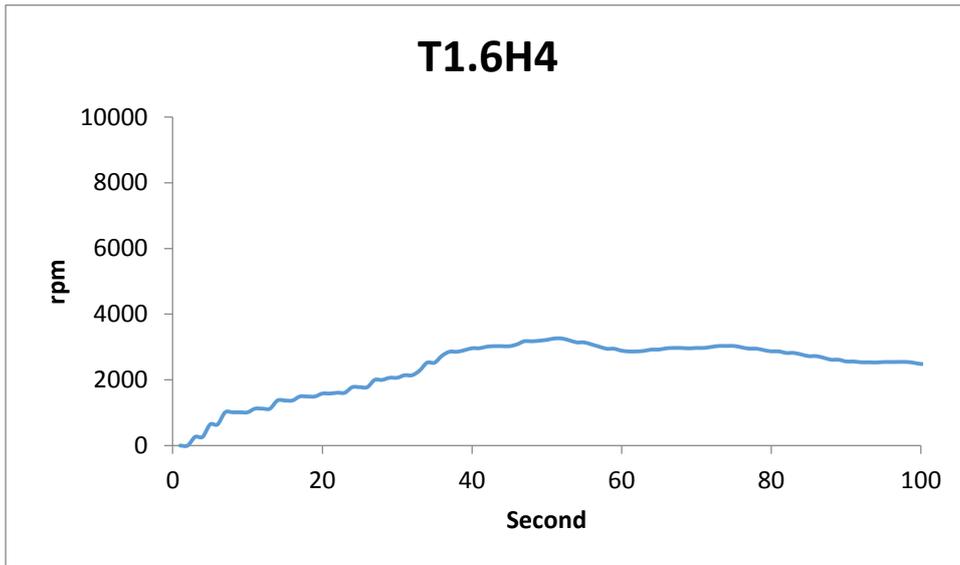
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 之單斜負載轉速



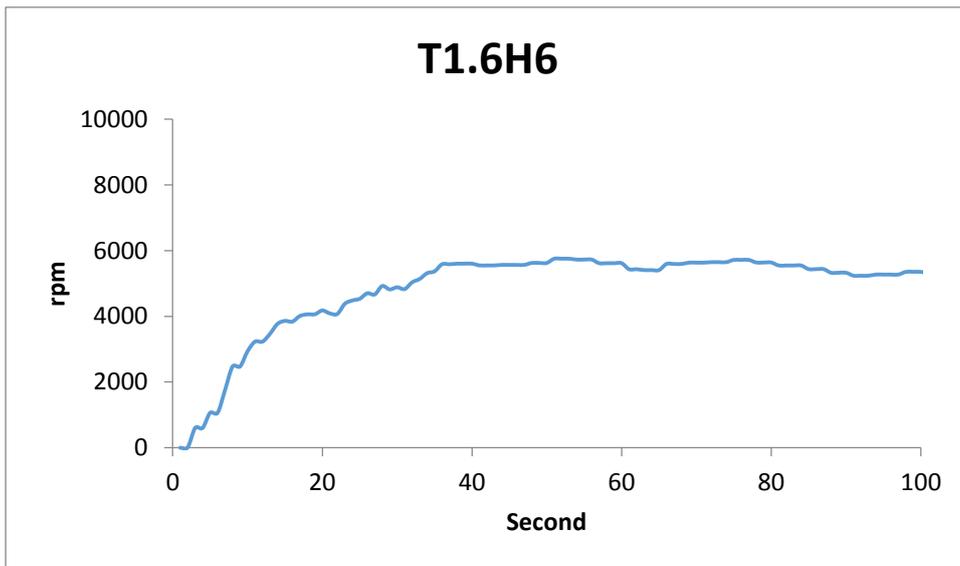
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 10 之單斜負載轉速



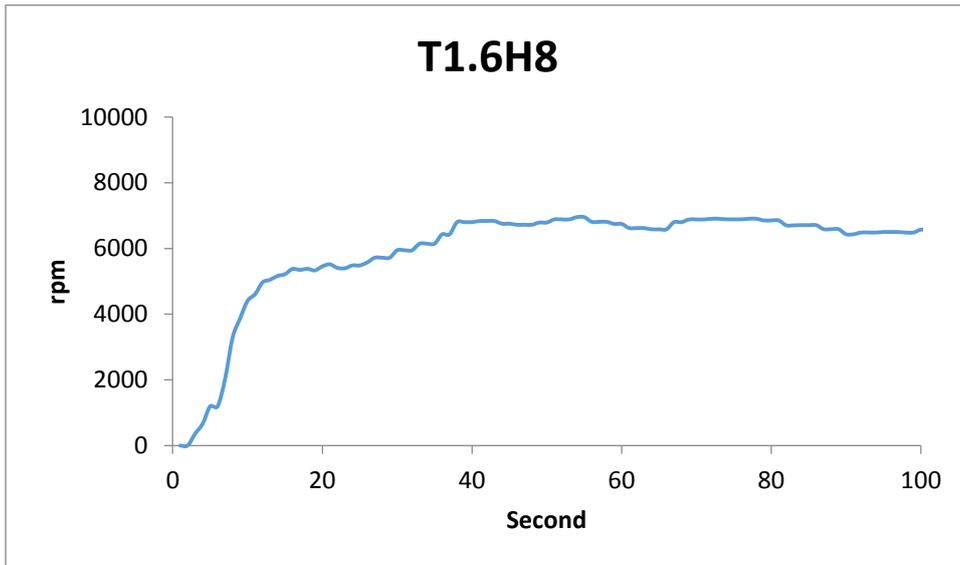
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 12 之單斜負載轉速



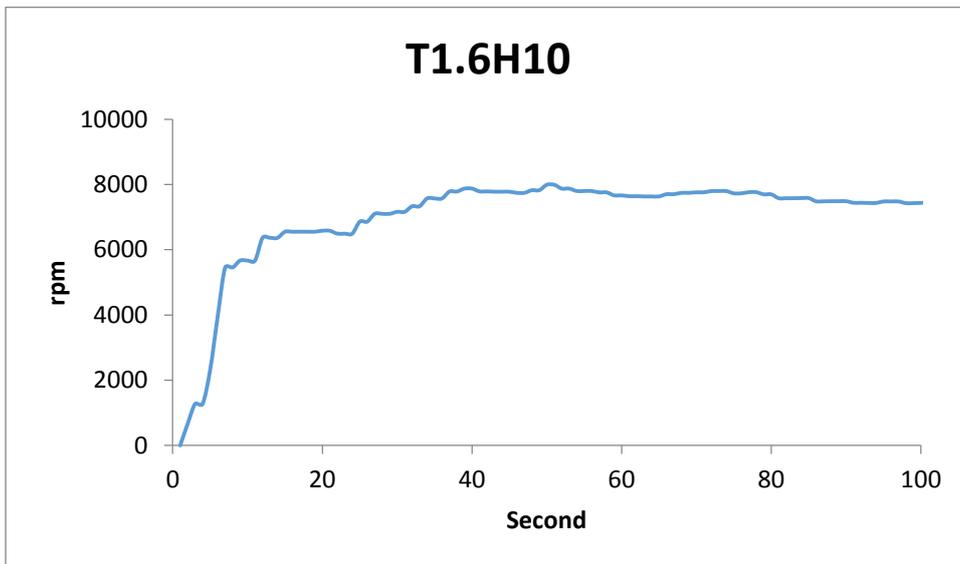
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 4 之單斜負載轉速



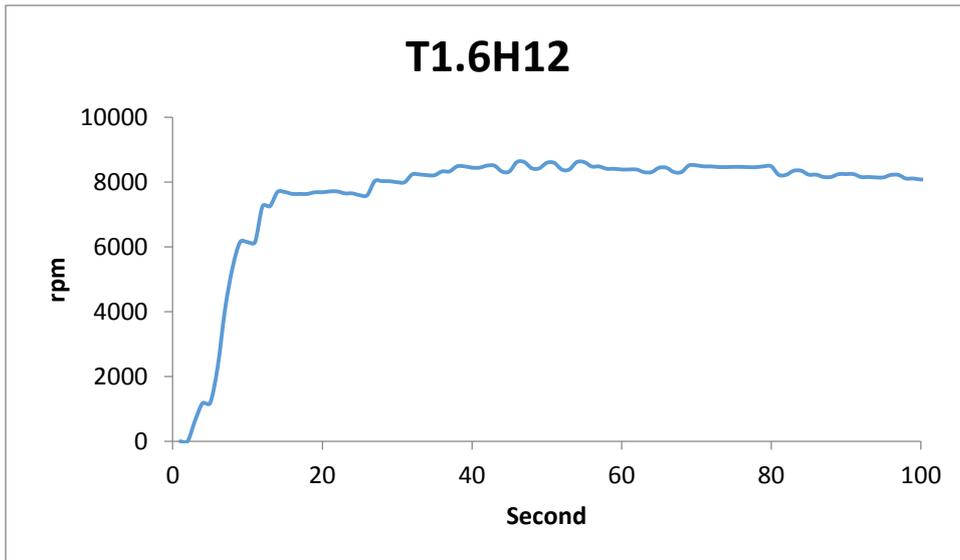
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 6 之單斜負載轉速



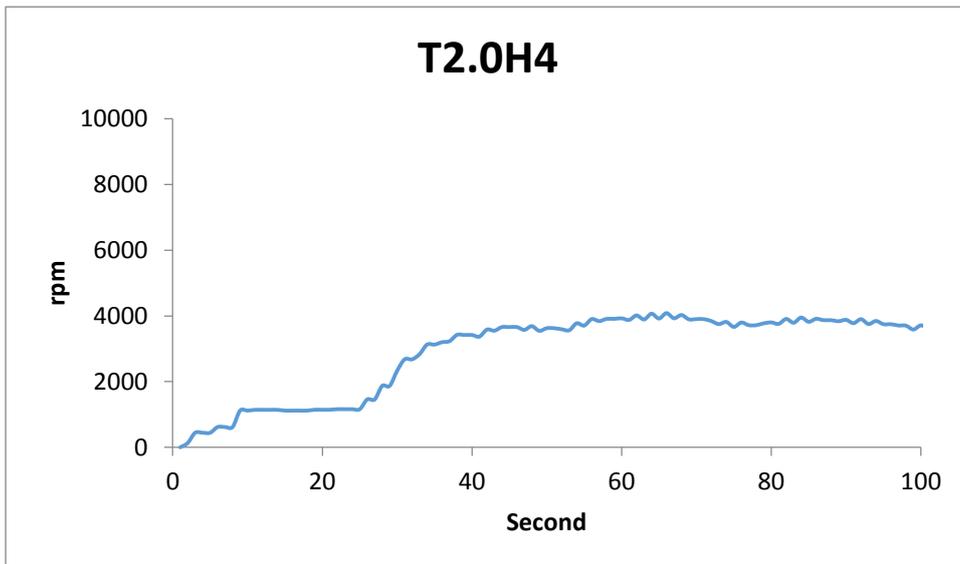
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 8 之單斜負載轉速



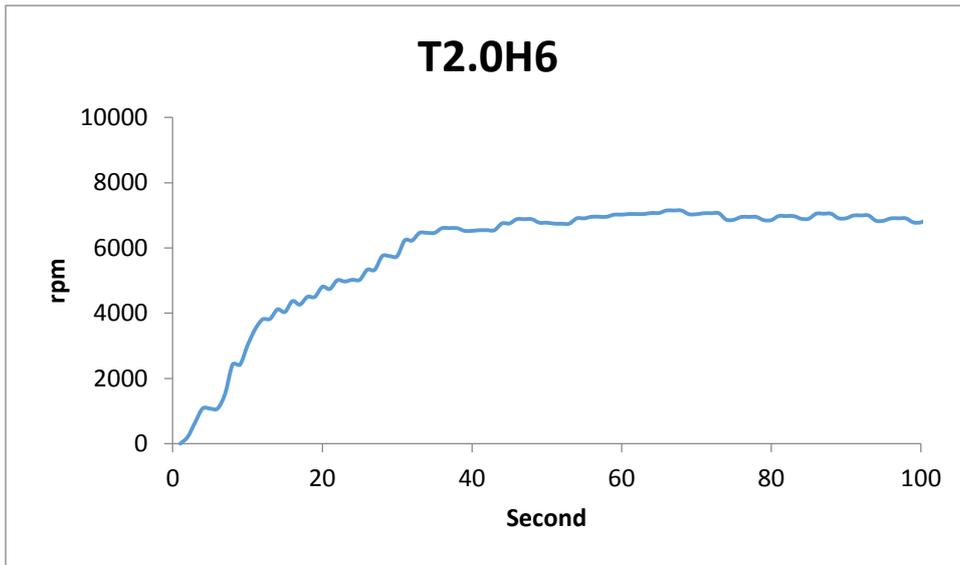
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 10 之單斜負載轉速



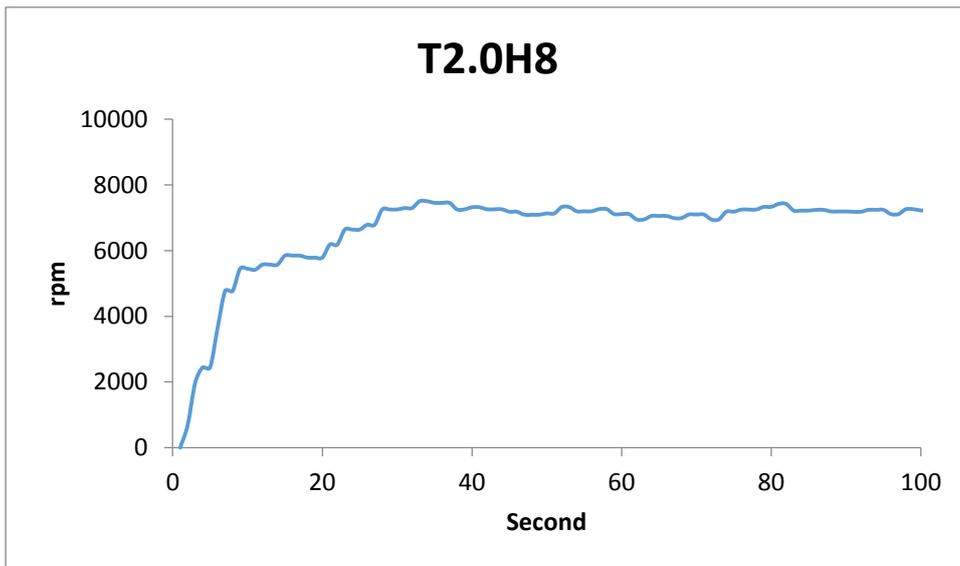
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 12 之單斜負載轉速



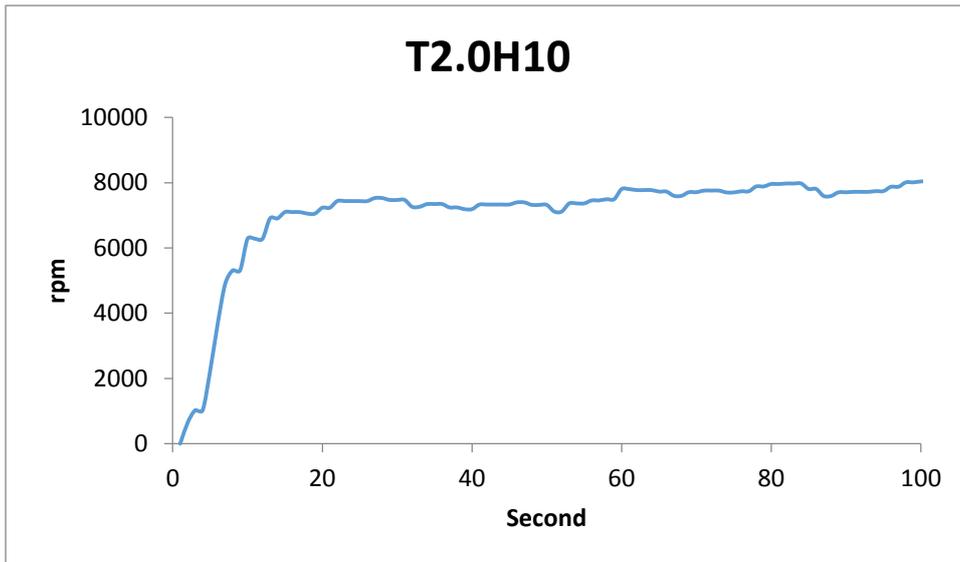
前牆開口率 100%週期 2 波高 4 之單斜負載轉速



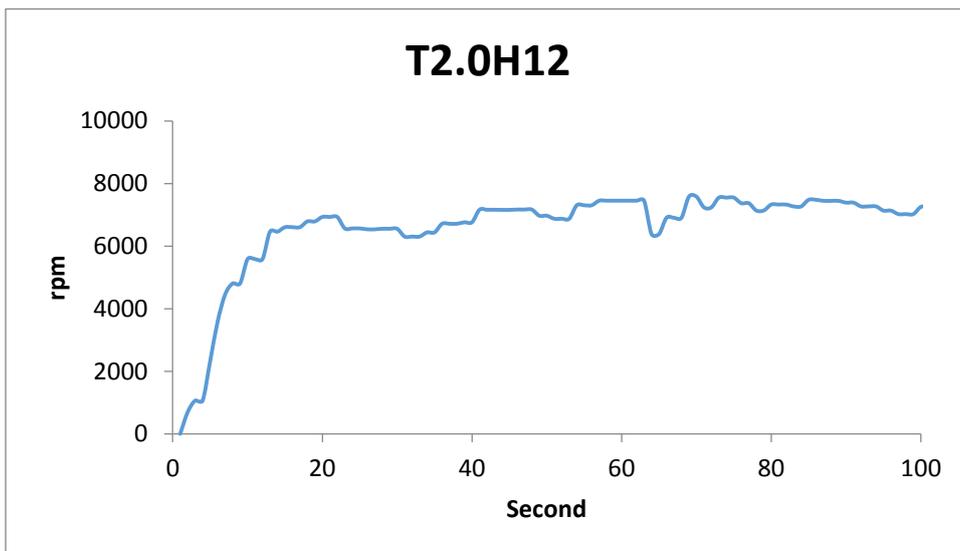
前牆開口率 100%週期 2 波高 6 之單斜負載轉速



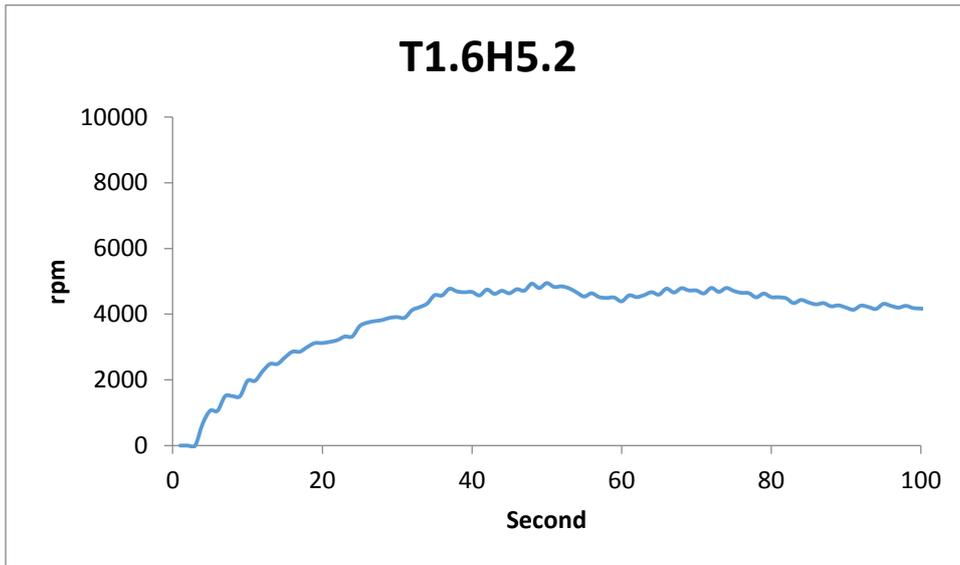
前牆開口率 100%週期 2 波高 8 之單斜負載轉速



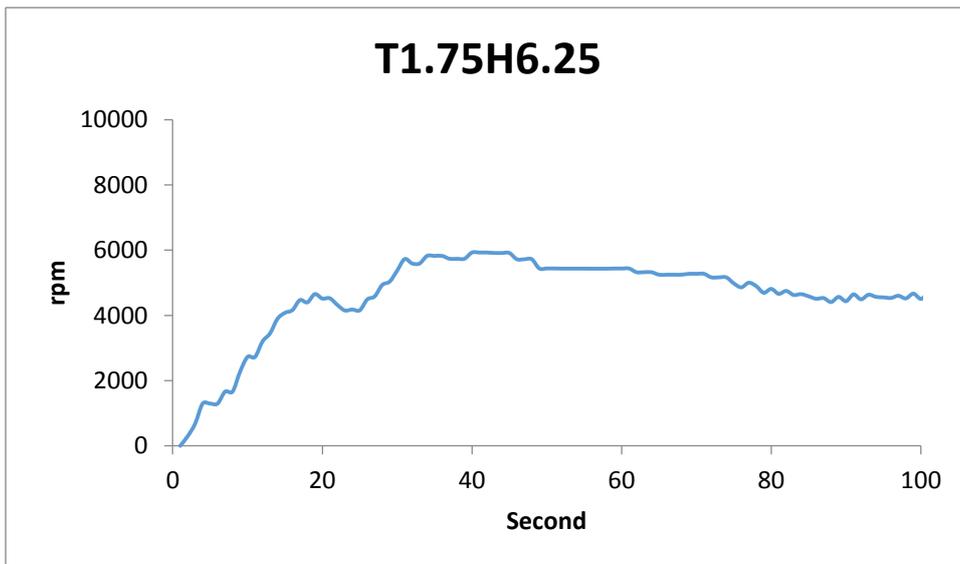
前牆開口率 100%週期 2 波高 10 之單斜負載轉速



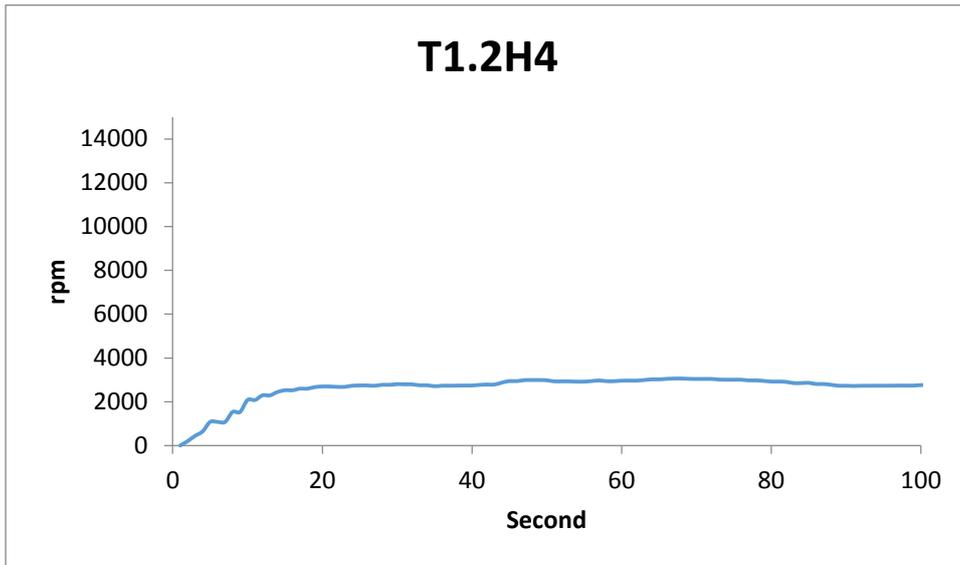
前牆開口率 100%週期 2 波高 12 之單斜負載轉速



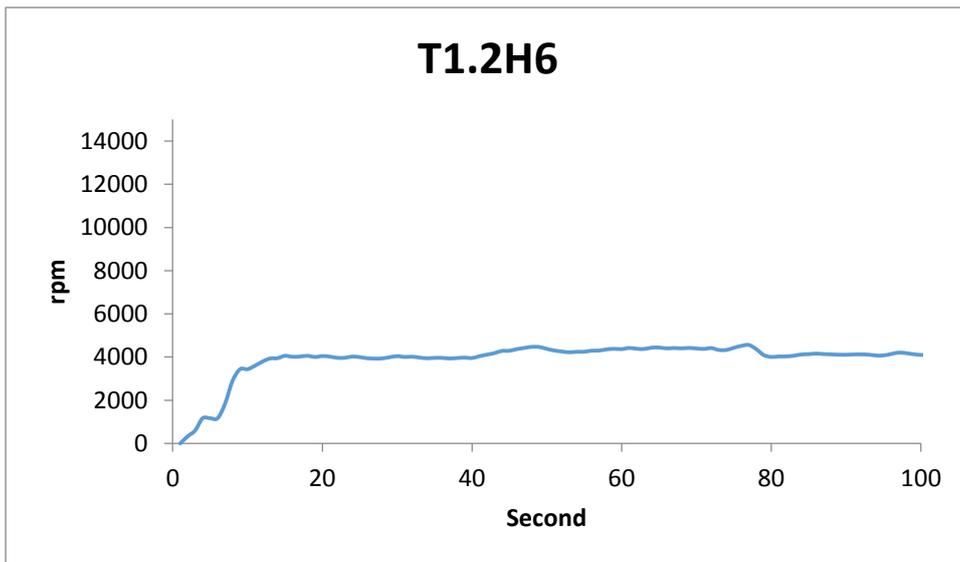
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 5.2 之單斜負載轉速



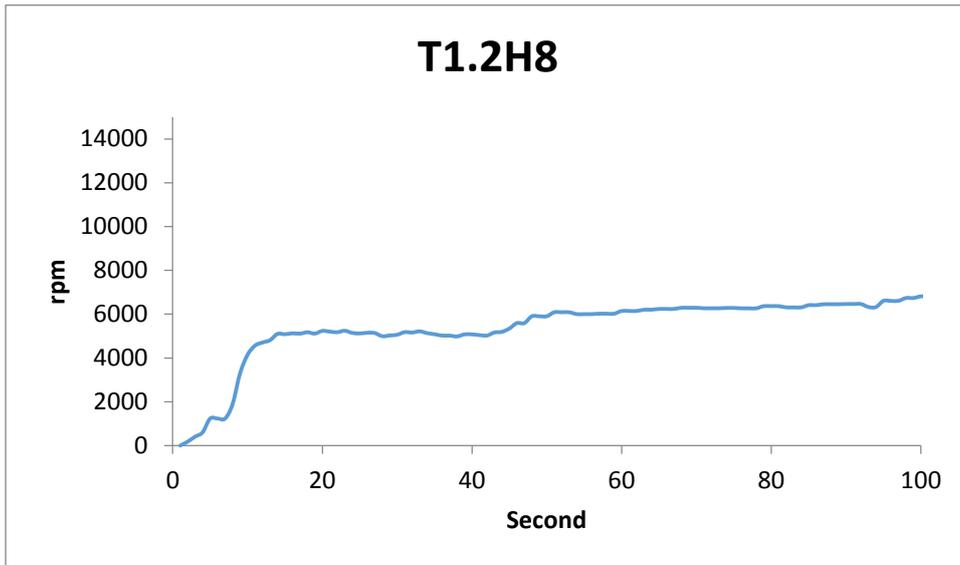
前牆開口率 100%週期 1.75 波高 6.25 之單斜負載轉速



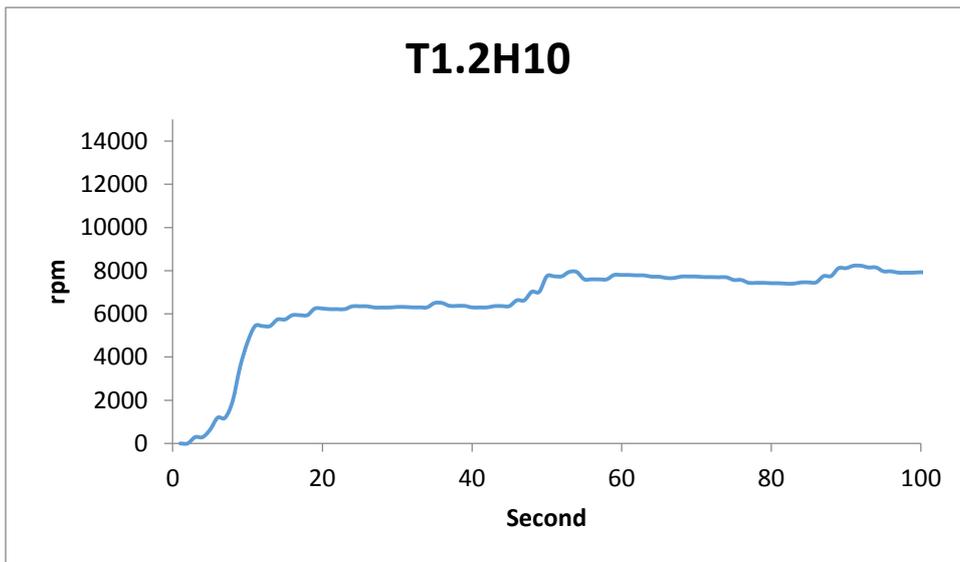
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 之雙斜無負載轉速



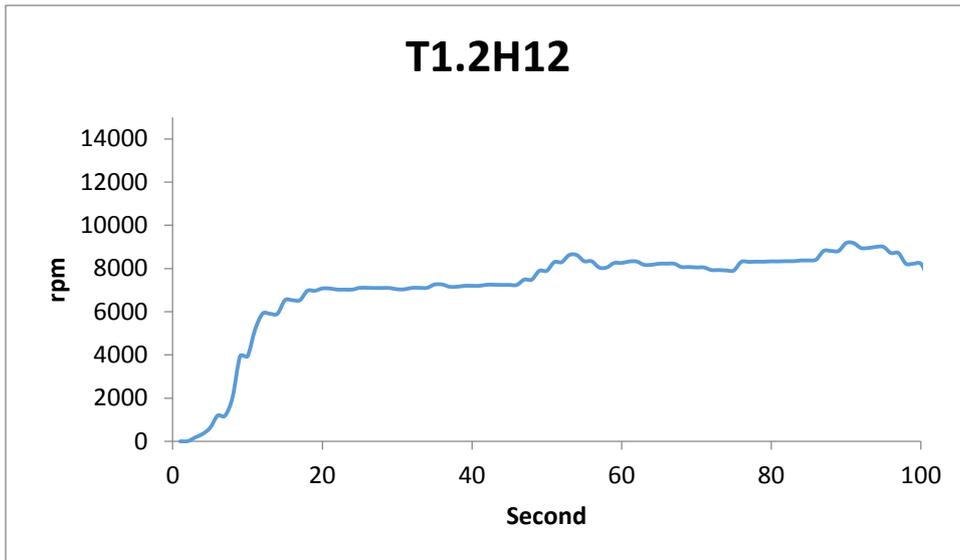
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 之雙斜無負載轉速



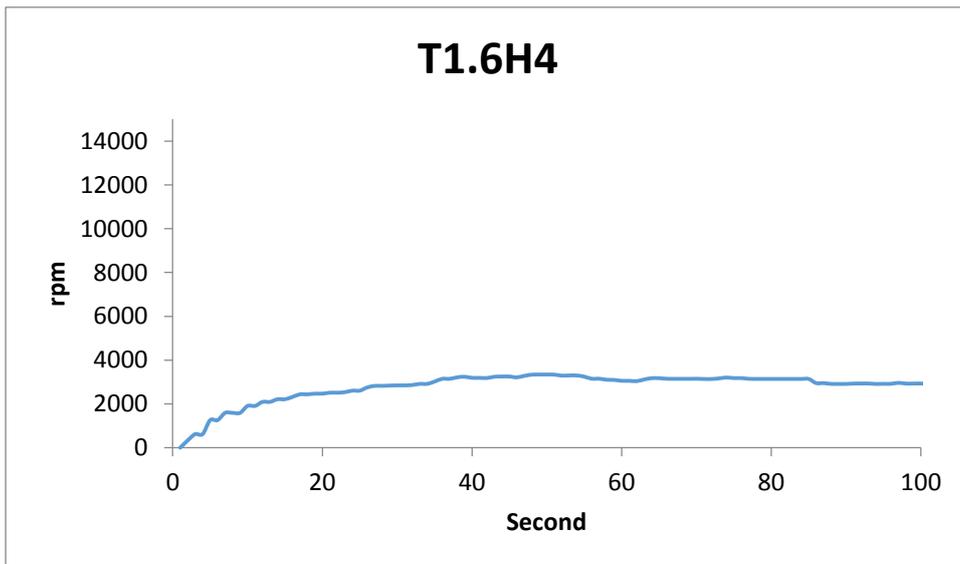
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 8 之雙斜無負載轉速



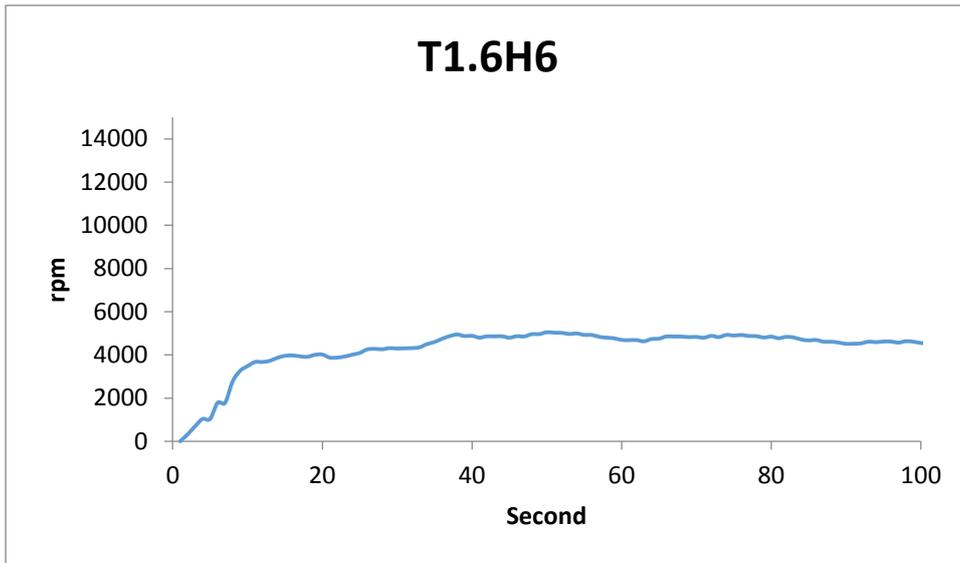
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 10 之雙斜無負載轉速



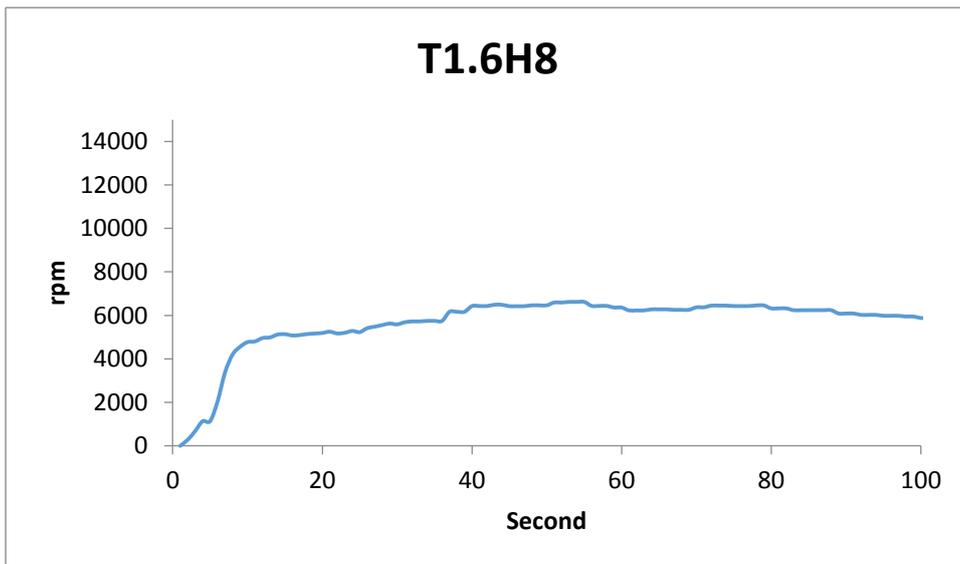
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 12 之雙斜無負載轉速



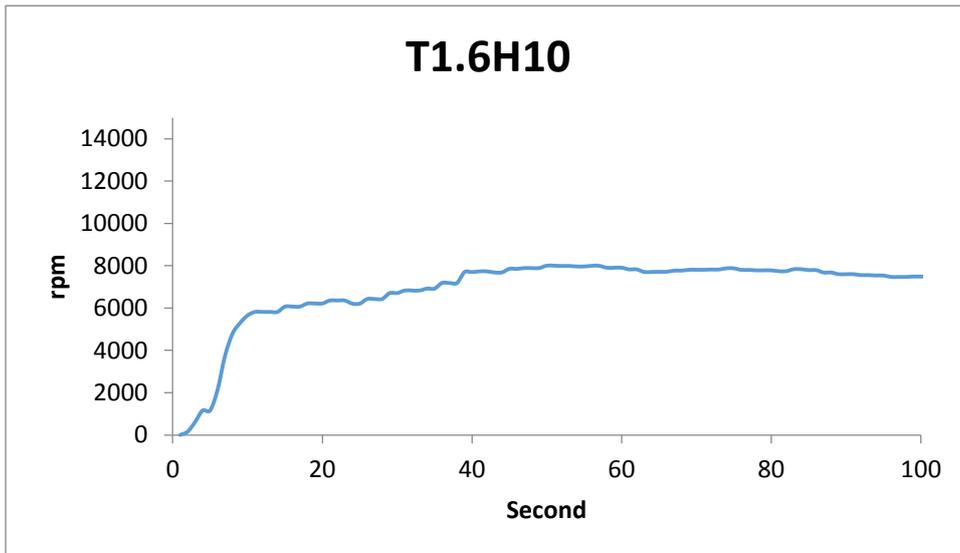
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 之雙斜無負載轉速



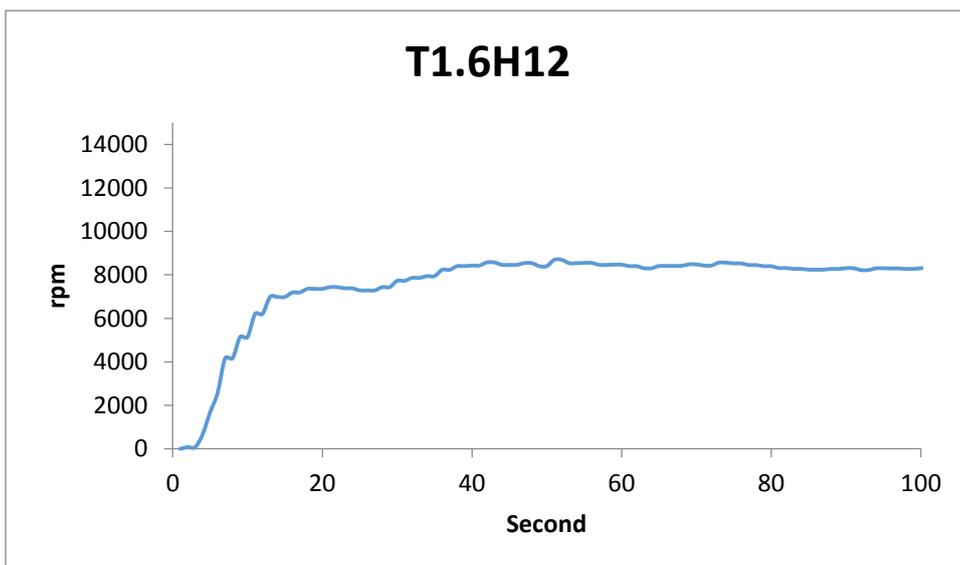
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 之雙斜無負載轉速



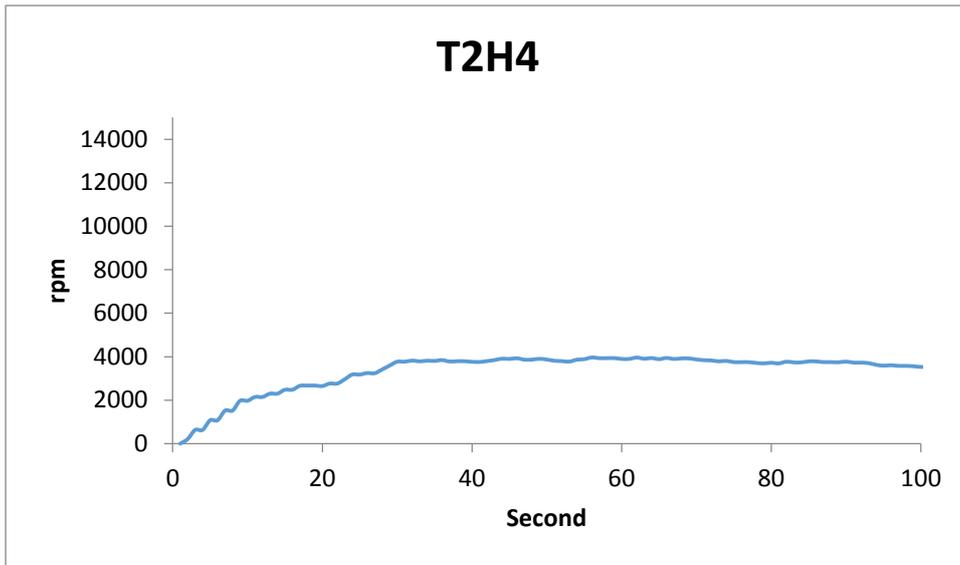
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 之雙斜無負載轉速



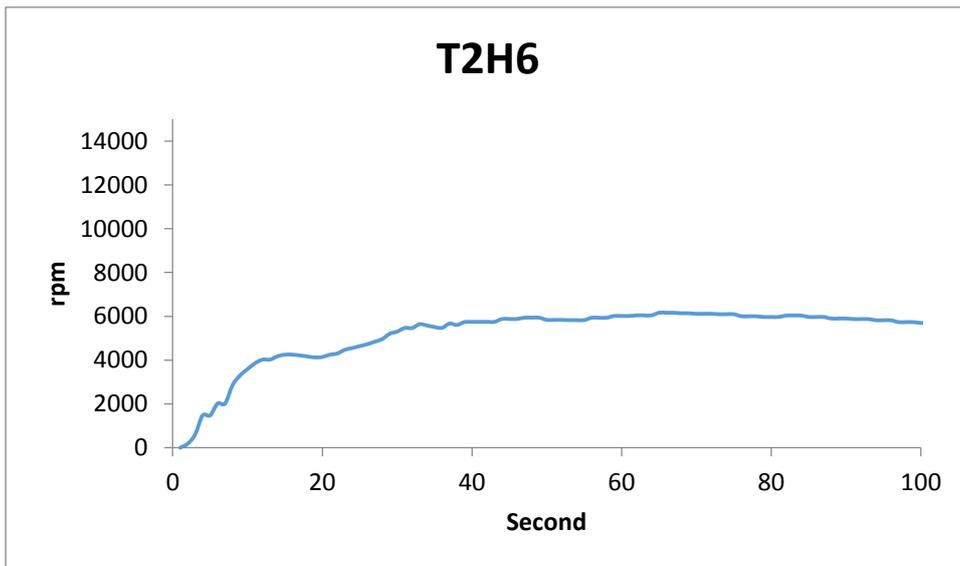
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 之雙斜無負載轉速



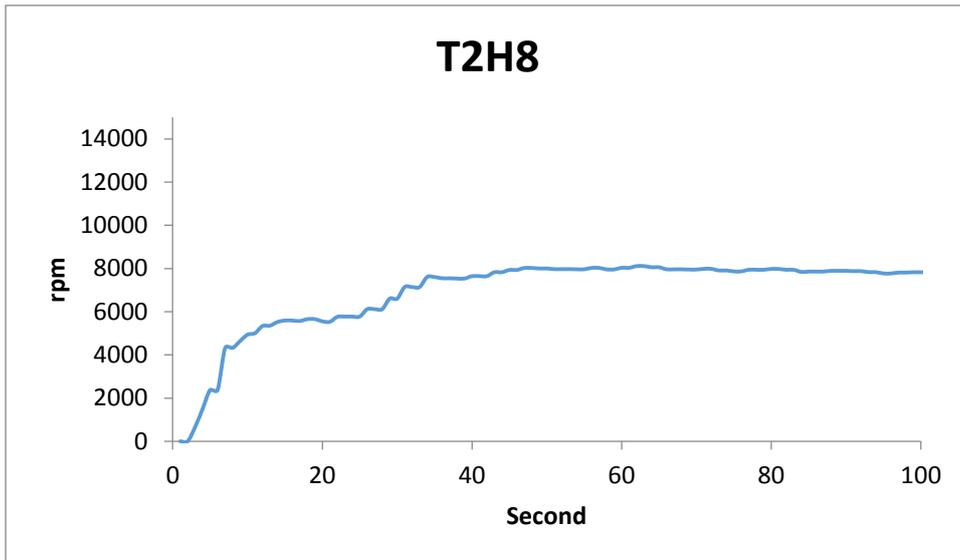
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 之雙斜無負載轉速



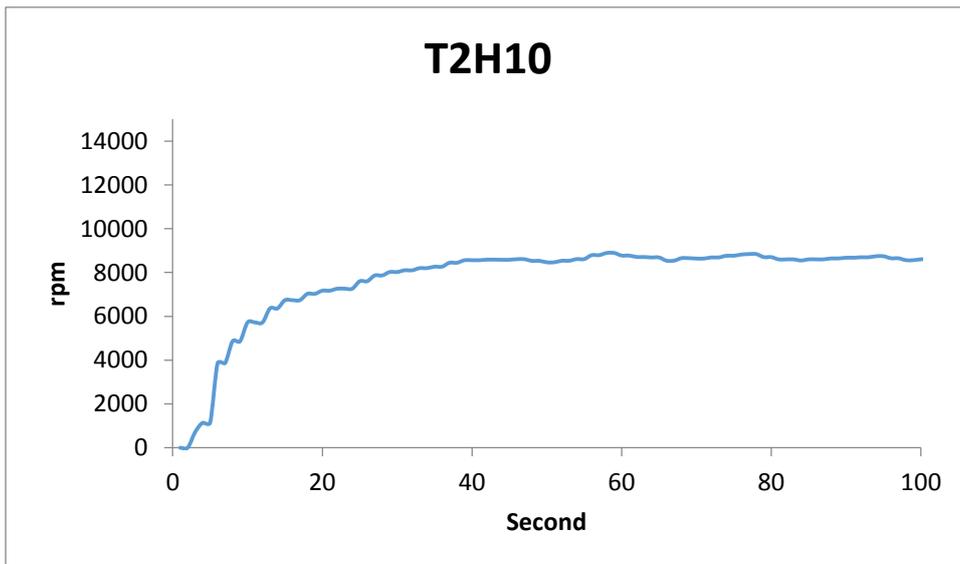
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 之雙斜無負載轉速



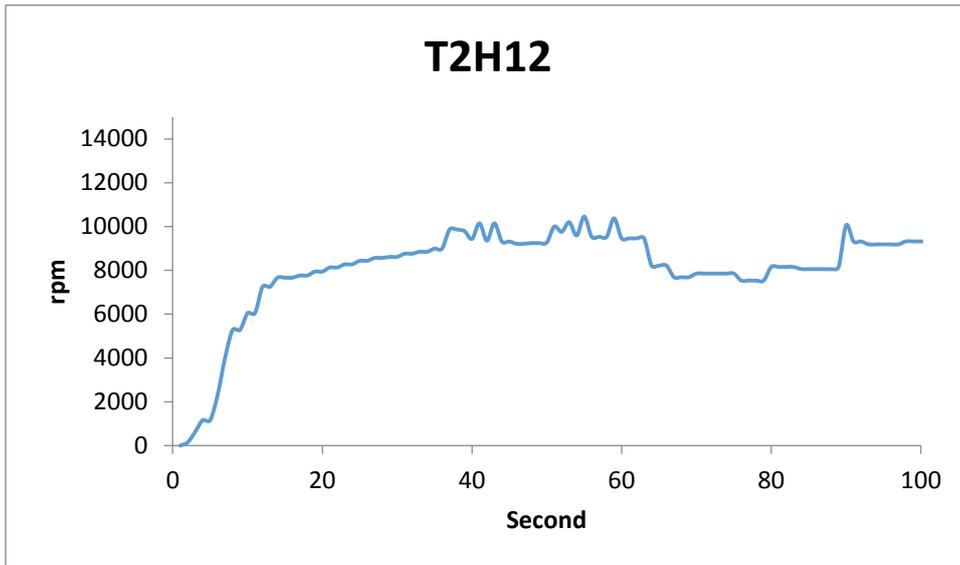
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 之雙斜無負載轉速



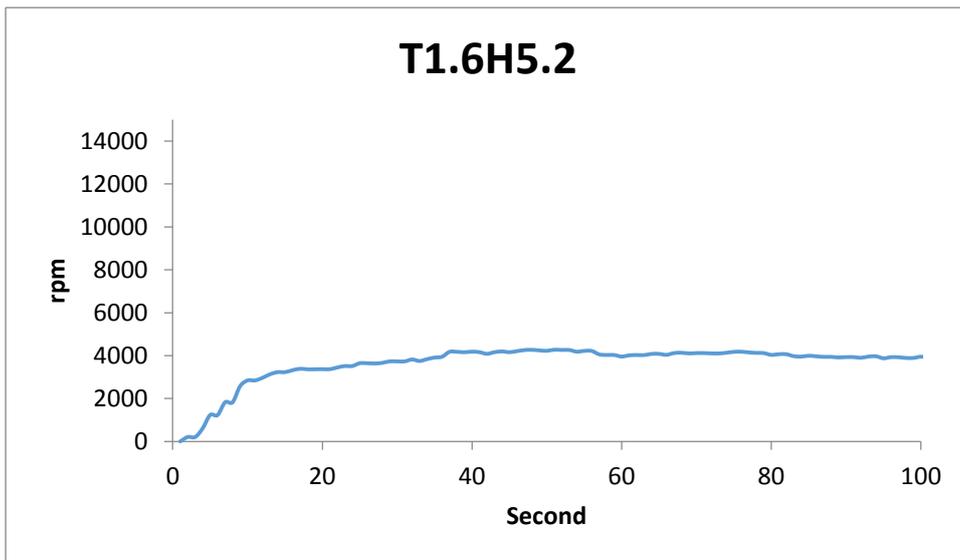
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 之雙斜無負載轉速



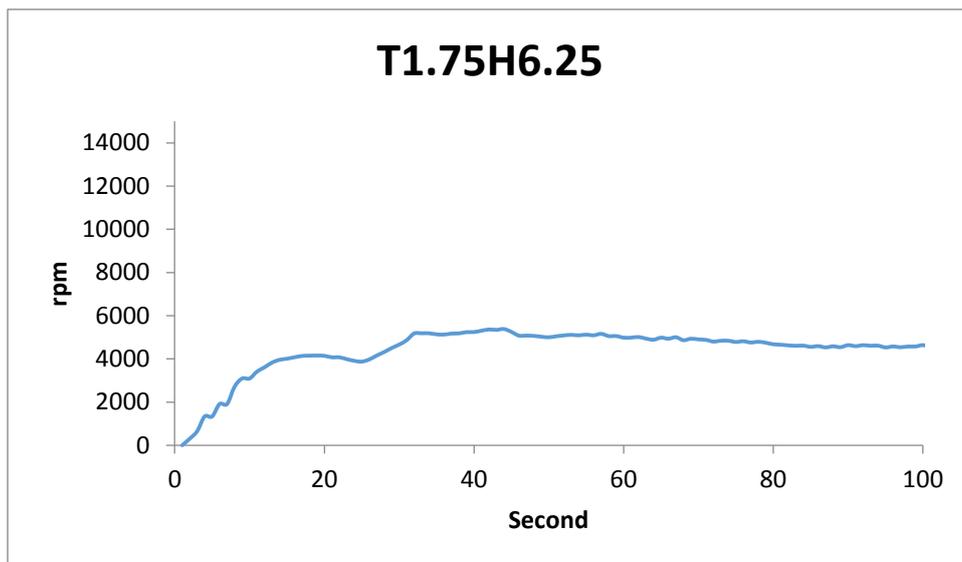
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 之雙斜無負載轉速



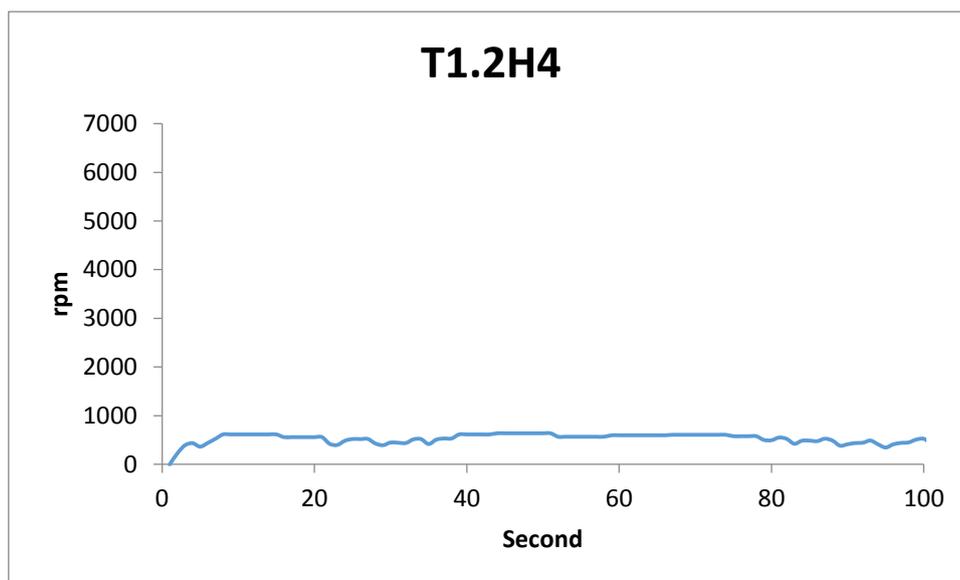
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 之雙斜無負載轉速



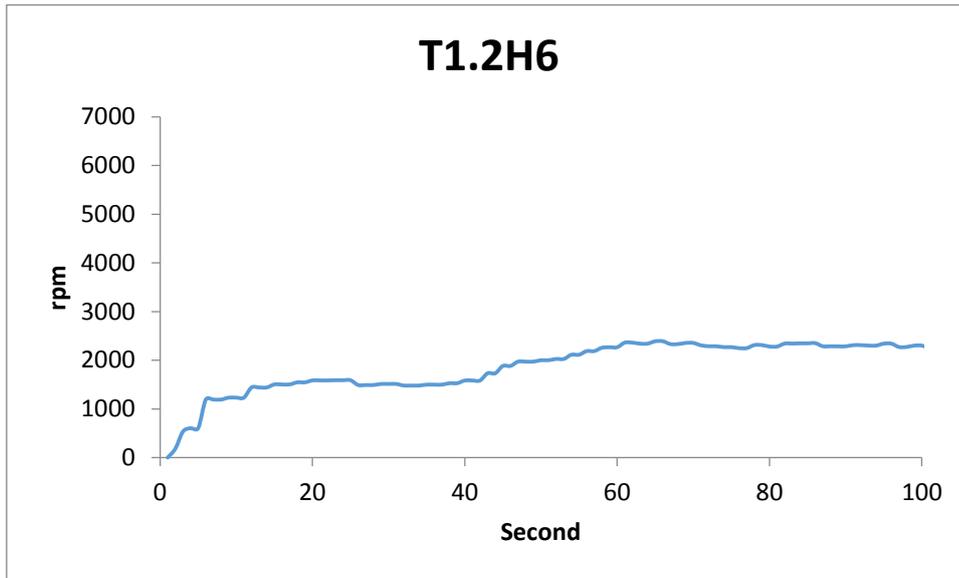
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 之雙斜無負載轉速



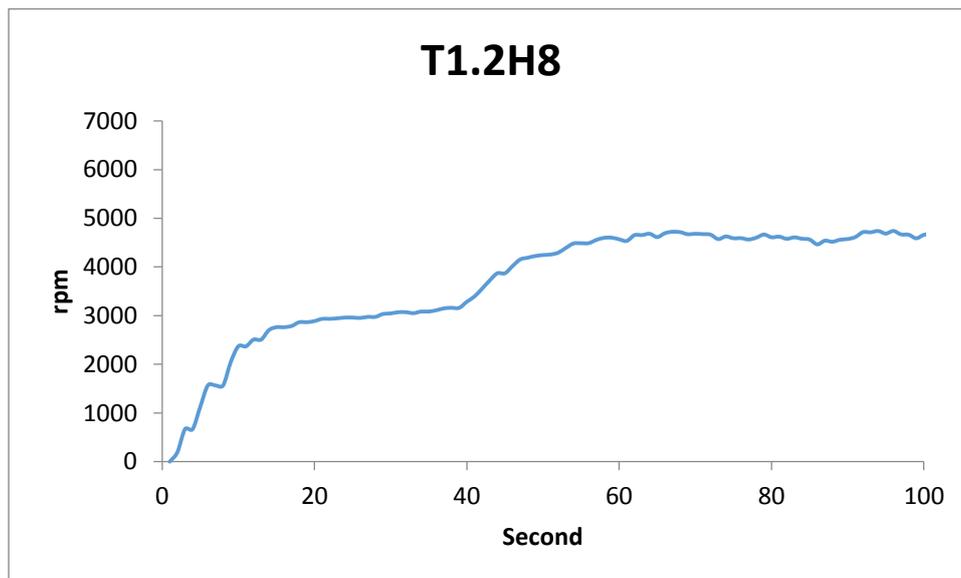
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 之雙斜無負載轉速



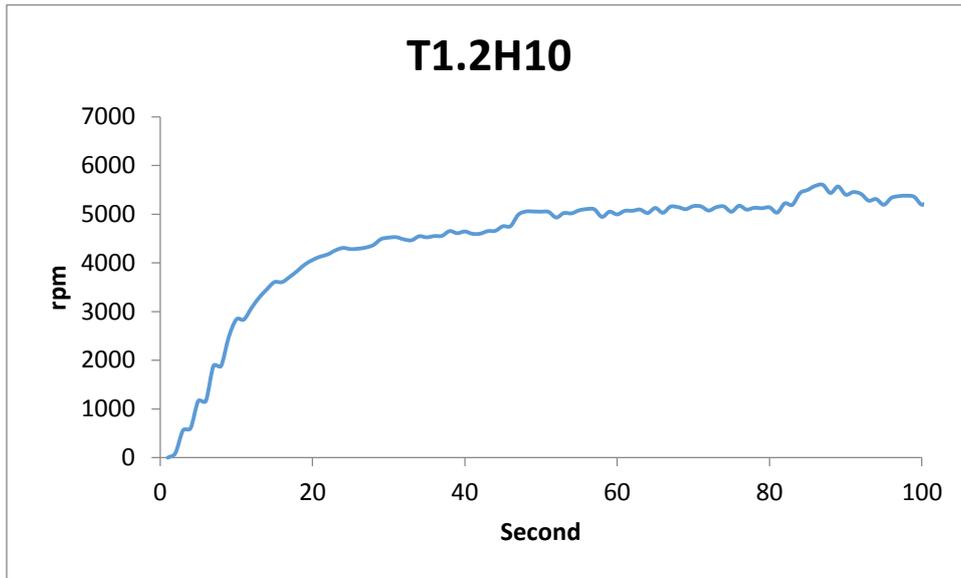
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 之雙斜直流負載轉速



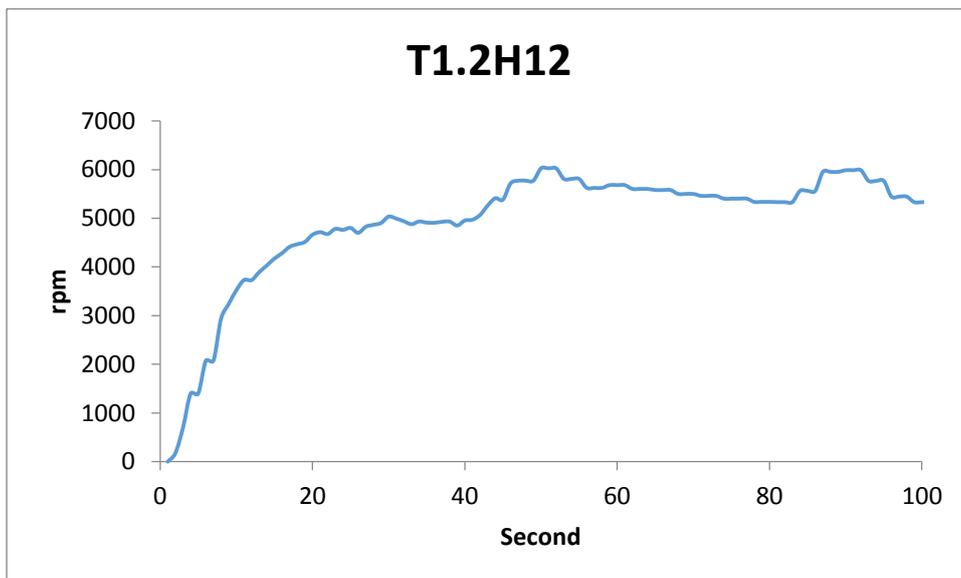
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 之雙斜直流負載轉速



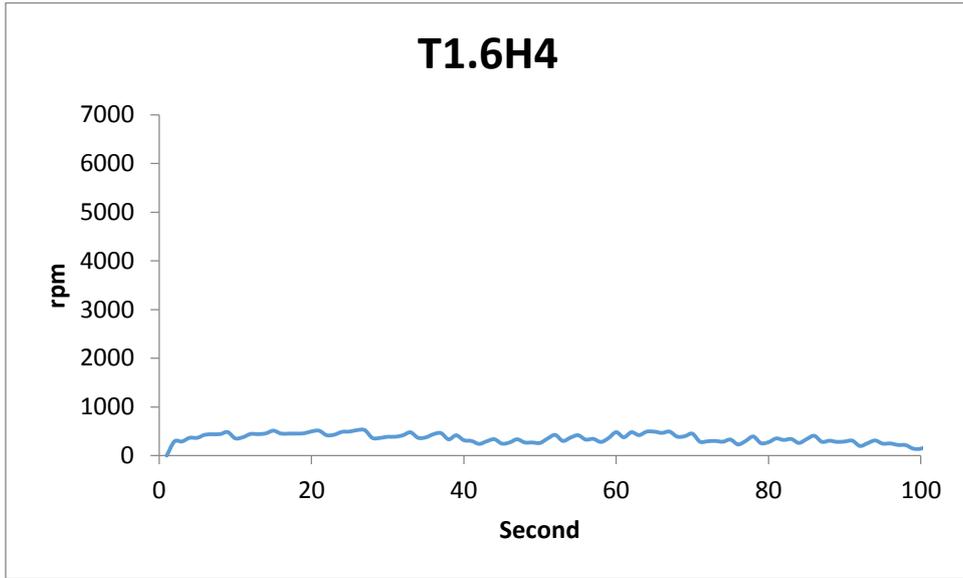
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 8 之雙斜直流負載轉速



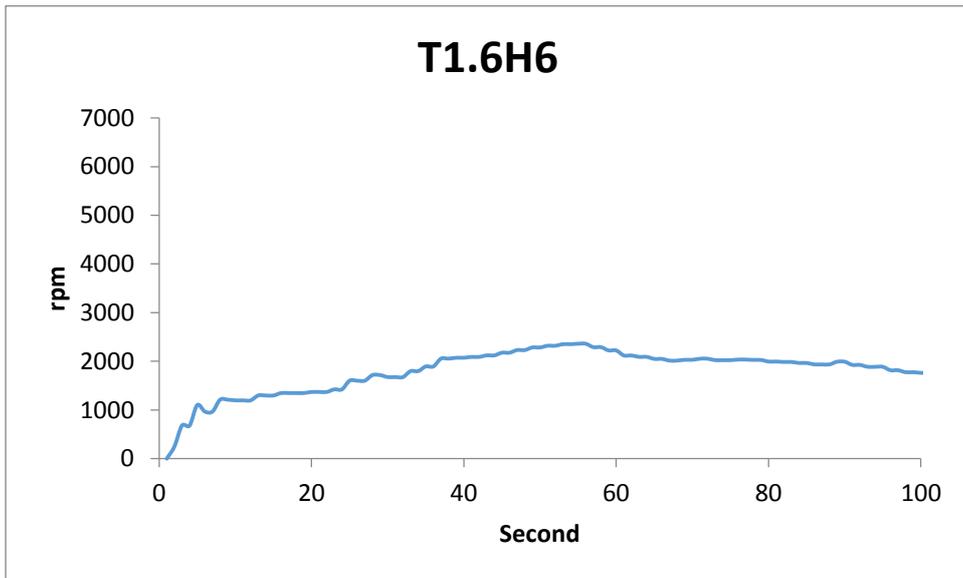
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 10 之雙斜直流負載轉速



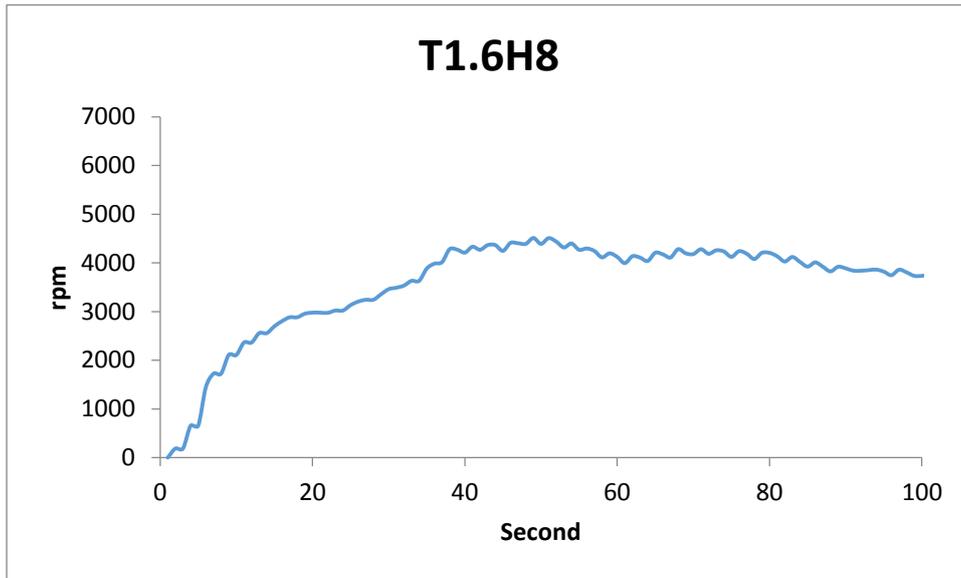
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 12 之雙斜直流負載轉速



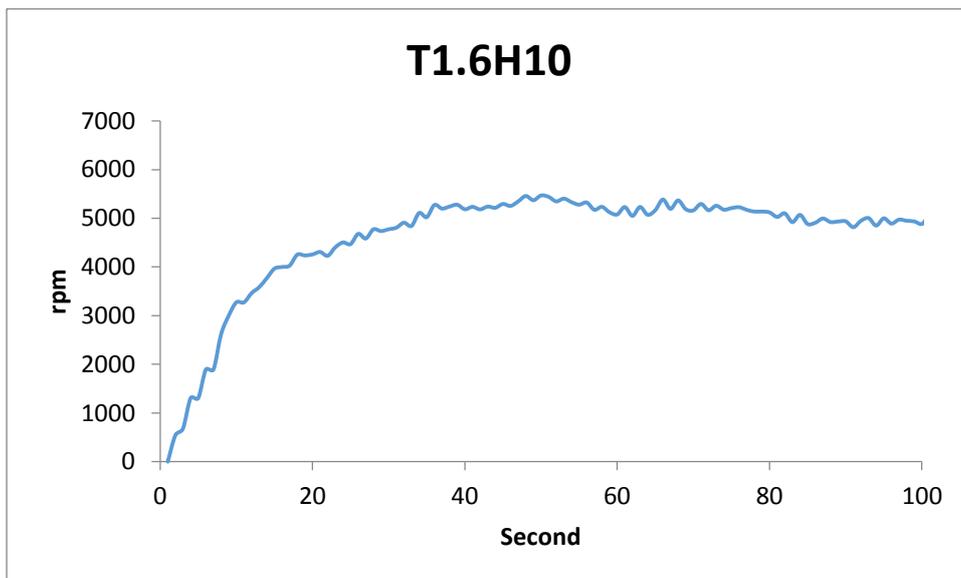
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 之雙斜直流負載轉速



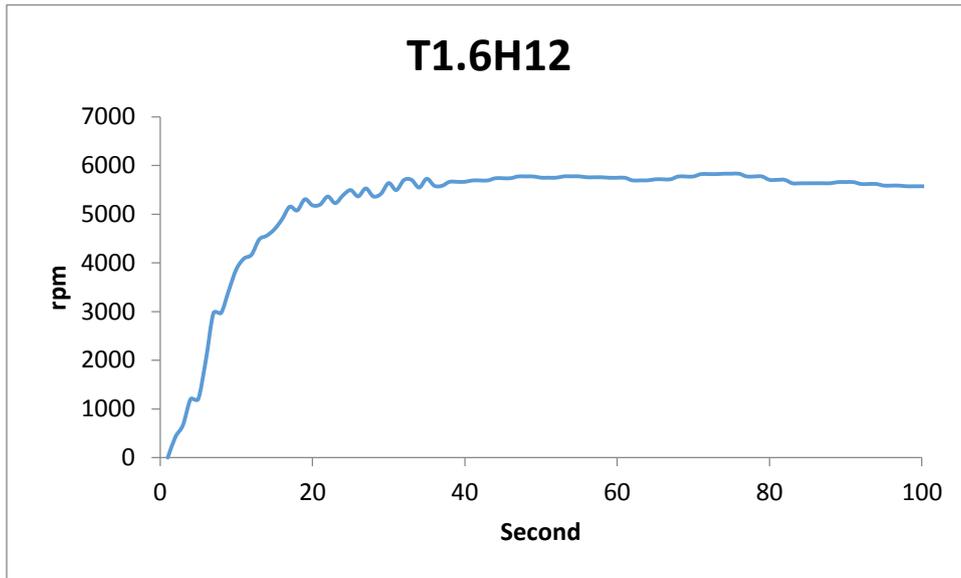
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 之雙斜直流負載轉速



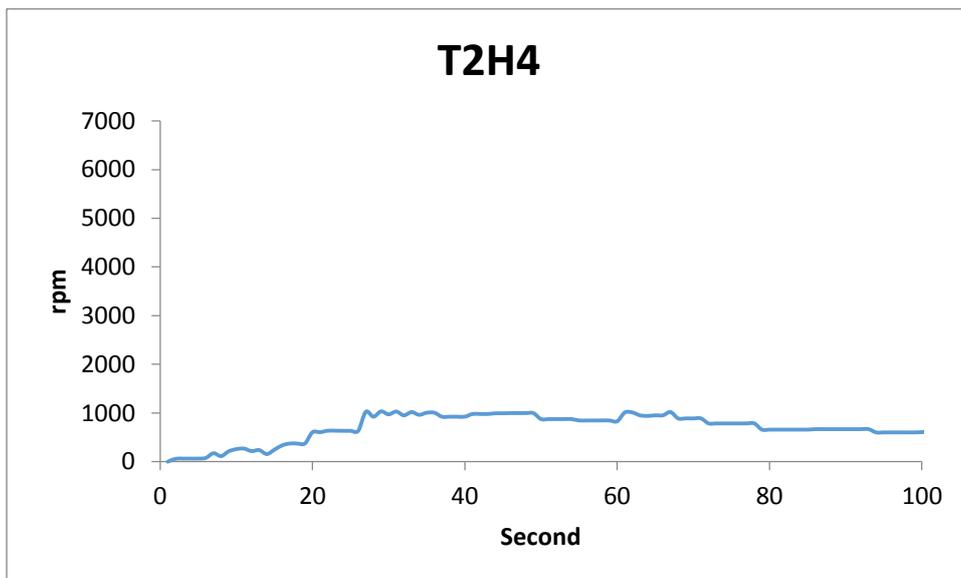
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 之雙斜直流負載轉速



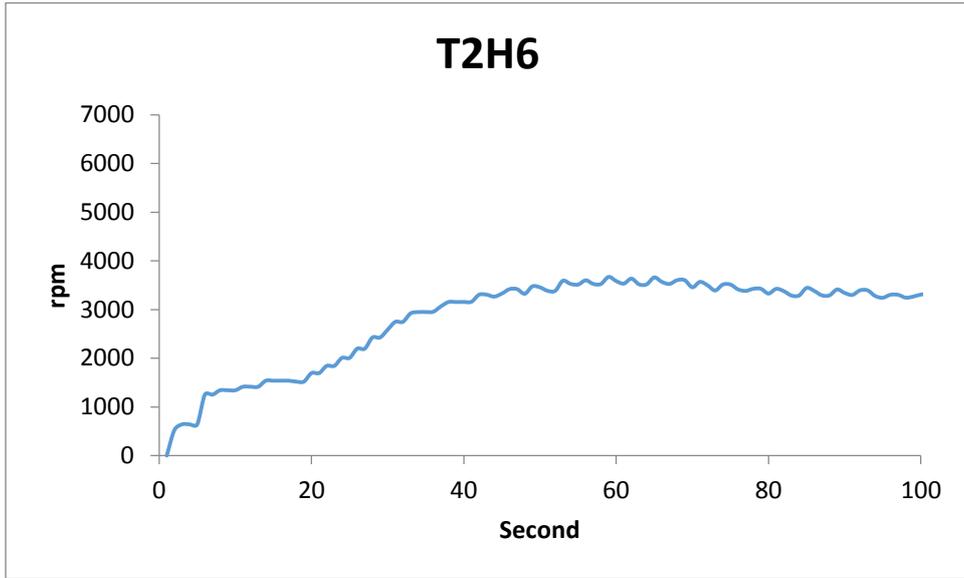
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 之雙斜直流負載轉速



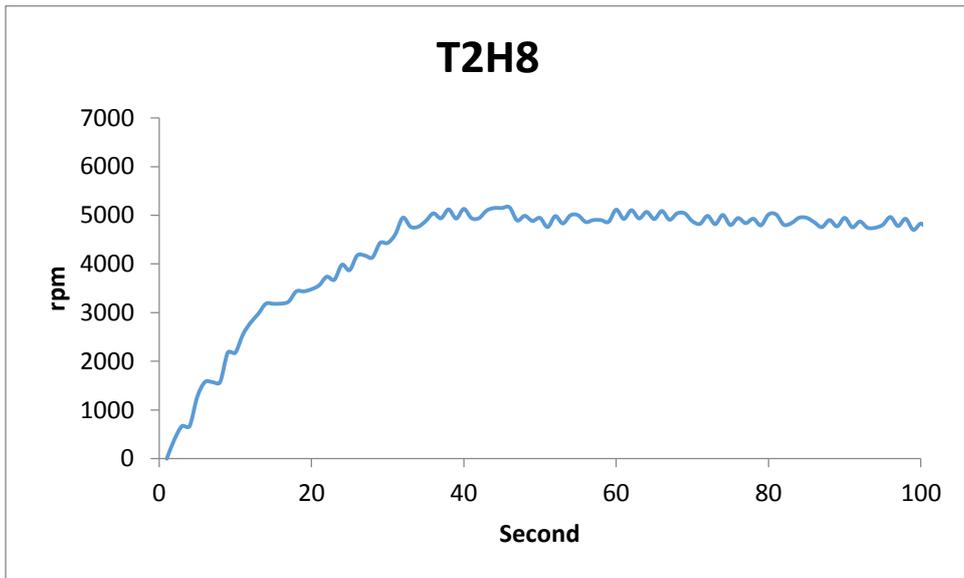
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 之雙斜直流負載轉速



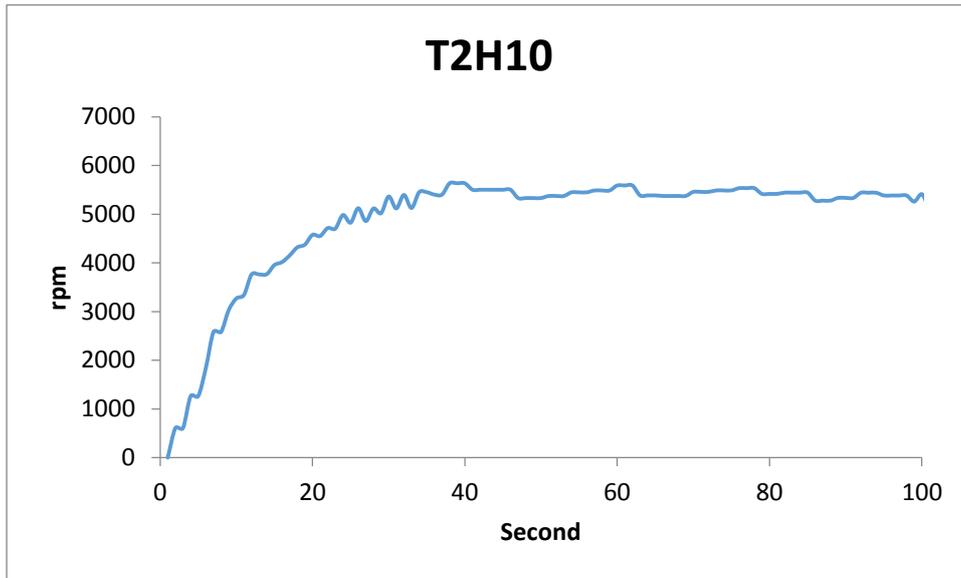
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 之雙斜直流負載轉速



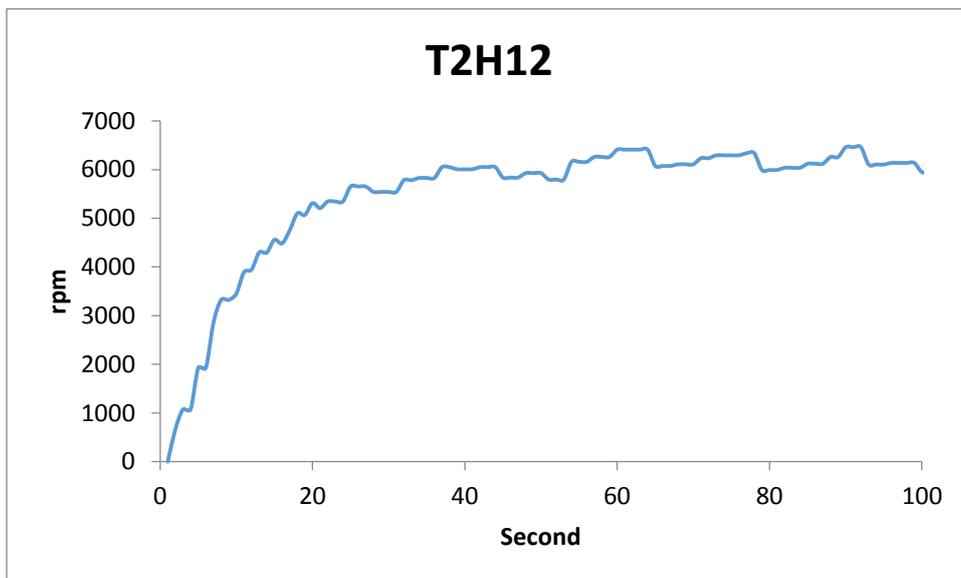
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 之雙斜直流負載轉速



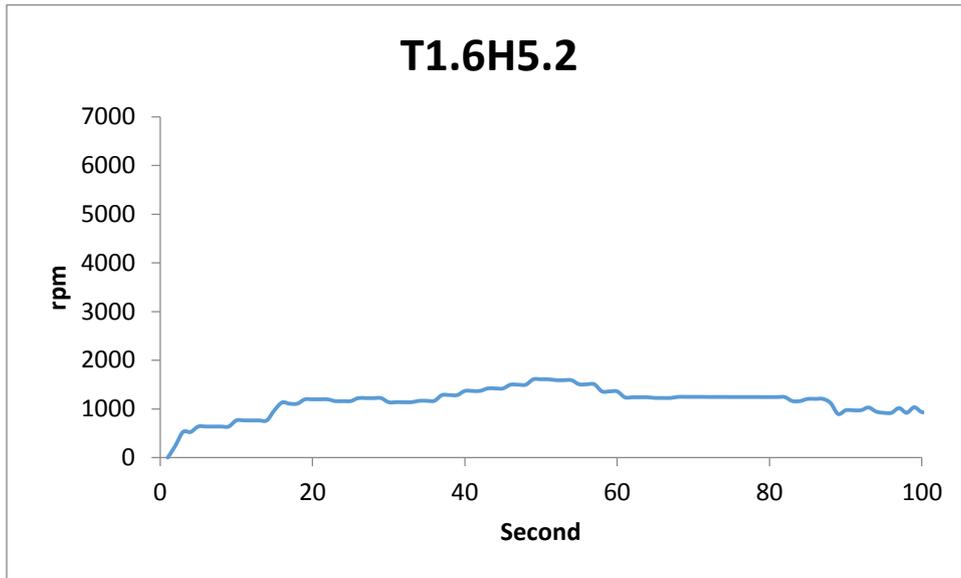
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 之雙斜直流負載轉速



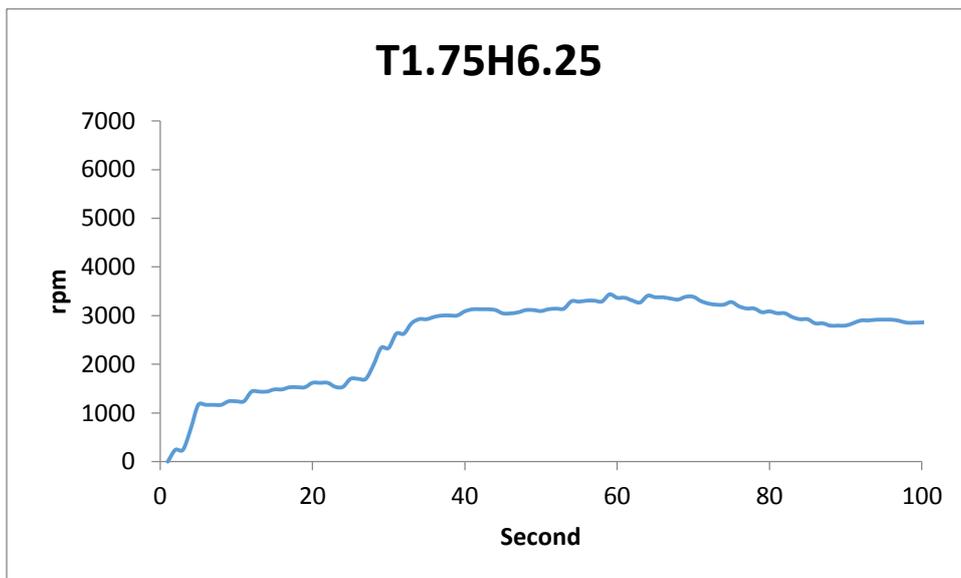
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 之雙斜直流負載轉速



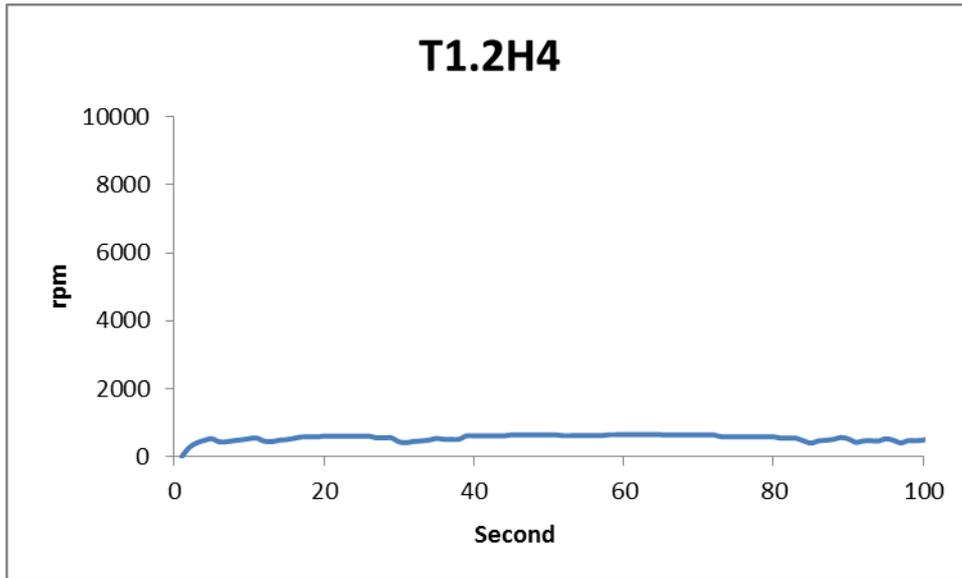
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 之雙斜直流負載轉速



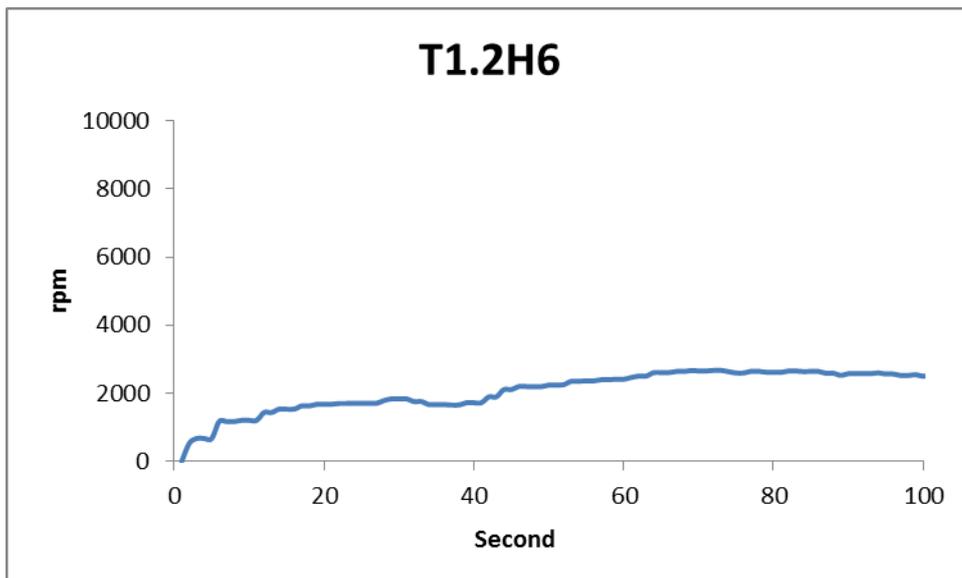
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 之雙斜直流負載轉速



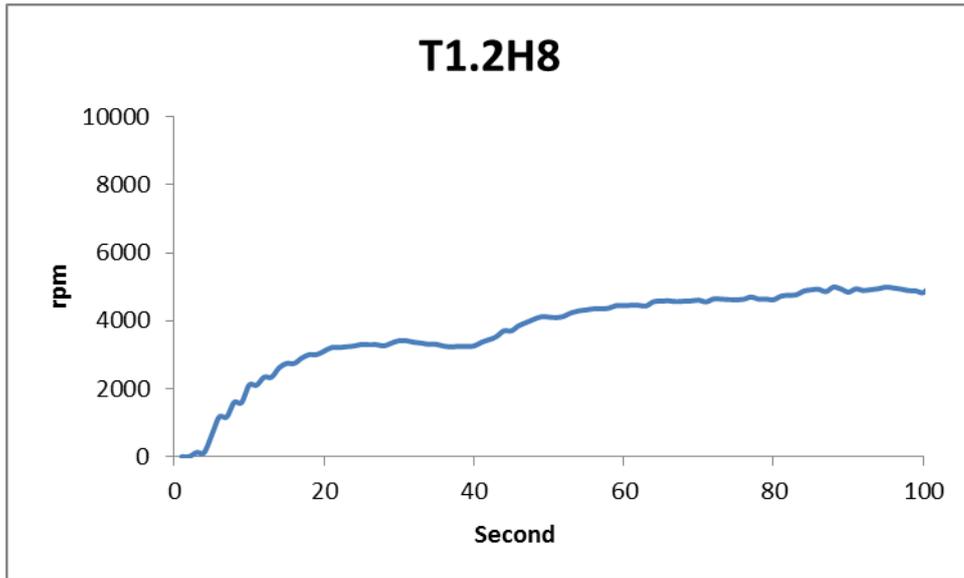
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 之雙斜直流負載轉速



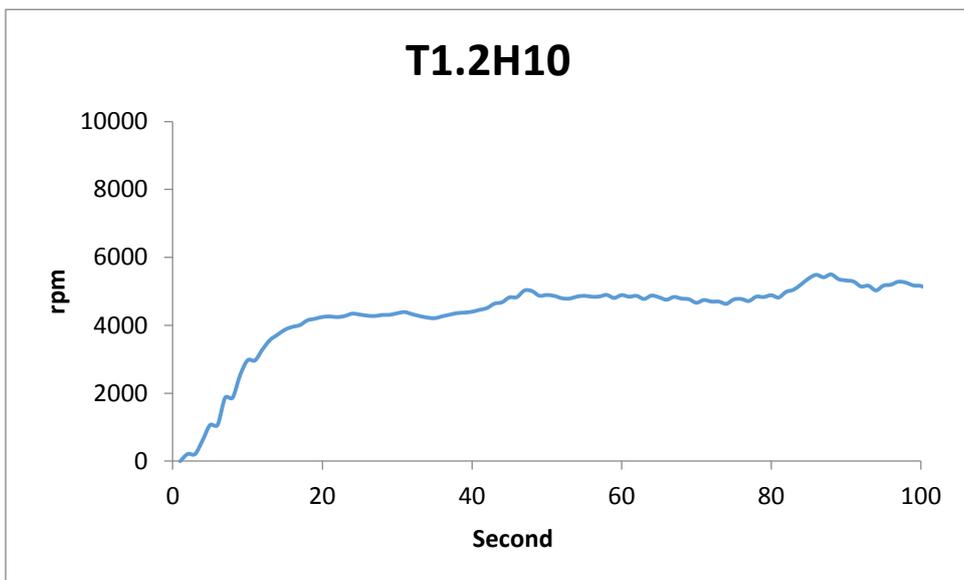
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 4 之雙斜直流負載轉速



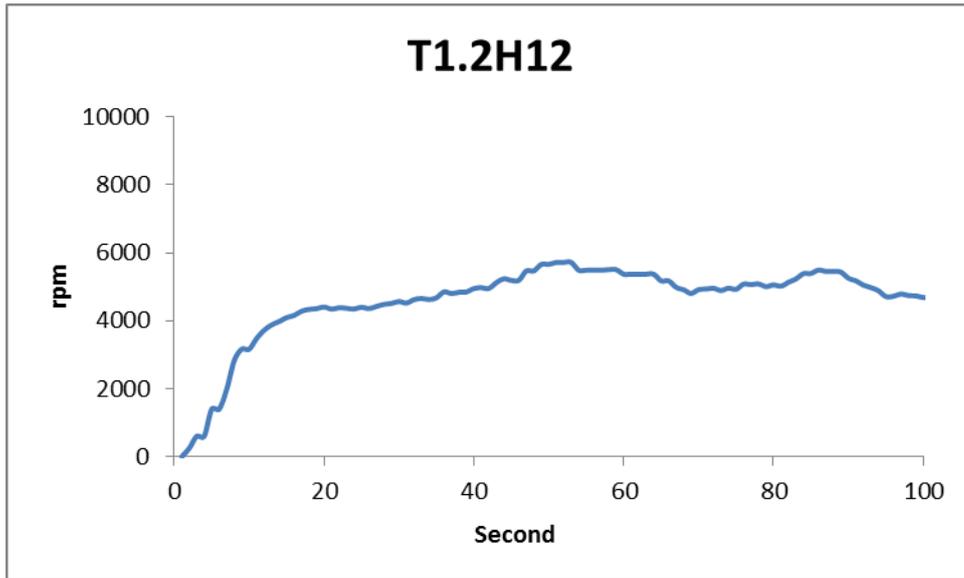
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 6 之雙斜直流負載轉速



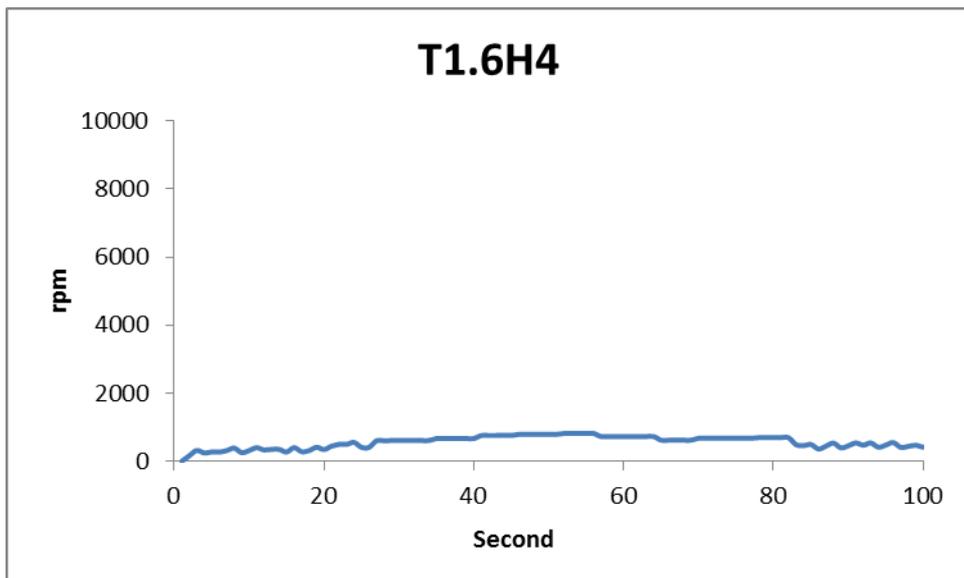
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 之雙斜直流負載轉速



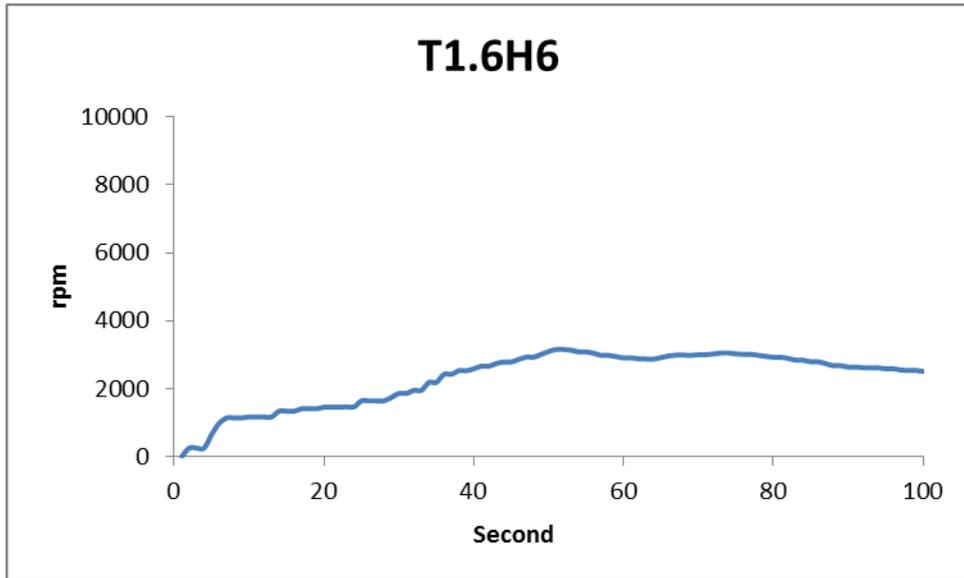
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 10 之雙斜直流負載轉速



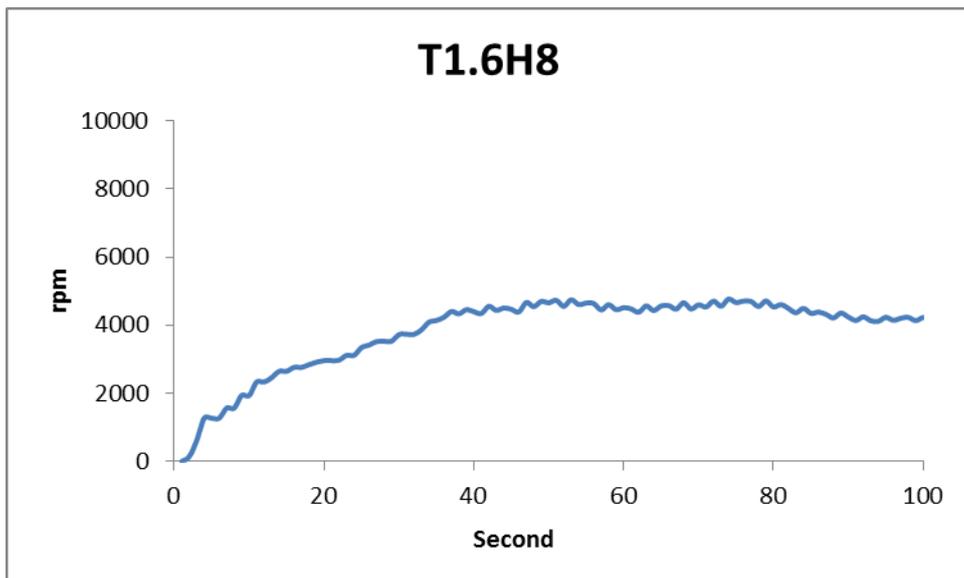
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 12 之雙斜直流負載轉速



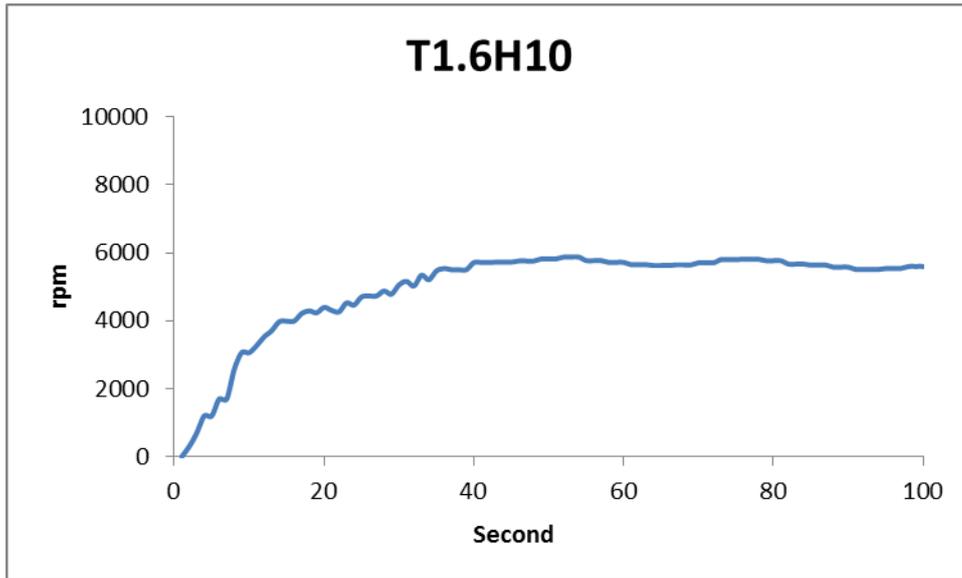
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 4 之雙斜直流負載轉速



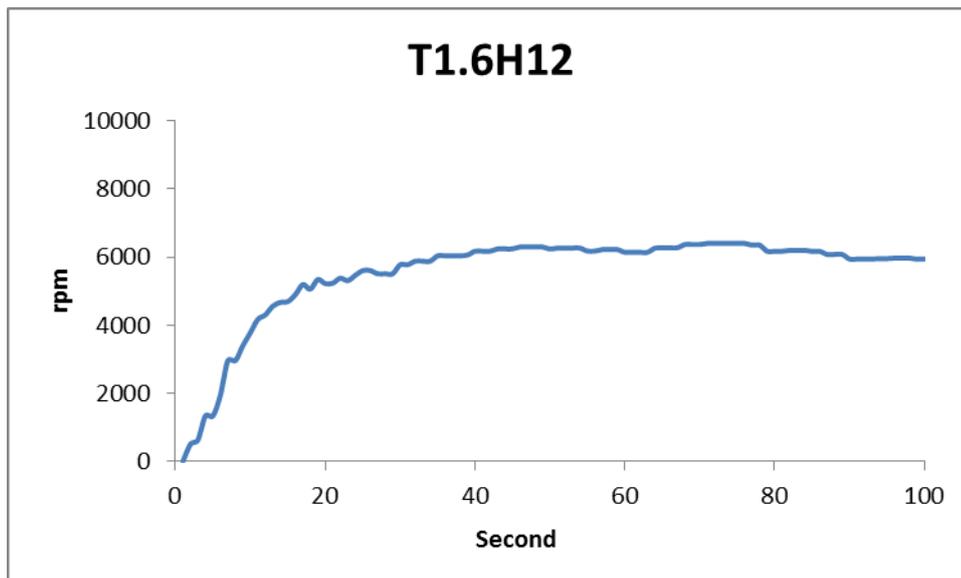
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 6 之雙斜直流負載轉速



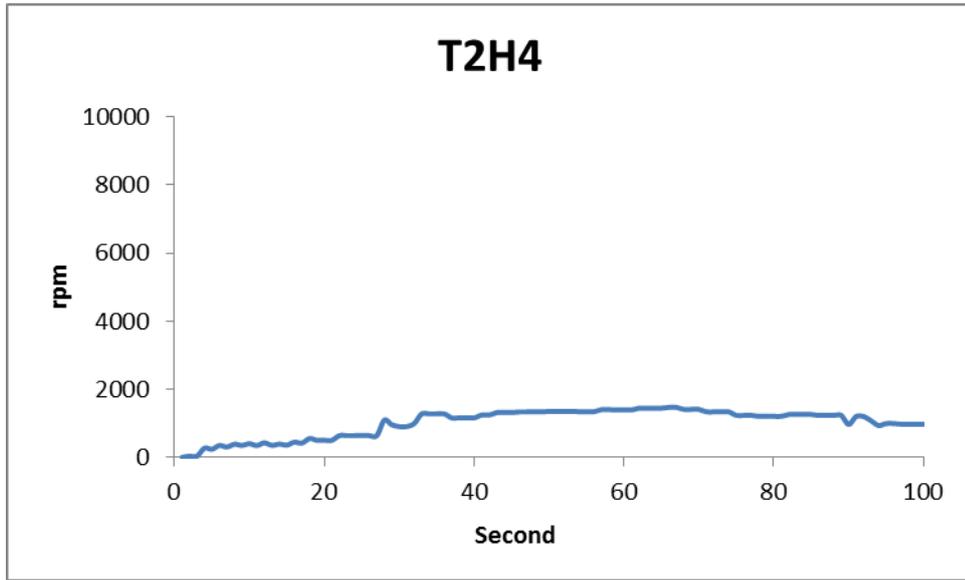
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 8 之雙斜直流負載轉速



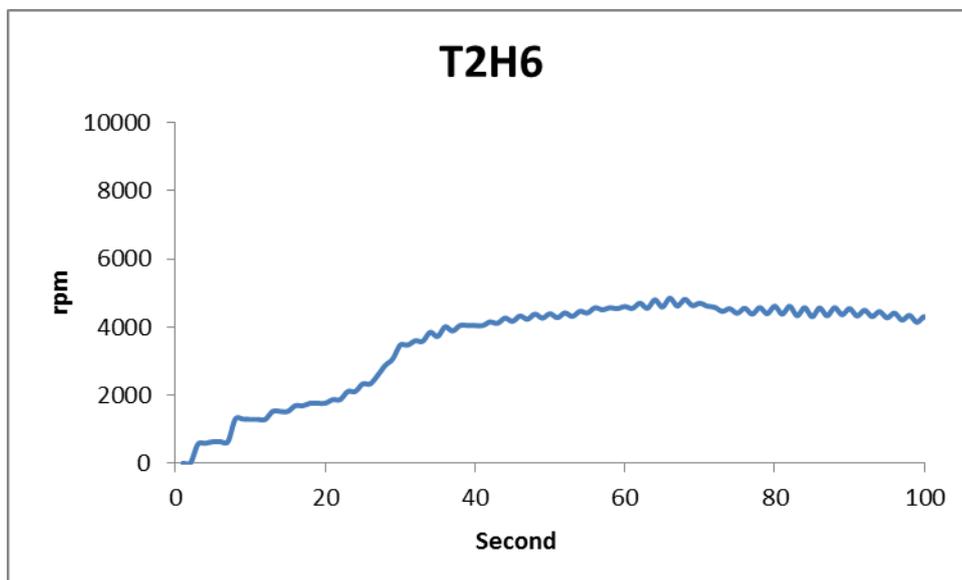
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 10 之雙斜直流負載轉速



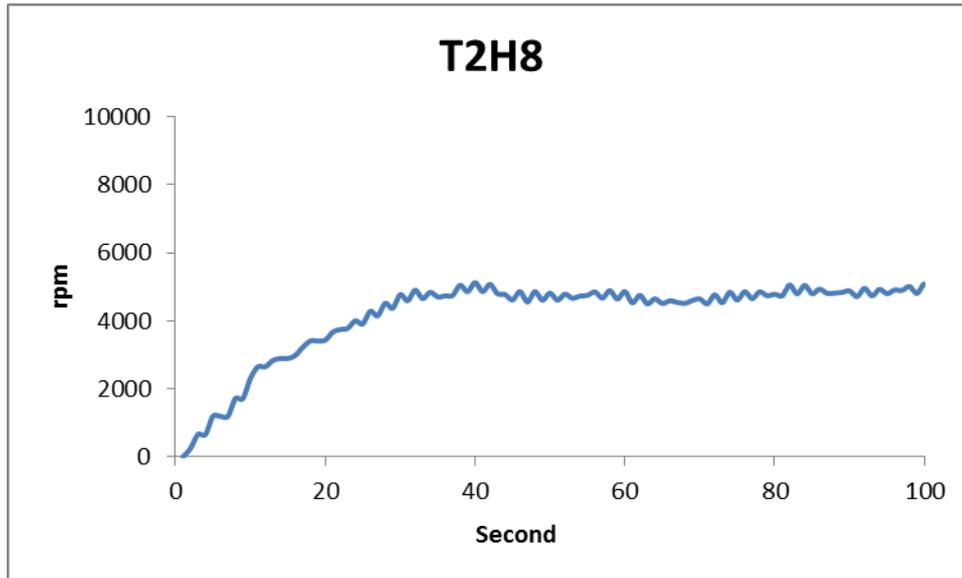
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 12 之雙斜直流負載轉速



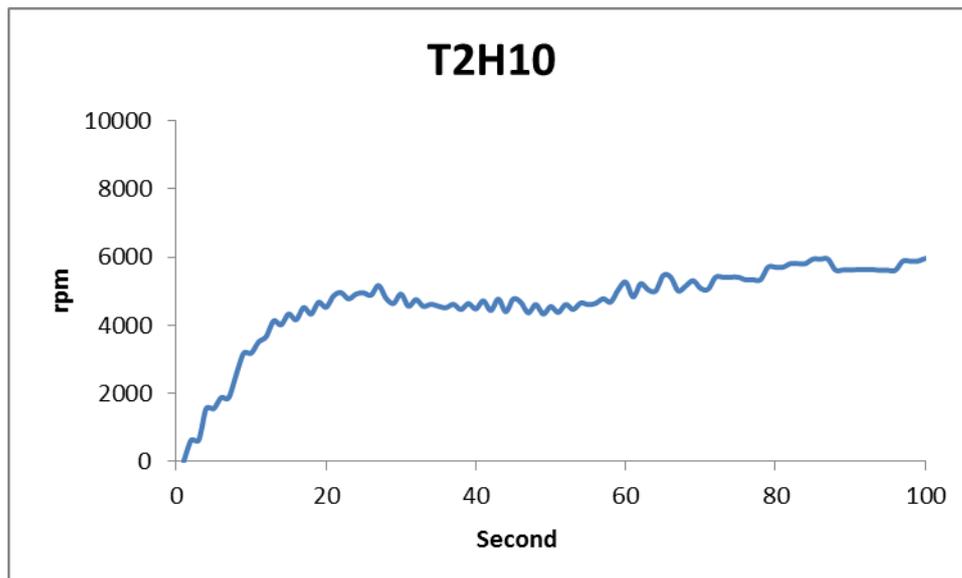
前牆開口率 100%週期 2 波高 4 之雙斜直流負載轉速



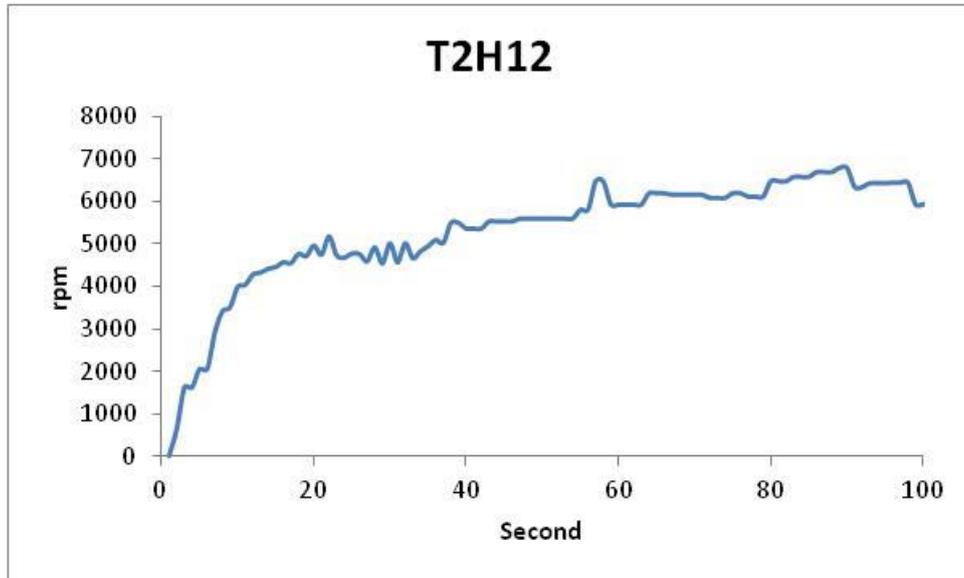
前牆開口率 100%週期 2 波高 6 之雙斜直流負載轉速



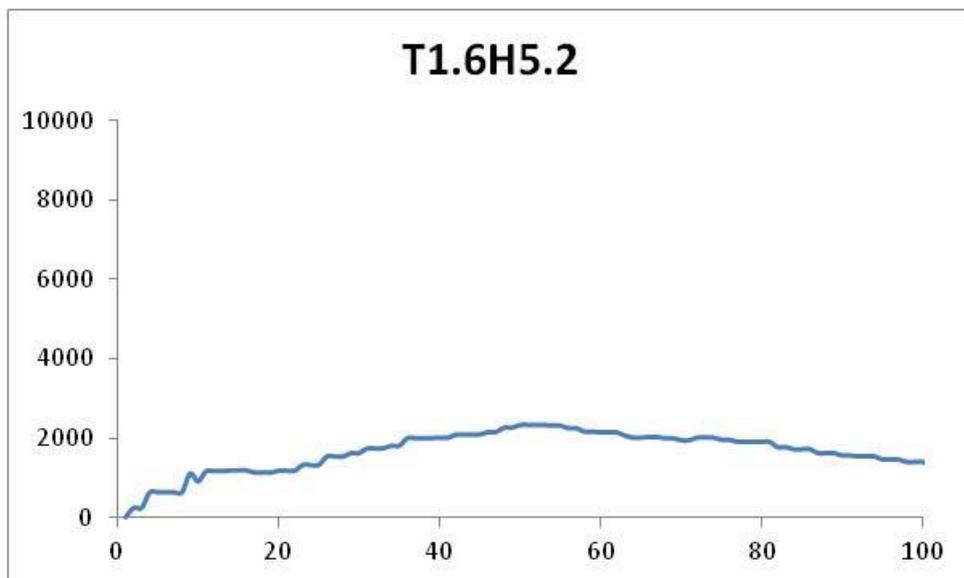
前牆開口率 100%週期 2 波高 8 之雙斜直流負載轉速



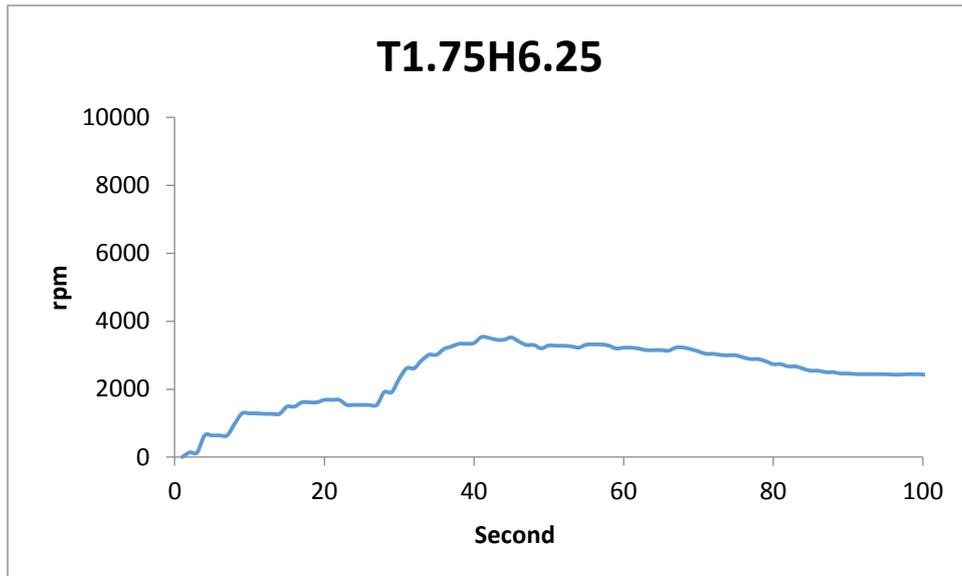
前牆開口率 100%週期 2 波高 10 之雙斜直流負載轉速



前牆開口率 100%週期 2 波高 12 之雙斜直流負載轉速

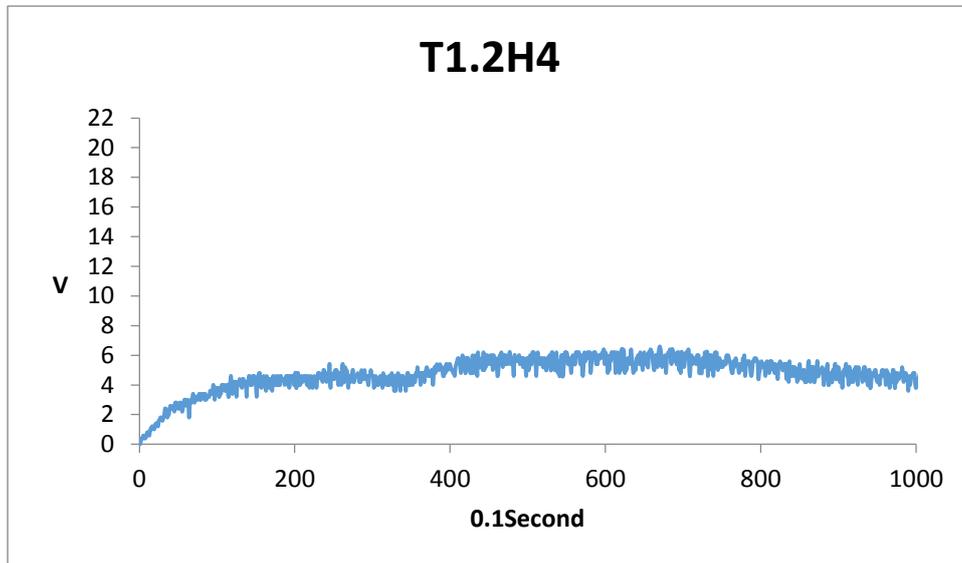


前牆開口率 100%週期 1.6 波高 5.2 之雙斜直流負載轉速

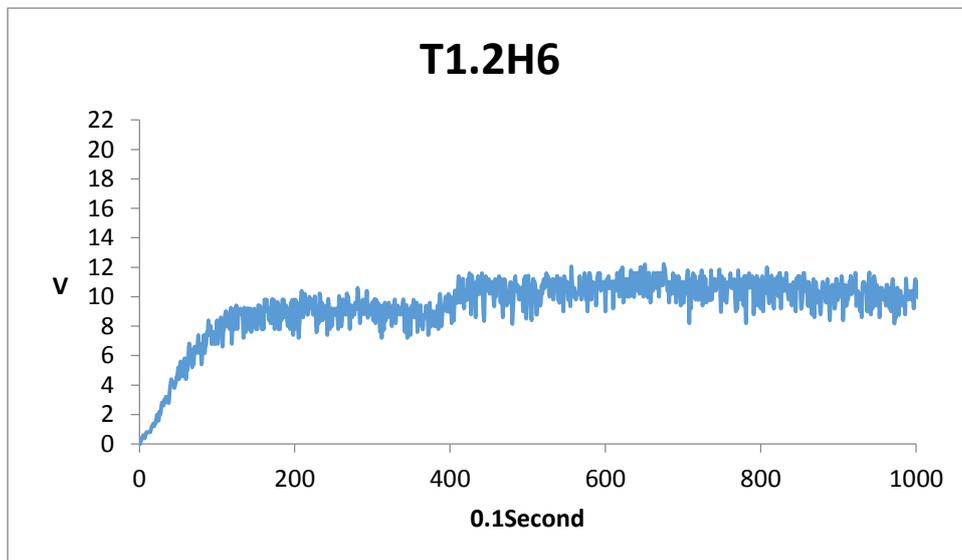


前牆開口率 100%週期 1.75 波高 6.25 之雙斜直流負載轉速

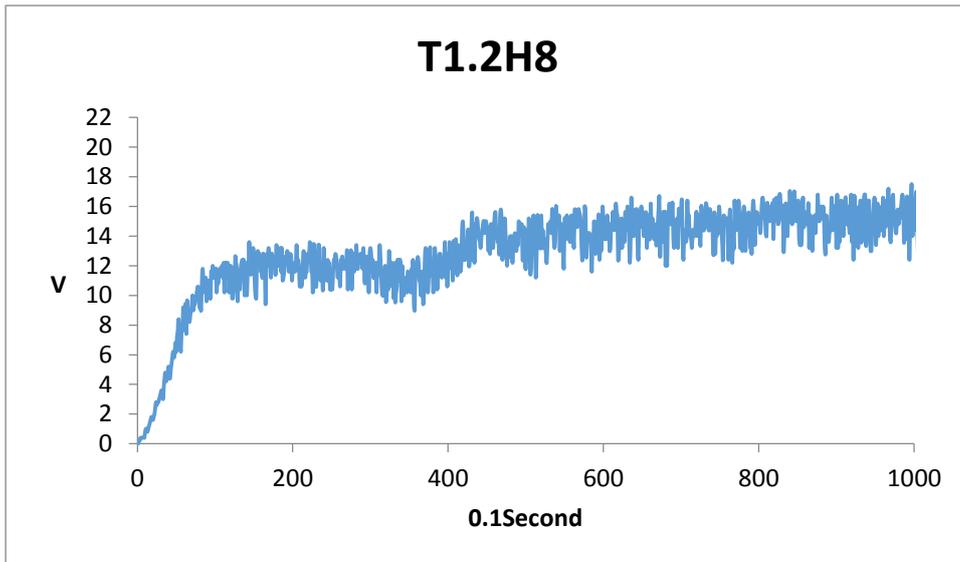
附件五 電壓圖



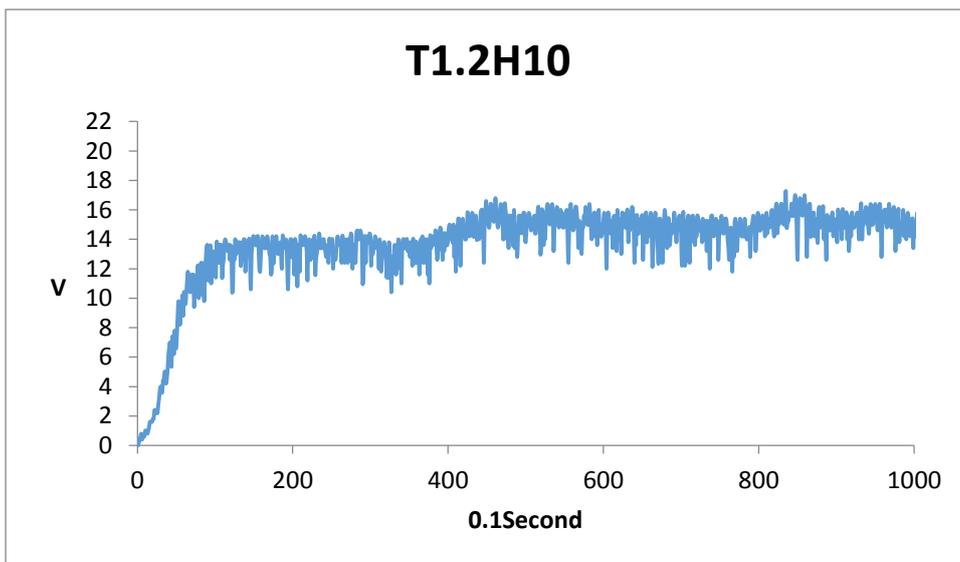
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 4 之單斜電壓



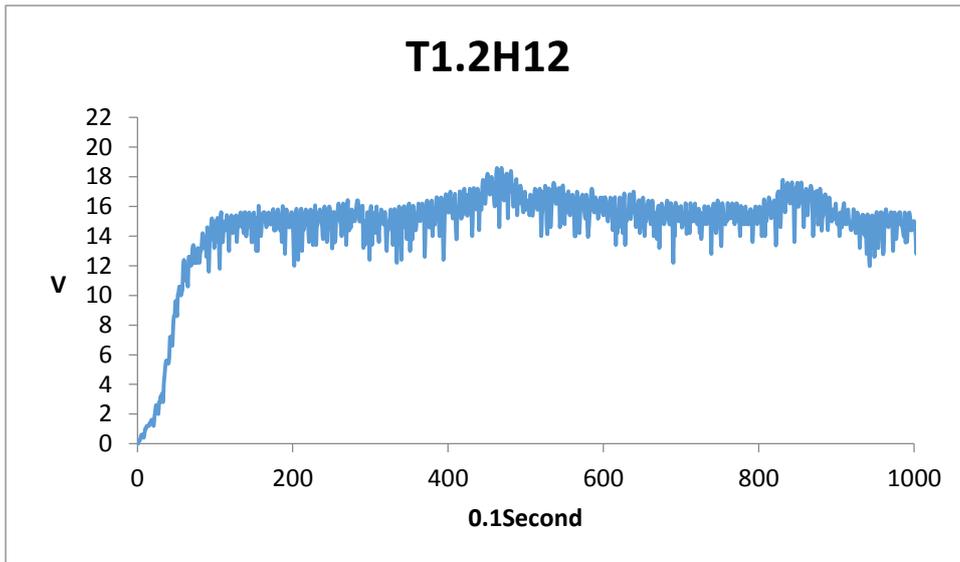
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 6 之單斜電壓



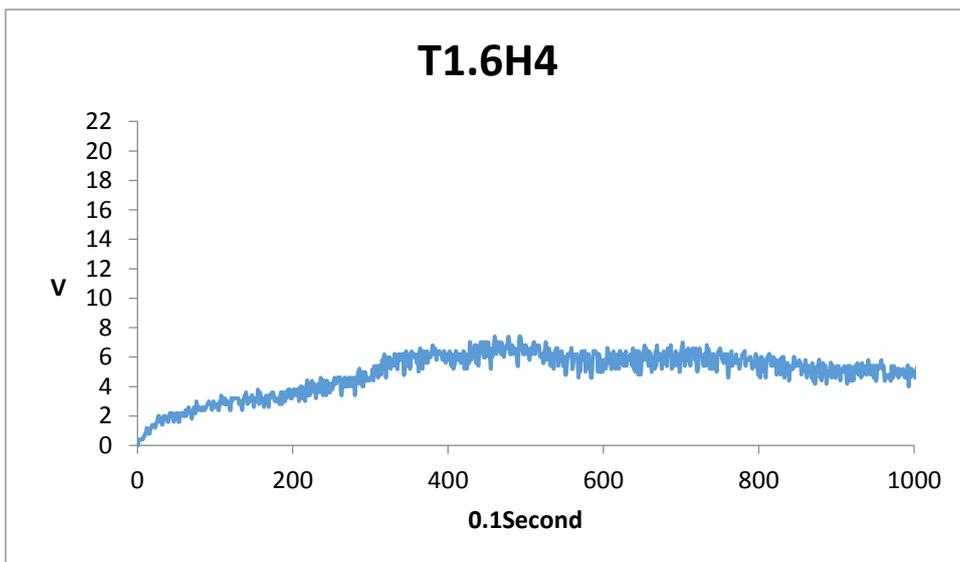
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 之單斜電壓



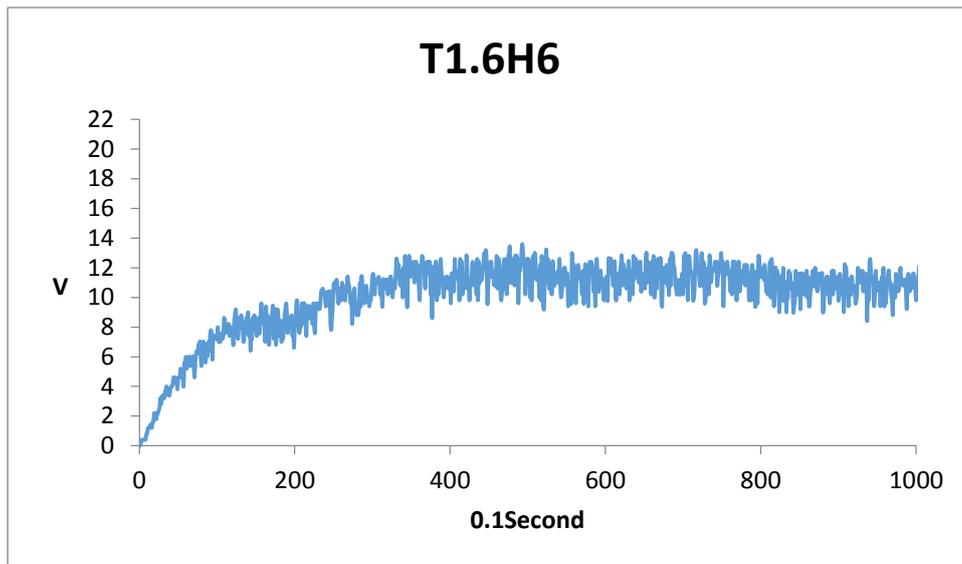
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 10 之單斜電壓



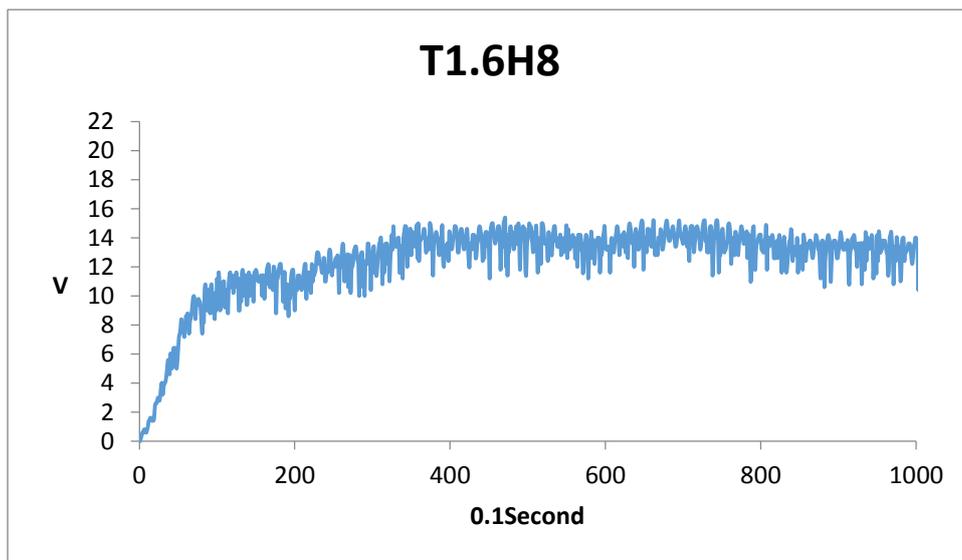
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 12 之單斜電壓



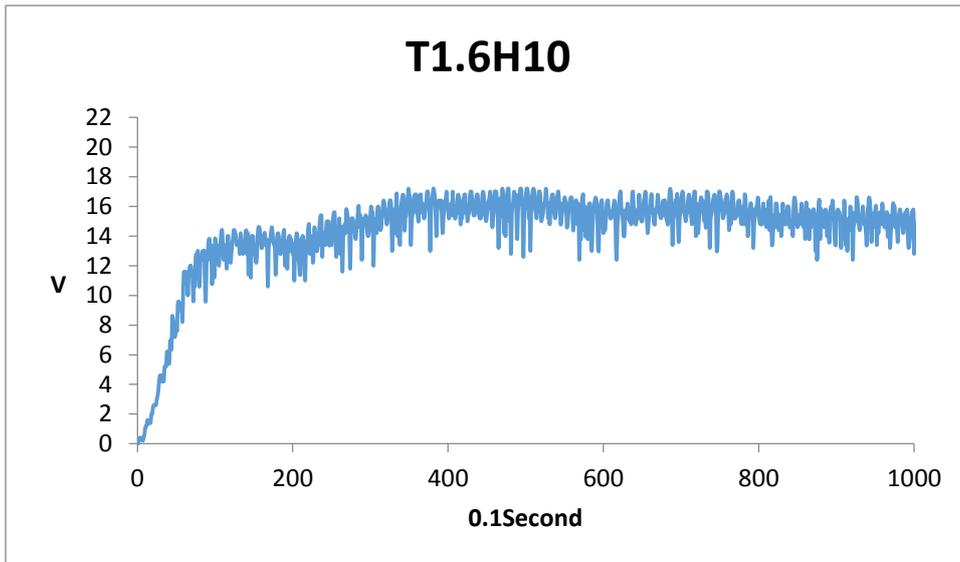
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 4 之單斜電壓



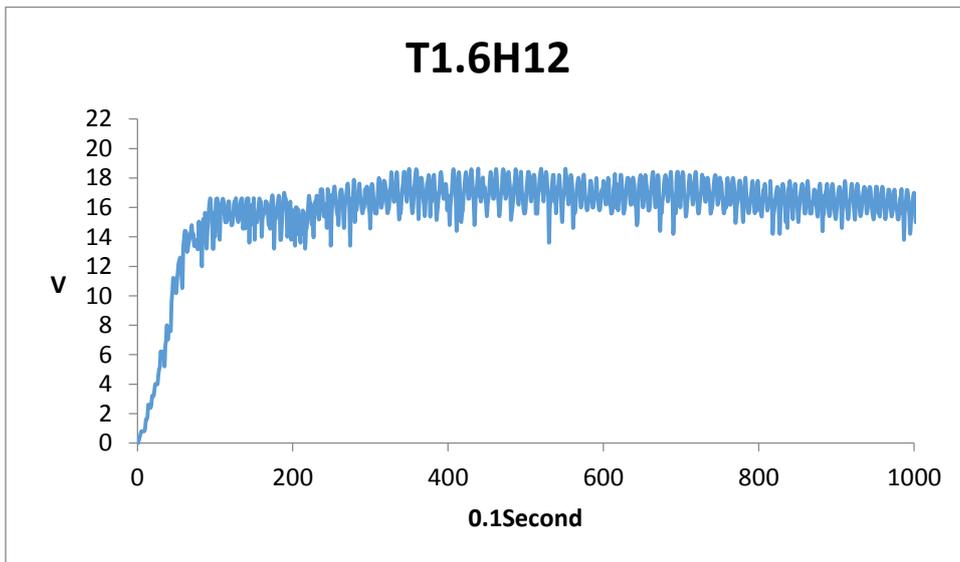
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 6 之單斜電壓



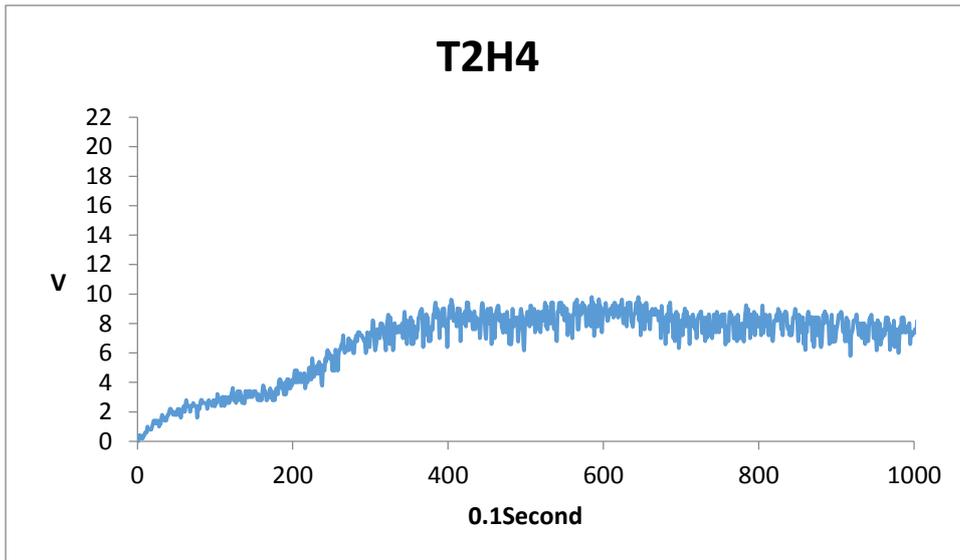
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 8 之單斜電壓



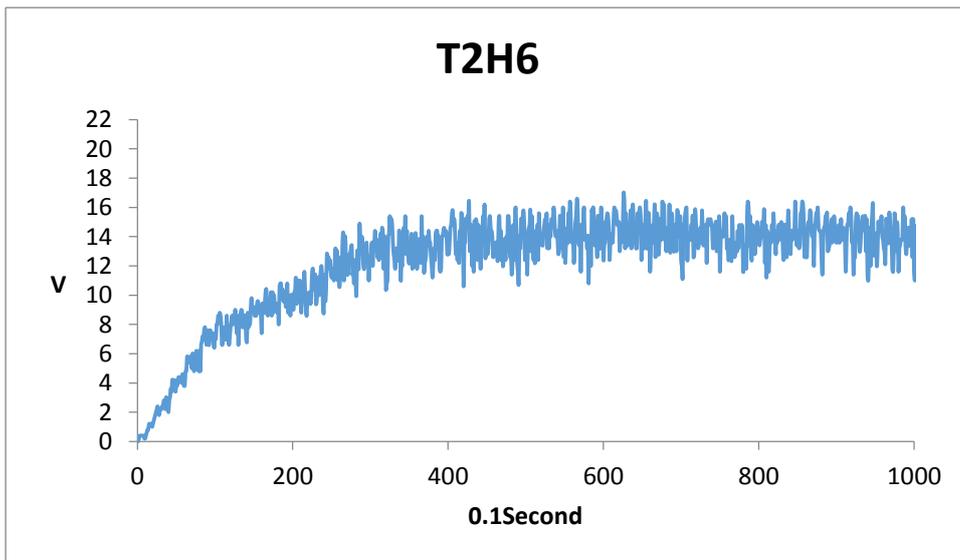
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 10 之單斜電壓



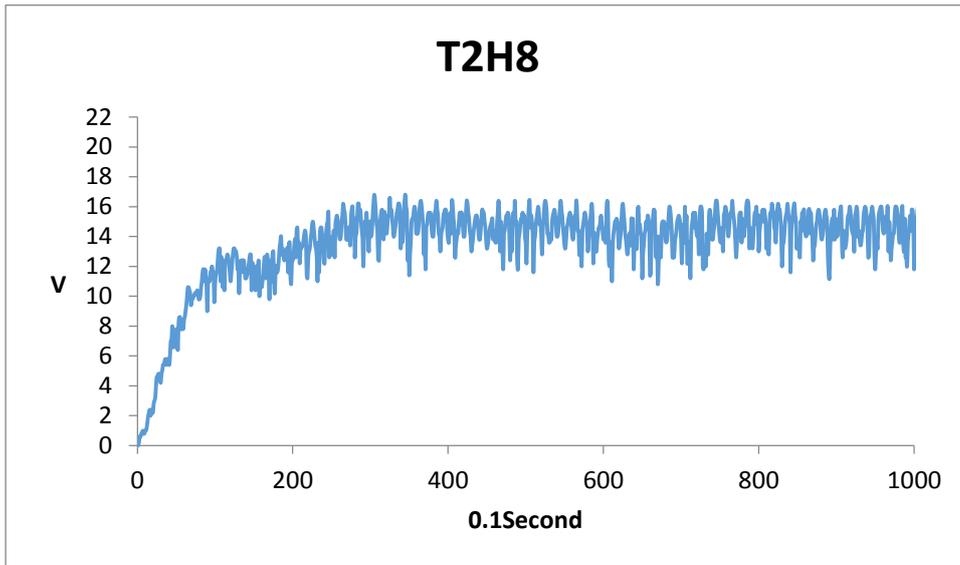
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 12 之單斜電壓



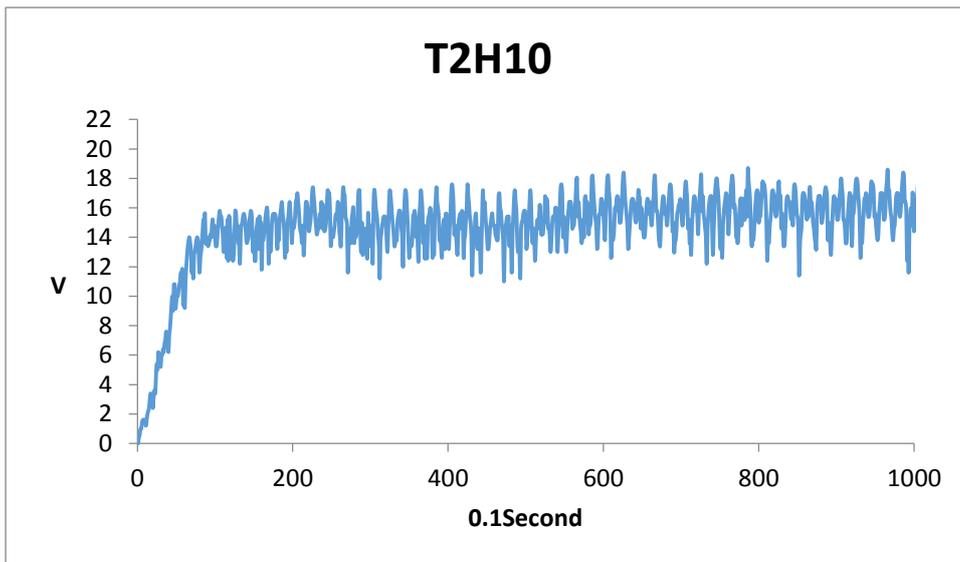
前牆開口率 100%週期 2 波高 4 之單斜電壓



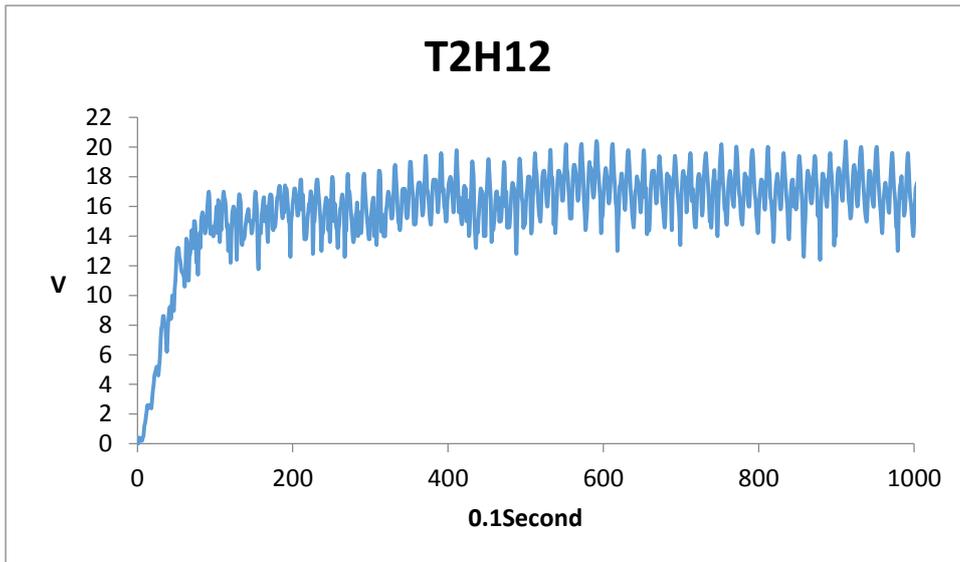
前牆開口率 100%週期 2 波高 6 之單斜電壓



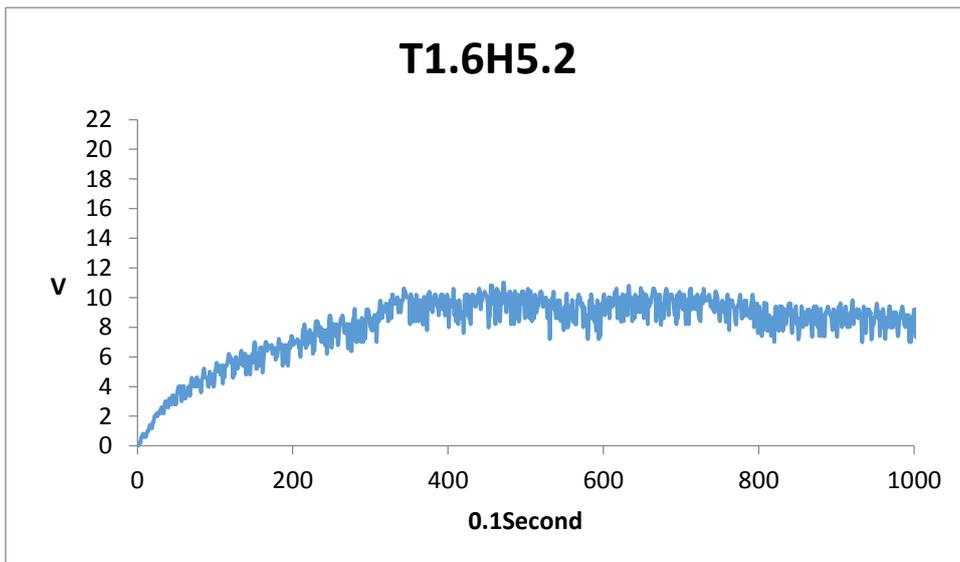
前牆開口率 100%週期 2 波高 8 之單斜電壓



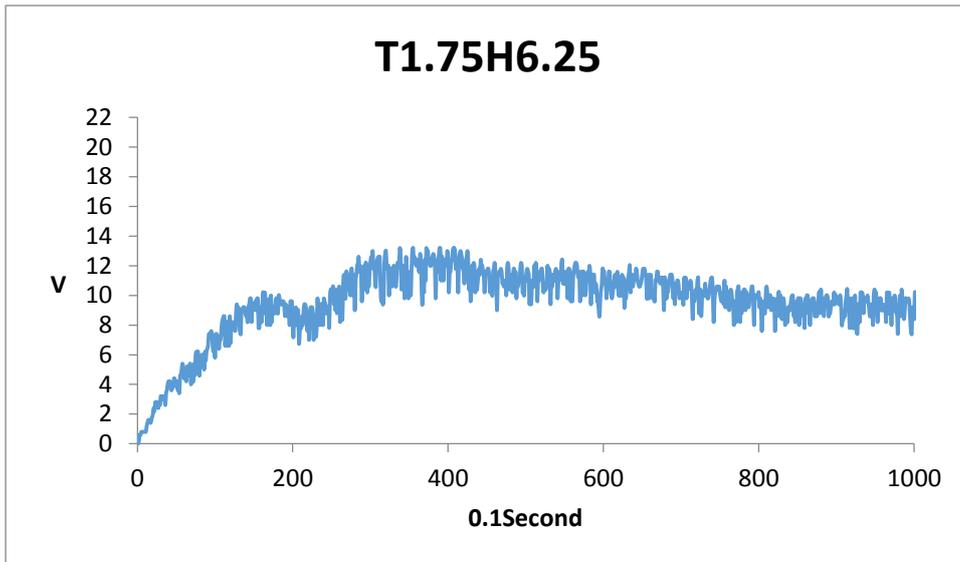
前牆開口率 100%週期 2 波高 10 之單斜電壓



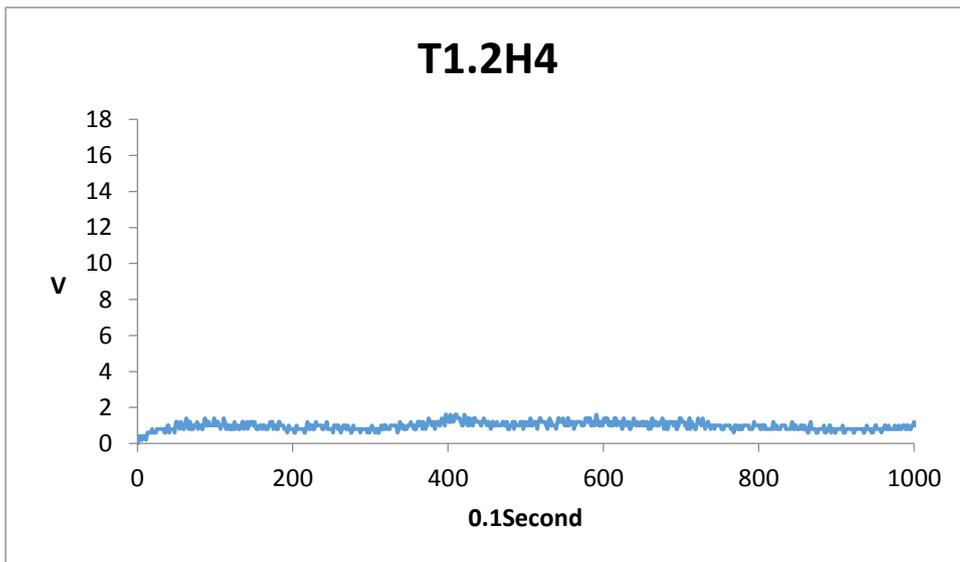
前牆開口率 100%週期 2 波高 12 之單斜電壓



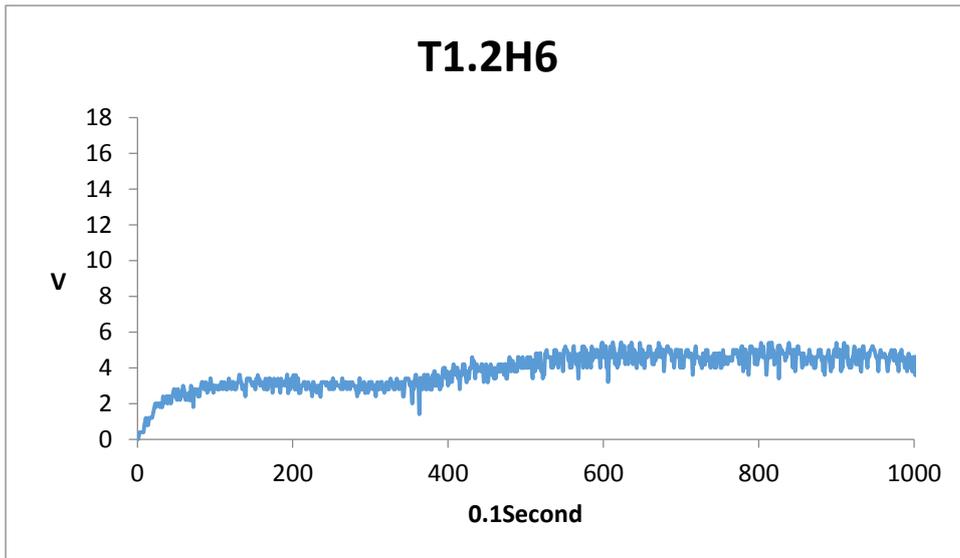
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 5.2 之單斜電壓



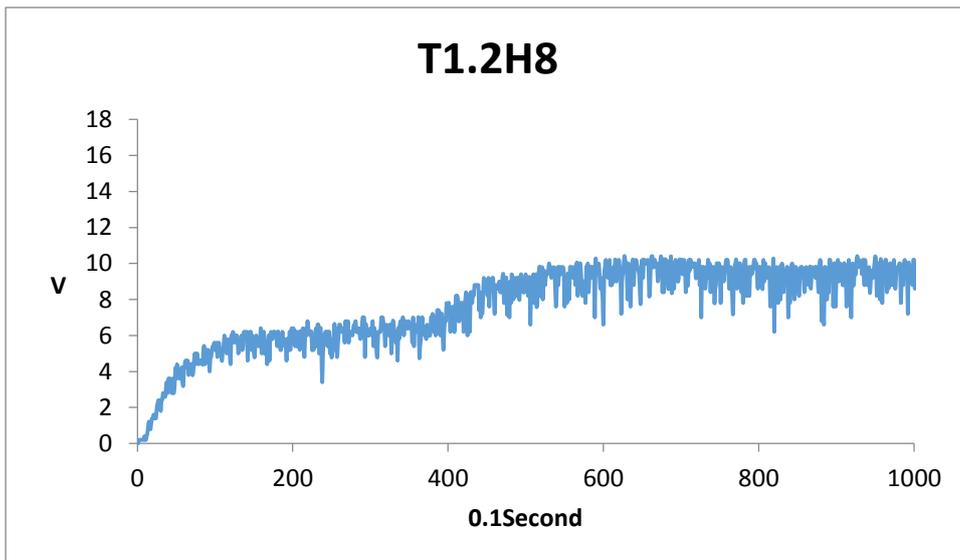
前牆開口率 100%週期 1.75 波高 6.25 之單斜電壓



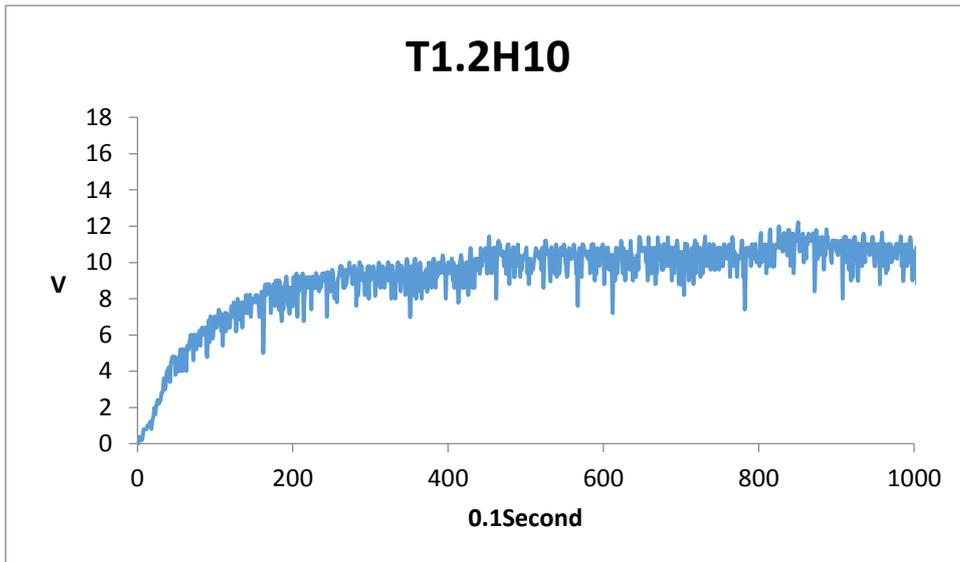
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 4 之雙斜電壓



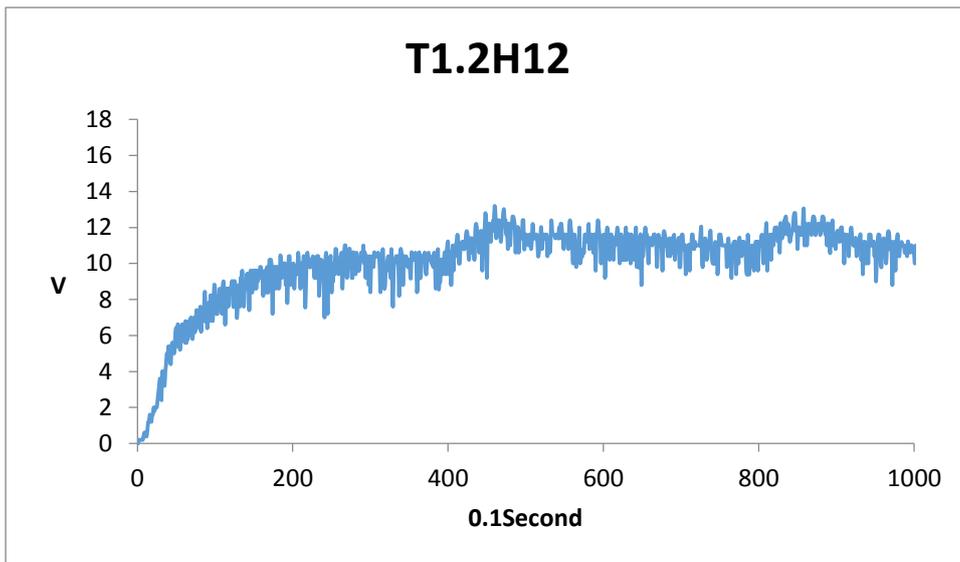
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 6 之雙斜電壓



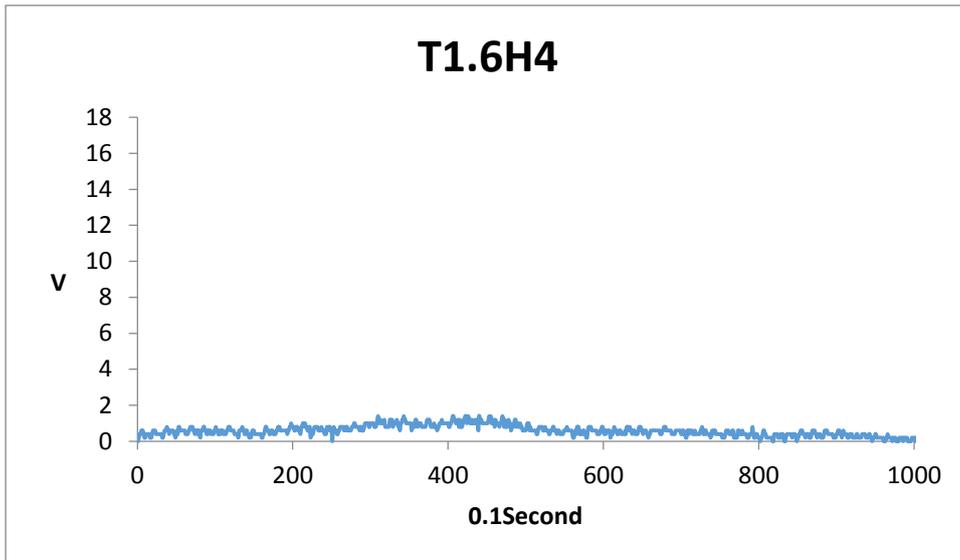
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 8 之雙斜電壓



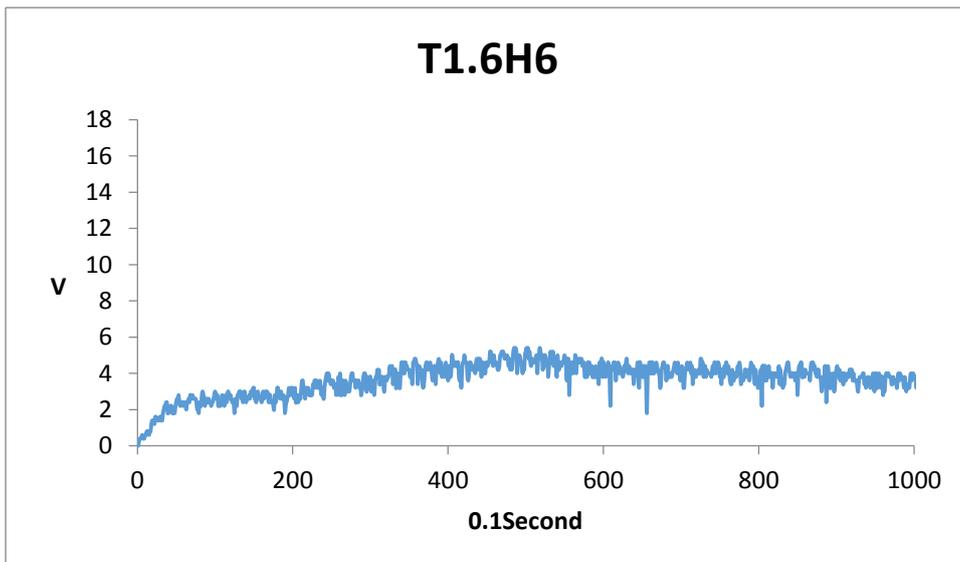
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 10 之雙斜電壓



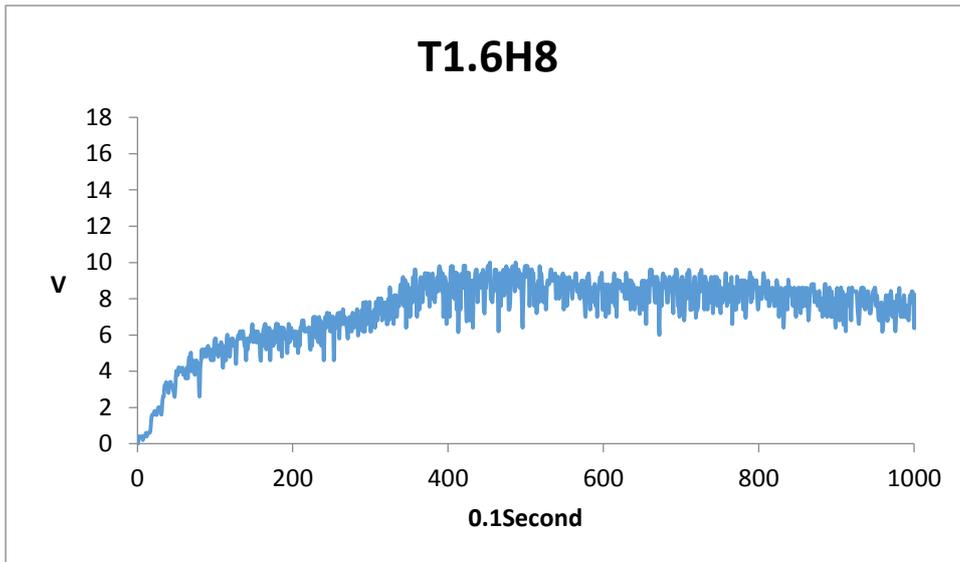
前牆開口率 35%週期 1.2 波高 12 之雙斜電壓



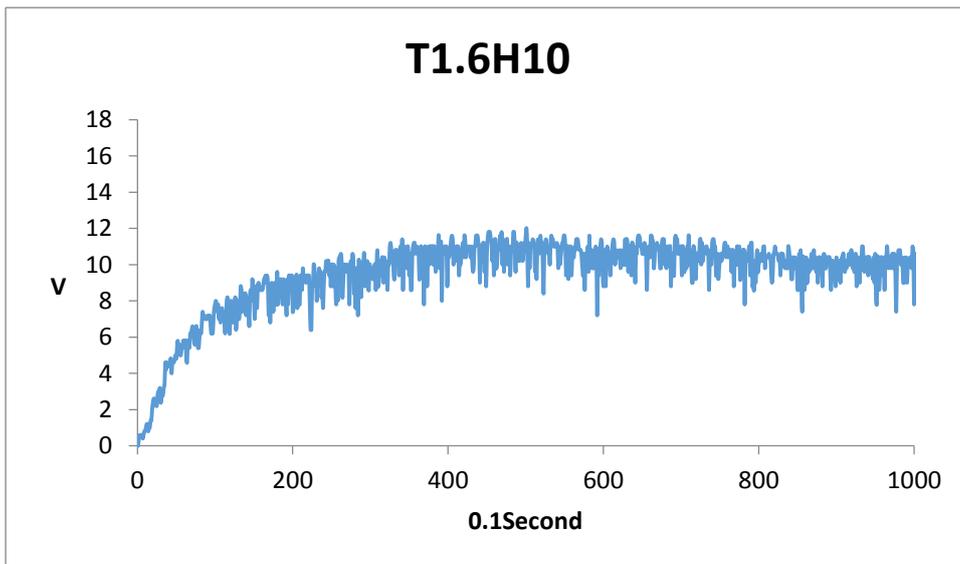
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 4 之雙斜電壓



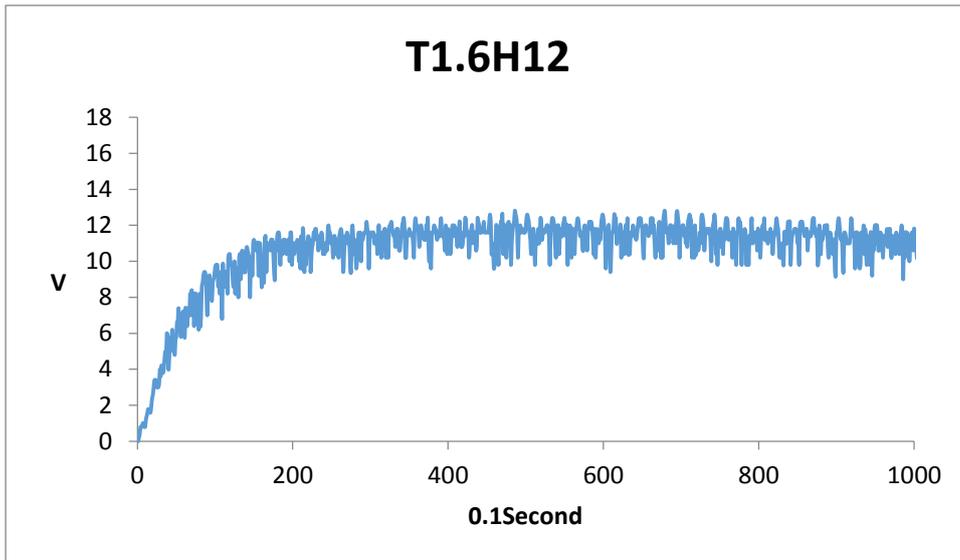
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 6 之雙斜電壓



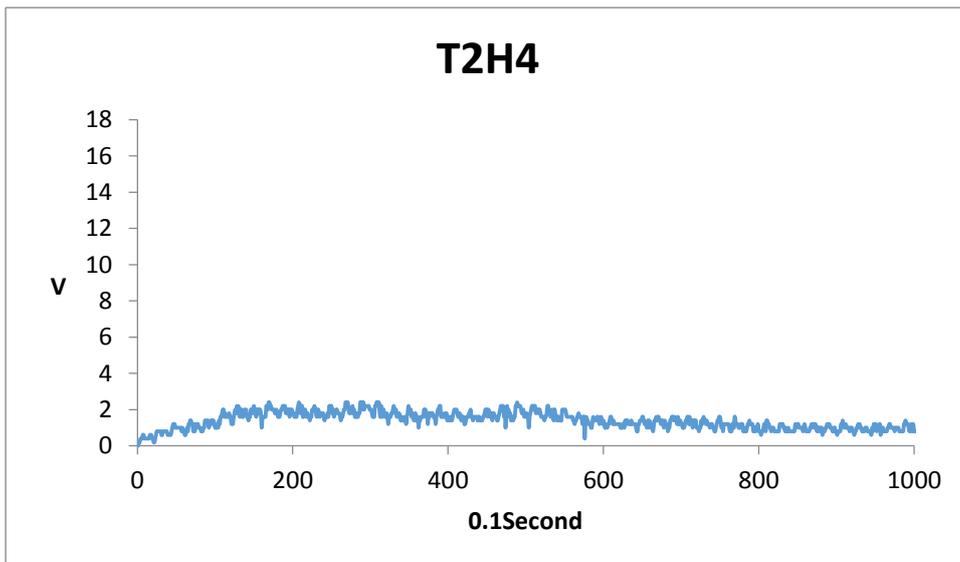
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 8 之雙斜電壓



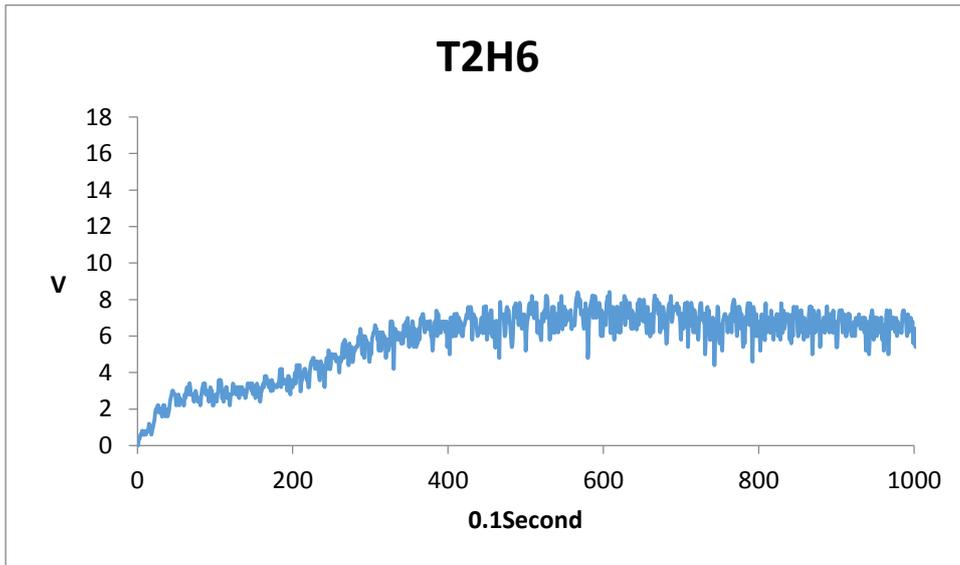
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 10 之雙斜電壓



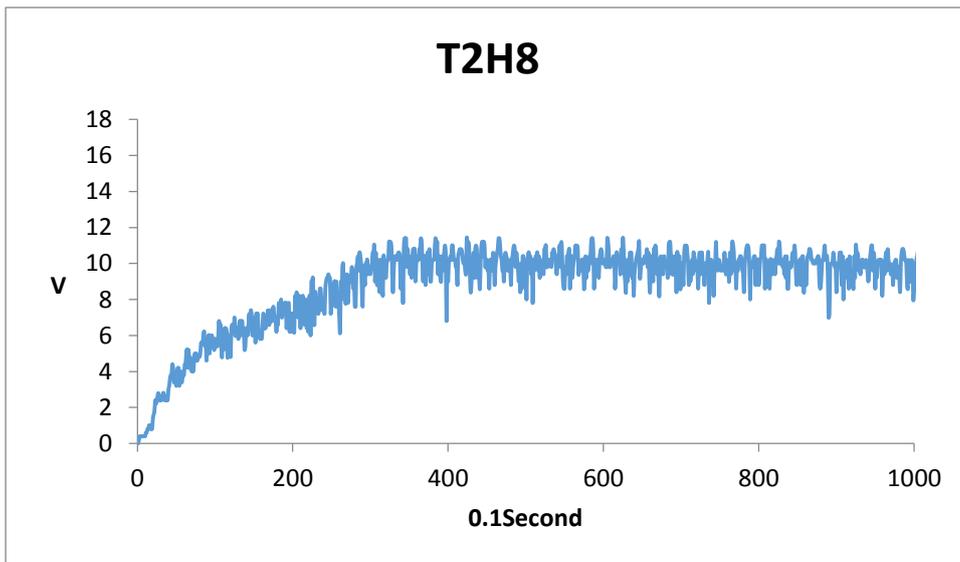
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 12 之雙斜電壓



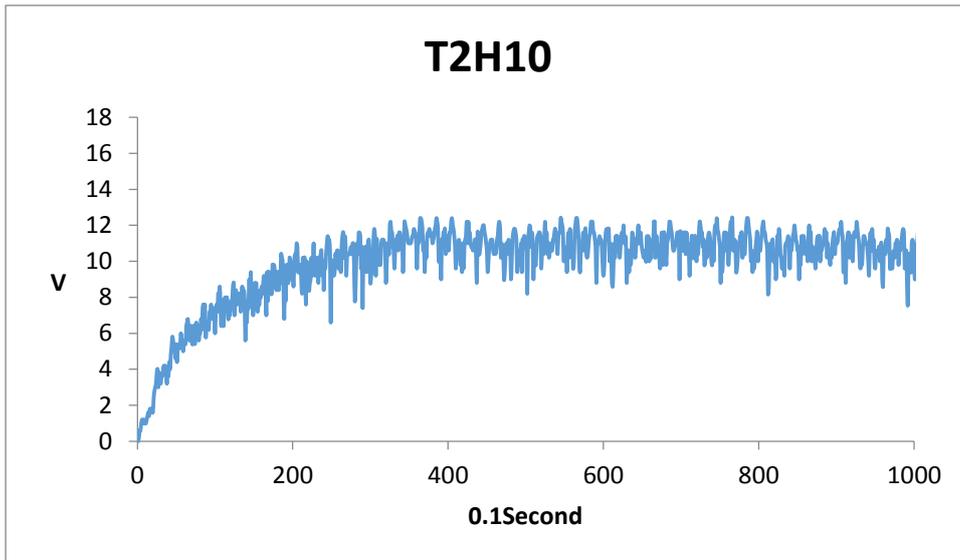
前牆開口率 35%週期 2 波高 4 之雙斜電壓



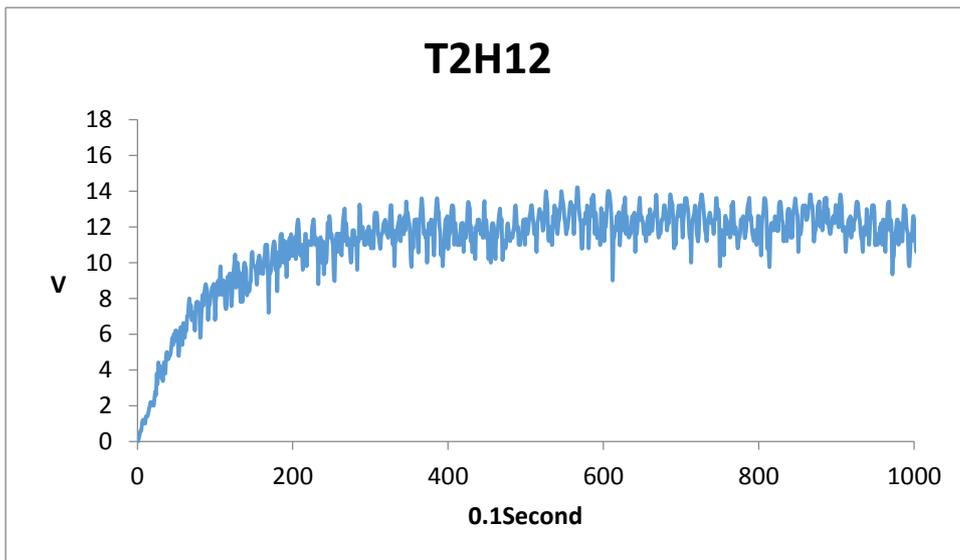
前牆開口率 35%週期 2 波高 6 之雙斜電壓



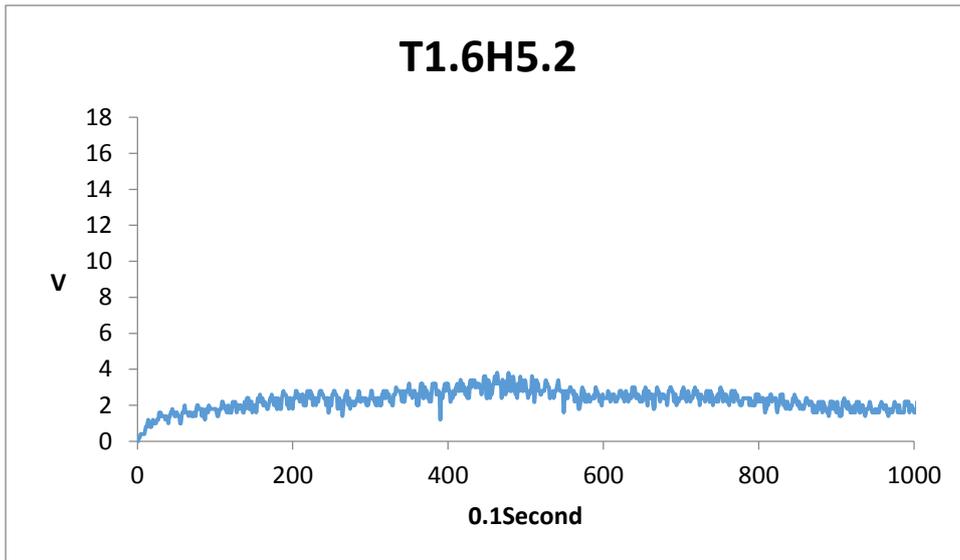
前牆開口率 35%週期 2 波高 8 之雙斜電壓



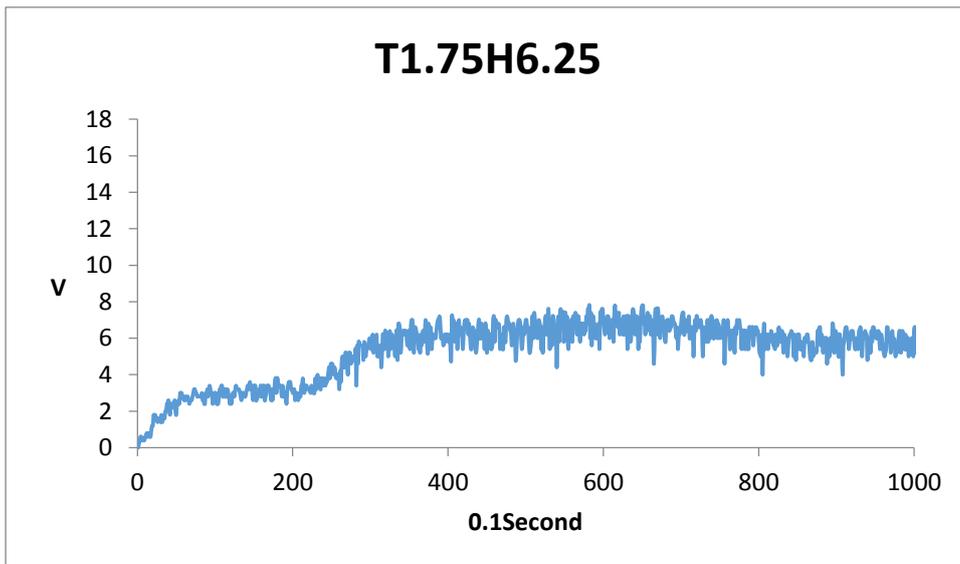
前牆開口率 35%週期 2 波高 10 之雙斜電壓



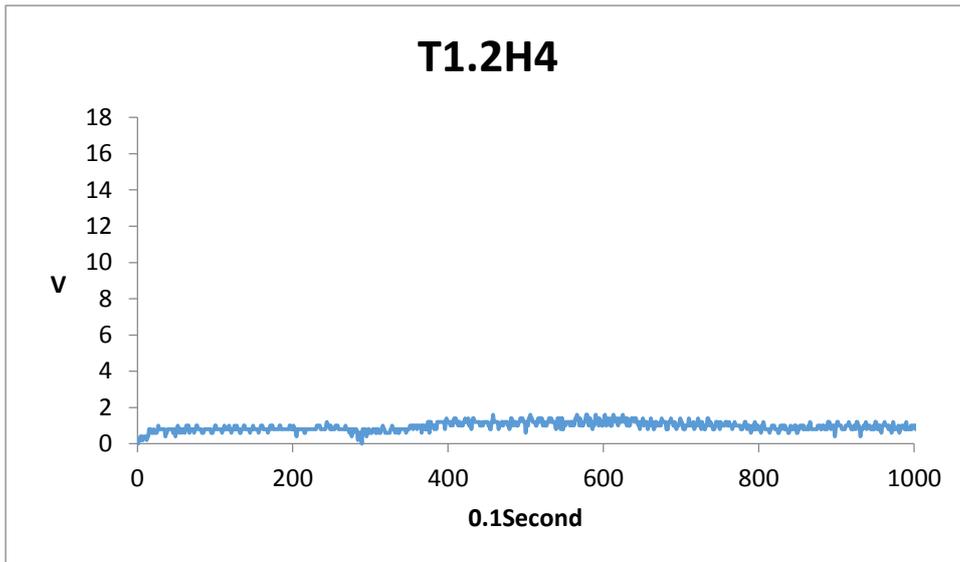
前牆開口率 35%週期 2 波高 12 之雙斜電壓



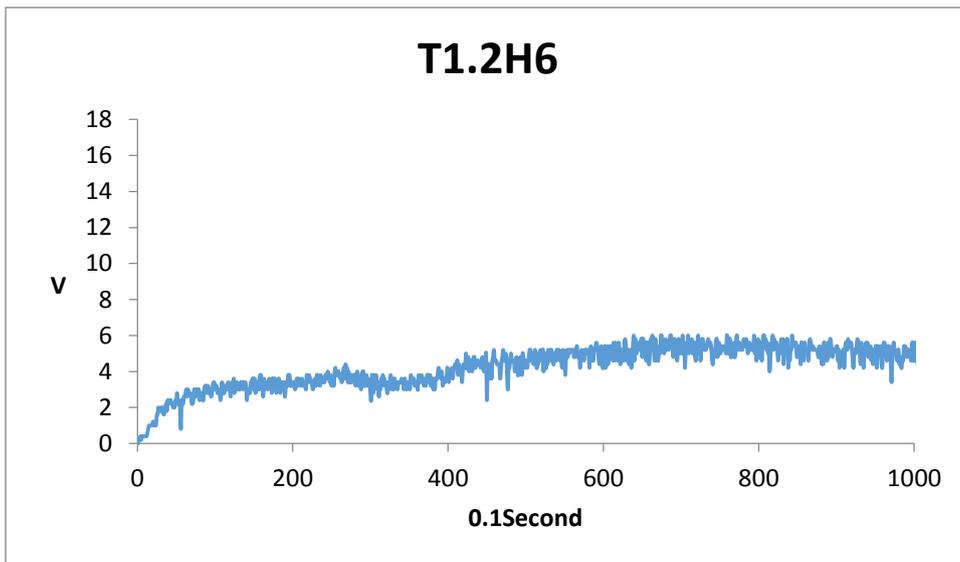
前牆開口率 35%週期 1.6 波高 5.2 之雙斜電壓



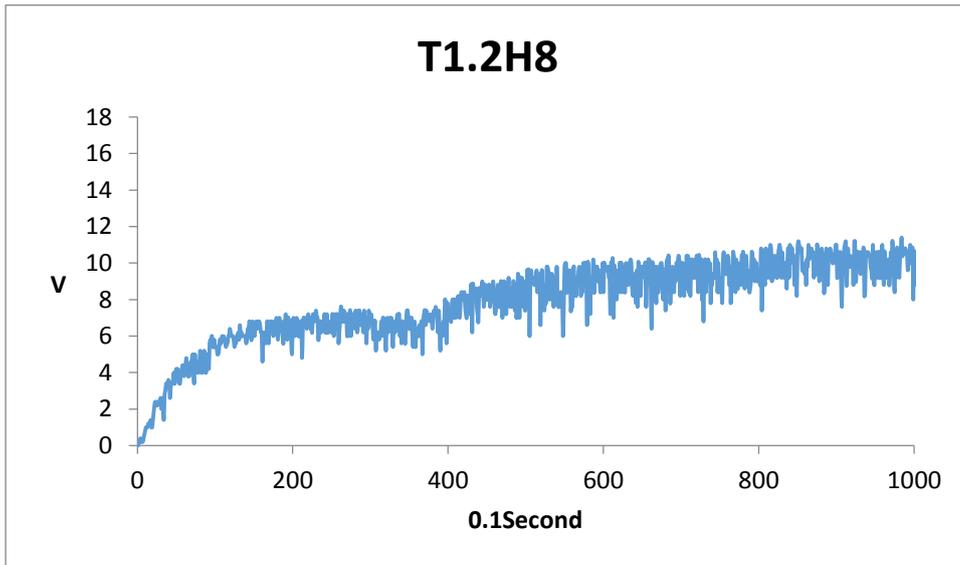
前牆開口率 35%週期 1.75 波高 6.25 之雙斜電壓



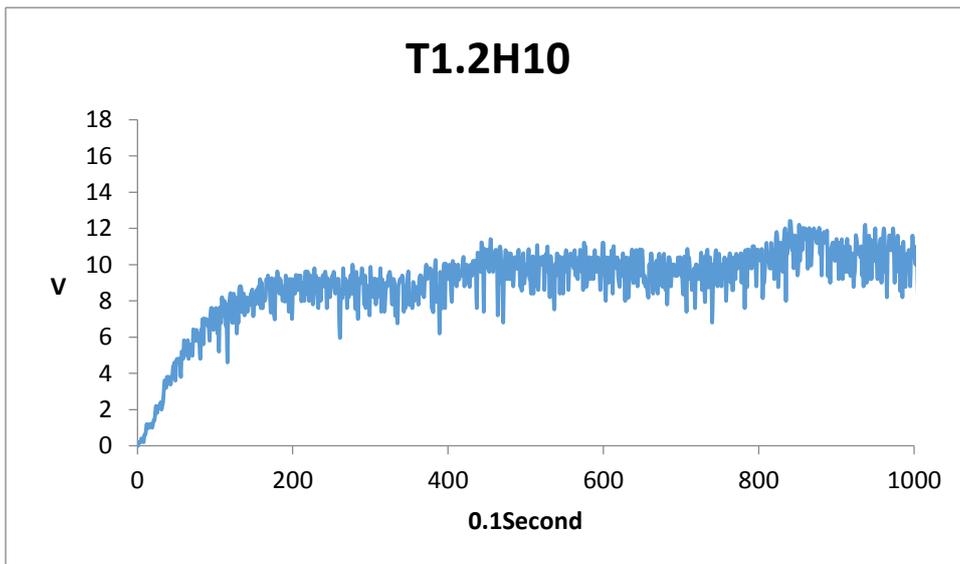
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 4 之雙斜電壓



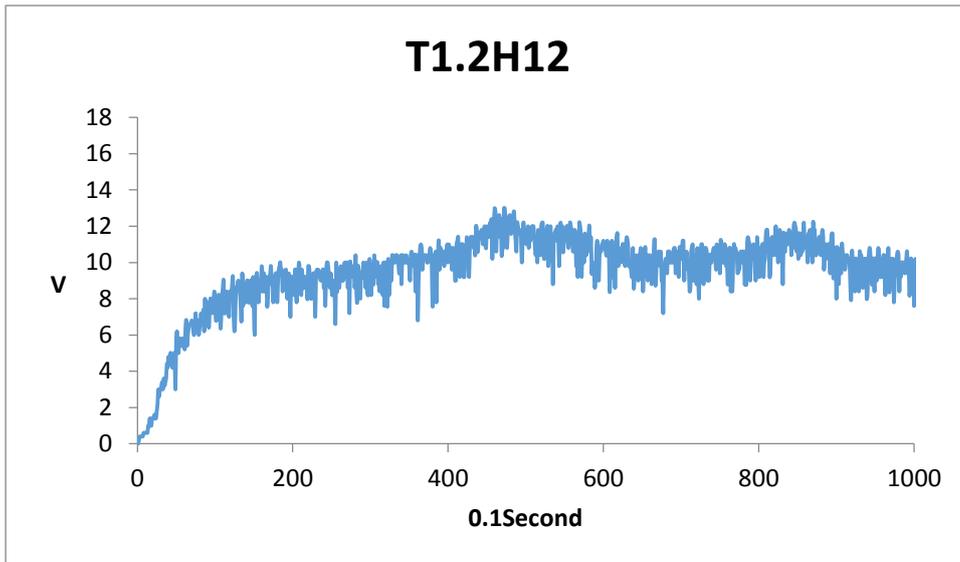
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 6 之雙斜電壓



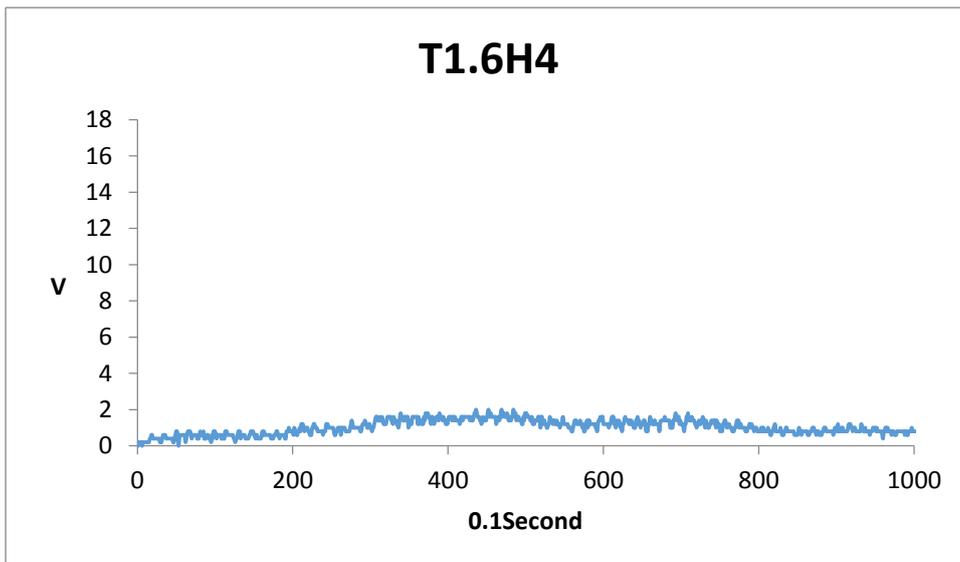
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 8 之雙斜電壓



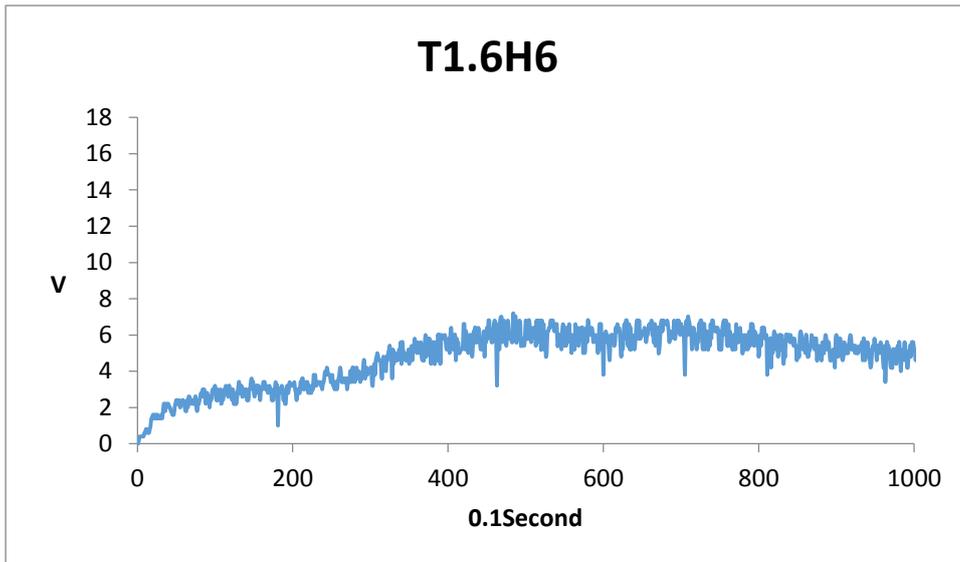
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 10 之雙斜電壓



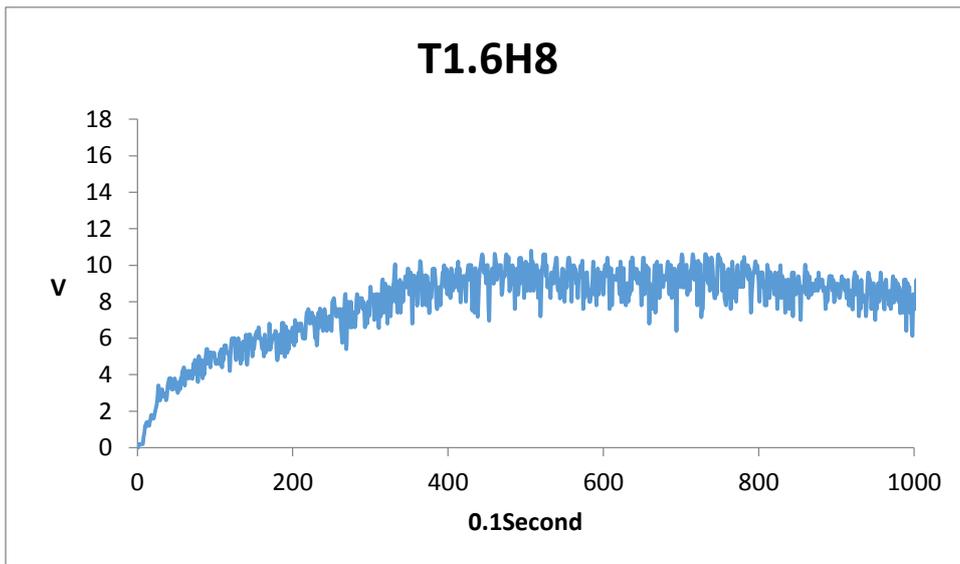
前牆開口率 100%週期 1.2 波高 12 之雙斜電壓



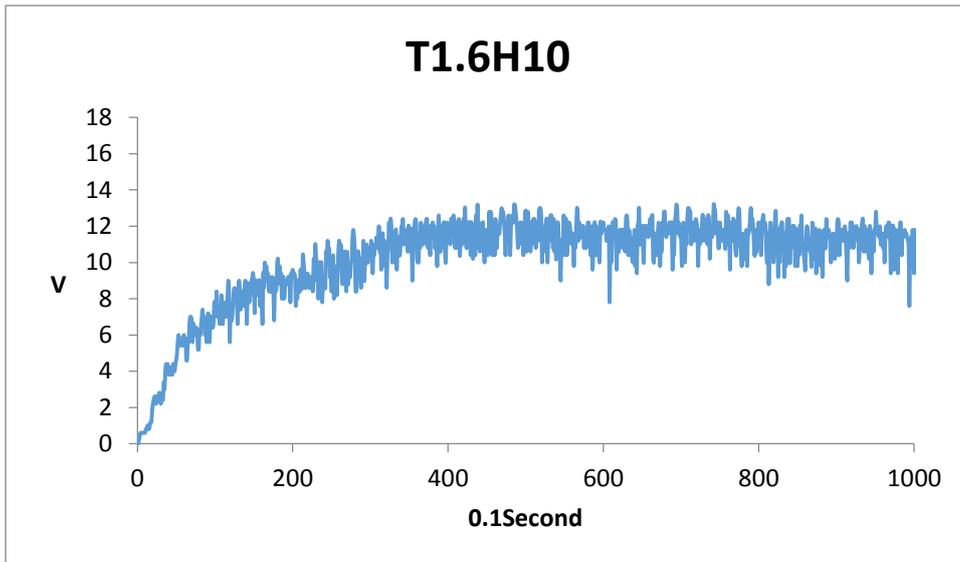
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 4 之雙斜電壓



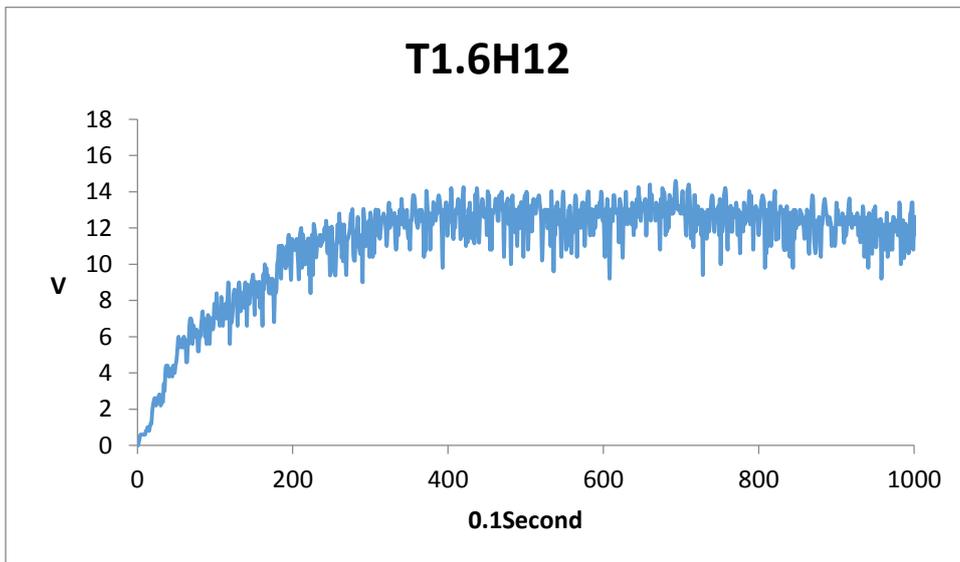
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 6 之雙斜電壓



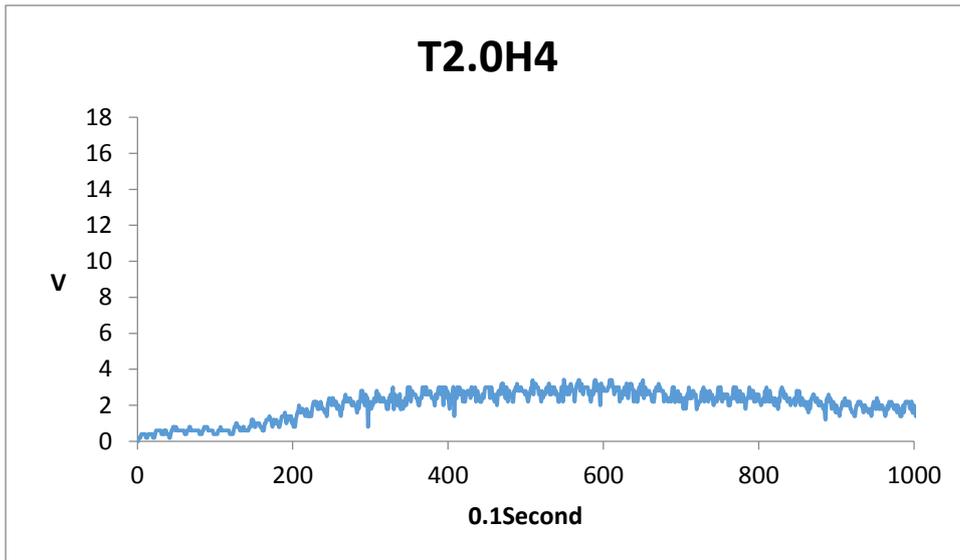
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 8 之雙斜電壓



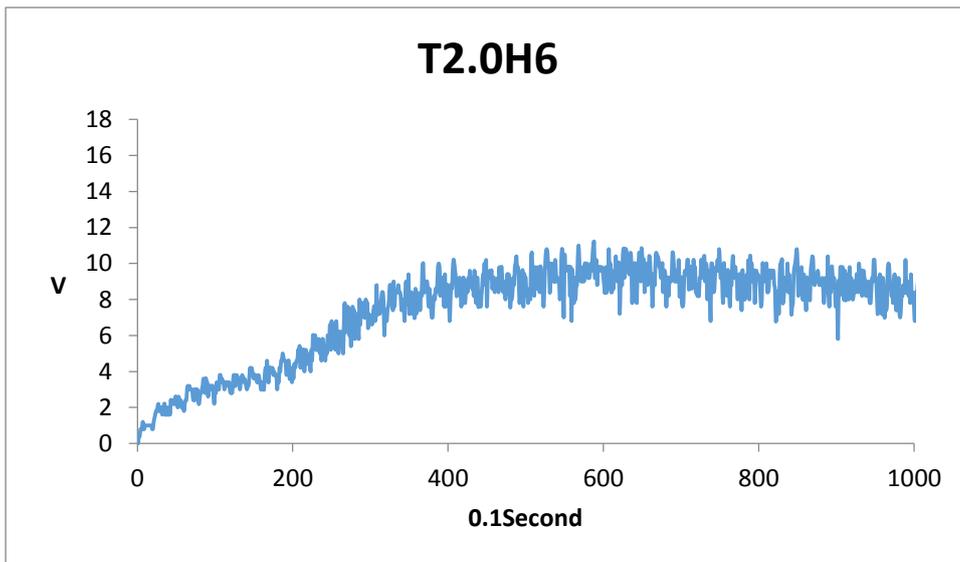
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 10 之雙斜電壓



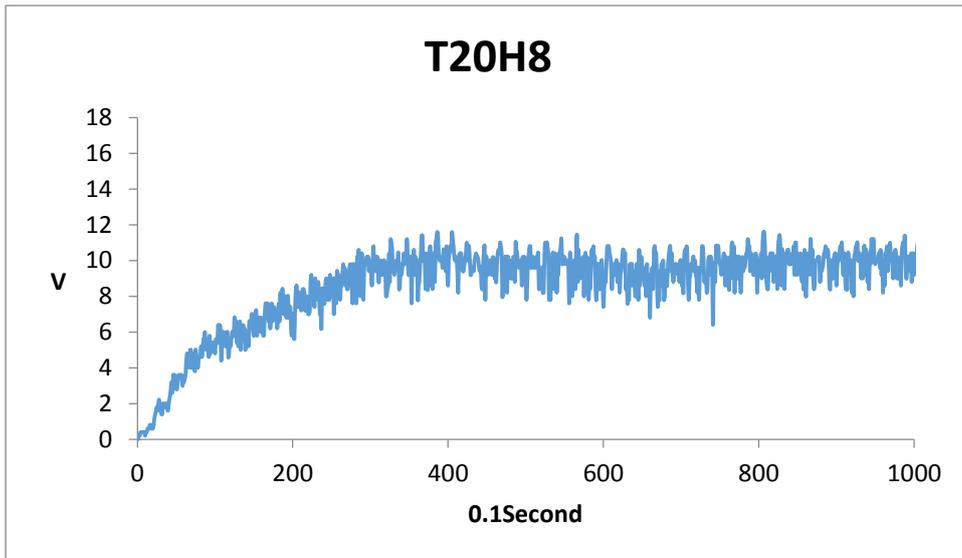
前牆開口率 100%週期 1.6 波高 12 之雙斜電壓



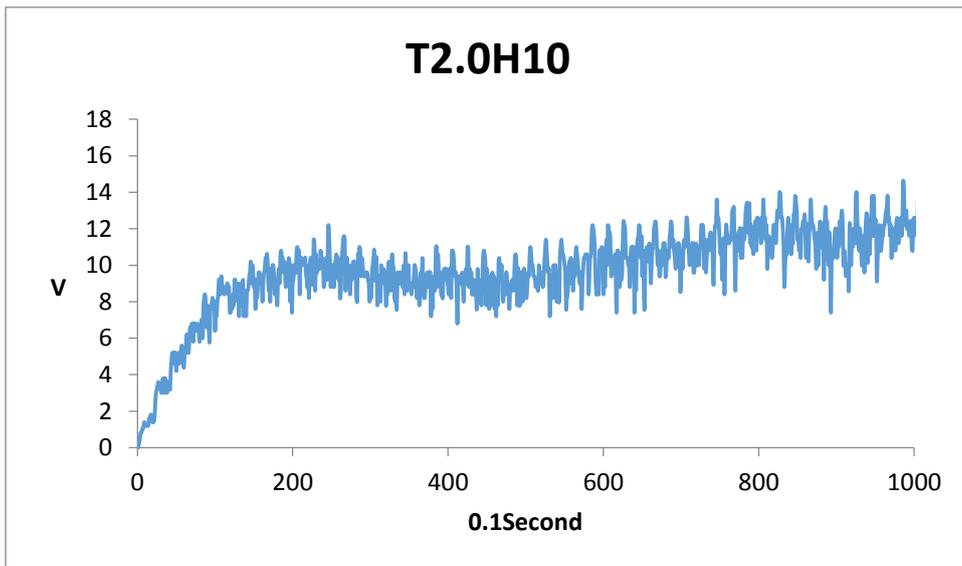
前牆開口率 100%週期 2.0 波高 4 之雙斜電壓



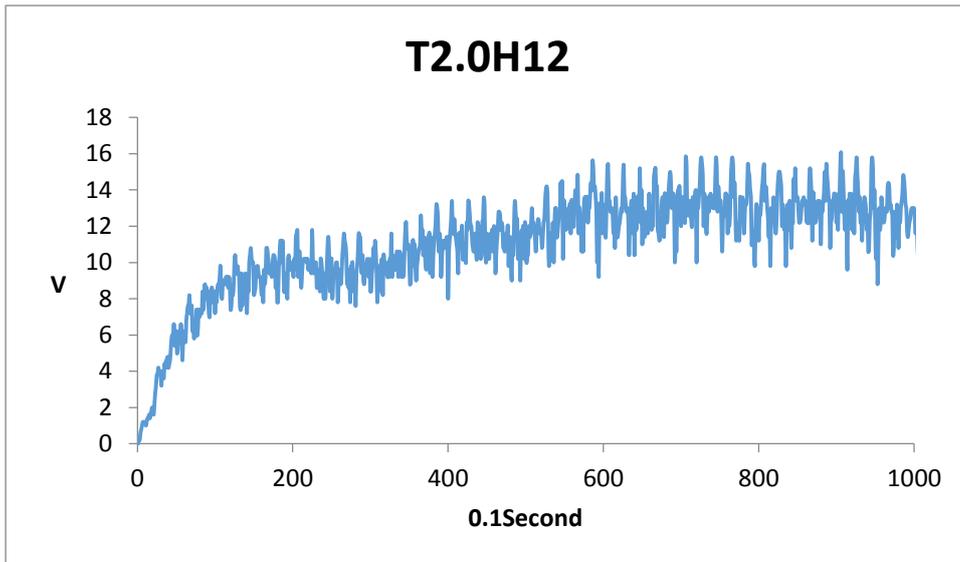
前牆開口率 100%週期 2.0 波高 6 之雙斜電壓



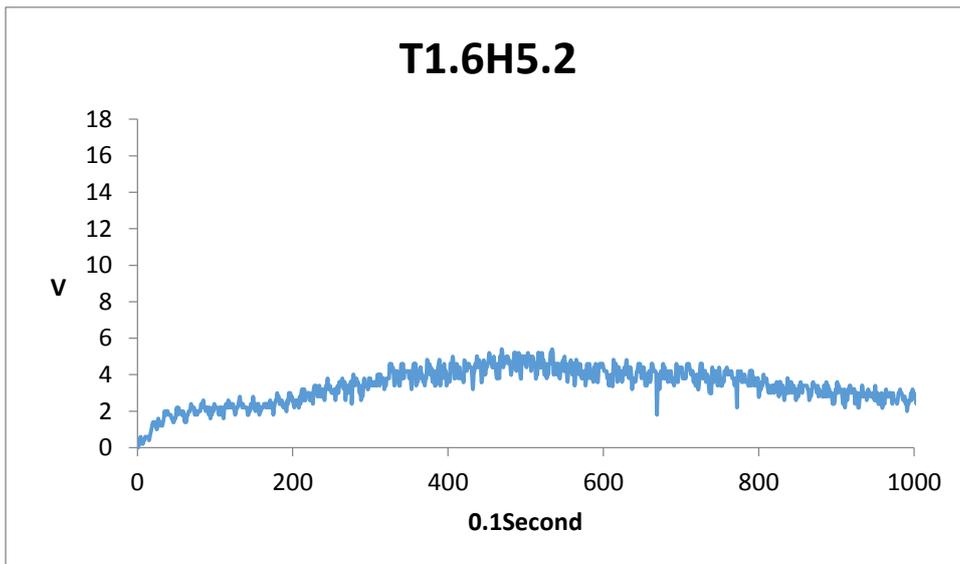
前牆開口率 100%週期 2.0 波高 8 之雙斜電壓



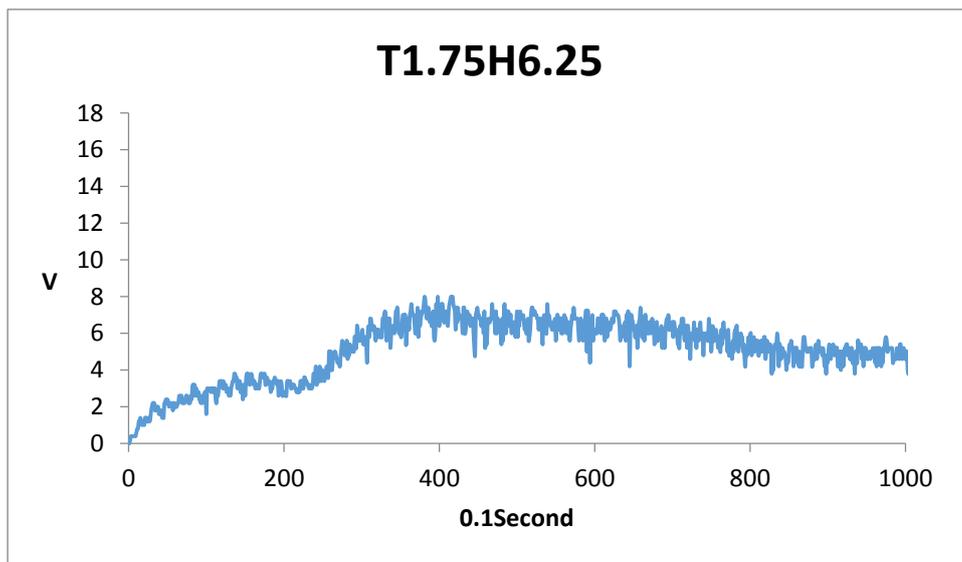
前牆開口率 100%週期 2.0 波高 10 之雙斜電壓



前牆開口率 100%週期 2.0 波高 12 之雙斜電壓



前牆開口率 100%週期 1.6 波高 5.2 之雙斜電壓



前牆開口率 100%週期 1.75 波高 6.25 之雙斜電壓

附件六 期中報告審查意見處理表

計畫編號：MOTC-IOT-105-H2DB005c

計畫名稱：可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色港灣之發展研究(4/4)

執行單位：國立中山大學

審查日期：105 年 7 月 11 日

參與審查人員及其建議改善意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
運輸研究所張金機 委員		
第二章內容與 104 年期末報告大致相同，其中表 2-10、2-11 及 2-12 中 Depth at lip、Lip depth below MWL 等均未更正。	感謝委員的建議與指教，已修正表 2-10、2-11 及 2-12 中 Depth at lip、Lip depth below MWL 翻譯名稱	依處理情形辦理
第四章防波堤設計規範與附錄基本設計(防波堤)應非本研究計畫重點，描述甚詳，但擷取系統卻僅以流程圖帶過。	感謝委員的建議與指教，會在期末報告詳述設計流程	依處理情形辦理
第七章與 104 年期末第五章僅圖 7-12 直流改為交流，增加風洞導流系統外，所有描述均相同，改變交流增加導流並未進一步描述。P143 表 7-2 為何同一模型(Model 103-1)高雄港模型週期與波高比花蓮港大。	感謝委員的建議與指教，花蓮港波浪條件實驗縮尺為 1/25，高雄港則為 1/16/	依處理情形辦理
根據第五章防坡堤波能擷取參數研究成果，針對波浪條件、設置環境提出最佳防坡堤設計參數(範圍)。	感謝委員的建議與指教，會在期中報告提出較佳設計範圍	依處理情形辦理
根據第六章渦輪設計研究成果，進一步作風力發電測試(可分為波浪引起氣流與單獨製造氣流)。	感謝委員的建議與指教，會增加風扇風洞實驗以便與波浪實驗對照。	依處理情形辦理
如果可能針對模型(物理、數值)轉換參數再作探討。	感謝委員的建議與指教，會在期末報告針對模型(物理、數值)轉換參數再作探討。	依處理情形辦理
國立臺灣海洋大學翁文凱 委員		

<p>本研究今年為四年期最後一年，建議應將前三年之研究成果統合於今年之計畫成果中，有利於整個計畫成果的瞭解，亦可分年敘述及成果並得合其整體成果。</p>	<p>感謝委員的建議與指教，會在期末報告整合前三年的研究成果。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>本研究為綠色能源結合港灣結構，建議先評估各種綠色能源應用於港灣結構物之適用性，以瞭解港灣結構應用中最適合之綠色能源種類。</p>	<p>感謝委員之建議與指教。</p>	<p>符合</p>
<p>海洋能源內本文以波浪能為主要考慮，其原因為何？而波浪能之型式以 OWC 為考慮，其原因為何？建議有一系統之說明。</p>	<p>感謝委員的建議與指教，本研究考慮港灣結構、腹地與經濟性；太陽能因天候的不穩定性變數較多。風力發電則需要大面積的設置並考量土地的乘載力。 波浪能選擇 OWC 系統之原因為構造物簡單、施工方便、生物不易附著於發電系統、維護方便等因素。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>本文所利用型式目前已有相當多文獻發表，其差異為何？</p>	<p>感謝委員的建議與指教，本研究之差異在於堤前坡度與風扇系統之改良。今探討法規設計是否與港灣現有構造物相容。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>內容細節如下： (一)文字部分誤植 (二)波能擷取效能 (三)影響參數(擷取效能之影響參數)要作哪些？ (四)艙內共振頻率 (五)Pa 為何(總壓 or 動壓)擷取效能 V.Pa，為何不用導流管內之 V 及 Pa (六)防波堤最佳配置型式為何 (七)風力維修成本的考慮 (八)風速計配置位置及功能型式應說明</p>	<p>感謝委員的建議與指教。 (一)文字誤植已修正 (二)擷取效能在 15% 至 20% 之間 (三)目前將以風扇改良與發電系統更換為主要項目 (四)會在工作期間進行討論 (五)後期工作期間壓力將以導管內部壓力為主要測量項目 (六)會在期末報告提出較佳設計範圍 (七)會在期末報告提出維修整本概</p>	<p>依處理情形辦理</p>

<p>(九)OWC 影響參數應在前期已檢討清楚，才配置考慮防波堤型式</p>	<p>略計算</p> <p>(八)會在期末說明風速計配置位置及功能型式</p> <p>(九)影響參數已在前期探討過，會在期末提出配置形式。</p>	
<p>國立嘉義大學陳文俊 委員</p>		
<p>本研究期中已得到許多具體之初步成果，給予肯定，期許期末可得符合目標之成果供委辦單位參考。</p>	<p>感謝委員的建議與指教。</p>	<p>符合</p>
<p>海洋能如潮汐、波浪之應用分析能否如太陽能、風能給予各港灣發電功率之估算。</p>	<p>感謝委員的建議與指教，臺灣因欠缺自然地形故潮汐能無法推廣。在期末報告會推估各港區之電功率。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>本報告中敘述臺灣東北部有較大之波能，是否代表於基隆港有較可能之波浪發電潛能抑或不侷限現有港口地區？</p>	<p>感謝委員的建議與指教，本研究之理念為在現有之防坡堤外部加裝此裝置，而原有之防坡堤已符合堤體安全之設計，固本研究不侷限現有港口地區。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>本研究所研提直立式防波堤設計基準及設計流程，建議可列出一般直立式防波堤及與綠能結合防波堤設計上之差異，有利凸顯此部分之研提。</p>	<p>感謝委員的建議與指教，會於期末報告列出。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>有關反射率、氣流速度、內部壓力之成果中，Kr 之 H/L 與氣流速度、內部壓力之週期是否為同條件之試驗，氣流速度、內部壓力之部分能否改為無因次成果？</p>	<p>Kr 之 H/L 與氣流速度、內部壓力之週期為同條件之試驗。氣流速度與內部壓力將會還原與現地相同之尺寸比較。</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>水工試驗條件選取花蓮港及高雄港之波浪條件是否與本文提及東北部有較大之波能有違？</p>	<p>花蓮港波浪條件實驗縮尺為 1/25，高雄港則為 1/16/</p>	<p>依處理情形辦理</p>
<p>國立成功大學水工試驗所江文山 委員</p>		
<p>本研究將波浪能轉換為氣流驅動渦輪機發電，就現地而言，風驅動的氣流更為直接，</p>	<p>感謝委員的建議與指教，會考量納入風力與波浪兩種驅動力。</p>	<p>依處理情形辦理</p>

是否可能考量納入兩種驅動力。		
後續工作：”評估對港灣構造物之影響”，評估項目涵蓋哪些？	感謝委員的建議與指教，包含沉沙與震動等	依處理情形辦理
實驗數據分析結果，建議能對物理意義略加說明，以利閱讀。	感謝委員的建議與指教，本研究將在期末報告中加入結論與建議章節。	依處理情形辦理
報告中請說明歷年成果，再說明今年度的部分，較清楚明白。	感謝委員的建議與指教，本研究將在期末報告中加入結論與建議章節。	依處理情形辦理
本所港研中心蔡立宏 委員		
波能擷取系統與防波堤共構後是否影響原有的安全穩定，建議做力之分析，探討其滑動、傾覆、承載、破壞等。	感謝委員的建議與指教，會在期末探討安全之分析，包含其滑動、傾覆、承載、破壞等。	依處理情形辦理
本研究已針對反射率、氣流速度與室內壓力做分析探討，未來是否能提出建議之配置條件。	感謝委員的建議與指教，會在期末報告提出較佳設計與配置範圍	依處理情形辦理
氣流速度及室內壓力分析以無因次氣室長度之前 1/3 作探討分析，為何不以平均值做分析。另外無因次沒水深，是以哪物理量無因次化。	海洋波浪資料多以前 1/3 之波浪資料為參考數據，無因次沒水深為波高之無因次化。	依處理情形辦理
在 5.4 節中探討海床坡度影響，坡度有 1/1、1/2、1/4 其坡度變化是否影響入射水深。	感謝委員的建議與指教，坡度變化的確有影響入射水深，但卻是實際作用是以消能為主。	依處理情形辦理
本所港研中心曾相茂 委員		
摘要表研究人員參與人員是否要修正。	感謝委員的建議與指教，本研究將進行相關之修正。	依處理情形辦理
目錄之格式是否須調整為本所之要求格式。	感謝委員的建議與指教，本研究將進行相關之修正。	依處理情形辦理
第 18-20 頁基、中、花、高四港之推估之各種重現期波高為何會用不同的方式？	感謝委員的建議與指教，波浪資料因風向、波向等自然因素，故會使用不同的推估方式。	依處理情形辦理

附件七 期末報告審查意見處理表

計畫編號：MOTC-IOT-105-H2DB005c

計畫名稱：可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色港灣之發展研究(4/4)

執行單位：國立中山大學

審查日期：105 年 12 月 2 日

參與審查人員及其建議改善意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
運輸研究所張金機 委員		
試驗資料分析：水槽有效長 20m，水深 0.6m，試驗 60s，重復反射嚴重。因此，如何擷取部份資料分析相當重要。建議仿 Goda(P5-9)分析方法。	感謝委員意見，已重新分析波高資料並進行比對與修正。	符合
部份試驗結果呈現異常現象，建議能加以說明，例如(一)P9-1 表 9-1，T=1.0 較 T=1.2，1.4 高；T1=1.6、1.8 增高，T=2.0 又降低。(二)P 附 2-2 T=1.2，H=10 波浪呈穩定變化，但 P 附 3-2 風速呈不規則變動，P 附 4-2 轉速又漸穩定。	反射率因波浪之週期改變而變化，但並非正相關之原因微波長與造波水槽長度之對應關係，部分波長在可能會出現駐波的現象發生如 T=1.8，而在多個波疊加的狀況下有可能會出現時而駐波時而疊加的狀況。 T=1.2，H=10 之波高資料有一週期性變化，因出圖之比例故不易發覺，風速也是為一具有週期變化之狀況。	依處理情形辦理
本研究選擇可能發生之波高週期組合，在不同堤體條件測得可用參數，最後得到最大電壓及電功率。但計畫目的為評估港灣建置波能發電可行性建議，利用港口波浪分佈概率與試驗結果概估每年可生產電量。	感謝委員之意見，會在建議處提出。	依處理情形辦理

4. 風機能取得風能最大極限為 59% 實際少於 30%，波浪發電能擷取多少波能？波浪風速→風能擷取試驗與實體(原型)差異極大，應為下個階段研究重點。因此，在建議(第七章)增列此項目	本期實驗結果發現，最高截取率為 50% 已上，但在發電效能上則須考慮實際發電量而非擷取率，其效率與發電機型式、大小及設置方式均有影響。	依處理情形辦理
其他(一) 附件之附圖編排不完整，圖名、標示等。(二) P8-6 改變參數高雄港波高週期均較花蓮港大，不合理，因為參數不必提港口。	(一)會進行附件編排之修正。 (二)花蓮港之縮尺為 1/25，高雄港縮尺為 1/16。故花蓮港之實驗波浪資料小於高雄港。	依處理情形辦理
模型試驗與港口實體存有很大差異，建議未來可以建立小型實體防波堤試驗。	感謝委員之意見，會在建議處提出。	依處理情形辦理
國立嘉義大學陳文俊 委員		
本案報告內容涵蓋法規，結構分析、數值模擬及水工試驗等極為豐富，給予肯定	感謝委員肯定	符合
P5-20 及 P5-29 所提及氣室水位變化中“內部波高最大值“，“最小值“等應將“波高“修正為振幅較適當。	感謝委員之意見，會進行修訂。	依處理情形辦理
5.5 節中有關“NS“，“S11“，“S12“之代表意義建議先說明(於第六章 P6-27 有說明)。	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
表 5-9 中模擬結果中花蓮港波能約為高雄港之 3.6 倍，惟其入射波高僅為高雄港之 1.3 倍，是否蓋水面積不同，又試驗結果反高雄港波能為花蓮港之 1.6 倍，波能是以量測方式測得所致？	數據誤植，已修正	依處理情形辦理
P5-39 提及“土木 406-100“，建議改為“土木 401-100“較符設計規範之意義	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
第六章之試驗部份無論氣流速度，內部波高，能量擷取率週期 1.8sec 都有最小之結果，原因是否與此週期之波長與水槽長度模型氣室長度間有關？另水槽長度於長週期下不足亦可未來考慮	週期 1.8 之波浪條件對應於 20 公尺之造波水槽會出現駐波之現象。水槽長度於長週期下不足為未來考慮之問題。	依處理情形辦理

目前之能量擷取率約在 20% 以下，有無思考如何提升，可作為接續之研究	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
建議報中之結論能再修適；建議亦可針對本研究發現可改善，未考慮到的及可延續的去作修正	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
結論及建議部份請依具體研究得到之結果及發現可再延續之部份作具體之撰寫	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
成功大學水工試驗所江文山 委員		
報告中對基礎實驗研究與工程實務設計方面，均有相當篇幅的說明，建議於適當的章節針對該二部份整合說明，以利讀者閱讀	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
P.1-7 第一段文字提到波能系統納入港灣結構物不會有安全上的顧慮，但有相容性問題，請具體說明以免誤解	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
建議結論中增加實驗研究結果的總結說明，另外，目前結論內容有些部份似乎不適合放於結論中，請再考量	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
根據團隊長期投入的經驗，關於此主題，是否尚有待進一步研究的部份，請考量納入建議中	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
P9-56.9-57 花蓮港與高雄港的實驗結果顯示入射波能轉風能的效率分別為約 12% 與 20%，若進一步轉換為電能則效率如何？另二個實驗的模型縮尺不同分別為 1/25 與 1/16 是否對結果亦有影響。	風能轉換為電能其效率與發電機型式、大小及設置方式均有影響。縮尺模型之結果比較，主要為還原成原尺寸誤差之浮動。	依處理情形辦理
基礎實驗研究成果豐富，實務應用待進一步發展	感謝委員肯定	符合
增加實驗研究具體成果的總結說明，結論與建議適當的修改	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
本所港研中心邱永芳 委員		

有可用性的建議與設計方式	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
具有創新性	感謝委員肯定	符合
申請專利。	會進行申請	依處理情形辦理
本所港研中心蔡立宏 委員		
太陽能分析上，以年發電量與建置成本計算每度電之成本，似不恰當。	已年發電量之原因為必須克服日照時間不同之原因，故以年做為時間之評估單位，且拉長評估之時間。	依處理情形辦理
實驗條件上，花蓮港與高雄港的縮尺並不相同，本研究如何應用其條件定出波浪條件。	以波浪水槽模型之罪大縮尺為原則，因高雄港及花蓮港條件不同而使用不同之縮尺。	依處理情形辦理
報告中之圖表，建議於內文中提及	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
期中審查意見與回覆辦理情形需列入報告中。	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
編撰格式需依本所出版品規定編排	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
建議將前三章的成果節錄說明	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
最後一章結論與建議中，需增加效益與應用	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
本所港研中心陳志弘 委員		
本研究為四年期計畫最後一年，文中未提及前三年的工作內容與成果，建議加入。	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
目錄格式建議修正以符合中心出版品格式。	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
第二、五、六章有許多小節，標題有註腳符號，卻無說明是否拿掉	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
P2-12 推估太陽能發電量，接用 0.7 折減係	0.7 為工程上之常用系數，且評估年	依處理情形辦理

數，可說明使用 0.7 的依據為何，建議文中說明	限較長之特性	理
表 2-1~表 2-5 只有表，文中卻未提及表的用途為何？	感謝委員之意見，會進行修訂	依處理情形辦理
是否有針對港灣結構物有無波能擷取系統設計的成本差異分析，並與其他綠能發電作成本效益評估？	感謝委員之意見，會進行評估	依處理情形辦理

附件八 期中簡報



MOTC-IOT-105-H2DB005c
交通部運輸研究所
國立中山大學
合作辦理

可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色 港灣之發展研究(4/4) 《期中報告》

計畫主持人：李賢華教授
協同主持人：陳陽益教授

日期：2016.7.11



Content

- 一. 計畫背景分析
- 二. 綠色能源應用於港灣結構物之分析
- 三. 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明
- 四. 防波堤之計規範與波能擷取系統相合性探討
- 五. 複合式防波堤波能擷取相關參數分析
- 六. 氣流發電系統理論及設計
- 七. 水工試驗參數與規畫
- 八. 本階段研究結果與後續工作



計畫背景分析

- 計畫緣起及計畫目的
- 本計畫研究內容及工作項目



計畫緣起及計畫目的

- 「2020年我國成為綠能科技與智慧生活的全球創新領航者」
- 本計畫以可再生之綠能系統應用於港灣結構系統中，一方面對於結構體可產生保護作用，另一方面將負面作用之能量轉換成可資利用之能源。

台電統計台灣各種能源使用情形

類別 Item	整購電量 (百萬度) Energy Produced and Purchased (GWh)	構成比 (%)	年成長率 Growth Rate (%)	
抽水水力 PS. Hydro	2,889	1.4	-5.2	
火力 Thermal	台電自有 Taipower	115,272	54.1	4.1
	民營電廠 IPP	39,558	18.6	1.8
	汽電共生 Cogen.	9,255	4.3	-2.6
	小計 Subtotal	164,085	77.0	3.1
核能 Nuclear	40,522	19.0	1.2	
再生能源 Renewable Energy	慣常水力 Conv. Hydro	3,095	1.5	-9.9
	民營電廠 IPP	113	0.1	-2.3
	耗費水力 Hydro Entrusted to Taipower	768	0.4	23.8
	台電自有 Taipower	803	0.4	55.9
	風力 Wind Power	730	0.3	44.0
	民營電廠 IPP	9	0.0	123.7
	太陽能 Solar Energy	29	0.0	1,133.5
小計 Subtotal	5,546	2.6	6.7	
全系統合計 Total Energy Produced and Purchased	213,042	100.0	2.7	



計畫緣起及計畫目的



國立中山大學 海洋環境及工程學系

5



本計畫研究內容及工作項目

• 建立波浪能擷取系統與港灣構造物結合之可行性(法規面之探討)

探討目前港灣構造物中，其在規劃設計時所使用之相關規範及設計準則，了解將波能轉換系統納入港灣構造物為一體設計時之可行性，或必須為單獨個體之結構物時，於設計準則及相關規範之適用情形。

• 進行波能轉換系統進一步與港灣構造結合，評估其對港灣構造之影

本階段中則進一步在水理理論及水工試驗中進行更深入之模擬，以了解在安全影響上的正面或負面情形。

• 效能改進之實體模型之設計分析

本階段中將以港灣實體構造為重點進行設計，包括構造型式、使用材料、受力分析等，使期能符合現行之港灣設計規範，以便未來實際應用時可資參考。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

6



一 二年度已完成及本年度進行之工作項目



國立中山大學 海洋環境及工程學系

7



二 綠色能源應用於港灣結構物之分析

- 太陽能、風能應用於港灣之案例分析
- 海洋能發展與應用現況
- 波浪發電之應用

國立中山大學 海洋環境及工程學系

8



太陽能應用分析

以基隆港計算方式為例：

可裝設之屋頂面積為19萬平方公尺，每10平方公尺的太陽能電池功率為1kWp，故基隆港的設置容量大約為19000 kWp，概算後可得年發電量約為1553萬度，乘上折減係數0.7後，約為**1087萬度**；而裝設成本粗估約為 $19,000 \text{ kWp} \times 80,000 \text{ 元/kWp} = 15.2 \text{ 億元}$

港口位置	港區總面積 (公頃)	屋頂覆蓋面積 (萬平方公尺)	年平均日照時間 (小時)	發電量 (萬度)	成本 (億元)	成本 (萬元)/每十萬度
基隆港	572	19	1388.8	1087	15.2億元	1398萬元
台中港	3793	76	1914.1	6369	60.8億元	954.6萬元
高雄港	17678	96	2315.2	8290	76.8億元	926.4萬元
花蓮港	308	8.1	1597.7	559	6.4億元	1144.9萬元

國立中山大學 海洋環境及工程學系

9



風能應用分析

- 由前階段計畫中所分析之結果，**台中港之港區條件最適合風能發電**，高雄港則為四個案例港口中最不適宜風能發電的港口。基隆港與花蓮港之風能潛力差異不多，但其發電量估算仍不及台中港的20%。

港口位置	海岸線估計長度 (公尺)	屋頂覆蓋面積 (萬平方公尺)	可裝設台數	DS-3000 發電量(度)/台	總發電量 (百萬度)/年
基隆港	8503	19	1349	1369.5	1.42
台中港	12945	76	3729	4388.5	17.24
高雄港	17798	96	4217	350.8	1.75
花蓮港	5548	8.1	535	1152.1	0.53

國立中山大學 海洋環境及工程學系

10



海洋能之發展與應用現況

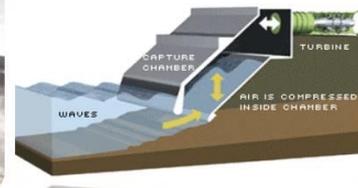
- 海洋能：
 - 海流發電
 - › 耗費成本過大，不易付諸實行
 - 海洋溫差發電
 - › 耗費成本過大，不易付諸實行
 - 潮汐發電
 - › 對環境之影響較大，需詳細評估後才可推動
 - 波浪發電
 - › 台灣具先進造船技術有利於波浪發電裝置載台的建造
 - › 台灣東北部有較大之波能，離岸地區可達10kW/m以上



國際上波浪發電發展概況

- 國際上從事波浪發電開發的國家有英國、日本、美國、加拿大、丹麥、挪威、蘇俄、以色列及中國等國。世界第一個波浪發電裝置雖然是1964年日本發明的60W航標燈，但因盛行風的方向及廣大的大西洋等因素，英國的波浪能源開發在世界上名列前茅。

LIMPET500(Land Installed Marine Pneumatic Energy Transformer – 500kW)





日本酒田港現地試驗 - Sakata OWC



Air turbine	
Type	Tandem wells turbine
Blade CD	1.337m
Number of blades	18
Generator	
Type	Inducted magnetic field synchronous generator
Rated output	60kw
Power	AC200V

波浪條件	示性波高：2m 週期：8 sec
渦輪種類	Tandem Wells Turbine NACA 0021
渦輪直徑	1.337 m
發電功率	60kw @ 1800 rpm
渦輪轉速範圍	500 - 2400 rpm
發電電壓	AC 200V 50Hz
起始發電轉速	500 rpm

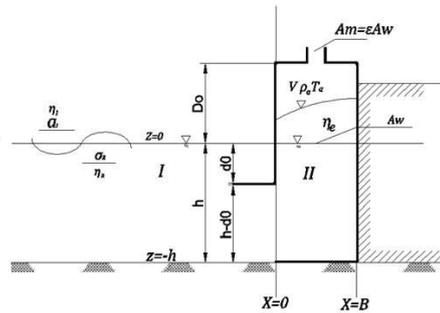


三 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明

1. 理論發展簡介
2. 日本酒田港之沉箱式波能轉換系統
3. 酒田港現地試驗數據與模擬結果比較

理論發展簡介

- 與防波堤或護岸結構相互結合之發電設施，其型式為直接利用波浪力、水流力或空氣壓力來驅動相關之發電設備。即為利用水柱內波能能量變化造成空氣壓力變化而帶動機械能的波力發電裝置，而此發電裝置則結合於沉箱結構中。根據其研究結果，此種沉箱主要功能為使用於防波堤以及護岸，但外加此波浪發電裝置後，除了具備原來之防波以及攔砂機能，還能對波能量加以利用，甚至於對於原防波堤結構具有降低波浪力，而增加其耐久性之附加功效。

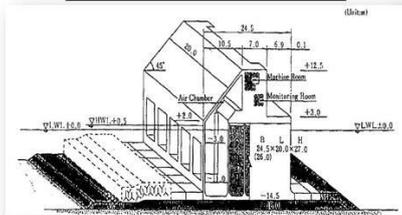


國立中山大學 海洋環境及工程學系

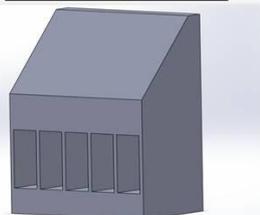
15

酒田港之沉箱設計及本計畫數值模擬模型建置

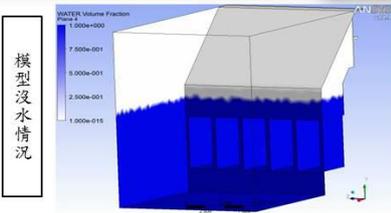
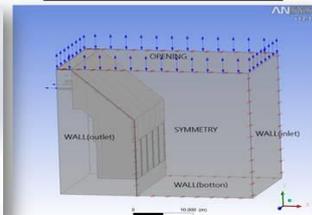
酒田港之沉箱式波能轉換系統



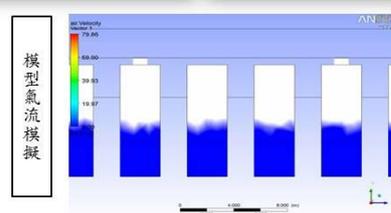
SOLID WORK建置之模型



ANSYS模擬前邊界條件設置



模型沒水情況



模型氣流模擬

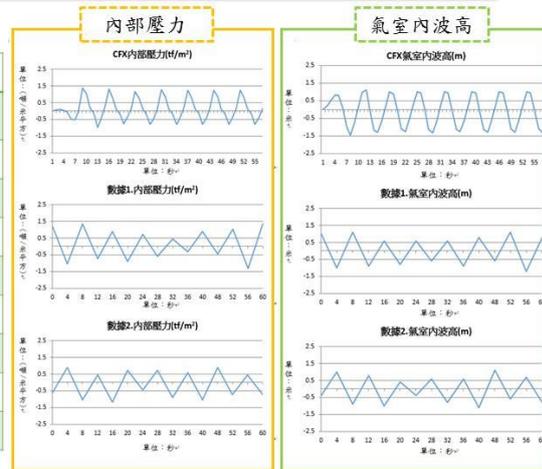
國立中山大學 海洋環境及工程學系

16



ANSYS模擬與現地試驗數據比較

CFX模擬與實驗數據比較表(氣室內部壓力)			
氣室內壓力 (tf/m ²)	極值平均值	最大值	最小值
CFX模擬	1.04 (tf/m ²)	1.37 (tf/m ²)	-0.96 (tf/m ²)
實驗數據1	0.86 (tf/m ²)	1.33 (tf/m ²)	-1.33 (tf/m ²)
實驗數據2	0.77 (tf/m ²)	0.89 (tf/m ²)	-1.19 (tf/m ²)
CFX模擬與實驗數據比較表(氣室內波高)			
氣室內波高(m)	極值平均值	最大值	最小值
CFX模擬	1.2(m)	1.1(m)	-1.44(m)
實驗數據1	0.81(m)	1.1(m)	-1.2(m)
實驗數據2	0.74(m)	1.1(m)	-1.1(m)



四

防波堤之計規範與波能擷取系統相合性探討

1. 防波堤設計基準說明
2. 防波堤設計之流程
3. 直立式防波堤設計基準說明
4. 波能擷取系統與防波堤共構之考慮要點
5. 波能擷取系統與防波堤共構之設計流程



防波堤設計基準說明 (交通技術標準規範港灣類工程設計部，港灣構造物設計基準)

防波堤規劃之基本原則

- 防波堤之功能為確保港內之靜穩、維持水深、防止海岸之破壞及保護港灣設施以及背後土地免受波浪、暴潮、海嘯等之影響。
- 規劃防波堤時，須充分考慮其對附近水域、設施、地形、流況等之影響而決定其配置及斷面
- 防波堤之設計以及施工時，除須充分檢討其安全性外，亦須充分考慮將來之維修。

防波堤之佈置

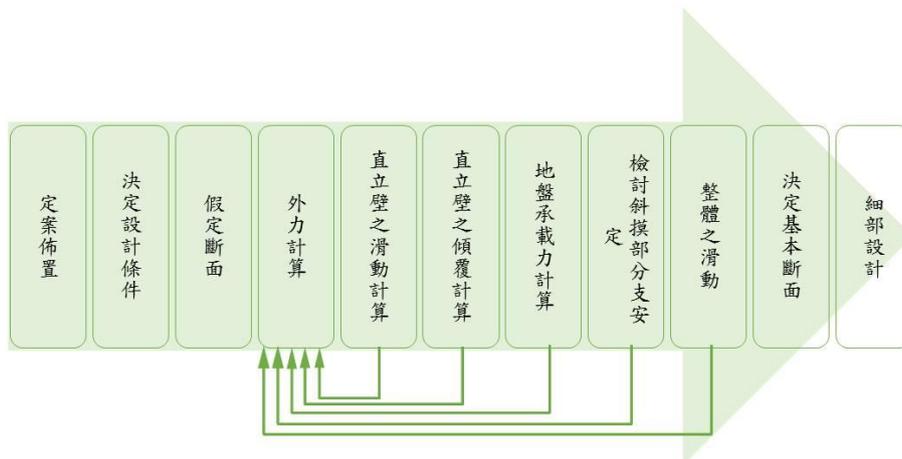
- 防波堤之法線應能對最多最強之波浪，產生有效遮蔽
- 須留意港內外海水之交換
- 防波堤建設時，須考慮自然條件、施工條件，並應檢討其經濟性
- 防波堤之配置應不妨害港灣之將來發展
- 在暗礁之周圍除受折射之影響波高增大外，在陡坡上之防波堤亦有可能受衝擊波力作用
- 孤立於外海之島式防波堤，其長度若為侵襲波波長之數倍以下時，因受兩端繞射波之影響，防波堤背後之波高分佈會有相當的變動而影響水域穩定性

國立中山大學 海洋環境及工程學系

19



防波堤設計之流程



國立中山大學 海洋環境及工程學系

20

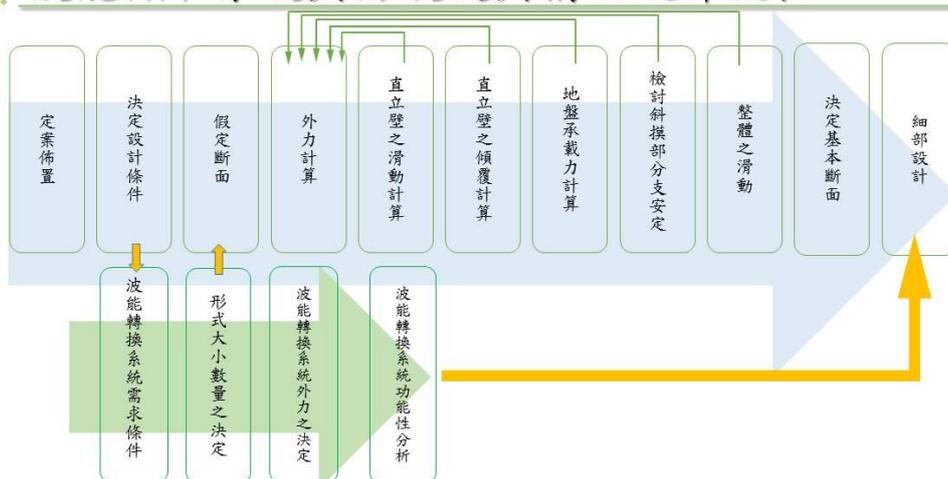
直立式防波堤設計基準說明

基本斷面之假定	外力計算	安定計算	波能擷取系統與防波堤共構之考慮要點
<ul style="list-style-type: none"> • 堤頂高 • 堤面場鑄混凝土厚度 • 堤體寬度 	<ul style="list-style-type: none"> • 波力 <ul style="list-style-type: none"> • 作用於壁狀結構物之波力 • 作用於覆蓋石(塊)之波力 • 作用於海中結構之波力 • 作用於水面附近結構物之波力 • 靜水壓 • 浮力 • 自重 • 地震力 • 地震時之動水壓 • 作用於堤體之動水壓力 	<ul style="list-style-type: none"> • 直立部之安定計算 <ul style="list-style-type: none"> • 滑動 • 傾倒 • 基礎承载力之檢討 	<ul style="list-style-type: none"> • 浪條件之考慮 • 外力條件 • 結合波能轉換系統防波堤安定性檢核

國立中山大學 海洋環境及工程學系

21

波能擷取系統與防波堤共構之設計流程



國立中山大學 海洋環境及工程學系

22

五

複合式防波堤波能擷取相關參數分析

1. 沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數
2. 無因次氣室長度變化之影響
3. 前牆沒水深於系統中之影響



沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數影響

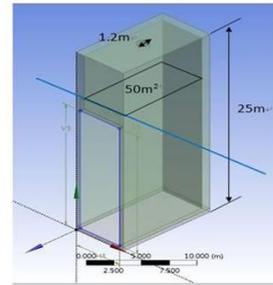
本研究選定三組波高以及五組波浪週期，波高分別為：1.5米、2米、2.5米；波浪週期為：6秒、7.5秒、9秒、10.5秒、12秒本研究除了探討前牆開口沒水深度之影響外，幾何變數中亦考慮氣室長度（氣室長度是指與波長同向之氣室邊長）之影響：

- 無因次氣室長(A)：

氣室長度分別為入射波長之0.125、0.15、0.175倍，其無因次化後本研究以A125、A150、A175表示，其數值如下表（左）所示。

- 無因次前牆沒水深(D)：

考慮到前牆開口處必須永遠低於水位，因此設置前牆沒水深分別為入射波高之2倍、3倍、4倍，無因次化後本研究以D2、D3、D4表示，其數值如下表（右）所示。



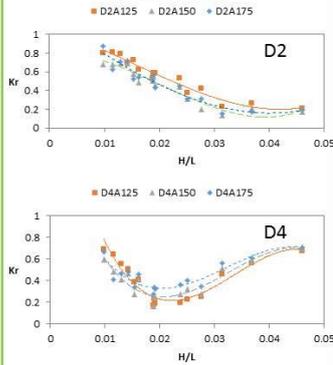
無因次氣室長	入射波長				
	T=6s	T=7.5s	T=9s	T=10.5s	T=12s
A125	6.79m	9.96m	13.16m	16.28m	19.25m
A150	8.15m	11.95m	15.79m	19.53m	23.10m
A175	9.50m	13.94m	18.42m	22.79m	26.95m

無因次前牆沒水深	入射波高		
	H=1.5m	H=2m	H=2.5m
D2	3m	4m	5m
D3	4.5m	6m	7.5m
D4	6m	8m	10m



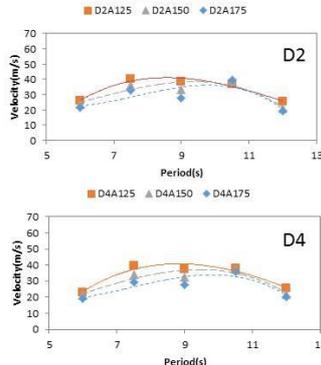
氣室長度於系統中之影響

反射率



無因次氣室長度對反射率之影響會隨著不同之波浪條件而有不同變化。

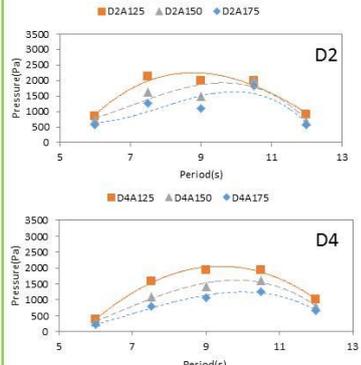
氣流速度



無因次氣室長度越小其產生之氣流速度越大。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

內部壓力



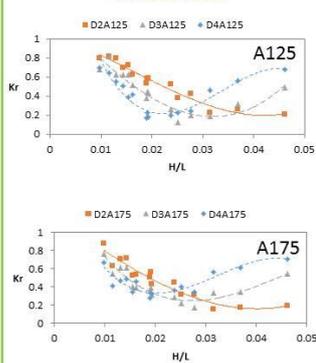
無因次氣室長度越小其產生之內部壓力也越大。

25



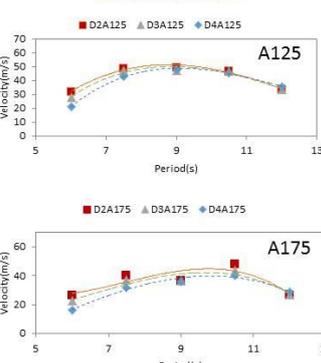
前牆沒水深於系統中之影響

反射率



無因次前牆沒水深越大，其波浪反射率之最小值反而出現在越小之波浪尖銳度

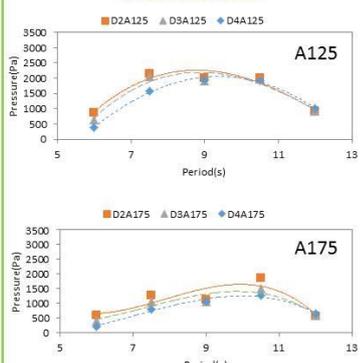
氣流速度



無因次前牆沒水深越小會有較佳之轉換效果。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

內部壓力



無因次前牆沒水深越小會有較佳之轉換效果。

26

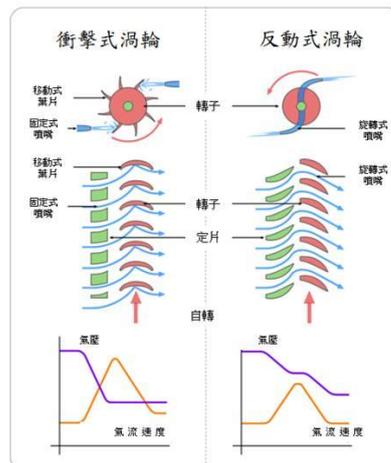
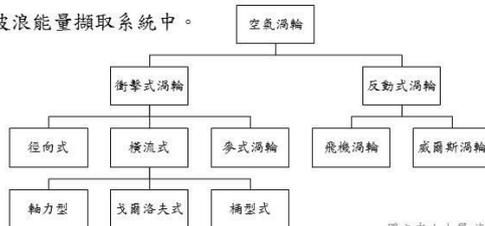
六 氣流發電系統理論及設計

1. 渦輪簡介與選用
2. 威爾斯渦輪簡介
3. NACA 0021葉片各項參數
4. 渦輪設計
5. 出風口與氣流導流設計

渦輪簡介與選用

先使用於震盪水柱式波浪發電系統中的渦輪為一種具有整流閘的簡易衝擊式渦輪，整流閘的用意旨在將震盪水柱式波浪發電系統中的雙向氣流整合成單向氣流，但也導致了氣流動能的損失、設計趨於複雜化以及設備維護的困難等問題。

因此，許多具自整流功能的渦輪於1970年代開始出現，威爾斯渦輪(Wells turbine)即為此時期的產物，而由於它的應用方便以及成本等考量，在1976年開始廣泛的使用於各種型式的波浪能量擷取系統中。

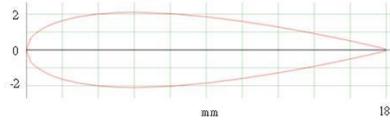


威爾斯渦輪簡介

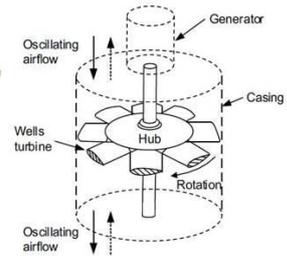
威爾斯渦輪(Wells turbine)為一種雙向式葉片設計，常見於水力與風力發電的應用，因為其特殊的葉片設計，當葉片受氣流影響時，大部分的氣流會往轉軸的斜面流動，少部分的氣流則流向扇葉外沿，扇葉上的合力以靠近轉軸的斜面較大，因此無論風力由哪邊吹入，此種渦輪都保持相同的旋轉方向。



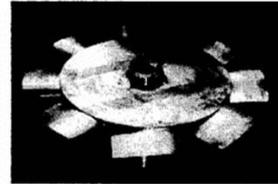
威爾斯渦輪扇葉受氣流時情形



NACA 0021翼型剖面



威爾斯渦輪(Wells turbine)立體構造示意圖



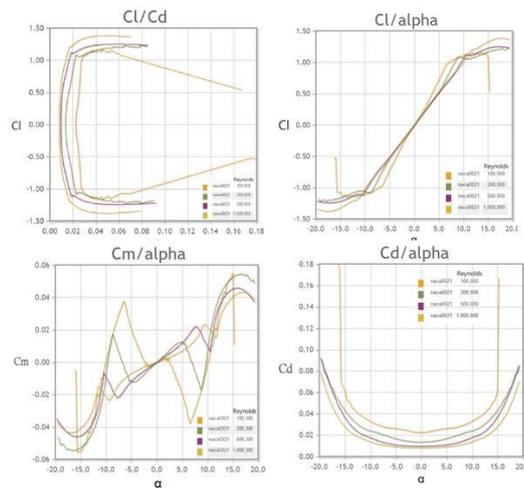
酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021)

國立中山大學 海洋環境及工程學系

29

NACA 0021葉片各項參數

- 參考美國航空諮詢委員會(NACA)，還原編號NACA0021。整理出揚升係數、阻抗係數、力矩在不同雷諾數與攻角間之關係，因NACA0021之對稱設計，在攻角為0時葉片在y方向之合力為零，無揚升力與力矩作用。但若攻角改變時，會因葉片上下表面流體流速的改變產生壓力差，與流體作用於葉片表面，使得葉片產生揚升力與力矩作用。葉片之阻抗係數則是因流體流動方向之投影面積為主要變因，但在攻角為正負5度時並無明顯的上升，可視為定值。

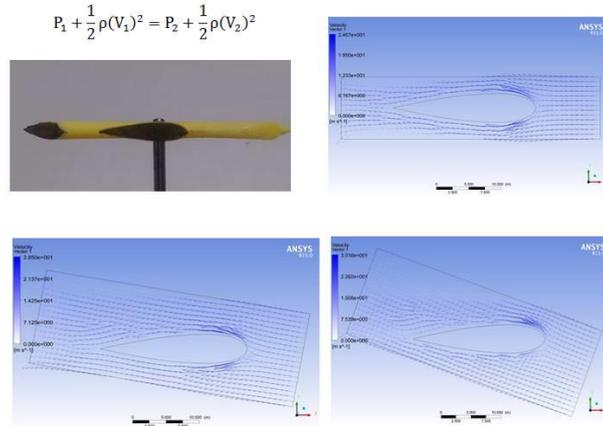


國立中山大學 海洋環境及工程學系

30

NACA0021 葉片數剖面值模擬

- 以ANSYS軟體模擬NACA0021剖面在攻角0度、正負10度、正負20度在向同流速下之流場情況，以此模擬可看出NACA0021剖面在各攻角下之流場變化。可以看出在攻角為0度時流場為上下對稱的狀態，這代表葉片是處於合力為0的狀態，因此渦輪不會轉動。當攻角出現時背風面的流速加快，根據伯努力方程式速度較快的區域會產生較小之壓力，因此葉片產生壓力差而推動葉片使渦輪轉動。



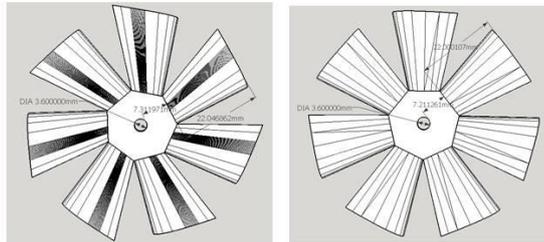
國立中山大學 海洋環境及工程學系

31

渦輪設計

- 奇數葉片之渦輪設計與增加葉片受風面積有助於提高渦輪之轉速與發電效能；設計兩種葉片型式，第一種為較典型之雙斜翼設計、第二種為變形式雙斜翼，觀察在相同受風面積下何種渦輪幾何可提高渦輪轉速。

	奇數葉片渦輪	偶數葉片渦輪
相對啟動風速	小	大
相對轉速	快	慢
相對噪音	大	小
相對震動幅度	大	小



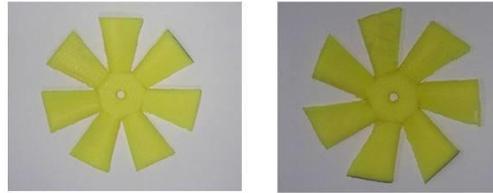
國立中山大學 海洋環境及工程學系

32

渦輪設計

- 根據本計畫之水工模型上方氣流孔大小(70mm)設計威爾斯渦輪尺寸，於SketchUp軟體建立渦輪模型，再以3D列印方式製作成品，初步測試結果發現，單斜翼之設計有助於提升轉速且具有減小啟動風速之現象；但確實結果仍需要往後之實驗來驗證。

	雙斜翼	單斜翼
相對迎風面積	大	小
相對尾翼設計	短	長
相對末端距離軸心	近	遠
相對啟動風速	大	小
相對有效受風面積	小	大
相對轉速	慢	快

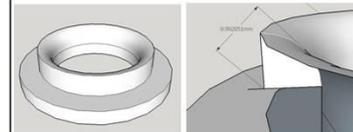
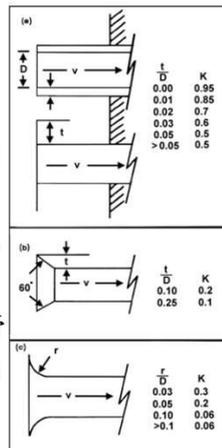


國立中山大學 海洋環境及工程學系

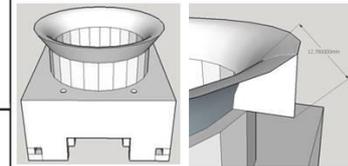
33

出風口與氣流導流設計

- 導流管目的在於削弱氣流吸入與排出時之渦流現象，以減少氣流之能量損失。曲面式出風口設計，當曲壁之曲率半徑(r)與出風口直徑(D)的比值大為0.1時可得最小壓損細數(K)0.06，故以圖(c)為設計參考，本計畫之波能轉換系統因實驗縮尺的原故，出風口直徑為7公分，最佳管壁曲率則應大於0.7公分可得最小壓損係數0.06。



導流盤及其管壁曲率



出風口及其管壁曲率

國立中山大學 海洋環境及工程學系

34



導流系統各項實體原件

- SketchUp繪製導流盤、馬達安裝基座、導流管。最後以3D列印機印製各項元件，包含導流盤、馬達安裝基座、導流管，整體導流系統安裝樣是如圖所示



國立中山大學 海洋環境及工程學系

35



導流系統安裝餘波能擷取系統



擴大原波能轉換系統之出風口，將原波能轉換系統的頂板切割出邊長為10公分的正方形洞口，並在上方加裝一畫有直徑為9公分之出風口邊長為12公分之正方形的可拆卸式的壓克力板頂板



以黏土補平被開挖頂板造成之空隙之部分，以防止漏風與維持原系統的完整性



將導流系統安裝於波能轉換系統之頂板

國立中山大學 海洋環境及工程學系

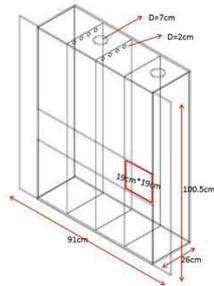
36

七 水工試驗參數與規畫

1. 實驗參數設定
2. 實驗佈置
3. 數據擷取

實驗參數設定

本實驗使用模型，尺寸長、寬、高各為26cm、81cm、100.5cm，實驗有3組不同週期，5組不同波高，以及花蓮港、高雄港示性波高與週期，如表所示，共計17組不同波浪條件，並有4組不同渦輪機之實驗。並量測其風速、無負載之轉速、有負載之轉速、發電效能。



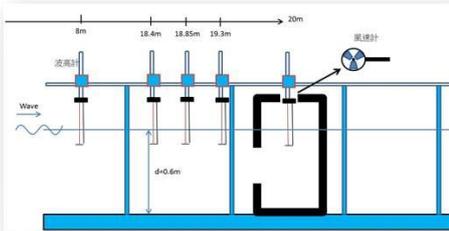
17
組
不
同
波
浪
條
件

Parameter	Prototype	Model		
花蓮港波浪條件	8sec / 1.3m	1.6 sec / 5.2cm		
高雄港波浪條件	7sec/1m	1.75sec / 6.25cm		
週期 T(sec)	6 sec	1.2 sec		
	8 sec	1.6 sec		
	10 sec	2 sec		
波高 H(cm/m)	1 m	4 cm		
	1.5 m	6 cm		
	2 m	8 cm		
	2.5 m	10 cm		
3 m	12 cm			
堤前海床坡度變化	單斜翼無負載	雙斜翼無負載	單斜翼有負載	雙斜翼有負載



實驗佈置

實驗水槽示意圖



內部氣室波高計

模型實體



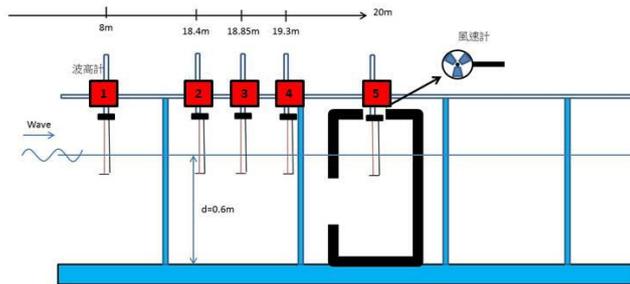
架設於水槽中情形

39



數據擷取

- 波高計量測*5
- 出風口氣流速度量測
- 威爾斯渦輪轉速測試
- 示波器電壓量測



國立中山大學 海洋環境及工程學系

40

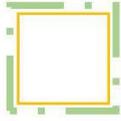


八 後續工作



後續工作

1. 本階段研究則以使波浪能擷取系統之優化及探討其他附屬功能之效率為主，現階段已針對渦輪扇葉幾何條件與渦輪優化，但現階段僅完成部分波浪條件下之數值模擬部分，後續也將再輔以文獻資料、不同波浪條件之數值模擬、水工試驗等方式來進行系統進一步的優化改良。
2. 波浪能擷取系統中之電能轉換系統的開發，現階段已完成渦輪的相關參數試驗，經實驗證實，此渦輪於本計畫模型中所產生之氣流速度下也能順利作動，且運作情形良好，**後續則計畫將此渦輪結合發電機做能量的儲存並結合防波堤，以增加防波堤之耐久性與附加價值。**
3. 期以在本年度計畫中完成一套由**波浪能→氣體動能→機械能→電能**的初步概念設計，並充分了解各項環境因子在此系統中的運作機制及影響層面為何，有助於建立未來於實際應用的考量範例之一。



Thanks for Listening.

計畫成果在本年度發表之文章

- 1 風能應用於台灣港灣之初步研究，港灣季刊第 104 期，P1-6
- 2 太陽能應用於台灣港灣之初步研究，港灣季刊第 104 期，P40-45

附件九 期末簡報



MOTC-IOT-105-H2DB005c
交通部運輸研究所
國立中山大學
合作辦理

可循環式綠色能源結合港灣結構以建構綠色 港灣之發展研究(4/4) 《期末報告》

計畫主持人：李賢華教授
協同主持人：陳陽益教授

日期：2016.12.02



Content

- 一. 計畫背景分析
- 二. 綠色能源應用於港灣結構物之分析
- 三. 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明
- 四. 防波堤之計規範與波能擷取系統相合性探討
- 五. 結合波能轉換系統防波堤安定性檢核
- 六. 複合式防波堤波能擷取相關參數分析
- 七. 氣流發電系統理論及設計
- 八. 水工試驗參數與規畫
- 九. 水工試驗結果討論與分析
- 十. 結論與建議



一 計畫背景分析

- 計畫緣起及計畫目的
- 本計畫研究內容及工作項目



計畫緣起及計畫目的

- 「2020年我國成為綠能科技與智慧生活的全球創新領航者」
- 本計畫以可再生之綠能系統應用於港灣結構系統中，一方面對於結構體可產生保護作用，另一方面將負面作用之能量轉換成可資利用之能源。

台電統計台灣各種能源使用情形

類別 Item	發售電量 (百萬瓩) Energy Produced and Purchased (GWh)	構成比 (%)	年成長率 Growth Rate (%)	
抽水水力 P.S. Hydro	2,889	1.4	-5.2	
火力 Thermal	台電自有 Taipower	115,272	54.1	4.1
	民營電廠 IPP	39,558	18.6	1.8
	汽電共生 Cogen.	9,255	4.3	-2.6
	小計 Subtotal	164,085	77.0	3.1
核能 Nuclear	40,522	19.0	1.2	
再生能源 Renewable Energy	慣常水力 Conv. Hydro	3,095	1.5	-9.9
	民營電廠 IPP	113	0.1	-2.3
	託管水力 Hydro Entrusted to Taipower	768	0.4	23.8
	風力 Wind Power	803	0.4	55.9
	台電自有 Taipower	730	0.3	44.0
	民營電廠 IPP	9	0.0	123.7
	太陽能 Solar Energy	29	0.0	1,133.5
小計 Subtotal	5,546	2.6	6.7	
全系統合計 Total Energy Produced and Purchased	213,042	100.0	2.7	



計畫緣起及計畫目的



本計畫研究內容及工作項目

• 建立波能擷取系統與港灣構造物結合之可行性(法規面之探討)

探討目前港灣構造物中，其在規劃設計時所使用之相關規範及設計準則，了解將波能轉換系統納入港灣構造物為一體設計時之可行性，或必須為單獨個體之結構物時，於設計準則及相關規範之適用情形。

• 進行波能轉換系統進一步與港灣構造結合，評估其對港灣構造之影

本階段中則進一步在水理理論及水工試驗中進行更深入之模擬，以了解在安全影響上的正面或負面情形。

• 效能改進之實體模型之設計分析

本階段中將以港灣實體構造為重點進行設計，包括構造型式、使用材料、受力分析等，使期能符合現行之港灣設計規範，以便未來實際應用時可資參考。



一、二年度已完成及本年度進行中之工作項目



國立中山大學 海洋環境及工程學系

7



二 綠色能源應用於港灣結構物之分析

- 太陽能、風能應用於港灣之案例分析
- 海洋能發展與應用現況
- 波浪發電之應用

國立中山大學 海洋環境及工程學系

8



太陽能應用分析

以基隆港計算方式為例：

可裝設之屋頂面積為19萬平方公尺，每10平方公尺的太陽能電池功率為1kWp，故基隆港的設置容量大約為19000 kWp，概算後可得年發電量約為1553萬度，乘上折減係數0.7後，約為**1087萬度**；而裝設成本粗估約為19,000 kWp × 80,000 元/kwp = 15.2億元

港口位置	港區總面積 (公頃)	屋頂覆蓋面積 (萬平方公尺)	年平均日照時間 (小時)	發電量 (萬度)	成本 (億元)	成本 (萬元)/每十萬度
基隆港	572	19	1388.8	1087	15.2億元	1398萬元
台中港	3793	76	1914.1	6369	60.8億元	954.6萬元
高雄港	17678	96	2315.2	8290	76.8億元	926.4萬元
花蓮港	308	8.1	1597.7	559	6.4億元	1144.9萬元

國立中山大學 海洋環境及工程學系

9



風能應用分析

- 由前階段計畫中所分析之結果，**台中港之港區條件最適合風能發電**，高雄港則為四個案例港口中最不適宜風能發電的港口。基隆港與花蓮港之風能潛力差異不多，但其發電量估算仍不及台中港的20%。

港口位置	海岸線估計長度 (公尺)	屋頂覆蓋面積 (萬平方公尺)	可裝設台數	DS-3000 發電量(度)/台	總發電量 (百萬度)/年
基隆港	8503	19	1349	1369.5	1.42
台中港	12945	76	3729	4388.5	17.24
高雄港	17798	96	4217	350.8	1.75
花蓮港	5548	8.1	535	1152.1	0.53

國立中山大學 海洋環境及工程學系

10

海洋能之發展與應用現況

- 海洋能：
 - 海流發電
 - › 耗費成本過大，不易付諸實行
 - 海洋溫差發電
 - › 耗費成本過大，不易付諸實行
 - 潮汐發電
 - › 對環境之影響較大，需詳細評估後才可推動
 - 波浪發電
 - › 台灣具先進造船技術有利於波浪發電裝置載台的建造
 - › 台灣東北部有較大之波能，離岸地區可達10kW/m以上

國際上波浪發電發展概況

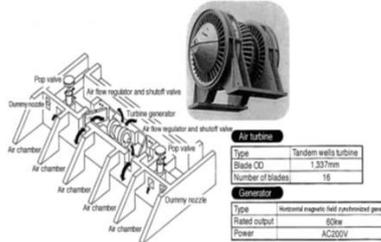
- 國際上從事波浪發電開發的國家有英國、日本、美國、加拿大、丹麥、挪威、蘇俄、以色列及中國等國。世界第一個波浪發電裝置雖然是1964年日本發明的60W航標燈，但因盛行風的方向及廣大的大西洋等因素，英國的波浪能源開發在世界上名列前茅。

LIMPET500(Land Installed Marine Pneumatic Energy Transformer – 500kW)





日本酒田港現地試驗 - Sakata OWC



波浪條件	示性波高：2m 週期：8 sec
渦輪種類	Tandem Wells Turbine NACA 0021
渦輪直徑	1.337 m
發電功率	60kw @ 1800 rpm
渦輪轉速範圍	500 - 2400 rpm
發電電壓	AC 200V 50Hz
起始發電轉速	500 rpm



國立中山大學 海洋環境及工程學系

13



三 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明

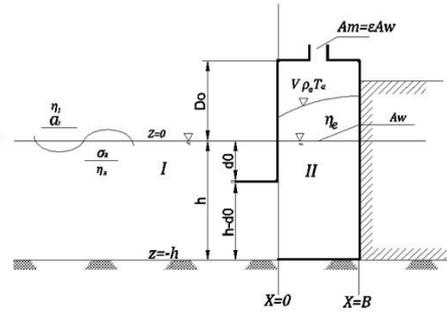
1. 理論發展簡介
2. 日本酒田港之沉箱式波能轉換系統
3. 酒田港現地試驗數據與模擬結果比較

國立中山大學 海洋環境及工程學系

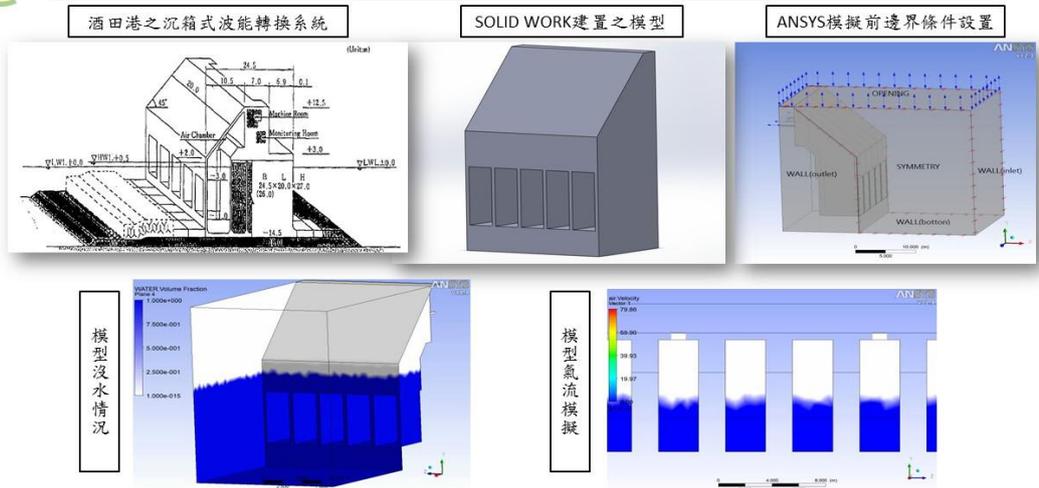
14

理論發展簡介

- 與防波堤或護岸結構相互結合之發電設施，其型式為直接利用波浪力、水流力或空氣壓力來驅動相關之發電設備。即為利用水柱內波能能量變化造成空氣壓力變化而帶動機械能的波力發電裝置，而此發電裝置則結合於沉箱結構中。根據其研究結果，此種沉箱主要功能為使用於防波堤以及護岸，但外加此波浪發電裝置後，除了具備原來之防波以及攔砂機能，還能對波能加以利用，甚至於對於原防波堤結構具有降低波浪力，而增加其耐久性之附加功效。



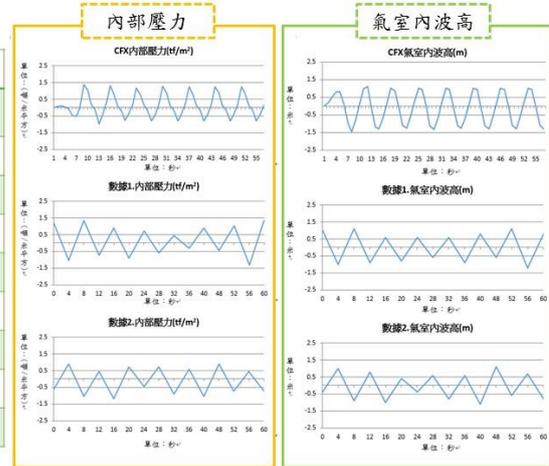
酒田港之沉箱式波能轉換系統



ANSYS模擬與現地試驗數據比較

CFX模擬與實驗數據比較表(氣室內部壓力)			
氣室內壓力 (tf/m ²)	極值平均值	最大值	最小值
CFX模擬	1.04 (tf/m ²)	1.37 (tf/m ²)	-0.96 (tf/m ²)
實驗數據1	0.86 (tf/m ²)	1.33 (tf/m ²)	-1.33 (tf/m ²)
實驗數據2	0.77 (tf/m ²)	0.89 (tf/m ²)	-1.19 (tf/m ²)

CFX模擬與實驗數據比較表(氣室內波高)			
氣室內波高(m)	極值平均值	最大值	最小值
CFX模擬	1.2(m)	1.1(m)	-1.44(m)
實驗數據1	0.81(m)	1.1(m)	-1.2(m)
實驗數據2	0.74(m)	1.1(m)	-1.1(m)



四 防波堤之計規範與波能擷取系統相合性探討

1. 防波堤設計基準說明
2. 防波堤設計之流程
3. 直立式防波堤設計基準說明
4. 波能擷取系統與防波堤共構之考慮要點
5. 波能擷取系統與防波堤共構之設計流程



防波堤設計基準說明 (交通技術標準規範港灣類工程設計部，港灣構造物設計基準)

防波堤規劃之基本原則

- 防波堤之功能為確保港內之靜穩、維持水深、防止海岸之破壞及保護港灣設施以及背後土地免受波浪、暴潮、海嘯等之影響。
- 規劃防波堤時，須充分考慮其對附近水域、設施、地形、流況等之影響而決定其配置及斷面
- 防波堤之設計以及施工時，除須充分檢討其安全性外，亦須充分考慮將來之維修。

防波堤之佈置

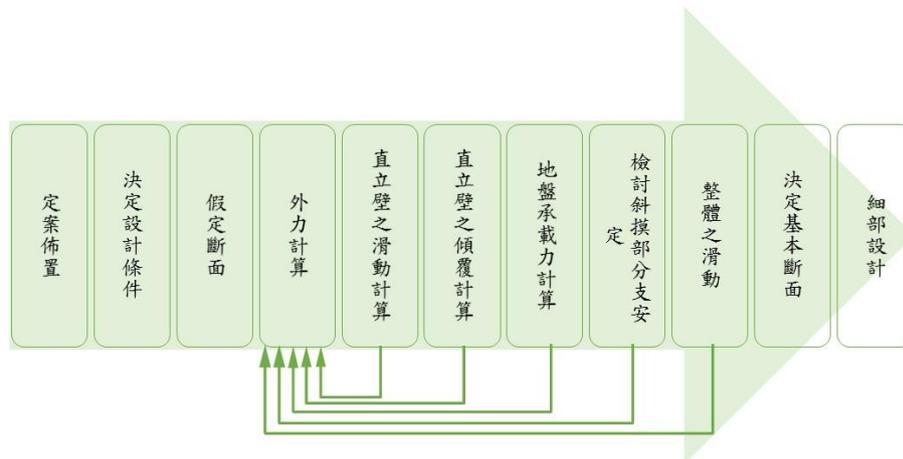
- 防波堤之法線應能對最多最強之波浪，產生有效遮蔽
- 須留意港內外海水之交換
- 防波堤建設時，須考慮自然條件、施工條件，並應檢討其經濟性
- 防波堤之配置應不妨害港灣之將來發展
- 在暗礁之周圍除受折射之影響波高增大外，在陡坡上之防波堤亦有可能受衝擊波力作用
- 孤立於外海之島式防波堤，其長度若為侵襲波波長之數倍以下時，因受兩端繞射波之影響，防波堤背後之波高分佈會有相當的變動而影響水域穩定性

國立中山大學 海洋環境及工程學系

19



防波堤設計之流程



國立中山大學 海洋環境及工程學系

20

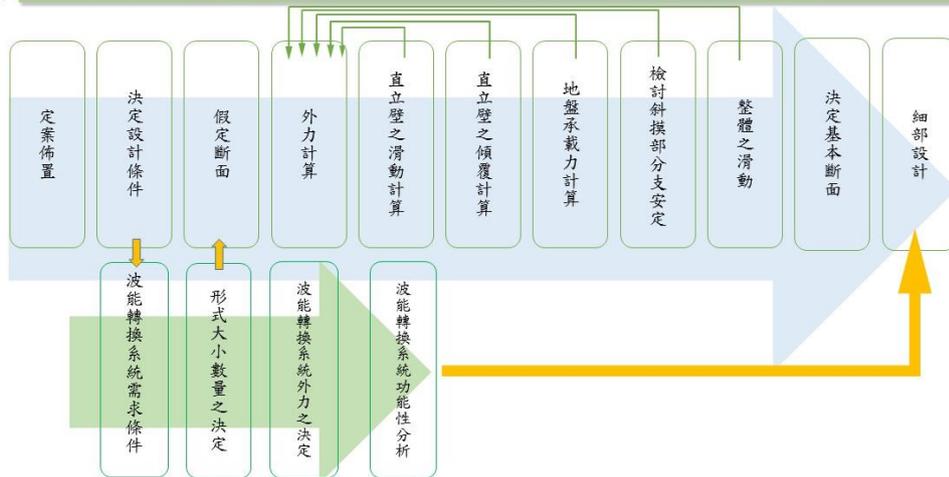
直立式防波堤設計基準說明

基本斷面之假定	外力計算	安定計算	波能擷取系統與防波堤共構之考慮要點
<ul style="list-style-type: none"> • 堤頂高 • 堤面場鑄混凝土厚度 • 堤體寬度 	<ul style="list-style-type: none"> • 波力 <ul style="list-style-type: none"> • 作用於壁狀結構物之波力 • 作用於覆蓋石（塊）之波力 • 作用於海中結構之波力 • 作用於水面附近結構物之波力 • 靜水壓 • 浮力 • 自重 • 地震力 <ul style="list-style-type: none"> • 地震時之動水壓 • 作用於堤體之動水壓力 	<ul style="list-style-type: none"> • 直立部之安定計算 <ul style="list-style-type: none"> • 滑動 • 傾倒 • 基礎承载力之檢討 	<ul style="list-style-type: none"> • 浪條件之考慮 • 外力條件 • 結合波能轉換系統防波堤安定性檢核

國立中山大學 海洋環境及工程學系

21

波能擷取系統與防波堤共構之設計流程



國立中山大學 海洋環境及工程學系

22



定案佈置

- 以各地區之歷年統計的波浪資料預先計算其能量多寡，並決定其使用方式及目的(緊急用電儲存、岸區照明等)，依照地點不同需選定施做的工法與機具。

決定設計條件

- 依照現地之條件可分為自然環境條件及設計目的條件。自然環境條件包含：現地海水水深、海床坡度、潮差、波浪示性週期、波浪示性波高、地震力之影響、颱風之影響、土壤承载力等；設計目的包含：使用目的、電力儲存方式、發電機組條件、風扇渦輪設計、前牆開口率等。

波能轉換系統需求條件

- 海水水深不可過深以避免施工過於困難，設置位置不可離港區過遠，避免維護難度過高。波浪條件需謹慎考慮，避免波浪過大造成系統損壞，或波浪過小造成系統無法使用。



波能轉換系統波浪外力之決定

1. 波浪正向力特性：

- 結構物等柱體所受之正向波力，其基本假設波力為拖曳力與慣性力之線性疊加結果。
- 拖曳力乃因流體黏滯性所引起，黏滯效應對柱體產生邊界層摩擦阻力及水流分離，在流體通過柱體後形成wake，進而使柱體前後端產生壓力差，此壓力差即為形狀阻力。拖曳力與拖曳係數、及水粒子流速之平方成正比，拖曳力係數實際上會受到流場黏性、渦度及紊流等因素之影響。
- 慣性力則包含虛質量力和流體質量力兩部分，其與水粒子加速度成正比，慣性力係數可以勢能理論得知其大小，一般對柱體其值取2，對球體其值取1.5。



2. 波浪側向力特性：

- 垂直柱體除受波浪進行方向平行之正向力作用外，柱體同時受與波浪進行方向垂直之側向力作用。在無限流場中，定義無因次Kc數，用來描述一個在振盪流場中的物體，所受到的阻力相對慣性力之關係

$$K_c = \frac{VT}{L}$$

其中，V為流速振盪的振幅、T為振盪的週期、L為物體的特徵長度。

- 當K.C值很小時，柱體附近之流線幾乎接近理想流體之狀態，隨著K.C值遞增，流體會於柱體之分離點產生分離現象，進而在柱體後方產生渦流。
- 當生成之渦流對稱時，柱體左右兩側之壓力大小一致時，則側向力幾乎趨近於零；當K.C值持續遞增時，柱體後方之渦流將不再對稱，進而產生所謂的渦流剝離，此時在柱體左右兩側會產生壓力差，此即為側向力生成之主因，側向力為一振動力之形式。



波能轉換系統功能性分析

- 波能轉換系統之功能有截能與消波兩大功能。在截能方面需考慮系統的氣室長度、沒水深度、前牆開口率、出風口大小、渦輪葉片、發電機組等因素；在消能方面則是藉由氣室內的空氣壓縮與系統前牆承受波浪力來達到消能之作用。

形式大小數量之決定

- 氣室長度：本研究建議氣室長度應小於示性波長的三分之一為設計。
- 沒水深度：設計建議以現地最低潮位向下一點五倍之示性波高為設計。
- 前牆開口率：設計建議參考現地的是性波長期波浪情況設計。
- 系統出風口搭配氣室之設計：設計建議以奇數個氣室搭配一個出風口，每個出風口搭配數個相通的氣室，系統之間彼此獨立，機組系統設計高度建議高於防波堤，系統維護能有較方便的施工性。



假定斷面與外力計算

- 直立堤之堤頂高應在朔望平均高潮位加上示性波高之0.6倍以上，堤體所需寬度依據作用波壓力而決定，進行設計時須考量於波浪作用下及施工時之安全性，研擬斷面需考量斷面寬度、基礎厚度及護基方塊之重量，以得最佳穩定斷面。

細部設計

- 出風口設計之導流系統，可在低波能支狀況產生整流之效果，集中氣流而產稱較高之風速，並在高波能之條件下產生消能之作用，使整個系統更為穩定。



五 結合波能轉換系統防波堤安定性檢核



結合波能轉換系統防波堤安定性檢核

- 由於防波堤安定性檢核時，主要以靜力分析為主，當防波堤結構結合波能轉換系統後，可利用同樣的分析方法分別進行直立壁體之安定性檢核、堤基安定檢核，以及整體結構之安定檢核。

- 堤體之滑動檢討必須滿足： $F \leq \frac{f_s \cdot V}{H}$

其中， v ：作用於堤體之垂直合力 (t/m)

H ：作用於堤體之水平合力 (t/m)

f^* ：堤底與基礎摩擦係數

F ：安全係數（平常時1.2以上，地震時1.0以上）。

- 堤體之傾倒檢討必須滿足： $F \leq \frac{V \cdot l_V}{H \cdot l_H}$

其中， V ：作用於堤底之垂直合力 (t/m)

H ：作用於堤體之水平合力 (t/m)

l_V ：堤體後趾與堤體垂直合力作用線間之距離 (m)

l_H ：堤體底面至水平合力作用線間之高 (m)

F ：安全係數（平時為1.2以上，地震時為1.1以上）。



計算條件

- 合田公式計算出之側向力：Goda
- 數值方法計算出之側向力：Ansys
- 混凝土單位體積重：2.45 (tonf/m³)
- 合成堤單位截面之面積：427.75(m²)

計算過程

- 獲得水面之壓力： P_1
- 獲得水底之壓力： P_2
- 海水深度： h_1
- 波浪做用於高於海面之高度： h_2
- 壁體底面與基礎之摩擦係數： f_s
- 堤體後趾與堤體垂直合力作用線間之距離： l_V
- 堤體底面至水平合力作用線間之高： l_H
- 作用於堤底之垂直合力： V
- 作用於堤體之水平合力： H



側向力計算結果

- 每米寬合成壁體重： $V=427.75 \times 2.45=1047.99 \left(\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right)$

$$\text{側向合力} : \frac{(P_1 +) \times h_1}{2} + \frac{P_1 \times h_2}{2}$$

$$\text{合田公式計算出之側向力} : P_1=24133 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right), P_2=17271 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$$

$$\text{數值方法計算出之側向力} : P_1=21837 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right), P_2=9285 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$$

將以上數值代入側向合力公式，得側向作用力 H_1 、 H_2

$$\text{合田公式計算出之單位側向力} : H_1=37.458 \left(\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right)$$

$$\text{數值方法計算出之單位側向力} : H_2=29.088 \left(\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right)$$



壁體滑動檢核

$$\bullet F \leq \frac{f_s \cdot V}{H}$$

在標準狀況下假設 $f_s=0.6$

以合田公式計算出之側向力分析出滑動安全數值

$$F=16.79 \geq 1.2$$

以數值方法計算出之側向力分析出滑動安全數值

$$F=21.62 \geq 1.2$$

壁體傾覆檢核

$$\bullet F \leq \frac{V \cdot l_V}{H \cdot l_H}$$

$$l_V = 8.6\text{m}, l_H=8.74\text{m}(\text{Goda公式})$$

$$10.53\text{m}(\text{數值方法})$$

以合田公式計算出之側向力分析出傾覆安全數值

$$F=27.53 \geq 1.2$$

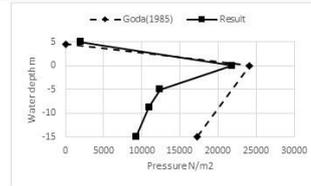
以數值方法計算出之側向力分析出傾覆安全數值

$$F=29.43 \geq 1.2$$

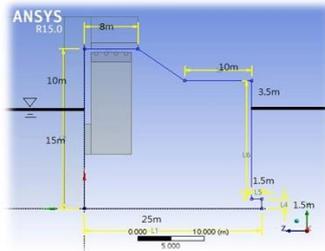
- 以上分析得出，結合波能截取系統之合成防波堤在兩種受力方式之安全性分析皆大於標準值1.2，故符合安全性之要求。



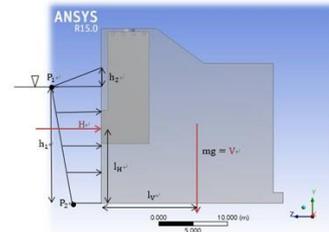
- 本案例分析時使用兩種外力；第一為傳統防波堤設計時所使用之合田公式(Goda)計算之外力分布，使用合田公式時之假設條件為，前牆開口處不受力；但本計畫仍假設前牆開口處受力。第二為利用數值分析方法(Ansys)考慮氣室外壓力之變化。



波浪作用於波能擷取合成防波堤系統力量分佈圖



波能截取合成防波堤系統尺寸圖



外力作用於波能截取合成防波堤系統示意圖

六

複合式防波堤波能擷取相關參數分析

1. 沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數
2. 無因次氣室長度變化之影響
3. 前牆沒水深於系統中之影響

沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數影響

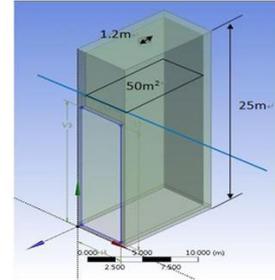
本研究選定三組波高以及五組波浪週期，波高分別為：1.5米、2米、2.5米；波浪週期為：6秒、7.5秒、9秒、10.5秒、12秒本研究除了探討前牆開口沒水深度之影響外，幾何變數中亦考慮氣室長度（氣室長度是指與波長同向之氣室邊長）之影響：

- 無因次氣室長(A)：

氣室長度分別為入射波長之0.125、0.15、0.175倍，其無因次化後本研究以A125、A150、A175表示，其數值如下表（左）所示。

- 無因次前牆沒水深(D)：

考慮到前牆開口處必須永遠低於水位，因此設置前牆沒水深分別為入射波高之2倍、3倍、4倍，無因次化後本研究以D2、D3、D4表示，其數值如下表（右）所示。



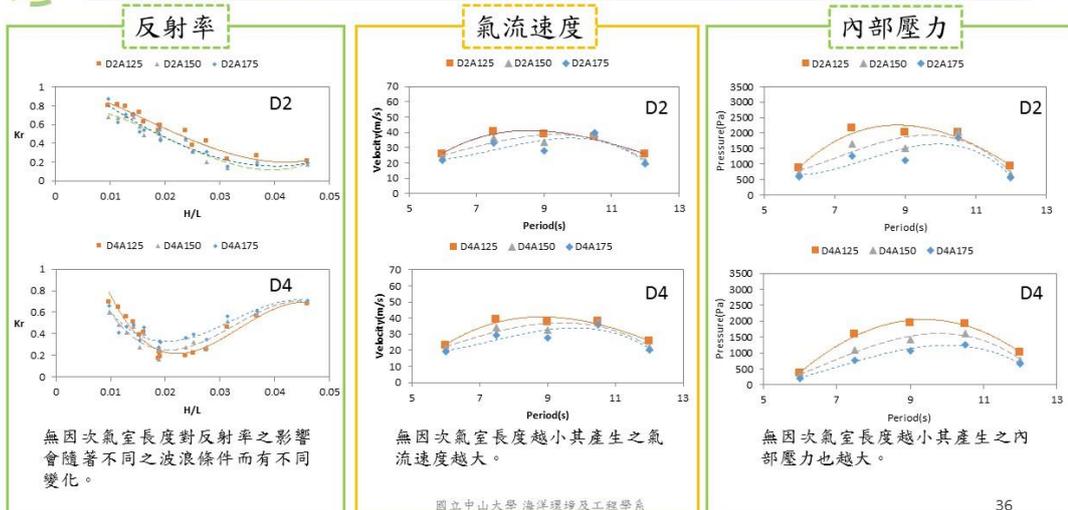
無因次氣室長	入射波長				
	T=6s	T=7.5s	T=9s	T=10.5s	T=12s
A125	6.79m	9.96m	13.16m	16.28m	19.25m
A150	8.15m	11.95m	15.79m	19.53m	23.10m
A175	9.50m	13.94m	18.42m	22.79m	26.95m

無因次前牆沒水深	入射波高		
	H=1.5m	H=2m	H=2.5m
D2	3m	4m	5m
D3	4.5m	6m	7.5m
D4	6m	8m	10m

國立中山大學 海洋環境及工程學系

35

氣室長度於系統中之影響

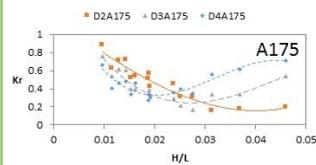
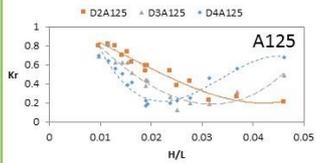


36



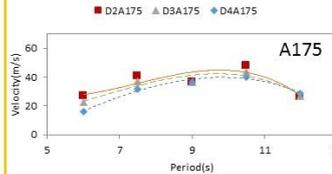
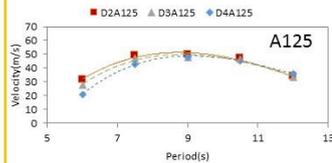
前牆沒水深於系統中之影響

反射率



無因次前牆沒水深越大，其波浪反射率之最小值反而出現在越小之波浪尖銳度

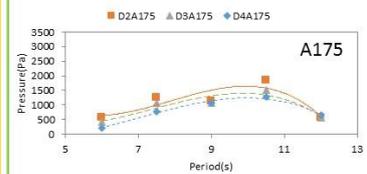
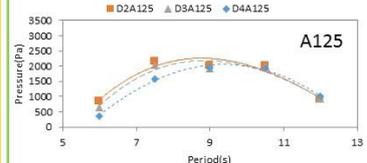
氣流速度



無因次前牆沒水深越小會有較佳之轉換效果。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

內部壓力



無因次前牆沒水深越小會有較佳之轉換效果。

37



七 氣流發電系統理論及設計

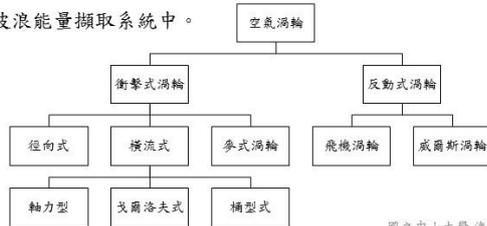
1. 渦輪簡介與選用
2. 威爾斯渦輪簡介
3. NACA 0021葉片各項參數
4. 渦輪設計
5. 出風口與氣流導流設計

國立中山大學 海洋環境及工程學系

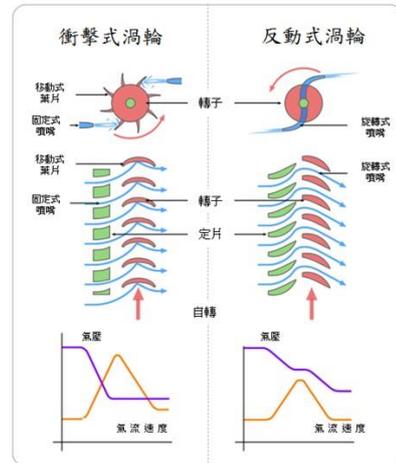
38

渦輪簡介與選用

先使用於震盪水柱式波浪發電系統中的渦輪為一種具有整流閘的簡易衝擊式渦輪，整流閘的用意旨在將震盪水柱式波浪發電系統中的雙向氣流整合成單向氣流，但也導致了氣流動能的損失、設計趨於複雜化以及設備維護的困難等問題。因此，許多具自整流功能的渦輪於1970年代開始出現，威爾斯渦輪(Wells turbine)即為此時期的產物，而由於它的應用方便以及成本等考量，在1976年開始廣泛的使用於各種型式的波浪能量擷取系統中。



國立中山大學 海洋環境及工程學系



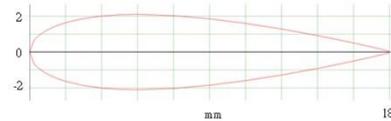
39

威爾斯渦輪簡介

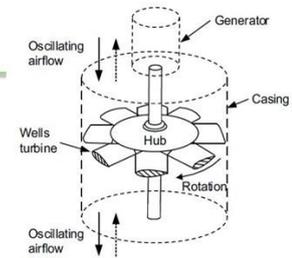
威爾斯渦輪(Wells turbine)為一種雙向式葉片設計，常見於水力與風力發電的應用，因為其特殊的葉片設計，當葉片受氣流影響時，大部分的氣流會往轉軸的斜面流動，少部分的氣流則流向扇葉外沿，扇葉上的合力以靠近轉軸的斜面較大，因此無論風力由哪邊吹入，此種渦輪都保持相同的旋轉方向。



威爾斯渦輪扇葉受氣流時情形



NACA 0021翼型剖面



威爾斯渦輪(Wells turbine)立體構造示意圖



酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021)

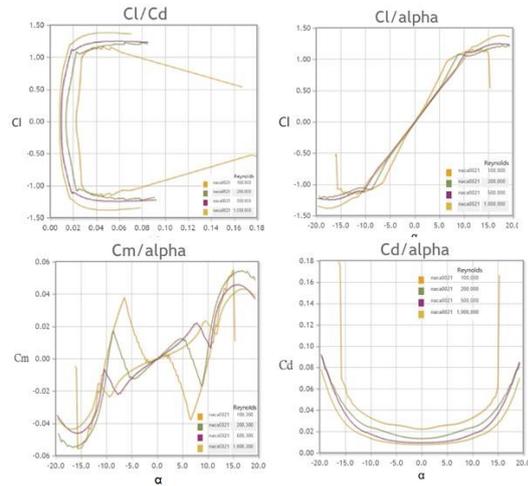
國立中山大學 海洋環境及工程學系

40



NACA 0021 葉片各項參數

- 參考美國航空諮詢委員會(NACA)，還原編號NACA0021。整理出揚升係數、阻抗係數、力矩在不同雷諾數與攻角間之關係，因NACA0021之對稱設計，在攻角為0時葉片在y方向之合力為零，無揚升力與力矩作用。但若攻角改變時，會因葉片上下表面流體流速的改變產生壓力差，與流體作用於葉片表面，使得葉片產生揚升力與力矩作用。葉片之阻抗係數則是因流體流動方向之投影面積為主要變因，但在攻角為正負5度時並無明顯的上升，可視為定值。



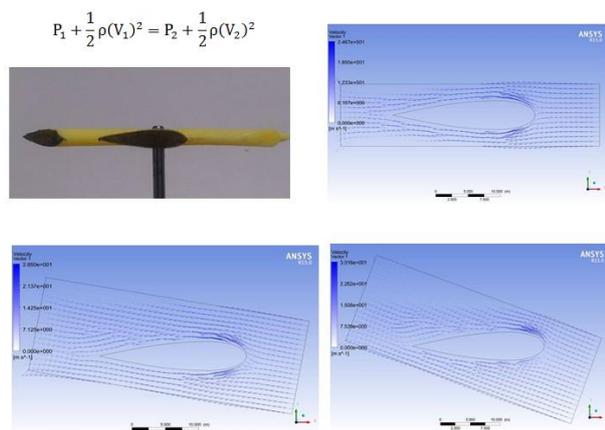
國立中山大學 海洋環境及工程學系

41



NACA0021 葉片數剖面值模擬

- 以ANSYS軟體模擬NACA0021剖面在攻角0度、正負10度、正負20度在向同流速下之流場情況，以此模擬可看出NACA0021剖面在各攻角下之流場變化。可以看出在攻角為0度時流場為上下對稱的狀態，這代表葉片是處於合力為0的狀態，因此渦輪不會轉動。當攻角出現時背風面的流速加快，根據伯努力方程式速度較快的區域會產生較小之壓力，因此葉片產生壓力差而推動葉片使渦輪轉動。



國立中山大學 海洋環境及工程學系

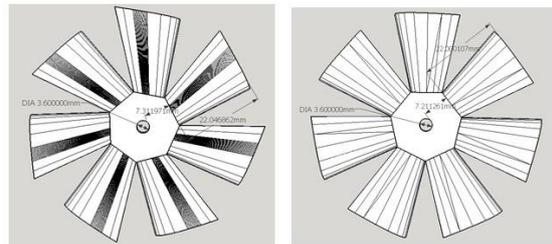
42



渦輪設計

- 奇數葉片之渦輪設計與增加葉片受風面積有助於提高渦輪之轉速與發電效能；設計兩種葉片型式，第一種為較典型之雙斜翼設計、第二種為變形式雙斜翼，觀察在相同受風面積下何種渦輪幾何可提高渦輪轉速。

	奇數葉片渦輪	偶數葉片渦輪
相對啟動風速	小	大
相對轉速	快	慢
相對噪音	大	小
相對震動幅度	大	小



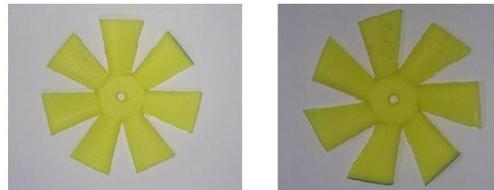
國立中山大學 海洋環境及工程學系



渦輪設計

- 根據本計畫之水工模型上方氣流孔大小(70mm)設計威爾斯渦輪尺寸，於SketchUp軟體建立渦輪模型，再以3D列印方式製作成品，初步測試結果發現，單斜翼之設計有助於提升轉速且具有減小啟動風速之現象；但確實結果仍需要往後之實驗來驗證。

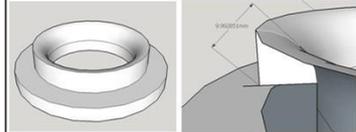
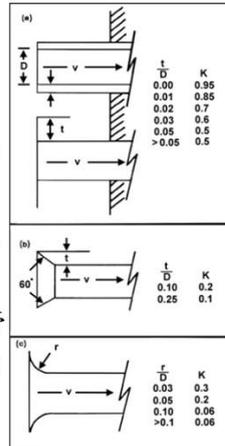
	雙斜翼	單斜翼
相對迎風面積	大	小
相對尾翼設計	短	長
相對末端距離軸心	近	遠
相對啟動風速	大	小
相對有效受風面積	小	大
相對轉速	慢	快



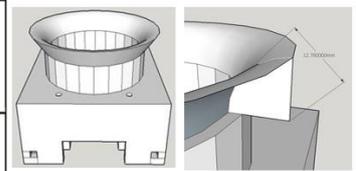
國立中山大學 海洋環境及工程學系

出風口與氣流導流設計

- 導流管目的在於削弱氣流吸入與排出時之渦流現象，以減少氣流之能量損失。曲面式出風口設計，當曲壁之曲率半徑(r)與出風口直徑(D)的比值大為0.1時可得最小壓損細數(K)0.06，故以圖(c)為設計參考，本計畫之波能轉換系統因實驗縮尺的原故，出風口直徑為7公分，最佳管壁曲率則應大於0.7公分可得最小壓損係數0.06。



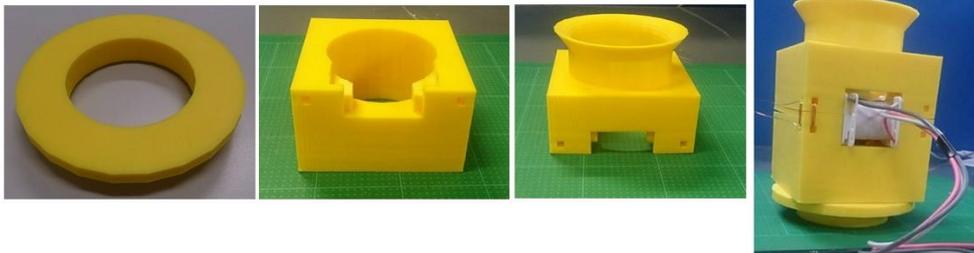
導流盤及其管壁曲率



出風口及其管壁曲率

導流系統各項實體原件

- SketchUp繪製導流盤、馬達安裝基座、導流管。最後以3D列印機印製各項元件，包含導流盤、馬達安裝基座、導流管，整體導流系統安裝樣是如圖所示

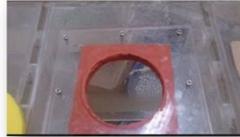




導流系統安裝餘波能擷取系統



擴大原波能轉換系統之出風口，將原波能轉換系統的頂板切割出邊長為10公分的正方形洞口，並在上方加裝一畫有直徑為9公分之出風口邊長為12公分之正方形的可拆卸式的壓克力板頂板



以黏土補平被開挖頂板造成之空隙之部分，以防止漏風與維持原系統的完整性



將導流系統安裝於波能轉換系統之頂板

國立中山大學 海洋環境及工程學系

47



八 水工試驗參數與規畫

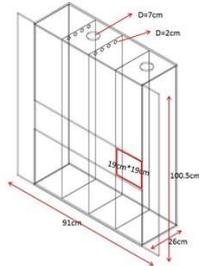
1. 實驗參數設定
2. 實驗佈置
3. 數據擷取

國立中山大學 海洋環境及工程學系

48

實驗參數設定

本實驗使用模型，尺寸長、寬、高各為26cm、81cm、100.5cm，前牆開口率35%、100%，實驗有3組不同週期，5組不同波高，以及花蓮港、高雄港示性波高與週期，如表所示，共計17組不同波浪條件，並有4組不同渦輪機之實驗。並量測其風速、無負載之轉速、有負載之轉速、發電效能。



17組不同波浪條件

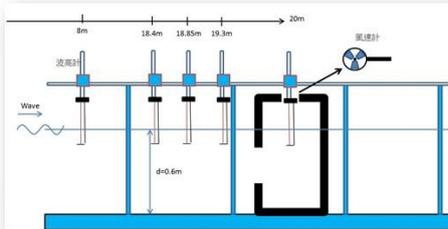
Parameter	Prototype	Model
花蓮港波浪條件	8sec / 1.3m	1.6 sec / 5.2cm
高雄港波浪條件	7sec/1m	1.75sec / 6.25cm
週期 T(sec)	6 sec	1.2 sec
	8 sec	1.6 sec
	10 sec	2 sec
波高 H(cm/m)	1 m	4 cm
	1.5 m	6 cm
	2 m	8 cm
	2.5 m	10 cm
堤前海床坡度變化	單斜翼無負載	雙斜翼無負載
	單斜翼有負載	雙斜翼有負載

國立中山大學 海洋環境及工程學系

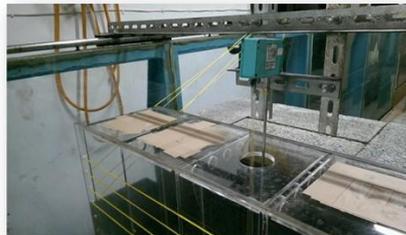
49

實驗佈置

實驗水槽示意圖



內部氣室波高計



模型實體



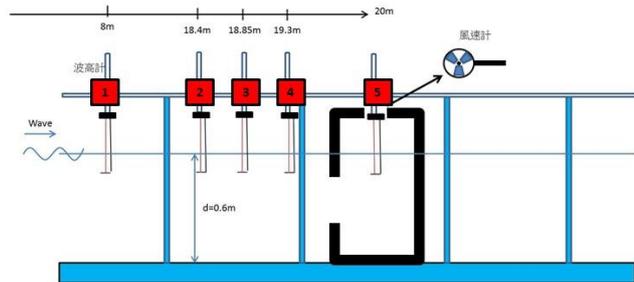
架設於水槽中情形



50

數據擷取

- 波高計量測*5
- 出風口氣流速度量測
- 威爾斯渦輪轉速測試
- 示波器電壓量測



國立中山大學 海洋環境及工程學系

51

九 水工試驗結果討論與分析

1. 水工模型於不同波浪條件下之試驗結果比較
2. 發電系統設計與試驗結果討論
3. 實驗成果比較

國立中山大學 海洋環境及工程學系

52



水工模型於不同波浪條件下之試驗結果比較

無斜板模型於不同波浪條件下之反射率結果

反射率Kr(%)		波高H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1	47.8	57.3	58.9	59.7	61.3
	1.2	32.0	45.1	54.9	55.0	56.7
	1.4	54.7	50.2	49.5	48.0	48.8
	1.6	56.5	64.8	65.9	62.0	62.0
	1.8	79.2	74.7	72.6	73.0	71.9
	2	71.7	65.4	67.1	65.2	61.6

出風口改良模開口率35%於不同波浪條件下之反射率結果

反射率Kr(%)		波高H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1.2	32.2	48.8	50.5	51.1	53.2
	1.6	49.7	50.7	51.4	52.4	52.2
	2	49.1	48.1	48.8	47.3	52.82

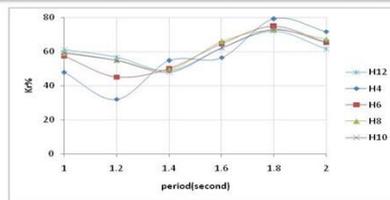
出風口改良模開口率100%於不同波浪條件下之反射率結果

反射率Kr(%)		波高H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1.2	42.2	44.3	45.4	45.6	43.7
	1.6	48.5	49.2	49.7	51.4	50.5
	2	56.1	55.4	55.8	54.7	43.4

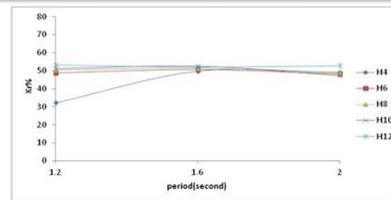
- 週期較小的波在開口率100%有著比35%較小的反射率，反之亦然。



各波浪條件下反射率與波浪週期關係圖

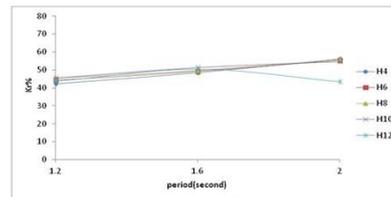


無斜板模型



開口率35%出風口改良

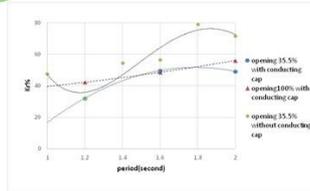
- 單一模型隨著波浪條件變化的反射率試驗結果比較，出風口改良後反射率趨近穩定，無較大的變化。



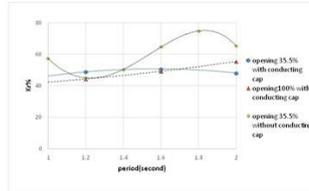
開口率100%出風口改良



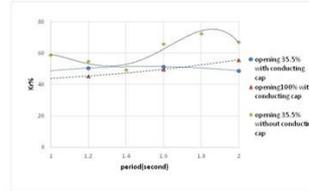
不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較



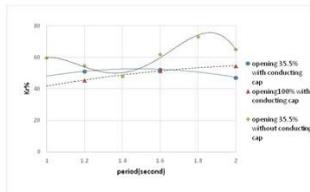
不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=4)



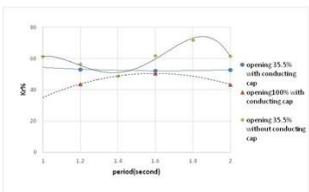
不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=6)



不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=8)



不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)



不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=12)

- 不同模型的反射率試驗結果比較，無斜板模型的極值出現於週期1.2及1.8處。波浪條件在週期為1.2~1.6間與入射波高為12時，開口率100%之反射率皆小於開口率35%；但在週期為1.8~2與波高4~10時開口率35%之反射率皆小於開口率100%。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

55



氣流速度結果比較

無斜板模型於不同波浪條件下之氣流速度結果

氣流速度(m/s)		波高H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1	5.52	7.17	8.23	8.81	9.38
	1.2	6.19	8.11	9.88	12.53	12.85
	1.4	5.42	7.18	8.6	9.96	11.32
	1.6	5.9	8.1	9.57	10.41	11.49
	1.8	4.01	5.53	6.89	8	8.76
	2	6.64	8.24	8.35	10.18	14.85

前牆開口率35%風口改良於不同波浪條件下之氣流速度結果

氣流速度(m/s)		波高H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1.2	7.11	9.08	11.19	12.60	12.49
	1.6	5.41	7.38	8.84	10.28	11.03
	2	5.75	8.075	8.68	8.85	10.43

前牆開口率100%風口改良於不同波浪條件下之氣流速度結果

氣流速度(m/s)		波高H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1.2	8.38	11.23	13.78	16.20	19.32
	1.6	5.63	7.73	9.14	9.54	10.11
	2	6.45	7.62	7.82	8.64	8.91

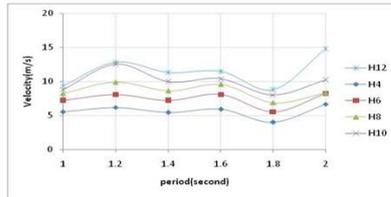
- 在週期1.2的波氣旋速度相對較快，但轉速不一定比較高。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

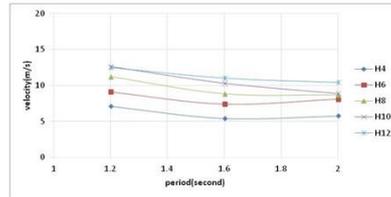
56



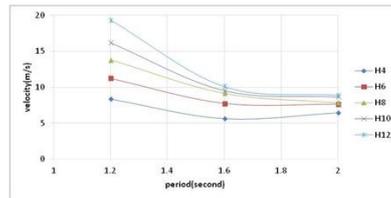
各波浪條件下氣流速度與波浪週期關係圖



無斜板模型



開口率35%出風口改良

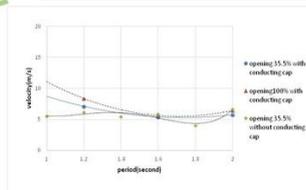


開口率100%出風口改良

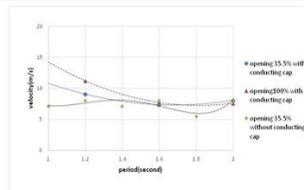
- 單一種模型隨著波浪條件變化的氣流速度試驗結果比較，顯示前牆開口率100%時具有較大的氣流速度之現象，但在波浪週期為2秒的波浪條件下此現象則會相反。



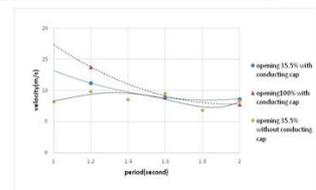
不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較



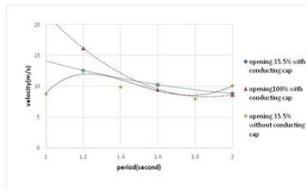
不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=4)



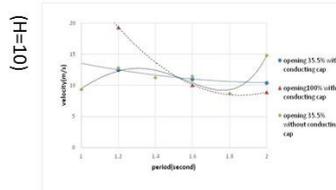
不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=6)



不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=8)



不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=10)



不同前牆開口率及有無導流管之反射率比較(H=12)

- 不同模型的反射率試驗結果比較，在週期1.2時有較佳的氣流速度表現，並於週期1.8左右時有最低值出現，後又有上升趨勢。



內部波高結果比較

無斜板模型於不同波浪條件下之內部波高結果

內部波高(cm)		波高H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1	5.43	7.14	8.78	9.71	9.68
	1.2	7.43	8.79	10.97	13.40	14.72
	1.4	6.93	9.38	11.31	13.05	14.71
	1.6	8.14	11.06	13.57	15.88	17.99
	1.8	5.92	8.23	10.47	10.51	14.75
	2	11.28	15.46	19.64	23.01	25.38

前牆開口率35%風口改良於不同波浪條件下之內部波高結果

內部波高(cm)		波高H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1.2	8.35	10.58	12.86	14.86	16.40
	1.6	7.54	10.68	13.49	15.87	18.25
	2	10.36	14.60	18.91	22.92	26.90

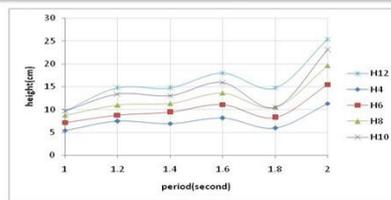
前牆開口率100%風口改良於不同波浪條件下之內部波高結果

內部波高(cm)		波高H(cm)				
		4	6	8	10	12
週期T(sec)	1.2	10.54	13.99	17.44	19.94	21.45
	1.6	10.41	10.56	13.52	16.25	18.80
	2	10.45	15.37	20.42	25.10	26.71

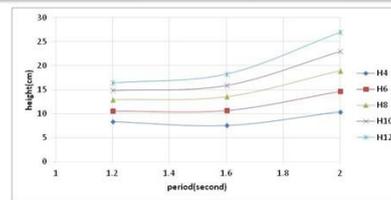
- 開口率越大，內部波高越高。



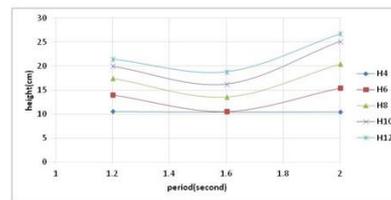
各波浪條件下內部波高與波浪週期關係圖



無斜板模型



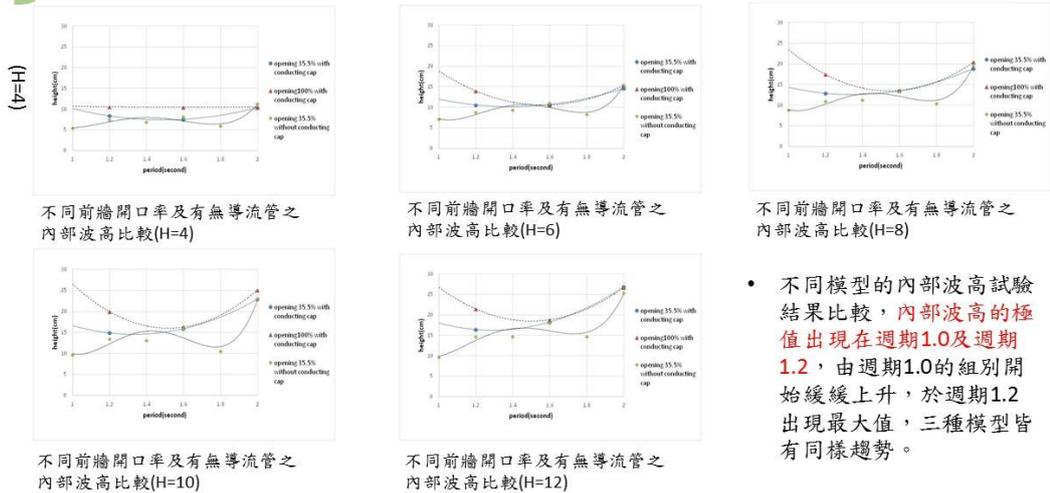
開口率35%出風口改良



開口率100%出風口改良

- 單一種模型隨著波浪條件變化的內部波高試驗結果比較

不同前牆開口率及有無導流管之內部波高比較



國立中山大學 海洋環境及工程學系

61

能量擷取率結果比較

無斜板模型於不同波浪條件下之能量擷取率

能量擷取率		波高H[cm]				
氣流速度能/入射波能		4	6	8	10	12
週期T[sec]	1	0.17	0.17	0.14	0.11	0.09
	1.2	0.21	0.21	0.21	0.28	0.21
	1.4	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	1.6	0.16	0.18	0.17	0.14	0.13
	1.8	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
2	0.21	0.17	0.10	0.12	0.26	

前牆開口率35%出風口改良模型於不同波浪條件下之能量擷取率

能量擷取率		波高H[cm]				
氣流速度能/入射波能		4	6	8	10	12
週期T[sec]	1.2	0.313	0.293	0.307	0.280	0.190
	1.6	0.117	0.134	0.127	0.130	0.110
	2	0.121	0.164	0.114	0.076	0.087

前牆開口率100%出風口改良模型於不同波浪條件下之能量擷取率

能量擷取率		波高H[cm]				
氣流速度能/入射波能		4	6	8	10	12
週期T[sec]	1.2	0.51	0.55	0.57	0.60	0.70
	1.6	0.13	0.15	0.14	0.10	0.09
	2	0.19	0.14	0.08	0.07	0.05

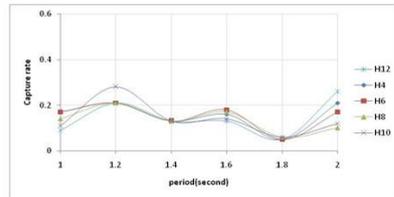
- 在同一開口率，波浪能越高，能量擷取率越高；不同開口率時，同一波浪能，開口率越大，能量擷取率越大。

國立中山大學 海洋環境及工程學系

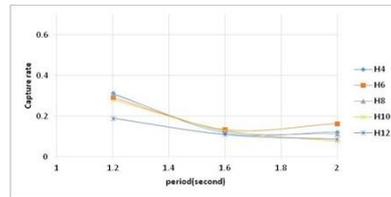
62



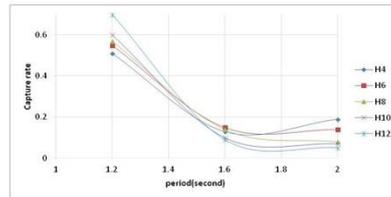
各波浪條件下能量擷取率與波浪週期關係圖



無斜板模型



開口率35%出風口改良

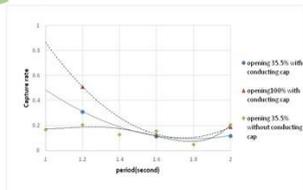


開口率100%出風口改良

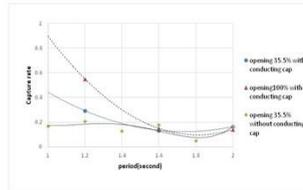
- 單一種模型隨著波浪條件變化的能量擷取率試驗結果比較



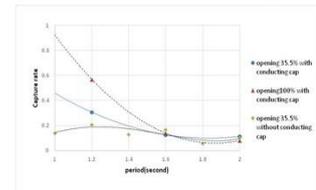
不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較



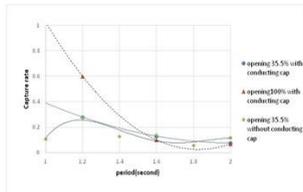
不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=4)



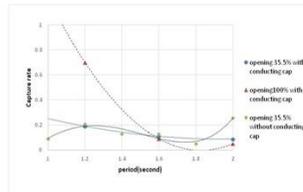
不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=6)



不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=8)



不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=10)



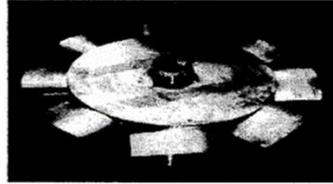
不同前牆開口率及有無導流管之能量擷取率比較(H=12)

- 不同模型的能量擷取率試驗結果比較，由圖之趨勢線可看出能量擷取率同樣於週期1.2時有較佳的表現，週期1.8時有最低值出現。

發電系統設計與試驗結果討論

威爾斯渦輪設計

- 本計畫始時參考日本震盪水柱式波浪發電系統實際應用案例—酒田港波浪發電系統現地長期實驗中，採用威爾斯渦輪做為主要之發電機渦輪，且因本計畫中水工模型之尺寸較小，因此此部分規劃也以威爾斯渦輪為主要考量。
- 本期計畫改良渦輪之項目為扇葉數目、扇葉受風面積、扇葉幾何形狀，以提升渦輪效能。



酒田港發電裝置使用之威爾斯渦輪(NACA 0021)

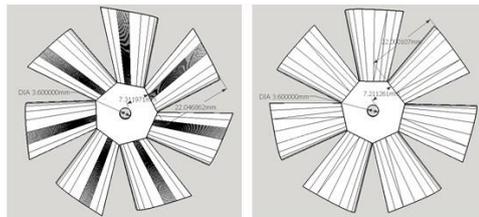
波浪條件	示性波高：2m 週期：8 sec
渦輪種類	Tandem Wells Turbine NACA 0021
渦輪直徑	1.337 m
發電功率	60kw @ 1800 rpm
渦輪轉速範圍	500 – 2400 rpm
發電電壓	AC 200V 50Hz
起始發電轉速	500 rpm

酒田港發電裝置主要參數

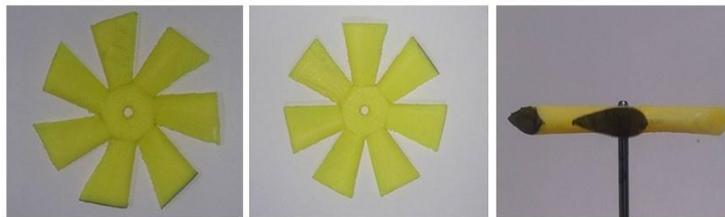
國立中山大學 海洋環境及工程學系

65

本計畫威爾斯渦輪模型單斜與雙斜設計圖



於AUTO CAD軟體建立葉片剖面及立體圖後，根據本計畫中之水工模型上方氣流孔大小(70 mm)設計威爾斯渦輪尺寸，再以3D列印方式製作成品



3D 列印威爾斯渦輪實體模型

國立中山大學 海洋環境及工程學系

66



氣流速度測試與威爾斯渦輪轉速測試

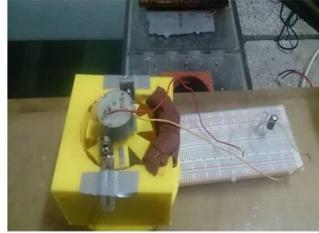


PROVA RM-1501
轉速計

- 導流系統可使低波浪能條件之氣流速度增加，面對高波浪能則氣流速度降低，可使整個波能擷取系統變得更為穩定，在低波浪能時可以穩定發電，高波浪能時則可產生更有效的消波現象。
- 在有負載的狀況，傳統風扇在低波浪能條件時幾乎無法轉動，而單斜與雙斜風扇卻可以穩定轉動產生電能。



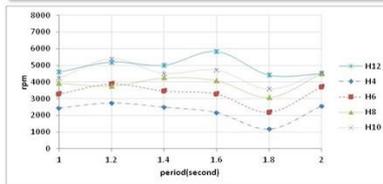
威爾斯渦輪置於導流模型進行無負載轉速試驗(無上導管)



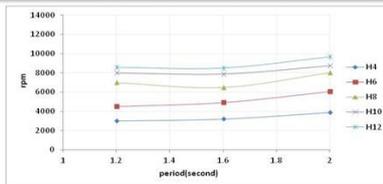
威爾斯渦輪置於導流模型進行有負載轉速試驗(無上導管)



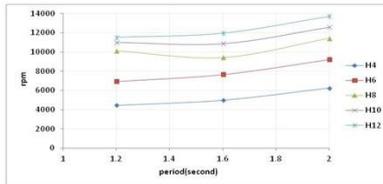
前牆開口率變換與無負載轉速之比較



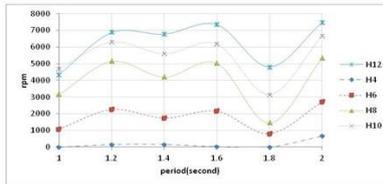
前牆開口率35%無導流之傳統渦輪轉速與波浪週期關係圖(無負載)



前牆開口率35%有導流雙斜渦輪轉速與波浪週期關係圖(無負載)



前牆開口率35%有導流單斜渦輪轉速與波浪週期關係圖(無負載)

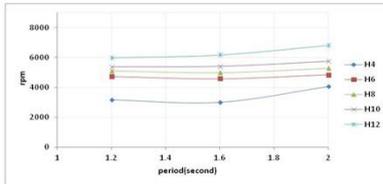


前牆開口率35%傳統渦輪轉速與波浪週期關係圖(負載馬達)

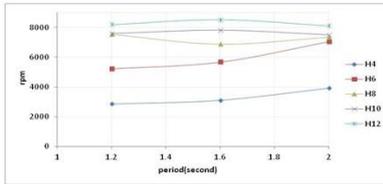
- 在無負載之狀況下單斜與雙斜之轉動效能遠比傳統風扇來得高，其中又以單斜更為突出。



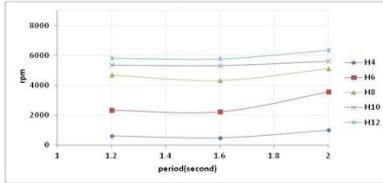
前牆開口率變換與有負載轉速之比較



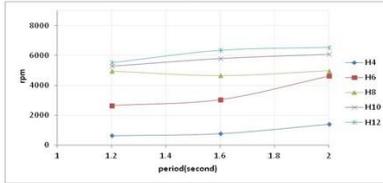
前牆開口率35%有導流之單斜渦輪轉速與波浪週期關係圖(負載馬達)



前牆開口率100%有導流之單斜渦輪轉速與波浪週期關係圖(負載馬達)



前牆開口率35%有導流之雙斜渦輪轉速與波浪週期關係圖(負載馬達)



前牆開口率100%有導流之雙斜渦輪轉速與波浪週期關係圖(負載馬達)

傳統發電系統無加裝導流系統，在波能較高之情況會有較高的風速進而產生較高的轉速，但在低波能時新的發電系統仍可持續且穩定的發電，其中又以前牆開口率100%之單斜渦輪發電系統更為明顯。



發電機輸出電壓試驗設置



型號 RT-2060(6V/50mA)
太陽能板用直流馬達



電壓測試模擬電路



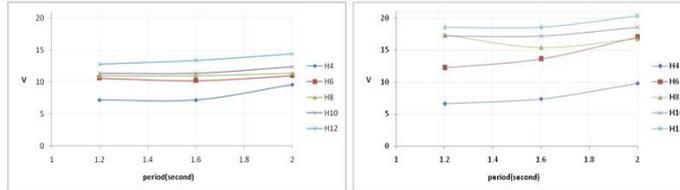
電壓訊號接收
示波器



示波器畫面擷取

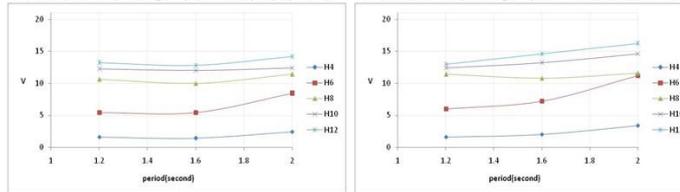


前牆開口率變換輸出電壓試驗結果



前牆開口率35%有導流單斜渦輪模型各波浪條件下最大電壓與波浪週期關係圖

前牆開口率100%有導流單斜渦輪模型各波浪條件下最大電壓與波浪週期關係圖



前牆開口率35%有導流雙斜渦輪模型各波浪條件下最大電壓與波浪週期關係圖

前牆開口率100%有導流雙斜渦輪模型各波浪條件下最大電壓與波浪週期關係圖

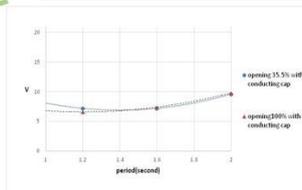
各波浪條件下最大電壓與波浪週期關係圖

國立中山大學 海洋環境及工程學系

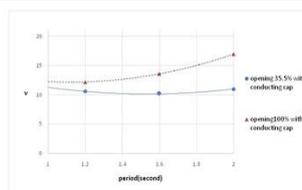
71



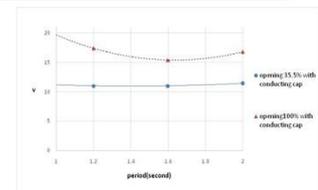
不同前牆開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較



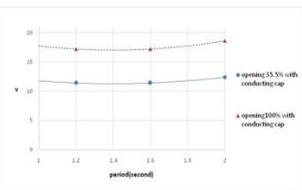
不同前牆開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=4)



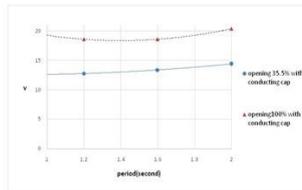
不同前牆開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=6)



不同前牆開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=8)



不同前牆開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=10)



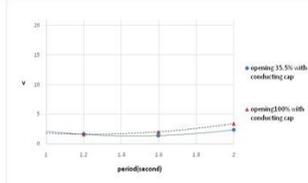
不同前牆開口率模型之單斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=12)

國立中山大學 海洋環境及工程學系

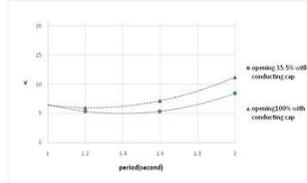
72



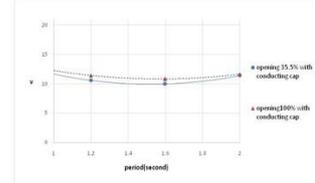
不同前牆開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較



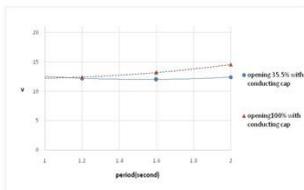
不同前牆開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=4)



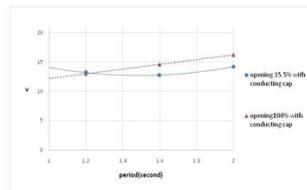
不同前牆開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=6)



不同前牆開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=8)



不同前牆開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=10)



不同前牆開口率模型之雙斜渦輪最大電壓與波浪週期比較(H=12)

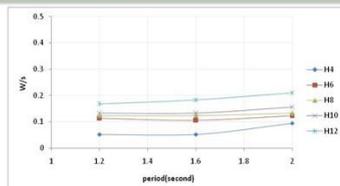
國立中山大學 海洋環境及工程學系

- 同一波高條件下不同斜板或前牆開口率之最大電壓表現，其中前牆開口率100%所產生之電壓皆大於前牆開口率35%，且單斜渦輪皆大於雙斜渦輪，發電極質皆在週期2時發生。

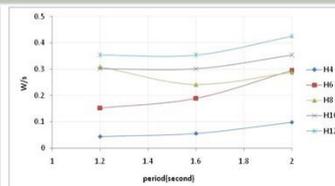
73



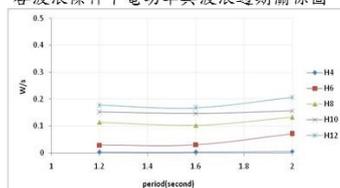
輸出電功率試驗結果



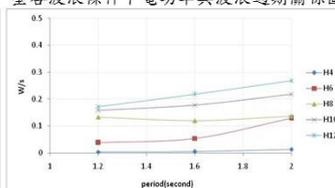
前牆開口率35%出風口改良單斜渦輪模型各波浪條件下電功率與波浪週期關係圖



前牆開口率100%出風口改良單斜渦輪模型各波浪條件下電功率與波浪週期關係圖



前牆開口率35%出風口改良雙斜渦輪模型各波浪條件下電功率與波浪週期關係圖



前牆開口率100%出風口改良雙斜渦輪模型各波浪條件下電功率與波浪週期關係圖

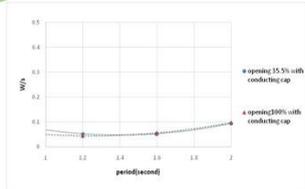
國立中山大學 海洋環境及工程學系

各波浪條件下電功率與波浪週期關係圖

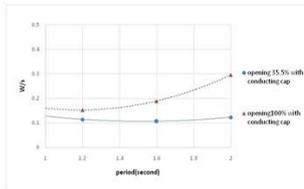
74



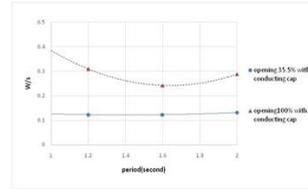
不同前牆開口率單斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較



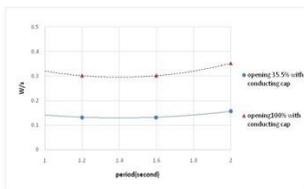
不同前牆開口率單斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=4)



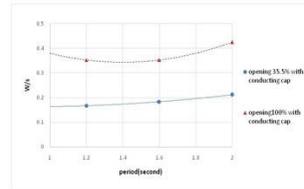
不同前牆開口率單斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=6)



不同前牆開口率單斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=8)



不同前牆開口率單斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=10)

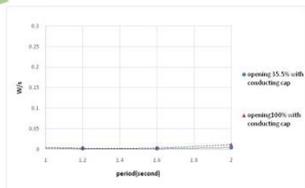


不同前牆開口率單斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=12)

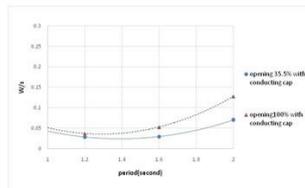
國立中山大學 海洋環境及工程學系



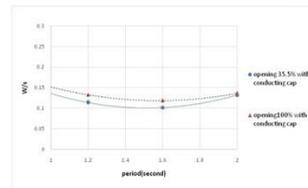
不同前牆開口率雙斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較



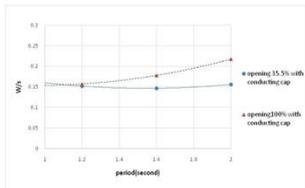
不同前牆開口率雙斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=4)



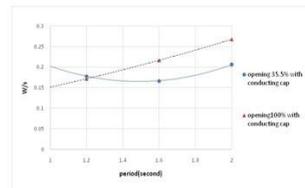
不同前牆開口率雙斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=6)



不同前牆開口率雙斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=8)



不同前牆開口率雙斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=10)



不同前牆開口率雙斜渦輪模型之電功率與波浪週期比較(H=12)

國立中山大學 海洋環境及工程學系

- 同一波高條件下不同斜板或前牆開口率之電功率，其中以前牆開口率100%單斜渦輪發電系統之電功率最高。



實驗成果比較

- 前牆開口率之增加會導致反射率的增加，氣流速度與能量擷取率的下降，但發電效能會提升。
- 由波浪實驗資料在波浪週期小於1.6秒或波高條件大於6公分時，前牆開口率100%之效能將大幅增加以至於超過前牆開口率35%。
- 單斜渦輪發電效能高於雙斜渦輪系統，在於單斜渦輪之有效受風面積較大且風阻面積較小。
- 導流系統在面臨低波能之狀況時具有整流並集中氣流之特性，在面臨高波能之狀況時則可以產生消能之作用，進而保護波能擷取系統與發電渦輪。



示波計



發電展示



國立中山大學 海洋環境及工程學系

79

十 結論與建議

國立中山大學 海洋環境及工程學系

80



結論

1. **法規革新**-政府應修法並做為綠能科技改革的領頭羊，鼓勵各港務公司設置波能擷取系統，並吸引民間企業投資綠能產業，達到截能與潔能之永續目標。
2. **教育與推廣**-雖然非再生能源發電可以帶來大量的需求，但迫使汙染越來越嚴重，而非再生能源也會到用盡的一天，政府應該把綠能產業的益處推廣至大眾。並讓民眾教育後代環保與永續的重要。
3. **現地資料統整**-台灣的現地資料之統計較日本與歐美差，若有較完整的資料統計系統，將使台灣的綠能產發展得更為迅速。
4. **模擬測試**-運算技術強大的電腦將可以更為精確的模擬綠能系統設置於現地之情況，以便之後波能擷取系統設計之參考。並且可以考慮多種變因之波能擷取系統，找出最較佳解。
5. **模型實驗**-以模型實驗進行現地之縮尺實驗。並使用模擬時之較佳解之模型設計，驗證模擬測試之結果是否相符，同時可細部微調模型部分條件找出最佳解。



結論

6. **細部設計**-波能擷取系統之細部設計包含前牆開口率、風扇設計、導流系統設計、發電機組設計。
7. **較佳設計**
 - 一. **基礎設計**：根據第四章之波堤之基礎設計理論來設計波能擷取系統，以確保其強度與耐久性。
 - 二. **長度設計**：根據現有防波堤長度決定波能擷取系統之長度，或作為離岸堤之使用。
 - 三. **寬度設計**：設計寬度應小於適性波長之三之一，以確保波能之有效利用。
 - 四. **高度設計**：波能擷取系統之高度應與防波堤切齊或高於防波堤，以便後續維修工作的方便性。



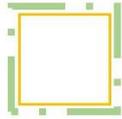
結論

- 五. 前牆沒水深度：設計之沒水深度為最低潮水位再向下1.5倍之示性波高，以確保在最低潮位時亦可以穩定發電。
- 六. 前牆開口率與出風口設計：出風口大小需與發電渦輪對應，前牆開口率須與出風口互相搭配，應先確認出風口大小後再決定前牆開口率。
- 七. 風扇設計：風扇設計推薦使用奇數型風扇設計，葉片幾何以單斜為主要設計，亦可使用更為優秀的扇葉設計。
- 八. 維護管理：波能擷取系統設置於海岸區域，鹽分較高、腐蝕性強，發電機組與風扇渦輪需要較高的維護。渦輪及發電機組需要重視定期檢測銹蝕與生物附著之情況，以延長發電機組的使用時間。



建議

1. 波能擷取系統需先決定其使用之目的；如港區照明或警示燈之使用。
2. 本系統所產出之電能為連續但較不穩定，需考慮電力之儲存方式。發電系統建議使用直流式發電，在儲存與使用方面也更為直接，且直流電系統之維修較為簡單，在高鹽之環境更為適用。
3. 波能擷取系統與發電機組防蝕問題極為重要，因此與海水接觸的部份必須為具有防蝕功能之材質，且能自由升降至安全高程，以避開暴潮或風雨之衝擊，並定期維護。



Thanks for Listening.

計畫成果在本年度發表之文章

- 1 風能應用於台灣港灣之初步研究，港灣季刊第 104 期，P1-6
- 2 太陽能應用於台灣港灣之初步研究，港灣季刊第 104 期，P40-45