

104-31-7806
MOTC-IOT-103-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(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 104 年 5 月

104-31-7806
MOTC-IOT-103-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(2/4)

著 者：邱永芳、張富東、黃茂信、李賢華

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 5 月

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. (2/4) / 邱永芳等著. -- 初版. -- 臺北市：
交通部運研所，民 104.05

面；公分

ISBN 978-986-04-4502-2(平裝)

1.港埠工程 2.能源

443.2

104004437

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(2/4)

著者：邱永芳、張富東、黃茂信、李賢華

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)26587176

出版年月：中華民國 104 年 5 月

印刷者：群彩印刷科技股份有限公司

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：300 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：1010400357

ISBN：978-986-04-4502-2 (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(2/4)			
國際標準書號 ISBN 978-986-04-4502-2 (平裝)	政府出版品統一編號 1010400357	運輸研究所出版品編號 104-31-7806	計畫編號 103-H2DB005c
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：邱永芳 研究人員：張富東、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、陸曉筠 研究人員：方鉢淳、張正憲、鄭聿翔、陳勝傑 林雋祐、吳宗輝、陳政翰、劉雨慈 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 103 年 2 月 至 103 年 12 月
關鍵詞：綠色能源、波浪能、能源擷取			
摘要： 本計畫計畫為思考以可再生之綠色能源，結合於港灣構造系統中，以建置一真正綠色港灣系統為目標。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，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計畫之第一目標。工作中主要的挑戰包括兩大方面：一為波浪能量之擷取系統之設計、二為效能高之波浪發電系統設計。由於設施附屬於港灣構造物上，且為了擷取作用於構造物之波浪能量，擷取系統將有許多的限制。本計畫成果效益以及可以提供本所或政府機關後續應用情形包含下列幾項： 1. 本計畫屬於創新前瞻、技術開發之研究，藉由其研究成果可促成學界合作研究。 2. 可提供交通部航港局與各港務分公司等相關決策之參據與實務應用政策施政之依據，以改善海洋環境品質。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
104 年 5 月	438	300	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。
機密等級： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 (解密條件：☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密，☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密) ☒普通			
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 (2/4)			
ISBN 978-986-04-4502-2 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010400357	IOT SERIAL NUMBER 104-31-7806	PROJECT NUMBER 103-H2DB005c
DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yung-Fang Chiu PROJECT STAFF: Fu-Tung Chang, Mao-Hsin Huang PHONE: (04)-26587120 FAX: (04) 26571329			PROJECT PERIOD FROM February 2006 TO December 2006
RESEARCH AGENCY: National Sun Yat-sen University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee H.H DEPUTY INVESTIGATOR: Chen Yang-yih, Lu Hsiao-yun PROJECT STAFF: Fang Po-Chun, Chang Cheng-Hsien, Cheng Yu-Hsiang, Chen Sheng-Jie, Lin chuan yu, Wu Tsung-Yeah, Chen Cheng-Han, Liu Yu-Ci ADDRESS: 70 Lienhai Rd., Kaohsiung 80424, Taiwan, R.O.C. PHONE: (07) 5252000 ext.5069			
KEY WORDS: GREEN ENERGY RESOURCES, WAVE ENERGY, ENERGY CAPTURE			
ABSTRACT: 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. 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. The research outcome benefits and subsequent applications are as follows: 1. This is a forward-looking, innovational and technical development project, by the result of this study can boost academic cooperation. 2. This study can be used as the basis of policies for Maritime and Port Bureau or Taiwan International Ports Corporation to improve the quality of the marine environment.			
DATE OF PUBLICATION May 2015	NUMBER OF PAGES 438	PRICE 300	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ 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	IIIX
表目錄	XXIII
第一章 計畫背景分析	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 本計畫與當前國家施政之關聯性	1-2
1.3 本計畫目的及其重要性	1-2
1.4 本計畫研究內容及工作項目	1-6
1.4.1 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計	1-6
1.4.2 波浪能擷取系統縮尺實體試驗模型之建立	1-7
1.4.3 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究	1-7
1.5 本計畫之研究方法及研究架構	1-8
第二章 太陽能與風能及其於港灣應用分析	2-1
2.1 綠色能源簡介	2-1
2.2 太陽能之發展與應用現況	2-1
2.3 太陽能電池介紹	2-2
2.3.1 太陽能電池發電原理	2-2
2.3.2 太陽能電池種類	2-3
2.3.3 晶片型太陽能電池	2-5

2.3.4 薄膜太陽能電池.....	2-6
2.4 太陽能發電適用於各港口概略分析	2-9
2.4.1 分析方法及步驟說明	2-9
2.4.2 太陽能發電系統設置條件.....	2-10
2.4.3 四大港設置太陽能條件.....	2-12
2.4.4 預期發電量與成本估算.....	2-16
2.5 風能之發展與應用現況	2-18
2.5.1 風能的發展	2-18
2.5.2 風能之優點及缺點評估.....	2-18
2.5.3 臺灣目前風能發展現況.....	2-19
2.6 風能發電適用於各港口概略分析	2-25
2.6.1 簡介	2-25
2.6.2 小型風力發電機介紹	2-26
2.6.3 臺灣四大港口風力發電適用分析	2-31
2.6.4 臺灣四大港口風力發電比較	2-38
2.6.5 國際離岸風力發展現況.....	2-38
2.6.6 我國離岸風能發展現況.....	2-41
第三章 波浪能之發展與應用	3-1
3.1 海洋能之發展與應用現況	3-1
3.1.1 海洋能的發展	3-1
3.1.2 海洋能源種類	3-1
3.2 波浪發電之原理及種類	3-5
3.3 波浪發電之應用	3-8

3.3.1 國際上波浪發電發展簡介	3-8
3.3.2 波浪能發電目前實際安裝運轉案例	3-12
3.4 臺灣四大港口基本簡介及波浪資料	3-24
3.4.1 基隆港基本簡介及波浪資料	3-24
3.4.2 臺中港基本簡介及波浪資料	3-25
3.4.3 花蓮港基本簡介及波浪資料	3-26
3.4.4 高雄港基本簡介及波浪資料	3-27
3.5 臺灣四大港口可重現波高迴歸期推估	3-29
第四章 沉箱堤為基礎之波浪發電理論說明	4-1
4.1 沉箱與氣流公式推導	4-1
4.1.1 理論發展簡介	4-1
4.1.2 氣室內空氣動力學	4-2
4.1.3 波浪與氣室內之空氣反應	4-5
4.1.4 空氣能量	4-6
4.1.5 波能效率	4-8
4.2 不規則波浪能 WI 公式推導	4-8
4.3 紊流流體力學理論	4-9
第五章 波浪發電複合式防波堤應用及結構安全分析	5-1
5.1 波能轉換數值方法驗證	5-2
5.1.1 日本酒田港之沉箱式波能轉換系統	5-2
5.1.2 ANSYS CFX 數值模擬介紹	5-4
5.1.3 模擬結果比較	5-7

5.2 波浪發電複合式防波堤於高雄港第一港口北堤之模擬.....	5-16
5.2.1 案例分析模型	5-17
5.2.2 模擬結果分析	5-20
5.3 波能轉換氣室 RC 結構設計	5-27
5.3.1 鋼筋排筋設計	5-28
5.3.2 鋼筋混凝土學計算	5-30
5.4 沉箱式防波堤結合波能轉換系統之結構安全分析.....	5-33
5.4.1 作用在直立岸堤之最大波力估算.....	5-33
5.4.2 模擬軟體介紹:.....	5-35
5.4.3 受力變形分析	5-37
5.4.4 Von Mises stress 破壞應力分析	5-40
5.5 波能轉換氣室結構力學有限元素分析:.....	5-43
第六章 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析.....	6-1
6.1 沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數.....	6-1
6.2 分析結果討論	6-3
6.2.1 無因次氣室長度變化之影響.....	6-4
6.2.2 無因次沒水深度變化之影響.....	6-5
第七章 實體模型設計及水工試驗規畫.....	7-1
7.1 模型相似理論及縮尺.....	7-1
7.2 實驗模型製作	7-2
7.3 實驗儀器及設備	7-3
7.4 實驗佈置	7-5

7.5 實驗波浪條件	7-5
7.6 實驗參數設定	7-6
7.7 實驗步驟	7-6
7.7.1 波高計量測	7-7
7.7.2 氣流速度量測	7-7
第八章 水工模擬試驗結果與分析	8-1
8.1 數值模擬與水工模擬試驗比較	8-1
8.1.1 波浪反射率結果之比較	8-1
8.1.2 氣流速度結果之比較	8-1
8.1.3 整體能量擷取率結果之比較	8-1
8.2 水工模擬試驗模型 I 與模型 II 比較	8-2
8.2.1 波浪反射率結果之比較	8-2
8.2.2 氣流速度結果之比較	8-2
8.2.3 整體能量擷取率結果之比較	8-2
8.3 水工模擬試驗模型 I 與模型 II 於不同波浪條件下之比較	8-4
8.3.1 波浪反射率結果之比較	8-4
8.3.2 氣流速度結果之比較	8-9
8.3.3 內部波高結果之比較	8-14
8.3.4 整體能量擷取率結果之比較	8-21
8.3.5 水工模擬試驗模型 I 與模型 II 結果分析	8-26
第九章 結論與建議	9-1
9.1 結論	9-1

9.1.1 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計	9-1
9.1.2 波浪能擷取系統實體模型之建立	9-2
9.1.3 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究	9-2
9.2 建議	9-3
9.3 成果效益及後續應用	9-3
參考文獻	參-1
附錄 A	附 A-1
附錄 B	附 B-1
附錄 C	附 C-1
附錄一 期中簡報資料	附 1-1
附錄二 期中報告審查意見處理情形表	附 2-1
附錄三 期末簡報資料	附 3-1
附錄四 期末報告審查意見處理情形表	附 4-1

圖目錄

圖 1.1 全球能源需求非再生與可再生能源之比例.....	1-4
圖 1.2 可再生能源種類所佔比例.....	1-4
圖 1.3 計畫研究流程圖.....	1-9
圖 2.1 太陽電池構造圖.....	2-3
圖 2.2 太陽能電池外觀圖.....	2-4
圖 2.3 各種不同組態太陽能電池示意圖.....	2-4
圖 2.4 合成後之高雄港區圖.....	2-10
圖 2.5 基隆港區圖.....	2-12
圖 2.6 臺中港區圖.....	2-13
圖 2.7 高雄港區圖.....	2-14
圖 2.8 花蓮港區圖.....	2-15
圖 2.9 石門風力場址.....	2-23
圖 2.10 觀園風力場址.....	2-23
圖 2.11 澎湖中屯風力場址.....	2-24
圖 2.12 雲麥風力場址.....	2-24
圖 2.13 DS-300 功率氣流速度曲線圖.....	2-27
圖 2.14 DS-700 功率氣流速度曲線圖.....	2-28
圖 2.15 DS-1500 功率氣流速度曲線圖.....	2-28
圖 2.16 DS-3000 功率氣流速度曲線圖.....	2-29
圖 2.17 1KW VAWT 功率氣流速度曲線圖.....	2-29

圖 2.18 4KW VAWT 功率氣流速度曲線圖	2-30
圖 3.1 浮筒及浮塢式波能轉換系統.....	3-6
圖 3.2 搖擺浮板式 (THE OSCILLATING SURGE CONVERTER) 波能 轉換系統.....	3-6
圖 3.3 擺盪或推升水柱體 (OWC) 波能轉換系統	3-7
圖 3.4 連桿作動式 (PELAMIS OR ATENUATOR) 波能轉換系統 ...	3-7
圖 3.5 溯升及越波驅動式 (OVERTOPPING AND TERNINATOR) 波能 轉換系統.....	3-8
圖 3.6 波能轉換系統之設計及建造施工情形.....	3-11
圖 3.7 波能轉換系統岸上設施建造施工情形.....	3-12
圖 3.8 LIMPET 500 的整體運作模式	3-13
圖 3.9 LIMPET 500 運作時現場波浪行為	3-13
圖 3.10 PICOOWC 系統正視圖	3-15
圖 3.11 PICOOWC 系統後視圖	3-16
圖 3.12 VIZHINJAM OWC 沉箱前防波堤結構	3-18
圖 3.13 VIZHINJAM OWC 沉箱後視圖.....	3-18
圖 3.14 VIZHINJAM OWC 正在建設中.....	3-19
圖 3.15 VIZHINJAM OWC 整體模型圖.....	3-19
圖 3.16 SAKATA OWC 的波能發電系統.....	3-21
圖 3.17 SAKATA OWC 的沉箱施工階段.....	3-22
圖 3.18 基隆港地圖(資料來源:WIKIPEDIA).....	3-24
圖 3.19 基隆港歷年示性波高.....	3-25
圖 3.20 臺中港歷年示性波高.....	3-26

圖 3.21 花蓮港歷年示性波高	3-27
圖 3.22 高雄港潮位(高雄港務局網頁所提供)	3-28
圖 3.23 高雄港潮差	3-28
圖 3.24 高雄港歷年示性波高	3-29
圖 4.1 CBWPCS 系統及其相關參數圖(REDRAW AFTER TAKAHASHI ET AL. 1985)	4-2
圖 4.2 一個循環週期之空氣能圖(AFTER TAKAHASHI 1895)	4-7
圖 5.1 酒田港之沉箱式波能轉換系統(AFTER GODA 1991)	5-3
圖 5.2 酒田港沉箱式 OWC 之渦輪室(AFTER GODA 1991)	5-3
圖 5.3 SOLID WORK 建置之模型	5-6
圖 5.4 邊界類型設置	5-6
圖 5.5 模型沒水狀況	5-8
圖 5.6 模型沒水狀況側視圖	5-8
圖 5.7 現場測量之氣室內部波高與壓力圖(GODA 1991)	5-9
圖 5.8 數據 1 之氣室內部壓力(AFTER GODA 1991)	5-10
圖 5.9 數據 2 之氣室內部壓力(AFTER GODA 1991)	5-10
圖 5.10 數據 1 之氣室內波高(AFTER GODA 1991)	5-11
圖 5.11 數據 2 之氣室內波高(AFTER GODA 1991)	5-11
圖 5.12 CFX 模擬之氣室內部壓力	5-12
圖 5.13 CFX 模擬之氣室內波高	5-12
圖 5.14 CFX 模擬與 GODA 實驗數據比較圖(氣室內部壓力)	5-13
圖 5.15 CFX 模擬與 GODA 實驗數據比較圖(氣室內波高)	5-14
圖 5.16 波浪發電防波堤之沒水深度	5-17

圖 5.17 波浪發電防波堤之尺寸(正視圖).....	5-18
圖 5.18 波浪發電防波堤之尺寸(側視圖).....	5-18
圖 5.19 高雄港第一港口水深平面圖.....	5-19
圖 5.20 模型沒水狀況.....	5-20
圖 5.21 氣室內水位以及空氣流速圖.....	5-21
圖 5.22 氣室內部波高變化圖.....	5-21
圖 5.23 監測點編號圖.....	5-22
圖 5.24 監測點 1 之壓力變化圖.....	5-22
圖 5.25 監測點 2 之壓力變化圖.....	5-23
圖 5.26 監測點 3 之壓力變化圖.....	5-23
圖 5.27 監測點 4 之壓力變化圖.....	5-24
圖 5.28 監測點 5 之壓力變化圖.....	5-24
圖 5.29 監測點 6 之壓力變化圖.....	5-25
圖 5.30 綜合壓力變化圖.....	5-25
圖 5.31 出口氣流速度變化圖.....	5-26
圖 5.32 正面模型圖.....	5-27
圖 5.33 側面模型圖.....	5-28
圖 5.34 模型說明.....	5-28
圖 5.35 牆面配筋示意圖.....	5-29
圖 5.36 剪力筋間距示意圖.....	5-29
圖 5.37 結合波能轉換系統之沉箱受力圖.....	5-34
圖 5.38 波力分布.....	5-37

圖 5.39 ANSYS 模型變形情形：正視圖.....	5-38
圖 5.40 ANSYS 模型變形情形：側視圖.....	5-39
圖 5.41 ANSYS 模型變形情形：上視圖.....	5-39
圖 5.42 ANSYS 分析結果：數據.....	5-40
圖 5.43 VON MISES 破壞應力分析：正視圖	5-41
圖 5.44 VON MISES 破壞應力分析：側視圖	5-42
圖 5.45 VON MISES 破壞應力分析上視圖	5-42
圖 5.46 VON MISES 破壞應力分析數據	5-43
圖 5.47 分割大小	5-44
圖 5.48 鋼筋排列整體圖	5-44
圖 5.49 整體變位	5-45
圖 5.50 X 向變位(橫向變位)	5-45
圖 5.51 Y 向變位(高低向變位)	5-46
圖 5.52 Z 向變位(前後向變位).....	5-46
圖 5.53 混凝土裂痕情形.....	5-47
圖 6.1 固定幾何參數示意圖.....	6-2
圖 6.2 OWC 反射率結果(無因次沒水深=2)	6-7
圖 6.3 OWC 反射率結果(無因次沒水深=3)	6-7
圖 6.4 OWC 反射率結果(無因次沒水深=4)	6-7
圖 6.5 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=2).....	6-8
圖 6.6 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次沒水深=3).....	6-8
圖 6.7 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次沒水深=4).....	6-8

圖 6.8 波高 1.5 米-OWC 平均氣流速度(無因次沒水深=2).....	6-9
圖 6.9 波高 1.5 米-OWC 平均氣流速度(無因次沒水深=3).....	6-9
圖 6.10 波高 1.5 米-OWC 平均氣流速度(無因次沒水深=4).....	6-9
圖 6.11 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=2)....	6-10
圖 6.12 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=3)....	6-10
圖 6.13 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=4)....	6-10
圖 6.14 波高 2 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=2).....	6-11
圖 6.15 波高 2 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=3).....	6-11
圖 6.16 波高 2 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=4).....	6-11
圖 6.17 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=2)..	6-12
圖 6.18 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=3)..	6-12
圖 6.19 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=4)..	6-12
圖 6.20 波高 2.5 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=2).....	6-13
圖 6.21 波高 2.5 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=3).....	6-13
圖 6.22 波高 2.5 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=4).....	6-13
圖 6.23 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=2).....	6-14
圖 6.24 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=3).....	6-14
圖 6.25 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=4).....	6-14
圖 6.26 波高 1.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=2).....	6-15
圖 6.27 波高 1.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=3).....	6-15
圖 6.28 波高 1.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=4).....	6-15
圖 6.29 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=2).....	6-16

圖 6.30 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=3).....	6-16
圖 6.31 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=4).....	6-16
圖 6.32 波高 2 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=2).....	6-17
圖 6.33 波高 2 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=3).....	6-17
圖 6.34 波高 2 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=4).....	6-17
圖 6.35 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=2).....	6-18
圖 6.36 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=3).....	6-18
圖 6.37 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=4).....	6-18
圖 6.38 波高 2.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=2).....	6-19
圖 6.39 波高 2.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=3).....	6-19
圖 6.40 波高 2.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=4).....	6-19
圖 6.44 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.125)	6-21
圖 6.45 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.15)	6-21
圖 6.46 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.175)	6-21
圖 6.47 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.125)	6-22
圖 6.48 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.15)..	6-22
圖 6.49 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.175)	6-22
圖 6.50 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.125)	6-23
圖 6.51 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.15)	6-23

圖 6.52 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.175)	6-23
圖 6.53 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.125)	6-24
圖 6.54 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.15)	6-24
圖 6.55 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.175)	6-24
圖 6.56 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.125)	6-25
圖 6.57 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.15)	6-25
圖 6.58 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.175)	6-25
圖 6.59 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.125)	6-26
圖 6.60 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.15)	6-26
圖 6.61 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.175)	6-26
圖 7.1 水槽試驗模型示意圖	7-10
圖 7.2 實驗水槽示意圖	7-11
圖 7.3 造波水槽	7-11
圖 7.4 造波機	7-12
圖 7.5 波高計	7-12
圖 7.6 訊號增幅器	7-13
圖 7.7 AD/DA 內建 ANALOG INPUT 介面與 ANALOG OUTPUT 介面	7-13
圖 7.8 訊號放大器	7-14
圖 7.9 氣流速度計(產品代號：AM.4214SD)	7-14
圖 7.10 模型實體	7-15
圖 7.11 模型架設於水槽中情形	7-15

圖 7.13 內部氣室波高計	7-16
圖 8.1 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=4).....	8-5
圖 8.2 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=6).....	8-6
圖 8.3 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=8).....	8-6
圖 8.4 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=10).....	8-7
圖 8.5 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=12).....	8-7
圖 8.6 模型 I 反射率綜合比較	8-8
圖 8.7 模型 II 反射率綜合比較	8-8
圖 8.8 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=4).....	8-10
圖 8.9 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=6).....	8-11
圖 8.10 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=8).....	8-11
圖 8.11 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=10).....	8-12
圖 8.12 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=12).....	8-12
圖 8.13 模型 I 氣流速度綜合比較	8-13
圖 8.14 模型 II 氣流速度綜合比較	8-13
圖 8.15 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=4).....	8-16
圖 8.16 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=4).....	8-16
圖 8.17 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=6).....	8-17
圖 8.18 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=6).....	8-17
圖 8.19 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=8).....	8-18
圖 8.20 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=8).....	8-18
圖 8.21 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=10).....	8-19

圖 8.22 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較($H=10$).....	8-19
圖 8.23 模型 I 及模型 II 內部波高比較($H=12$).....	8-20
圖 8.24 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較($H=12$).....	8-20
圖 8.25 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較($H=4$).....	8-23
圖 8.26 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較($H=6$).....	8-24
圖 8.27 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較($H=8$).....	8-24
圖 8.28 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較($H=10$).....	8-25
圖 8.29 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較($H=12$).....	8-25
圖 8.30 模型 I 能量擷取率綜合比較	8-26
圖 8.31 模型 II 能量擷取率綜合比較	8-26
圖 A.1 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6.25\text{CM}$, $T=1.75\text{S}$)	附 A-1
圖 A.2 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1\text{S}$)	附 A-2
圖 A.3 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$)	附 A-3
圖 A.4 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$)	附 A-4
圖 A.5 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$)	附 A-5
圖 A.6 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$)	附 A-6
圖 A.7 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=2\text{S}$)	附 A-7
圖 A.8 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1\text{S}$)	附 A-8
圖 A.9 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$)	附 A-9
圖 A.10 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$)	附 A-10
圖 A.11 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$)	附 A-11
圖 A.12 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$)	附 A-12

圖 A.13 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=2\text{S}$)	附 A-13
圖 A.14 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1\text{S}$)	附 A-14
圖 A.15 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$)	附 A-15
圖 A.16 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$)	附 A-16
圖 A.17 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$)	附 A-17
圖 A.18 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$)	附 A-18
圖 A.19 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=2\text{S}$)	附 A-19
圖 A.20 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1\text{S}$)	附 A-20
圖 A.21 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$)	附 A-21
圖 A.22 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$)	附 A-22
圖 A.23 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$)	附 A-23
圖 A.24 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$)	附 A-24
圖 A.25 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=2\text{S}$)	附 A-25
圖 A.26 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1\text{S}$)	附 A-26
圖 A.27 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$)	附 A-27
圖 A.28 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$)	附 A-28
圖 A.29 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$)	附 A-29
圖 A.30 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$)	附 A-30
圖 A.31 水工模擬試驗模型 I 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=2\text{S}$)	附 A-31
圖 A.32 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6.25\text{CM}$, $T=1.75\text{S}$)....	附 A-32
圖 A.33 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1\text{S}$)	附 A-33
圖 A.34 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$)	附 A-34

圖 A.35 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 A-35
圖 A.36 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 A-36
圖 A.37 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$).....	附 A-37
圖 A.38 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=4\text{CM}$, $T=2\text{S}$).....	附 A-38
圖 A.39 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 A-39
圖 A.40 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 A-40
圖 A.41 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 A-41
圖 A.42 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 A-42
圖 A.43 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$).....	附 A-43
圖 A.44 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=6\text{CM}$, $T=2\text{S}$).....	附 A-44
圖 A.45 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 A-45
圖 A.46 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 A-46
圖 A.47 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 A-47
圖 A.48 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 A-48
圖 A.49 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$).....	附 A-49
圖 A.50 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=8\text{CM}$, $T=2\text{S}$).....	附 A-50
圖 A.51 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 A-51
圖 A.52 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 A-52
圖 A.53 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 A-53
圖 A.54 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 A-54
圖 A.55 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$).....	附 A-55
圖 A.56 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=10\text{CM}$, $T=2\text{S}$).....	附 A-56

圖 A.57 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 A-57
圖 A.58 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 A-58
圖 A.59 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 A-59
圖 A.60 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 A-60
圖 A.61 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=1.8\text{S}$).....	附 A-61
圖 A.62 水工模擬試驗模型 II 波高結果($H=12\text{CM}$, $T=2\text{S}$).....	附 A-62
圖 B.1 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=6.25\text{CM}$, $T=1.75\text{S}$).....	附 B-1
圖 B.2 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=4\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 B-1
圖 B.3 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=6\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 B-2
圖 B.4 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=8\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 B-2
圖 B.5 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=10\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 B-3
圖 B.6 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=12\text{CM}$, $T=1\text{S}$).....	附 B-3
圖 B.7 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=4\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 B-3
圖 B.8 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=6\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 B-4
圖 B.9 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=8\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 B-4
圖 B.10 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=10\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 B-4
圖 B.11 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=12\text{CM}$, $T=1.2\text{S}$).....	附 B-5
圖 B.12 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=4\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 B-5
圖 B.13 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=6\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 B-5
圖 B.14 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=8\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 B-6
圖 B.15 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=10\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 B-6
圖 B.16 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=10\text{CM}$, $T=1.4\text{S}$).....	附 B-6

圖 B.17 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=4\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 B-7
圖 B.18 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=6\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 B-7
圖 B.19 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=8\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 B-7
圖 B.20 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=10\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 B-8
圖 B.21 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=12\text{CM}$, $T=1.6\text{S}$).....	附 B-8

表目錄

表 1.1 2011 年台電統計臺灣各種能源使用情形.....	1-5
表 2.1 太陽能電池種類.....	2-5
表 2.2 依標案名稱調查最近得標資料(未知實際標案內容).....	2-11
表 2.3 基隆近五年日照時間 (單位：小時)	2-12
表 2.4 臺中近五年日照時間 (單位：小時)	2-13
表 2.5 高雄近五年日照時間 (單位：小時)	2-14
表 2.6 花蓮近五年日照時間 (單位：小時)	2-15
表 2.7 各港資料綜合表.....	2-17
表 2.8 世界各國風力發電機組目前累積裝置容量.....	2-19
表 2.9 臺灣及其他各國對於風力發電之獎勵電價表.....	2-20
表 2.10 臺灣各風力發電場址發電機機型及發電量一覽	2-21
表 2.11 各風力發電機介紹.....	2-22
表 2.12 新高能源科技股份有限公司小型風力發電機	2-26
表 2.13 特力寶科技有限公司小型風力發電機.....	2-27
表 2.14 各型號風機在不同氣流速度所對應之功率(W)	2-30
表 2.15 基隆港歷年各級氣流速度概率.....	2-31
表 2.16 基隆港每年各型號風機每一台可發電量.....	2-31
表 2.17 基隆港每年各型號風機可發總電量.....	2-32
表 2.18 臺中港歷年各級氣流速度概率.....	2-32

表 2.19 臺中港每年各型號風機每一台可發電量.....	2-33
表 2.20 臺中港每年各型號風機可發總電量.....	2-34
表 2.21 高雄港歷年各級氣流速度概率.....	2-34
表 2.22 高雄港每年各型號風機每一台可發電量.....	2-35
表 2.23 高雄港每年各型號風機可發總電量.....	2-36
表 2.24 花蓮港歷年各級氣流速度概率.....	2-36
表 2.25 花蓮港每年各型號風機每一台可發電量.....	2-37
表 2.26 花蓮港每年各型號風機可發總電量.....	2-38
表 2.27 歐洲主要離岸風能發展國家的市場發展概況、發展動力與激勵措施比較.....	2-40
表 3.1 各種海洋能種類比較分析表.....	3-3
表 3.2 LIMPET500 設計參數	3-14
表 3.3 PICO 設計參數.....	3-16
表 3.4 VIZHINJAM 設計參數.....	3-20
表 3.5 SAKATA OWC 設計參數	3-23
表 3.6 基隆港各月份最適極值函數與對應的 50 年重現期波高	3-31
表 3.7 臺中港各月份最適極值函數與對應的 50 年重現期波高	3-31
表 3.8 推估花蓮港波浪之各重現期波高.....	3-32
表 3.9 高雄港外海各方向各迴歸期設計波浪分析表.....	3-32
表 3.10 高雄港極端水位分析表.....	3-32
表 5.1 CFX 模擬與實驗數據比較表(氣室內部壓力).....	5-15
表 5.2 CFX 模擬與實驗數據比較表(氣室內波高).....	5-15

表 5.3 綜合壓力表	5-26
表 5.4 頂部樓板:X 軸-Y 向彎矩配筋	5-31
表 5.5 防波牆面: X 軸-Z 向彎矩配筋	5-32
表 5.6 隔間牆: Y 軸-X 向彎矩配筋	5-32
表 6.1 固定幾何參數表	6-2
表 6.2 無因次氣室長數值表	6-3
表 6.3 無因次前牆沒水深數值表	6-3
表 7.1 實驗儀器與設備一覽	7-3
表 7.2 模型與實體縮尺	7-7
表 7.3 模型與實體縮尺	7-8
表 7.4 波高計規格表	7-9
表 8.1 數值模擬、模型 I 及 模型 II 比較表	8-3
表 8.2 模型 I 反射率 K_R	8-4
表 8.3 模型 II 反射率 K_R	8-5
表 8.4 模型 I 平均氣流速度	8-9
表 8.5 模型 II 平均氣流速度	8-9
表 8.6 模型 I 內部波高	8-14
表 8.7 模型 II 內部波高	8-14
表 8.8 模型 I 內部波高放大率	8-15
表 8.9 模型 II 內部波高放大率	8-15
表 8.10 模型 I 及模型 II 入射波能	8-21
表 8.11 模型 I 氣流速度能	8-21

表 8.12 模型 II 氣流速度能	8-22
表 8.13 模型 I 能量擷取率	8-22
表 8.14 模型 II 能量擷取率	8-23
表 C-1 基隆港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計	附 C-1
表 C-2 基隆港颱風資訊與其對應最大波高.....	附 C-4
表 C-3 臺中港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計	附 C-5
表 C-4 臺中港颱風資訊與其對應最大波高.....	附 C-8
表 C-5 花蓮港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計	附 C-9
表 C-6 花蓮港颱風資訊與其對應最大波高.....	附 C-13
表 C-7 高雄港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計	附 C-16
表 C-8 高雄港颱風資訊與其對應最大波高.....	附 C-19

第一章 計畫背景分析

1.1 計畫緣起

本計畫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。

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 本計畫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、道路坍方、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。本計畫屬於創新前瞻、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 本計畫目的及其重要性

本計畫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計畫之第一目標。

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一新的、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。此為本計畫之第二目標。

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。

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^[1]，如圖 1.1 所示全球有 19%的能源需求來自於可再生能源；如圖 1.2 所示，再生能

源中有 68%為傳統的生物能，多半用於熱能；17%是來自水力，而來自新的可再生能源者僅有 14%（人類自古就知悉利用水力及風力，因此部分學者將水力、風力、及生物能等稱為舊的再生能源方式，而近年所發展之核能、生物質能等技術則稱新的再生能源）。

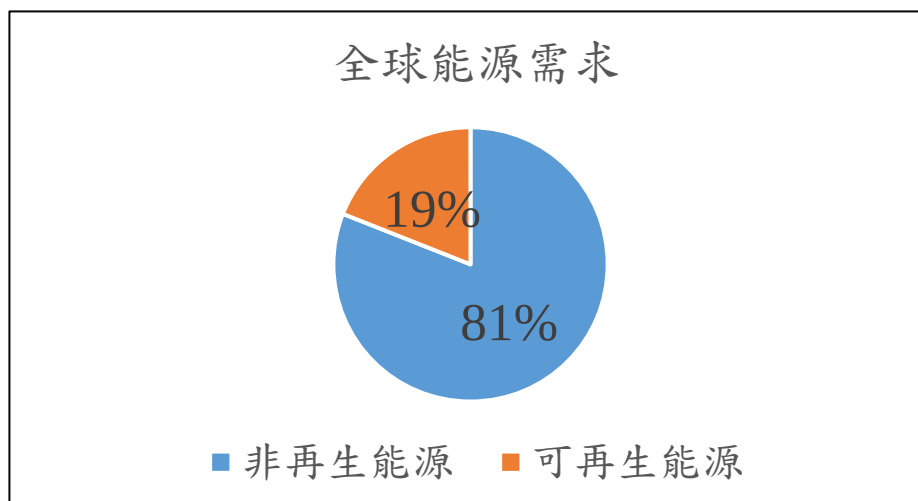


圖 1.1 全球能源需求非再生與可再生能源之比例

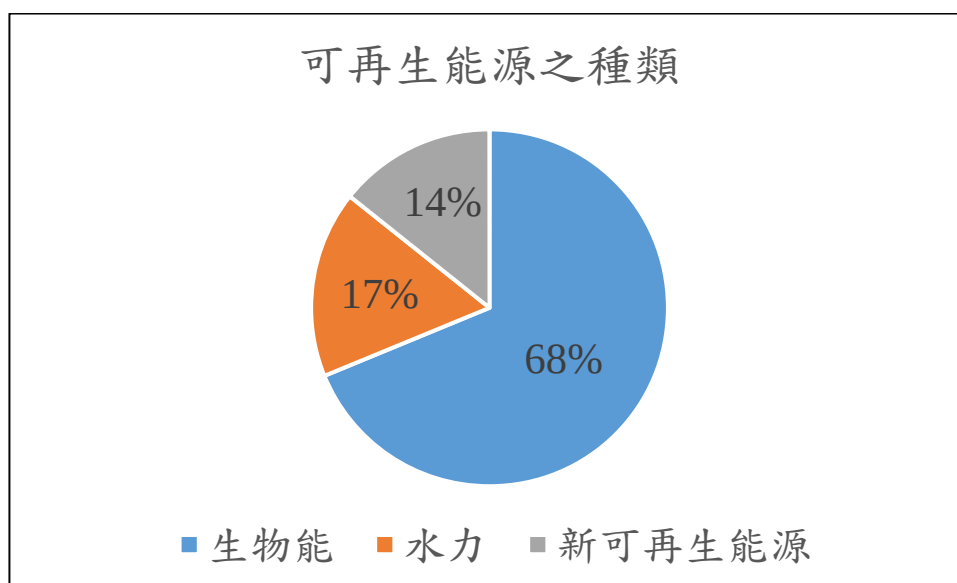


圖 1.2 可再生能源種類所佔比例

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 年台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，稍嫌不足。其應用之可行性，特別針對較能適用於港灣相關構造者作探討。

表 1.1 2011 年台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 本計畫研究內容及工作項目

本計畫工作的內容將包括有三大層面之工作項目：(1) 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計、(2) 波浪能擷取系統實體模型之建立、(3) 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究。

在第一階段的研究中，已建立一波浪能擷取系統，在一固定氣室內湧進波浪，利用波浪進入時之上下起伏作用造成空之震盪，再將此震盪之氣流，經過整流及引導以推動氣旋式渦輪系統來發電。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，其具體工作項目依照以上內容，則分別敘述如下。

1.4.1 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計

波浪能擷取系統及波能轉換系統之模型設計，在初期研究研究成果中已建立波能轉換系統，並證實其應用於港灣構造之可行性。但仍必須依照結構之型式、大小、材質、位置，以及其與相對應之綠能設施結合後對結構之影響作進一步之分析。另外包括波浪引導方式及波浪能擷取方式之考慮、應用於不同港灣構造之可行性，以及效能最佳化之設計等均為相關工作項目：

1. 波浪引導或集中之設計考慮

在波浪能的擷取上，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，本階段之研究中亦將加以考慮，但是否因此而增加防波堤之受力，以致造成安全之顧慮，則必須優先考慮並加以避免。或者在設計時考慮在能量擷取之同時，波浪之能量因此而損失後，降低其對結構物之衝擊力。

2. 波浪能擷取系統及波能轉換系統於不同港灣構造應用之可行性

波浪能擷取及波能轉換系統除了附設於外廓防堤上之外，是否也能應用於其他型式之港灣結構上，也必須建立起相關之分析模型後，

才能加以分析及評估。

3. 波浪能擷取及轉換系統之效能優化

本計畫中最重要的課題為，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，能有效提高其發電效能，必須配合參數之優化選擇，重新建立模型並進行分析。

1.4.2 波浪能擷取系統縮尺實體試驗模型之建立

波浪能擷取系統實體模型之建立，主要為進行相關之試驗室驗證工作，該實體模型之建立必須依據實驗室能容納之最大型模型而設計。本計畫之執行所利用之實驗室如前節所述以造波水槽試驗室為主，因此模型也以水工模型為主。此縮尺實體模型設計時，將依據數值及數學模型分析之結果按實體比例縮小，其縮小尺寸之計算將以符合福祿數之動力相似原則(Froude similarity)進行。

縮尺試驗模型之建立，依據參數及相關幾何規劃及分析之需求，必要時將以經費能負荷之情況下，建立多組模型進行造波水槽試驗，以達到同模型多參數、同參數多模型、多重驗證之目標。

1.4.3 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究

本計畫之目標為建立綠色港灣結構，並以此為主軸發揮傳統港灣結構多功能之應用，在構造使用時除了不能影響其功能性之外，更不能造成港灣結構安全之危害。因此、相關港灣構造物之安全性及耐久性影響必須加以評估，評估時必須經過詳細之結構受力分析。其評估重點包括：結構分析模型之建立、結構使用材料之確認及建立材料相關之特性於模組中、環境外力數據之取得及應用於分析系統中。

1. 結構分析模型之建立

結構分析模型與波浪擷取及能量轉換系統之分析模型，由於使用之分析程式差異甚大，通常無法以同一個程式分析兩種絕然不同之目標，因此、兩種分析模型必須分開建立或分別進行分析。

2. 結構使用材料之確認及建立材料相關之特性於模組中

結構耐久性與所使用之材料息息相關，故材料之受力行為、以及環境影響如材料腐蝕行為也必須一併考慮。在建立分析模型時，各種使用材料之力學行為必須正確輸入，甚至建立自有之材料特性系統。

3. 環境外力數據之取得及應用於分析系統

各種綠能設施在設置時，必須具有一定程度之結構安全性，才能進一步運轉而達到其使用功能。因此、碼頭構造設施之結構型式及使用材料，將為影響附屬設施安全之首要因素。本工作項目中必須加以瞭解，並進行相關分析工作。

1.5 本計畫之研究方法及研究架構

本計畫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，而後確立本計畫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。其研究架構之流程大體如圖 1.3 所示。

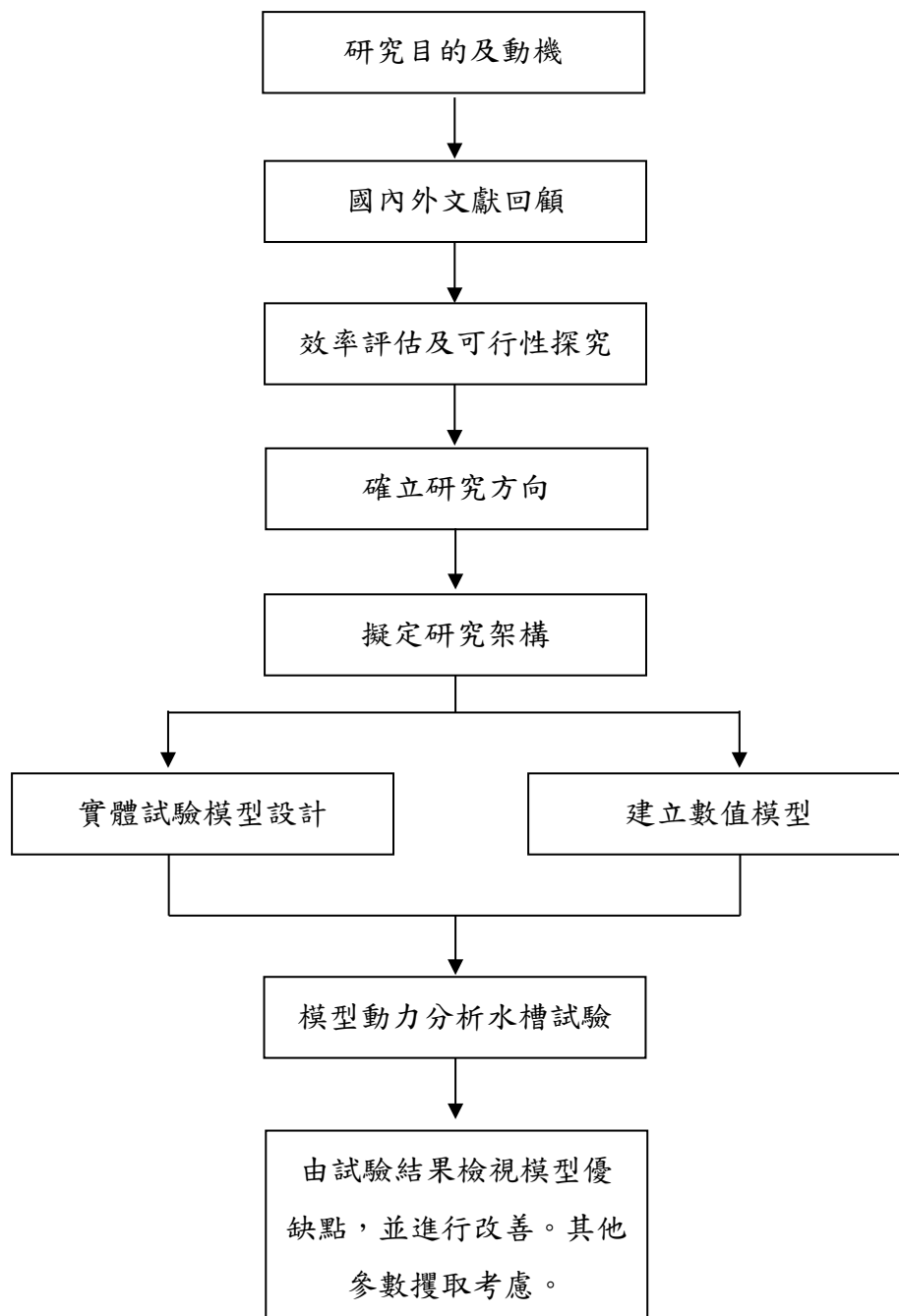


圖 1.3 計畫研究流程圖

第二章 太陽能與風能及其於港灣應用分析

2.1 綠色能源簡介

所謂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。因此、本章將以前階段研究之成果，針對太陽能及風能於臺灣各大港區應用之可行性作一較為綜合性之整理。

2.2 太陽能之發展與應用現況

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，對於環境沒有污染，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台站的供電，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，以及太陽能電站並網發電等領域。

太陽能電池的使用可追溯至 1960 年代始，美國就將太陽能電池應用於人造衛星作為部份能量來源，之後更轉往發展成民生用途上。而目前除了歐美及日本以外，世界其他國家包括臺灣及中國大陸等也開始大量使用太陽能裝置，尤其日本及最近中國大陸於太陽能的發展上更是不遺餘力，除政府有補助獎勵辦法，民間也有許多企業贊助開發。

2.3 太陽能電池介紹

2.3.1 太陽能電池發電原理

太陽電池(solar cell)是以半導體製程的製作方式做成的，其發電原理是將太陽光照射在太陽電池上，使太陽電池吸收太陽光能透過圖中的 p-型半導體及 n-型半導體使其產生電子(負極)及電洞(正極)，同時分離電子與電洞而形成電壓降，再經由導線傳輸至負載。如圖 2.1 所示。

簡單的說，太陽光電的發電原理，是利用太陽電池吸收 $0.2\mu\text{m}\sim 0.4\mu\text{m}$ 波長的太陽光，將光能直接轉變成電能輸出的一種發電方式。

由於太陽電池產生的電是直流電，因此若需提供電力給家電用品或各式電器則需加裝直/交流轉換器，將直流電轉換成交流電，才能供電至家庭用電或工業用電。

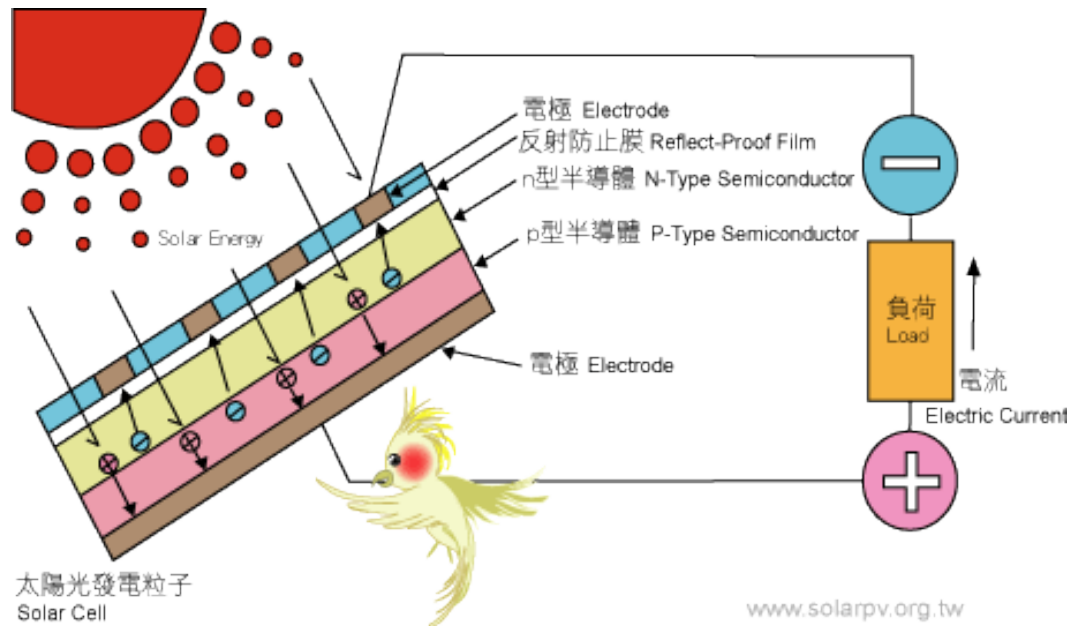


圖 2.1 太陽電池構造圖

(資料來源：太陽光電資訊網)

2.3.2 太陽能電池種類

目前太陽能電池技術主要分為晶片型(Wafer-Based) 與薄膜型(Thin-Film)太陽能電池。詳細如表 2.1 所示。晶片型太陽能電池應用最普遍的為多晶矽，以三五族為基板材料之太陽能電池。薄膜型太陽能電池是在基板上沉積一層厚度小於 $1\mu\text{m}$ 的薄膜(多晶矽、非晶矽或三五族材料)。各種不同組態太陽能電池示意圖及外觀顯示如圖 2.2 及 2-3。

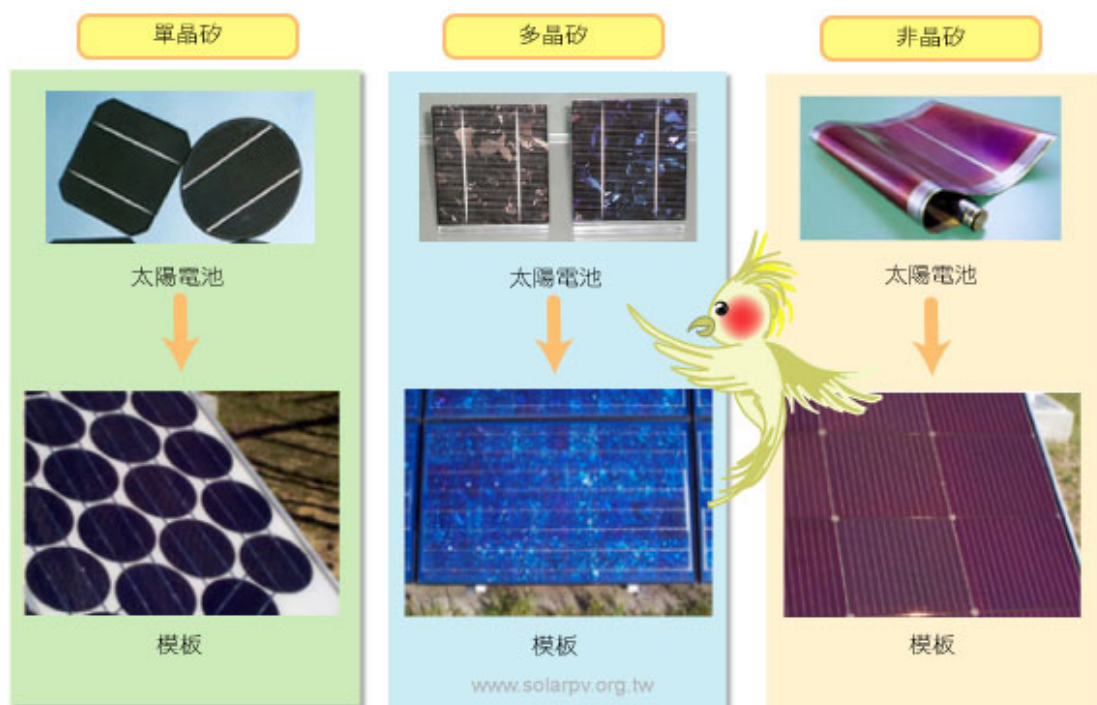


圖 2.2 太陽能電池外觀圖

(資料來源：太陽光電資訊網)

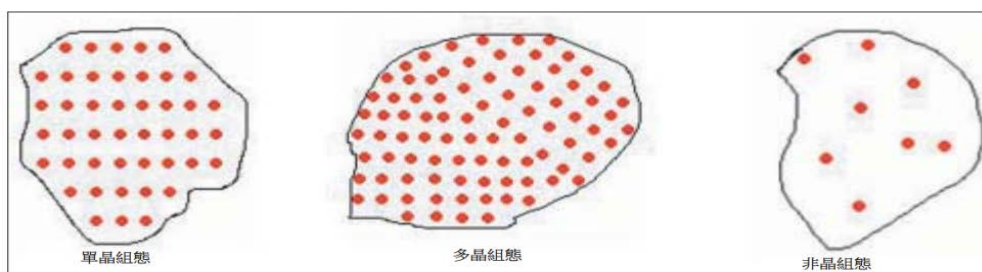


圖 2.3 各種不同組態太陽能電池示意圖

(資料來源：太陽光電資訊網)

表 2.1 太陽能電池種類			
種類	使用之材料與技術		能量擷取率
晶片型太陽能電池	單晶矽		12~20%
	多晶矽		10~18%
	非晶矽		6~9%
薄膜型太陽能電池	薄膜矽技術		7~8.5%
	化合物半導體技術	III-V 族（聚光型太陽能電池）	26~28%
		II-VI 族（CIGS、CdTe）	10~20%
	新興材料技術	有機電池	8.5%
		球狀矽技術	11.7%
		染料敏化電池	12%
		串疊型電池	39%

2.3.3 晶片型太陽能電池

1. 單結晶矽太陽能電池

單晶矽電池最普遍，多用於發電廠、充電系統、道路照明系統及交通號誌等，所發電力與電壓範圍廣，能量擷取率高，使用年限長，世界主要大廠，如德國西門子、英國石油公司及日本夏普公司均以生產此類單晶矽太陽能電池為主要，市場佔有率約五成，光電能量擷取率最高（12%~20%）。

2. 多結晶矽太陽能電池

多晶矽電池的效率較單晶矽低，但因製程步驟較簡單，成本亦較低廉，較單晶矽電池便宜 20%，效率略差（10%~18%），因此一些低功率的電力應用系統均採用多晶矽太陽能電池。

3.非結晶矽太陽電池

因為非晶矽對光的吸收性比矽強約 500 倍，所以只需要薄薄的一層 (300 nm)就可以將光子的能量有效地吸收，且不需要使用昂貴的結晶矽基板或是金屬等基板，如此不僅可以節省大量的材料成本，也使得製作大面積的太陽電池成為可能。成本便宜，效率較差（6%~9%），且容易造成裂質化。可直接鍍在玻璃及塑膠上面，與建築物可做最佳結合。

2.3.4 薄膜太陽能電池

1.薄膜矽太陽能電池

多結晶矽太陽能電池的基板厚度約 200~300 μm ，而薄膜矽太陽能電池為 2~3 μm 。新構造的薄膜矽太陽能電池是由非晶矽薄膜與結晶矽薄膜層壓而成。可高效地吸收波長在 600nm 以上的太陽光。矽薄膜太陽能電池所使用的矽原料量，約為結晶類太陽能電池的 1/100 左右。其製程連續又可大面積製造，加上光譜吸收範圍廣，儘管轉換效率約（7 ~ 8.5%），是最有機會挑戰每瓦 1 美元市電成本的太陽能電池。

2.III-V 族（俗稱三五族）化合物半導體

三五族太陽能電池，或稱聚光型太陽能電池，具有遠高於矽晶太陽能電池的轉換效率，同時也有薄膜電池的可撓性，大到電廠、小至消費性電子的應用都有。三五族太陽能電池是以在單晶矽基板上，以化學氣相沉積法成長砷化鎵薄膜，所製成的薄膜太陽能電池，很早就應用在人造衛星的太陽能電池板上，具有可吸收光譜範圍極廣，轉換效率可達（26% ~ 28%），且壽命較其他種類太陽能電池長，性質穩定的優點。但其材料成本高，量產困難度高。

3.聚光型太陽能電池

使用透鏡將光聚集到狹小的面積上來提高發電效率。聚光型太陽電池假如使用聚光倍率為 1000 倍的透鏡時，單位模組的太陽能電池單元的成本可降至結晶矽類電池單元的 1/10 左右，而所需的面積僅矽晶圓的 1/2.5。但必須搭配使用太陽追蹤系統。

4.II-VI 族化合物半導體

CdS,碲化鎘 CdTe 的成本便宜。CuInSe₂ 的光吸收係數大，轉換效率可達 18%~20%。CIGS 為直接能隙材料，比非晶矽具有更高的吸光係數。轉換效率最高可達 19.2%，一般商用模組則可達 10~12%。具有高轉換效率及低材料成本的優點，成為業界關注焦點之一。未來幾年，CIGS（銅銦鎳碲）薄膜太陽能電池的銷售將會加速增長，到 2015 年，CIGS 將佔薄膜太陽能電池市場的 43.3%。

5.有機太陽能電池

有機光伏選用分子來吸收太陽能，有機太陽能電池的設計和開發可以比普通的晶體矽太陽能電池纖薄 1000 倍，從而將材料的使用降至最低。在太陽能電池方面，三菱化學通過有望大幅降低製造成本的有機薄膜太陽能電池，實現了 8.5%的轉換效率，刷新了全球最高值。

6.球形矽太陽能電池

製造時讓矽以點滴的方式落下形成球狀的快速凝固。球形矽太陽能電池的矽使用量只有多晶矽太陽能電池的 1/5-1/7。目前的轉換效率約 11.7%。Solarfan 採用了四塊聚光型球形矽太陽能電池板，可以通過 USB 接口為數位產品進行充電，在陽光下準備 10 分鐘可以為手機充入約進行 3 分鐘通話的電量。

7.染料敏化太陽能電池

染料敏化太陽能電池（Dye-sensitized solar cell，DSSC）是最近被開發出來的一種嶄新的太陽電池。DSSC 也被稱為格雷策爾電池，因

為是在 1991 年由格雷策爾等人發明的構造和一般光伏特電池不同，其基板通常是玻璃，也可以是透明且可彎曲的聚合箔(polymer foil)，玻璃上有一層透明導電的氧化物(transparent conducting oxide, TCO) 通常是使用 FTO($\text{SnO}_2\text{:F}$)，於上長有一層約 10 微米厚的 porous 奈米尺寸的 TiO_2 粒子(約 10~20 nm)形成一 nano-porous 薄膜。然後塗上一層染料附著於 TiO_2 的粒子上。通常染料是採用 ruthenium polypyridyl complex。上層的電極除了也是使用透明導電層和 TCO 外，也鍍上一層鉑當電解質反應的催化劑，二層電極間，則注入填滿含有 iodide/triiodide 電解質。雖然目前 DSSC 電池的最高能量擷取率約在 12% 左右，但是製造過程簡單，所以一般認為降低生產成本會更多，能用更低的成本提供同樣的發電量。

8. 串疊型電池

串疊型電池(Tandem Cell)屬於一種運用新穎原件結構的電池，藉由設計多層不同能隙的太陽能電池來達到吸收效率最佳化的結構設計，紅光和藍光區域的光譜會分別由兩個電池來吸收。以增加 QE 的能量擷取率。目前由理論計算可知，如果在結構中放入越多層數的電池，將可把電池效率逐步提升，甚至可達到 50% 的能量擷取率，但串疊型電池的技術困難處在於它必須要做到電流匹配 (current match)，因為上下兩層電池產生的電流串聯時，會以電流於較小的那一顆電池為主。此種高聚光太陽光發電(High Concentration Photovoltaic, HCPV)技術由於具有發電效率高、溫度係數低及最有降低發電成本的潛力等優勢，近年來逐漸受到國際的重視。例如在臺灣，核能研究所利用 MOCVD 磊晶生長的方法進行堆疊式單體型 InGaP/GaAs/Ge 三接面太陽電池磊晶片的開發與太陽電池元件製程，所完成的太陽電池在 128 個太陽條件下，最佳能量能量擷取率為 39.07 %。依據聚光型太陽光發電協會(CPV Consortium)資料顯示，聚光型太陽光發電的全球市場將以 145% 年複合成長率向上增長，預估至 2015 年之安裝量將達 1.8 GW。

2.4 太陽能發電適用於各港口概略分析

2.4.1 分析方法及步驟說明

臺灣四面環海，因此建造了許多商港與漁港等大大小小的港口，尤其以臺灣四大港：基隆港、臺中港、高雄港以及花蓮港最具代表性，而港區用電為 24 小時故其用電量非常大，若引進綠色能源，既能節省各港的用電成本，以及對愛護地球盡一份力，故此分析中便挑選了這四大港口，作為初步研究之對象。

初步的構想為將太陽能板架設在港區內可以利用之建築物的屋頂上，以達到最佳吸收太陽輻射的效率。而要裝設於屋頂上，就需要計算各港屋頂面積，但因為本計畫僅屬於構想階段，無法進行現地調查，因此本計畫使用 GIS 軟體計算屋頂面積，以高雄港為例，過程大致如下：

先從 Google Earth 上將高雄港的衛星圖截取下來，而為了獲得足夠看清楚屋頂的解析度，不能直接擷取整個港區衛星圖，必須先拉近到足夠看清楚屋頂的距離，然後分很多張擷取下來，再利用 PhotoShop 軟體將這些圖整合成一個高雄港區圖(如下圖 2.4)，然後在 GIS 軟體裡，利用高雄港底圖將整合過的高雄港區圖座標化，再利用軟體裡的計算面積的工具，將屋頂一一框起來，便能計算高雄港區內建築物屋頂的總面積，再將一些已裝設其他裝置的屋頂去除掉，便可粗略得到可裝設太陽能板的屋頂面積。

裝設面積有了以後，接下來就要估算出裝設成本以及預期的發電量，本計畫中是利用中央技術研究院的太陽能光電資訊網裡的相關資料去估算，並放上各港日照時間表以作參考及比對，詳細內容在 2.3.2 節及 2.3.4 節有介紹。



圖 2.4 合成後之高雄港區圖

2.4.2 太陽能發電系統設置條件

1. 根據太陽能光電資訊網，設置太陽光電系統時應考慮設置地點與面積：1峰瓩*(kWp)太陽光電系統所需使用設置面積約為10平方公尺。
(峰瓩：大約是正中午時的陽光照射量下的太陽電池輸出功率。即約在攝氏25度時，以 $1,000\text{W/m}^2$ 強度的陽光，光譜為AM1.5的照射，可輸出1瓩電力之太陽電池容量，稱為1峰瓩。)
2. 材料選用部分，現今以「多晶矽」太陽能板為大宗，故本計畫中先行以此種類太陽能板設置試算之。
3. 根據太陽能光電資訊網，並聯型系統1峰瓩(kWp)設置成本約新台幣25萬元，平均一天發3度電以上，系統耐用年限20年以上。但此資料已為幾年前資訊，如民國98年於屋頂上安裝太陽能板，成本即為新台幣23萬元/kWp，之後由於歐洲經濟體許多負債國發生經濟崩跌，而導致太陽能設置主要國家補貼政策的取消，也導致太陽能板價格的大幅滑落。
4. 本計畫以最近的成本估算約為新台幣8萬元/kWp，主要參考資料如

下：

(1) 經濟部能源局推動「陽光屋頂百萬座」計畫，於102年年初調查價格（屋頂型）：7~11萬/kWp。

(2) 依標案名稱調查最近得標資料（請參照表2.2）

(3) 根據裝設太陽能板於國立中山大學海工館的廠商粗估，成本為新台幣8萬元/kWp，但是此數字為粗略估計，還需根據裝設的系統種類調整價格。

5. 發電量會因日照量變動，其他如光電板體積塵、太陽電池效率、溫度、電力迴路、蓄電池、轉換器等因素也會造成發電量下降，故需要乘上一個折減係數，一般慣例取0.7代入即可。(歐等，2008) ^[3]

表 2.2 依標案名稱調查最近得標資料(未知實際標案內容)

標案名稱	採購屬性	決標日期	採購機關	設置容量(kWP)	金額(元)	元/kWp
T-102149 20.16KW 太陽能發電系統組	財物	102.06.06	清華大學	20.16	1,120,000	55,556
K015014 6kW 太陽發電系統	財物	102.05.20	崑山科技大學	6	715,000	119,167

（資料來源：裝設太陽能板於國立中山大學海工館之廠商提供）

2.4.3 四大港設置太陽能條件

1. 基隆港（港區圖請參照圖2.5）

- (1) 港區總面積：572 公頃（陸域面積 196 公頃；水域面積 376 公頃）
[4]

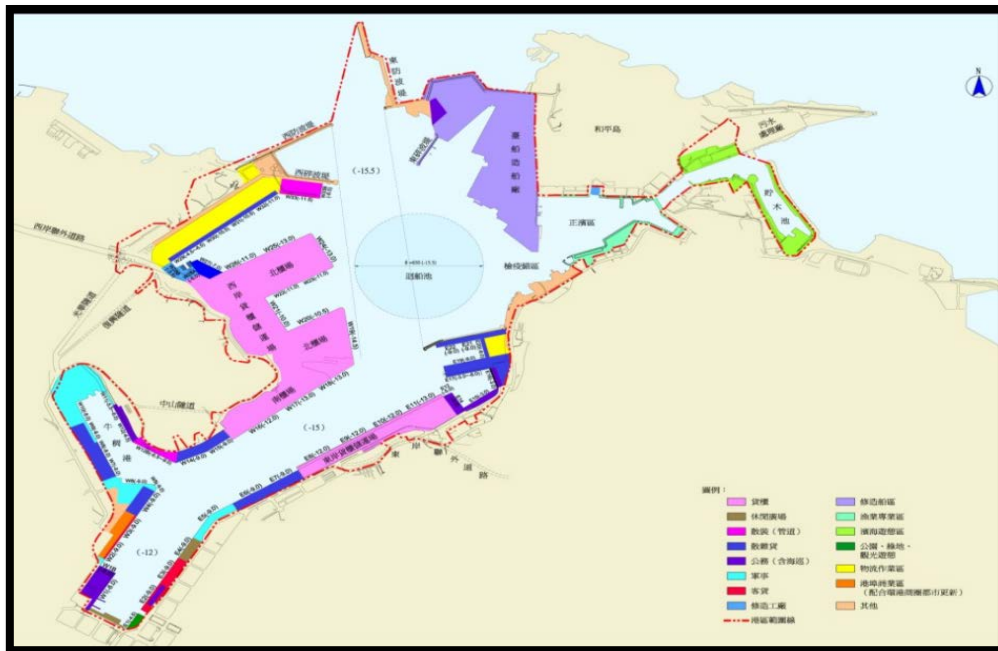


圖 2.5 基隆港區圖

（資料來源：臺灣港務股份有限公司網站）

- (2) 港區內有建築物屋頂覆蓋面積約為 26 萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為 19 萬平方公尺。）

表 2.3 基隆近五年日照時間（單位：小時）						
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	平均
基隆	1364.2	1473.4	1657.4	1173	1276.2	1388.8

- (3) 港區所在地區之年日照時間（請參照表 2.3）^[5]

2. 臺中港（港區圖請參照圖2.6）

- (1) 港區總面積：3793 公頃（陸域面積 2820 公頃；水域面積 973 公頃）

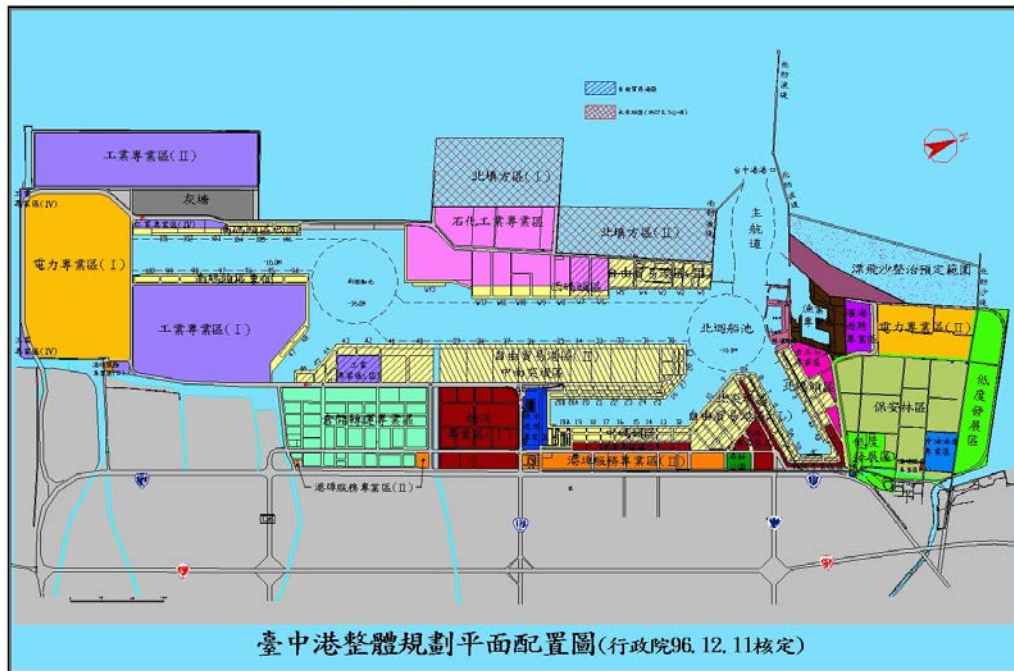


圖 2.6 臺中港區圖

（資料來源：中央氣象局 2008-2012 年氣象監測報告）

- (2) 港區內建築物屋頂覆蓋面積約為 126 萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為 76 萬平方公尺。）
- (3) 港區所在時間之年日照時間（請參照表 2.4）

表 2.4 臺中近五年日照時間（單位：小時）						
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	平均
臺中	1952.8	2094	1886.1	1842.1	1795.6	1914.1

（資料來源：中央氣象局2008-2012年氣象監測報告）

3. 高雄港（港區圖請參照圖2.7）

(1) 港區總面積：17678 公頃(陸域 1442 公頃；水域面積 16236 公頃)



圖 2.7 高雄港區圖

（資料來源：臺灣港務股份有限公司網站）

(2) 港區內建築物屋頂覆蓋面積約為 136 萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為 96 萬平方公尺。）

(3) 港區所在地區之年日照時間（請參照表 2.5）

表 2.5 高雄近五年日照時間（單位：小時）						
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	平均
高雄	2282.5	2523.1	2378.4	2136.7	2255.4	2315.2

（資料來源：中央氣象局2008-2012年氣象監測報告）

4. 花蓮港（港區圖請參照圖2.8）

- (1) 港區總面積：308 公頃（陸域面積 172 公頃；水域面積 136 公頃）



圖 2.8 花蓮港區圖

（資料來源：臺灣港務股份有限公司網站）

- (2) 港區內建築物屋頂覆蓋面積約為 10 萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為 8.1 萬平方公尺。）
- (3) 港區所在地區之年日照時間（請參照表 2.6）

表 2.6 花蓮近五年日照時間（單位：小時）						
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	平均
花蓮	1630.9	1773.2	1677.2	1473.2	1433.9	1597.7

（資料來源：中央氣象局2008-2012年氣象監測報告）

2.4.4 預期發電量與成本估算

根據設置條件與太陽能光電資訊網裡的太陽光電效益概算機（網址：<http://solarpv.itri.org.tw/memb/powercalc.aspx>）計算，估算各港的預估發電量以及大約裝設成本。

計算公式說明：

- ✓ 年發電量（度）＝ 設置容量kWp × 民國99年各縣市日平均發電度數 × 365天）
- ✓ 成本：新台幣8萬元//kWp （詳細請參考2.3.2節）

1. 基隆港

可裝設之屋頂面積為19萬平方公尺，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 kWp*8萬元/kWp=**15.2億元**。

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 kWp*8萬元/kWp=**60.8億元**

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 kWp*8萬元/kWp =**76.8億**

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 kWp*8萬元/kWp =**6.4億元**。

將上述各港的所有資料整理後，並計算出各港之太陽能板發十萬度電的裝設成本，如表2.7所示，可得知年平均日照時間越長的地區，裝設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 2.7 各港資料綜合表

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公頃	19萬平方公尺	1388.8小時	1087萬度	15.2億元	1398萬元
臺中港	3793公頃	76萬平方公尺	1914.1小時	6369萬度	60.8億元	954.6萬元
高雄港	17678公頃	96萬平方公尺	2315.2小時	8290萬度	76.8億元	926.4萬元
花蓮港	308公頃	8.1萬平方公尺	1597.7小時	559萬度	6.4億元	1144.9萬元

2.5 風能之發展與應用現況

2.5.1 風能的發展

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。

^[6]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。

2.5.2 風能之優點及缺點評估

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；風能之空氣汙染及碳排放低；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。

2.5.3 臺灣目前風能發展現況

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）^[7]。

表 2.8 世界各國風力發電機組目前累積裝置容量

排名	國家	目前累積裝置容量	排名	國家	目前累積裝置容量
1	中國	62,733	14	荷蘭	2,328
2	美國	46,919	15	澳洲	2,224
3	德國	29,603	16	土耳其	1,799
4	西班牙	21,674	17	愛爾蘭	1,631
5	印度	16,084	18	希臘	1,629
6	法國	6,800	19	波蘭	1,616
7	義大利	6,747	20	巴西	1,509
8	英國	6,540	21	奧地利	1,084
9	加拿大	5,265	22	比利時	1,078
10	葡萄牙	4,083	23	墨西哥	873
11	丹麥	3,871	24	紐西蘭	622
12	瑞典	2,970	25	台灣	564
13	日本	2,501	26	南韓	407

（資料來源：Global Wind Energy Council）

再生能源的發展是事在人為，臺灣仍有空間得以讓再生能源發揮。而風電發展遲緩的原因有許多，其中有人認為係因臺灣的電價低廉（低於天然氣發電），因此發展風電的誘因不足，再加上台電收購天然氣的

單價高於風力發電收購電價，使得風力發電的投資漸少。但最主要的原因應該為政府的能源政策不明確，且大部分為台電在主導，在各種人事包袱及老舊管理思維下之決策能否應付快速之競爭，實令人憂心。表 2.9 為臺灣及其他各國對於風力發電之獎勵電價之比較表，相對於其他國家有些高達兩倍多，臺灣則與平均售價相當，可說完全無獎勵性可言。

臺灣各風力發電場址發電機機型、數量及發電量條列於表 2.10 中。其中風機發電量較大且風機數量相對較多的區域大部分集中於西南沿海地區，如王功、雲林麥寮、觀園、臺中港及彰濱工業區。發電瓦數最高為 2300kW，同一區域數量則可達 20 餘部風機。圖 2.9 為風機設於石門風力場址、圖 2.10 為風機設於觀園風力場址、圖 2.11 為風機設於澎湖中屯風力場址、圖 2.12 則為風機設於雲林麥寮風力場址情形。

表 2.9 臺灣及其他各國對於風力發電之獎勵電價表		
	年平均售價(台幣/度)	風電收購價格(台幣/度)
臺灣	2.6	2.6138
韓國	1.91	3.1
泰國	2.22	5.8
中國大陸	1.95	2.94
加拿大	2.56	4.1
瑞典	2.03	3.5

(資料來源：英華威網站)

表 2.10 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)

表 2.11 各風力發電機介紹

機型	切入氣流速度 (m/s)	額定氣流速度 (m/s)	切出氣流速度 (m/s)
Vestas-V47(660W)	4	15	25
Vestas-V80(2000kW)	4	16	25
Gamesa-G80(2000kW)	4	15	25
Enercon-E40(600W)	2.5	12.5	28-34
Enercon-E44(900kW)	3	12	28-34
Enercon-E70(2300kW)	2	15	28-34
Zephyros-Z72(2000kW)	3	13	25
GE 1.5s-(1500kW)	4	13	25
切入氣流速度：風電機組開始發電時，輪轂高度處的最低氣流速度。 額定氣流速度：風電機組達到額定功率輸出時輪轂高度處的設計氣流速度。 切出氣流速度：風電機組保持額定功率輸出時，輪轂高度處的最高氣流速度。			

(資料來源：臺灣電力公司網站)



圖 2.9 石門風力場址
(資料來源：臺灣電力公司網站)



圖 2.10 觀園風力場址
(資料來源：臺灣電力公司網站)



圖 2.11 澎湖中屯風力場址
(資料來源：臺灣電力公司網站)



圖 2.12 雲麥風力場址
(資料來源：臺灣電力公司網站)

2.6 風能發電適用於各港口概略分析

2.6.1 簡介

風力發電機分為大型風力發電機及小型風力發電機，由於大型風力發電機機組體積十分龐大，再加上必須選擇風能非常良好的空曠地區，大部分設置於沿海、平原及離島地區，在土地面積的條件下有其發展的限制。相較於大型風力發電機，中小型風力機的應用範圍更廣，產生的壓迫感較小，安裝上也較為容易，因此在近年來漸漸地受到了重視。

由於各國環境條件的不同，目前國際間對於中小型風力發電機的定義有很多種，以美國的定義來說，單機容量單機容量 100kW 以下為「小型風力機」，100kW~600kW 為「中型風力機」。

在這次的計畫中，由於港灣空地位置均有貨物堆置貨運輸交通等用途，因此、必須將風力發電機架設於屋頂或相關之建築，若採用了小型的風力發電機來輔助發電，所需的空間比較小。若進一步以垂直軸的風力發電機，產生的噪音也不會那麼大，在國外亦大都直接裝在屋頂上。中小型風力機可滿足偏遠地區、家庭用電、交通號誌、路燈、通訊設備、遊艇等用電需求，可自成獨立供電網路，亦可與市電系統相接。

研究時從本所港研中心的網站上取得了臺灣四大港口幾年內的氣流速度資料，以港口之歷年各級氣流速度概率搭配各家廠商所提供之功率氣流速度曲線圖來估計各港口之發電量。本計畫中計畫將小型風力發電機架設在港口的沿海地帶以及建築物屋頂上，這樣能減少一些建築物的阻隔，氣流速度不受影響較能穩定的發電。而沿海地帶的路徑長是由 Google Earth 概略估算之，再扣除一些從 Google Earth 上可明顯看出有地形、建築障礙問題的路徑長即可得到。初步規劃每 100 公尺裝設一台風力發電機(100 公尺是在考慮到各小型風力發電機之間不會太緊密造成過度裝設，同時也不會太鬆散造成發電量縮小的一個概

估值)，架設在屋頂上的數量亦是由 Google Earth 去估算總面積，再分為兩種算法去計算出架設的風機數量，搭配氣流速度資料以及小型風力發電機之功率氣流速度曲線圖來估算出每台小型風力發電機可產生的電量，又由各港口所裝設的風機數量來估計每年各港口可發電的總量。

2.6.2 小型風力發電機介紹

表 2.12、2-13 為網路上有提供產品規格之公司的小型風力發電機，圖 2.13 到圖 2.18 為兩間公司各型號之功率氣流速度曲線圖，我們從圖中可以尋找每種小型風力發電機在各種氣流速度時所對應能發電功率，以圖 2.13 為例，此圖為新高能源科技股份有限公司中 DS-300 型號之功率氣流速度曲線圖，我們可以由圖 2.13 到 2-18 進而整理出表 2.14，再對應各港口各級的氣流速度概率去估算出港口的發電量。

表 2.12 新高能源科技股份有限公司小型風力發電機				
產品編號	DS-300	DS-700	DS-1500	DS-3000
額定功率	300W	700W	1500W	3000W
切入氣流速度	3m/s	3m/s	3m/s	3m/s
額定氣流速度	13.5 m/s	12 m/s	12 m/s	12 m/s
切離氣流速度	15.5 m/s	15 m/s	15 m/s	15 m/s
可承受極限氣流速度	60 m/s	60 m/s	60 m/s	60 m/s

（資料來源：新高能源科技股份有限公司網站）

表 2.13 特力寶科技有限公司小型風力發電機		
產品編號	1kW VAWT	4KW VAWT
額定功率	1000W	4000W
切入氣流速度	3m/s	3.5m/s
額定氣流速度	12 m/s	12 m/s
切離氣流速度	30m/s	30 m/s
可承受極限氣流速度	55 m/s	55 m/s

(資料來源：特力寶科技股份有限公司網站)

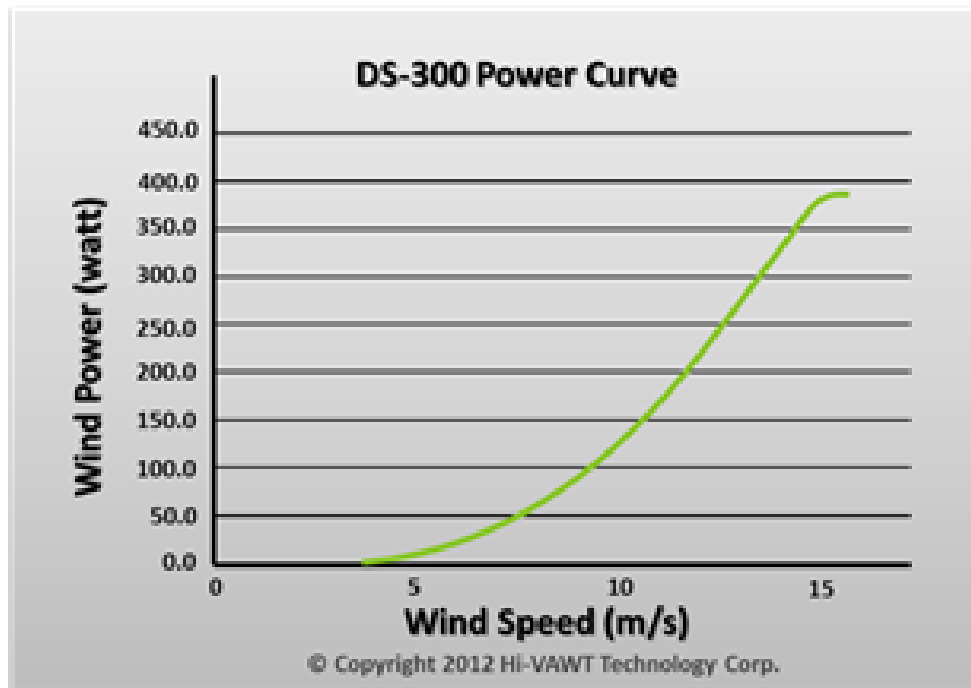


圖 2.13 DS-300 功率氣流速度曲線圖

(資料來源：新高能源科技股份有限公司網站)

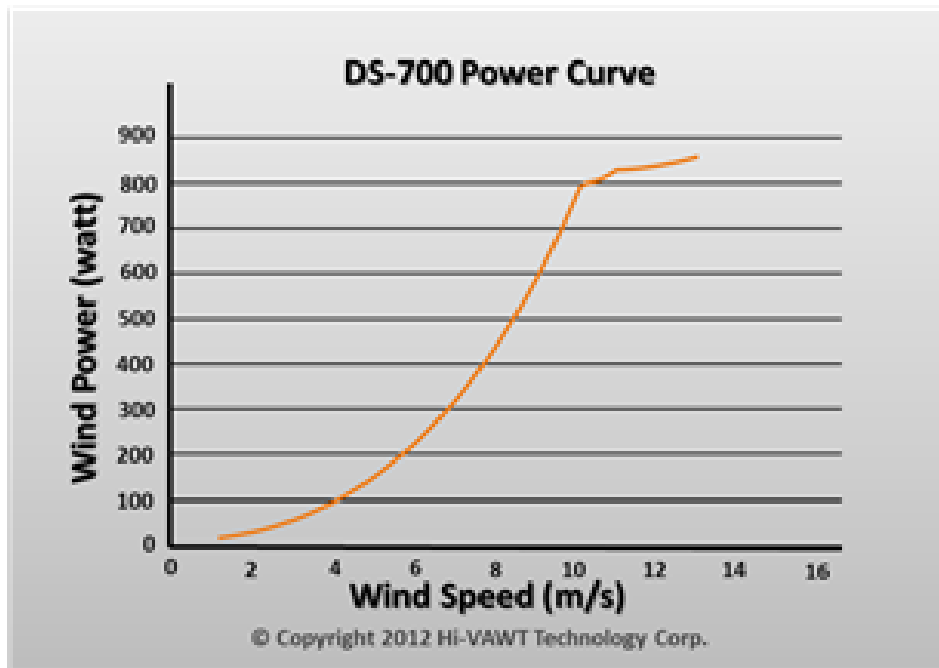


圖 2.14 DS-700 功率氣流速度曲線圖
(資料來源：新高能源科技股份有限公司網站)

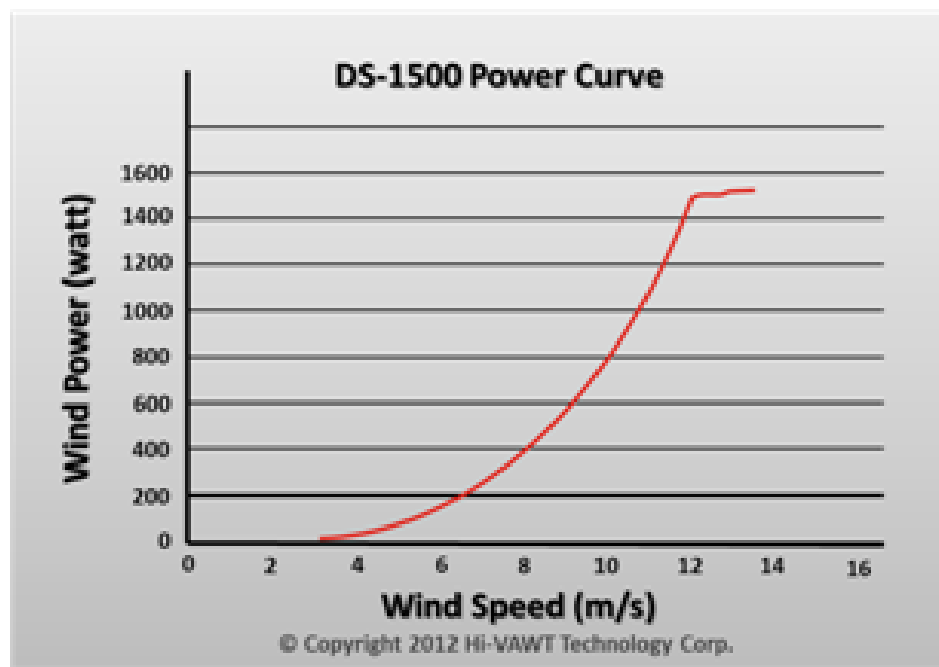


圖 2.15 DS-1500 功率氣流速度曲線圖
(資料來源：新高能源科技股份有限公司網站)

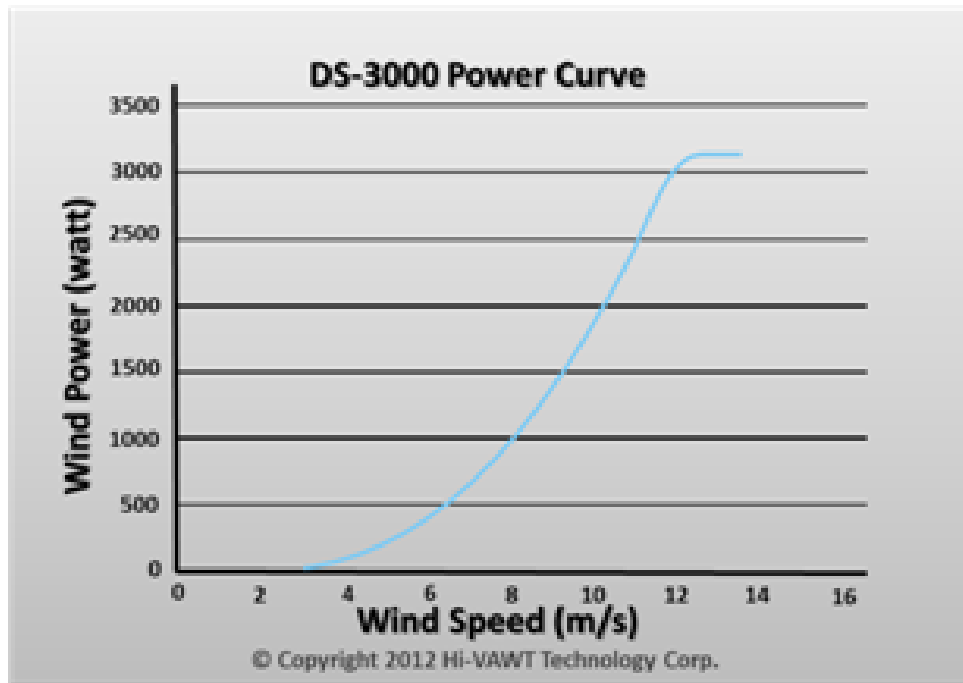


圖 2.16 DS-3000 功率氣流速度曲線圖

(資料來源：新高能源科技股份有限公司網站)

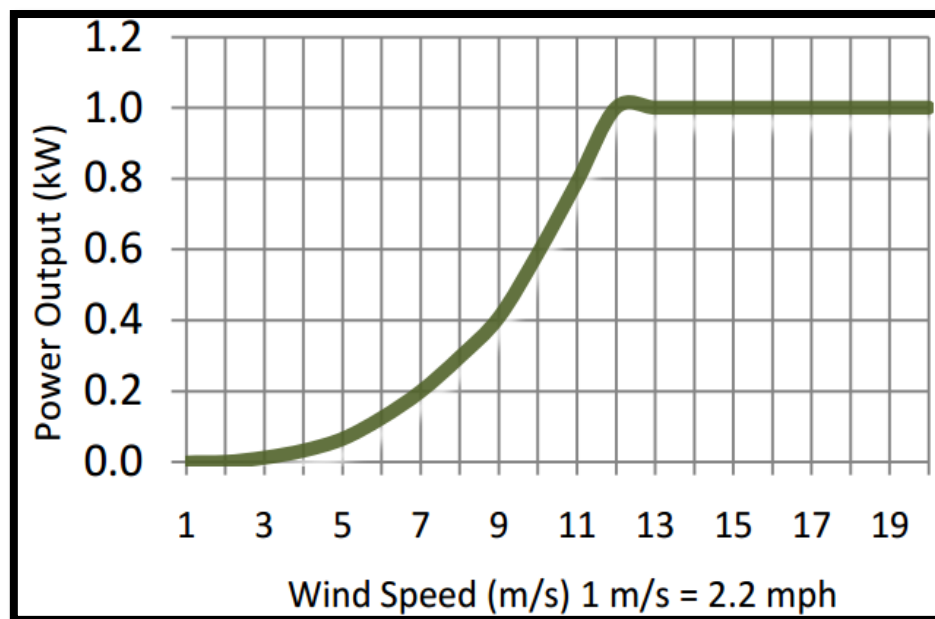


圖 2.17 1kW VAWT 功率氣流速度曲線圖

(資料來源：新高能源科技股份有限公司網站)

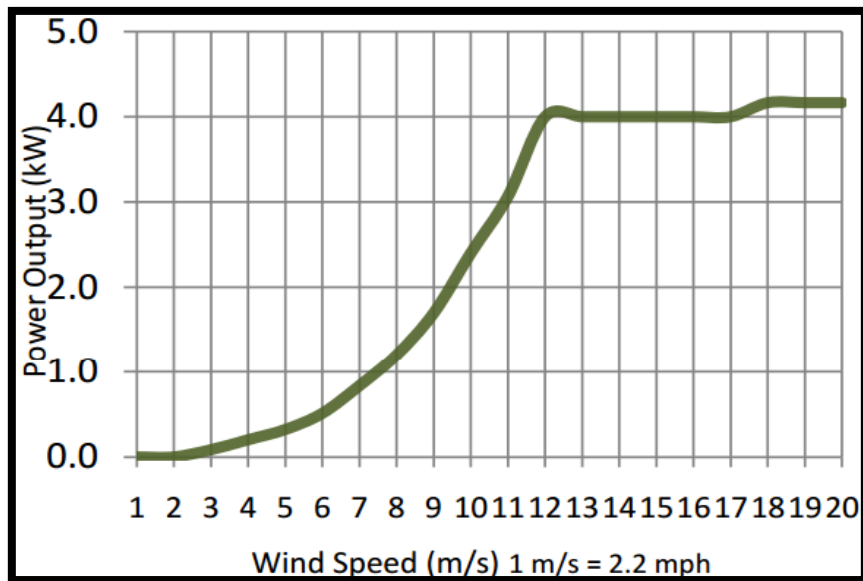


圖 2.18 4KW VAWT 功率氣流速度曲線圖

(資料來源：新高能源科技股份有限公司網站)

表 2.14 各型號風機在不同氣流速度所對應之功率(W)

氣流 速度 型號	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	18 m/s	20 m/s	30 m/s
DS-300	-	-	10	25	40	65	130	225	340	-	-	-	-
DS-700	65	100	150	235	325	450	750	845	0	-	-	-	-
DS-1500	0	35	85	165	265	400	800	1520	1540	-	-	-	-
DS-3000	-	110	250	420	700	1000	2000	3055	3110	-	-	-	-
1kW VAWT	-	40	70	130	200	300	600	1000	1000	1000	1000	1000	-
4kW VAWT	75	230	330	530	870	1190	2430	4000	4000	4000	4000	4000	-

2.6.3 臺灣四大港口風力發電適用分析

(1) 基隆港：

表 2.15 基隆港歷年各級氣流速度概率																
氣流速度 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	12.7	22.7	18.5	12.9	9.9	7.9	6.1	4.4	3.5	1.1	0.3	0.1	0	0	0	0

(資料來源：本所港研中心)

由基地資料(請參照表 2.15)估算出各級氣流速度每年所佔之時數，搭配不同機台之功率(請參照表 2.12, 2-13)可計算出每年每台風機在基隆港可產生的電量如表 2.16，而基隆港近幾年的最高氣流速度為 26.9m/s，亦在小型風力發電機可承受的範圍之內。

表 2.16 基隆港每年各型號風機每一台可發電量	
風機型號	發電量(度)
DS-300	77.0
DS-700	747.3
DS-1500	532.7
DS-3000	1369.5
1kW VAWT	414.5
4kW VAWT	1870.3

由 google earth 粗略估計得知，基隆港之屋頂面積為 19 萬平方公尺，將估算方法分為兩種：(1).基隆港的屋頂數量為 158 座，平均每座屋頂大約為 1202.5 平方公尺，假設每座屋頂皆為邊長 34.7 平方公尺的正方形，將小型風力發電機以每 10 公尺裝設一台的方式裝在屋頂的四周邊緣，我們每個屋頂可以裝設 8 台，整個基隆港總共能裝設 1264 台

小型風力發電機；(2). 將屋頂總面積想成一個大屋頂，每兩百平方公尺架設一座風力發電機，總共可以裝設 950 台。

而裝設在海岸線的部分，由 google earth 粗略估計得知，基隆港沿著海岸邊之路徑總長扣除一些明顯建築、地形問題估略為 8503 公尺，為了避免影響港邊作業，假設每 100 公尺裝設一台小型風力發電機，總共可以裝設 85 台，加上裝設在屋頂上的總共為(1)1349 台或(2)1035 台。將此帶入表 2.16 可得到基隆港各種型號之風機一年可發之總電量如表 2.17 所示。

表 2.17 基隆港每年各型號風機可發總電量		
風機型號	算法一總發電量(百萬度)	算法二總發電量(百萬度)
DS-300	0.10	0.08
DS-700	1.00	0.77
DS-1500	0.72	0.55
DS-3000	1.85	1.42
1kW VAWT	0.56	0.43
4kW VAWT	2.52	1.94

臺中港：

表 2.18 臺中港歷年各級氣流速度概率																
氣流速度 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	3.5	16.4	16.7	13	9.4	7.2	5.5	4.9	9.3	6.9	4.3	1.7	0.8	0.3	0.3	0

(資料來源：本所港研中心)

由基地資料（請參照表 2.18）估算出各級氣流速度每年所佔之時數，搭配不同機台之功率(請參照表 2.12, 13)可計算出每年每台風機在

臺中港可產生的電量如表 2.19，而臺中港近幾年的最高氣流速度為 32.6m/s，亦在小型風力發電機可承受的範圍之內。

表 2.19 臺中港每年各型號風機每一台可發電量	
風機型號	發電量(度)
DS-300	302.4
DS-700	1641.9
DS-1500	1886.9
DS-3000	4388.5
1kW VAWT	1480.8
4kW VAWT	6142.9

由 google earth 粗略估計得知，臺中港之屋頂面積為 76 萬平方公尺，將估算方法分為兩種：(1). 臺中港的屋頂數量為 225 座，平均每座屋頂大約為 3377.8 平方公尺，假設每座屋頂皆為邊長 58.1 平方公尺的正方形，將小型風力發電機以每 10 公尺裝設一台的方式裝在屋頂的四周邊緣，每個屋頂可以裝設 16 台，整個臺中港總共能裝設 3600 台小型風力發電機；(2). 將屋頂總面積想成一個大屋頂，每兩百平方公尺架設一座風力發電機，總共可以裝設 3800 台。

而裝設在海岸線的部分，由 Google Earth 粗略估計得知，臺中港沿著海岸邊之路徑總長扣除一些明顯建築、地形問題估略為 12945 公尺，為了避免影響港邊作業，假設每 100 公尺裝設一台小型風力發電機，總共可以裝設 129 台，加上裝設在屋頂上的總共為(1)3729 台或(2)3929 台。將此帶入表 2.19 可得到臺中港各種型號之風機一年可發之總電量如表 2.20 所示。

表 2.20 臺中港每年各型號風機可發總電量

風機型號	算法一總發電量(百萬度)	算法二總發電量(百萬度)
DS-300	1.13	1.19
DS-700	6.12	6.45
DS-1500	7.04	7.41
DS-3000	16.36	17.24
1kW VAWT	5.52	5.82
4kW VAWT	22.91	24.14

(2) 高雄港：

表 2.21 高雄港歷年各級氣流速度概率

氣流速度 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	23.7	26.8	22.3	14.1	6.9	3	1.5	0.8	0.6	0.2	0.1	0	0	0	0	0

(資料來源：本所港研中心)

由基地資料(請參照表 2.21)估算出各級氣流速度每年所佔之時數，搭配不同機台之功率(請參照表 2.12, 13)可計算出每年每台風機在高雄港可產生的電量如表 2.22，而高雄港近幾年的最高氣流速度為 19.7m/s，亦在小型風力發電機可承受的範圍之內。

表 2.22 高雄港每年各型號風機每一台可發電量

風機型號	發電量(度)
DS-300	16.4
DS-700	278.0
DS-1500	132.1
DS-3000	350.8
1kW VAWT	108.7
4kW VAWT	589.2

由 google earth 粗略估計得知，高雄港之屋頂面積為 96 萬平方公尺，將估算方法分為兩種：(1). 高雄港的屋頂數量為 202 座，平均每座屋頂大約為 4752.5 平方公尺，假設每座屋頂皆為邊長 68.9 平方公尺的正方形，將小型風力發電機以每 10 公尺裝設一台的方式裝在屋頂的四周邊緣，我們每個屋頂可以裝設 20 台，整個高雄港總共能裝設 4040 台小型風力發電機；(2).將屋頂總面積想成一個大屋頂，每兩百平方公尺架設一座風力發電機，總共可以裝設 4800 台。

而裝設在海岸線的部分，由 Google Earth 粗略估計得知，高雄港沿著海岸邊之路徑總長扣除一些明顯建築、地形問題估略為 17798 公尺，為了避免影響港邊作業，假設每 100 公尺裝設一台小型風力發電機，總共可以裝設 177 台，加上裝設在屋頂上的總共為(1)4217 台或(2)4977 台。將此帶入表 2.22 可得到高雄港各種型號之風機一年可發之總電量如表 2.23 所示。

表 2.23 高雄港每年各型號風機可發總電量

風機型號	算法一總發電量(百萬度)	算法二總發電量(百萬度)
DS-300	0.07	0.08
DS-700	1.17	1.38
DS-1500	0.56	0.66
DS-3000	1.48	1.75
1kW VAWT	0.46	0.54
4kW VAWT	2.48	2.93

(3)花蓮港：

表 2.24 花蓮港歷年各級氣流速度概率

氣流速度 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	5.9	19.4	24.6	18.6	11.8	7.1	4.9	3.3	3.3	0.9	0.2	0	0	0	0	0

(資料來源：本所港研中心)

由基地資料（請參照表 2.24）估算出各級氣流速度每年所佔之時數，搭配不同機台之功率(請參照 2-12, 13)可計算出每年每台風機在花蓮港可產生的電量如表 2.25，而花蓮港近幾年的最高氣流速度為 26.8m/s，亦在小型風力發電機可承受的範圍之內。

表 2.25 花蓮港每年各型號風機每一台可發電量

風機型號	發電量(度)
DS-300	61.5
DS-700	701.4
DS-1500	441.8
DS-3000	1152.1
1kW VAWT	350.0
4kW VAWT	1649.9

由 Google Earth 粗略估計得知，花蓮港之屋頂面積為 8.1 萬平方公尺，將估算方法分為兩種：(1). 花蓮港的屋頂數量為 30 座，平均每座屋頂大約為 2700 平方公尺，假設每座屋頂皆為邊長 51.9 平方公尺的正方形，將小型風力發電機以每 10 公尺裝設一台的方式裝在屋頂的四周邊緣，每個屋頂可以裝設 16 台，整個花蓮港總共能裝設 480 台小型風力發電機；(2). 將屋頂總面積想成一個大屋頂，每兩百平方公尺架設一座風力發電機，我們總共可以裝設 405 台。

而裝設在海岸線的部分，由 Google Earth 粗略估計得知，花蓮港沿著海岸邊之路徑總長扣除一些明顯建築、地形問題估略為 5548 公尺，為了避免影響港邊作業，假設每 100 公尺裝設一台小型風力發電機，總共可以裝設 55 台，加上裝設在屋頂上的總共為(1)535 台或(2)460 台。將此帶入表 2.25 可得到花蓮港各種型號之風機一年可發之總電量如表 2.26 所示。

表 2.26 花蓮港每年各型號風機可發總電量

風機型號	算法一總發電量(百萬度)	算法二總發電量(百萬度)
DS-300	0.03	0.03
DS-700	0.38	0.32
DS-1500	0.24	0.20
DS-3000	0.62	0.53
1kW VAWT	0.19	0.16
4kW VAWT	0.88	0.76

2.6.4 臺灣四大港口風力發電比較

從以上分析中可知，由於各港之風力潛能差別甚大，分析結果顯示，臺中港最適合風能發電，高雄港則最不適合風能發電，高雄港以太陽能發電應用較為可行。基隆港與花蓮港之風能潛力較為接近，但與臺中港相較，仍不足其 1/5 之發電量。

2.6.5 國際離岸風力發展現況

國際間離岸風能的發展緣自 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

施彙整於表一，以茲比較。

若以單機容量來看，2000 年前建造的離岸風場均使用小型機種，從英國 Blyth 離岸風場才開始使用 MW 級的大型機種，目前最大的風機裝置容量為 5MW。在風場規模方面，英國在 Walney (2011)和 Thanet (2010)的離岸風場，其總風機裝置容量分別為 300MW 和 367.2MW，為目前裝置容量最大的兩個商轉離岸風場；丹麥在 Horns Rev II(2009)及 Rødsand II(2010)離岸風場的裝置容量則分居三、四名，其他擁有已商轉離岸風場的國家還有瑞典、荷蘭、芬蘭、比利時、德國及中國大陸。近年來離岸風場發展較積極的國家包括英國、德國及中國大陸，未來陸續將有更大型的離岸風場開發，最為著名的是英國的 London Array(Phase I)，其總風機裝置容量為 630MW，預計於 2012 年完工商轉。目前施工中的英國大型離岸風場開發案共有 6 件，總設置容量超過 2,050MW，並有 8 個規劃中風場開發案，其預估開發總裝置容量高達 31.9GW。

表 2.27 歐洲主要離岸風能發展國家的市場發展概況、發展動力與激勵措施比較

國家	市場發展概況	發展動力與激勵措施
丹麥	➤ 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。	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）。
德國	➤ 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。	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。
英國	➤ 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。	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。

2.6.6 我國離岸風能發展現況

在離岸風力發電技術的研發上，由於國內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「無人觀測平台」、「離岸風機示範工程」及「離岸風能研究實驗場」，並建立抗颱風耐震型離岸風機設置的關鍵技術。

第三章 波浪能之發展與應用

3.1 海洋能之發展與應用現況

3.1.1 海洋能的發展^[9]

地球上海洋面積佔 71%，而陸地僅 29%，海洋蘊藏豐富的資源與能量，所以充份利用海洋的能量，是人類解決能源危機的一個很好的選擇。海洋能主要包括潮汐能、波浪能、洋流能等動能量和海洋溫差能、海水鹽差能、海洋滲透能等，全世界海洋能的蘊藏量很大，且海洋能源是取之不盡用之不竭的可再生能源，但要面臨的問題也相對的複雜，諸如鹽水的高腐蝕性，甚至有些設備需能承受深海的高壓環境等都需仰賴高成本及技術支援。

3.1.2 海洋能源種類^[10]

海洋能源之利用包括各種型式，其中較為普遍的應用有：海洋溫差能及海水鹽差能、潮汐能源、海流能源及波浪能源等，以下則分別介紹之。

1. 溫差能源:海洋溫差能（Ocean Thermal Energy）係指表層和深層海水間的溫差能。海洋溫差發電（Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC）利用熱機循環系統，將海洋溫差能轉換為電力，可全日全年發電，並做為基載電力，且不排放二氧化碳，屬於再生、永續能源。
2. 潮汐能源: 潮汐發電之原理為利用海水潮差驅動水渦輪機來發電。臺灣沿海之潮汐，最大潮差發生在金門、馬祖外島，約可達 5 公尺潮差，較具有發電之潛力。臺灣西部海岸大都是平直沙岸，圍築構造體來儲存漲退潮的海水，需花費較大之工程成本，但是若利用現有港灣地形來開發，在潮差較大的地方如臺中港，仍具有相當之潛

力。金門和馬祖在天然條件上發展潮汐發電則具有相對優勢。

3. 海流能源: 海流發電是利用海洋中海流的流動推動水輪機發電，一般均在海流流經處設置截流涵洞的沈箱，並在其中設置一座水輪發電機，視發電需要增加多個機組，惟於每組間需預留適當的間隔以避免紊流互相干擾。
4. 波浪能源: 海洋波浪是由太陽能源轉換而成的，因為太陽輻射的不均勻加熱與地殼冷卻及地球自轉造成風，風吹過海面又形成波浪，是海洋能源中能量最不穩定的一種能源。波浪能是指海洋表面波浪所具有的動能和勢能，水團相對於海平面發生位移時，使波浪具有勢能，而水質點的運動，則使波浪具有動能。波浪的能量與波高的平方、波浪的運動週期以及迎波面的寬度成正比，能量傳遞速率和氣流速度有關，也和風與水相互作用的距離（即風區）有關。貯存的能量通過摩擦和湍動而消散，其消散速度的大小取決於波浪特徵和水深，深水海區大浪的能量消散速度很慢，從而導致了波浪系統的複雜性，使它常常伴有局地風和幾天前在遠處產生的風暴的影響。

臺灣四面環海且因屬海島性氣候，沿海地區之波浪受季風影響終年持續不斷，在海洋環境方面大致可分為東、西兩個部分。臺灣東臨太平洋，水深可達數千公尺；西面臺灣海峽，水深則僅約 200 多公尺；北方海域和東海相接；南方則與巴士海峽相鄰。冬天時，臺灣有東北季風的吹拂，而夏天則有西南季風影響，造成海面的擾動及混合，在這樣的往復作用下，風浪、湧浪之形態相當複雜多變。基於上述因素，波浪能源的蘊藏量可說是十分豐富。

表 3.1 各種海洋能種類比較分析表

優 劣 勢 比 較 海 洋 能 種 類	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。	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。	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	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。	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。
波浪發電	1.臺灣具先進造船技術有利於波浪發電裝置載台的建造。 2.臺灣東北部有較大之波能，離岸地區可達 10kW/m 以上。	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。

由上表 3.1 可看出各個海洋能發電種類之間的優劣勢，海流發電及海洋溫差發電所耗費成本過大，不易付諸實行；潮汐發電則對環境之影響較大，應詳細評估後再推動；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、國光平台與成功測站，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。

3.2 波浪發電之原理及種類^[11]

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。

而 3.1.2 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。

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 3.1 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 heaf 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。

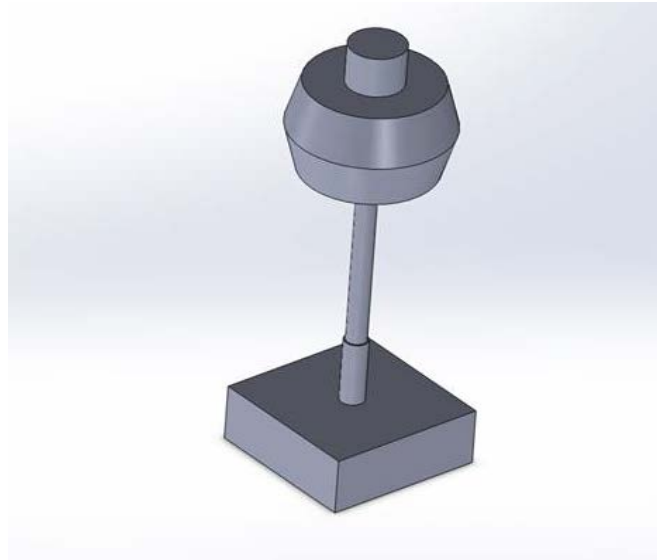


圖 3.1 浮筒及浮塢式波能轉換系統

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 3.2 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。

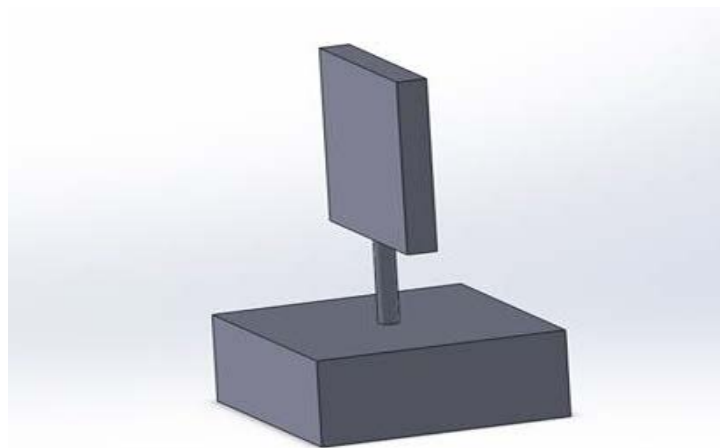


圖 3.2 搖擺浮板式 (the oscillating surge converter) 波能轉換系統

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 3.3 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。

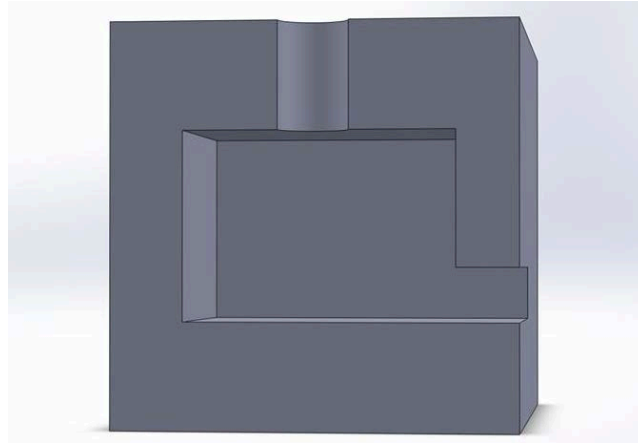


圖 3.3 擺盪或推升水柱體（OWC）波能轉換系統

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 3.4 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。

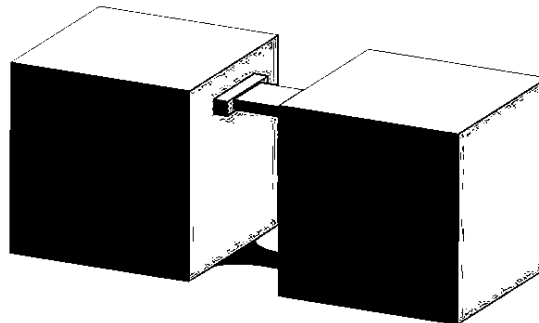


圖 3.4 連桿作動式（Pelamis or Attenuator）波能轉換系統

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 3.5 中左側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。

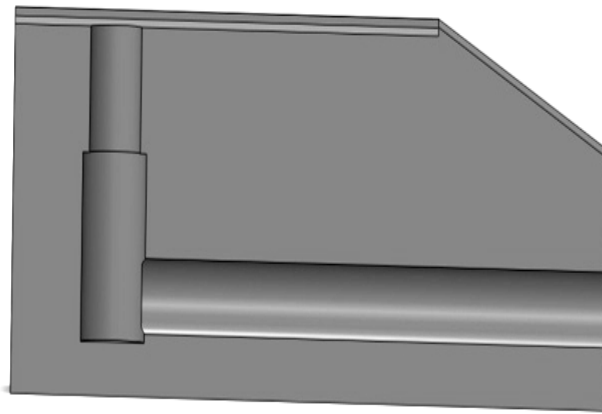


圖 3.5 溯升及越波驅動式 (Overtopping and Terminator) 波能轉換系統

3.3 波浪發電之應用

3.3.1 國際上波浪發電發展簡介^[12]

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証實驗，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証試驗。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。本計畫透過模型

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。此一過程的理論並曾經由研究案「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 $1/100 \sim 1/250$ 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，日本港完研究所之研究在大量經費及人力挹注下，為相關研究中，成果較為完整者。本計畫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 3.6 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 3.7 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。

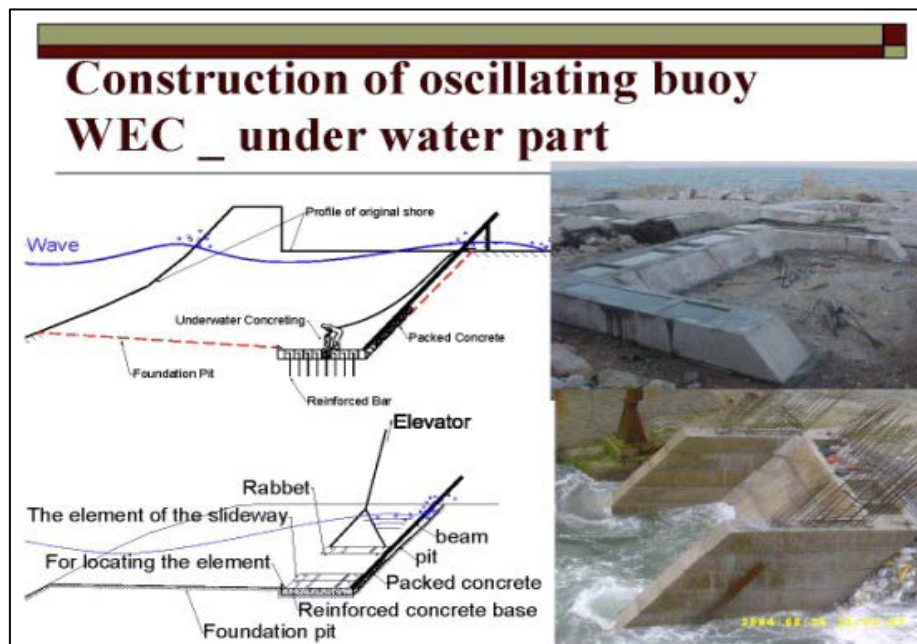


圖 3.6 波能轉換系統之設計及建造施工情形



圖 3.7 波能轉換系統岸上設施建造施工情形

我國台電公司於民國 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。

3.3.2 波浪能發電目前實際安裝運轉案例^[13]

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 3.8 至 3.9，而表 3.2 為 LIMPET500 設計參數。

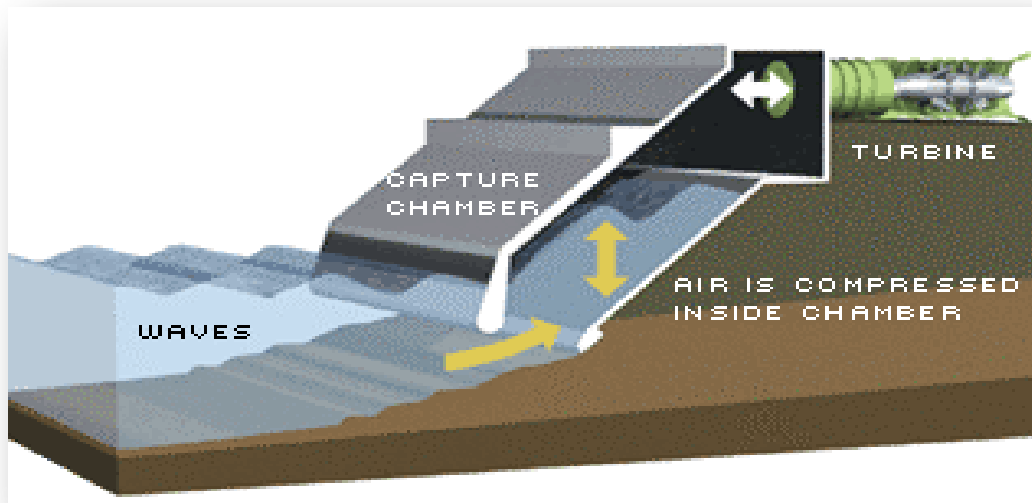


圖 3.8 LIMPET 500 的整體運作模式



圖 3.9 LIMPET 500 運作時現場波浪行為

表 3.2 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 (波長)	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 (堤體水面上高度)	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)	Rotor Type (轉子類型)	Wound rotor (繞線轉子) (but used with rotors shorted)

	並呈直線排列)		
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(轉動慣量) Generator Load	11.5kgm 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 3.10、3-11 而表 3.3 為 Pico 設計參數。



圖 3.10 PicoOWC 系統正視圖



圖 3.11 PicoOWC 系統後視圖

表 3.3 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(波長)	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(堤體水面上高度)	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 rings (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 (葉片大小)	375mm	Max test speed (最大轉速)	1500rpm
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 3.12 至 3-15 而表 3.4 為 Vizhinjam 設計參數



圖 3.12 Vizhinjam OWC 沉箱前防波堤結構



圖 3.13 Vizhinjam OWC 沉箱後視圖

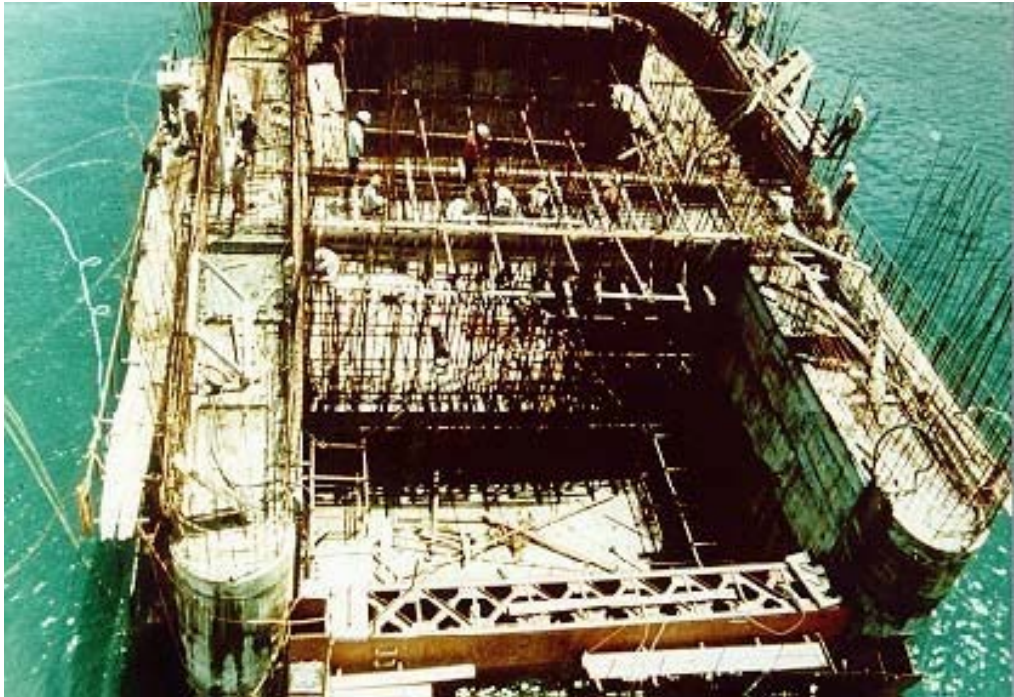


圖 3.14 Vizhinjam OWC 正在建設中

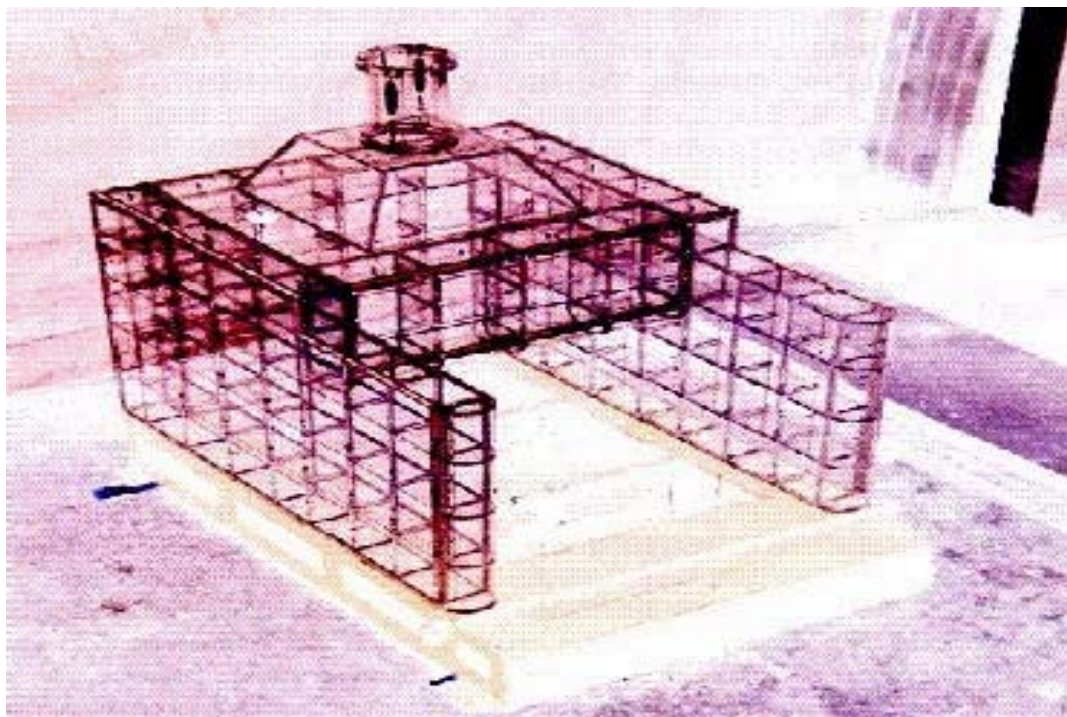


圖 3.15 Vizhinjam OWC 整體模型圖

表 3.4 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(波長)	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 (堤體水面上高度)	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	NACA0021	Rated Voltage	None.

(葉片型式)		(額定電壓)	
Number of blades (葉片數量)	8	Rated Speed (額定轉速)	None.
Blade Chord (葉片大小)	380mm	Max test speed (最大轉速)	None.
Hub to tip ratio (轂尖比)	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 3.16、3-17 而表 3.5 為 [Sakata OWC](#) 設計參數。

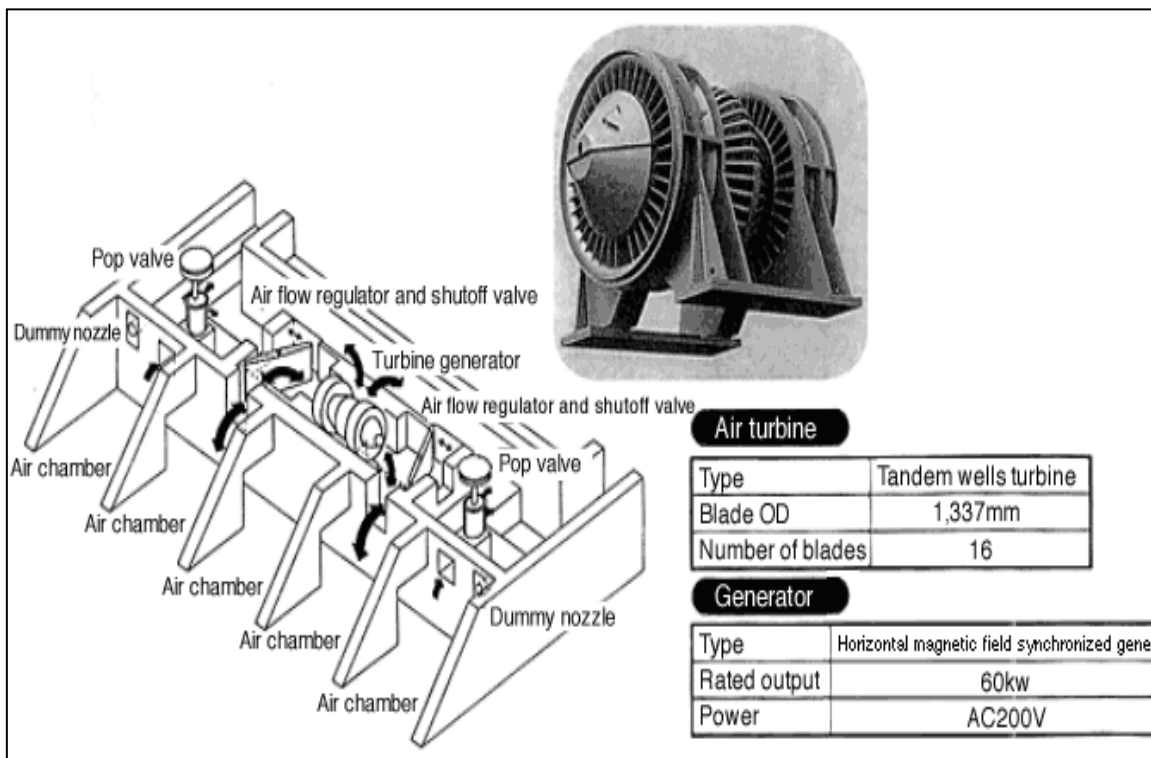


圖 3.16 Sakata OWC 的波能發電系統



圖 3.17 Sakata OWC 的沉箱施工階段

表 3.5 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. (渦輪機直徑)	1.337m	Type (型號)	None.
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.

3.4 臺灣四大港口基本簡介及波浪資料

3.4.1 基隆港基本簡介及波浪資料^{[14] [15]}

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 3.18。

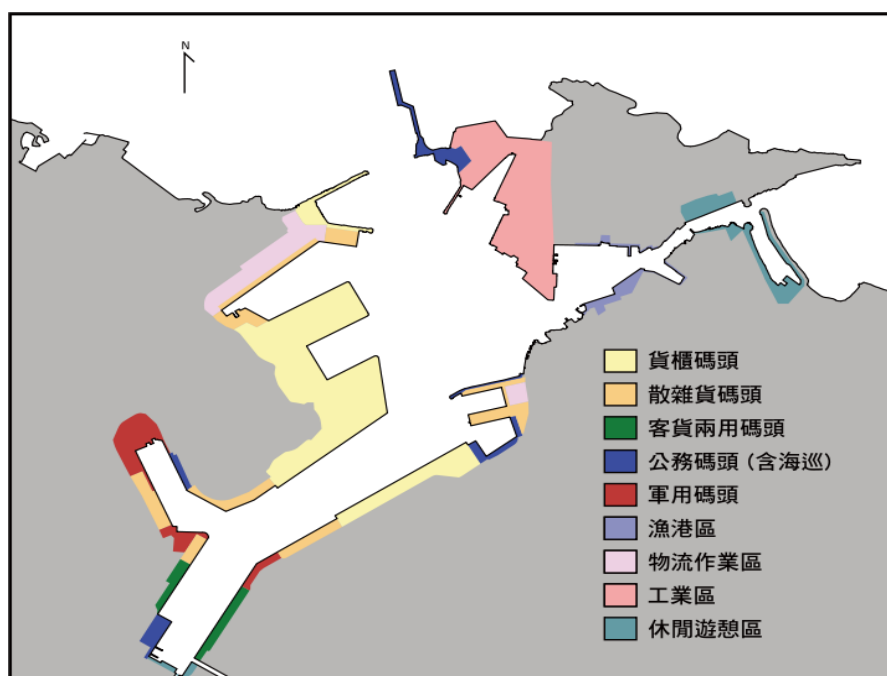


圖 3.18 基隆港地圖(資料來源:Wikipedia)

如下圖 3.19 為基隆港 2001 年-2012 年的波浪資料的統計(資料來源:本所港研中心),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。

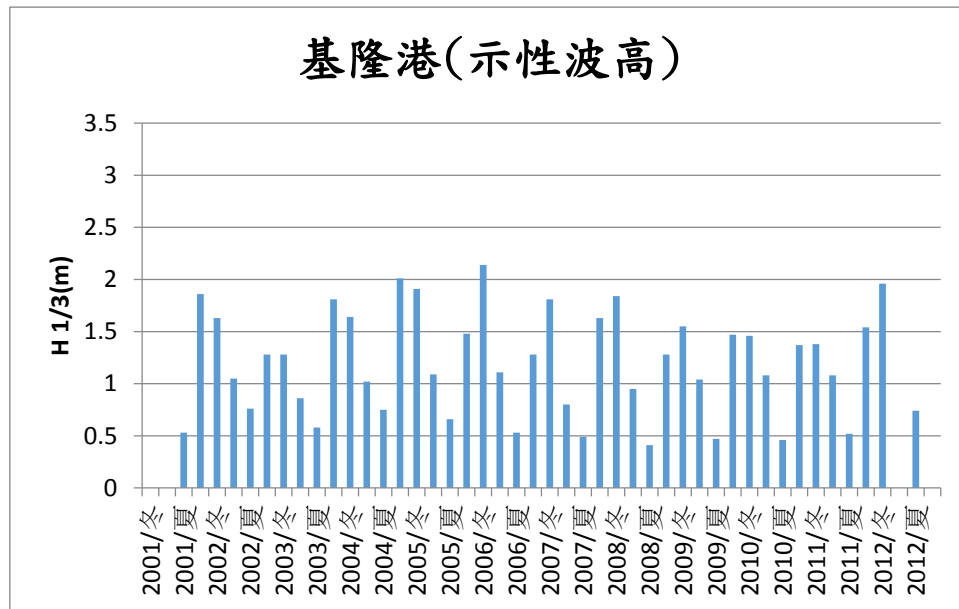


圖 3.19 基隆港歷年示性波高

3.4.2 臺中港基本簡介及波浪資料^{[16] [17]}

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 海里。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。

如下圖 3.20 為臺中港 2001 年-2012 年的波浪資料的統計(資料來源:本所港研中心),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。

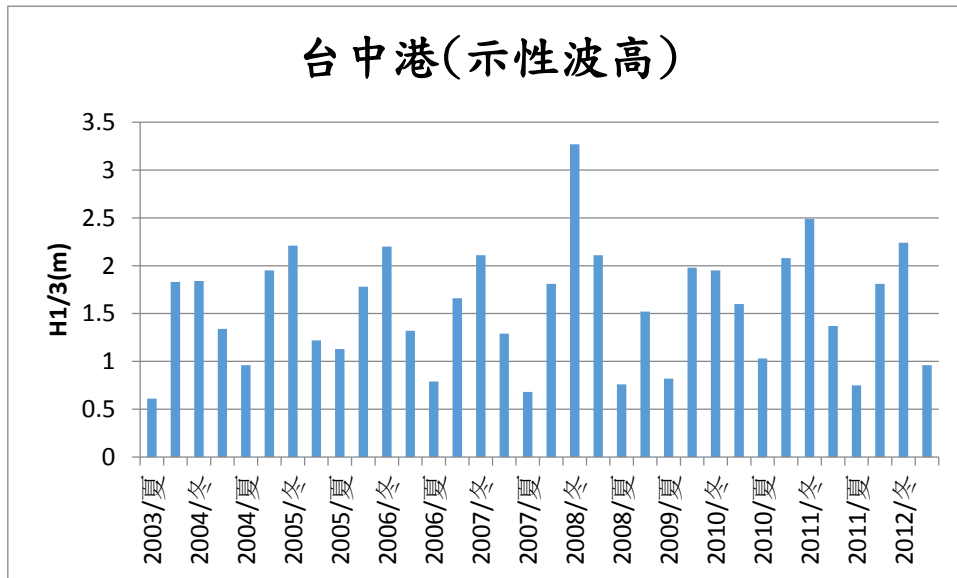


圖 3.20 臺中港歷年示性波高

3.4.3 花蓮港基本簡介及波浪資料^{[18] [19]}

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。

如下圖 3.21 為花蓮港 2001 年-2012 年的波浪資料的統計(資料來源: 本所港研中心)，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。

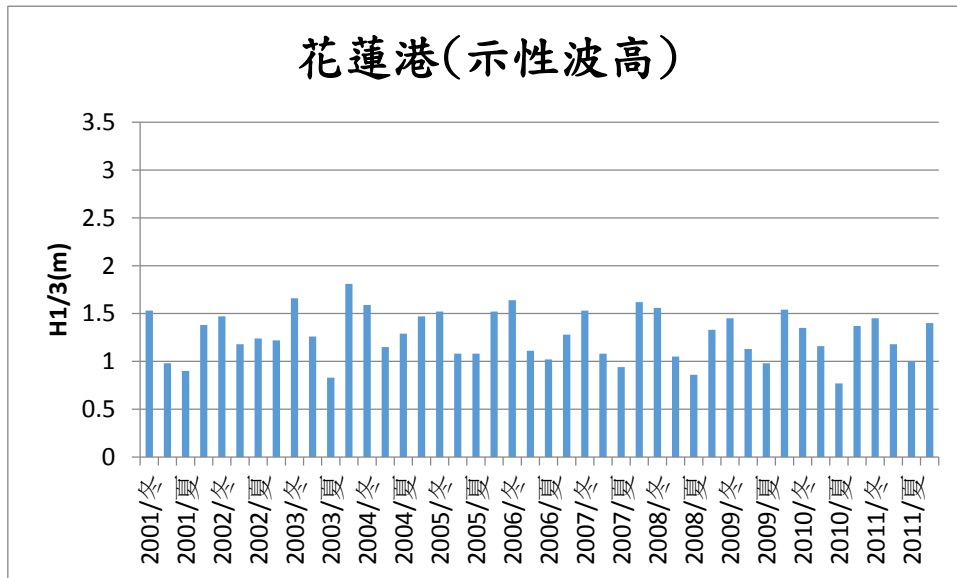


圖 3.21 花蓮港歷年示性波高

3.4.4 高雄港基本簡介及波浪資料^{[21] [22]}

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。

本港共有兩個港口，第一港口位於東經 120°15'25"，北緯 22°37'01"；第二港口位於東經 120°18'26"，北緯 22°33'21"。



圖 3.22 高雄港潮位(高雄港務局網頁所提供)

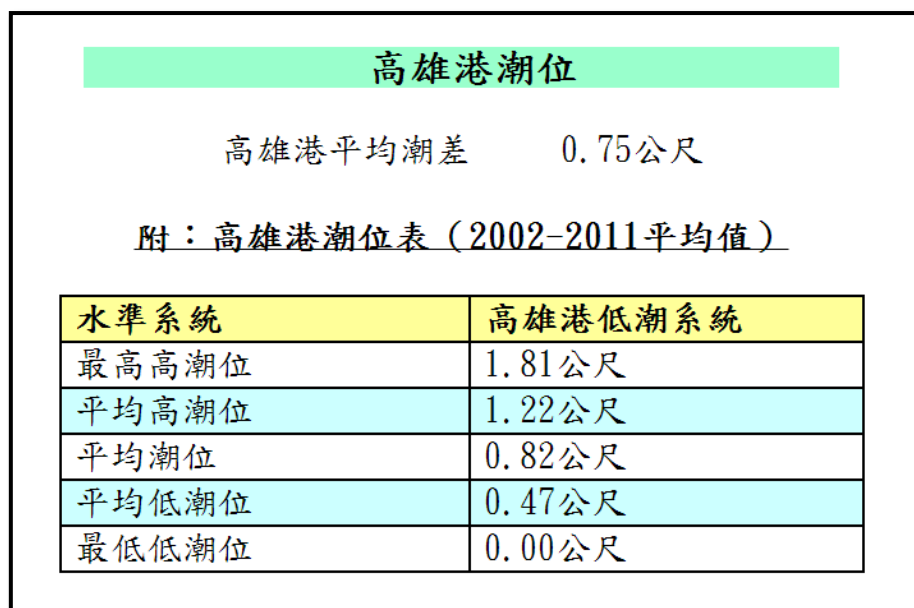


圖 3.23 高雄港潮差

如下圖 3.24 為高雄港 2001 年-2012 年的波浪資料的統計(資料來源: 本所港研中心)，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。

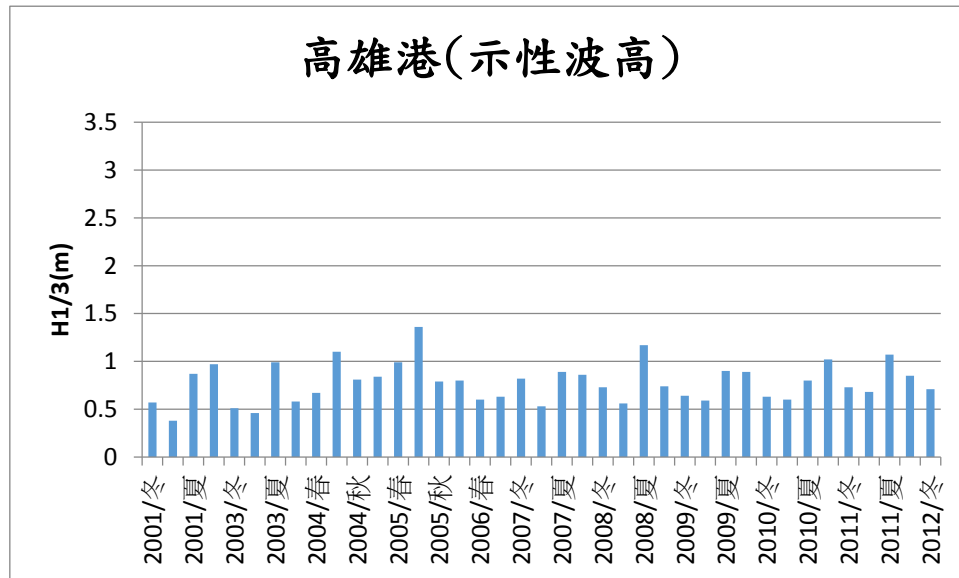


圖 3.24 高雄港歷年示性波高

3.5 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. 探討不同許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. 加權機率力矩法 (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。

表 3.6 基隆港各月份最適極值函數與對應的 50 年重現期波高

(資料來源：臺灣港灣構造物動態資訊管理系統 4)

月份	最適極值函數	參數推定法	重現期 50 年波高(m)
1 月	GEV	LSM	9.21
2 月	GEV	LSM	7.40
3 月	Weibull	LSM	6.80
4 月	GEV	LSM	6.21
5 月	GEV	LSM	3.74
6 月	GEV	LSM	2.73
7 月	Weibull	LSM	9.04
8 月	Weibull	MLE	9.79
9 月	Weibull	MLE	12.38
10 月	LogN	LSM	8.62
11 月	LogN	LSM	7.29
12 月	Weibull	LSM	7.84

表 3.7 臺中港各月份最適極值函數與對應的 50 年重現期波高

(資料來源：臺灣港灣構造物動態資訊管理系統 4)

月份	最適極值函數	參數推定法	重現期 50 年波高(m)
1 月	LogN	LSM	6.14
2 月	FT-1	LSM	6.84
3 月	GEV	LSM	7.88
4 月	LogN	LSM	6.16
5 月	LogN	LSM	4.21
6 月	Weibull	LSM	4.38
7 月	LogN	LSM	11.59
8 月	LogN	LSM	11.01
9 月	LogN	LSM	8.79
10 月	LogN	LSM	8.26
11 月	GEV	LSM	5.46
12 月	LogN	LSM	5.67

表 3.8 推估花蓮港波浪之各重現期波高

(資料來源：臺灣港灣構造物動態資訊管理系統 2)

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.77	0.37	0.50	0.65
ER(m)		2.78	0.02	1.13	2.17
x_R (m)	10	11.04	10.07	10.56	10.84
	25	12.98	10.59	11.94	12.62
	50	14.42	10.83	12.86	13.92
	100	15.86	11.00	13.71	15.21

表 3.9 高雄港外海各方向各迴歸期設計波浪分析表

(資料來源：臺灣港灣構造物動態資訊管理系統 2)

迴歸期 (年) 波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
NW	5.3	9.7	5.2	9.6	4.9	9.3	4.5	8.9	4.1	8.5	3.9	8.3	3.5	7.9
WNW	6.2	10.5	6.1	10.4	5.7	10.0	5.3	9.7	4.8	9.2	4.6	9.0	4.1	8.5
W	6.6	10.8	6.5	10.7	6.0	10.3	5.5	9.8	5.0	9.4	4.8	9.2	4.3	8.7
WSW	8.9	12.5	8.6	12.3	7.8	11.7	6.9	11.0	6.0	10.3	5.7	10.0	4.8	9.2
SW	10.0	13.3	9.7	13.1	8.7	12.4	7.7	11.7	6.7	10.9	6.3	10.5	5.2	9.6
SSW	12.0	14.5	11.6	14.3	10.4	13.5	9.2	12.7	7.9	11.8	7.5	11.5	6.1	10.4
S	13.0	15.1	12.6	14.9	11.5	14.2	10.3	13.5	9.0	12.6	8.5	12.2	7.1	11.2
SSE	13.3	15.3	13.0	15.1	11.9	14.5	10.8	13.8	9.5	12.9	9.1	12.7	7.6	11.6

註：1.依據 1940~2009 年間之颱風資料推算。

2.推算目標區為 120.26°E，22.47°N。

4. $T_s = 4.2 \times H_s^{0.5}$ 。

5. H_s 單位為 m， T_s 單位為 sec。

表 3.10 高雄港極端水位分析表

(資料來源：臺灣港灣構造物動態資訊管理系統 2)

迴歸期(年)	25	50	100	150	200	250
極端水位(m)	1.98	2.16	2.41	2.58	2.73	2.85

第四章 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。

4.1 沉箱與氣流公式推導

4.1.1 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 4.1 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，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所之研究成果，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。

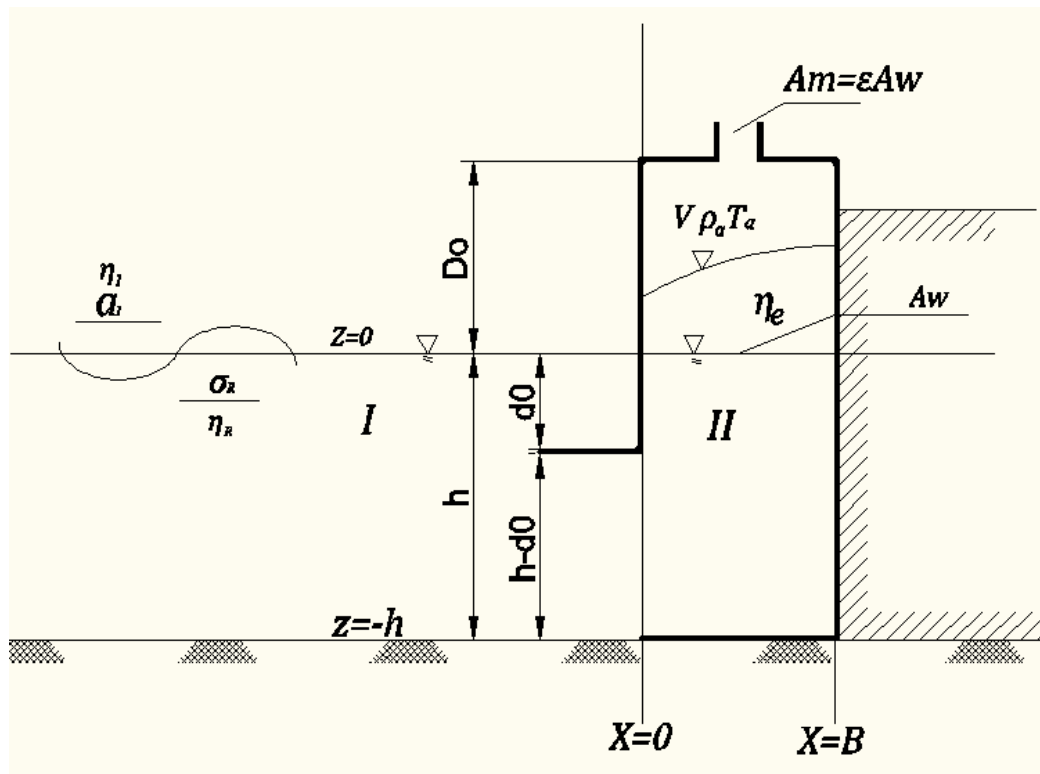


圖 4.1 CBWPCS 系統及其相關參數圖(redraw after Takahashi et al. 1985)

4.1.2 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：

$$\frac{P}{\rho_a} = RT_a \quad (4-1)$$

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:

$$\frac{d(\rho_a V)}{dt} + \dot{m} = 0 \quad (4-2)$$

式中、 V 為體積， $\dot{m}$ 為空氣質量的流出速率，其定義如下

$$\dot{m} = \rho_e C_d \varepsilon A_w W_p \quad (4-3)$$

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:

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

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(4-1)式代入(4-2)式可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V}{RT_a} \right) + \dot{m} = 0 \quad (4-5)$$

由空氣室中能量守恆定律，可進一步推導出公式如下：

$$p_a \frac{dV}{dt} + C_v \frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V}{RT_a} \right) + \dot{m} C_p T_e = 0 \quad (4-6)$$

c_v :定體積下單位熱量(=717.1J/kg K)

式(4-5)及(4-6)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，並可將其表式為非線性週期性的函數如下

$$V^* = V - V_0 = -A_w a_0 \sin \sigma t \quad (4-7)$$

$$T^* = T_a - T_0 = \alpha T_0 \sin \sigma(t + \tau) \quad (4-8)$$

$$p^* = p_a - p_0 = \lambda p_0 \sin \sigma(t + \tau) \quad (4-9)$$

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

$$\alpha = (\gamma - 1) \frac{a_0}{D_0} \cos \sigma \tau \quad (4-10)$$

$$\lambda = \gamma \frac{a_0}{D_0} \cos \sigma \tau \quad (4-11)$$

$$\cos \sigma \tau = \pm \sqrt{1 + K^2} - K \quad (4-12)$$

其中 K 與 γ 、 ε_e 值為

$$K = \varepsilon_e^2 (\gamma - 1) \frac{c_p T_0}{(\sigma D_0)^2} \frac{D_0}{a_0} \quad (4-13)$$

$$\gamma = c_p / c_v \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_e = c_d \varphi \varepsilon \quad (4-15)$$

4.1.3 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，以為小振幅波表示如下：

$$\eta_I = a_I \sin(\sigma t - kx - \Phi_I) \quad (4-16)$$

$$\eta_R = a_R \sin(\sigma t + kx - \Phi_R) \quad (4-17)$$

$$\eta_T = a_T \cos k(x - B) \sin \sigma t \quad (4-18)$$

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：

$$a_I \sin(\sigma t - \Phi_I) - a_R \sin(\sigma t - \Phi_R) = a_T \sin k B \cos \sigma t \quad (4-19)$$

考慮壓力於 $x=0$ 時之連續：

$$a_I \sin(\sigma t - \Phi_I) + a_R \sin(\sigma t - \Phi_R) = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_0) p^* + a_T \sin k B \cos \sigma t \quad (4-20)$$

其中

$$f(kh, kd_0) = \frac{2 \cosh kh \sinh k(h-d_0)}{\cosh k(h-d_0) \sinh k(h-d_0) + k(h-d_0)} \quad (4-21)$$

將(4-19)、(4-20)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：

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

$$a_T(\sin k B \cos \sigma \tau + \cos k B \sin \sigma \tau) \quad (4-22)$$

其中有效振幅 a_0 可表達為

$$a_0 = \frac{\sin k B}{k B} a_T \quad (4-23)$$

代入方程式(4-10)、(4-11)及(4-12)，方程式(4-22)可進一步改寫為下式：

$$a_I = 0.5 a_0 [\{A_0 f(kh, kd_0) \sin \sigma \tau \cos \sigma \tau + k B\}^2 + \{A_0 f(kh, kd_0) \cos^2 \sigma \tau + \frac{k B}{\tan k B}\}^2]^{(1/2)} \quad (4-24)$$

以及

$$\Phi_I = \tan^{-1} \left\{ -\frac{A_0 f(kh, kd_0) \sin \sigma \tau \cos \sigma \tau + k B}{A_0 f(kh, kd_0) \cos^2 \sigma \tau + k B / \tan k B} \right\} \quad (4-25)$$

其中

$$A_0 = \frac{\gamma p_0}{\rho_w g D_0} \quad (4-26)$$

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 $\sigma \tau$ 可以利用數值方法求解方程式(4-12)及(4-24)，其中並輔以式(4-13)、(4-21)及(4-26)等相關參數之求算。

4.1.4 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

$$W_a dt = p_a dV \quad (4-27)$$

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：

$$W_a dt = -A_w p_a d\eta = -A_w p_a \frac{d\eta}{dt} dt \quad (4-28)$$

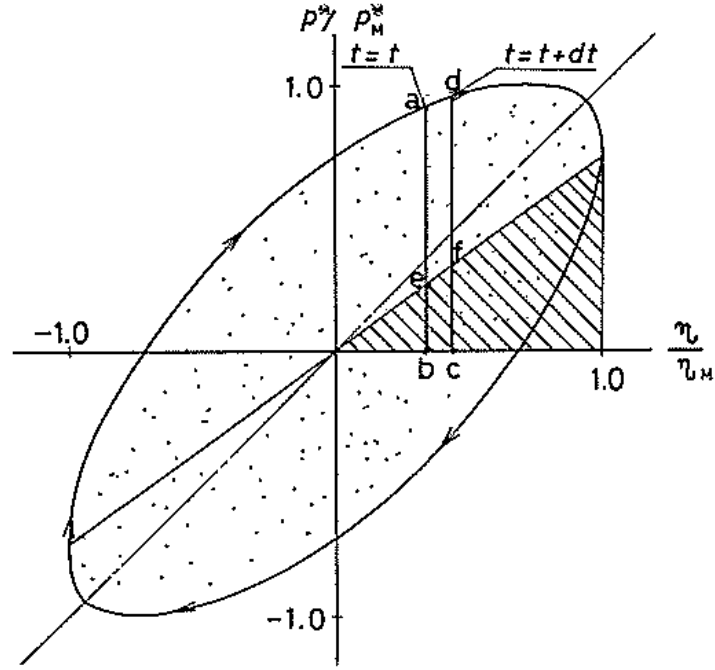


圖 4.2 一個循環週期之空氣能圖(after Takahashi 1895)

由(4-28)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4.2。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：

$$\overline{W_a} = -\frac{1}{T} \int_0^T p_a dV \quad (4-29)$$

平均空氣能於一個週期之量為圖4.2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：

$$\overline{W_a} = 0.5 \sigma A_w \eta_M p_M^* \sin \sigma \tau \quad (4-30)$$

將(4-7)、(4-9)代入，(4-30)重新寫成

$$\overline{W_a} = \frac{1}{2} \frac{\gamma p_0 \sigma A_w}{D_0} a_0^2 \sin \sigma \tau \cos \sigma \tau \quad (4-31)$$

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

$$W_{am} = \sigma A_w \eta_M p_M^* \quad (4-32)$$

4.1.5 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：

$$W = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g \quad (4-33)$$

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：

$$W_I = \frac{\rho_w g}{32\pi} H^2 T / K_s^2 \quad (4-34)$$

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(4-31)到(4-33)式可得

$$\overline{\text{EFF}} = \overline{W_a} / \overline{W_I} = \frac{\gamma p_0}{\rho_w g D_0} \frac{B \sigma}{C_g} \frac{a_0^2}{a_I^2} \sin \sigma \tau \cos \sigma \tau \quad (4-35)$$

其中 B 為氣室前後距離， D_0 為氣室空氣高度

4.2 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：

$$W_I = \rho_w g \int_0^\infty S(f) C_g(f) df \quad (4-36)$$

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

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

而在深水區，則不規則波能為

$$W_I = \frac{\rho_w g^2}{4\pi} \int_0^\infty S(f) f^{-1} df \quad (4-38)$$

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。

4.3 紊流流體力學理論

在前述 4.1 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。因此本計畫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。

本計畫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，也是本計畫採用的紊流模型。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。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4-39)$$

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，流體個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。

本計畫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 - ε 模型是在系統方程式裡引入兩個新變量。

連續方程式為

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4-40)$$

動量方程為

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla \cdot p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (4-41)$$

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

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (4-42a, b)$$

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

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4-43)$$

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

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4-44)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (4-45)$$

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

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

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，但其常數系數由 $C_{\varepsilon RNG}$ 替換 C_ε 。

紊流動能耗散方程式變為

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (4-47)$$

式中

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1.42 - f_n \quad (4-48)$$

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

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \mathcal{E}}}$$

(4-49a, b)

第五章 波浪發電複合式防波堤應用及結構安全分析

本計畫在第一階段的研究中，針對波能轉換結合防波堤可資參考之成果，進行了文獻搜尋及調查之外，並進行相似之模型建立及數值分析工作，其目的、除了進一步了解波能轉換發電系統結合防波堤之相關參數之外，同時亦驗證所使用數值方法之正確性及可靠性。根據第四章中之理論，本章將以數值模型進行相關之研究分析。本計畫將岸基式振盪水柱波浪發電系統結合於沉箱式防波堤上，故稱為結合波浪發電複合式防波堤，目前暫時選在高雄港第一港口北堤，因其鄰近本計畫團隊位置，在資料取得及現地勘查上相對方便。本章中對於波浪發電複合式防波堤之分析，可分為結構安全及波能轉換兩個主要部分，因為防波堤之主要功能在於消減波浪對航道及港池之影響，在設置具發電功能之波能轉換系統後，不能因為附加功能之應用而影響其主要功能。相關分析敘述如下：

1. 波能轉換分析：

本計畫採用 ANSYS CFX 軟體模擬沉箱氣室內之瞬時空氣流場變化圖，討論沉箱氣室內部波浪上部之空氣瞬時流向與速度壓力之關係，對於空氣與波浪共同作用之動態多相流態，因過於複雜則先予忽略。分析時、首先建立波浪發電複合式防波堤模型做為分析依據，並加入時間序列以及波浪與空氣之自由液面行為。根據此模擬，不僅可觀測沉箱氣室內任一時間序列之波浪與空氣之相互作用，亦可適度觀察氣室內空氣流場變化。

2. 結構安全分析：

參考臺灣西部海域高雄港第一港口北側防波堤所在環境條件，初步假設波浪發電複合式防波堤之幾何形狀與尺寸，以高雄港第一港口之颱風 50 年回歸期之波浪資料，透過合田公式計算可能遭受之最大波浪作用力，再透過數值套裝軟體 ANSYS 來模擬波浪發電

複合式防波堤之受力後變形情形。

在進行本計畫之模型分析時，本計畫先進行高橋重雄之試驗模擬，雖然能取得之高橋重雄所呈現之試驗成果，並非完整之成果，數據亦相當有限，但至少為目前少數具具體成果之試驗。分析完成後，比較觀察本計畫模擬之結果與現場試驗結果是否相近，進而能確認本計畫所採用之模擬方法是否接近於真實情況。

5.1 波能轉換數值方法驗證

本計畫採用數值軟體 ANSYS CFX 來模擬波浪發電複合式防波堤。為驗證數值分析結果是否與試驗結果有一致性，故先模擬高橋重雄於 1989 年興建於日本酒田港之沉箱式複合波能轉換系統，比較其模擬結果與現地實測資料之差異，再進行本計畫所規劃之波浪發電複合式防波堤之模擬。

5.1.1 日本酒田港之沉箱式波能轉換系統^[31]

日本酒田港之沉箱式波能轉換系統，於日本第一區港口建設局以及日本交通運輸部合作下，於 1982 年開始進行基礎研究(Takahashi et al,1992)；1987 年日本沿海開發研究所與 20 間民間公司聯合進行實地查核，並於 1989 年夏天開始於酒田港興建測試模型，於同年的冬天開始運作，其測試模型尺寸如圖 5.1，氣室設計如圖 5.2，該測試模型興建於酒田港之第二北堤，其整個系統分為五個氣室，中間有互通的管道。測試模型設計 1 到 5 米浪都能運作，其中主要是以 2 到 3 米為主。

測試模型 5 個氣室中，有兩個通風口通往渦輪發電機，渦輪機的開口面積為 0.6185 米平方，是氣流主要的進出面積，圖中的 pressure relief valve 跟 air flow valve 主要目的是保護渦輪發電機，當渦輪機轉速超過 2000 轉或是氣室內部壓力超過每平方米 1.6 T 時才會打開洩壓。值得注意的是，當初該沉箱式波能轉換系統設計配置之渦輪發電機輸

出功率為 200 千瓦，但由於研究經費不足的原故，所以最後採用 60 千瓦，也因為 OWC 匹配之渦輪發電機尺寸變小，所以需要的氣壓也減少，所以該測試模型多開了兩個 dummy nozzle 把多餘的氣壓排出。

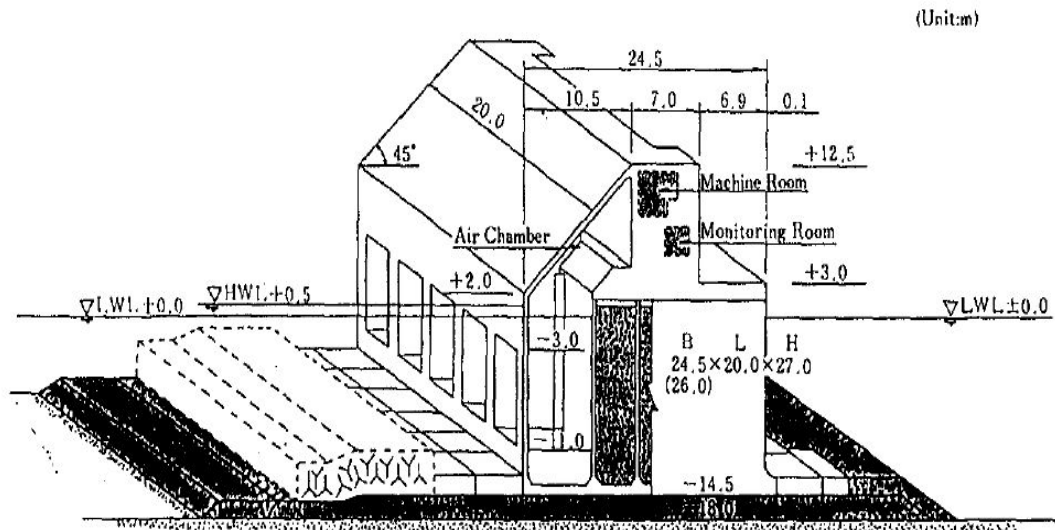


圖 5.1 酒田港之沉箱式波能轉換系統(after Goda 1991)

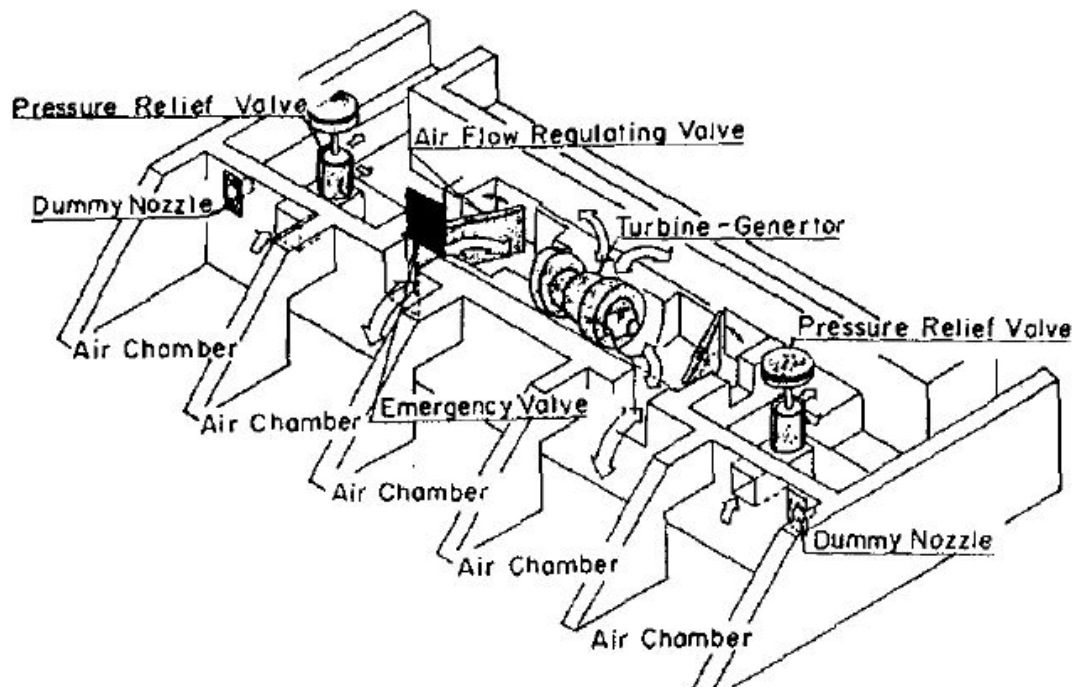


圖 5.2 酒田港沉箱式 OWC 之渦輪室(after Goda 1991)

5.1.2 ANSYS CFX 數值模擬介紹

CFX 是英國 AEA Technology 公司首先為解決核反應多項流問題而開發，並於 1986 年開始做為商業軟體向全球發售，目前 CFX 被納入 ANSYS 軟件中，如前所介紹、其應用遍及工業、能源、機械製造、汽車、航空、水處理、防火安全及環保等各行業。

本分析中所使用之流體力學理論已於前章中說明。使用 CFX 典型過程包括下列 6 個步驟：

1. 導入幾何：

本計畫根據該酒田港沉箱式波能轉換系統測試模型之尺寸，以 SOLID WORK 建置其數值模型如圖 5.3，再導入 ANSYS CFX 內分析。

2. 生成網格：

透過 ANSYS Workbench 將模型網格化，網格生成的目標是離散流動區域，流體力學基本方程式就在這些離散化後的網格單元上求解。

3. 設置流體介值的物理及化學屬性：

CFX 以 VOF(volume of Fluid Method)法求解波浪水槽中水氣氬戒之自由液面，以內建的程式編輯系統 CEL，編輯 VOF，並將之加在各個邊界上，及可確定從計算開始到結束間任意時刻的水槽自由液面，VOF 的值在 0 到 1 之間，當空氣 VOF 或水 VOF 值為 1 時，分別表示該處全部都是空氣或水，而為 0 則表示完全是另一種流體，根據模型資料水深為 14.5m，在 CEL 中定義如下：

$\text{waterVOF}=\text{step}((14.5[\text{m}]-y)/1[\text{m}])$:定義初始水體積分數

$\text{airVOF}=1-\text{watervol}$:定義初始空氣體積分數

4. 設置邊界條件：

在 CFX 邊界條件中，有 5 種邊界條件類型：

(1) 入口邊界(inlet)：

用於設置流動邊界的速度、壓力、流量等的分部，流體只能夠單向流入邊界。

(2) 出口邊界(outlet)：

設置流動邊界的速度、壓力、流量等的分部，流體只能夠單向流出邊界。

(3) 開放邊界(opening)：

用於設置流動邊界的速度、壓力、流量等的分部，流體可以進出邊界。

(4) 壁面邊界(wall)：

用於設置固體表面的邊界條件。

(5) 對稱邊界(symmetry)：

多用在流動可以減化時，流場外為對稱的邊界。

邊界條件是數值水槽實現造波功能的決定因素，本計畫以線性造波理論為基礎，在模擬水槽的模型上，設定相應的邊界名稱，其中 WALL(inlet)功能形同活塞式造波板，給定一行程使其造波，自 WALL(inlet)至 WALL(outlet)邊界為波浪傳遞的方向，圖 5.4 為本計畫所採用的邊界類型設置圖，大寫字體為邊界條件名稱。

5. 求解：

CFX 可監視求解的全過程，顯示收斂狀況。

6. 後處理、定量化分析：

CFX 後處理可以深入了解流場的細節，如速度、壓力、溫度、濃度等。

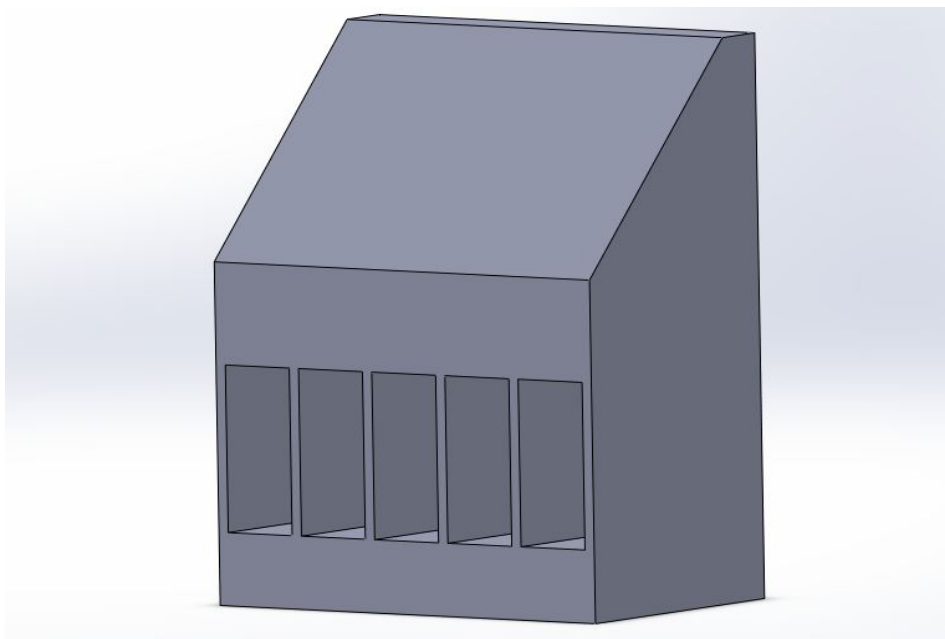


圖 5.3 SOLID WORK 建置之模型

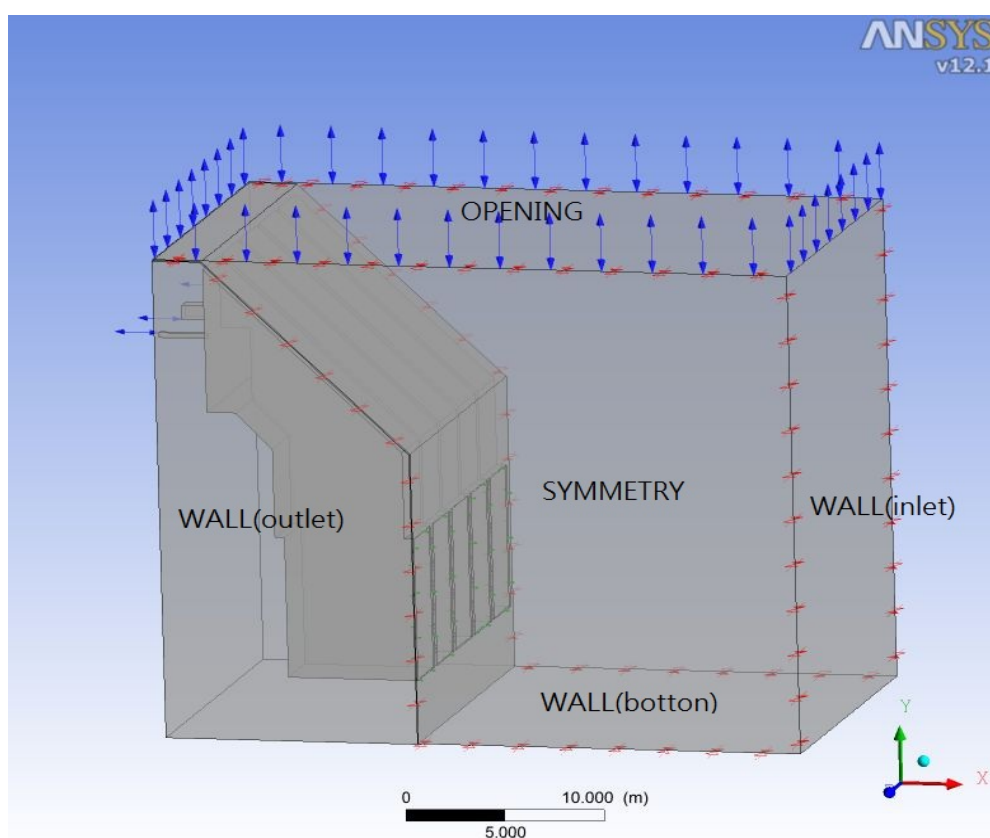


圖 5.4 邊界類型設置

5.1.3 模擬結果比較

圖 5.5 與圖 5.6 為 CFX 後處理顯示的模型沒水狀況，圖 5.6 可以看出氣室內水位的變化，圖 5.7 為合田良實研究團隊於 1990 年 11 月 8 號下午兩點，在酒田港現場測量獲得的氣室內部波高與壓力圖，實測時間為 20 分鐘，當天波浪條件波高約為 2.2 米至 3 米。合田良實研究團隊報告中僅討論氣室內部波高與壓力，並未記錄氣室出口氣流速度之變化，因此本計畫僅以氣室內部波高及壓力變化與之比較。

由於合田良實研究團隊之實驗為現地港灣中所進行，波浪條件不穩定，因此本計畫擷取紅框處內較為穩定兩分鐘之數據與模擬結果做比較。另由於此份資料無提供確切之實驗數據，因此本計畫只能根據圖 5.7 以一分鐘為單位自行繪製較清楚之圖表，紅框內兩分鐘之數據經自行繪製後，氣室內壓力如圖 5.8 以及 5-9 所示，氣室內波高變化如圖所示 5-10 以及 5-11，各圖皆為一分鐘之變化。本計畫波浪條件波高採用 2.5 公尺，週期為 7 秒，模擬時間為 56 秒，氣室內壓力以及氣室內波高變化模擬結果分別為圖 5.12 與圖 5.13，為方便比照模擬與實驗值，分析結果與實驗值合併於圖 5.14 與圖 5.15。其中第一次造波周期較為不穩定，是由於 WALL(inlet)初始位置為行程之中間點，並不是下死點，因此一開始誤差會較大，當 WALL(inlet)行程到達上死點後即為正常。

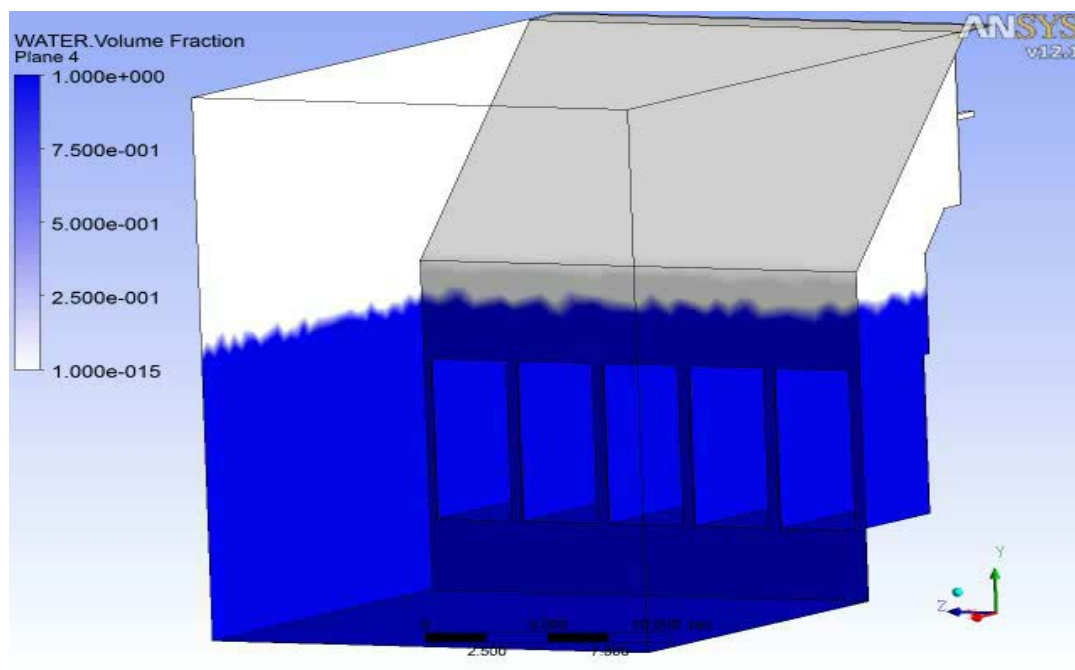


圖 5.5 模型沒水狀況

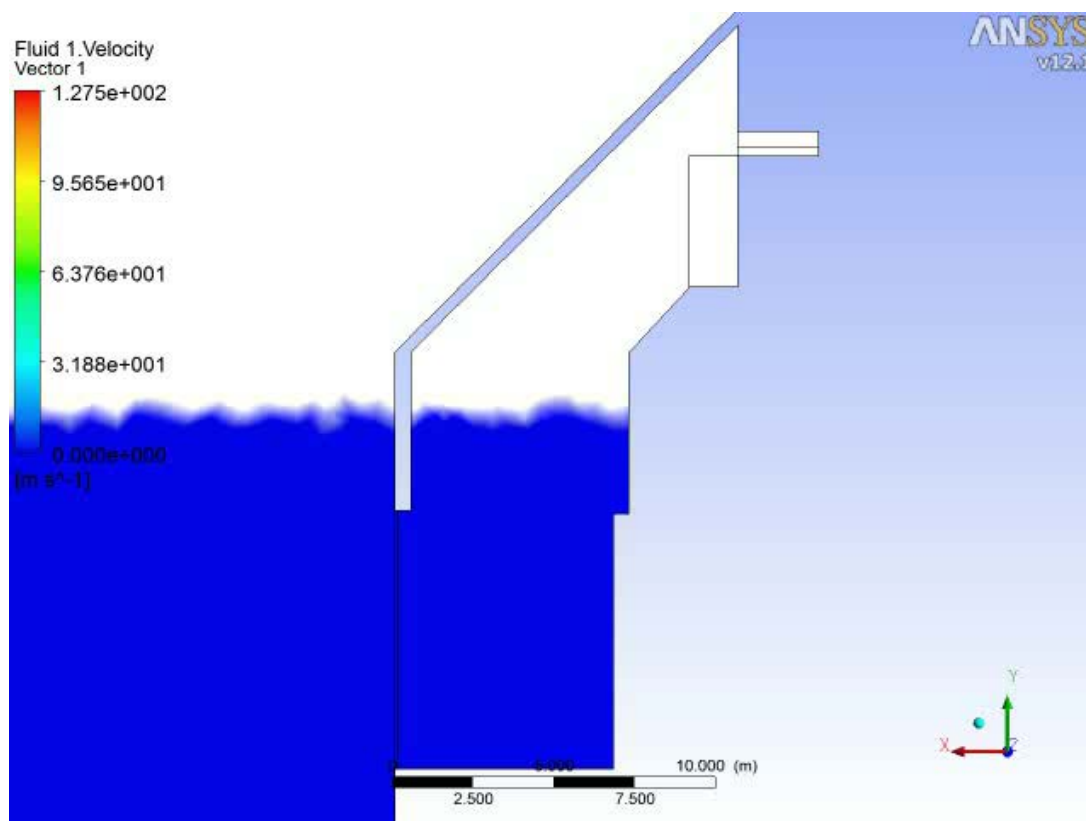


圖 5.6 模型沒水狀況側視圖

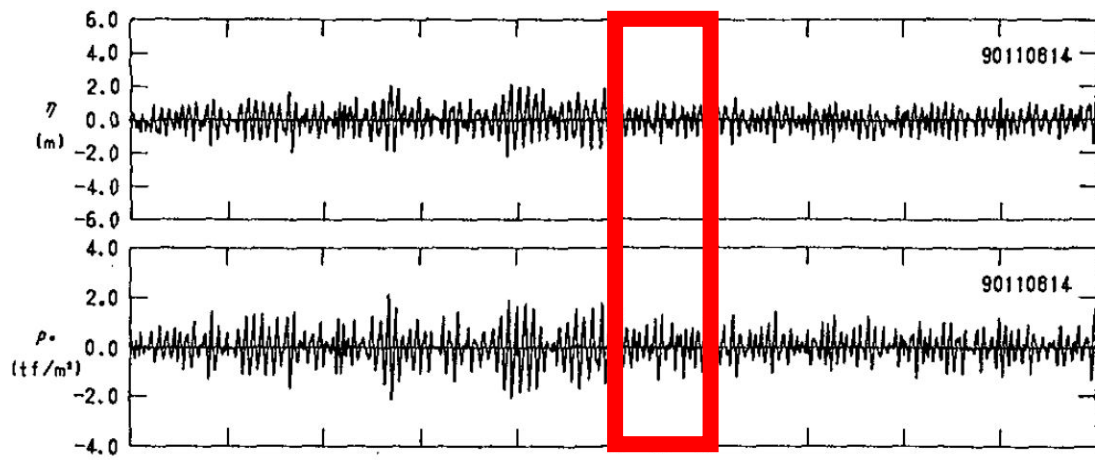


圖 5.7 現場測量之氣室內部波高與壓力圖(Goda 1991)

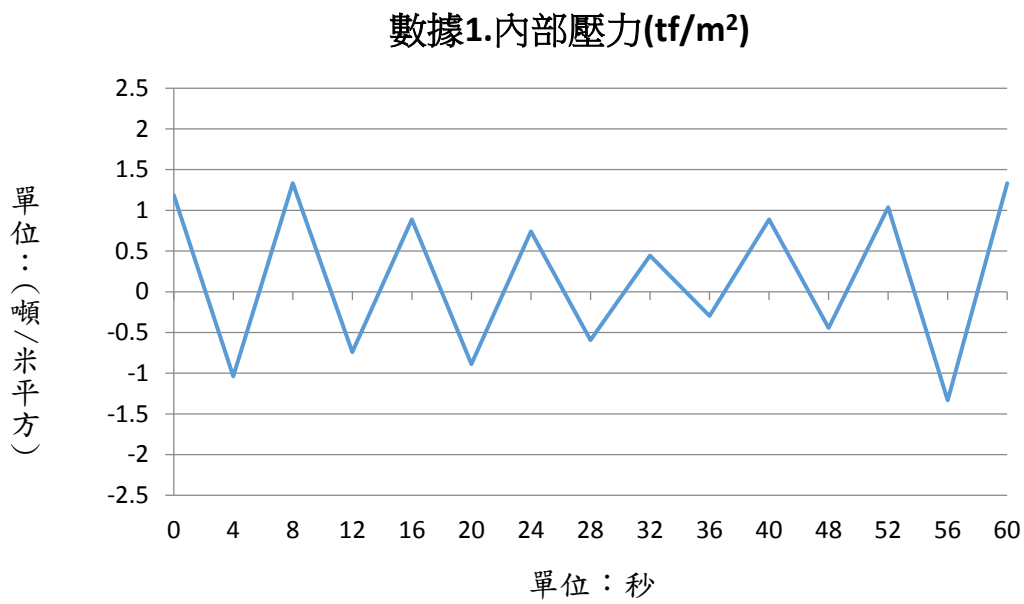


圖 5.8 數據 1 之氣室內部壓力(after Goda 1991)

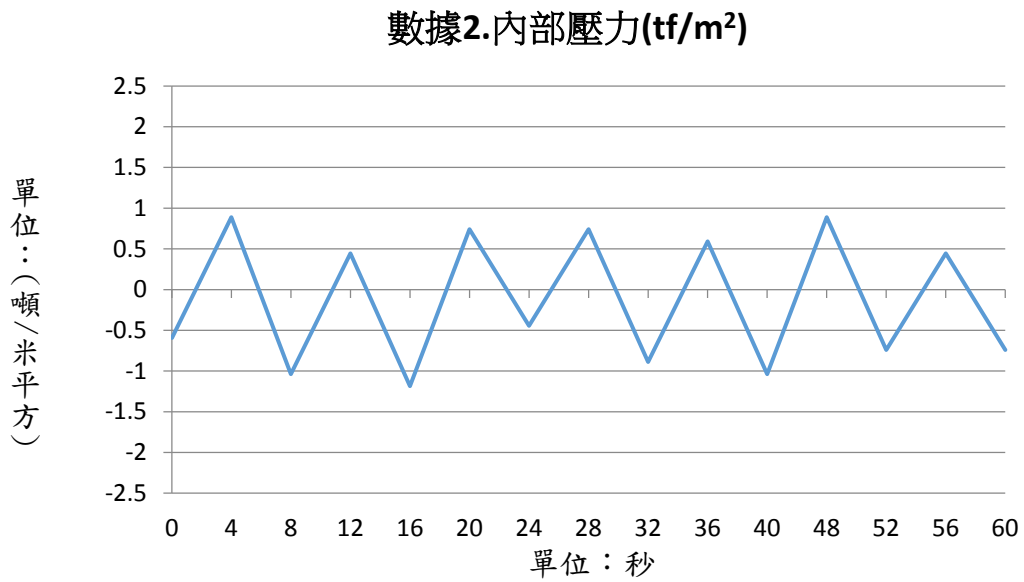
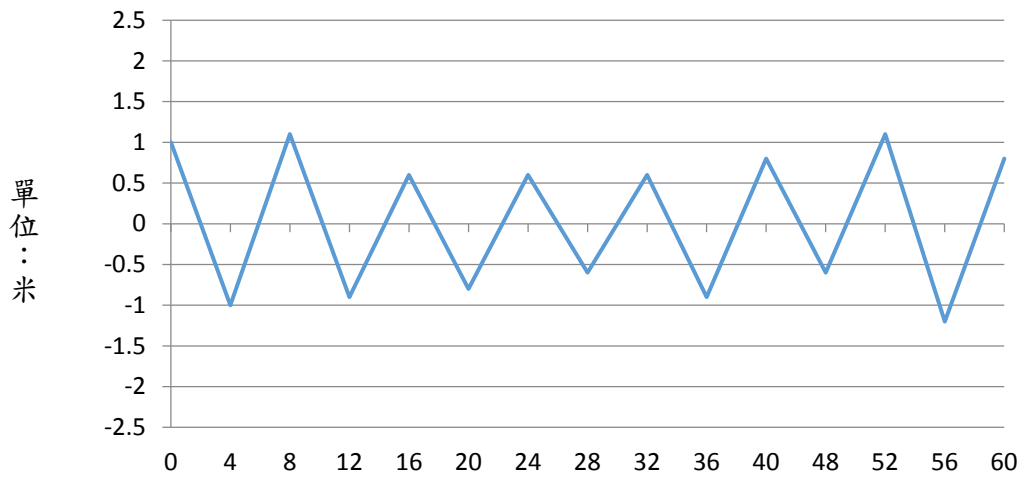


圖 5.9 數據 2 之氣室內部壓力(after Goda 1991)

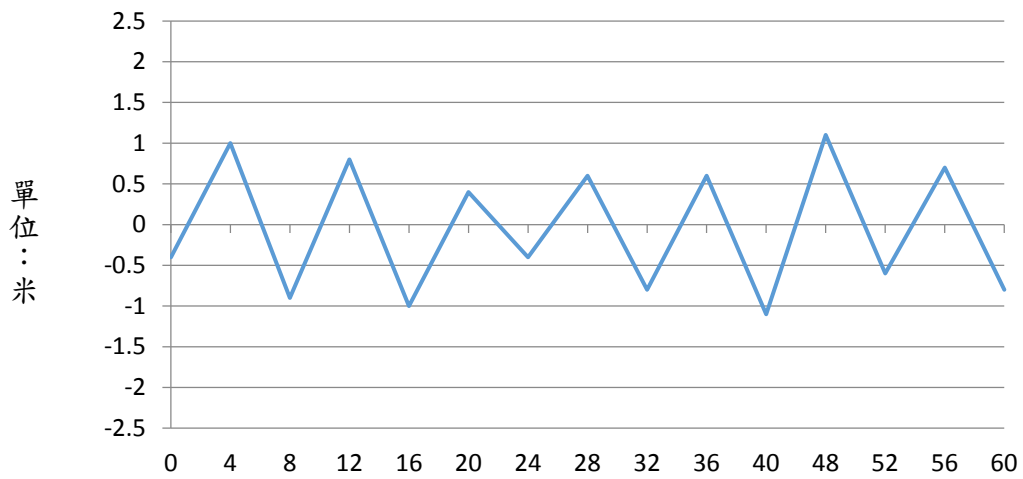
數據1.氣室內波高(m)



單位：秒

圖 5.10 數據 1 之氣室內波高(after Goda 1991)

數據2.氣室內波高(m)



單位：秒

圖 5.11 數據 2 之氣室內波高(after Goda 1991)

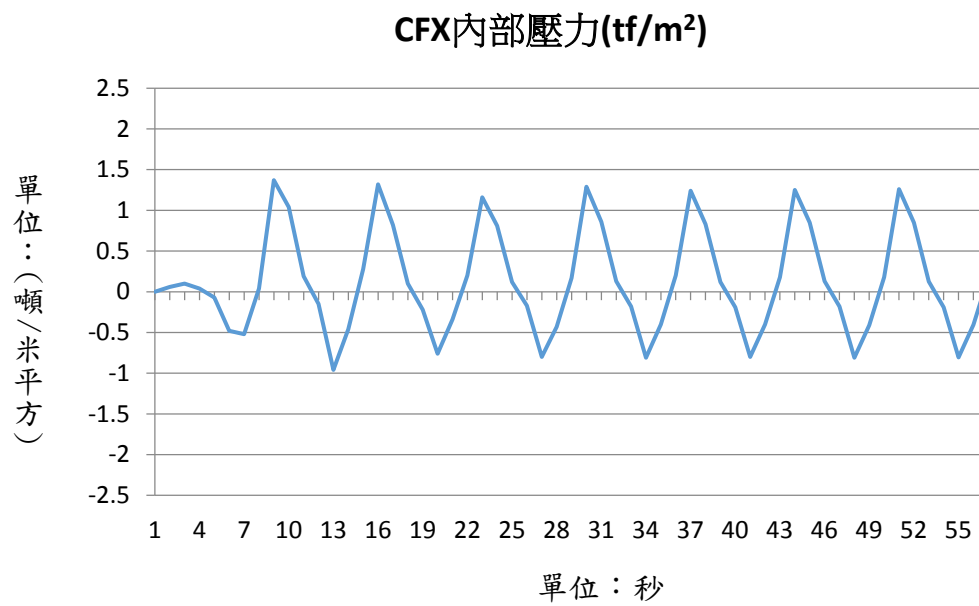


圖 5.12 CFX 模擬之氣室內部壓力

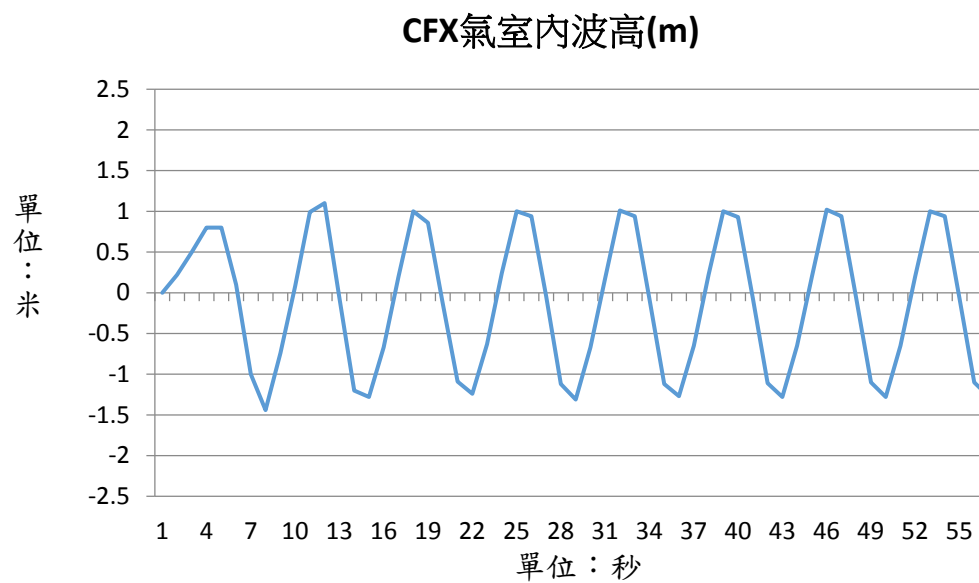


圖 5.13 CFX 模擬之氣室內波高

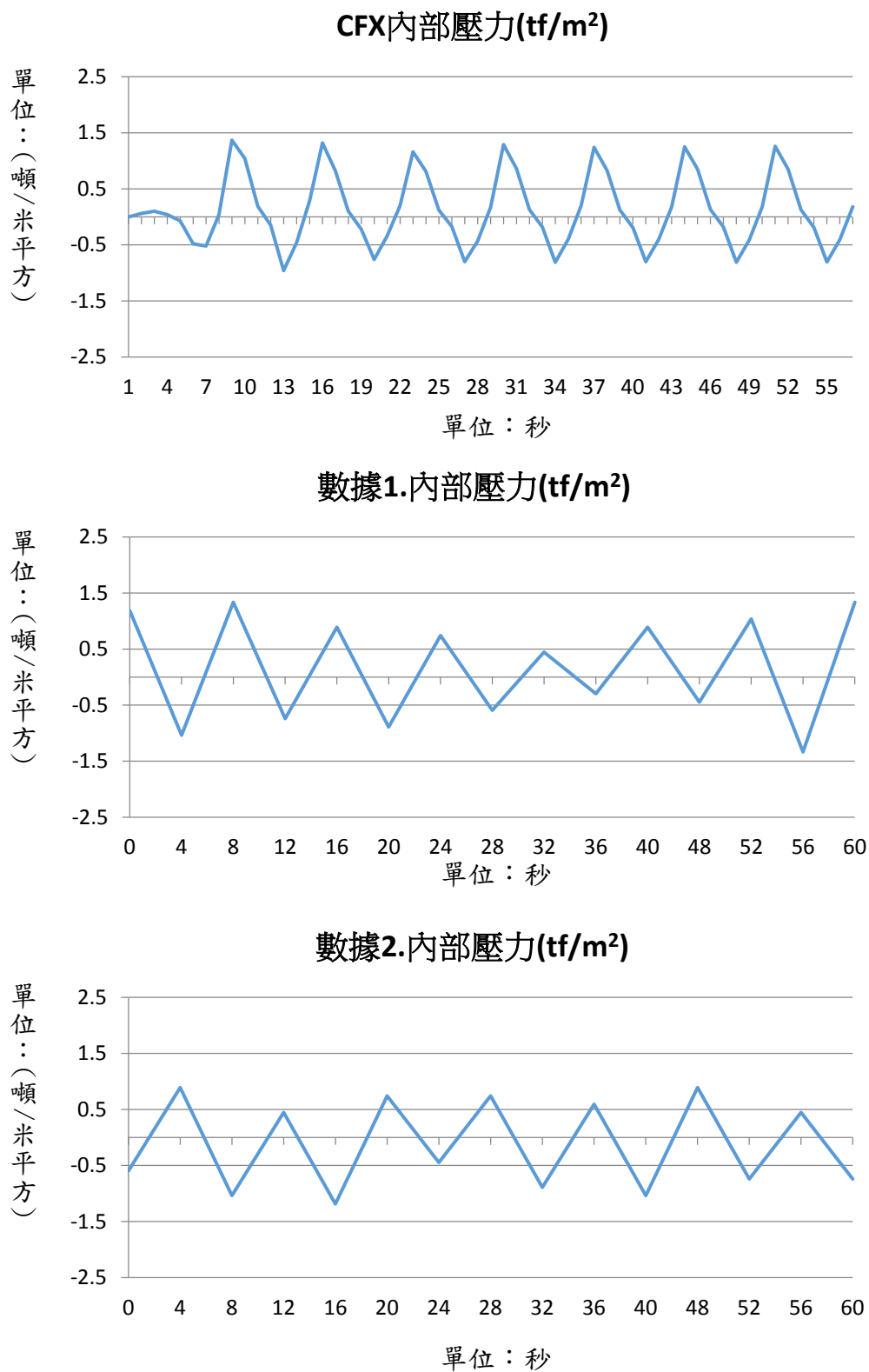


圖 5.14 CFX 模擬與 Goda 實驗數據比較圖(氣室內部壓力)

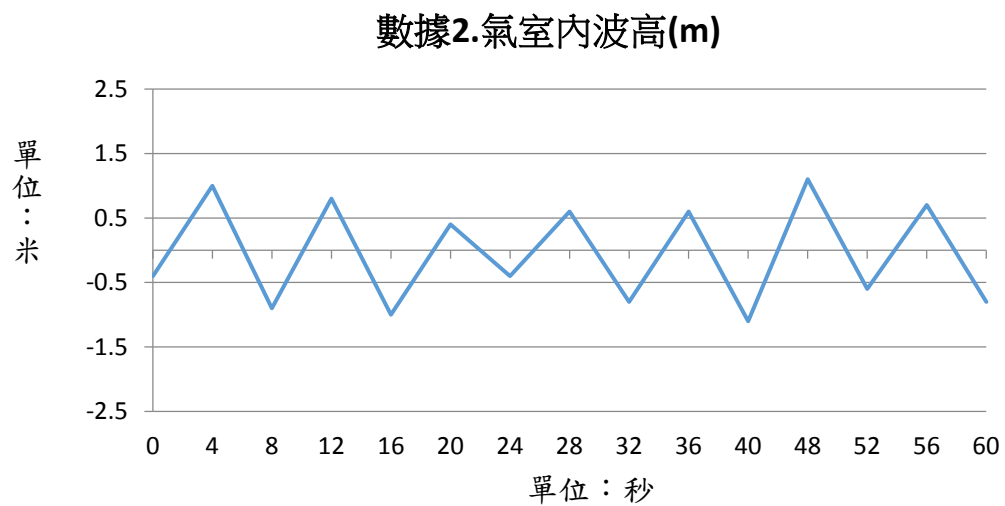
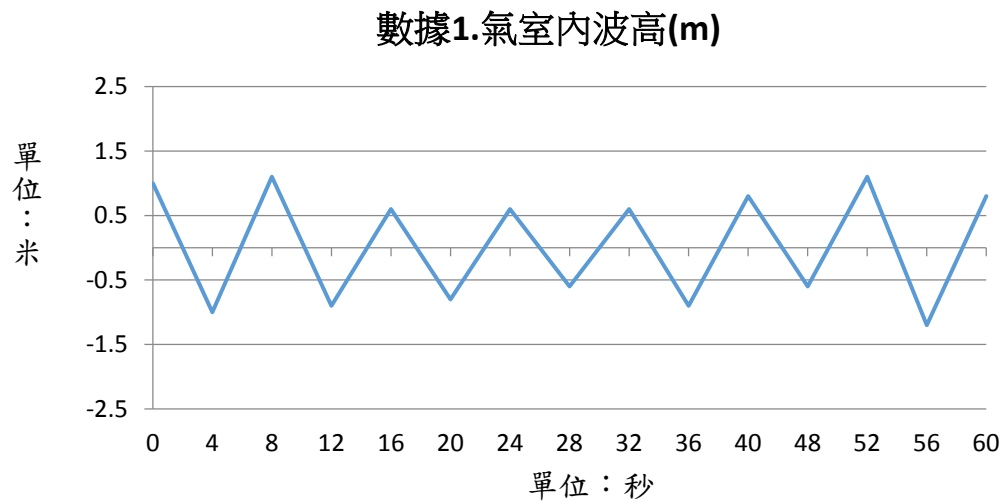
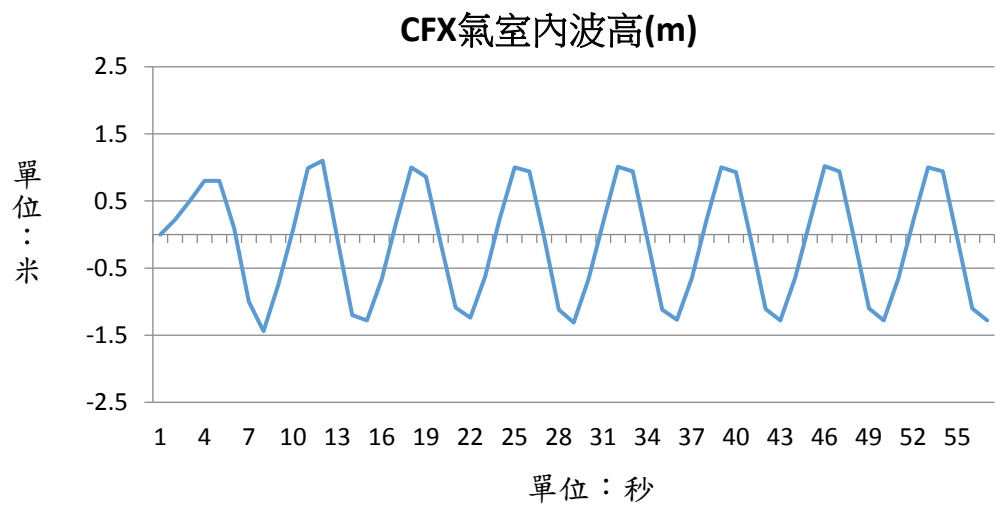


圖 5.15 CFX 模擬與 Goda 實驗數據比較圖(氣室內波高)

圖 5.14 及 5-15 可以比較 CFX 模擬與實驗數據之結果，下列表 5.1 及表 5.2 分別為模擬與實驗之氣室內壓力以及波高比較，因本計畫僅能依照 Goda 研究團隊報告結果圖，自行估出酒田港沉箱式波能轉換系統之氣室內壓力與波高之最大以及最小值，因此皆以極值平均來做討論，由下列表 5.1 及表 5.2 可以看出模擬之極值平均值會略大於實驗值，但最大及最小值為相當接近，由於模擬之波浪條件較為平穩，現場實驗之波浪條件較不一致，才會導致此結果，但整體結果算是相當吻合，由此可知、本計畫所採用之數值模擬方法，應能正確獲得本案結合波浪能量轉換系統複合防波堤之分析結果。

表 5.1 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)

表 5.2 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)

(註：極值平均值為將所有最大值及最小值取其絕對值後所計算之平均值)

5.2 波浪發電複合式防波堤於高雄港第一港口北堤之模擬

經由驗證本計畫與合田良實團隊之研究結果，可得知本計畫所採用之數值模擬方法具有相當之可靠度。因此進一步以本計畫案初期所規劃之研究方向，暫以高雄港第一港口之北側防波堤作為研分析標的，建立適合於臺灣港灣結構中發展之防波堤結合波浪能量轉換複合系統。研究構想中希望能於臺灣各大港中找出最適當位置來建構此一方案，但由於分析時必須取得防波堤之各項資料，如水深變化、波浪參數、堤防(目前以沉箱式防波堤為考慮重點)之設計資料等。在高雄港就近許多資料較易獲取之條件下，以其為案例分析之對象，經是當規劃及設計後首先進行數值方法模擬。

沉箱氣室內部壓力會影響沉箱氣室內部震盪水柱運動方程式，其中關鍵因素為沉箱氣室所涵蓋的海水面積與氣室出口面積之面積比，若面積比小則代表著沉箱氣室內部壓力小，亦代表著波浪由複合式防波堤外部傳遞至內部時其震盪水柱波高衰減量小，面積比小會導致氣室出口流速低、沉箱氣室所施予葉片的能量也減少；反之，若面積比大則代表著沉箱氣室內部壓力大，代表震盪水柱波高衰減量大，亦可能造成氣室出口流速降低、施予葉片能量減少。所以恰當的面積比在設計時必須加以考慮，使波浪發電複合式防波堤能擷取最多的波浪能量來產生最大的氣流速度施予葉片。

因此本計畫之氣室相關尺寸參考前人研究所給定之建議 (Paolo Boccotti, 2005；林, 2008；林, 2012)，再根據高雄港第一港口北堤之水深以及統計波浪條件來設計，本計畫暫以每三個氣室為一組，中間氣室有一出風口連接發電系統，而每個相鄰氣室之間有相通的氣流管道，波浪發電防波堤之沒水深度以及尺寸如圖 5.16 到圖 5.18 所示。

圖 5.19 為高雄港第一港口水深平面圖，考量高雄港防波堤之水深環境，初步假定波浪發電複合式防波堤之建置位置為高雄港第一港口之北側防波堤之靠海側，水深 7 到 9 公尺。本防波堤迎波面之幾何形狀與尺寸係參考高雄港第一港口之北側防波堤沉箱大小，以及港灣結構

物設計規範所給定。

5.2.1 案例分析模型

根據第五章之理論及前人相關研究，當沉箱長度固定時，其震盪空氣柱所施予葉片之最佳流體功率決定在波浪之週期。所以同樣的，若希望操作之波浪週期選定後，則可以設計沉箱長度以使在該波浪週期下之震盪空氣柱有最佳流速產生，也代表著沉箱氣室在該週期下能獲取最多波浪能量來產生流體功率施予葉片。本模擬之模型採用圖 5.18 之模型，沒水深度為 9.5 米，與酒田港之沉箱式波能轉換系統同樣是興建於堤防上，根據表 3.12，參考高雄港第一港口之 10 年回歸期夏季波浪條件，設計波高 $H_{1/3}$ 約為 1 米，週期約為 7 秒，其餘模擬之參數設定皆與上述小結之設置相同，其中本計畫在此模擬中加入了氣流速度之變化。

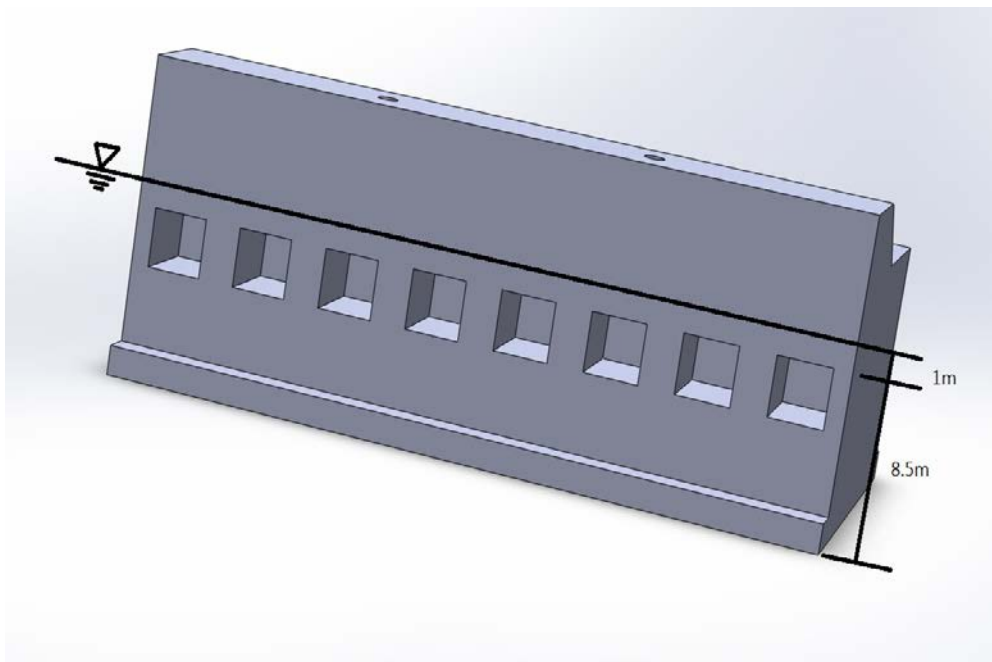


圖 5.16 波浪發電防波堤之沒水深度

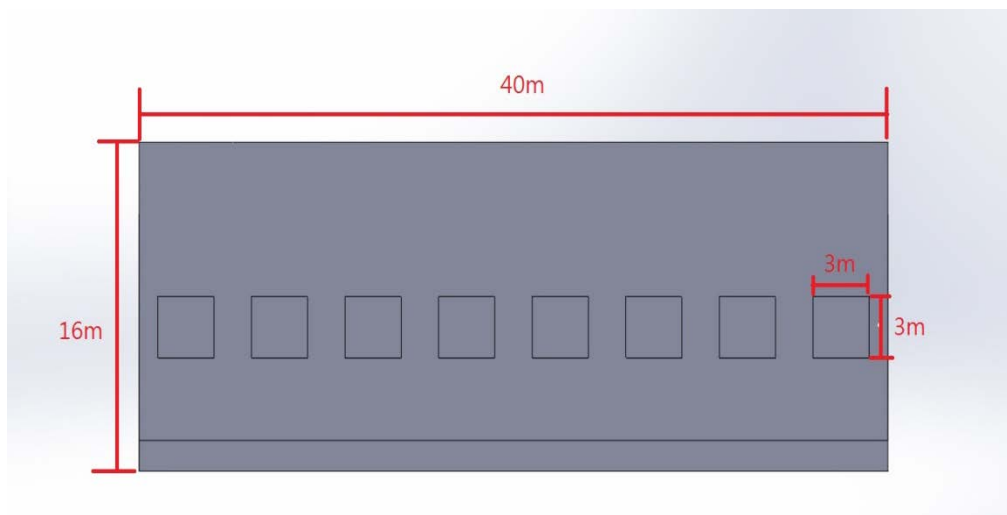


圖 5.17 波浪發電防波堤之尺寸(正視圖)

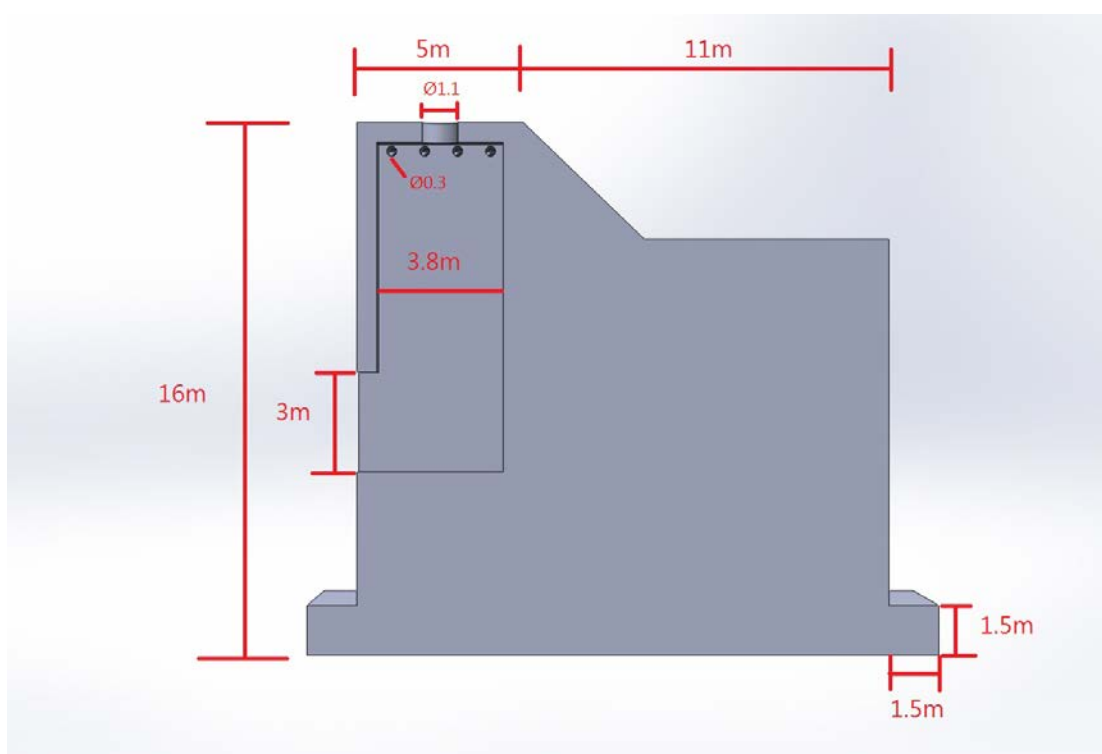


圖 5.18 波浪發電防波堤之尺寸(側視圖)

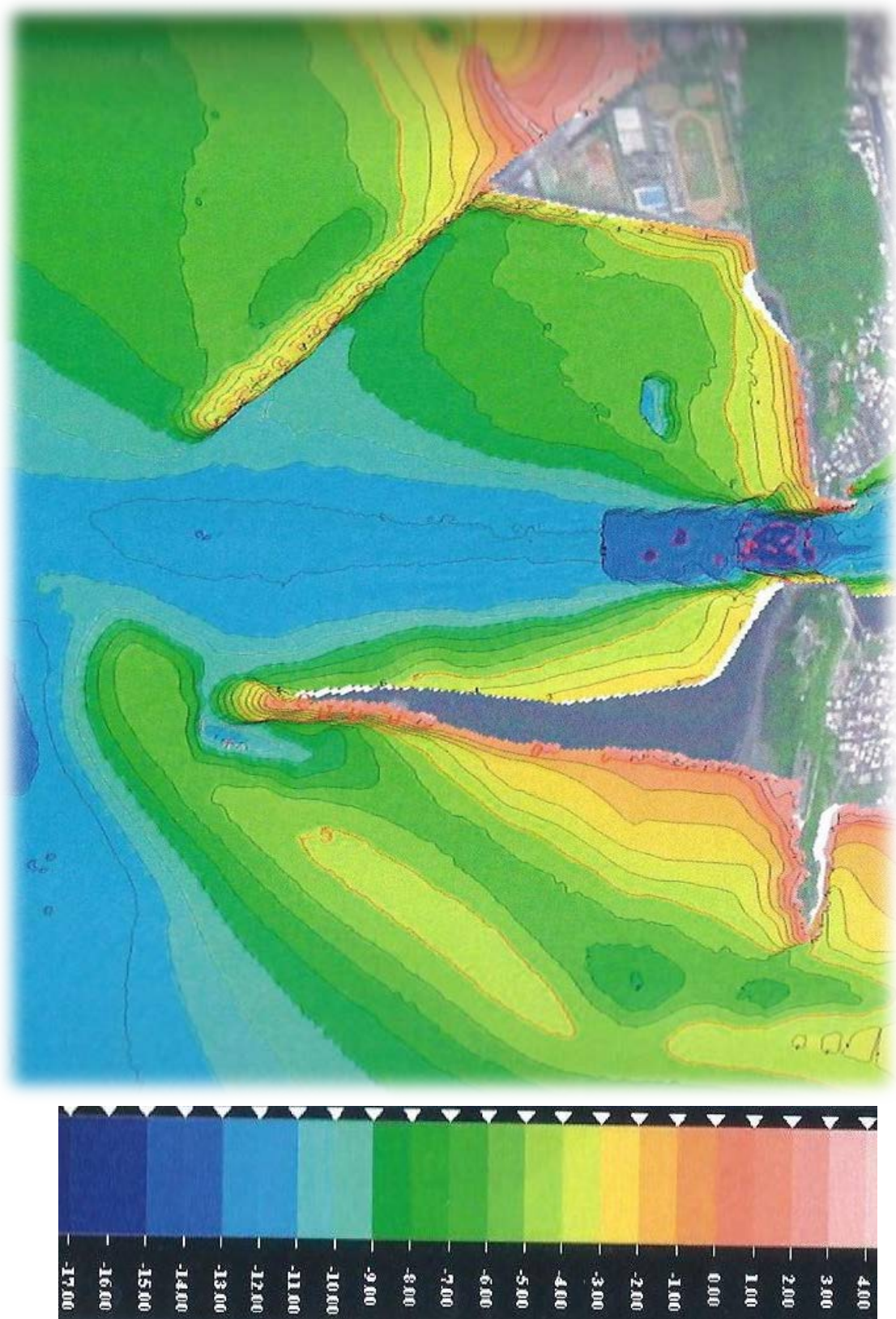


圖 5.19 高雄港第一港口水深平面圖

5.2.2 模擬結果分析

本計畫出不案例中，波浪發電複合式防波堤經數值演算後，得到氣室內之數據包括波高變化、壓力變化及氣流速度等。圖 5.20 可以看出模型沒水狀況，圖 5.21 可以看出氣室內水位以及空氣流速的變化。計算結果顯示氣室內部波高如圖 5.22 所示，內部波高最大值為 0.88 米，最小值為 -0.84 米，極值平均值為 0.65 米。本計畫設置 6 個壓力監控點，依序編號如圖 5.23 所示，其中單位為 Pa，圖 5.24 到圖 5.29 為每一監控點之壓力變化，其中編號 2 為氣室之開口，因此壓力明顯小於另外五個監控點。為方便比較每一監控點之大小，本計畫將圖 5.24 到 5-29 合併為圖 5.30，由圖 5.30 可明顯看出編號 5、6 明顯大於其他監控點，且值相當之接近，6 個監控點壓力平均值由大到小排列大致為 $5 > 6 > 1 > 4 > 3 > 2$ ，表 5.3 為所有監控點壓力之最大、最小以及平均值。與波浪發電複合式防波堤發電效率最為相關的因素為出風口之氣流速度，圖 5.3 為本計畫模型之出氣流速度度變化圖，絕對值之最大值為 33.3m/s，平均氣流速度約為 15m/s。

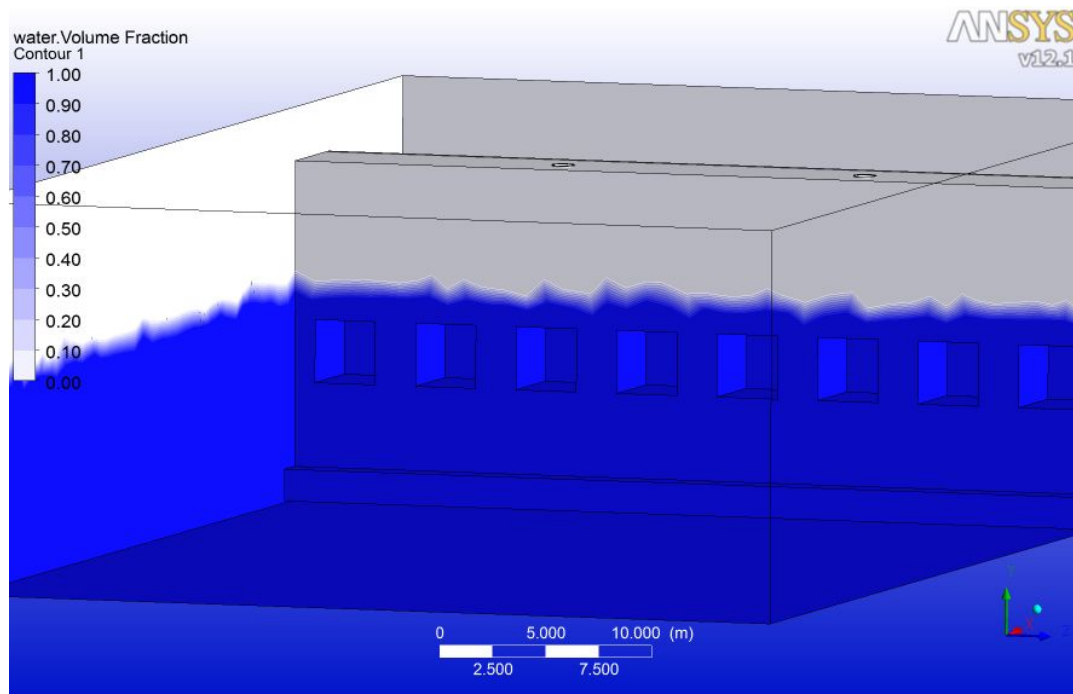


圖 5.20 模型沒水狀況

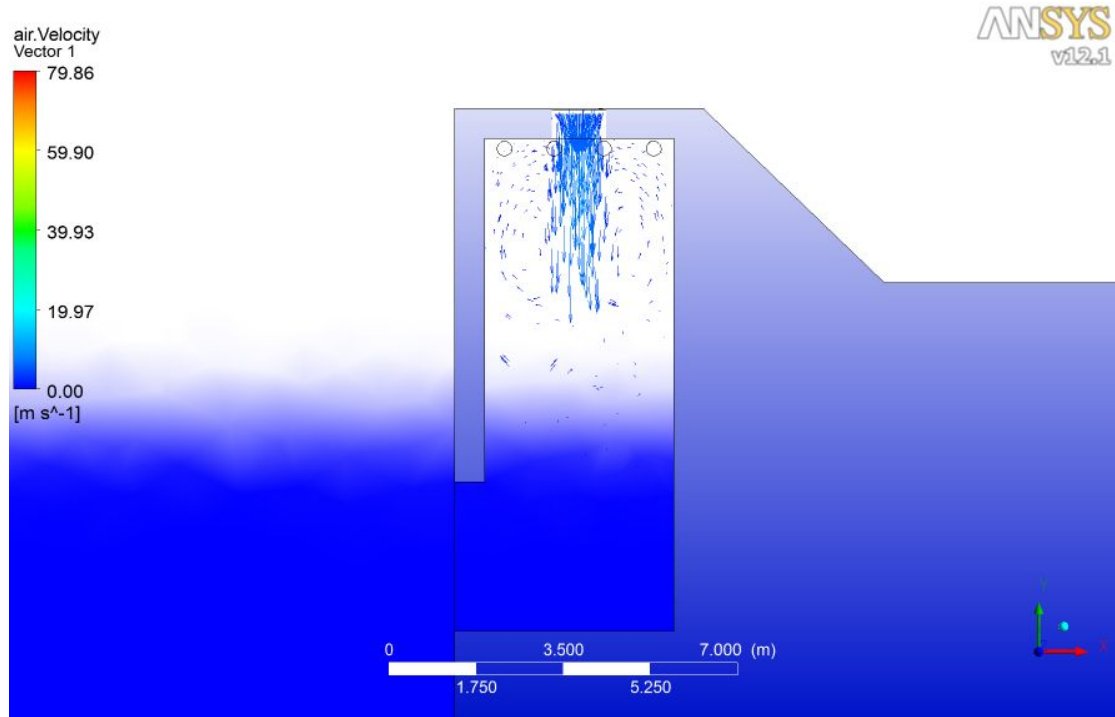


圖 5.21 氣室內水位以及空氣流速圖

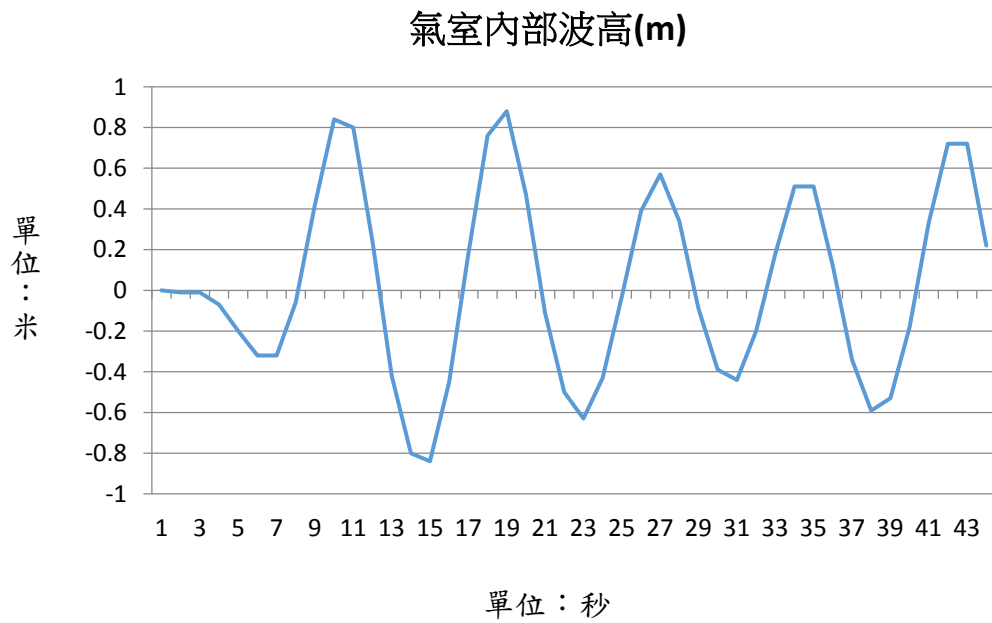


圖 5.22 氣室內部波高變化圖

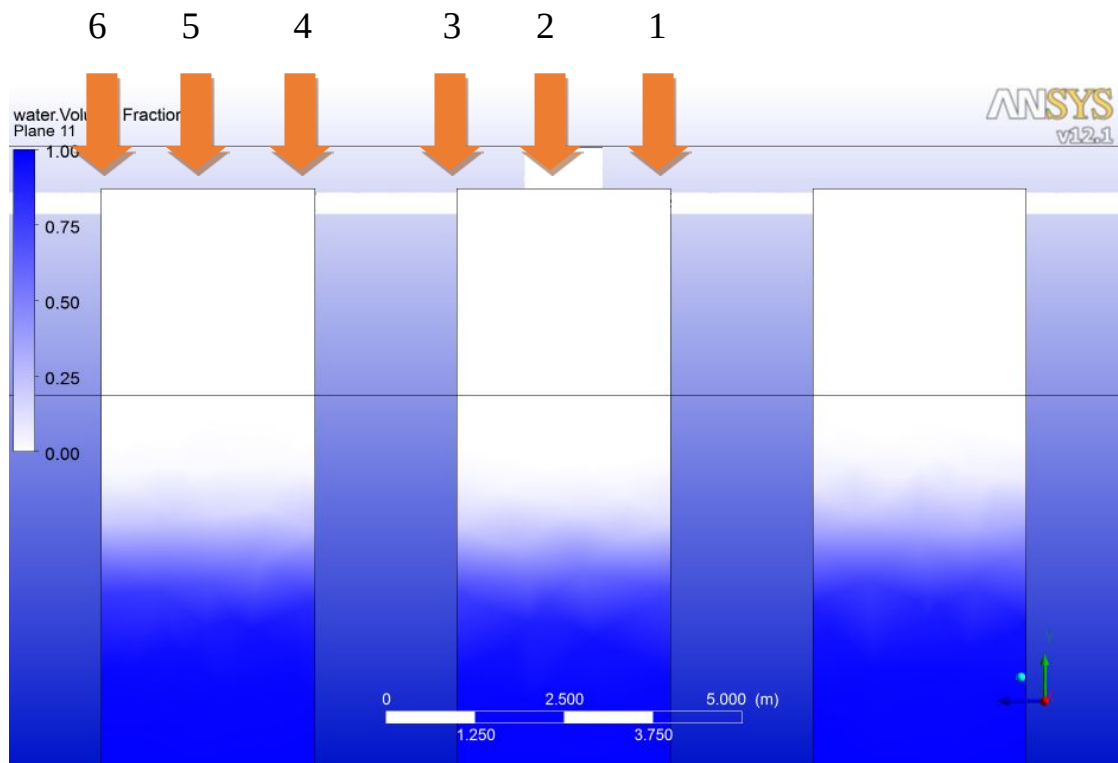


圖 5.23 監測點編號圖

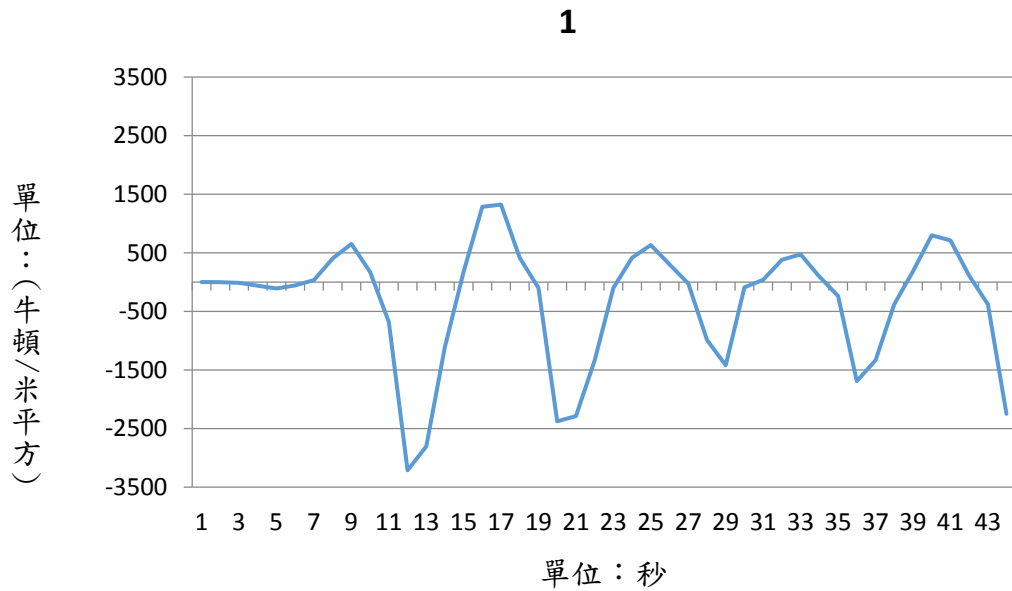


圖 5.24 監測點 1 之壓力變化圖

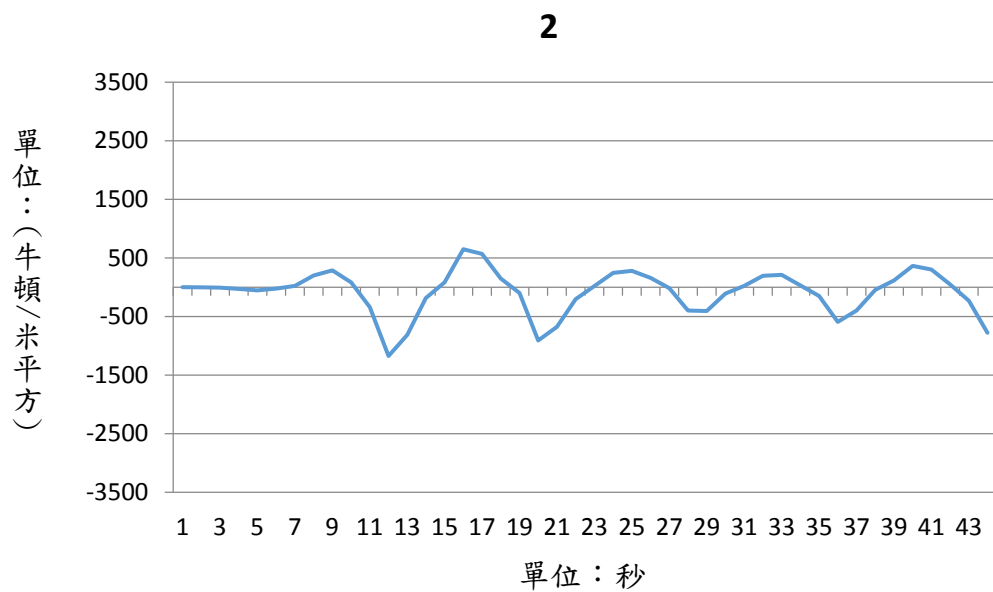


圖 5.25 監測點 2 之壓力變化圖

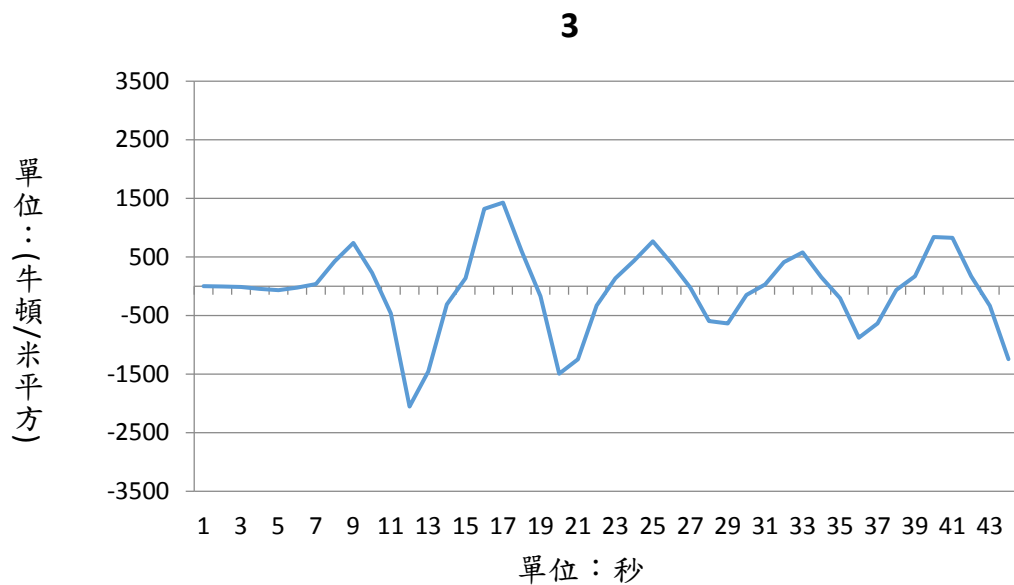


圖 5.26 監測點 3 之壓力變化圖

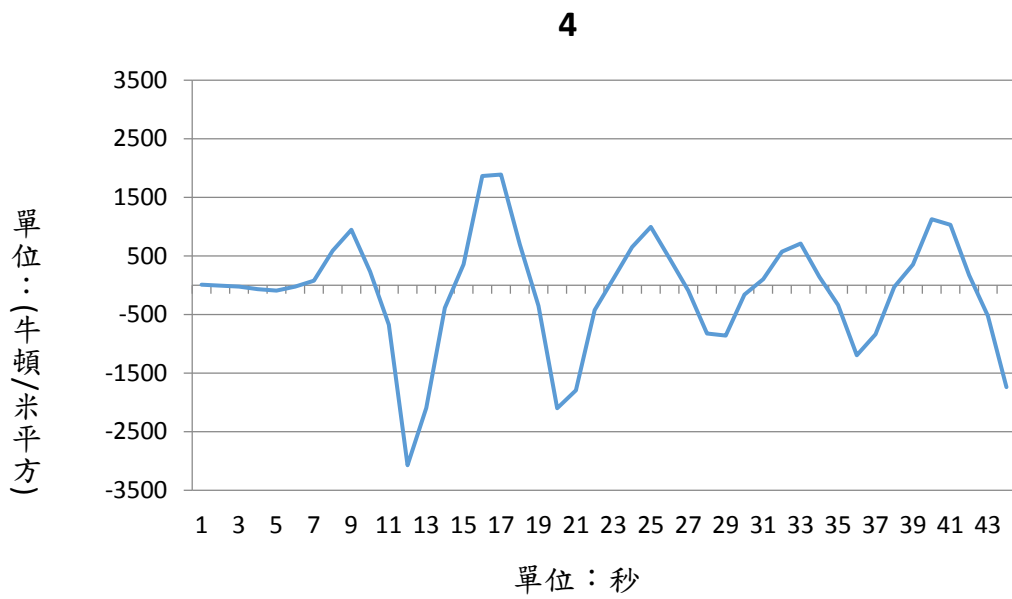


圖 5.27 監測點 4 之壓力變化圖

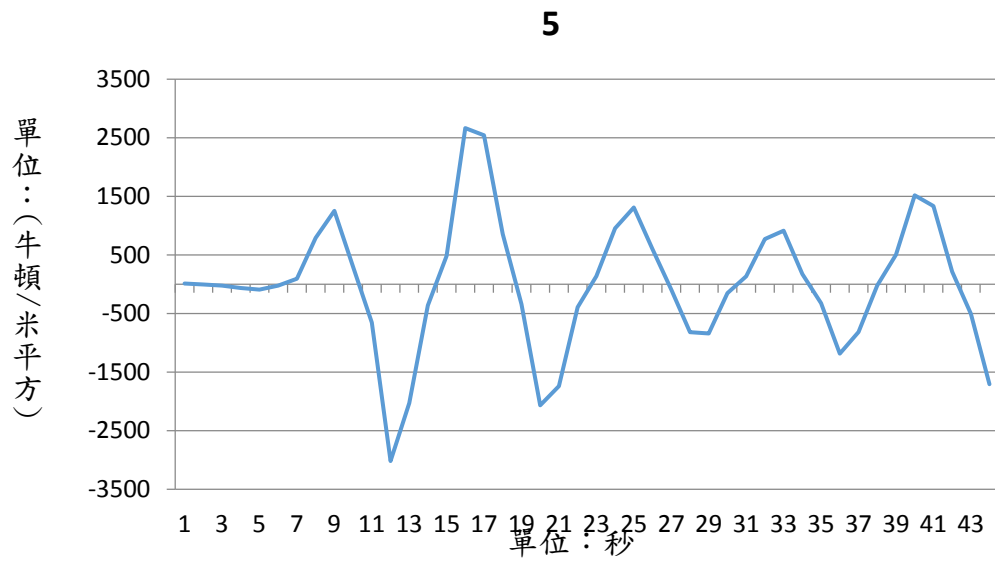


圖 5.28 監測點 5 之壓力變化圖

6

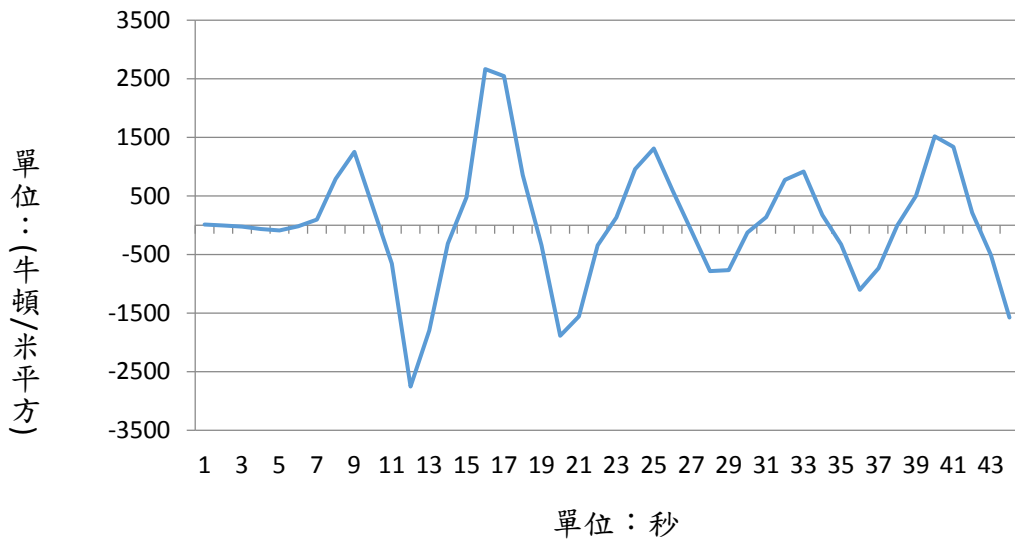


圖 5.29 監測點 6 之壓力變化圖

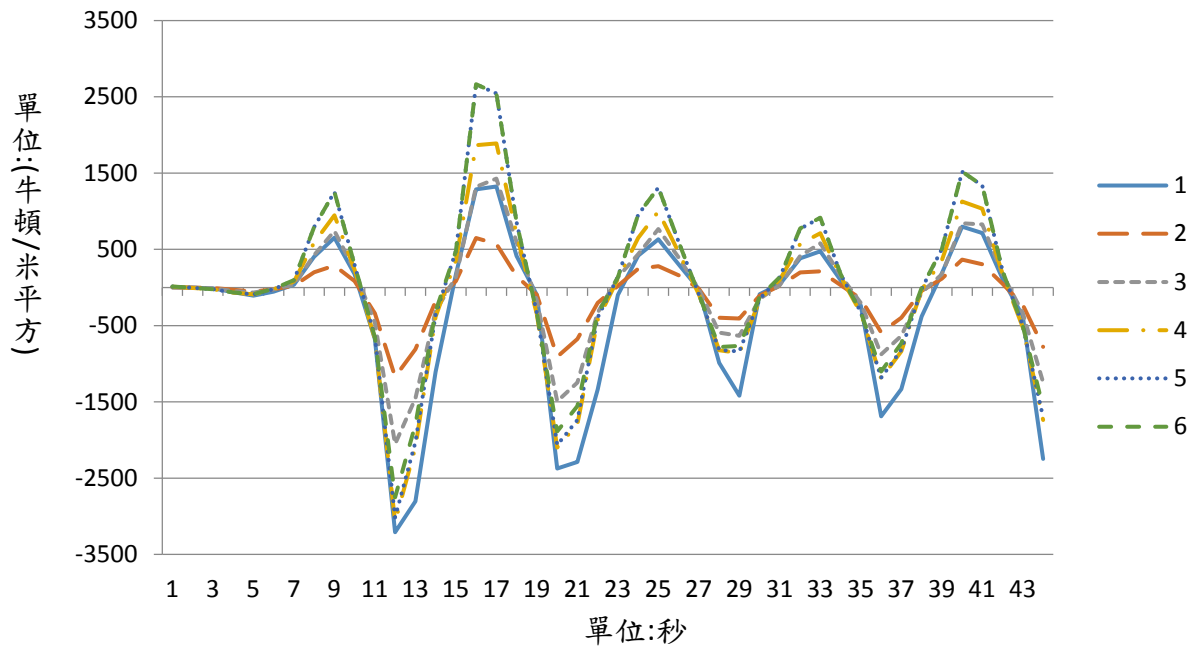


圖 5.30 綜合壓力變化圖

表 5.3 綜合壓力表			
	平均值	最大值	最小值
編號 1	719(Pa)	1325(Pa)	-3210(Pa)
編號 2	265(Pa)	648(Pa)	-1172(Pa)
編號 3	505(Pa)	1428(Pa)	-2053(Pa)
編號 4	700(Pa)	1889(Pa)	-3072(Pa)
編號 5	791(Pa)	2664(Pa)	-3017(Pa)
編號 6	759(Pa)	2665(Pa)	-2751(Pa)

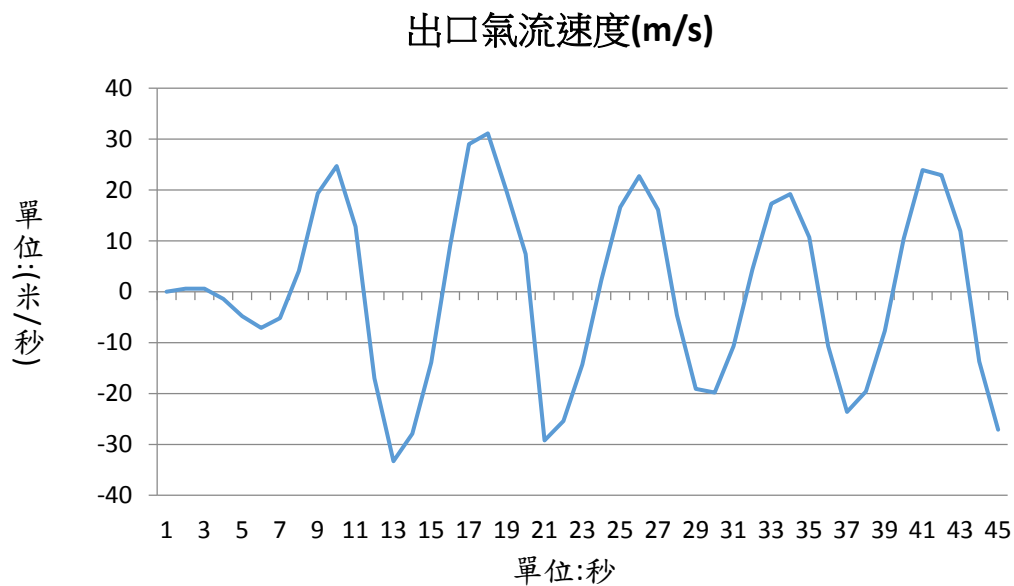


圖 5.31 出口氣流速度變化圖

5.3 波能轉換氣室 RC 結構設計

依照 94 年交通部港灣構造物設計基準修訂規範，本計畫結合防波堤之發電系統氣室可視為沉箱式(Caisson)防波堤設計。但其中氣室可視為既設沉箱結構之附屬結構，並不像其它封閉式擁有內部水位差，而背後也沒有厚重土壤壓力，故先只考慮前方波壓及自身載重，並排列其鋼筋於內增加其強度。

首先在設計圖中取其中一氣室及其周圍牆面，氣室後背即為沉箱結構，如圖 5.32 正視圖及圖 5.33 側視圖中，其中右側開口綠色選取區為計算範圍，分析時，頂部為頂板、左右兩邊為側牆、前方開口以外則為防波牆面來進行設計。整體氣室立體圖及內部空間則如圖 5.34 所示。

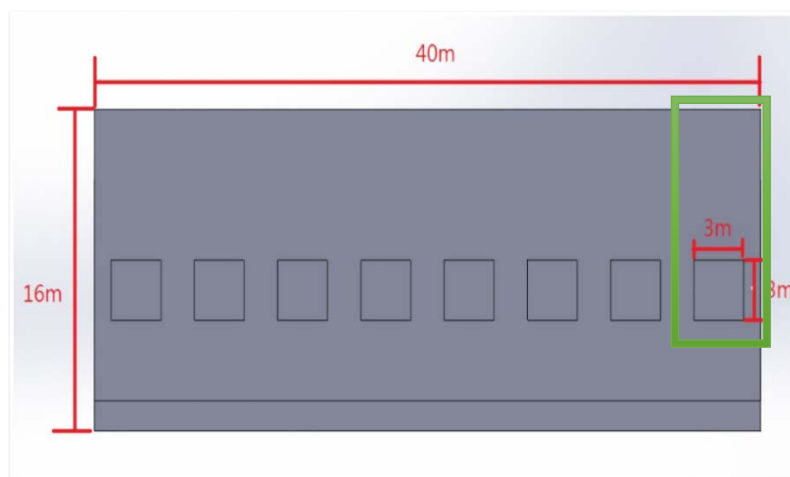


圖 5.32 正面模型圖

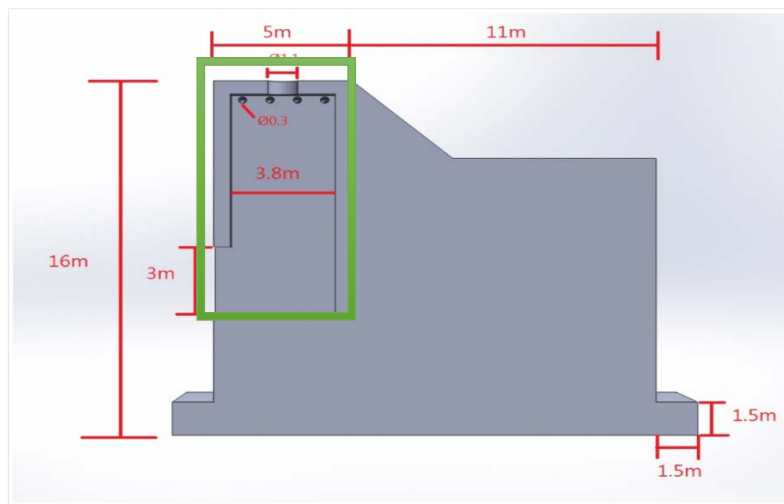


圖 5.33 側面模型圖

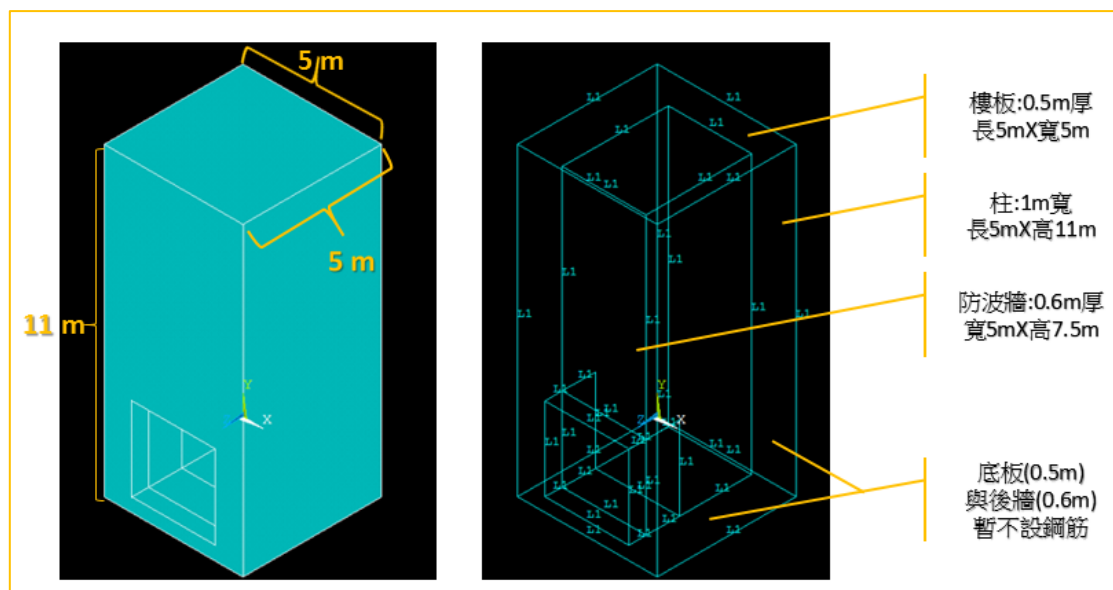


圖 5.34 模型說明

5.3.1 鋼筋排筋設計

本設計模式皆以中國土木工程學會所出版鋼筋混凝土學土木406-100 為設計基準。為了考慮剪力箍筋可以架設施工，樓板和防波牆板皆以雙排拉力控制設計，並皆排有剪力箍筋。柱方面將牆面視為側

撐，視為短柱設計。將除了自身以外設為向內載重，也設為雙排設計，但以抗壓承受力為主，並配有軸向螺箍。氣室鋼筋混凝土設計之配筋室示意圖，則如圖 5.35 及圖 5.36 所示。

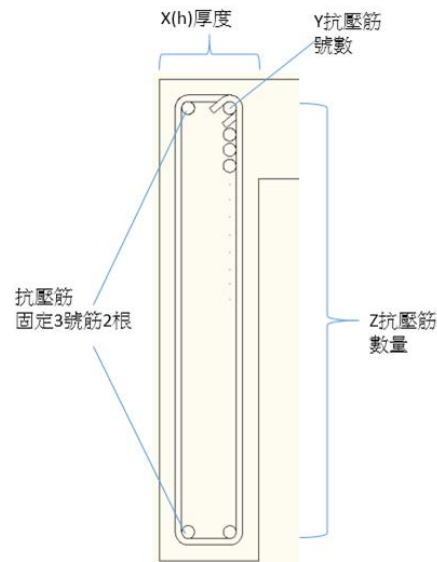


圖 5.35 牆面配筋示意圖

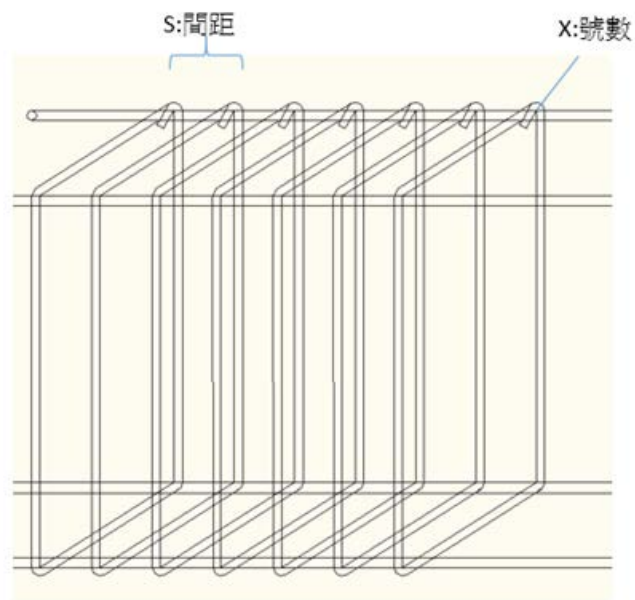


圖 5.36 剪力筋間距示意圖

5.3.2 鋼筋混凝土學計算

混凝土樑在拉力控制情形下力平衡方程式:

$$A_s f_y = 0.85 \beta_1 f'_c b c + A_s f'_s \dots\dots\dots (5-1)$$

其中壓力筋未降伏，故必須計算壓力鋼筋受力

$$f'_s = E_s \varepsilon_u \frac{c-d'}{c} \dots\dots\dots (5-2)$$

其中 E_s 為鋼筋模數係數

$$\Rightarrow A_s f_y = 0.85 \beta_1 f'_c b c + A_s E_s \varepsilon_u \frac{c-d'}{c} \dots\dots\dots (5-3)$$

兩邊乘 c ，移項得

$$\Rightarrow (0.85 * B_1 * f'_c * b) c^2 + (A'_s * E_s * \varepsilon_u - A_s * F_y) c - A'_s * E_s * e_s * d' = 0$$

解出 c 並把它代入力矩公式

$$M_n = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \dots\dots\dots (5-4)$$

即可得出結果。

混凝土剪力 $V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d$ ，經計算遠大於所受剪力。但所有樑總深皆大於 25cm，故以最小剪力筋配置斷面積

$$A_{v,min} = \frac{0.2 \sqrt{f'_c} b_w s}{f_{yt}} \dots\dots\dots (5-5)$$

其中 s 為鋼筋間距，依規範取 $[\frac{d}{2} \ 60\text{cm}]$ 中較小一項

柱分析:依規範其螺箍筋方程式:

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} \dots\dots\dots (5-6)$$

ρ_s : 斷面積比例

A_g : 柱全斷面積

A_{ch} : 箍筋外斷面積

主筋計算公式:

依載重計算:

$$P_n = 0.85f'_c ab + A'_s f'_s - A_s f_s \cdots \cdots \cdots (5-7)$$

依彎矩計算:

$$M_n = P_n e = 0.85f'_c ab \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - A_s f_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \cdots \cdots \cdots (5-8)$$

P_n : 載重

e : 偏心矩

以上述公式可做計算結果可得出下列結果:

1.2 自載重加上 1.6 活載重，假設其活載重為風力發電機 NACA0021，重量 480 公斤，混凝土比重為 2400kgf/m²，其計算式為:

$$=(480*250*1.6+2400*5*0.5*5*250*1.2)/0.85 \Rightarrow M_n=10814117.65 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$$

表 5.4 頂部樓板:X 軸-Y 向彎矩配筋

形式	鋼筋號數	鋼筋數
抗壓筋	3 號筋	2 根
抗拉筋	8 號筋	16 根
剪力箍筋	7 號筋	25 根

防波牆:

先以合田公式計算在波高最高=12m 及波長=105m 的情形下得出最大波壓=13.533KN/m²，以雙邊拘束樑計算得力矩 $M=7612312.5\text{kgf}\cdot\text{cm}$ ，依規範活載重再乘以一安全係數 1.6 得 $M_n=12179700.00\text{kgf}\cdot\text{cm}$ ，將樓板跟防波牆總載重加總起來為 130618.33kgf，帶入式(5-7)得出抗壓筋數，再帶入式(5-8)大於總力矩 $M_n=32654582.29\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 檢核 OK。

最後、依計算所得之配筋方式如表 5.5 及表 5.6 中所示，其中分別為前牆及隔間牆之配筋，而頂板配筋將受架設之發電系統影響，目前所假設使用之發電機則做為牆設計之用。

表 5.5 防波牆面: X 軸-Z 向彎矩配筋

形式	鋼筋號數	鋼筋數
抗壓筋	3 號筋	2 根
抗拉筋	8 號筋	16 根
剪力箍筋	9 號筋	19 根

表 5.6 隔間牆: Y 軸-X 向彎矩配筋

形式	鋼筋號數	鋼筋數
抗壓筋	18 號筋	16 根
抗拉筋	3 號筋	2 根
剪力箍筋	18 號筋	34 根

5.4 沉箱式防波堤結合波能轉換系統之結構安全分析

5.4.1 作用在直立岸堤之最大波力估算

依據港灣構造物設計基準修訂^[29](交通部運輸研究所, 2005)，作用於直立壁之最大波力分布可依合田公式計算，故本計畫在結構分析時之波力估算採取合田公式，合田公式之算法於下頁介紹。

由於波浪發電複合式防波堤於迎波面設置開孔，有別於一般防波堤全部阻擋波浪，本計畫目前初步計算波浪作用力時，僅將開孔處所受之波壓力扣除，並未探討進入沉箱內之波浪對結構物造成之壓力^[28]。由表 3.17 得知高雄颱風 50 年回歸期之入射波，考慮本波浪發電防波堤之迎波面方向，本計畫探討防波堤正向入射之波浪 WNW 波向所造成之影響，其中波高應採用最大波高 $H_{\max} = 1.8H^{\frac{1}{3}}$ 計算，其值約為 9.5 米，週期設定為 10 秒，波長則參考港灣構造物設計基準修訂所給之水深、週期、波長表之建議取用為 75 米。

本計畫假設無護基之防波堤置於水平底床上，故 $h=d$ ，因此海底面波壓 P2 與堤趾波壓 P3 相等(位置如下圖合田公式所示)，波浪作用方向假設與防波堤垂直，入射角 $\beta=0$ 。最大波浪作用力位於複合式防波堤與靜水面交接處，大小約為 94,955(N/m²)。

合田公式表示如下：

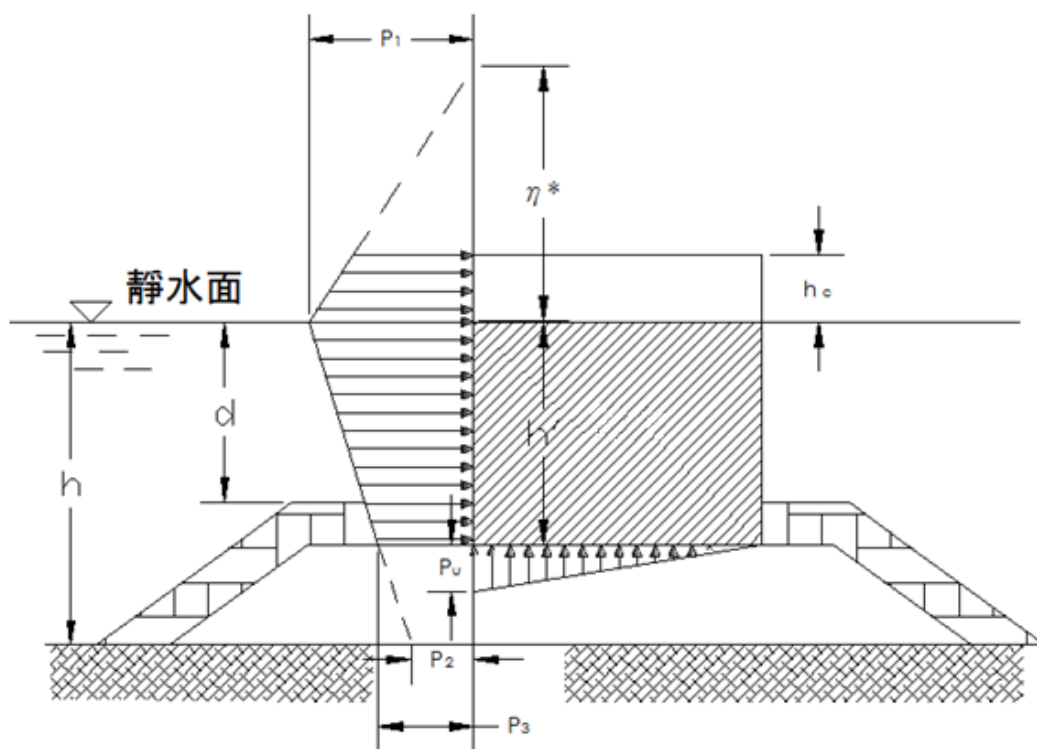


圖 5.37 結合波能轉換系統之沉箱受力圖

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

$$P_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta)\omega_0 H_d$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$P_3 = \alpha_3 P_1$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L}} \right]^2$$

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

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

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 ：設計坡高(m)

L ：水深 h 處之設計計算所使用之波長(m)

$\min(a,b)$ ：a 或 b 較小者

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

5.4.2 模擬軟體介紹：

本計畫進行數值模擬分析之軟體 ANSYS 是由美國 ANSYS 公司推出的大型有限元分析軟件，該公司創建於 1970 年，它開發並在全球各地銷售工程模擬軟件和技術，這些產品和技術被多種行業的工程師和設計師採用，包括航天、汽車、製造、電子和生物醫學等各個領域。

ANSYS 實際應用於各種工程中領域之分析中，根據不同學科和工程應用共分為以下幾部分，包括靜力分析、動力學分析、非線性分析、優化設計、熱分析與耦合場、計算流體動力學和電磁分析，以及疲勞分析等。ANSYS 它也可作為從事機械製造、石油化工、輕工、造船、

航空航天、汽車交通、電子、土木工程、水利、鐵道、日用家電，以及生物醫學等一般工業及科學研究的工程技術人員使用。例如美國之福特汽車、通用汽車、波音飛機製造公司以及航太總署等，均使用該軟體進行相關之應力分析。

ANSYS 軟體主要包括三個部分：前處理 Block，分析計算 Block 和後處理 Block。前處理提供了一個強大的實體建模及網格劃分工具，用戶可以方便地構造有限元模型；分析計算包括結構分析（可進行線性分析、非線性分析和高度非線性分析）、流體動力學分析、電磁場分析、聲場分析、壓電分析以及多物理場的耦合分析，可模擬多種物理介質的相互作用，具有靈敏度分析及優化分析能力；後處理可將計算結果以彩色等高線顯示、梯度顯示、向量顯示、粒子運動軌跡顯示、立體切片顯示、透明及半透明顯示（可看到結構內部）等圖形方式顯示出來，也可將計算結果以圖表、曲線形式顯示或輸出。本計畫的使用步驟為：

1. 導入模型：

本計畫先以 solid work 建置模型(圖 5.3 到 5.4)，再導入至 ANSYS 內。

2. 設置材料參數：

根據混凝土結構設計規範修正規定(內政部營建署, 2011) 暴露於氯離子環境有鋼筋腐蝕之虞者常重及輕質混凝土之最低規定強度為 $350(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ ，再根據其規範計算出彈性係數為 $30(\text{KN}/\text{mm}^2)$

3. 設置拘束以及載荷：

結構分析時假設，拘束面為波浪發電複合式防波堤之底面及右側與整體防波堤連結處，荷載為透過合田公式計算之波力分布，如圖 5.37 及圖 5.38 所示。

4. 網格劃分：

網格劃分則依據分析精確度及是否有局部放大觀察之需求而

建置，由於網格結點是有限元模型最基本的組成元素，要建立有限元模型，首先生成結點，再由結點連接成單元。

5. 進行求解:

查看分析結果，導出結果數據判斷結果之合理性。

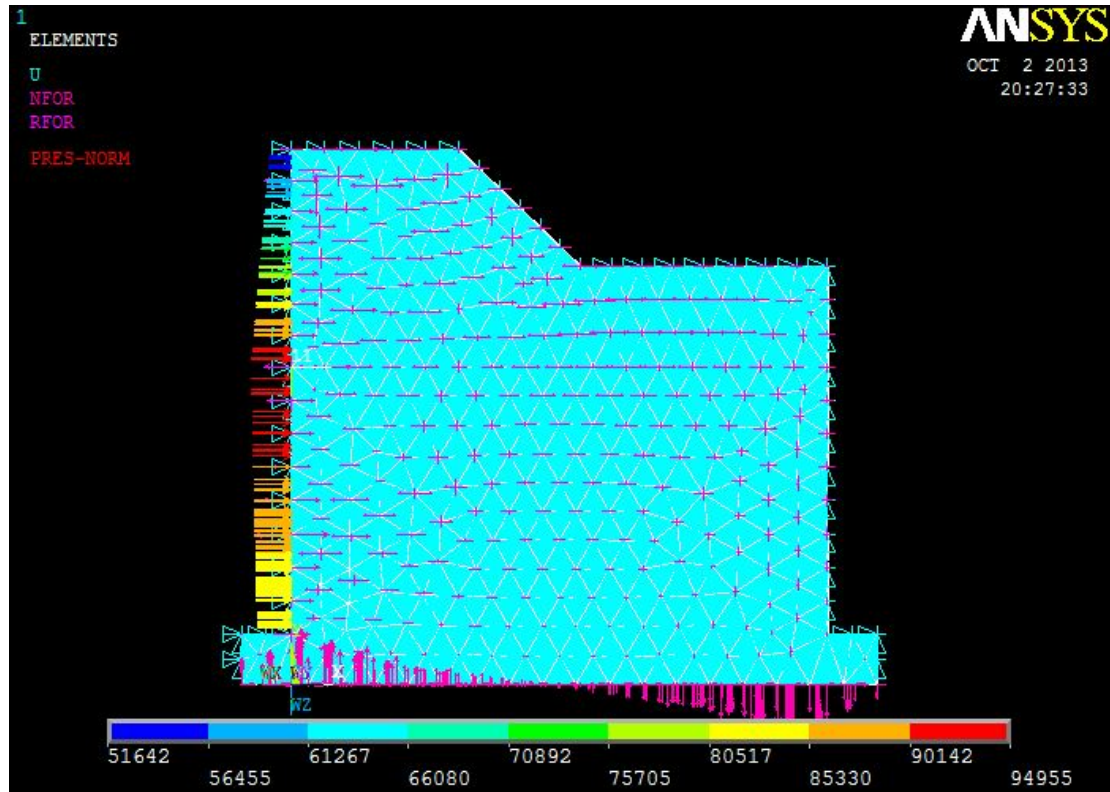


圖 5.38 波力分布

5.4.3 受力變形分析

圖 5.39 至 5.40 顯示 WNW 波向作用下，結合波能轉換系統防波堤結構之變形情形(單位為公尺)，圖 5.42 顯示各方向之位移最大值，UX 為入紙面方向，最大值約為 0.153mm，UY 向上為正，最大值約為 0.055mm，UZ 向右為正，最大值約為 0.023mm，最大位移量發生在圖 5.39 中的 MX 點，其值約 0.162mm；根據內政部營建署”混凝土結構設

計規範修正規定”^[30]混凝土最外受壓纖維之極限應變規定為 0.003，雖然從許多相關文獻不同試驗之結果顯示，混凝土之最大破碎壓應變可自 0.003 至 0.008，但一般配比與材料之混凝土在極限彎矩時之應變約在 0.003 至 0.004 間，本波浪發電複合式防波堤壁厚給定為 600mm，換算後最大應變約略為 0.00027，營建署規定之 0.003 約為其 11 倍。顯示在合田公式求得之波浪外力作用下，結合波能轉換系統防波堤結構中混凝土材料之變形相當小，經求出之應變值亦遠小於混凝土材料允許之最大應變值。

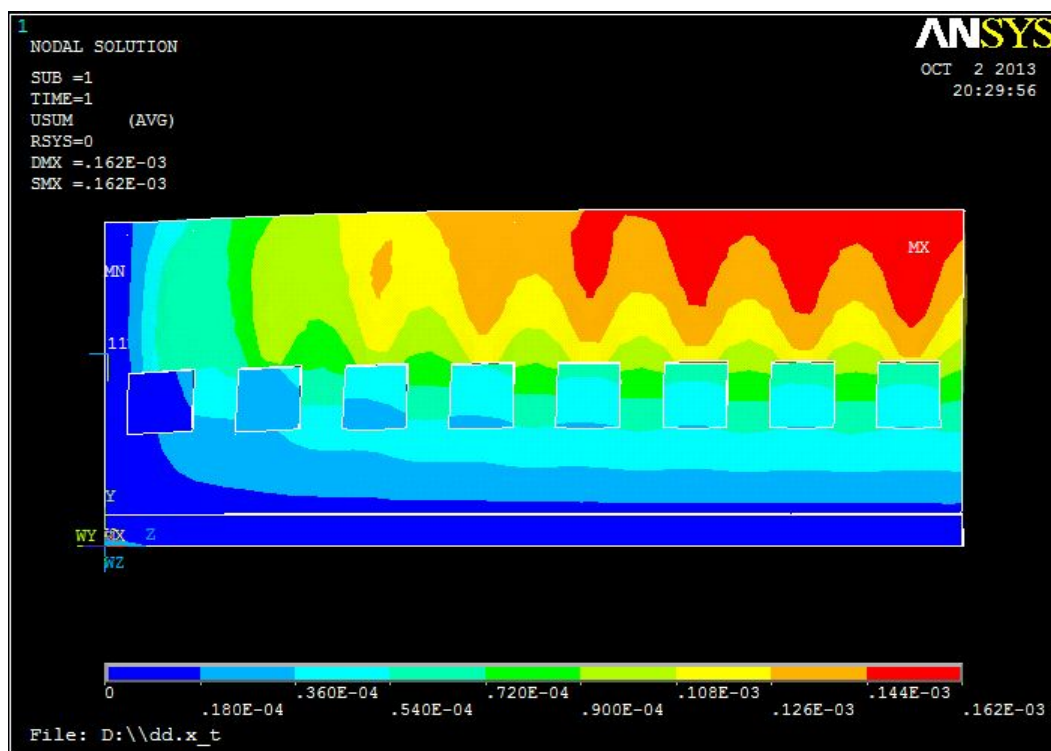


圖 5.39 ANSYS 模型變形情形：正視圖

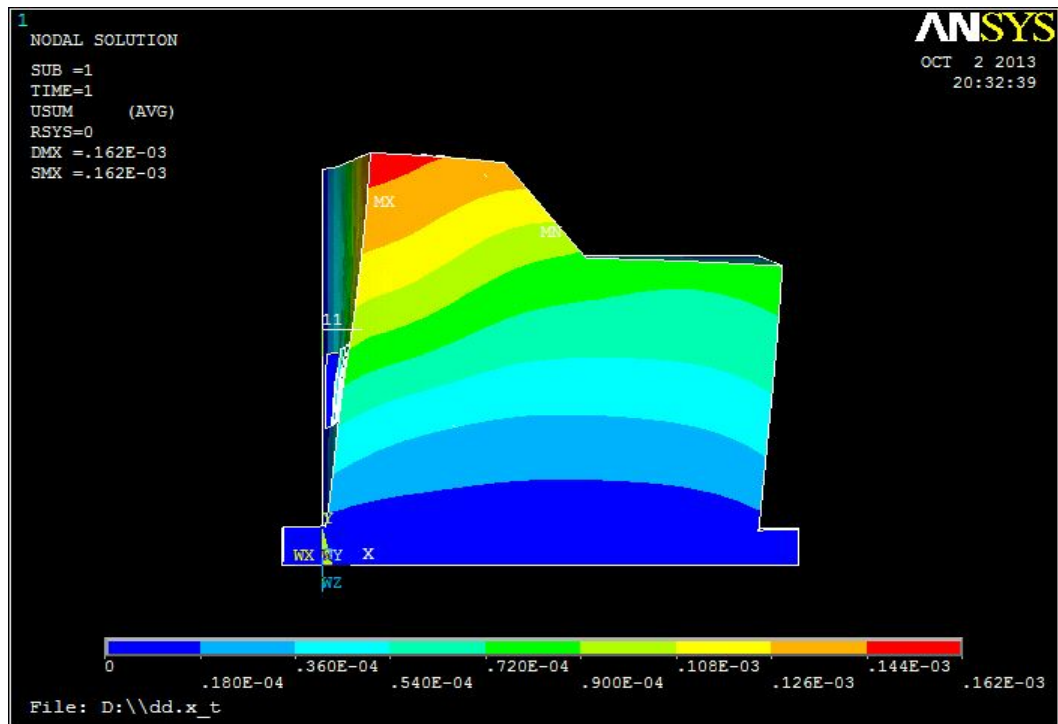


圖 5.40 ANSYS 模型變形情形：側視圖

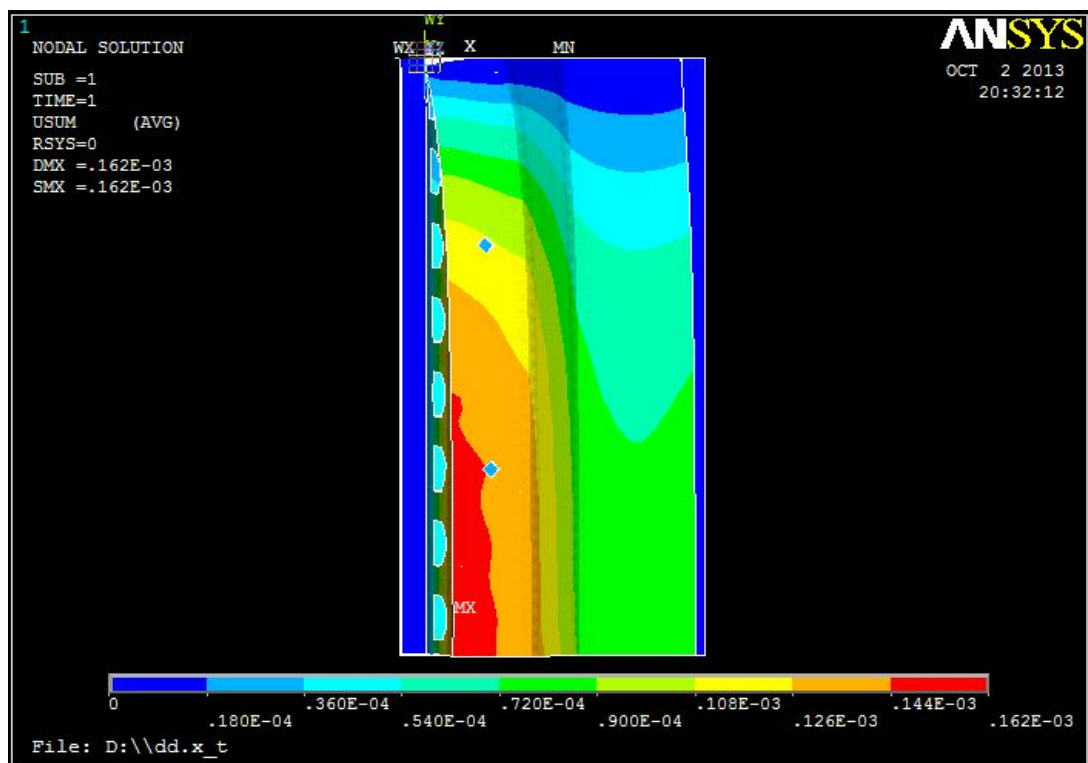


圖 5.41 ANSYS 模型變形情形：上視圖

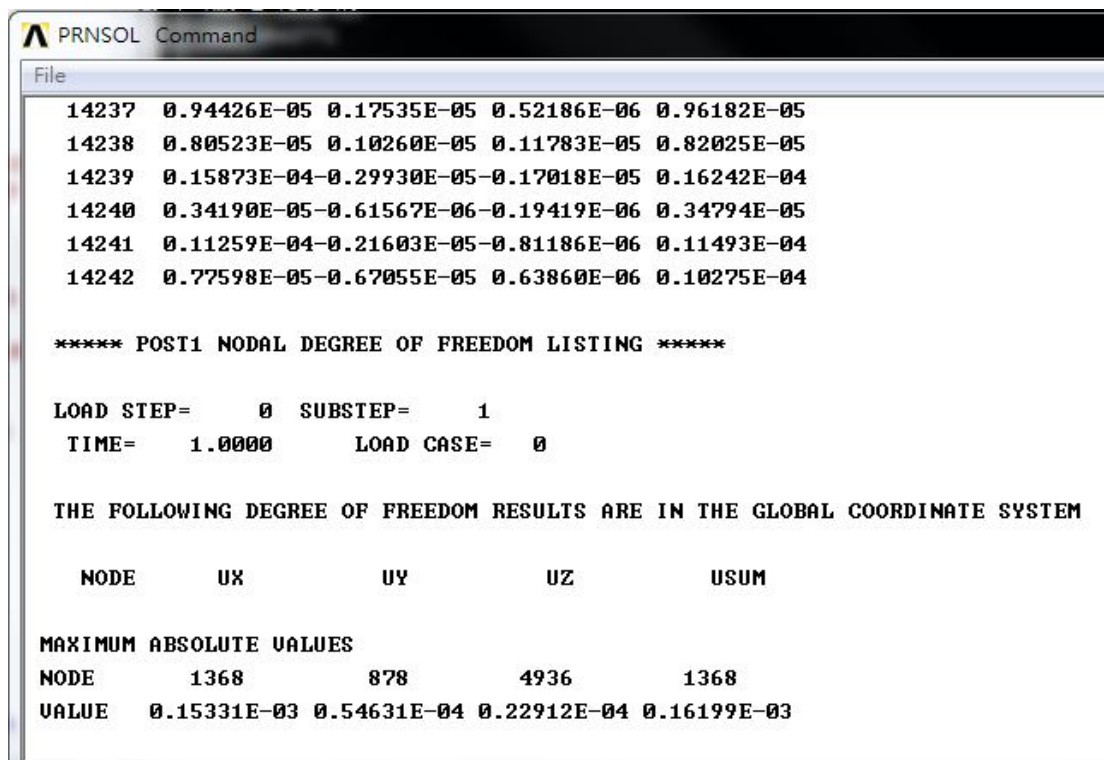


圖 5.42 ANSYS 分析結果：數據

5.4.4 Von Mises stress 破壞應力分析

「Von Mises 應力」 σ_{Mises} 之數學式為

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_a - \sigma_b)^2 + (\sigma_b - \sigma_c)^2 + (\sigma_c - \sigma_a)^2}{2}}$$

其中 σ_a 、 σ_b 及 σ_c 為材料點的主應力。於「畸變能破壞理論」中，主要以 Mises 應力來判別材料是否發生破壞。若 Mises 應力小於或等於降伏應力，材料為安全，反之則為破壞。

由於混凝土材料屬於脆性材料，脆性材料並無明顯的降伏現象，脆性材料之絕對最大的主應力(正向應力)若達到拉伸試驗之破壞強度時即會破裂，因此若結構是由脆性材料製成，必須使用其他準則來判斷材料是否破壞，例如最大正向應力準則。

本計畫當初在 ANSYS 內建模時 ELEMENT TYPE 就採用 SOLID 65(混凝土元素)，因此 Von Mises 分布即相等於 1st(σ_1), 2nd(σ_2), 3rd(σ_3)之主應力分布。圖 5.43 至 5.45 為 Von Mises 分布情形，圖 5.46 顯示各主應力以及 von Mises 之最大值，第一主應力最大值約為 356,300(N/m²)，第二主應力最大值約為 61,873(N/m²)，第三主應力最大值約為 10,624(N/m²)，其最大 von Mises 發生在圖 5.45 中的 MX 點，其值約為 490290(N/m²)。

混凝土之劈裂抗拉強度需依據 CNS 3801 試驗來得知^[30]，但常重混凝土抗拉強度一般約為抗壓強度開根號的 0.8 倍 ($0.8\sqrt{f_c}$)，因此由本計畫當初給定之混凝土抗壓強度可約略推出抗拉強度約為 4.7MPa，約為破壞應力之 9.5 倍。

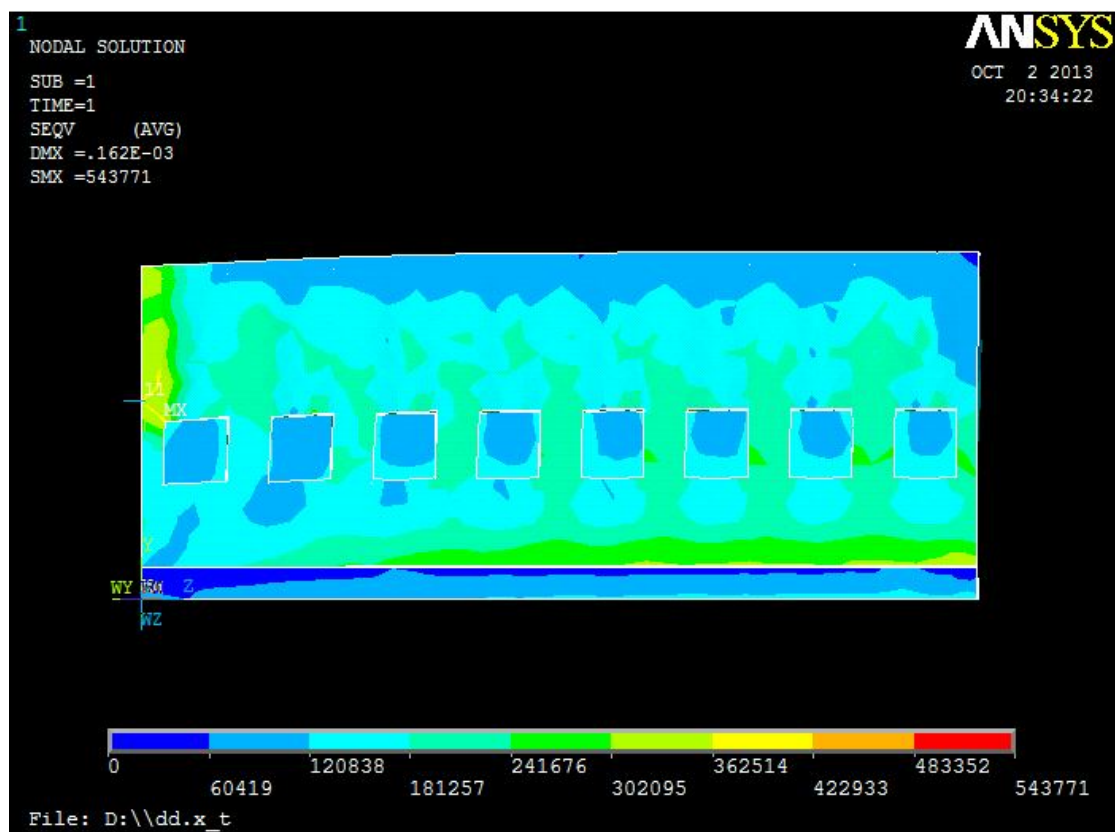


圖 5.43 Von Mises 破壞應力分析：正視圖

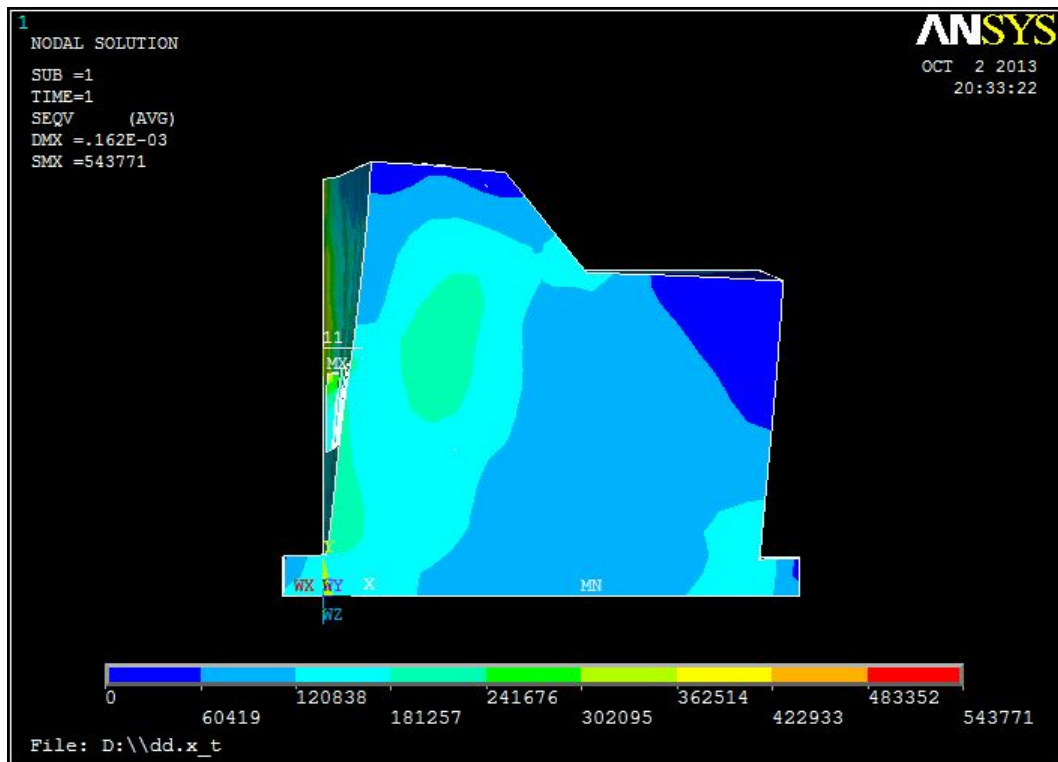


圖 5.44 Von Mises 破壞應力分析：側視圖

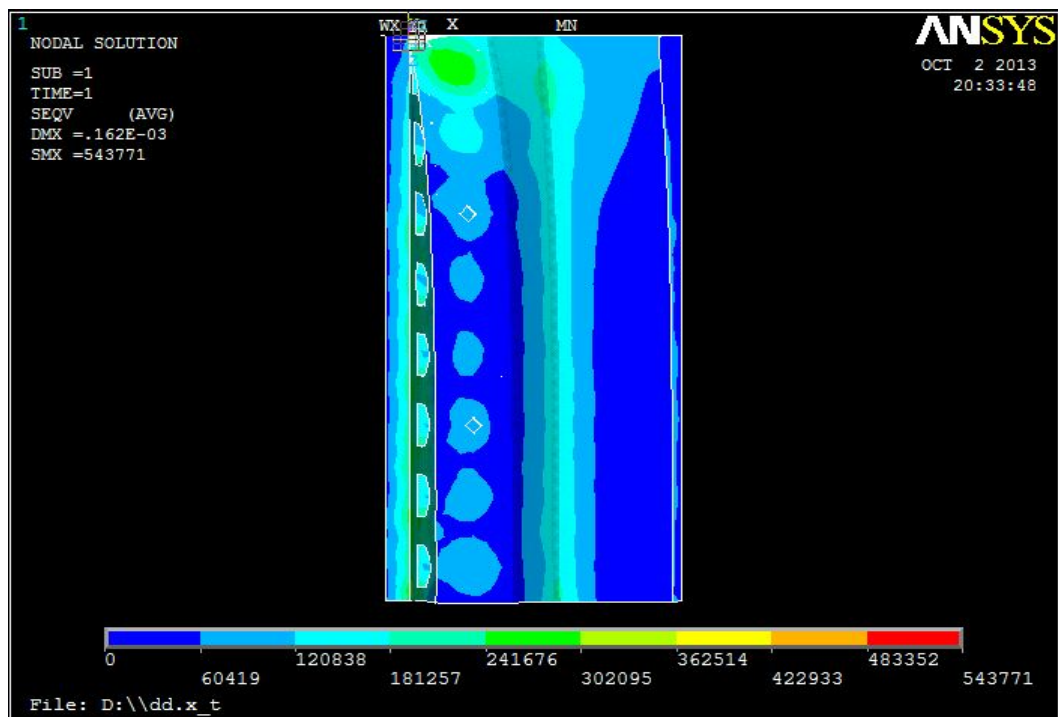


圖 5.45 Von Mises 破壞應力分析上視圖

PRNSOL Command					
File					
7508	45284.	-545.16	-78888.	0.12417E+06	0.10876E+06
7509	49021.	-1030.5	-72647.	0.12167E+06	0.10592E+06
7510	54594.	-1038.4	-69034.	0.12363E+06	0.10724E+06
7511	62302.	-982.34	-68964.	0.13127E+06	0.11370E+06
7512	72140.	-194.25	-70147.	0.14229E+06	0.12323E+06
7513	0.11222E+06	6170.3	-3962.4	0.11619E+06	0.11147E+06
7514	3365.1	-3643.5	-66994.	70359.	67130.
7515	76961.	-1170.7	-0.10153E+06	0.17849E+06	0.15498E+06
7516	3491.1	-618.21	-28357.	31848.	30006.
7517	0.13103E+06	25092.	-0.29231E+06	0.42334E+06	0.38157E+06
7518	0.11558E+06	30494.	-0.23131E+06	0.34689E+06	0.31314E+06
MINIMUM VALUES					
NODE	1287	1229	2180	5687	5687
VALUE	-25499.	-73125.	-0.33835E+06	0.0000	0.0000
MAXIMUM VALUES					
NODE	1153	2939	5933	5132	5132
VALUE	0.35630E+06	61873.	10624.	0.56197E+06	0.49029E+06

圖 5.46 Von Mises 破壞應力分析數據

5.5 波能轉換氣室結構力學有限元素分析：

除了整體結構之安全分析之外，由於既設之沉箱附加了波能轉換系統之氣室，沉箱之安全影響為第一優先考慮，如前結之分析所示，佳射氣室後之沉箱並未產生負面之影響，而對於氣室之結構安全也必須詳細分析。本計畫中對於氣室結構安全，除了在鋼筋混凝土配筋分析中，以結構靜力法分析之外，並已前節所用之相關軟體，特別針對混凝土材料之結構安全進行分析。

圖 5.35 及圖 5.36 為鋼筋排筋示意圖，依照計算設計結果排列，ANSYS 程式分析時每根鋼筋以 Bean188 分割為 1，混凝土以 Concrete65 電腦自動估計適當大小分割約 28~30 立方公分為一元素。在邊界條件 X 向(開孔左右)未任何拘束，只有後方(Z=0)與底部(Y=0)做拘束，並前方 Z=500 處設波壓抗壓，其分析結果如圖 5.47 至圖 5.53:

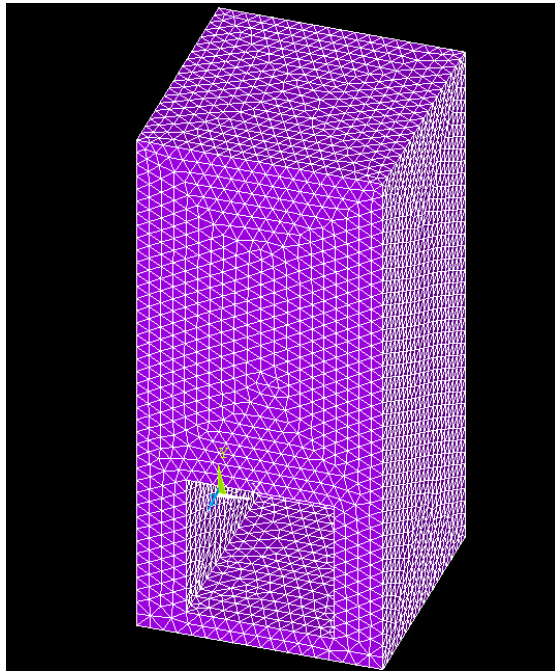


圖 5.47 分割大小

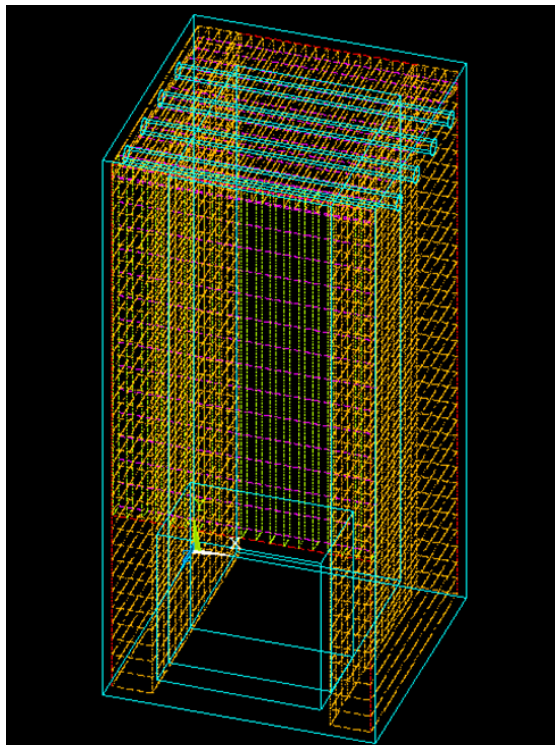


圖 5.48 鋼筋排列整體圖

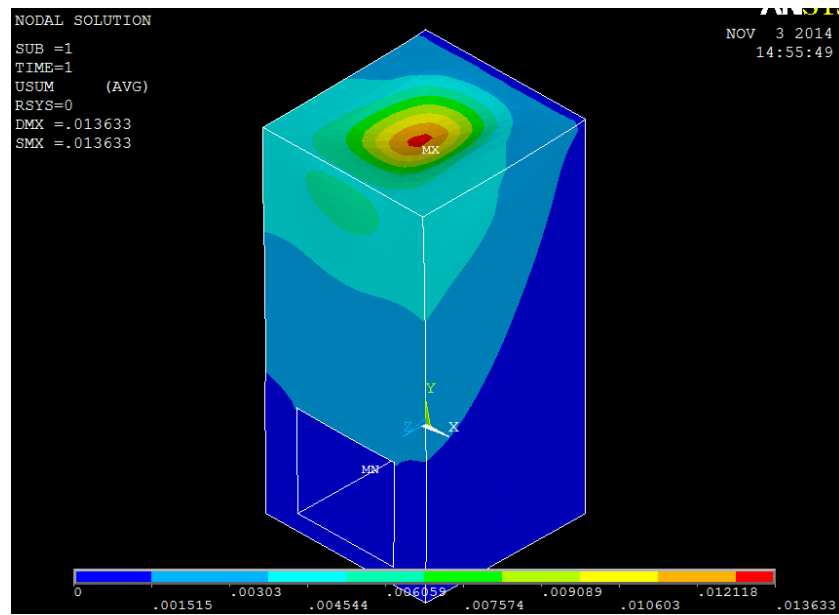


圖 5.49 整體變位

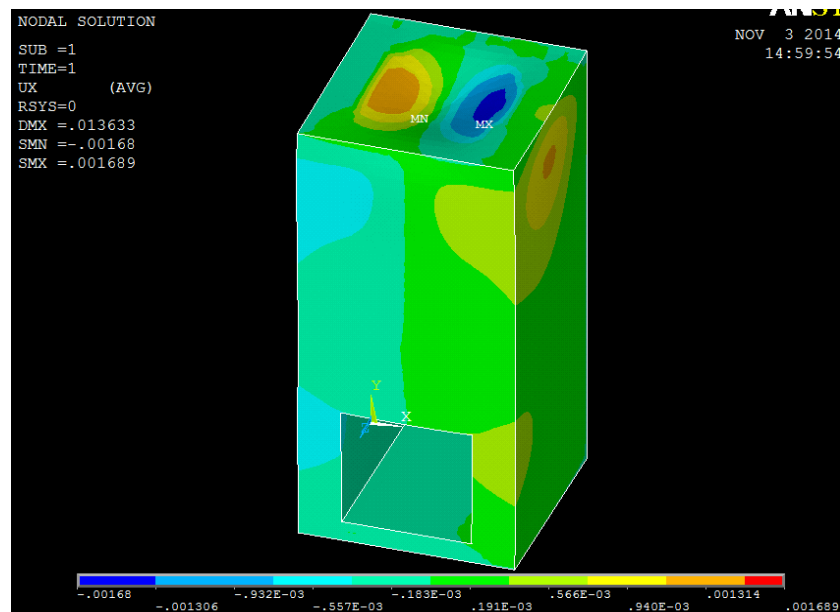


圖 5.50 X 向變位(橫向變位)

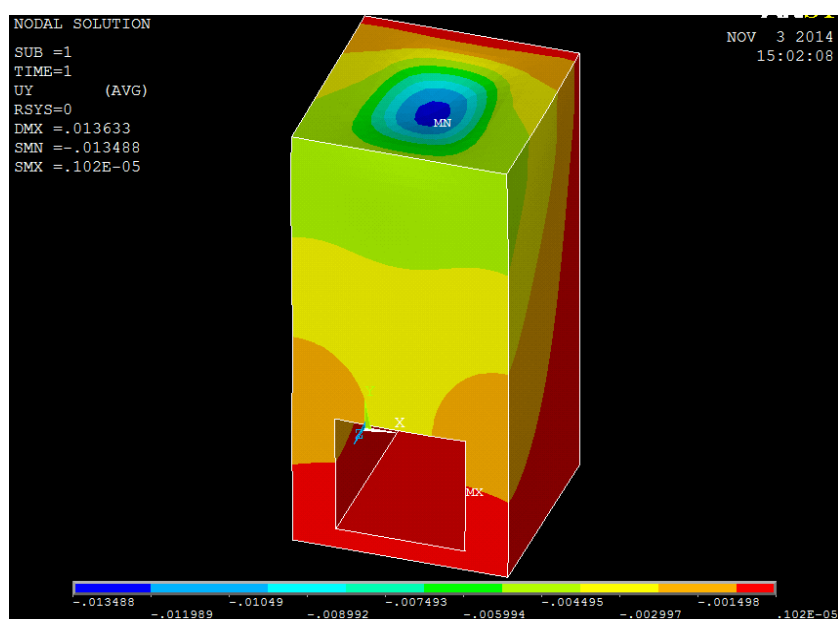


圖 5.51 Y 向變位(高低向變位)

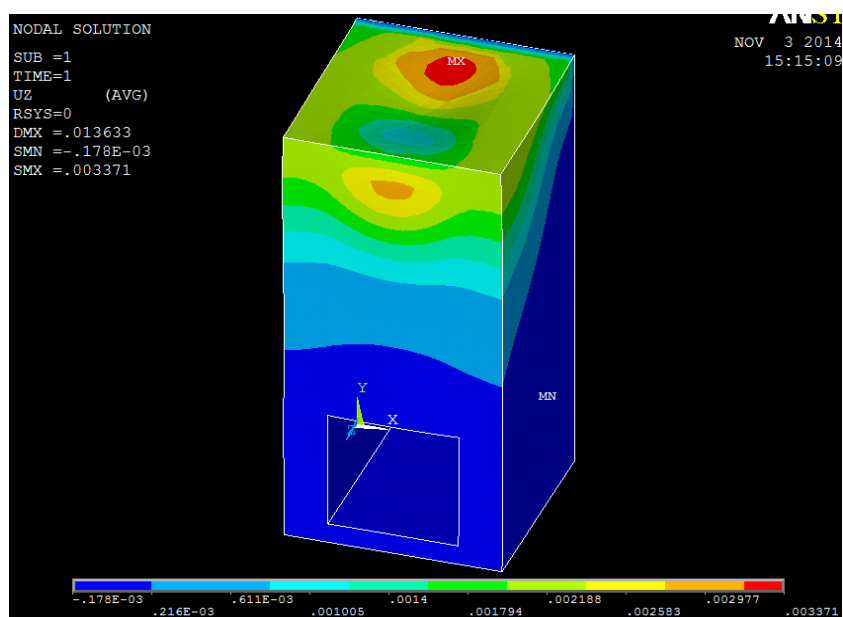


圖 5.52 Z 向變位(前後向變位)

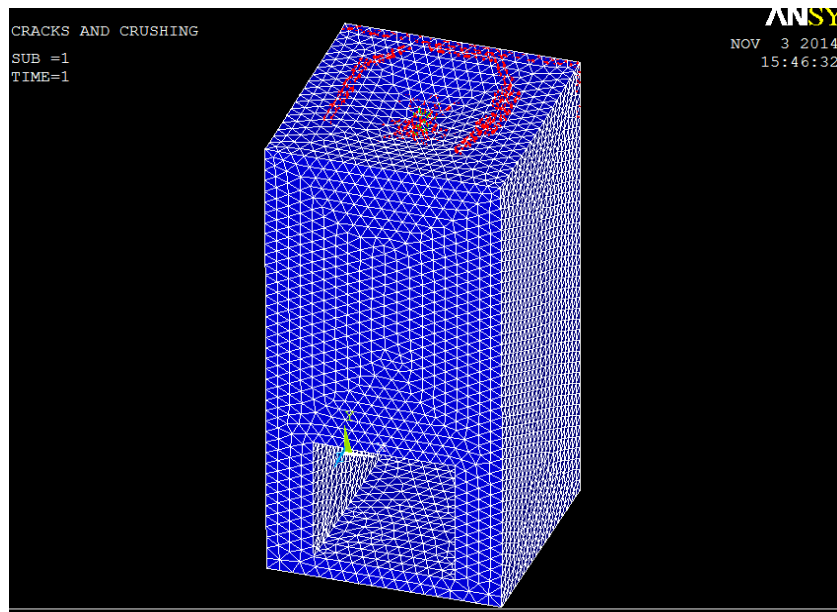


圖 5.53 混凝土裂痕情形

整體最大變位 0.001689 小於混凝土一般變位 $\epsilon_u = 0.003$ 故表示此配筋方式整體上安全可用。

但是系統仍示出頂部可能產生裂痕的區域及紋路，且單看 Z 軸向變位達 0.003371 算稍大，表示樓板處抵抗載重力及波壓可能需要再進一步顧慮。目前由於波能轉換系統中所使用的發電系統僅為假設，其重量及裝置位置仍待進一步研究。其中如重量過重時，如果氣流傳輸與轉輪搭配可行時，可考慮設置於實心之沉箱頂部，如此、一方面可降低氣室之頂部負載，二方面發電機系統之維修亦較安全簡便。

第六章 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

本計畫在進行造波水槽試驗前，必須先進行試驗模型之設計及分析，以便試驗時所建立之模型能達到最佳設計目的。除了基於試驗模型設計之需求之外，試驗時各項參數之設定，在試驗水槽各項環境條件限制下，找出適當之參數進行試驗，以及配合模型幾何參數，計算出較佳之波浪參數，均為進行試驗前之重要工作。

6.1 沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數

參數分析時，本計畫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；本計畫設計之波浪發電複合式防波堤的幾何參數，如均採用變數方式，其分析工作將無法在一定時間內完成，故大部分之幾何參數先固定如表6.1所示，相關幾何參數示意圖如圖6.1所示。現今岸基式震盪水柱式波能轉換系統(OWC)之相關研究，所採用之模型皆以類似圖6.1中之型式為主，如所示、水柱氣室前牆開口到海床下為全開口狀態。為探討在波浪作用下OWC幾何參數對波能轉換結果之差異，本計畫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，上述兩項變數皆定為入射波浪條件之相對值，因此兩者可以無因次表示，其兩者之設定分別為：

(1)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，其無因次化後本計畫以A125、A150、A175表示，其數值如表6.2所示。

(2)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，無因次化後本計畫以D2、D3、D4表示，其數值如表6.3所示。

表 6.1 固定幾何參數表

出氣孔直徑	1.2m
氣室蓋水面積	50m ²
壁厚	0.5m
外部高	25m
水深	20m

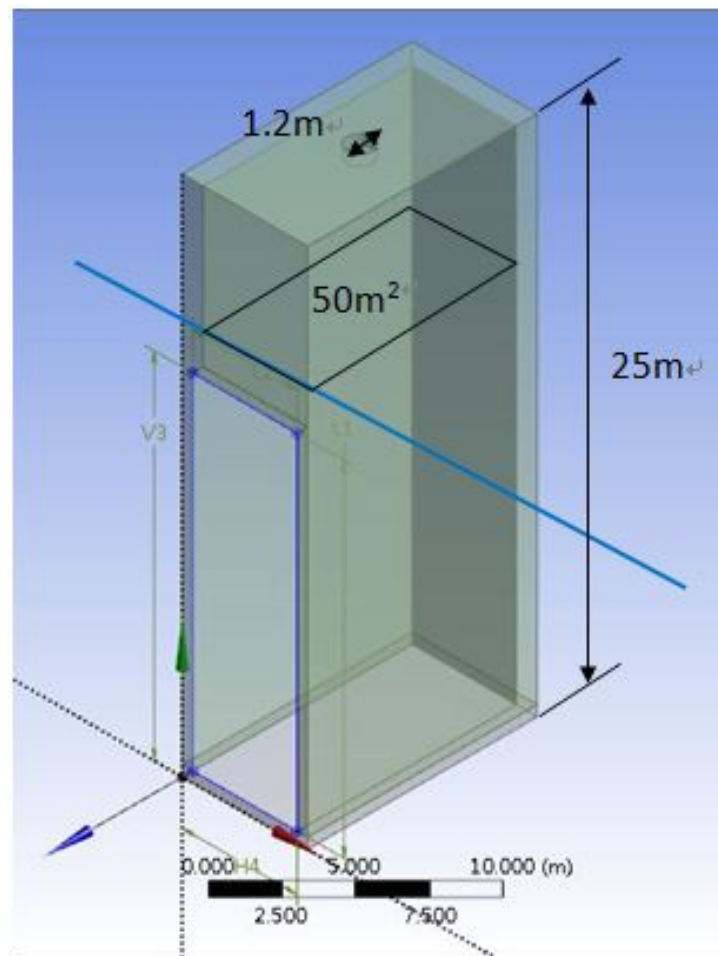


圖 6.1 固定幾何參數示意圖

表 6.2 無因次氣室長數值表

波浪 週期 無因次 氣室長	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

表 6.3 無因次前牆沒水深數值表

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

6.2 分析結果討論

本計畫所模擬之數值水槽固定水深為 20 米；以波高(H)為 1.5、2、2.5 公尺，週期(T)為 6、7.5、9、10.5、12 秒作為入射波浪條件；震盪水柱氣室 OWC 模型幾何變數分別為；(1)無因次氣室長度 A 為 0.125、0.15、0.175，本計畫以 A125、A150、A175 表示；(2)無因次前牆開口沒水深 D 為 2、3、4，本計畫以 D2、D3、D4 表示；本計畫分別討論以上述參數對防波堤之反射率、氣流速度以及氣室內部壓力之影響。

6.2.1 無因次氣室長度變化之影響

(1) 反射率

圖 6.2 到圖 6.4 為相同無因次前牆沒水深之反射率比較圖，在波浪反射率方面，當無因次前牆沒水深為 2 (2 倍 H) 時(圖 6.2)，無因次氣室長度為 0.15 (波長 0.15 倍，以下表示相同)有最小值出現，其反射率值約為 0.12，無因次氣室長度 0.125 (波長 0.125 倍) 相較之下反射率較大，而三種無因次氣室長度之反射率趨勢大致相同，波浪尖銳度 0.014 到 0.037 間之波浪反射率皆呈現平滑遞減之趨勢，而在尖銳度大於 0.037 之後，三者之反射率趨勢線皆呈現約略增加之現象。無因次前牆沒水深為 3 時(圖 6.3)，三種無因次氣室長度之反射率相當接近，反射率最小值約都是出現在波浪尖銳度 0.028，其值約為 0.2，隨著波浪尖銳度增大反射率也跟著增大。當無因次前牆沒水深為 4 (圖 6.4)，無因次氣室長度 0.125 時，幾乎在所有波浪尖銳度下反射率皆小於另外兩者，在波浪尖銳度 0.023 時，無因次氣室長度 0.125 有反射率最小值 0.19，而無因次氣室長度 0.175 之反射率則為 0.32 左右。由此可知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改變，其中大多以無因次氣室長度 0.125 有較小值出現。

(2) 氣流速度

在氣流速度方面，圖 6.5 到 6.22 為波高 1.5 米、2 米以及 2.5 米之前 1/3 最大氣流速度以及平均氣流速度趨勢圖；當波高 1.5 米、無因次沒水深為 2 時(圖 6.5、圖 6.8)，無因次氣室長度 0.125 在波浪週期 7.5 秒時有最大風速出現，前 1/3 最大氣流速度為 40.31 米/秒，平均氣流速度為 26.61 米/秒；波高 2 米時(圖 6.11、圖 6.14)，前 1/3 最大氣流速度則增加為 48.82 米/秒，平均氣流速度為 32.49 米/秒。當波高 1.5 米、無因次沒水深為 3 時(圖 6.6、圖 6.9)，最大值同樣發生在無因次氣室長度 0.125，其前 1/3 最大氣流速度為 40.33 米/秒，平均氣流速度為 26.97 米/秒，無因次氣室長度 0.15 以及 0.175

所產生之最大氣流速度發生在波浪週期 10.5 秒，與無因次氣室長度 0.125 之最大氣流速度發生在波浪週期 7.5 秒有所不同。無因次沒水深為 4 時(圖 6.7、圖 6.10)，同樣是無因次氣室長度 0.125 在波浪週期 7.5 秒時有最大風速出現，前 1/3 最大氣流速度為 39.32 米/秒，平均氣流速度為 26.19 米/秒。由上述可知無因次氣室長度 0.125 時，不論何種波浪週期所產生之風速皆大於另兩者無因次氣室長度，因此可以推論無因次氣室長度越小其產生之風速越大。

(3) 氣室內壓力

在氣室內壓力方面，圖 6.23 到 6.40 為波高 1.5 米、2 米以及 2.5 米之前 1/3 最大壓力以及平均壓力趨勢圖；當波高 1.5 米、無因次沒水深為 2 時(圖 6.23、圖 6.26)，無因次氣室長度 0.125 在波浪週期 7.5 秒時有最大壓力出現，前 1/3 最大壓力為 1341.38 帕，平均壓力為 717.82 帕。當波高 2 米、無因次沒水深為 2、無因次氣室長度 0.125 時(圖 6.29、圖 6.32)在波浪週期 7.5 秒之前 1/3 最大壓力為 2152.36 帕，平均壓力為 1166.28 帕。在無因次沒水深 3 (圖 6.30、圖 6.33)，無因次氣室長度 0.15 以及 0.175 所產生之最大氣流速度發生在波浪週期 10.5 秒，與無因次氣室長度 0.125 之最大壓力發生在波浪週期 7.5 秒有所不同。

6.2.2 無因次沒水深度變化之影響

(1) 反射率

圖 6.41 到圖 6.43 為相同無因次氣室長度之波浪反射率結果比較圖，由圖 6.41 到圖 6.43 觀察可以得知，無因次沒水深為 2 之反射率最小值是出現在波浪尖銳度大於 0.04 之後，到了無因次沒水深為 3 時反射率最小值出現在波浪尖銳度 0.03 左右，而無因次沒水深為 4 時反射率最小值則是出現在波浪尖銳度 0.02，可見隨著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。

(2) 氣流速度以及氣室內壓力

圖 6.44 至圖 6.52 為相同無因次氣室長度之前 1/3 最大氣流速度比較圖，由圖中可觀察到波高 1.5 米時無因次前牆開口沒水深改變對產生之風速並沒有多大的影響，但隨著波高增加到 2.5 米時，無因次前牆開口沒水深之影響轉變為較為明顯，且由圖 6.50 至圖 6.52 可以觀察到 3 種無因次氣室長度之趨勢皆相當雷同，三者皆是在週期 6 秒時有最大差距出現，但隨著週期增大，無因次前牆開口沒水深之影響也越來越小。而圖 6.53 至圖 6.61 之 OWC 壓力圖的趨勢也與速度圖相同。因此可以推論無論何種波浪條件下，無因次前牆開口沒水深越小會有較佳之轉換效果。

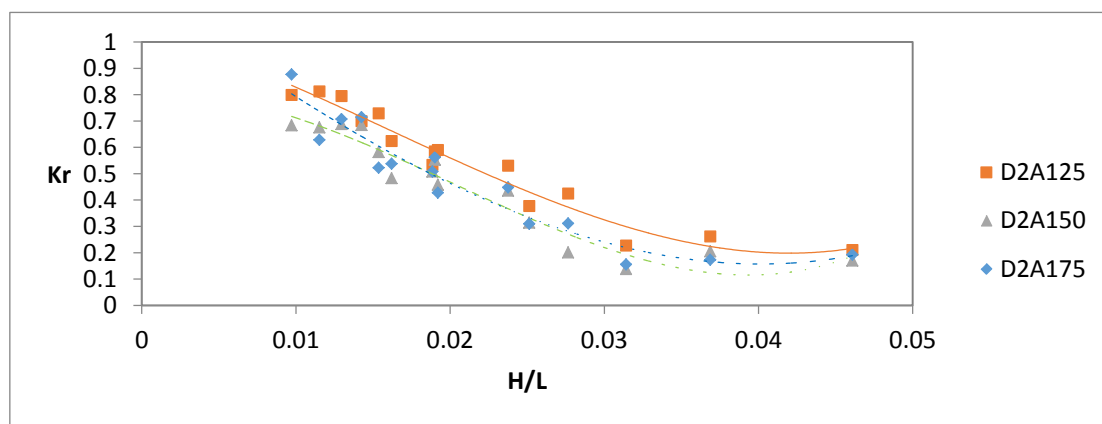


圖 6.2 OWC 反射率結果(無因次沒水深=2)

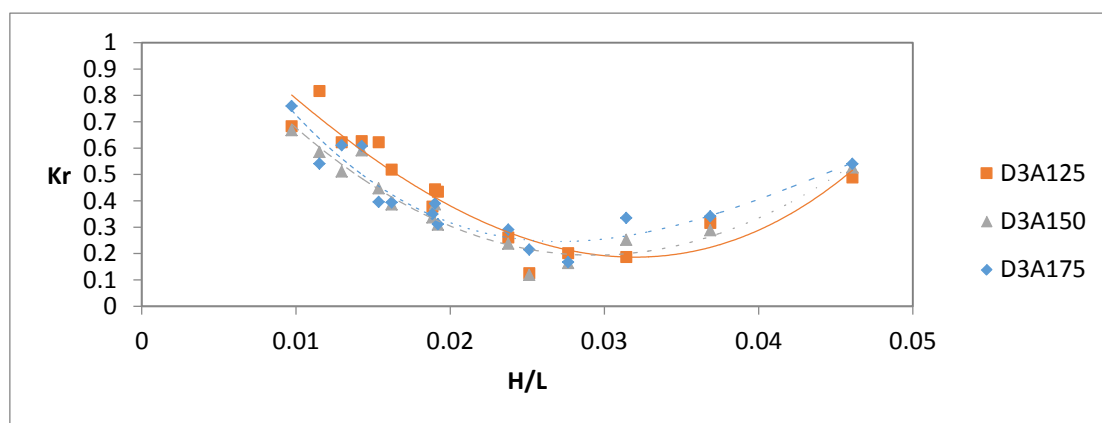


圖 6.3 OWC 反射率結果(無因次沒水深=3)

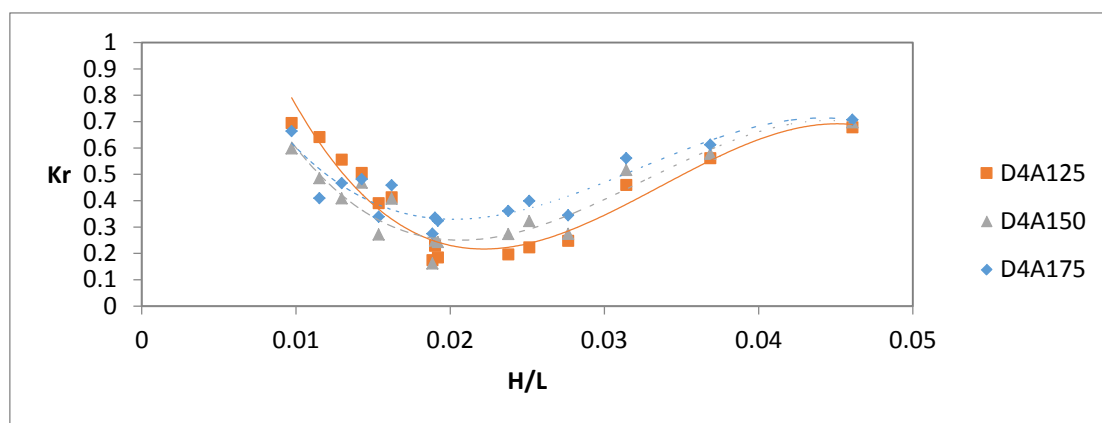


圖 6.4 OWC 反射率結果(無因次沒水深=4)

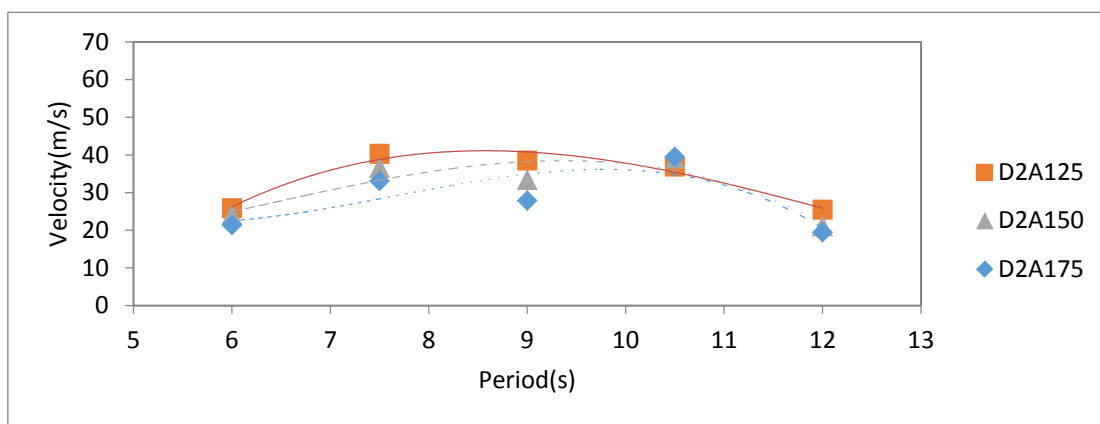


圖 6.5 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=2)

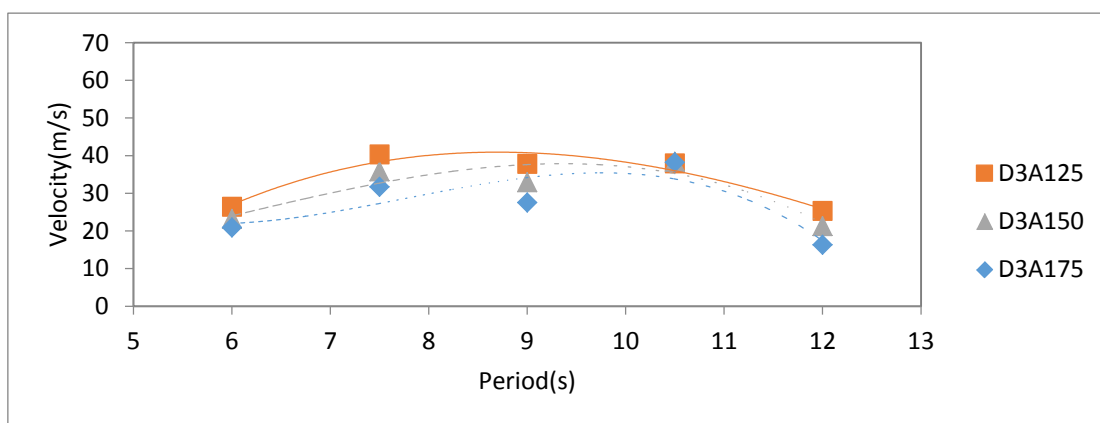


圖 6.6 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次沒水深=3)

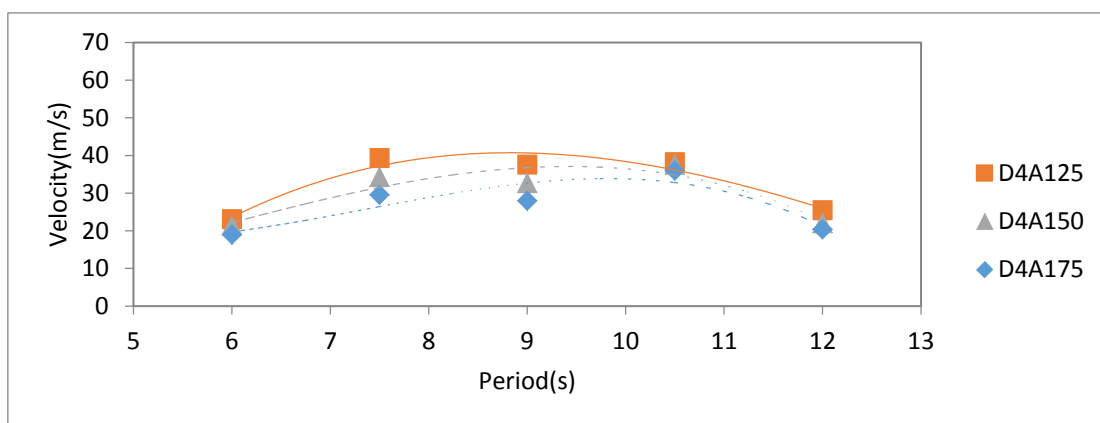


圖 6.7 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次沒水深=4)

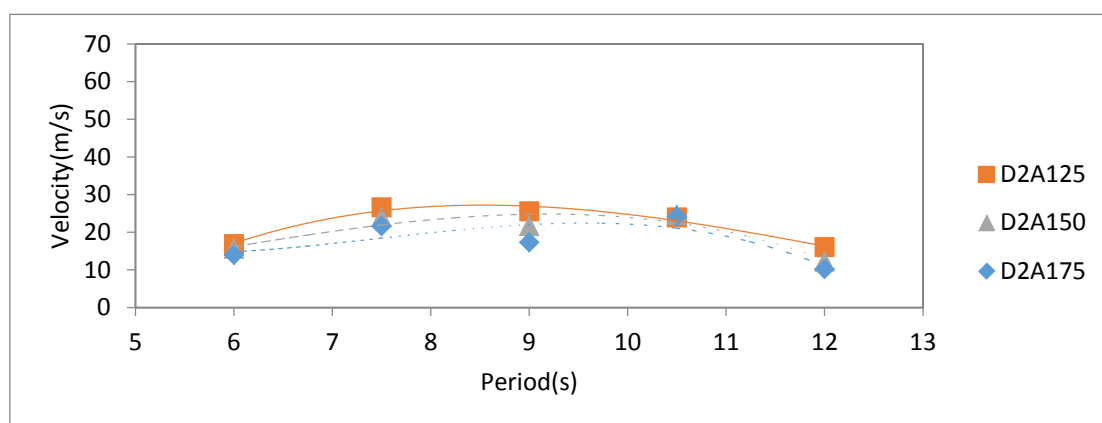


圖 6.8 波高 1.5 米-OWC 平均氣流速度(無因次沒水深=2)

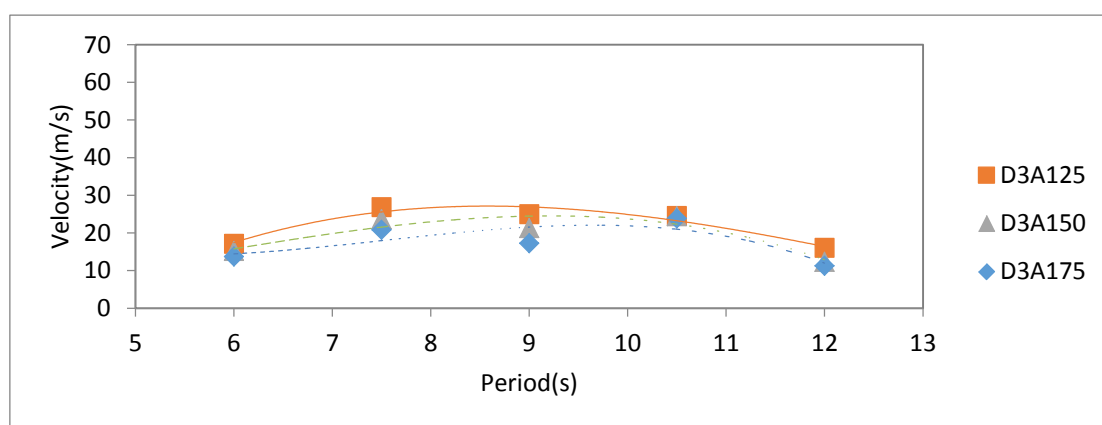


圖 6.9 波高 1.5 米-OWC 平均氣流速度(無因次沒水深=3)

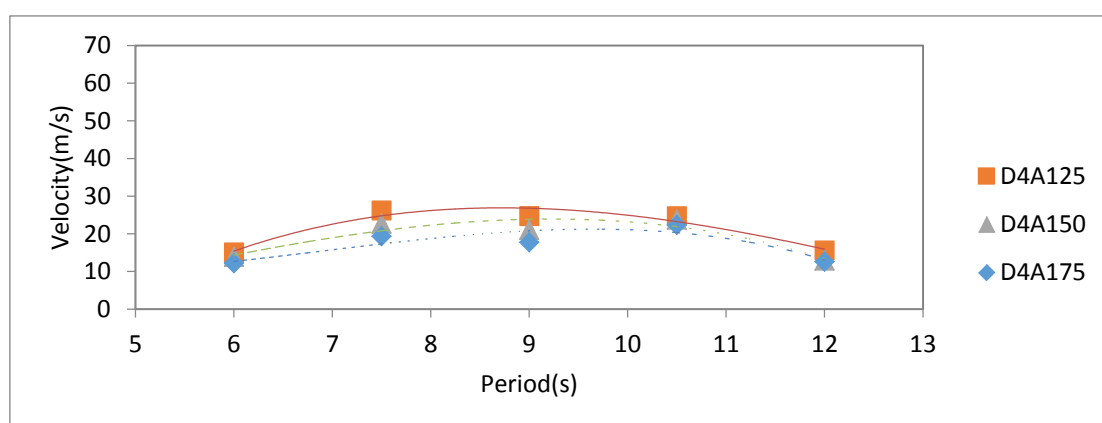


圖 6.10 波高 1.5 米-OWC 平均氣流速度(無因次沒水深=4)

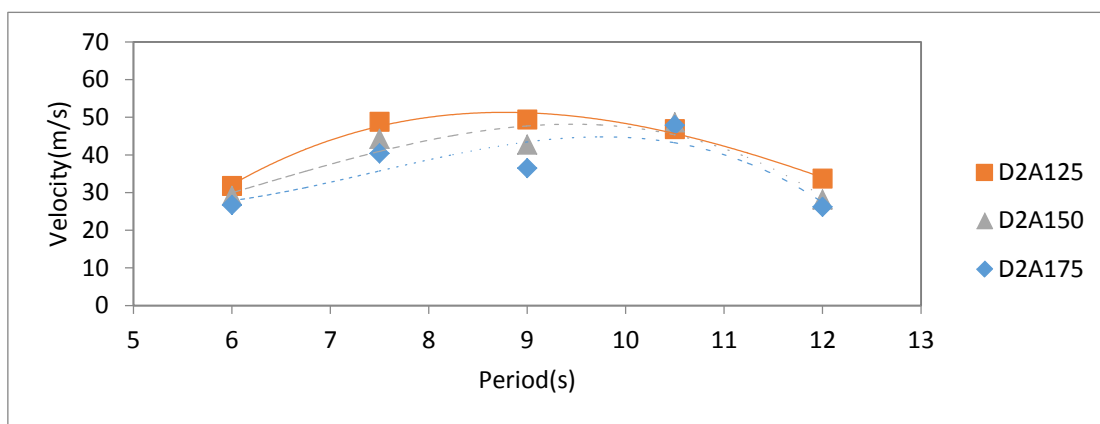


圖 6.11 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=2)

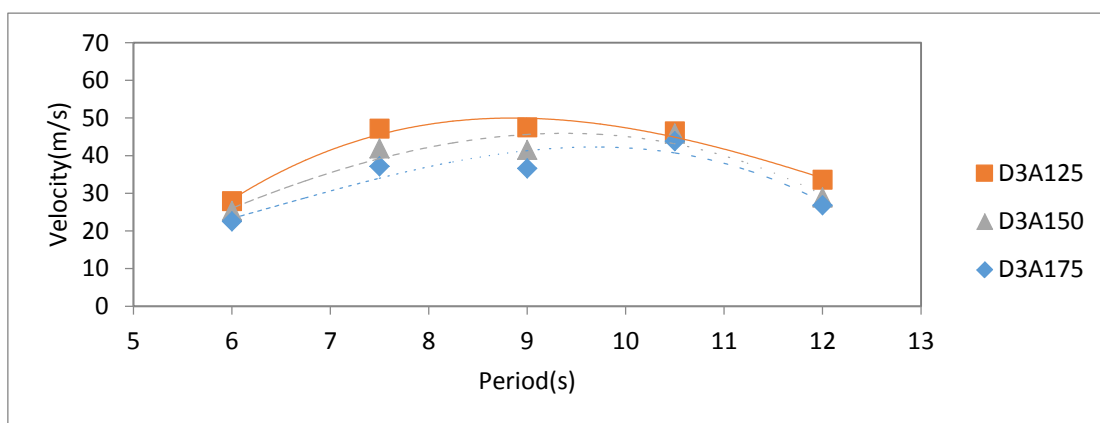


圖 6.12 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=3)

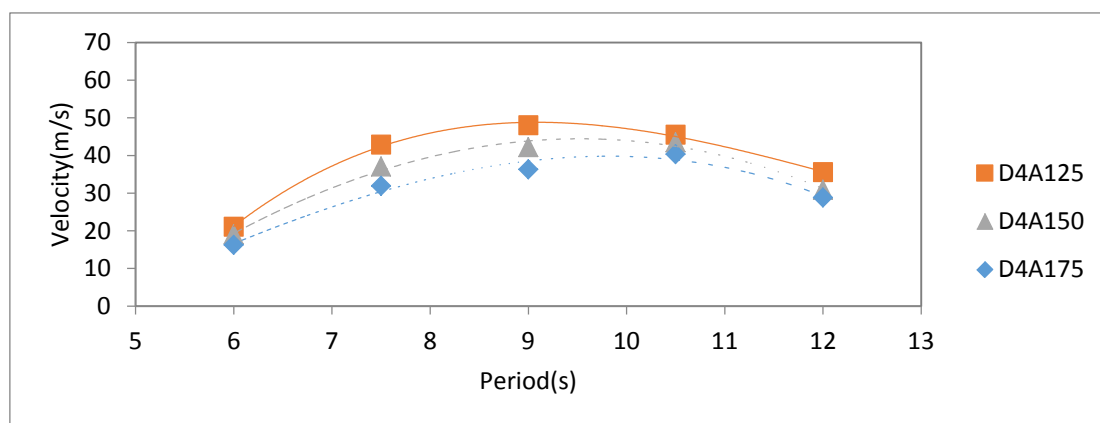


圖 6.13 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=4)

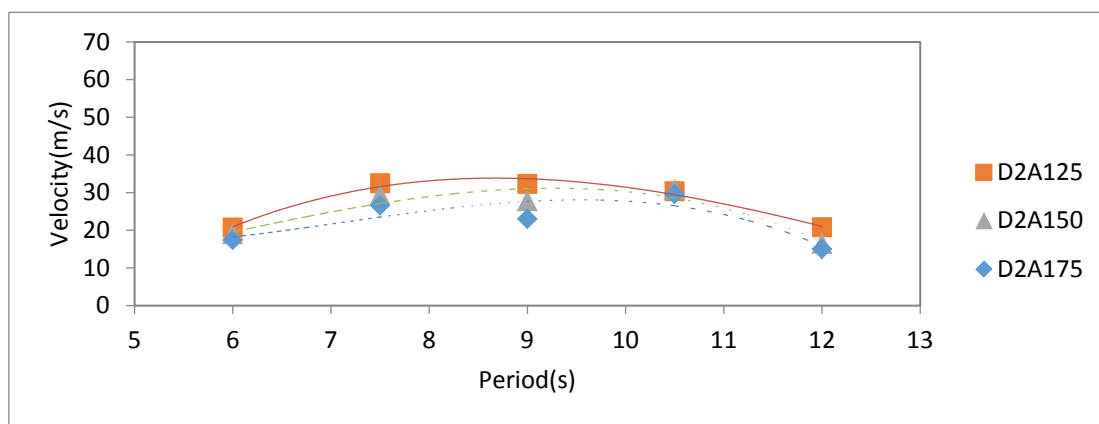


圖 6.14 波高 2 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=2)

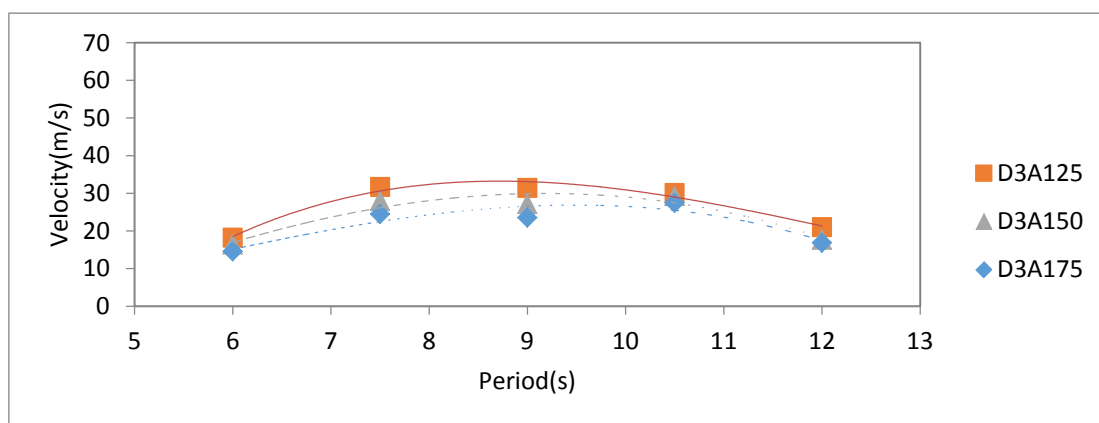


圖 6.15 波高 2 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=3)

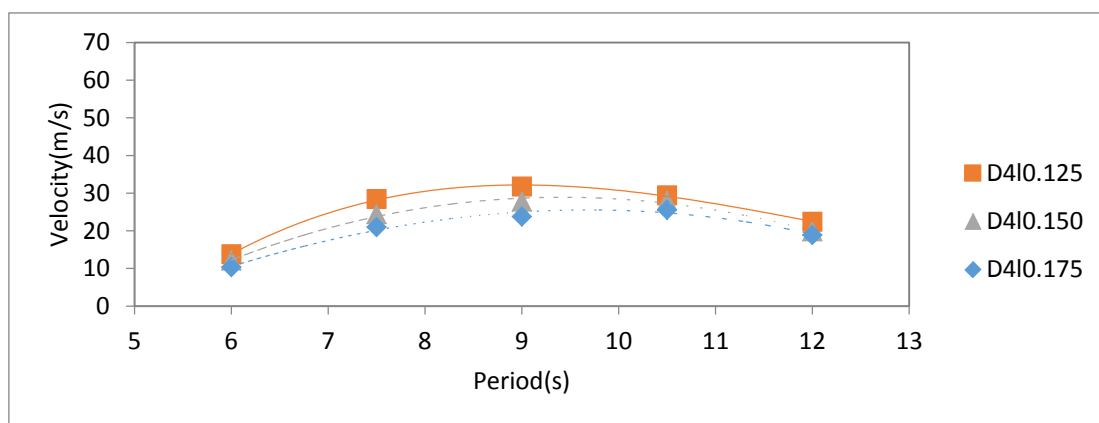


圖 6.16 波高 2 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=4)

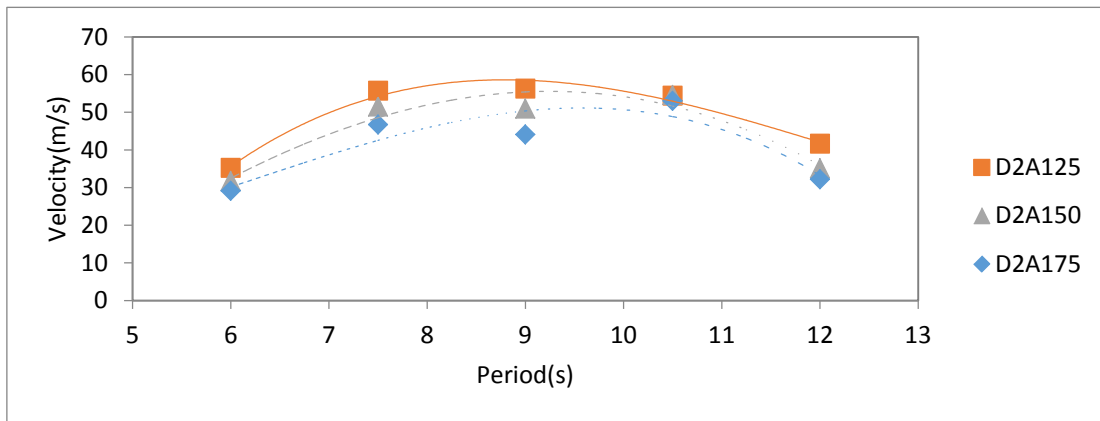


圖 6.17 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=2)

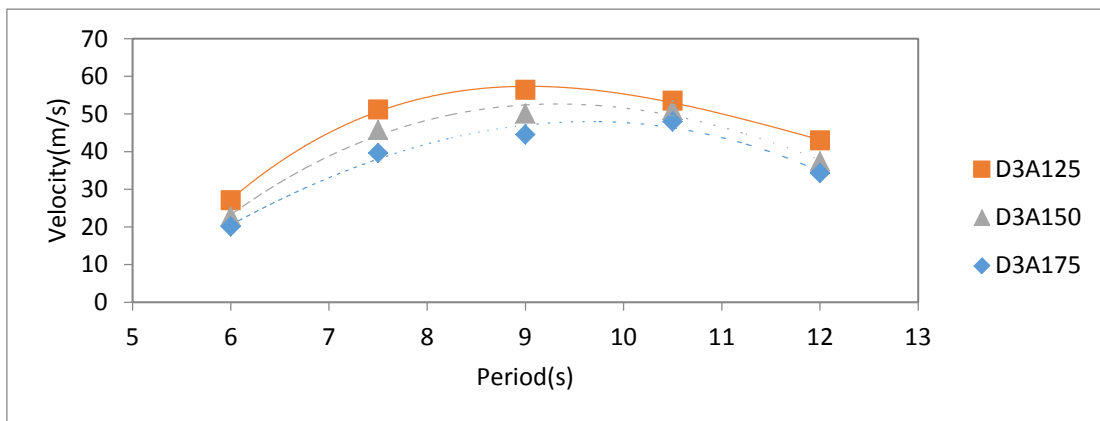


圖 6.18 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=3)

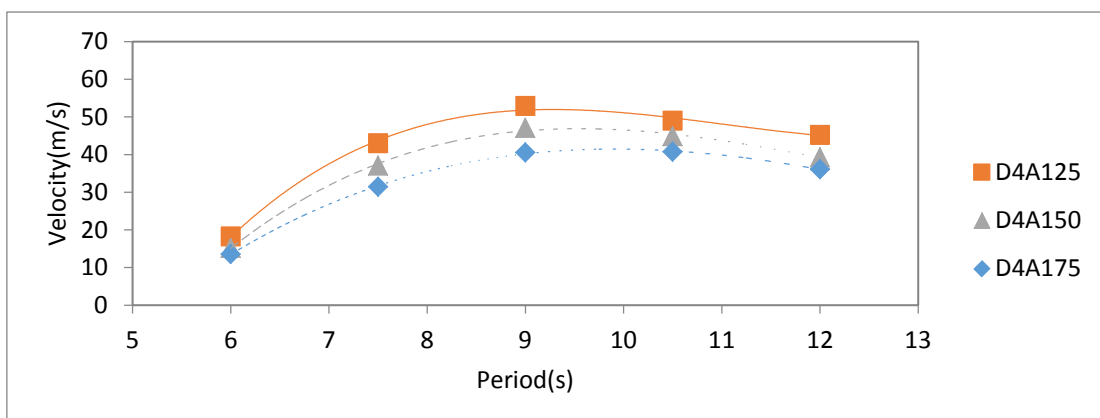


圖 6.19 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度 (無因次沒水深=4)

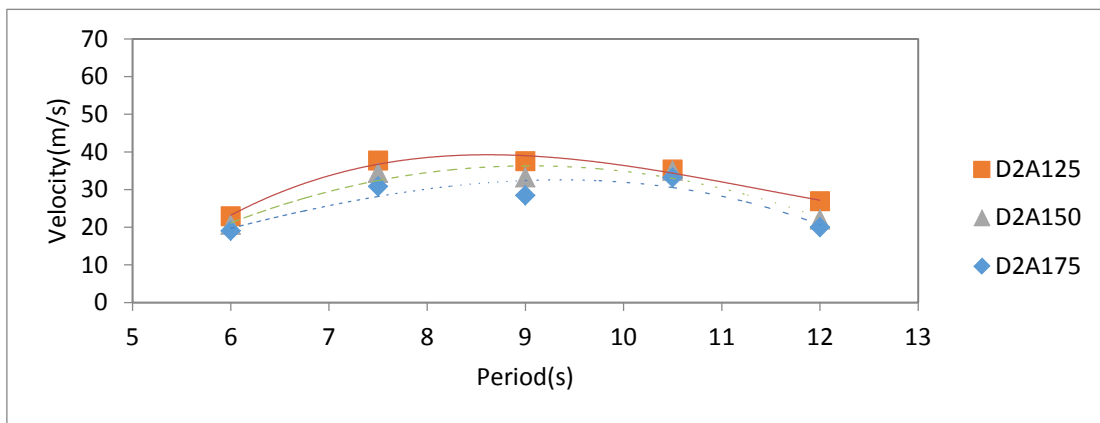


圖 6.20 波高 2.5 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=2)

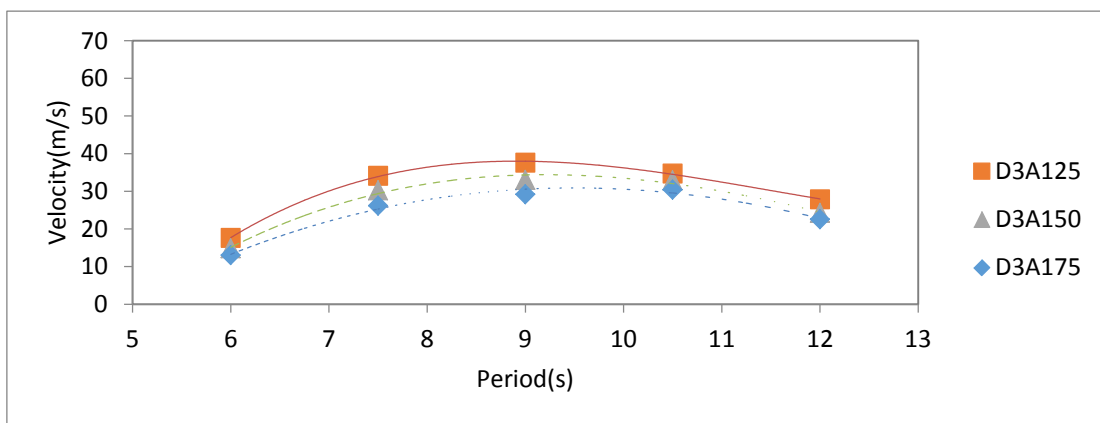


圖 6.21 波高 2.5 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=3)

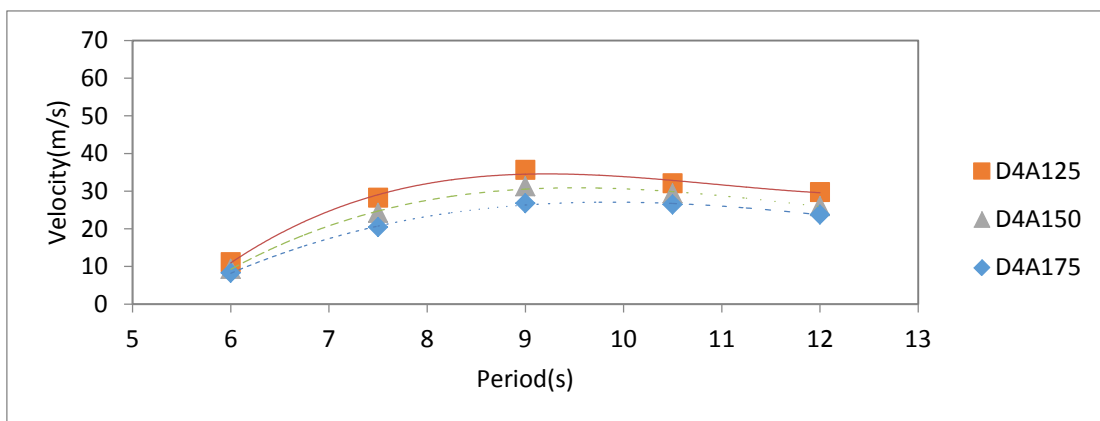


圖 6.22 波高 2.5 米-OWC 平均氣流速度 (無因次沒水深=4)

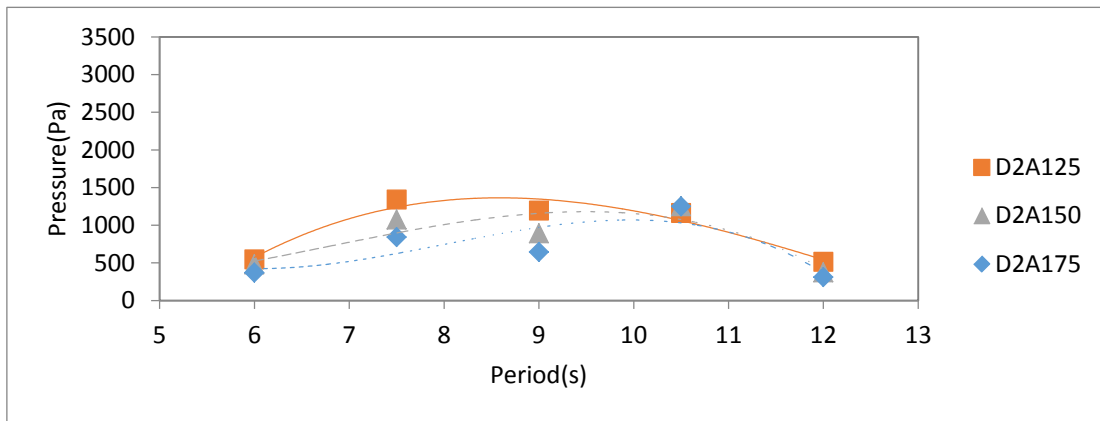


圖 6.23 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=2)

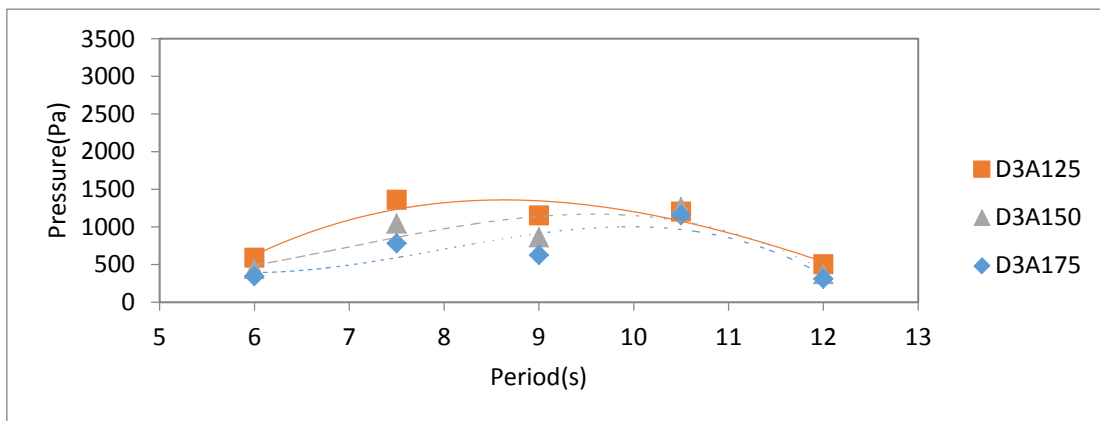


圖 6.24 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=3)

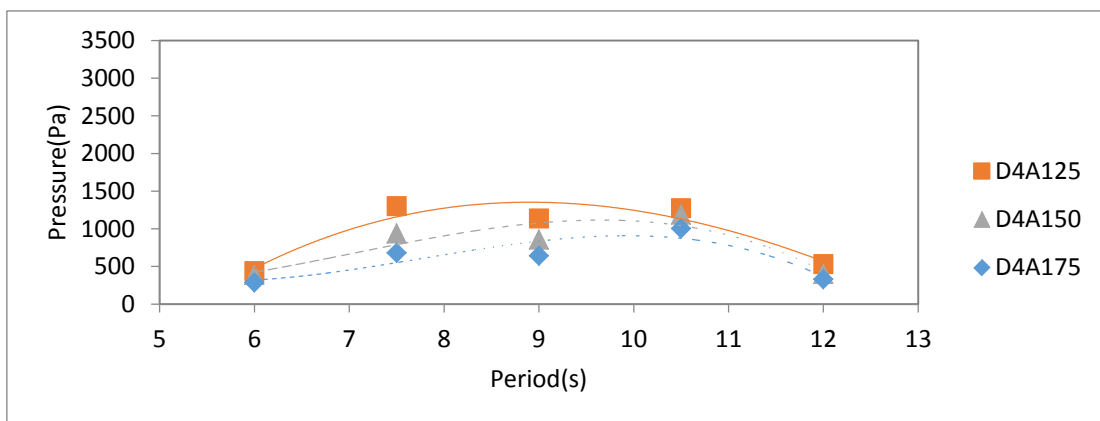


圖 6.25 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=4)

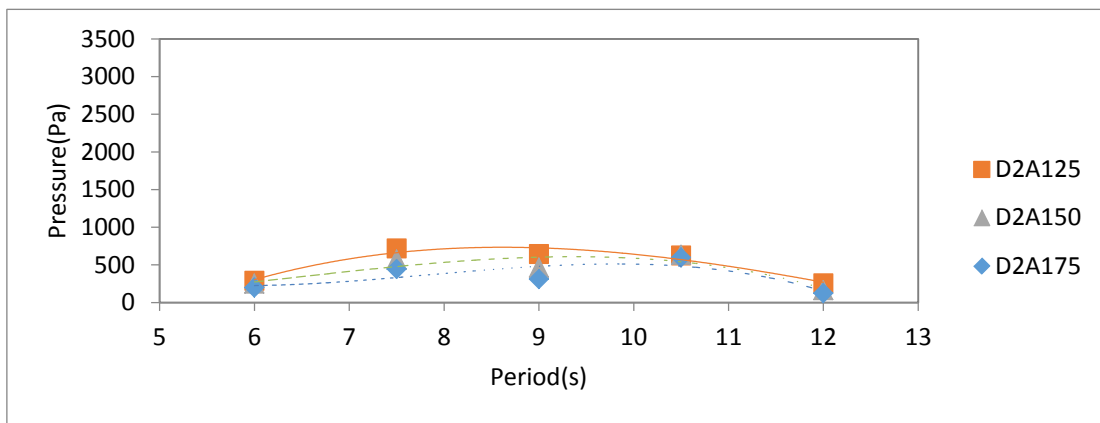


圖 6.26 波高 1.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=2)

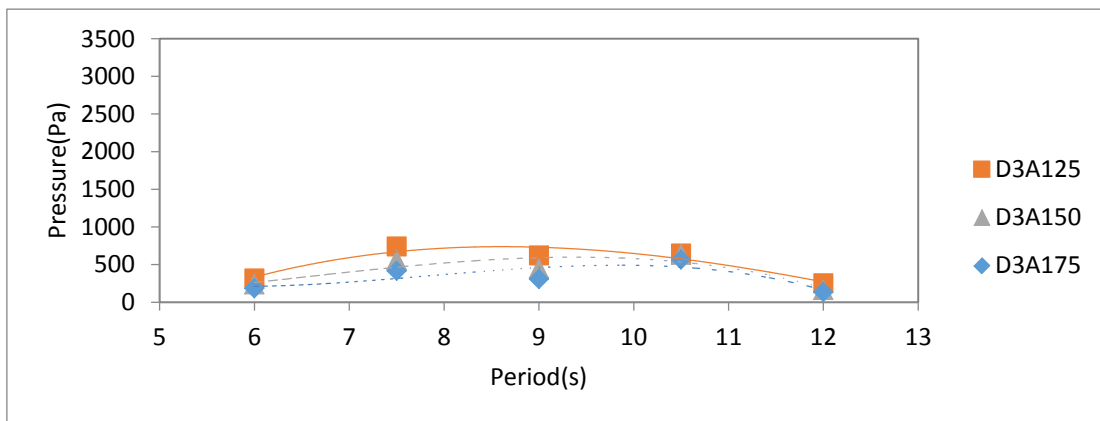


圖 6.27 波高 1.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=3)

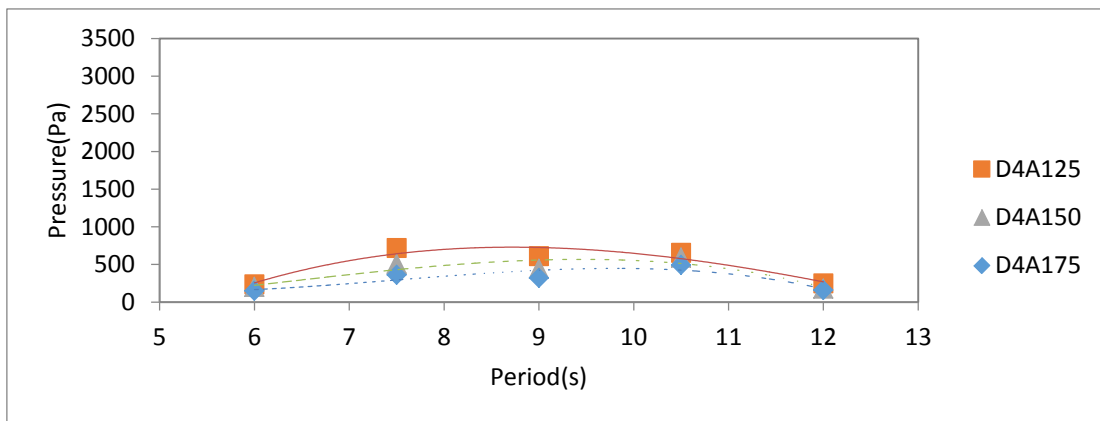


圖 6.28 波高 1.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=4)

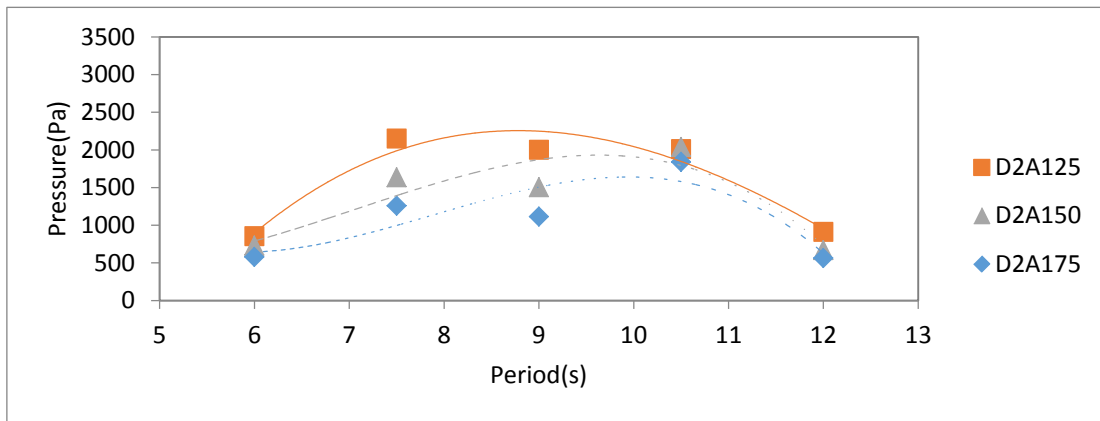


圖 6.29 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=2)

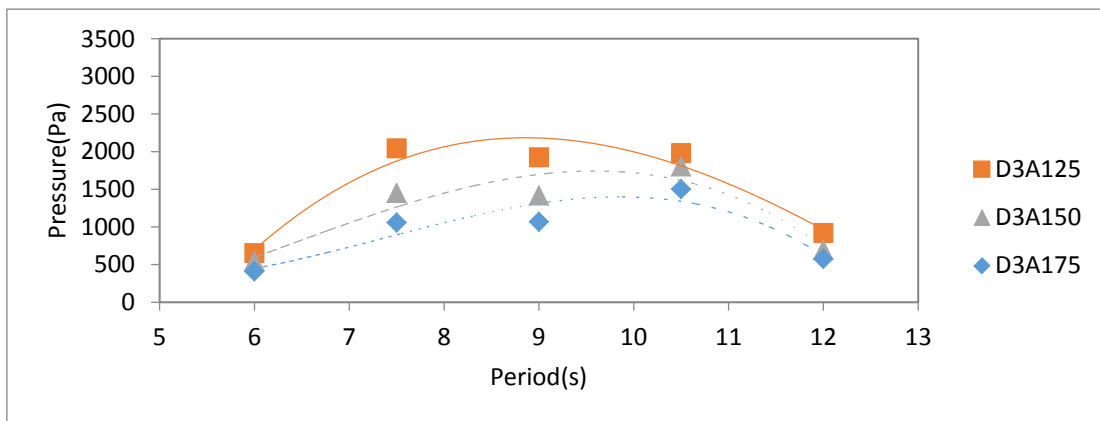


圖 6.30 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=3)

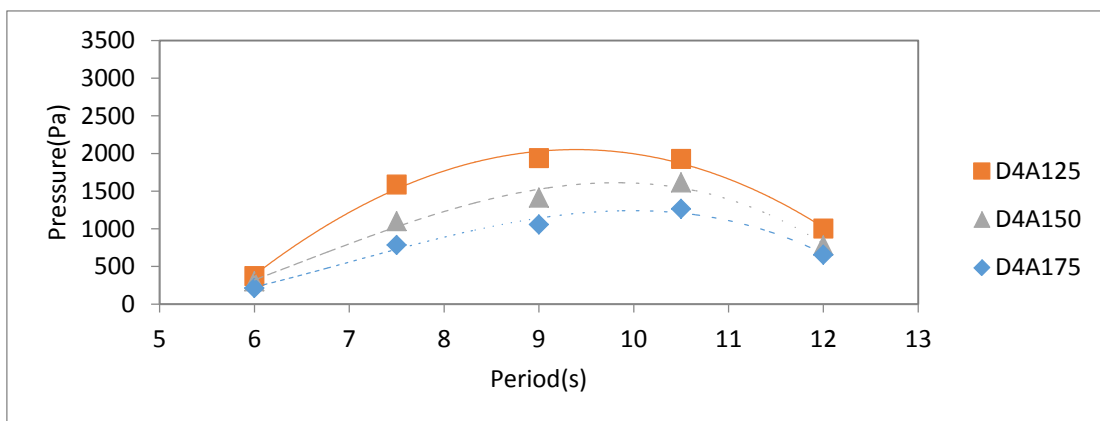


圖 6.31 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=4)

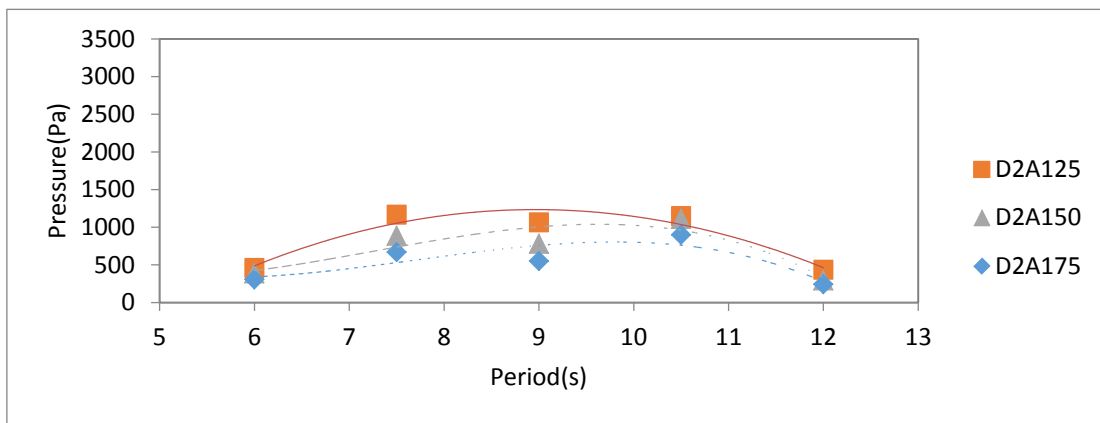


圖 6.32 波高 2 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=2)

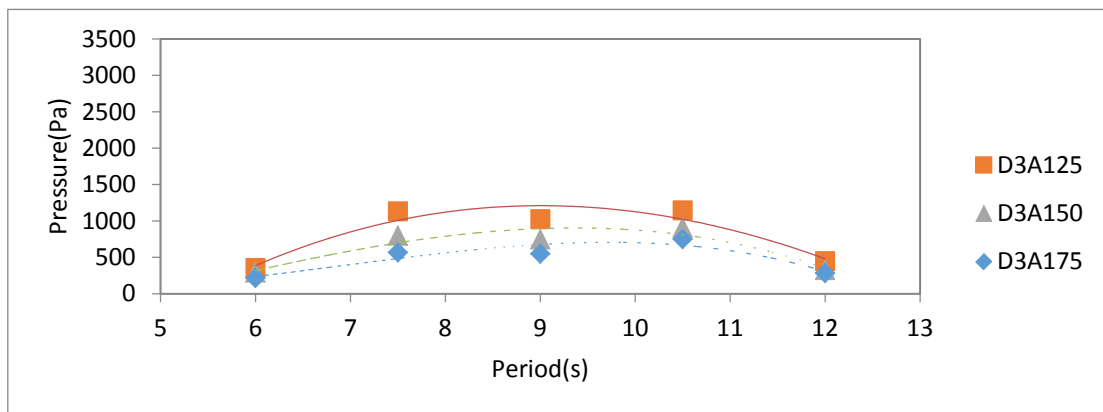


圖 6.33 波高 2 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=3)

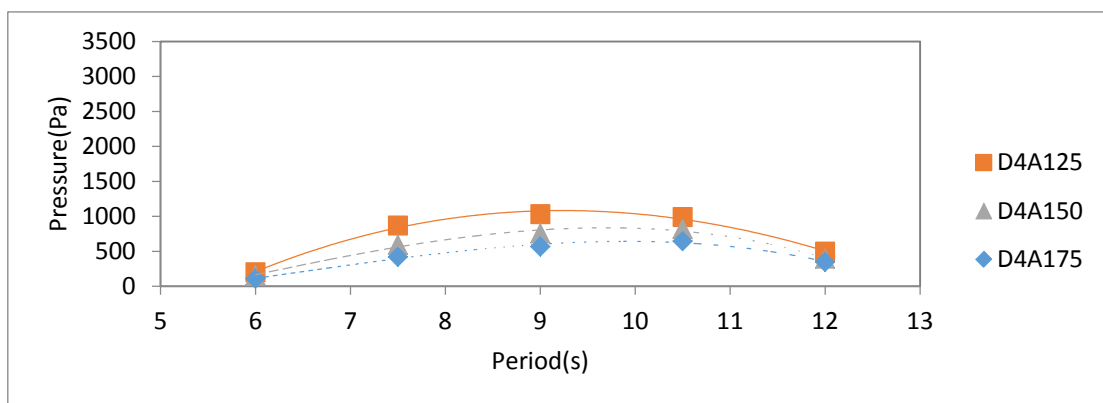


圖 6.34 波高 2 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=4)

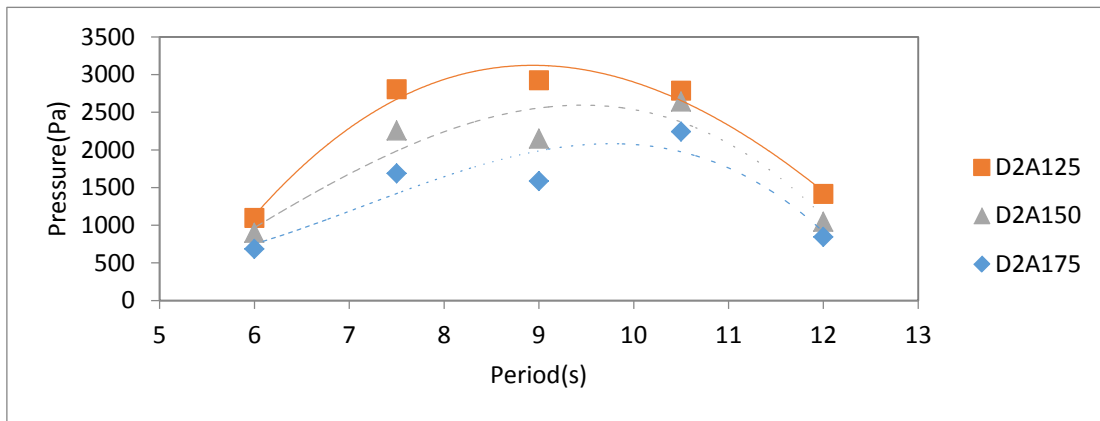


圖 6.35 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力 (無因次沒水深=2)

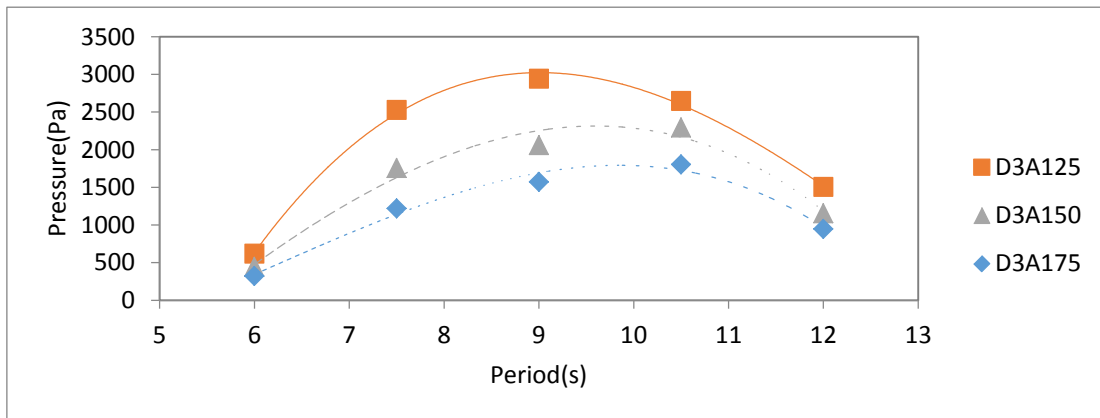


圖 6.36 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=3)

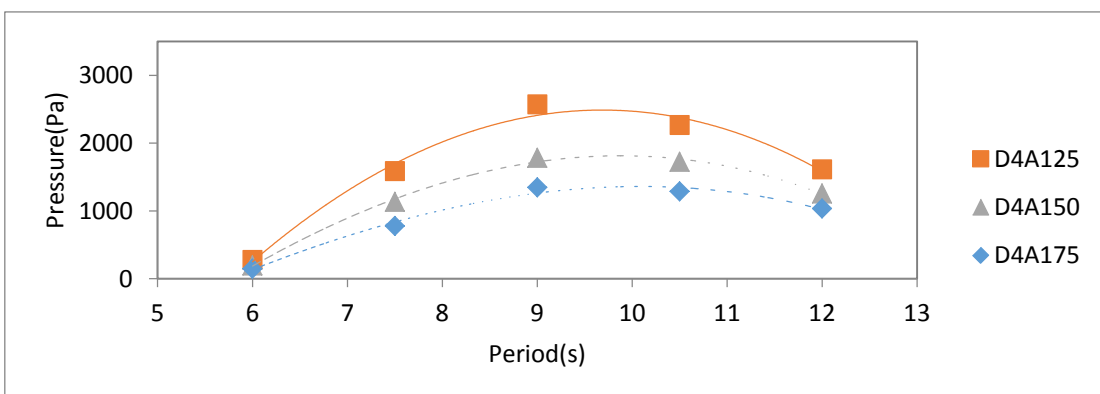


圖 6.37 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次沒水深=4)

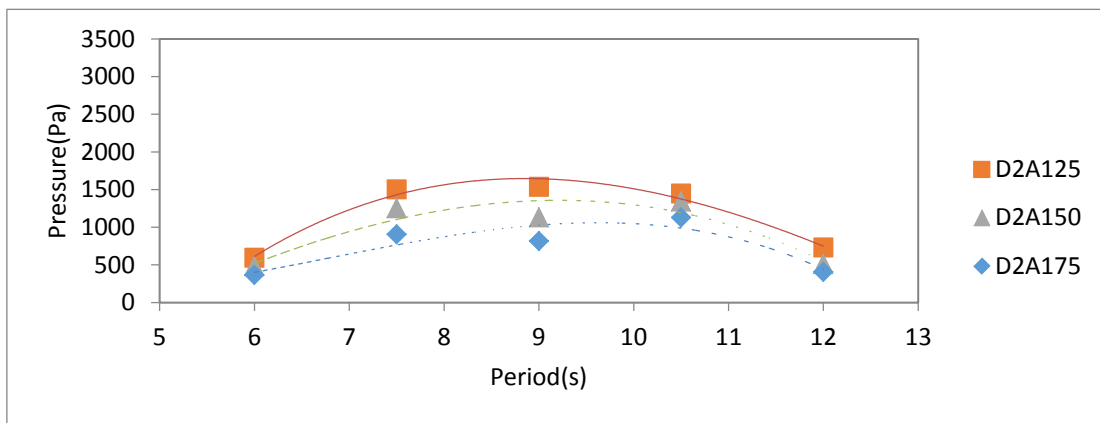


圖 6.38 波高 2.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=2)

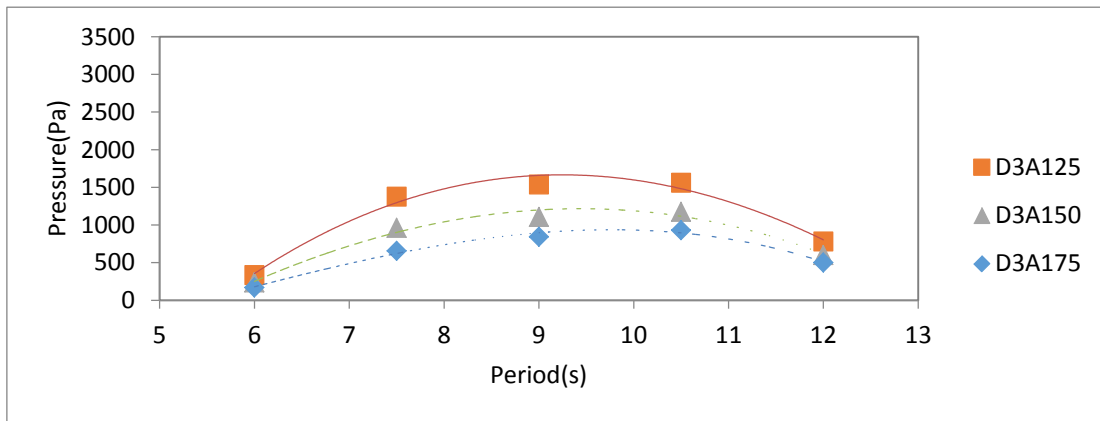


圖 6.39 波高 2.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=3)

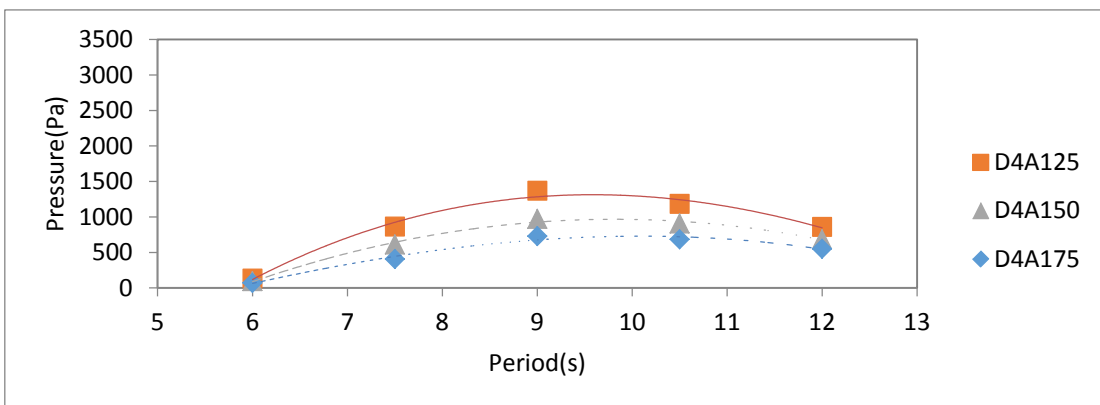


圖 6.40 波高 2.5 米-OWC 平均壓力(無因次沒水深=4)

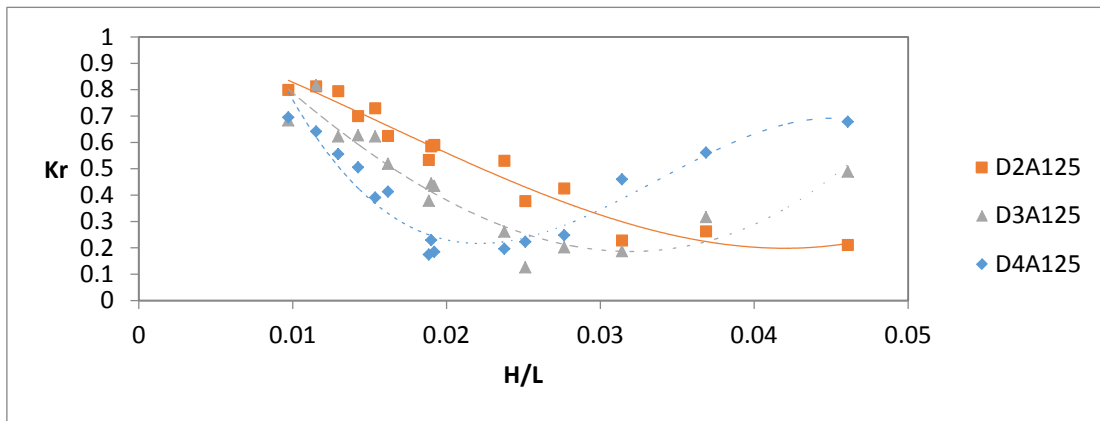


圖 6.41 OWC 反射率結果(無因次氣室長=0.125)

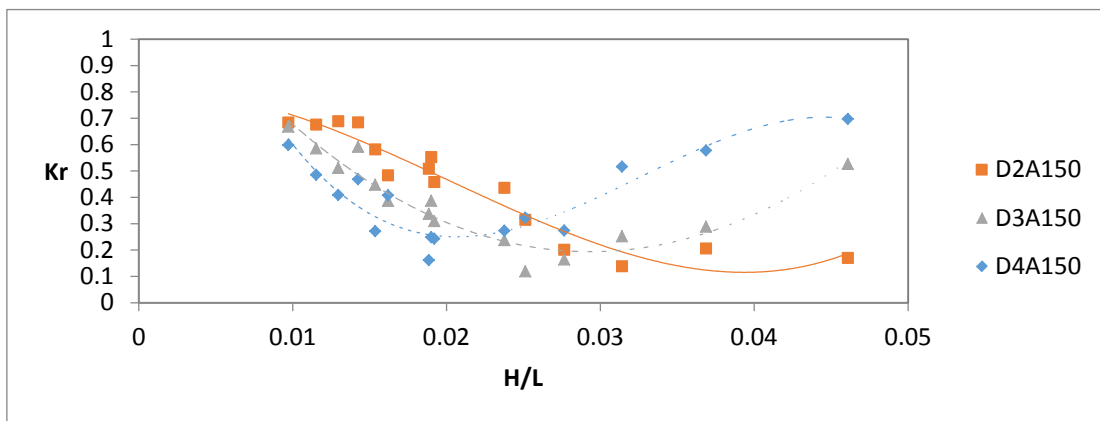


圖 6.42 OWC 反射率結果(無因次氣室長=0.15)

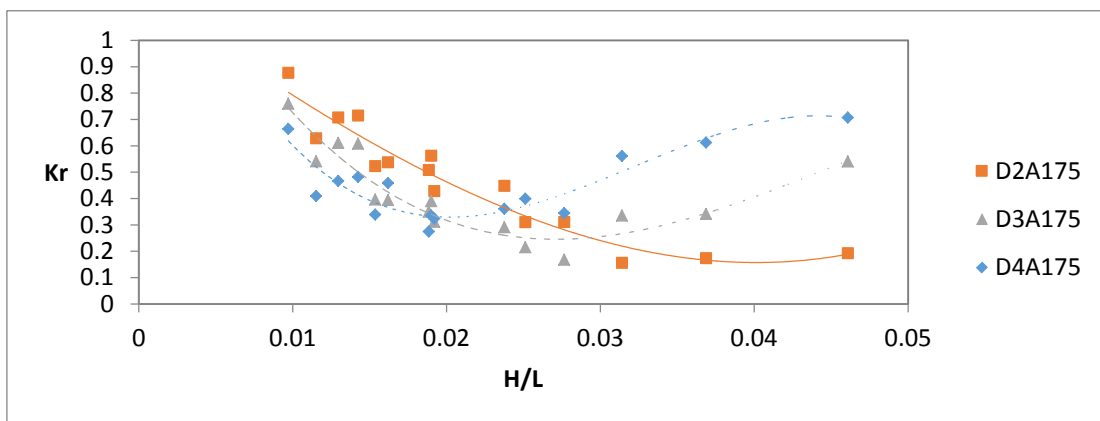


圖 6.43 OWC 反射率結果(無因次氣室長=0.175)

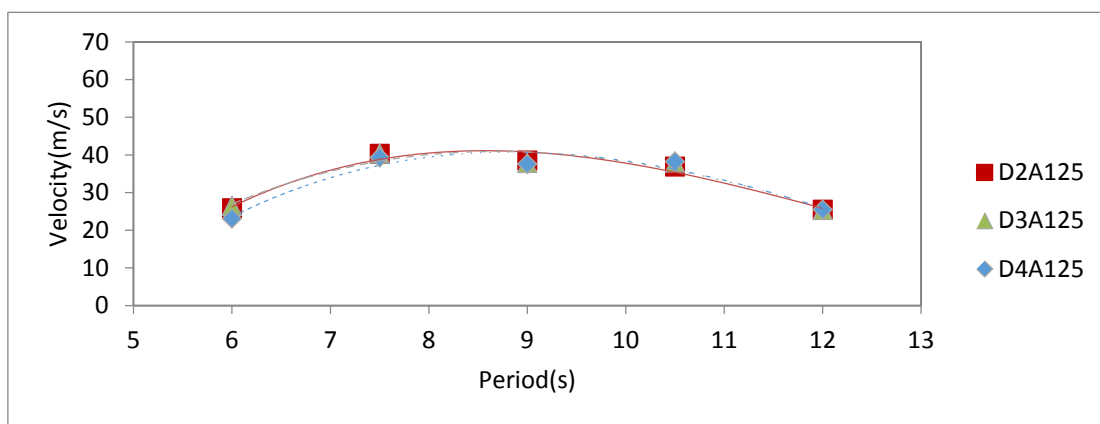


圖 6.44 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.125)

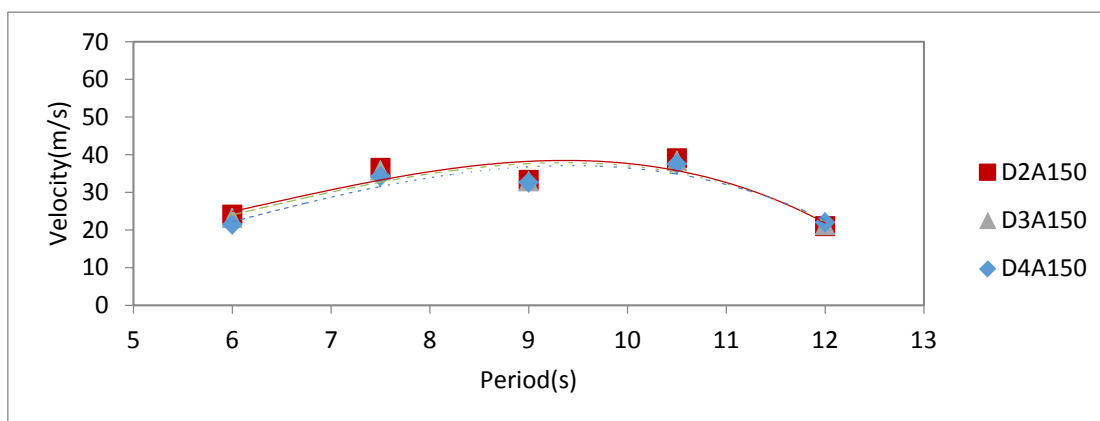


圖 6.45 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.15)

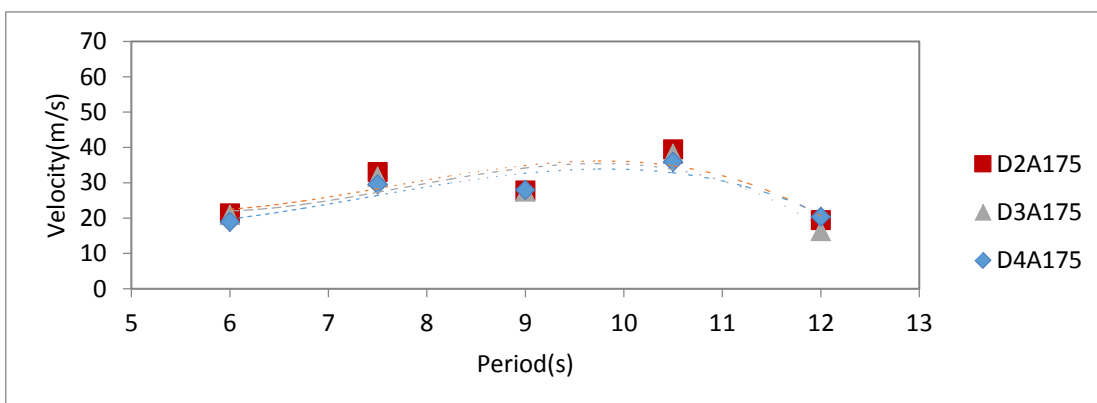


圖 6.46 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.175)

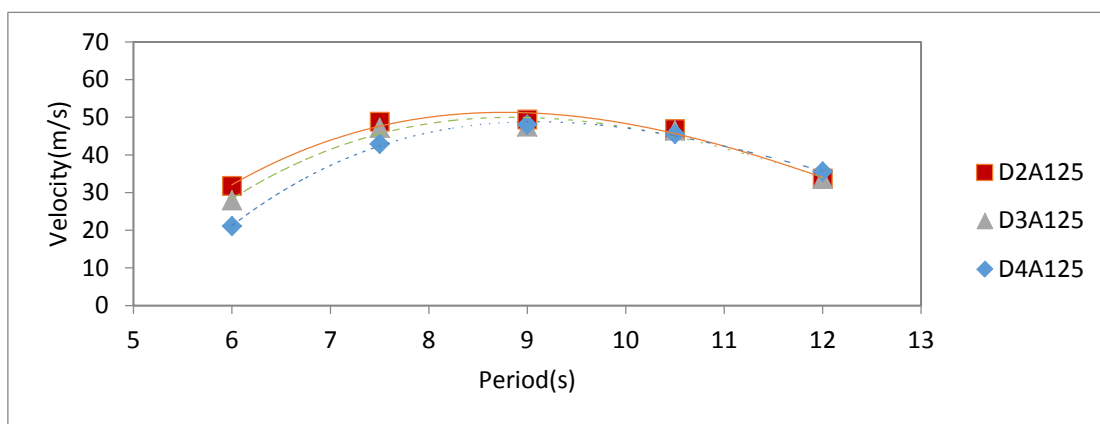


圖 6.47 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.125)

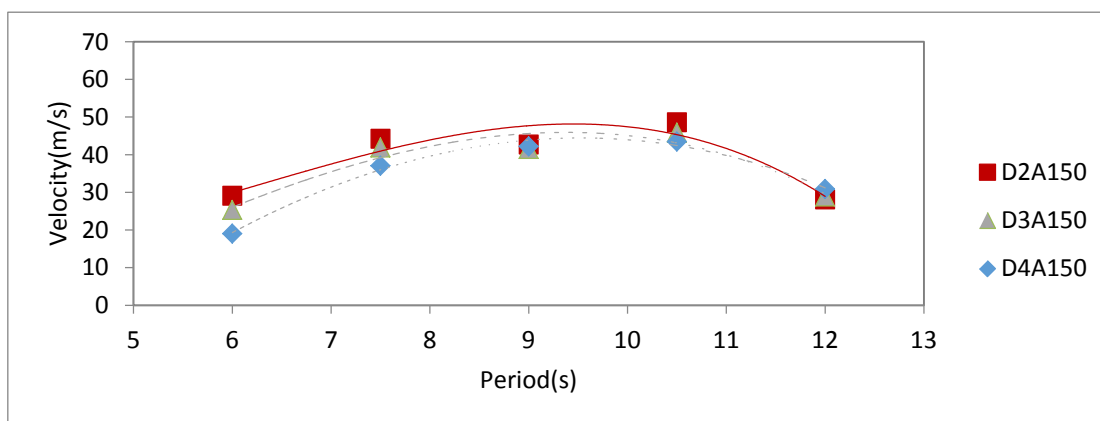


圖 6.48 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.15)

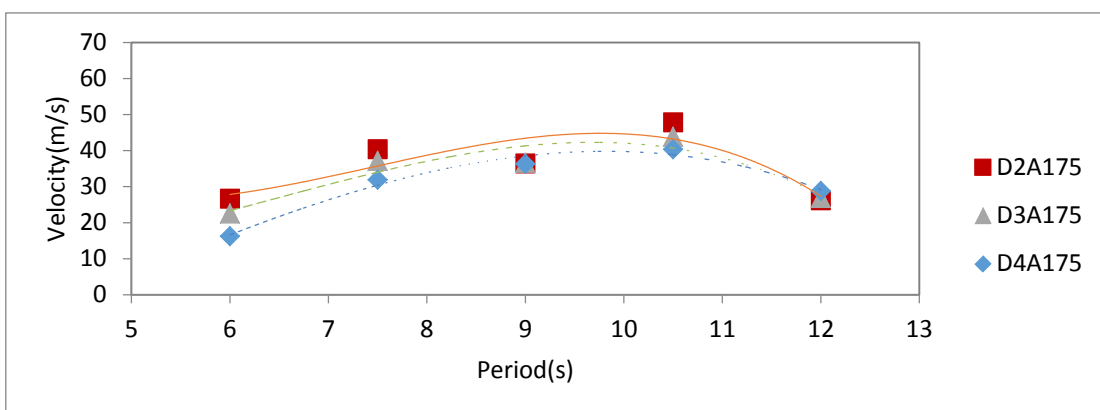


圖 6.49 波高 2 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.175)

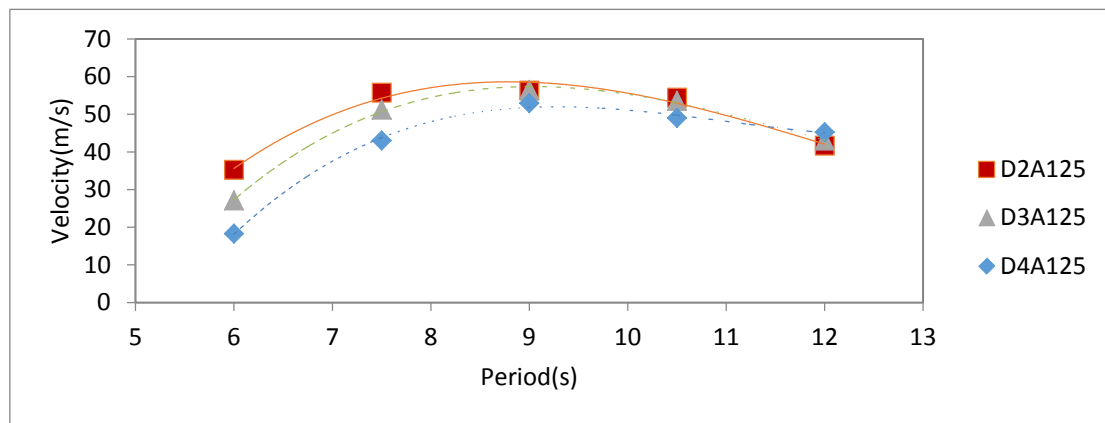


圖 6.50 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.125)

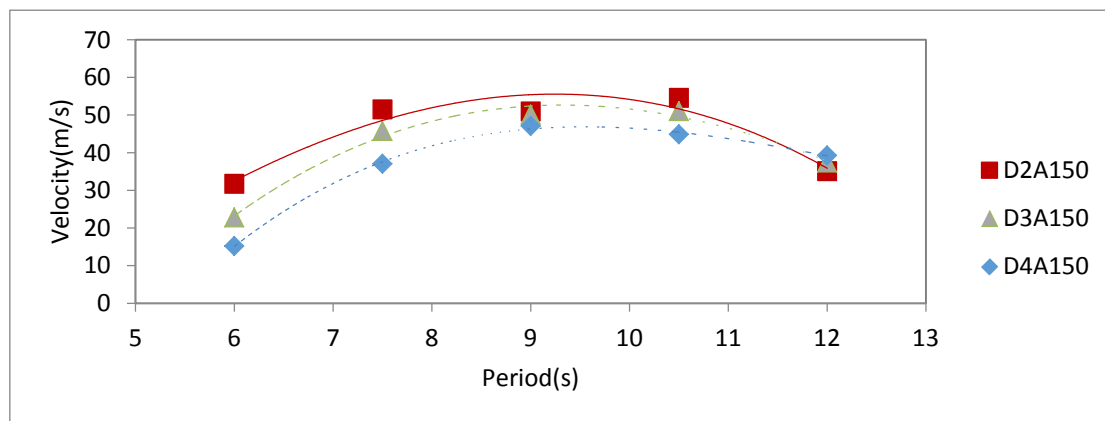


圖 6.51 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.15)

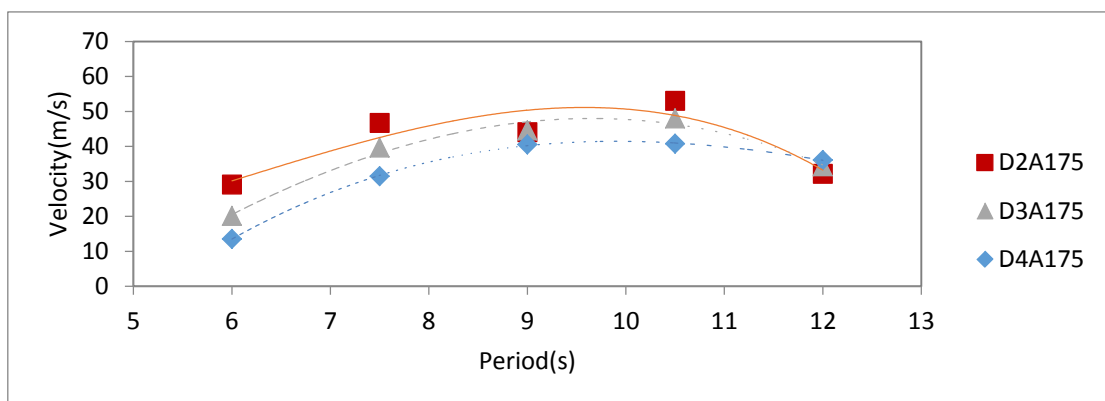


圖 6.52 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 最大氣流速度(無因次氣室長=0.175)

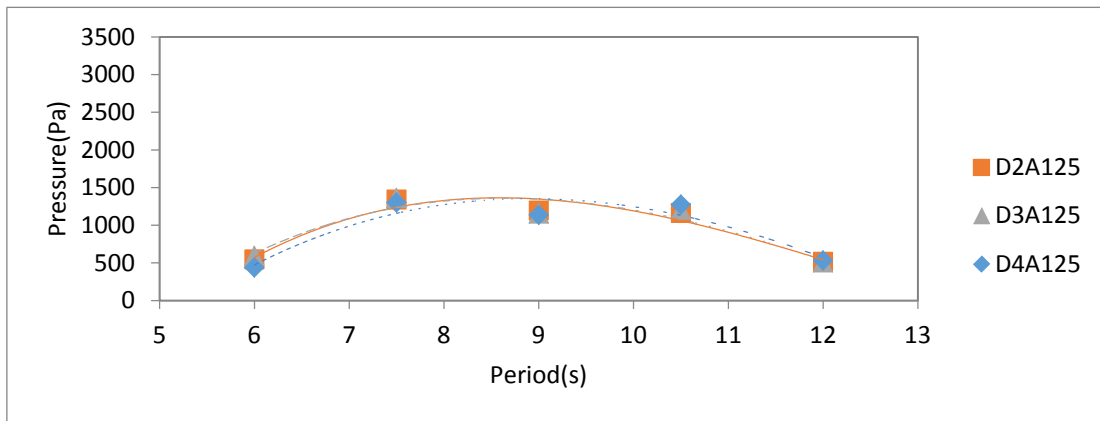


圖 6.53 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.125)

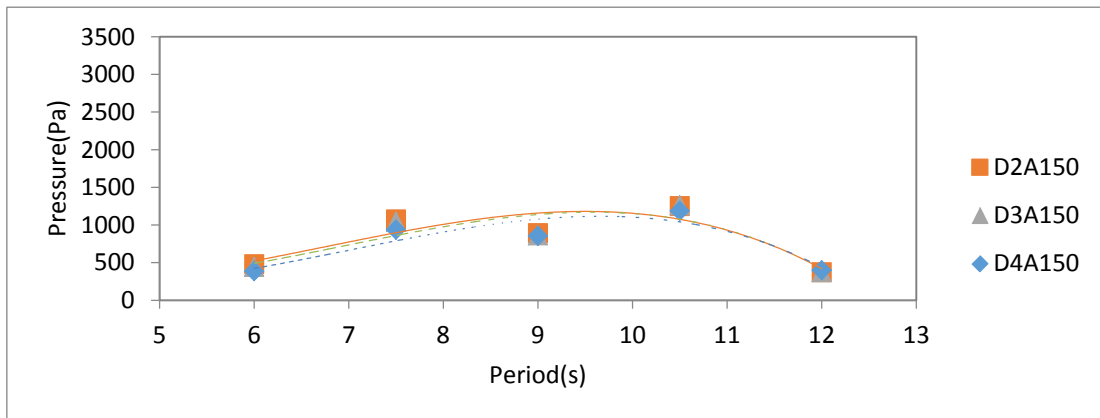


圖 6.54 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.15)

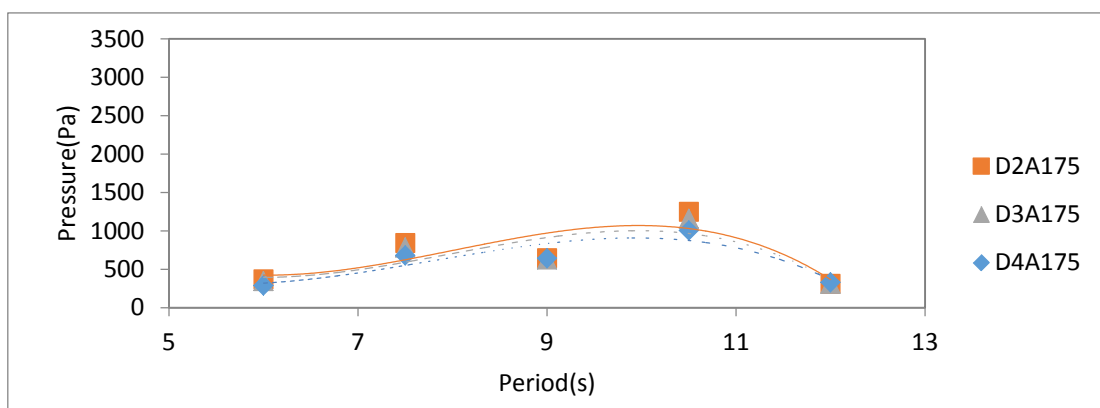


圖 6.55 波高 1.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.175)

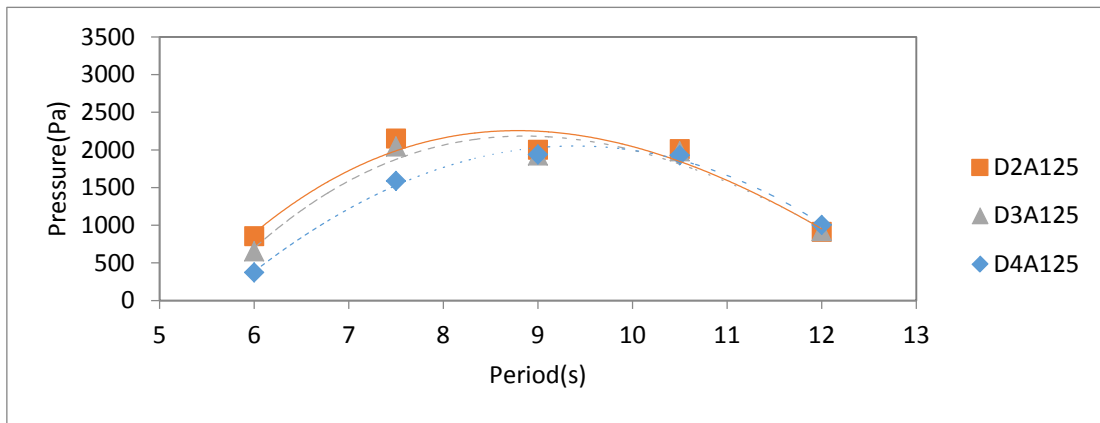


圖 6.56 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.125)

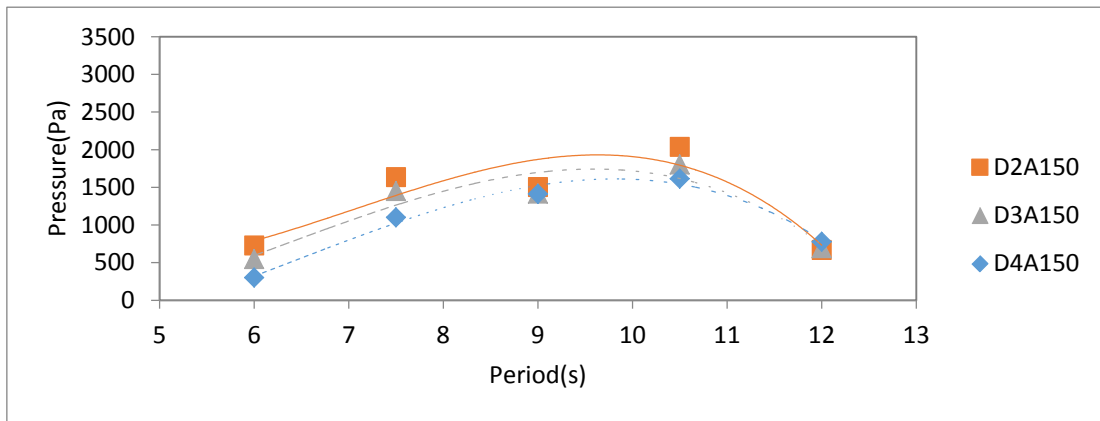


圖 6.57 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.15)

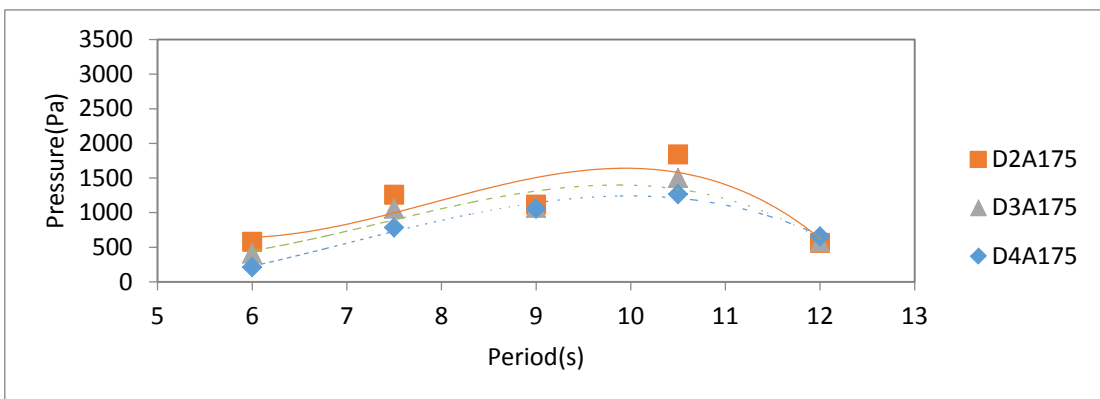


圖 6.58 波高 2 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.175)

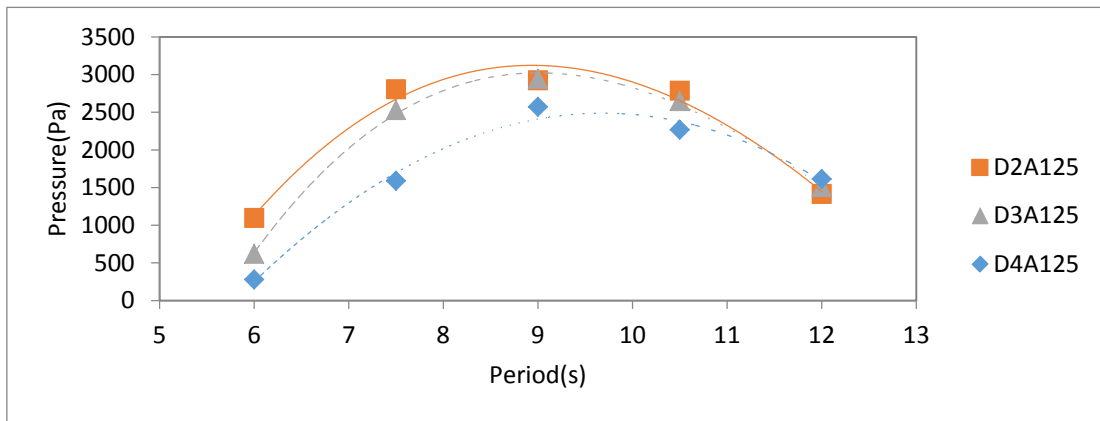


圖 6.59 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.125)

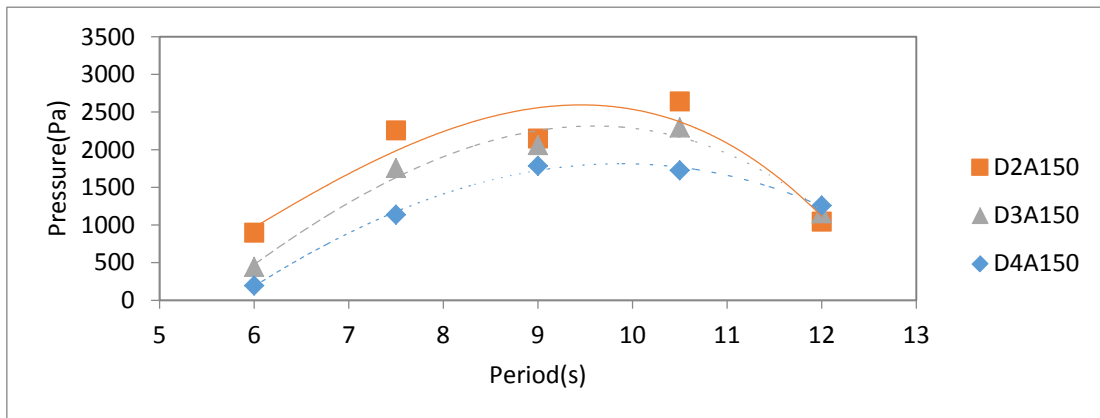


圖 6.60 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.15)

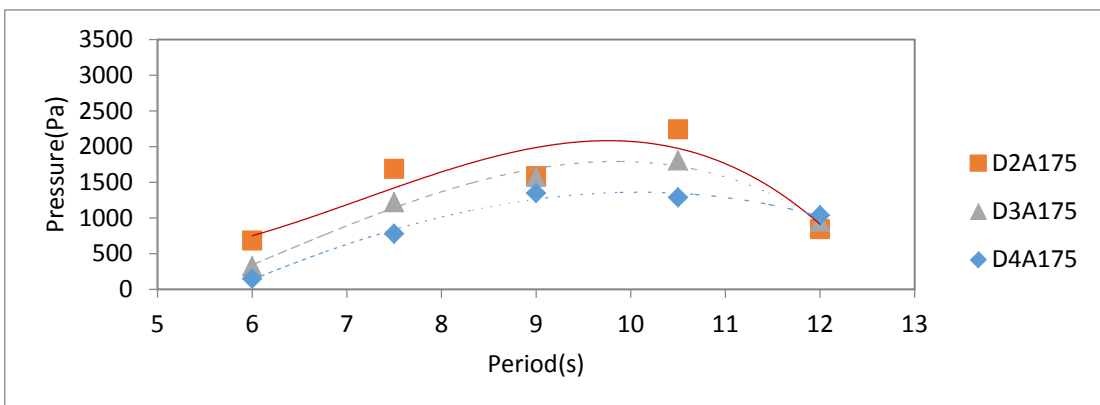


圖 6.61 波高 2.5 米-OWC 前 1/3 大壓力(無因次氣室長=0.175)

第七章 實體模型設計及水工試驗規畫

根據數值模擬研究，嘗試以實體模型設計及水工試驗規劃，來探討數值模擬之成果與水工模型試驗之結果，進行相關探討及比較。本實驗利用本系水工實驗室中之斷面水槽進行試驗，以模型相似理論來設計試驗縮尺，並採用厚度為 1cm 壓克力板的材料製作模型。

7.1 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，在本計畫的問題中，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：

$$F_r = \sqrt{\frac{\text{inertial force}}{\text{gravity force}}} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (7.1)$$

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：

$$\left[\frac{V}{\sqrt{gL}} \right]_m = \left[\frac{V}{\sqrt{gL}} \right]_p \quad (7.2)$$

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：

$$\lambda = \left(\frac{L_m}{L_p} \right) \quad (7.3)$$

由模型與實體之關係式，(7.2)式，可以推導出下列物理量的比例縮尺關係式：

$$\text{面積縮尺：} \frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = \lambda^2 \quad (7.4)$$

$$\text{週期縮尺：} \frac{T_m}{T_p} = \sqrt{\lambda} \quad (7.5)$$

$$\text{波高縮尺：} \frac{H_m}{H_p} = \lambda \quad (7.6)$$

$$\text{質量縮尺：} \frac{M_m}{M_p} = \frac{\rho_m \times L_m^3}{\rho_p \times L_p^3} = N_D \lambda^3 \quad (7.7)$$

$$\text{波浪力縮尺：} \frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m \times g_m}{M_p \times g_p} = \frac{\rho_m \times L_m^3 \times g_m}{\rho_p \times L_p^3 \times g_p} = N_D \lambda^3 \quad (7.8)$$

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。考慮實際水深為 9.5 公尺，故選用 0.6 公尺作為試驗水深，得到 1/16 的縮尺來進行水工模擬試驗。

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{16}$$

7.2 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 9.5 公尺，模型試驗水深為 0.6 公尺，故本實驗採 1/16 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、以及高 100.5cm 如，圖 7.1 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。

7.3 實驗儀器及設備

表 7.1 實驗儀器與設備一覽

實驗設備與儀器	數量
造波水槽	1 座
造波機	1 台
波高計	5 支
訊號增幅器	1 組
擷取卡	2 片
電腦	2 部
氣流速度計	2 支

本實驗是利用本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)

位於國立中山大學海洋環境及工程學系水工實驗室，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步，是以 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 97% 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 7.3~4 所示。

(2) 電容式波高計

本實驗使用五之波高計，其中一支波高計放置於造波板前 5 公尺，而其中三支分別放置於模型前端 5 公尺、3 公尺及 1 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 7.4 所示及圖 7.5 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 7.6 所示。

(4) 資料擷取器

為數位類比擷取卡(AD/DA)，採用研華 PCI.1710.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 7.7 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：0.4.30.0 公尺/秒，1.4.108 公里/小時，0.8.58.3，海浬/小時 80.5910，英呎/分鐘，如圖 7.9 所示。

7.4 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8m 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，必要時並將布置氣壓計於氣室內。實驗水槽示意圖如圖7.2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：

$$L_{min} = \frac{\Delta l}{0.45} < L < \frac{\Delta l}{0.05} = L_{max} \quad (7.9)$$

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 $x > 0.1L$

7.5 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

$$\frac{L^2 H}{h^3} \ll \frac{32\pi^2}{3} \quad (7.10)$$

$$\frac{H}{L} < \frac{1}{16} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (7.11)$$

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)。

7.6 實驗參數設定

本實驗使用模型，尺寸長、寬、高各為 26cm、81cm、100.5cm，實驗有六組不同週期，及五組不同波高，如表 7.2 所示，對同一試驗模型，將進行 30 組不同波浪參數之實驗。

改變參數

週期(T)1、1.2、1.4、1.6、1.8、2 sec，波高(H)4、6、8、10、12 公分

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 7.3 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。

7.7 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、氣流速度資料及氣室內之空氣壓力。分析時除了瞭解氣室內為波高變化、通氣口氣流速度及氣室內相關位置之氣壓變化外，波浪之反射率與傳統沉箱式碼頭之差異亦

將予以考慮。

7.7.1 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。

7.7.2 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出氣口，並置換單一方向旋轉葉片，搭配軟體介面擷取系統得氣流速度計上所量測到的氣流速度值。

表 7.2 模型與實體縮尺

Parameter	Modal	Prototype
週期 T(sec)	1 sec	4 sec
	1.2 sec	4.8 sec
	1.4 sec	5.6 sec
	1.6 sec	6.4 sec
	1.8 sec	7.2 sec
	2 sec	8 sec

波高 H(cm/m)	4 cm	0.64 m
	6 cm	0.96 m
	8 cm	1.28 m
	10 cm	1.6 m
	12 cm	1.92 m

表 7.3 模型與實體縮尺

parameter	Modal.1	Modal.2
模型總長	26 cm	26 cm
模型總寬	81+10 cm	81+10 cm
模型總高	100.5 cm	100.5 cm
氣室下方開口寬*高	19cm*19cm	19cm*53.5cm
氣室內部長	24 cm	24 cm
沒水深(靜水深至開口上緣)	6 cm	6 cm
出風口直徑	7 cm	7 cm
氣室連通洞直徑	2 cm	2 cm

表 7.4 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

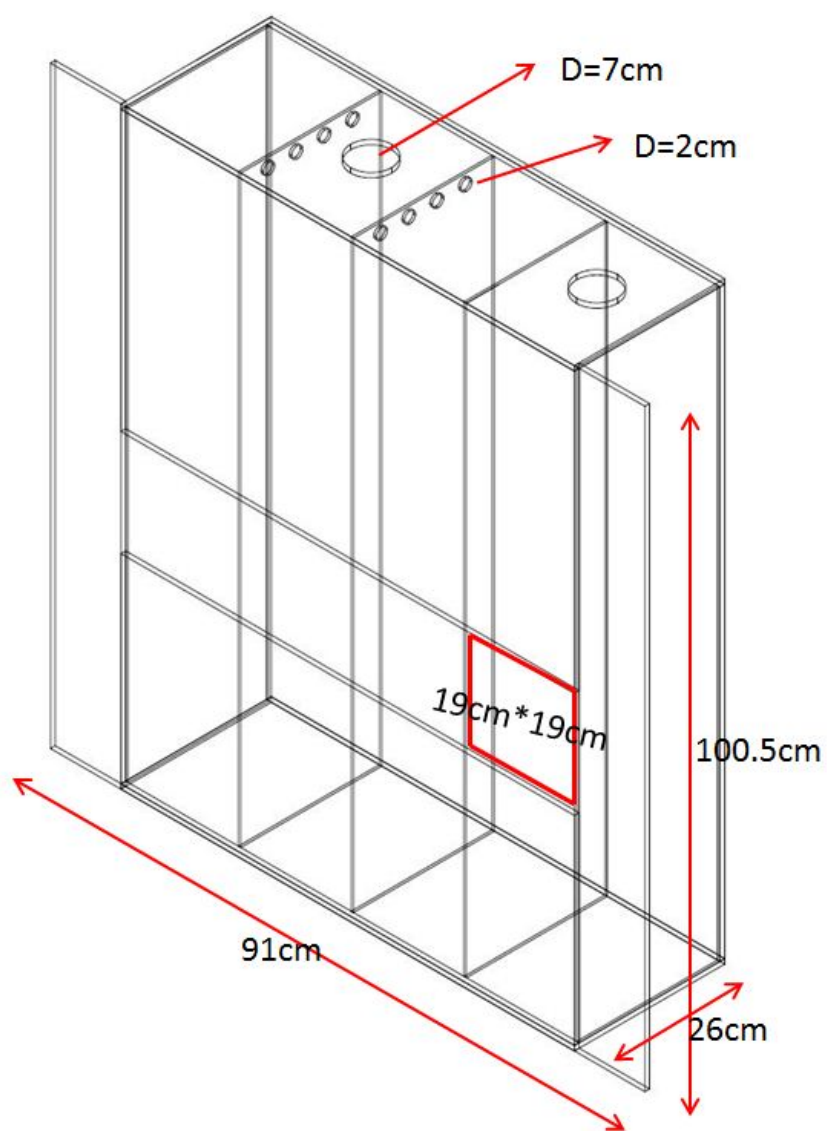


圖 7.1 水槽試驗模型示意圖

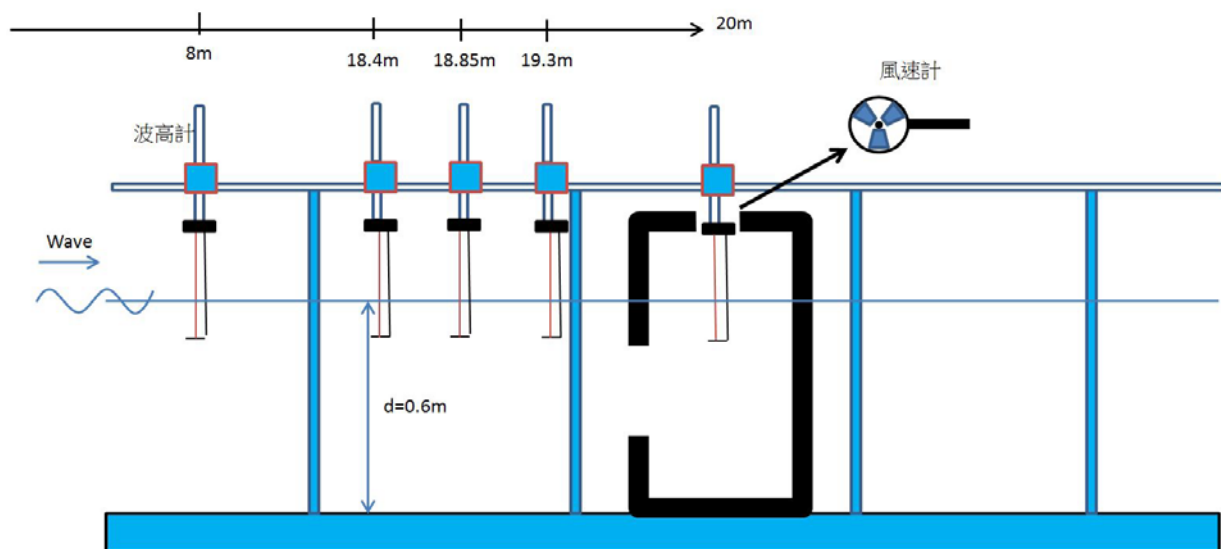


圖 7.2 實驗水槽示意圖



圖 7.3 造波水槽

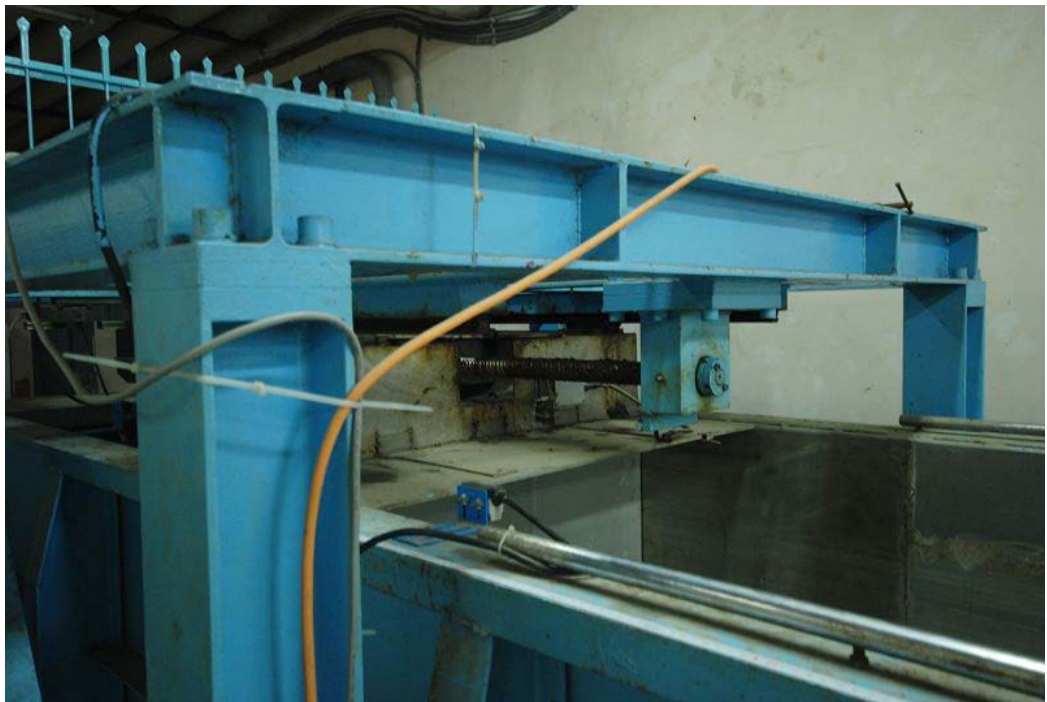


圖 7.4 造波機



圖 7.5 波高計



圖 7.6 訊號增幅器

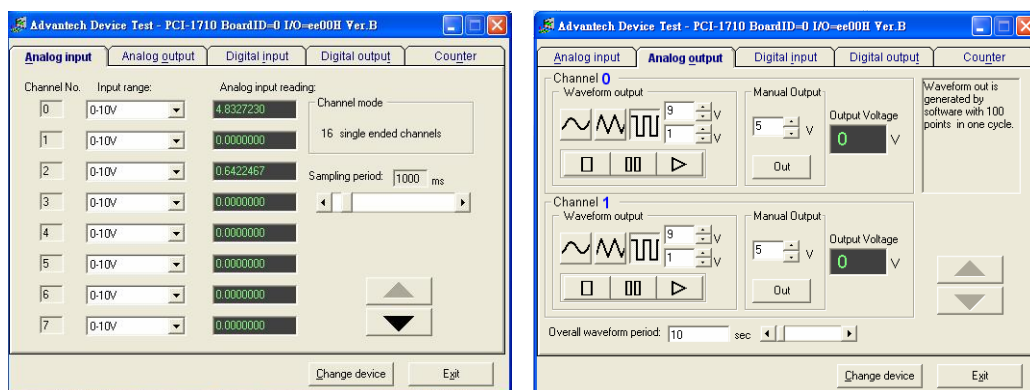


圖 7.7 AD/DA 內建 Analog input 介面與 Analog output 介面



圖 7.8 訊號放大器



圖 7.9 氣流速度計(產品代號：AM.4214SD)



圖 7.10 模型實體



圖 7.11 模型架設於水槽中情形



圖 7.12 內部氣室波高計位置

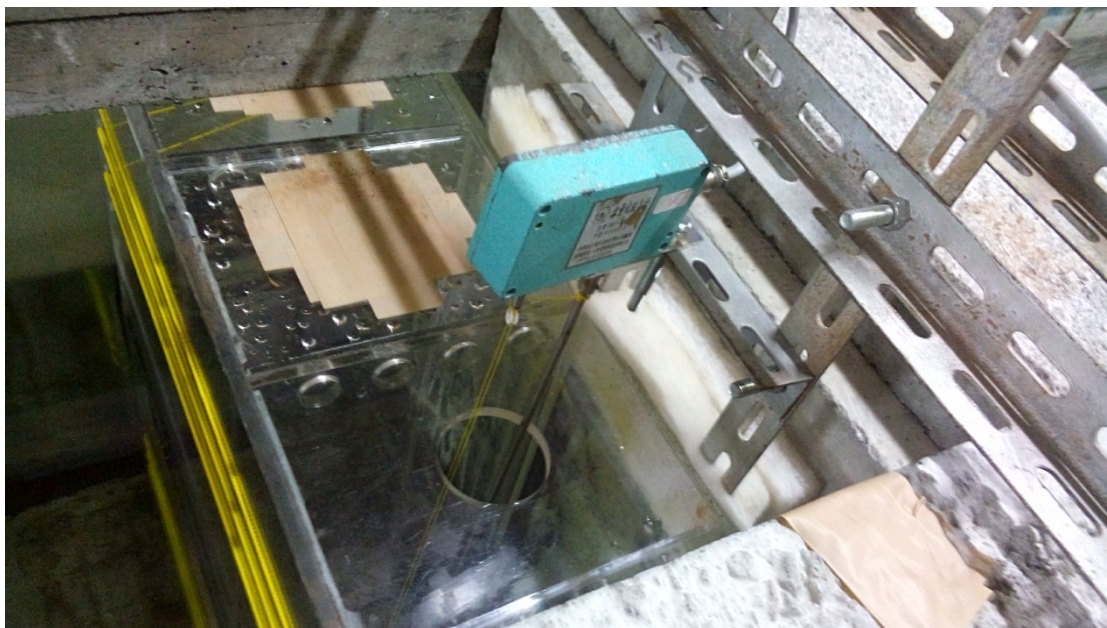


圖 7.13 內部氣室波高計

第八章 水工模擬試驗結果與分析

本計畫進行水工模擬試驗首先以分析模型中之高雄港第一港口防波堤北堤為模擬對象，其波浪條件週期為 7 秒，示性波高為 1m，水深為 9.5m，考慮試驗所造波槽合適試驗水深為 60cm，故採 1/16 縮尺進行水工模擬試驗。

本計畫在進行水工模型試驗波浪條件是以 60 公分的固定水深，波高 6.25cm 週期 1.75sec 波浪條件與數值模擬做比較，以及波高分別為 4、6、8、10、12 公分及週期分別為 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2 秒波浪條件，共有 31 組波浪條件參數。

本計畫水工試驗之模型有兩種：模型 I 是依據數值模擬模型，以 1:16 的縮尺進行水工模擬試驗。模型 II 是依據模型 I 將其迎波面之開口面積由模型 I 19cm*19cm 改為模型 II 19cm*53.5cm 如表 7.3。依據以上參數探討其波浪條件對其對應產生之反射率、氣流速度、內部波高及其效能之探討。

8.1 數值模擬與水工模擬試驗比較

8.1.1 波浪反射率結果之比較

由表 8.1 可知數值模擬反射率結果為 0.7，模型 I 反射率結果為 0.6。其結果誤差 14%。

8.1.2 氣流速度結果之比較

由表 8.1 可知模型 I 氣流速度結果為 7.30 m/s，氣流速度縮尺放大倍率為 4 倍，則為 $7.30 \times 4 = 29.2$ m/s，數值模擬氣流速度結果為 29.26 m/s，其結果誤差 0.21% 甚是相近。

8.1.3 整體能量擷取率結果之比較

由表 8.1 可知模型 I 氣室內部波高結果為 11.35cm，波高縮尺放大倍率為 16 倍，則為 $11.35 \times 16 = 181.6\text{cm}$ ，數值模擬氣室內部波高結果為 200cm，其結果誤差 9.5%。經本計畫計算後整體之波浪能轉換成風能之效率由數值模擬的結果為 11%，而模型 I 結果為 12%，其結果甚是相近。

8.2 水工模擬試驗模型 I 與模型 II 比較

在波高 6.25cm 週期 1.75sec 波浪條件下，進行水工模擬試驗模型 I 與模型 II 比較。模型 I 與模型 II 其差異在於迎波面開口面積，模型 I 為 $19\text{cm} \times 19\text{cm}$ ，模型 II 為 $19\text{cm} \times 53.5\text{cm}$ 。在其開口面積有 2.8 倍之差異。

8.2.1 波浪反射率結果之比較

由表 8.1 可知模型 I 反射率結果為 57.5%，模型 II 反射率結果為 70.6%，其模型 II 反射率結果較模型 I 反射率結果增加 13.1%。

8.2.2 氣流速度結果之比較

由表 8.1 可知模型 I 氣流速度結果為 7.30 m/s，模型 II 氣流速度結果為 6.87m/s，其模型 II 氣流速度結果較模型 I 氣流速度結果減少 0.43 m/s。

8.2.3 整體能量擷取率結果之比較

由表 8.1 可知模型 I 氣室內部波高結果為 11.35cm，模型 II 氣室內部波高結果為 10.32cm，其模型 II 氣室內部波高結果較模型 I 氣室內部波高結果減少 1.03 cm。經本計畫計算後整體之波浪能轉換成風能之效率模型 I 結果為 12%，模型 II 結果為 10%。

表 8.1 數值模擬、模型 I 及 模型 II 比較表

	數值模擬	模型 I	模型 II
縮尺	16:1		
週期 T[sec]	7	1.75	1.75
波高 H[cm]	100	6.25	6.25
波長[m]	59.192	3.712	3.712
蓋水面積[cm^2]	456000	1824	1824
迎波面開口面積 [cm^2]	300*300	19*19	19*53.5
入射波浪總能[J]	892789	13.51	13.51
反射率 Kr	66.26%	57.5%	70.6%
風口面積[cm^2]	9500	38	38
氣流速度[m/s]	29.26	7.30	6.87
氣流速度能[J]	99988	1.569	1.310
氣室內部波高 H _{1/3} [cm]	200	11.35	10.32
氣室內部波能[J]	111834	1.44	1.19
波高放大係數	2	1.82	1.65
擷取率 =(共振能/入射能)	0.13	0.11	0.09
能量擷取率(入射波能 轉風能)	0.11	0.12	0.10

參考公式：

(1) 反射率 Kr : $K_r = \frac{a_r}{a_i}$

$$a_i = \frac{1}{2|\sin(k\lambda_{12})|} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2\cos(k\lambda_{12} + \delta_{12})}$$

$$a_r = \frac{1}{2|\sin(k\lambda_{12})|} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2\cos(k\lambda_{12} - \delta_{12})}$$

(A_1 、 A_2 為波高計所量得合成波形之振幅， k 為週波數， λ_{12} 為兩隻波高計間之距離， δ_{12} 兩側點間之相位差)

(2) 氣流速度能： $\frac{1}{2}\rho AV^3t$ (ρ 為空氣密度採 1.200kg/m^3 ， A 為風口面積， V 為氣流速度)

(3) 氣室內部波能： $\frac{1}{16}\rho g H^2 A$ (ρ 為水密度採 1000kg/m^3 ， H 為波高， A 為蓋水面積)

8.3 水工模擬試驗模型 I 與模型 II 於不同波浪條件下之比較

在波高為 4、6、8、10、12cm 及週期為 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2sec 波浪條件下，進行水工模擬試驗模型 I 與模型 II 比較。模型 I 與模型 II 其差異在於迎波面開口面積，模型 I 為 $19\text{cm} \times 19\text{cm}$ ，模型 II 為 $19\text{cm} \times 53.5\text{cm}$ 。在其開口面積有 2.8 倍之差異。

8.3.1 波浪反射率結果之比較

在波高為 4、6、8、10、12cm 及週期為 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2sec 波浪條件下，模型 I 與模型 II 反射率結果如表 8.2 及表 8.3，由圖 8.1 到圖 8.5 可知模型 I 反射率結果皆大於模型 II 反射率結果。並由圖 8.6 到圖 8.7 可發現在相同的波高條件下，週期 1.2sec 有較小值發生，週期 1.8sec 有較大值發生。

表 8.2 模型 I 反射率 K_r

模型 I 反射率 K_r		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	0.4776	0.5730	0.5889	0.5970	0.6125
	1.2	0.3200	0.4508	0.5489	0.5496	0.5669
	1.4	0.5474	0.5019	0.4951	0.4801	0.4876
	1.6	0.5645	0.6480	0.6590	0.6199	0.6200
	1.8	0.7922	0.7470	0.7263	0.7300	0.7187
	2	0.7172	0.6543	0.6705	0.6516	0.6155

表 8.3 模型 II 反射率 Kr

模型 II 反射率 Kr		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[SEC]	1	0.4887	0.5935	0.6500	0.6731	0.6915
	1.2	0.5987	0.6924	0.6513	0.6213	0.6120
	1.4	0.6693	0.5870	0.5731	0.5575	0.5608
	1.6	0.7623	0.7481	0.7333	0.6956	0.7116
	1.8	0.7073	0.8102	0.8009	0.7696	0.7703
	2	0.7104	0.6904	0.6609	0.6798	0.6238

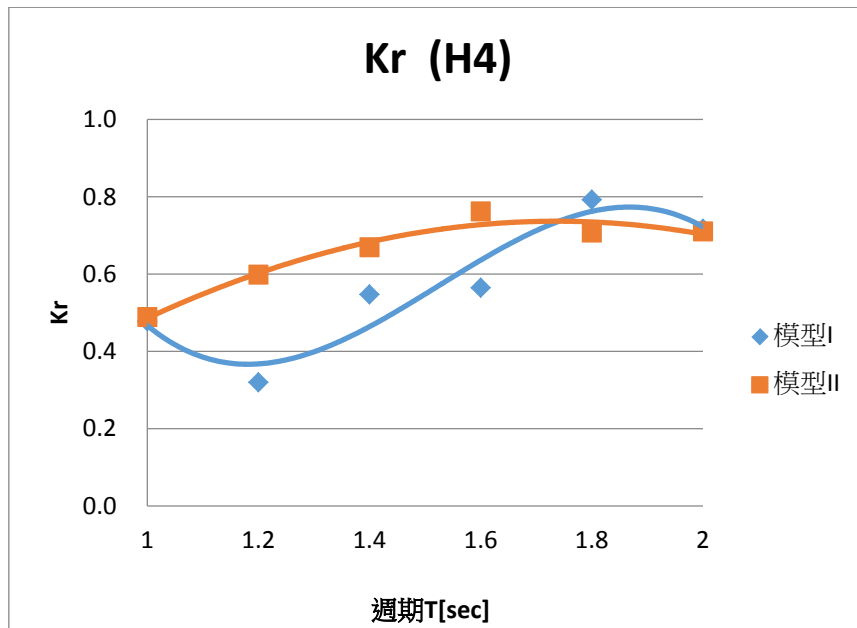


圖 8.1 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=4)

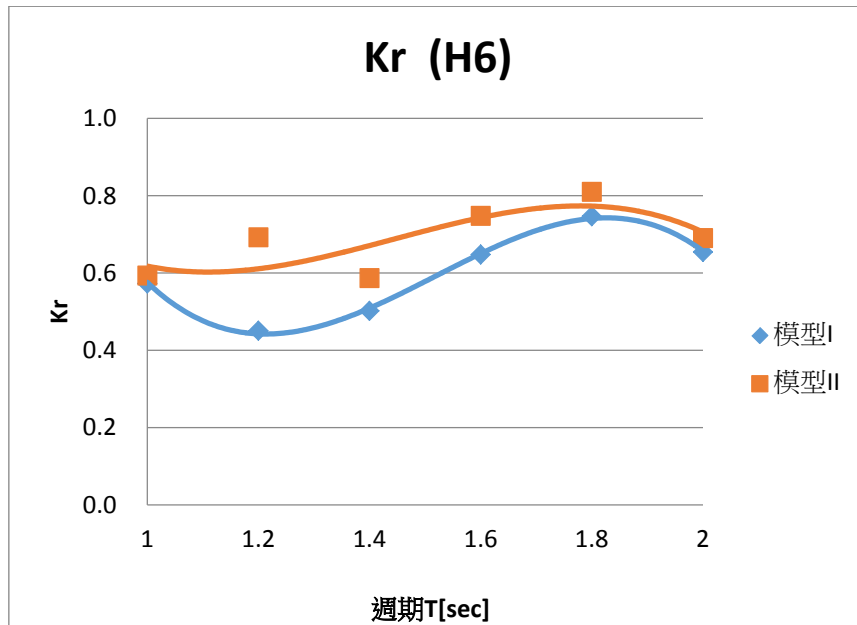


圖 8.2 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=6)

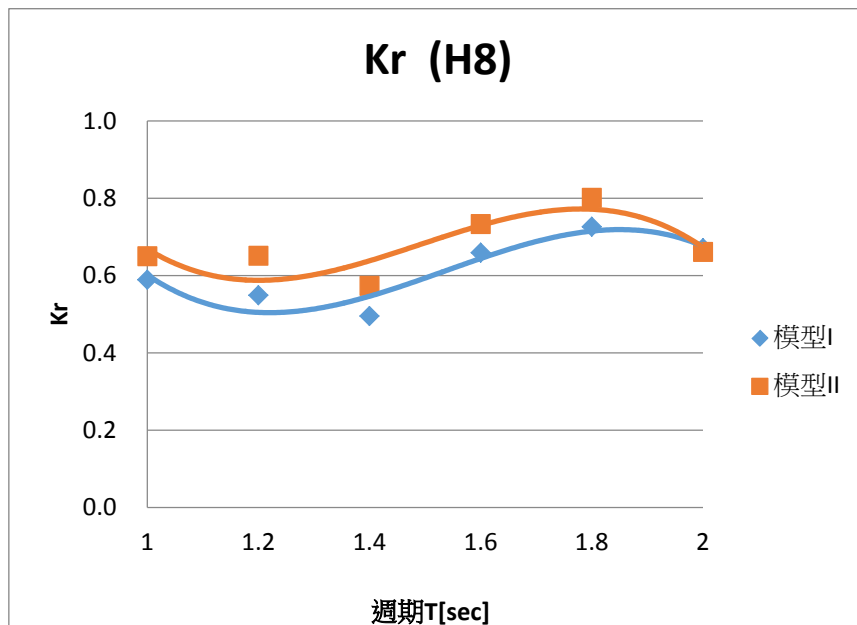


圖 8.3 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=8)

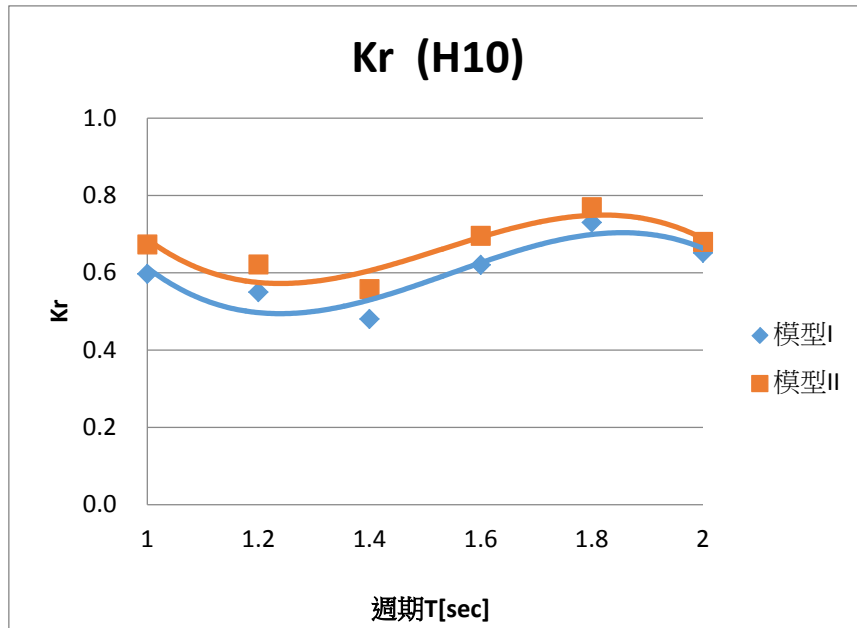


圖 8.4 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=10)

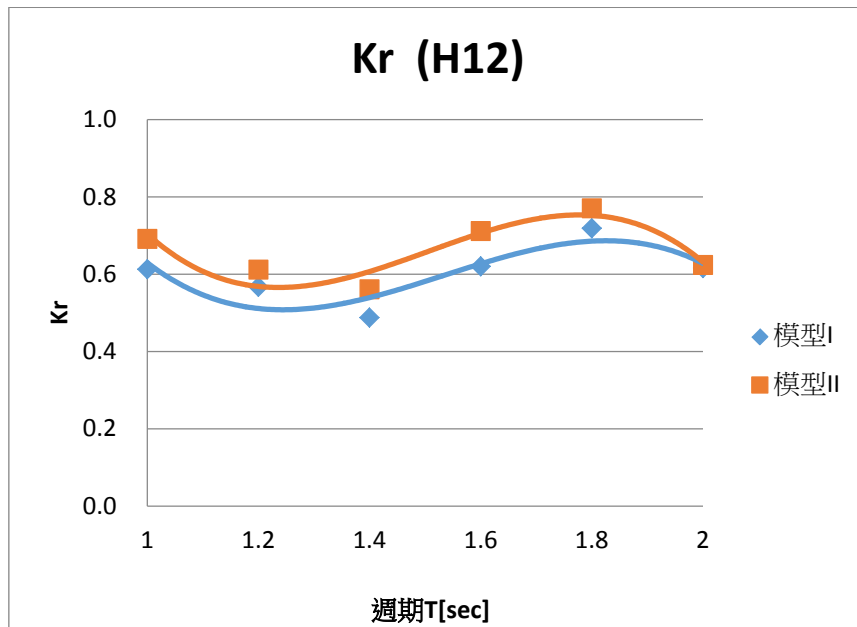


圖 8.5 模型 I 及模型 II 反射率比較(H=12)

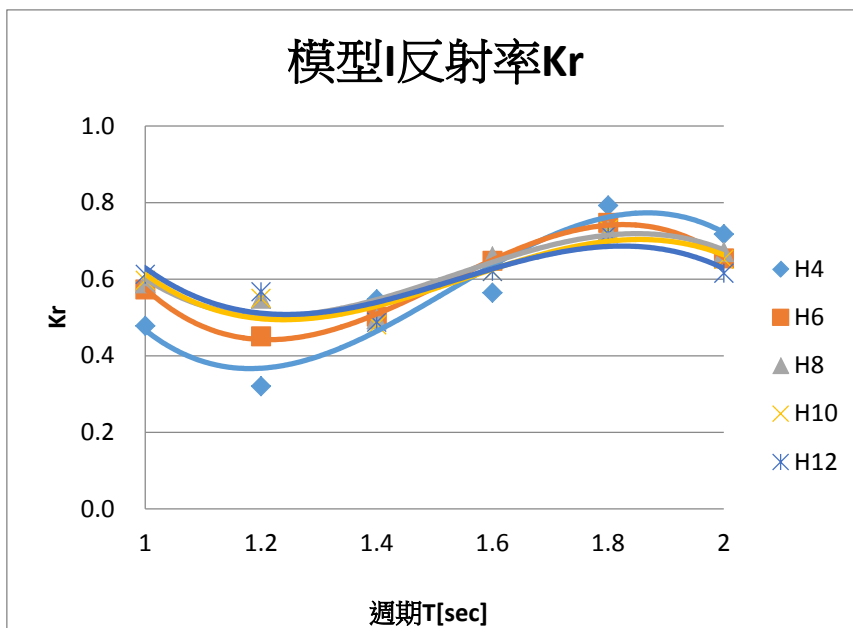


圖 8.6 模型 I 反射率綜合比較

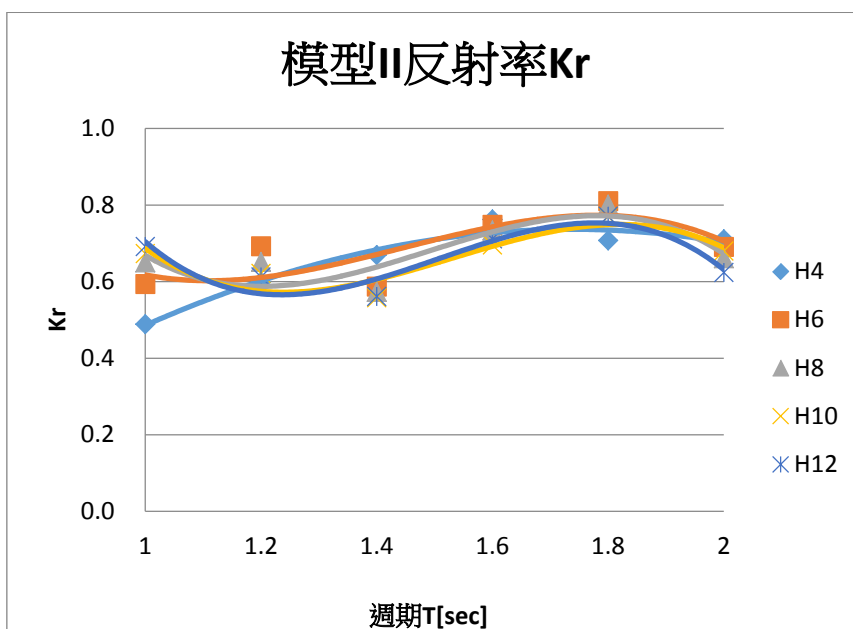


圖 8.7 模型 II 反射率綜合比較

8.3.2 氣流速度結果之比較

在波高為 4、6、8、10、12cm 及週期為 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2sec 波浪條件下，模型 I 與模型 II 氣流速度結果如表 8.2 及表 8.3 由圖 8.1 到圖 8.5 可知模型 I 氣流速度趨勢結果皆大於模型 II 氣流速度趨勢結果。並由圖 8.6 到圖 8.7 可發現在相同的波高條件下，週期 1.2sec 有較大值發生，週期 1.8sec 有較小值發生。

表 8.4 模型 I 平均氣流速度

模型 I		波高 H[cm]				
氣流速度[m/s]		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 8.5 模型 II 平均氣流速度

模型 II		波高 H[cm]				
氣流速度[m/s]		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	5.7	7.26	7.78	8.46	9.08
	1.2	5.87	7.7	10.18	11.1	12.26
	1.4	4.93	6.55	7.83	9.22	10.47
	1.6	5.86	7.53	8.79	9.58	10.18
	1.8	3.72	5.13	6.47	7.57	8.19

	2	7.11	7.56	7.47	8.41	10.01

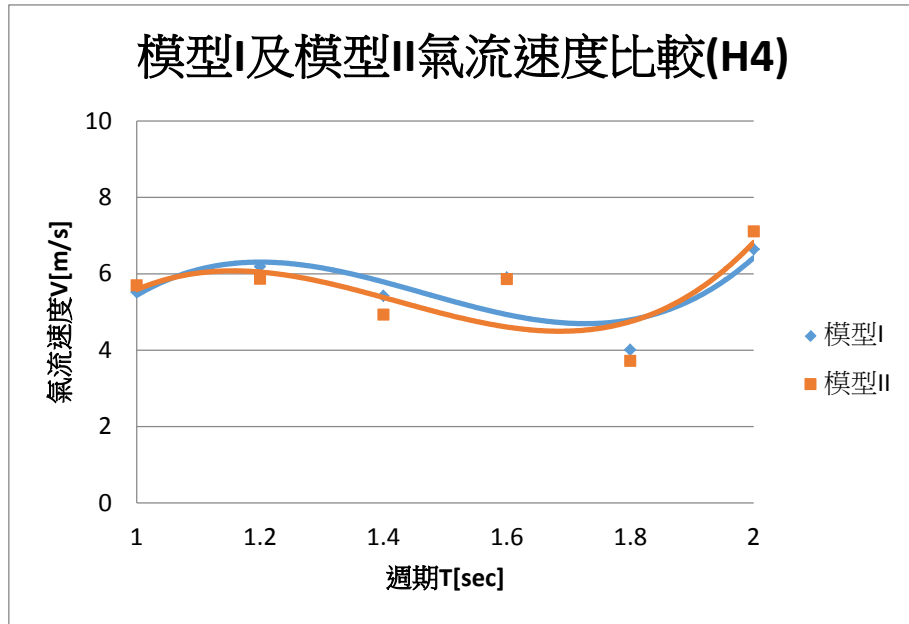


圖 8.8 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=4)

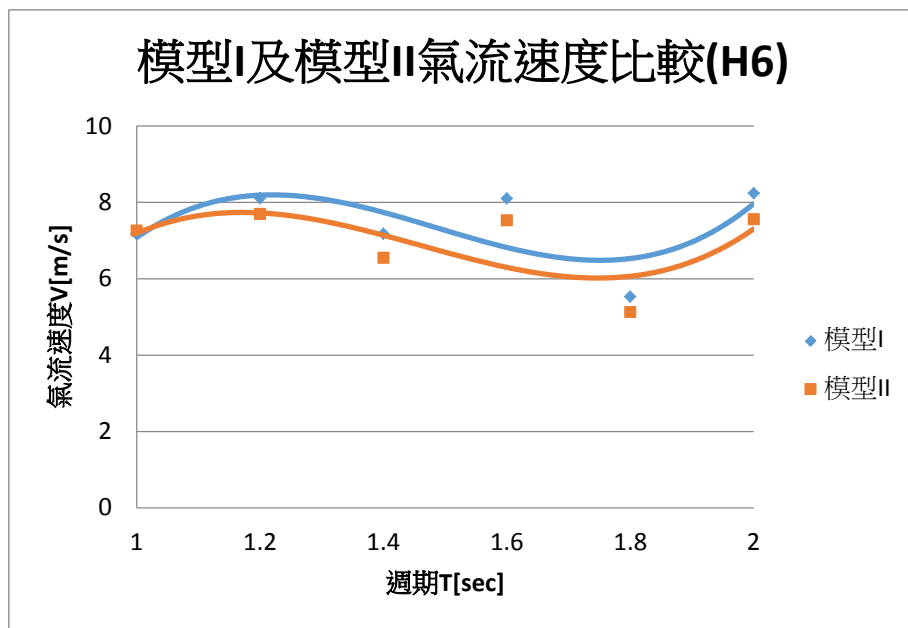


圖 8.9 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=6)

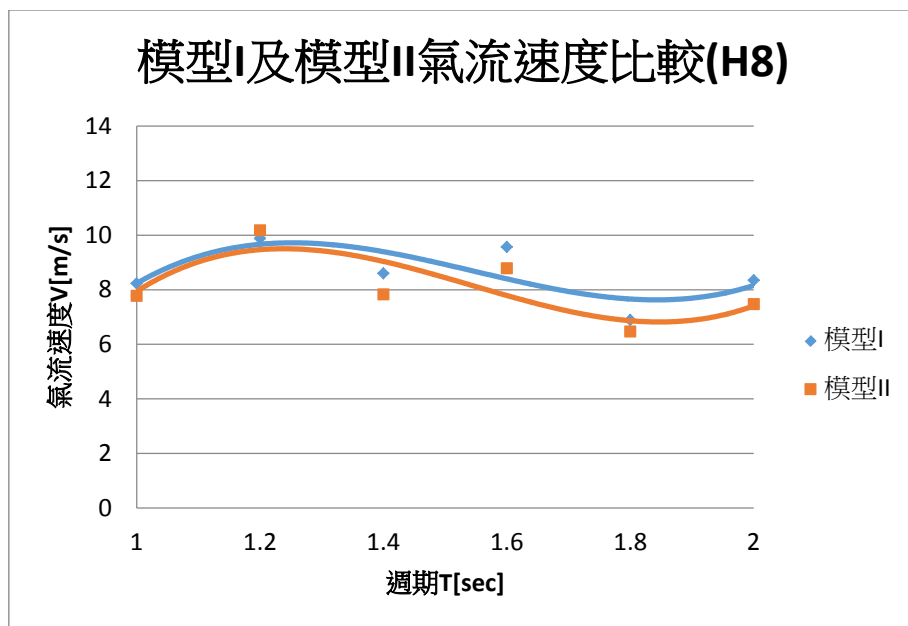


圖 8.10 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=8)

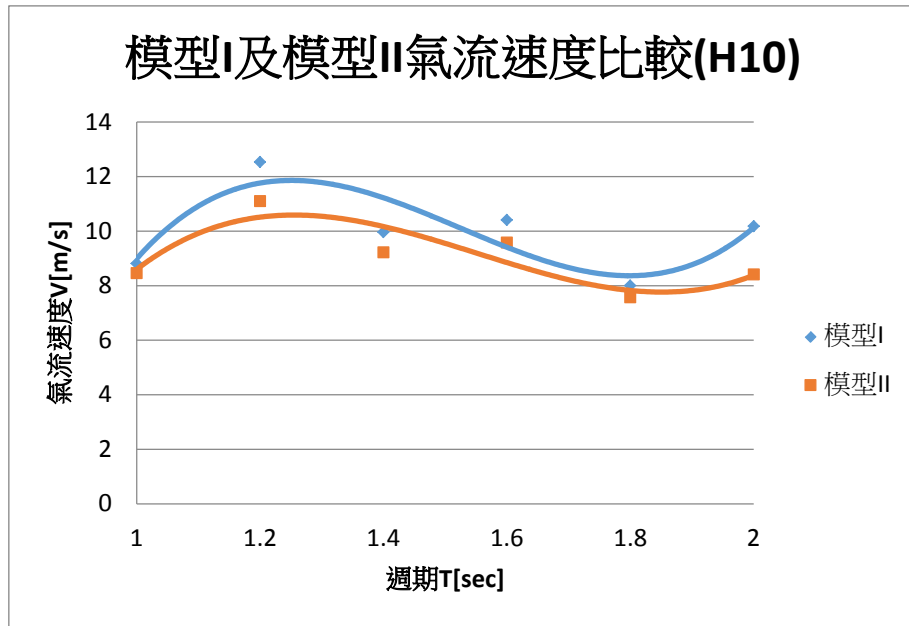


圖 8.11 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=10)

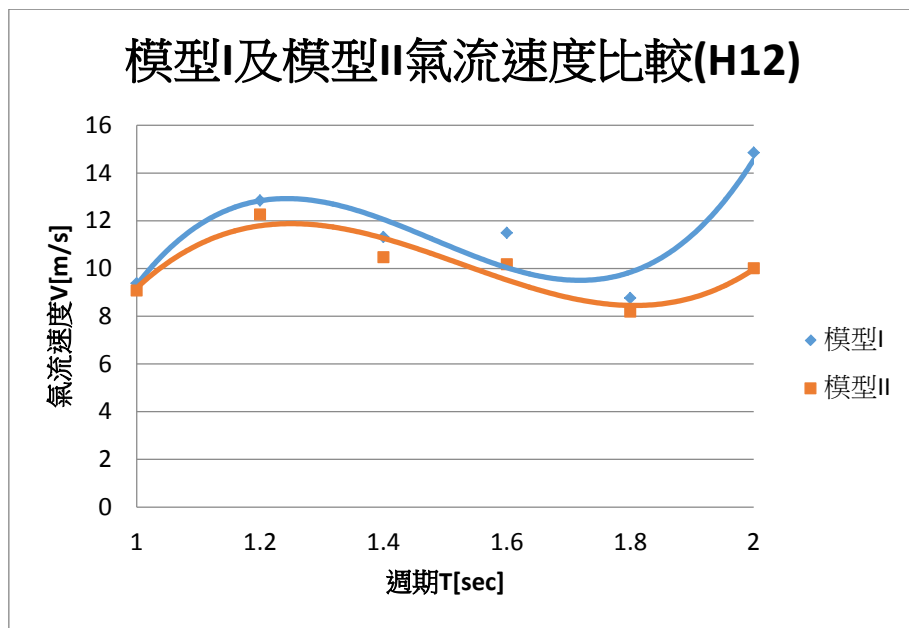


圖 8.12 模型 I 及模型 II 氣流速度比較(H=12)

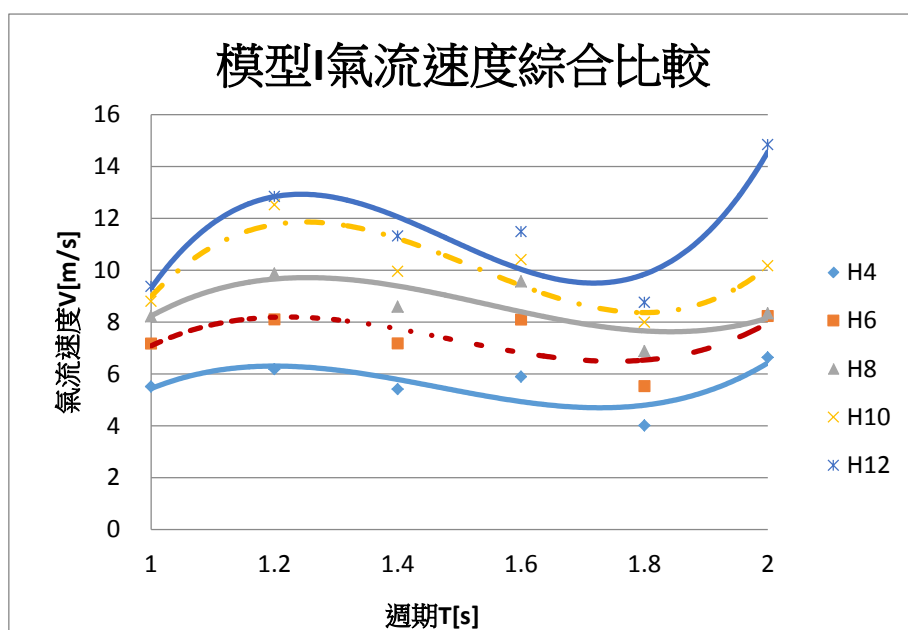


圖 8.13 模型 I 氣流速度綜合比較

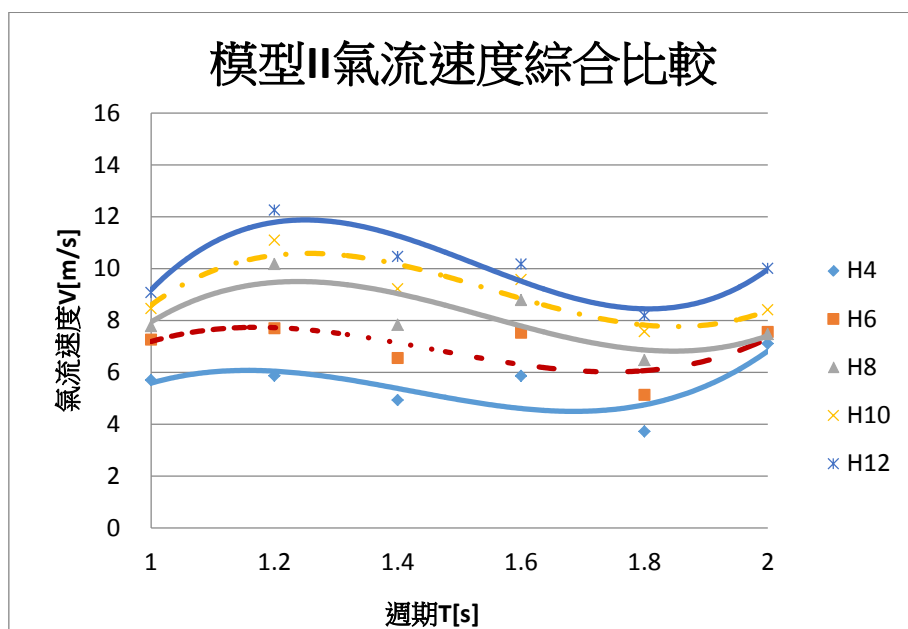


圖 8.14 模型 II 氣流速度綜合比較

8.3.3 內部波高結果之比較

在波高為 4、6、8、10、12cm 及週期為 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2sec 波浪條件下，模型 I 與模型 II 內部波高結果如表 8.6 及表 8.7，內部波高放大率結果如表 8.8 及表 8.9。由圖 8.15 到圖 8.24 可知模型 I 內部波高結果其趨勢幾乎近似於模型 II 內部波高結果。可發現在相同的波高條件下週期 1.8sec 有較小值發生。而在週期 2sec 有 2~3 倍較大的放大率，其餘週期皆位於 1~2 倍之間

表 8.6 模型 I 內部波高

模型 I		波高 H[cm]				
內部波高[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 8.7 模型 II 內部波高

模型 II		波高 H[cm]				
內部波高[cm]		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	5.78	8.60	10.52	11.96	12.04
	1.2	7.15	9.57	12.99	16.51	18.34
	1.4	6.97	9.10	10.75	12.45	14.99
	1.6	8.05	11.01	13.78	16.52	18.89
	1.8	5.46	7.56	9.78	11.98	14.15
	2	11.64	16.64	21.36	24.90	27.15

表 8.8 模型 I 內部波高放大率

模型 I		波高 H[cm]				
內部波高放大率		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	1.36	1.19	1.10	0.97	0.81
	1.2	1.86	1.47	1.37	1.34	1.23
	1.4	1.73	1.56	1.41	1.31	1.23
	1.6	2.04	1.84	1.70	1.59	1.50
	1.8	1.48	1.37	1.31	1.05	1.23
	2	2.82	2.58	2.45	2.30	2.12

表 8.9 模型 II 內部波高放大率

模型 II		波高 H[cm]				
內部波高放大率		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	1.45	1.43	1.32	1.20	1.00
	1.2	1.79	1.59	1.62	1.65	1.53
	1.4	1.74	1.52	1.34	1.24	1.25
	1.6	2.01	1.83	1.72	1.65	1.57
	1.8	1.36	1.26	1.22	1.20	1.18
	2	2.91	2.77	2.67	2.49	2.26

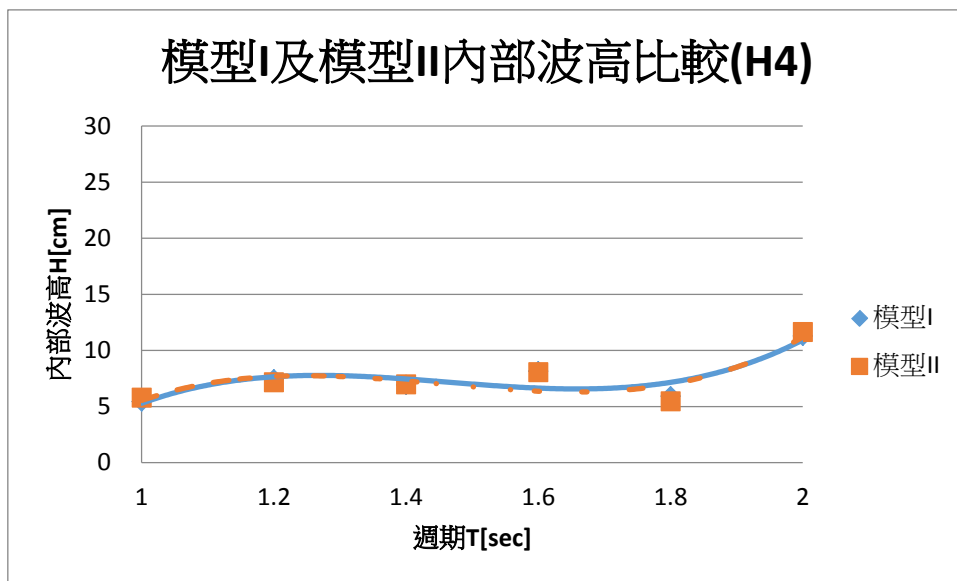


圖 8.15 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=4)

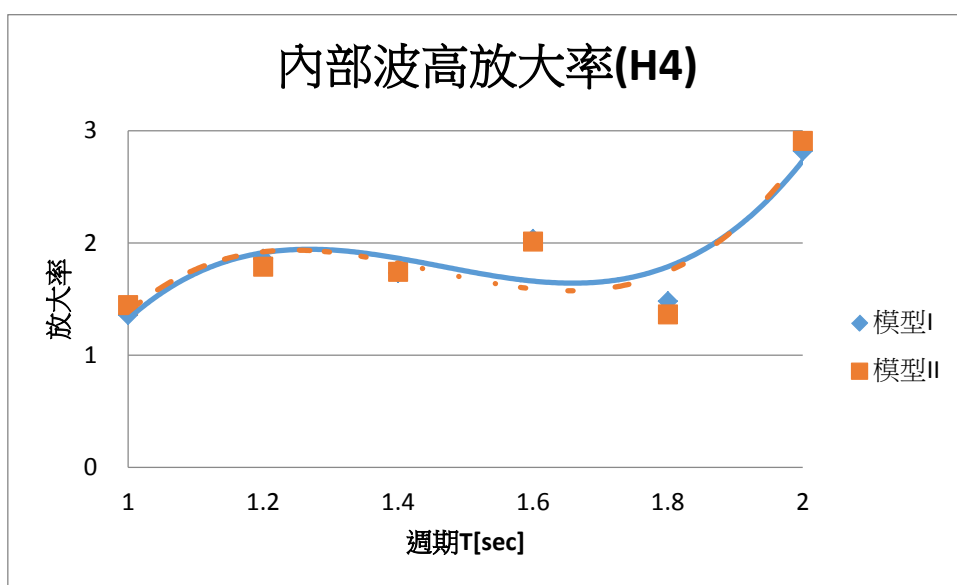


圖 8.16 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=4)

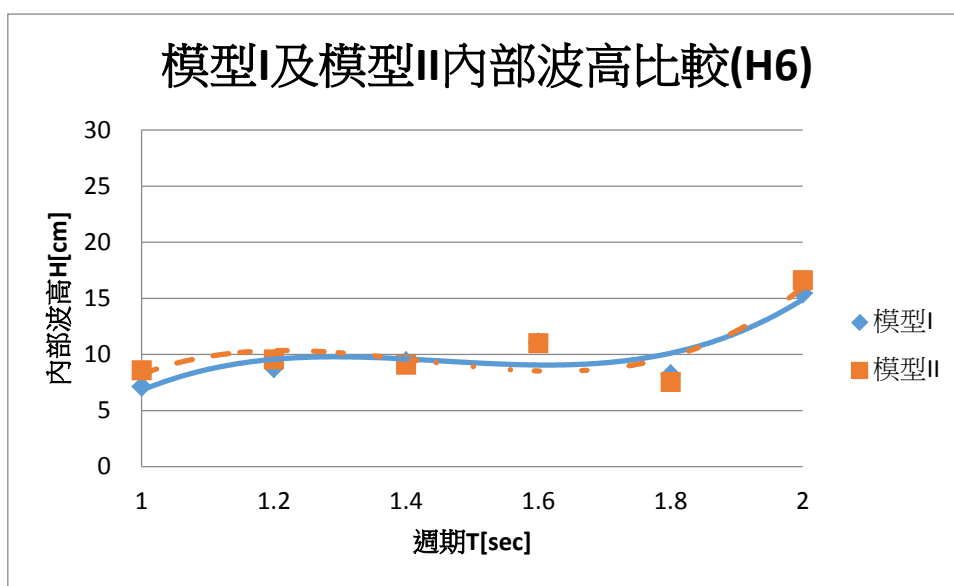


圖 8.17 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=6)

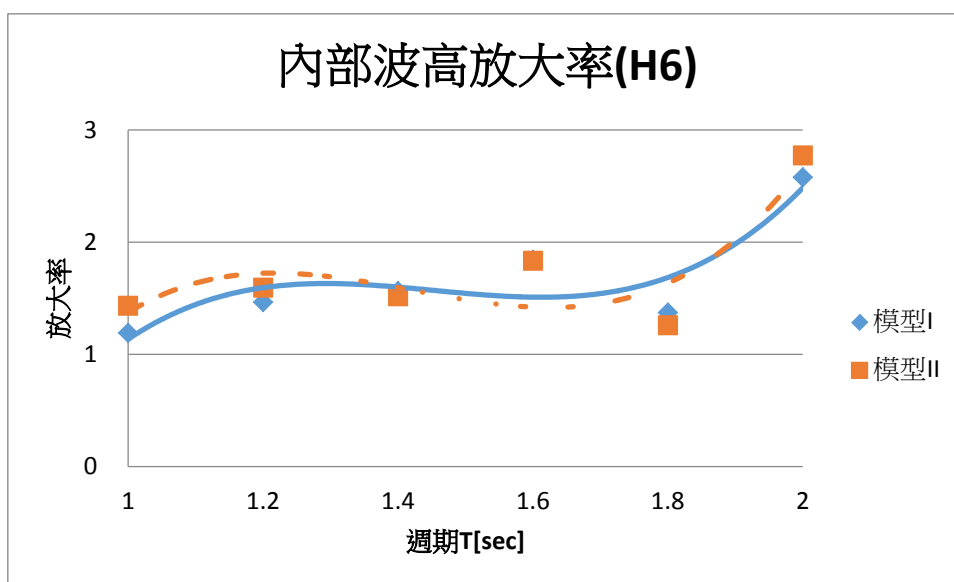


圖 8.18 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=6)

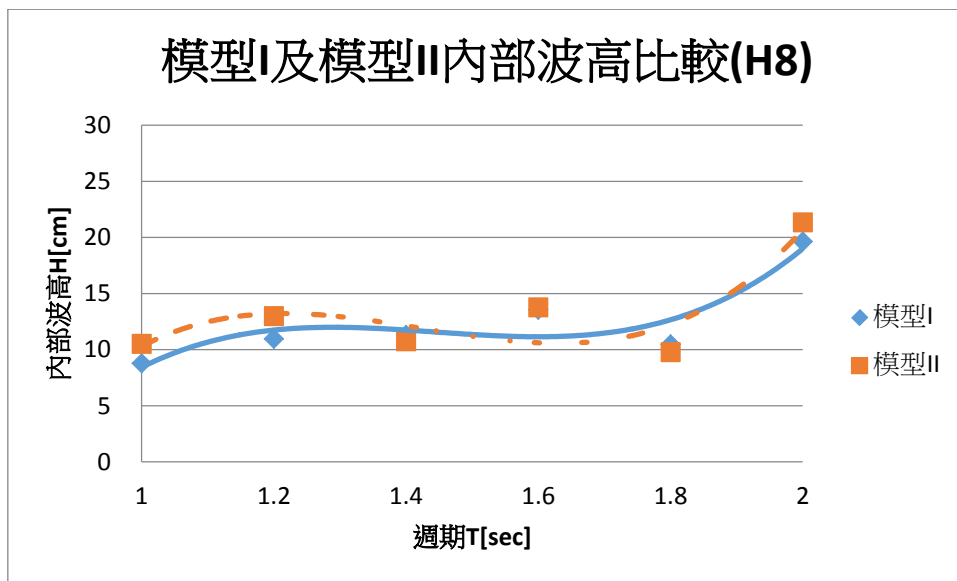


圖 8.19 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=8)

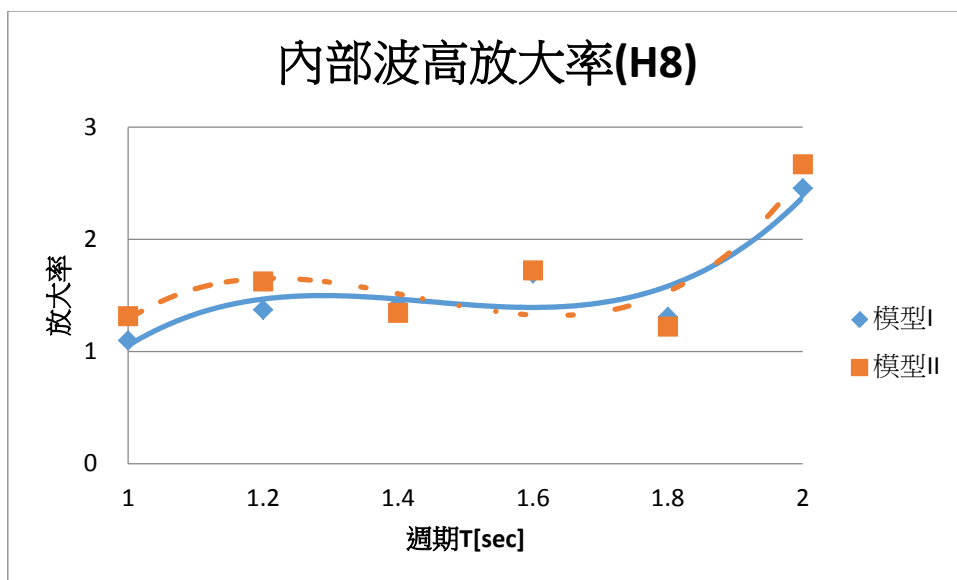


圖 8.20 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=8)

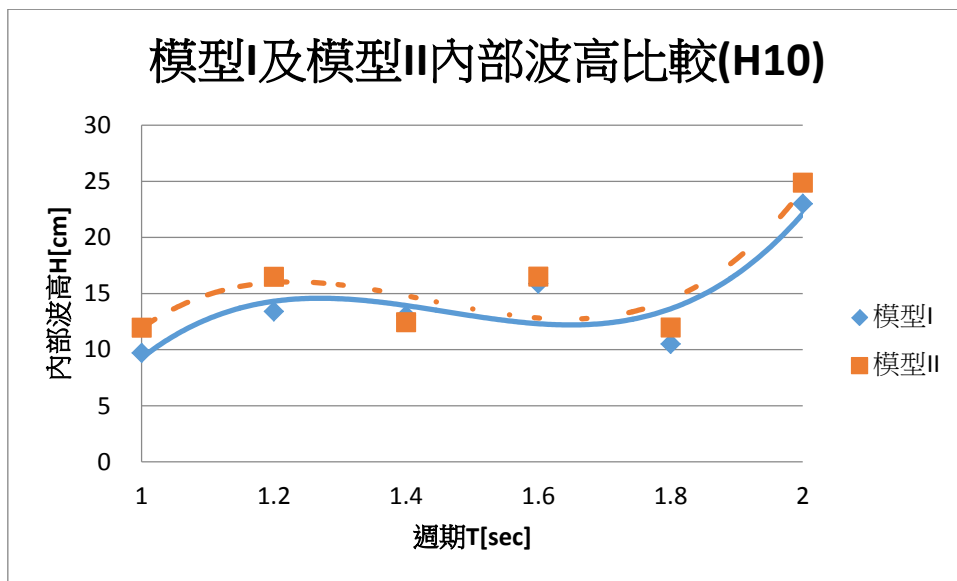


圖 8.21 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=10)

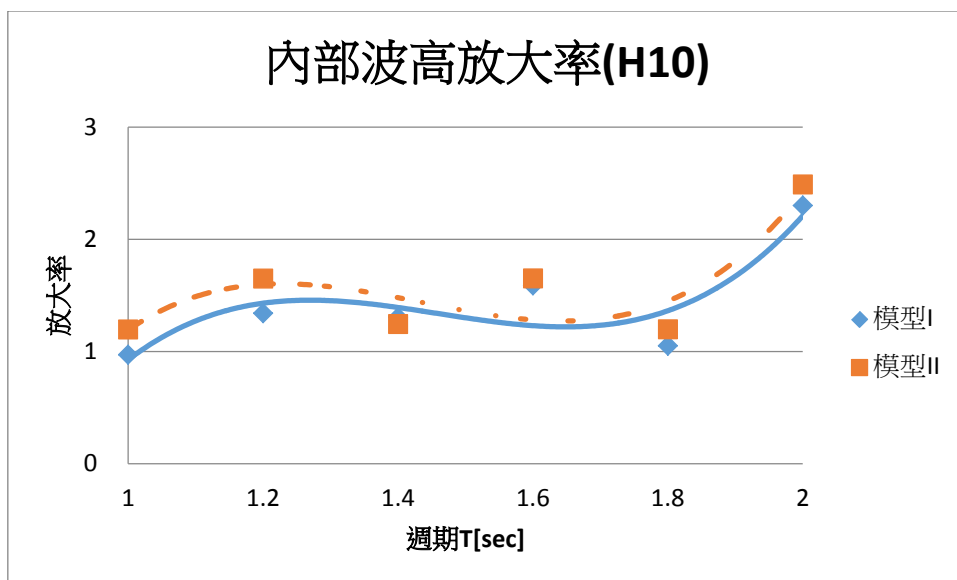


圖 8.22 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=10)

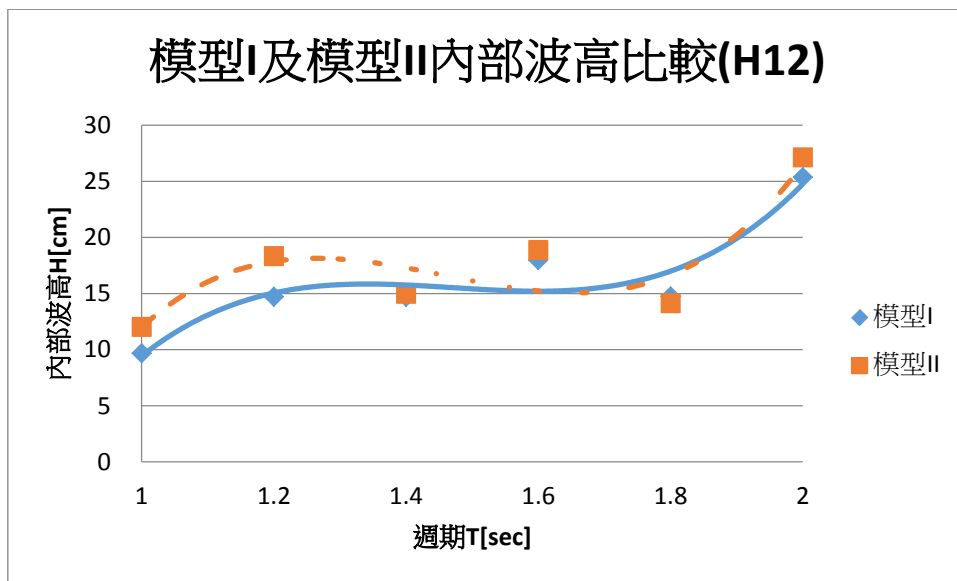


圖 8.23 模型 I 及模型 II 內部波高比較(H=12)

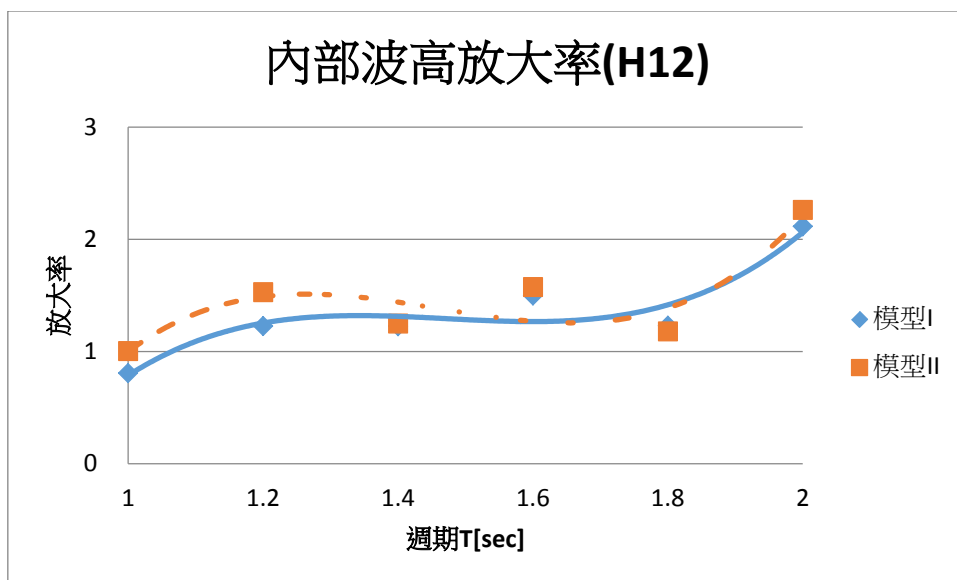


圖 8.24 模型 I 及模型 II 內部波高放大率比較(H=12)

8.3.4 整體能量擷取率結果之比較

在波高為 4、6、8、10、12cm 及週期為 1、1.2、1.4、1.6、1.8、2sec 波浪條件下，入射波能於表 8.10，模型 I 與模型 II 氣流速度能結果如表 8.11 及表 8.12，模型 I 與模型 II 能量擷取率結果如表 8.13 及表 8.14。由圖 8.25 到圖 8.31 可知模型 I 能量擷取率大於模型 II 能量擷取率。也可發現在相同的波高條件下週期 1.2sec 時模型 I 整體能量擷取率約有 22.4%，模型 II 整體能量擷取率約有 19.2%。而在週期 1.8sec 時模型 I 整體能量擷取率約有 5.4%，模型 II 整體能量擷取率約有 4.4%。

表 8.10 模型 I 及模型 II 入射波能

入射波能[J]		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	2.26	5.10	9.06	14.15	20.38
	1.2	3.13	7.03	12.50	19.54	28.13
	1.4	4.01	9.02	16.04	25.07	36.10
	1.6	4.89	11.00	19.56	30.56	44.00
	1.8	5.75	12.93	22.99	35.92	51.73
	2	6.59	14.82	26.34	41.16	59.27

表 8.11 模型 I 氣流速度能

模型 I 氣流速度能[J]		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期	1	0.39	0.85	1.29	1.58	1.91

T[sec]	1.2	0.66	1.48	2.67	5.45	5.88
	1.4	0.51	1.20	2.06	3.19	4.69
	1.6	0.76	1.96	3.24	4.17	5.60
	1.8	0.27	0.70	1.36	2.13	2.79
	2	1.35	2.58	2.69	4.87	15.12

表 8.12 模型 II 氣流速度能

模型 II 氣流速度能[J]		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	0.43	0.88	1.09	1.40	1.73
	1.2	0.56	1.27	2.92	3.79	5.11
	1.4	0.39	0.91	1.55	2.53	3.71
	1.6	0.74	1.58	2.51	3.25	3.90
	1.8	0.21	0.56	1.13	1.80	2.28
	2	1.66	2.00	1.92	2.75	4.63

表 8.13 模型 I 能量擷取率

模型 I 能量擷取率 入射波能/氣流速度能		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 8.14 模型 II 能量擷取率

模型 II 能量擷取率 入射波能/氣流速度能		波高 H[cm]				
		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	0.19	0.17	0.12	0.10	0.08
	1.2	0.18	0.18	0.23	0.19	0.18
	1.4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	1.6	0.15	0.14	0.13	0.11	0.09
	1.8	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
	2	0.25	0.13	0.07	0.07	0.08

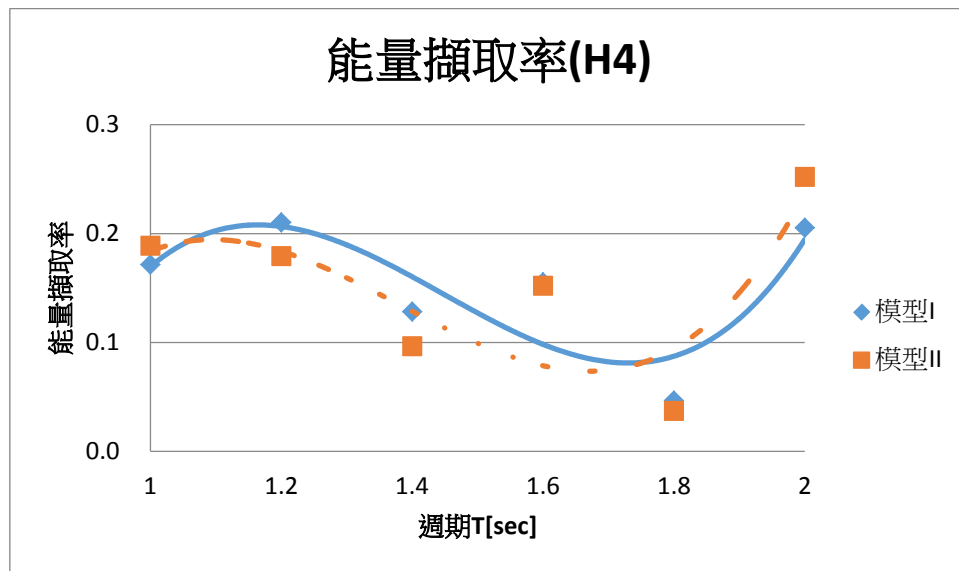


圖 8.25 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較(H=4)

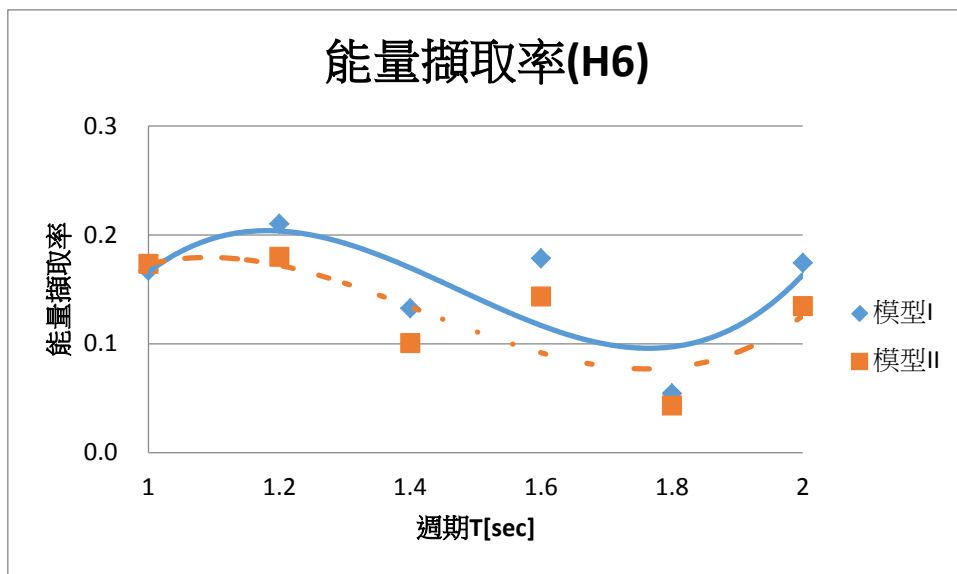


圖 8.26 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較(H=6)

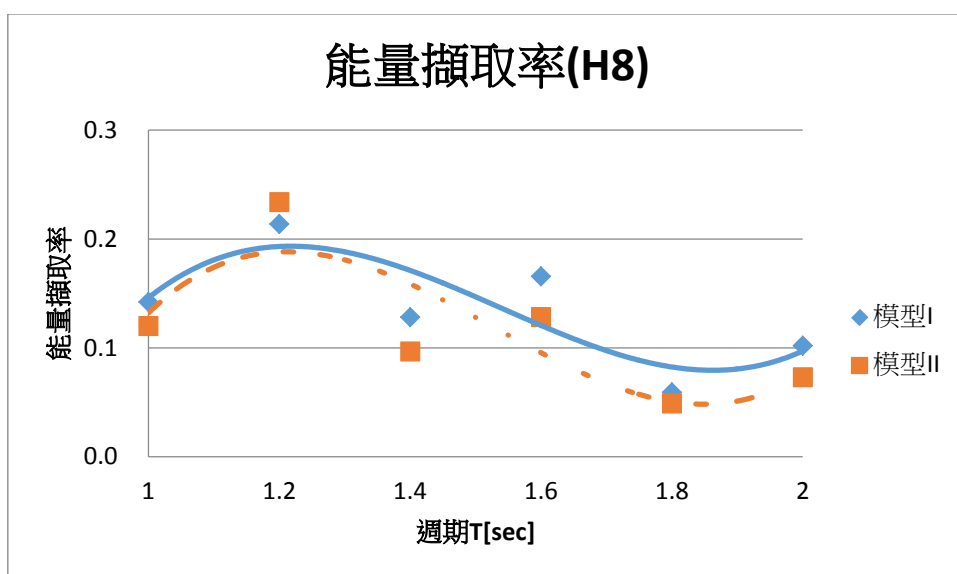


圖 8.27 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較(H=8)

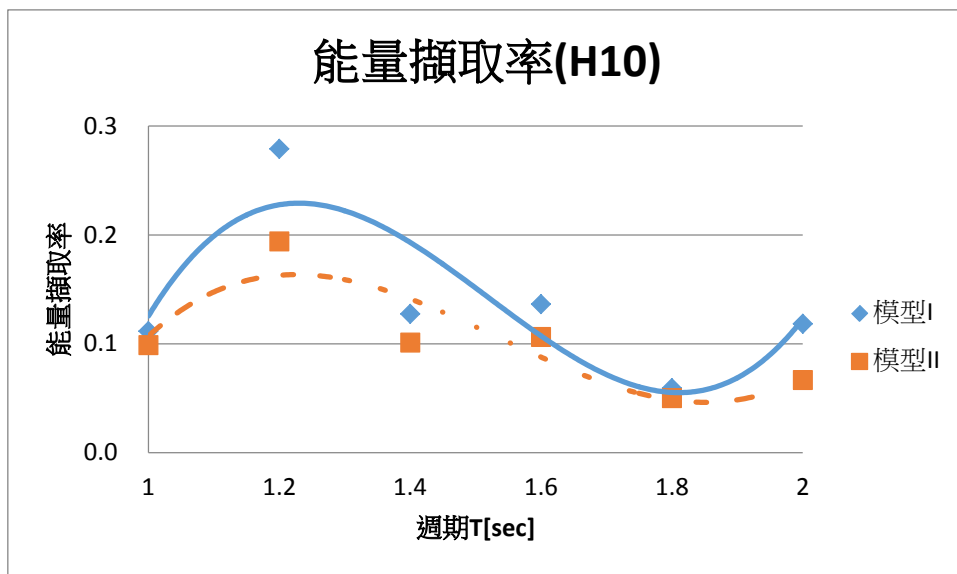


圖 8.28 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較(H=10)

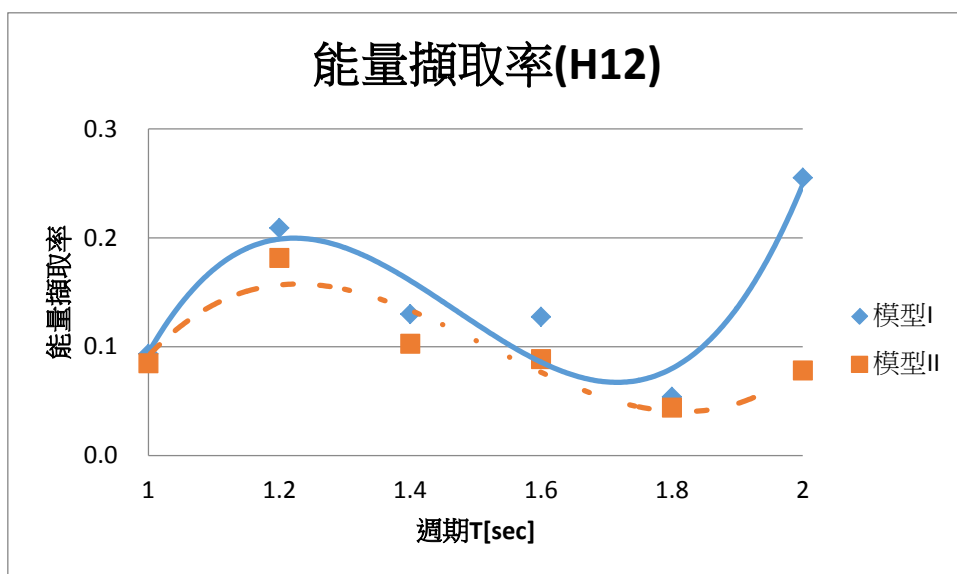


圖 8.29 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較(H=12)

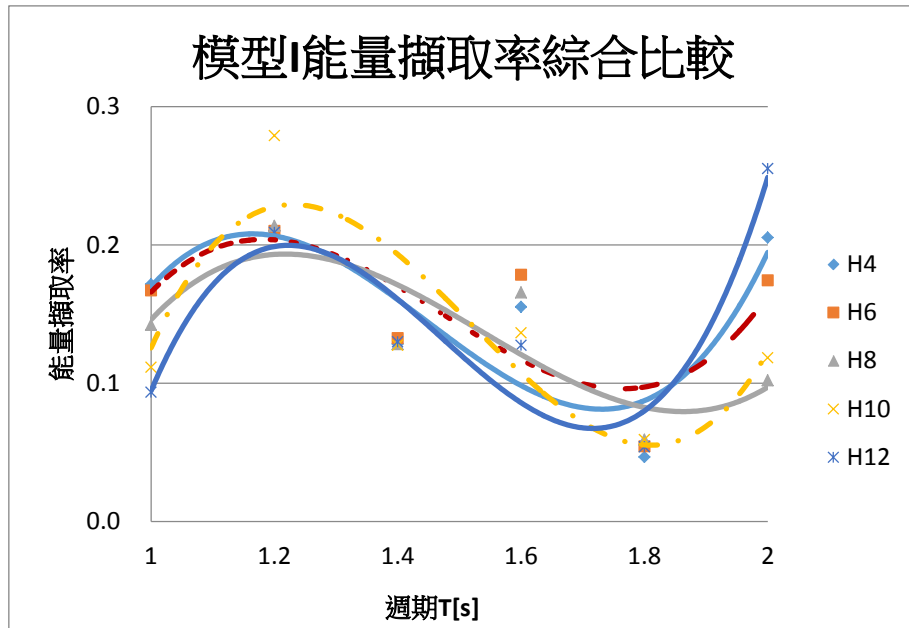


圖 8.30 模型 I 能量擷取率綜合比較

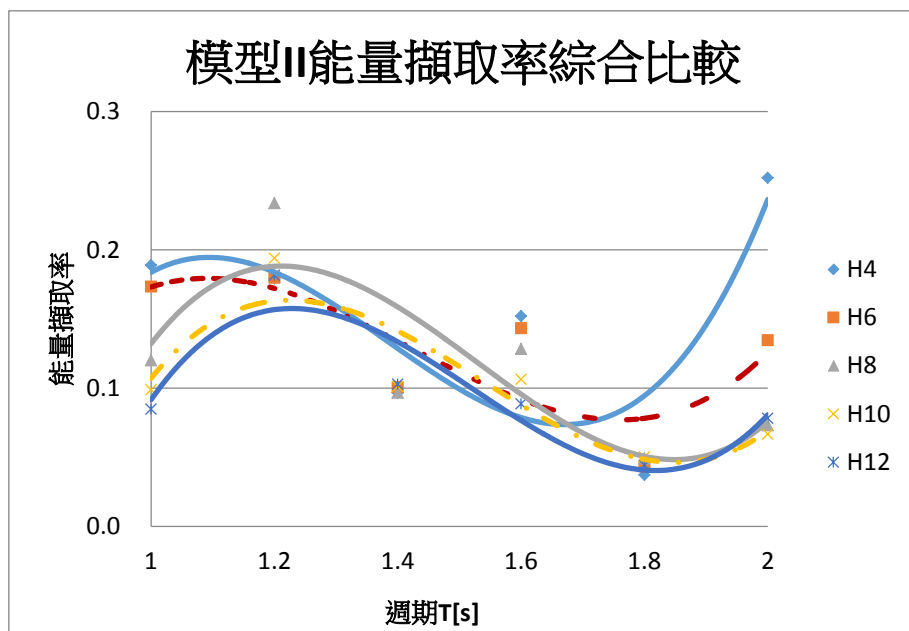


圖 8.31 模型 II 能量擷取率綜合比較

8.3.5 水工模擬試驗模型 I 與模型 II 結果分析

模型 I 與模型 II 其迎波面開口面積為模型 I 為 19cm*19cm 及模型 II 為 19cm*53.5cm，模型 II 模型開口面積為模型 I 開口面積的 2.8 倍。

(1)反射率結果分析

由圖 8.1 至圖 8.7 模型 I 及模型 II 反射率比較，可發現兩點，其一開口率較小的模型 I 產生之反射率小於開口率較大的模型 II，其模型 I 反射率結果約為模型 II 反射率結果的 90%。其二在相同的波高條件下，週期 1.2sec 有較小值發生，週期 1.8sec 有較大值發生。其模型 I 在週期 1.2sec 反射率結果約為模型 I 在週期 1.8sec 反射率結果的 66%。其模型 II 在週期 1.2sec 反射率結果約為模型 II 在週期 1.8sec 反射率結果的 82%。

(2)氣流速度結果分析

由圖 8.8 至圖 8.14 模型 I 及模型 II 氣流速度比較，可發現兩點，其一開口率較小的模型 I 產生之氣流速度優於開口率較大的模型 II，其模型 I 氣流速度結果約為模型 II 氣流速度結果的 108%。其二在相同的波高條件下，週期 1.2sec 有較大值發生，週期 1.8sec 有較小值發生。其模型 I 在週期 1.2sec 氣流速度結果約為模型 I 在週期 1.8sec 氣流速度結果的 150%。其模型 II 在週期 1.2sec 氣流速度結果約為模型 II 在週期 1.8sec 氣流速度結果的 152%。

(3)能量擷取率結果分析

由圖 8.25 至圖 8.31 模型 I 及模型 II 能量擷取率比較，可發現兩點，其一開口率較小的模型 I 之能量擷取率優於開口率較大的模型 II，其模型 I 能量擷取率約為模型 II 能量擷取率的 122%。其二在相同的波高條件下，週期 1.2sec 有較大值發生，週期 1.8sec 有較小值發生。其模型 I 在週期 1.2sec 能量擷取率約為模型 I 在週期 1.8sec 能量擷取率的 440%。其模型 II 在週期 1.2sec 氣流速度結果約為模型 II 在週期 1.8sec 能量擷取率的 475%。

綜合以上上述可知，其開口率較小可產生較大的氣流速度值，較小的反射率。開口率較大會產生較小的氣流速度值，較大的反射率。故可依使用之目的用途，搭配現地的波浪條件，選擇較適當的幾何模型設計。

第九章 結論與建議

本計畫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。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，將海洋能特別是由波浪作用於港灣結構，並可能造成結構破壞的能量，進一步加以利用轉換成有用的能源，該能源之利用可包括轉換成電力或將波浪能轉化為其他型式之能源儲存使用。而在工作規劃中亦具體揭櫫；進行以波浪能擷取為主之綠能系統研究。並以結合於港灣構造物波浪能擷取之系統之研究為主。

上階段研究成果中，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，如風能及太陽能是否適用於港灣構造之可行性分析。本階段的研究中，則著重在波能轉換系統結合於港灣結構之分析，其主要的目的並不只在發展海洋綠能，更重要的為藉由結構設計之改變，將抵抗波浪的概念轉化為利用，且能對海岸港灣相關設施做更好的保護。

以下則將分析結果對應於本計畫階段之需求工作項目做一探討，並做為本階段研究之結論。

9.1 結論

9.1.1 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計

經本計畫調查分析了許多的文獻，發現波浪能的研究正蓬勃發展中，不僅本計畫團隊過去在波浪能轉換系統的研究有所應用，國外更有利用港灣構造物結合波能轉換系統，達成發電的目的。因此、本計畫中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，以帶動發電機之轉輪進而達成發電之目的。該概念性之波能轉換系統亦設計使附設於防波堤之外廓，經數值模擬分析後，發現其在一定範圍的波浪作用下，確實具有相當的發電潛能。另外為進行實體縮尺模型之試驗，本階段計畫中並設計了兩組縮尺模型，以便在造波水槽中進行波浪模擬之實驗。在設計時依據全尺度之波能轉換系統，以及動力及運動相似度之考慮，設計為1/16縮尺之波能轉換系統。在設計過程中並進行了數值模擬分析，該分析模式及理論結果，與日本合田教授現地試驗之結果比較後，證實可作為本計畫中所規劃之模型之分析工具。

9.1.2 波浪能擷取系統實體模型之建立

在波浪能擷取系統實體模型之建立上，本階段研究中除了將模型數位化，並進行數值模擬分析之外，並進一步設計、建立了兩組縮尺實體模型。由於該模型建立之目的為進行造波水槽試驗，因此、建立模型的過程中，必須考慮現場全尺度結構與縮尺模型間之差異。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)。本計畫的問題中，考慮了各種外力包括波浪力、重力、慣性力、浮力及空氣壓力等；因此、本實驗結構物以福祿數(Froude similarity)為動力相似為主要依據，來規劃模型之各項幾何參數以及作用於模型之波浪參數。建立後之實體縮尺模型，設置於水槽實驗室之照片如第七章中所示。該實體縮尺模型主要以壓克力為材料，建立於水槽中時則輔以混凝土塊增加其重量，以保持試驗過程中之穩定及維持剛性材料之特性。

9.1.3 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究

本計畫中除了針對波浪發電複合式防波堤之波浪攫取及波能轉換效率，進行了數值模擬分析及造波水槽試驗，之外、並針對該結合了波能轉換系之結構物進行安全分析。分析項目中包括了波浪作用之反

射系數改變、結構體之整體受力分析以及波能轉換系統中，氣室構造之結構安全分析。分析結果中發現，本計畫中模擬之沉箱防波堤結合波能轉換系統後，其受波浪作用後之波浪反射率大幅降低，顯示有相當的能量經過波能系統轉換而發散；而結構物本體無論就變形檢視或受力狀態之應力變化，均處於安全範圍。結構體之安全檢視為經過一系列應力安全分析之結果，其中波浪外力及其他各種外力之作用均審慎考慮。另外、由於波能轉換系統之氣室結構，位於防波設施之外加構造，本計畫中考慮以鋼筋混凝土為建材，以材料與原有結構之一致性為考慮，並根據內政部營建署訂定之暴露於氯離子環境混凝土之最低規定強度 $350(\text{kgf/cm}^2)$ 來設計。該波能轉換系統之氣室結構，則另行以鋼筋混凝土材料為主之結構分析工具進行較詳細之含材料特性之結構分析，分析後發現波能轉換系統之氣室結構均能處於安全範圍。

9.2 建議

本階段研究為第一階段研究成過之延續性研究，上階段的工作中針對各種可再生性能源做較普遍性之調查了解，並進行粗略性之分析，以了解各種型式可再生性能源應用於港灣區域之可行性，但基於港灣構造中之造價及功能性甚為重要，本階段研究中則以不妨礙、甚至加強原港灣構造之功能性為前提下，建立一能附屬於港灣構造中之波浪能擷取及轉換系統為研究主旨。本階段研究成果中已有具體之分析結果；但目前建立之模型因須進行相關之造波水槽試驗，耗費較大，除了以高雄一港口北堤為參照而進行之外，並多建立了一組模型以資比較。

9.3 成果效益及後續應用

本計畫的成果效益以及後續應用包含有：

1. 本計畫屬於創新前瞻、技術開發之研究，藉由其研究成果可促成學

界合作研究。

2. 可作為政策施政之依據，以改善海洋環境品質。
3. 後續工作中宜建立更多之模型，尤其針對波能擷取較有利地區、或波能蘊藏豐富地區，針對當地地形、波浪等條件，以及可結合之其他型式港灣構造物進行進一步之研究。例如花蓮港區，轉換之能量利用時並能結合當地之觀光休閒產業，以帶動地方之繁榮。
4. 目前模型試驗之結果相當令人鼓舞，因為不僅波能轉換之效率可達到相當的程度，在波浪反射率對現有結構物之影響上亦呈現正面效果，未來之研究上宜針對此兩利之效應增加研究項目。
5. 目前水槽試驗僅測試至波能轉換開口處之氣流速度，未來可增加可架設於氣室上方小型之發電系統，在有負載的情況下，檢視此波能發電系統實際發電的效能。
6. 最終目的以能實際建立一套「結合港灣構造物波浪能轉換系統」於臺灣之港灣結構中，以有效利用源源不絕之波浪能源，並有益於港灣構造物之保固及耐久使用。

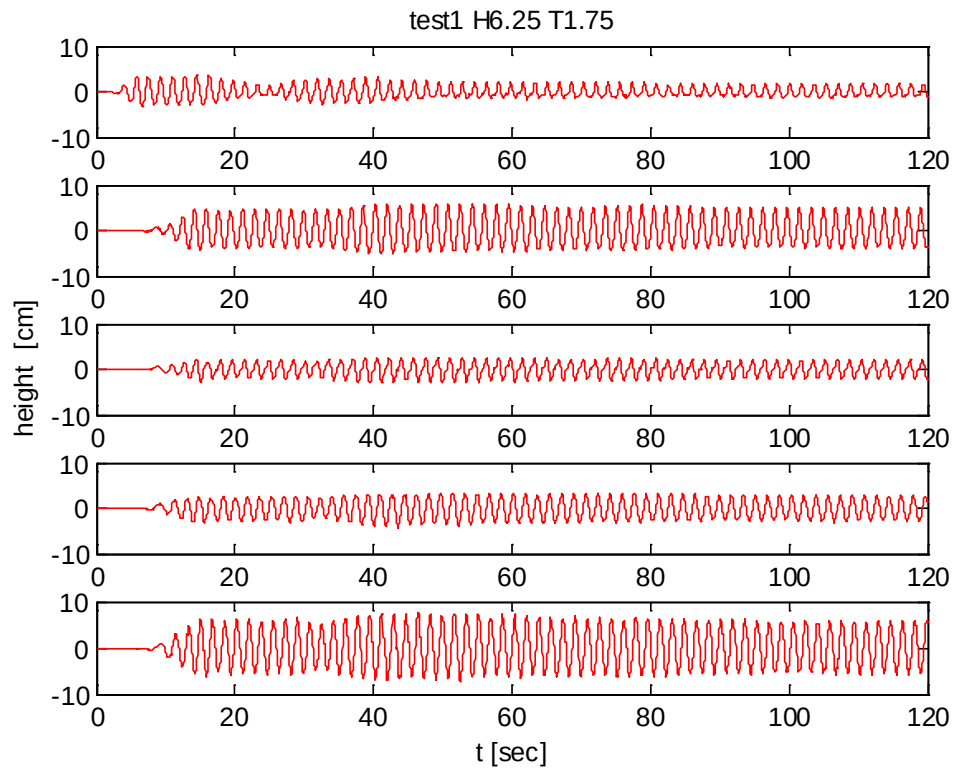
參考文獻

1. REN21, Renewables 2011: Global Status Report。
2. 太陽光電資訊網 <http://solarpv.itri.org.tw/memb/main.aspx>。
3. 歐文生、何明錦、陳瑞鈴、陳建富、羅時麒，臺灣太陽能設計用標準日射量之研究，中華民國建築學會「建築學報」第 64 期，2008 年 6 月，103~118 頁。
4. 臺灣港務股份有限公司 <http://www.twport.com.tw/>。
5. 中央氣象局，2008-2012 年氣象監測報告。
6. Gorban, Alexander N. Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. Journal of Energy Resources Technology. 2001.December, 123: 311-317
7. 英華威風力發電集團 Infravest，臺灣風力發電發展現況。
8. 施月英，海岸風力發電機對鳥類群聚的影響-彰濱工業區崙尾風力場為例，靜宜大學生態學系碩士論文，2008。
9. 國立中央大學數位學習歷程平台—海洋能。
10. 洪長春，波浪能發電之發展潛能，科技發展政策報導 113，第 3 期。
11. 藍振洋，波浪發電原理與系統開發，工業技術研究院
12. 再生能源網專業人士，海洋能技術
13. Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report
14. 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。
15. 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。
16. 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。
 17. 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。
 18. 交通部運輸研究所，臺中港觀測波浪資料專刊 (1994~2008 年)(下冊)，2009。
 19. 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。
 20. 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。
 21. 交通部運輸研究所，臺灣主要港口附近海域長期波浪統計特性及設計波推算之研究(1/4)，2010。
 22. 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。
 23. 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。
 24. 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(2/4)，2011。
 25. 交通部運輸研究所，”臺灣主要港口附近海域長期波浪統計特性及設計波推算之研究(4/4)，2013。
 26. Paolo Boccotti, Comparison between a U-OWC and a conventional OWC, Ocean Engineering, Vol. 34, 2005, pp 799–805.
 27. 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。
 28. 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。

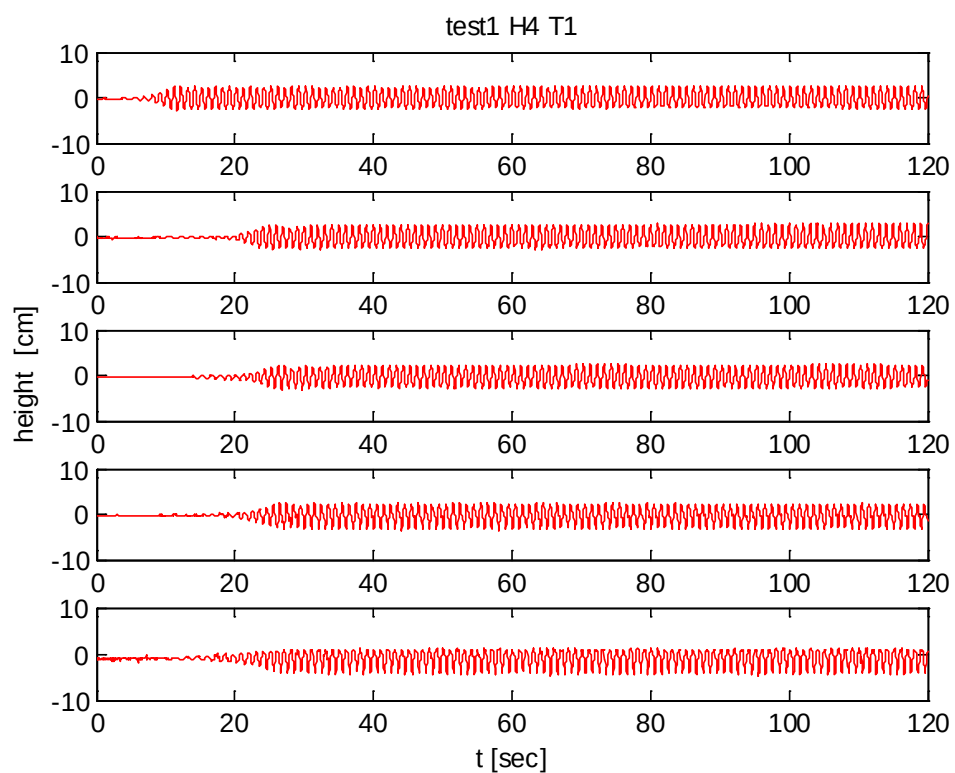
29. 交通部運輸研究所，港灣構造物設計基準修訂，2005。
30. 內政部營建署，混凝土結構設計規範修正規定，2011。
31. S Takahashi, H Nakada, H Ohneda," Wave Power Conversion by a Prototype Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port",*23rd Coastal Engineering Conference* , 1992, pp 3440-3453.

附錄 A



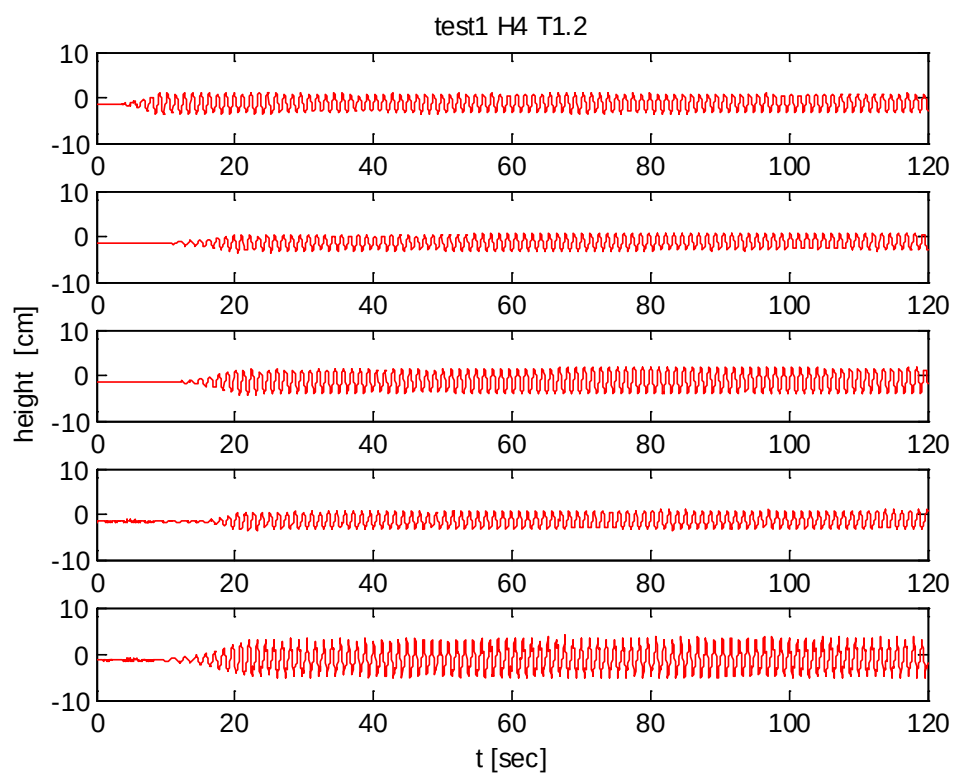
H3[cm] =	3.9837	8.9057	4.2578	5.6507	11.3547
H10[cm] =	5.4076	10.3575	4.9297	6.4241	12.8240
Hmax[cm] =	7.4724	11.7853	6.0843	8.4016	15.2052

圖 A.1 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6.25cm ,T=1.75s)



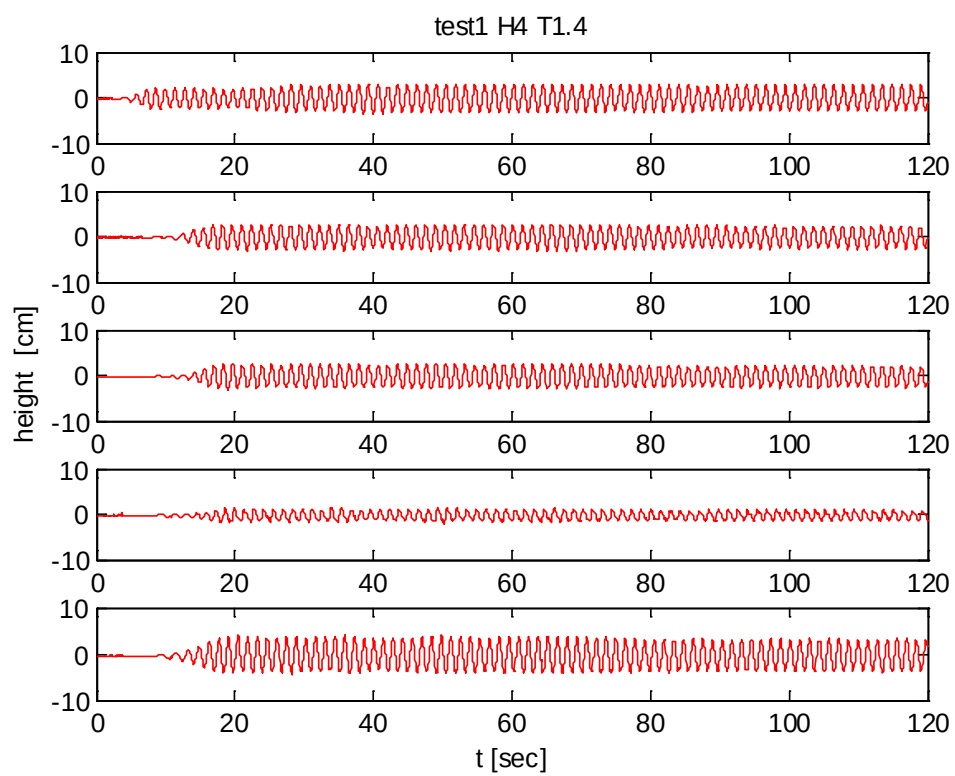
H3 [cm]=	4.5886	4.7039	4.6745	4.8358	5.4303
H10 [cm]=	4.9867	5.2283	5.4567	6.0590	7.9835
Hmax [cm]=	5.5734	5.9785	6.3260	6.9437	9.5285

圖 A.2 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=4cm ,T=1s)



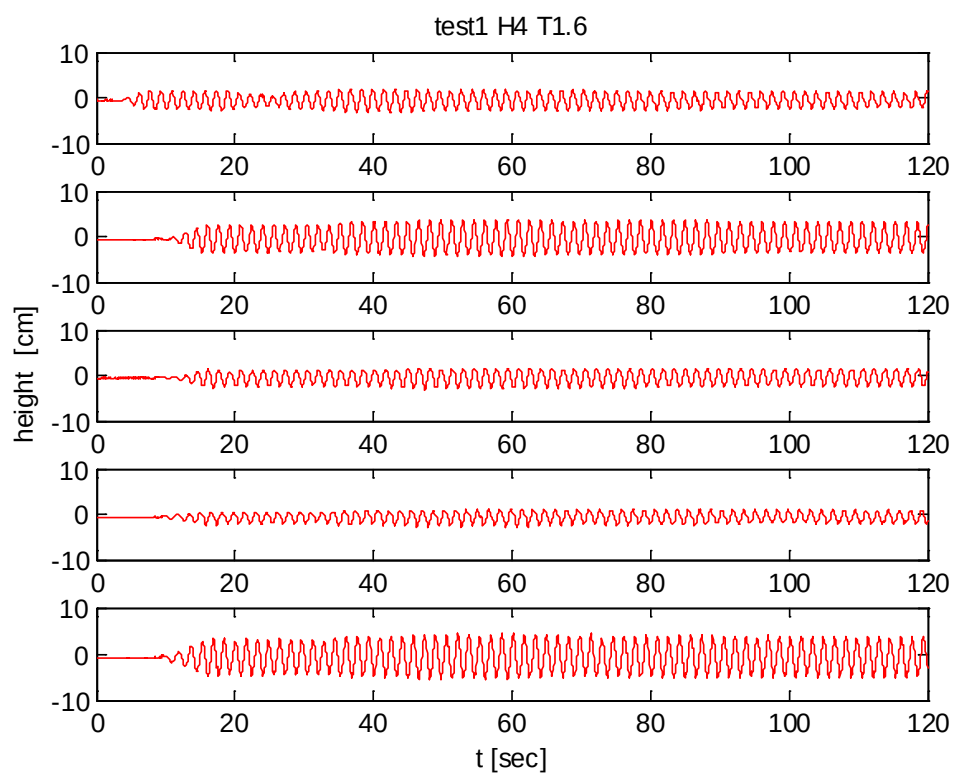
H3 [cm]=	5.8003	5.3021	6.5226	5.6101	7.4322
H10[cm] =	6.6667	6.1260	7.7604	6.3895	9.4082
Hmax[cm] =	7.5773	7.0504	8.6725	7.5419	10.7074

圖 A.3 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=4cm ,T=1.2s)



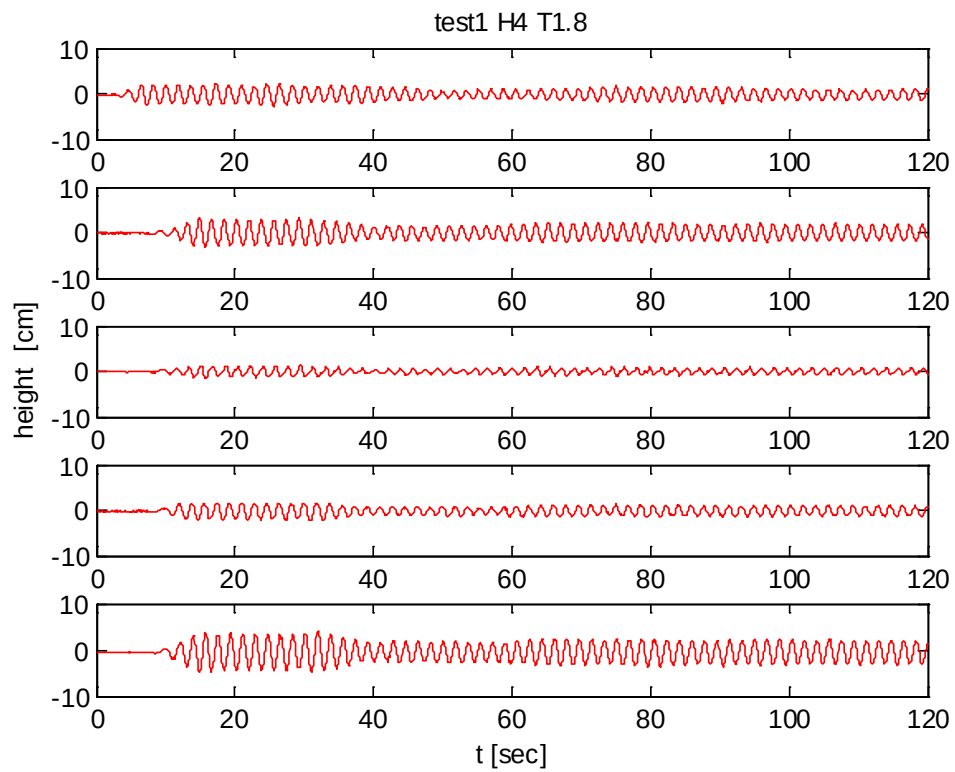
H3 [cm]=	5.5073	5.0078	4.9384	2.5620	6.9324
H10 [cm]=	6.1332	5.6575	5.3903	3.0245	7.6401
Hmax [cm]=	7.1460	6.5196	6.3953	4.2178	8.6849

圖 A.4 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=4cm ,T=1.4s)



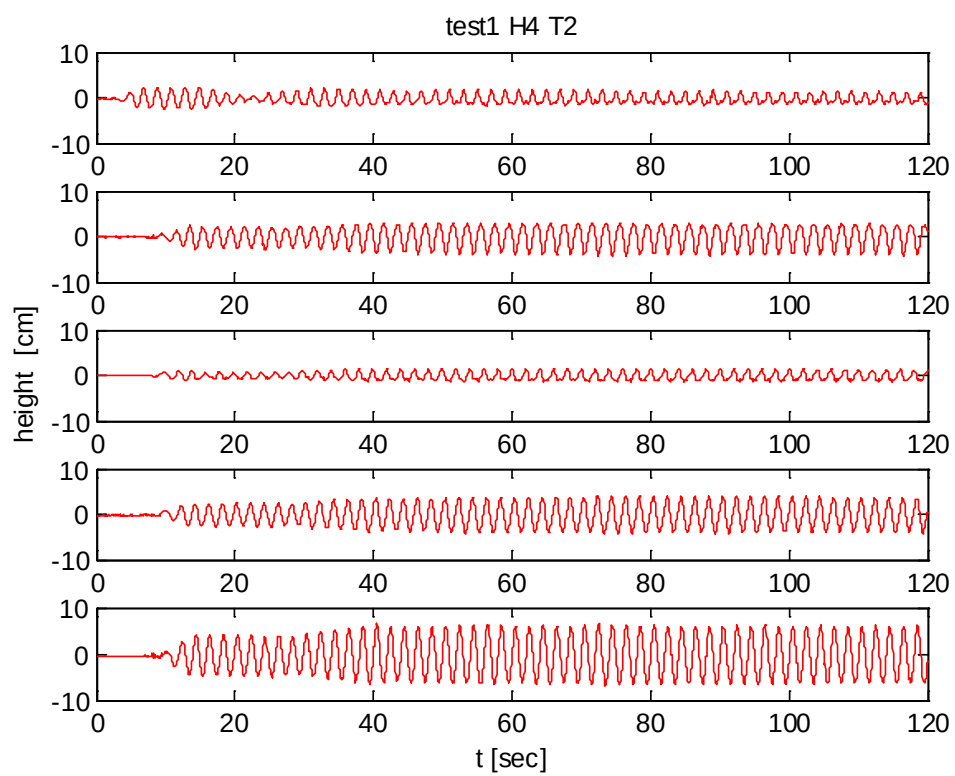
H3 [cm]=	4.4172	6.7127	4.1380	3.6202	8.1404
H10 [cm]=	5.4543	7.5611	5.2603	4.5754	9.5524
Hmax [cm]=	6.5166	8.7501	6.3260	5.7490	11.1327

圖 A.5 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=4cm ,T=1.6s)



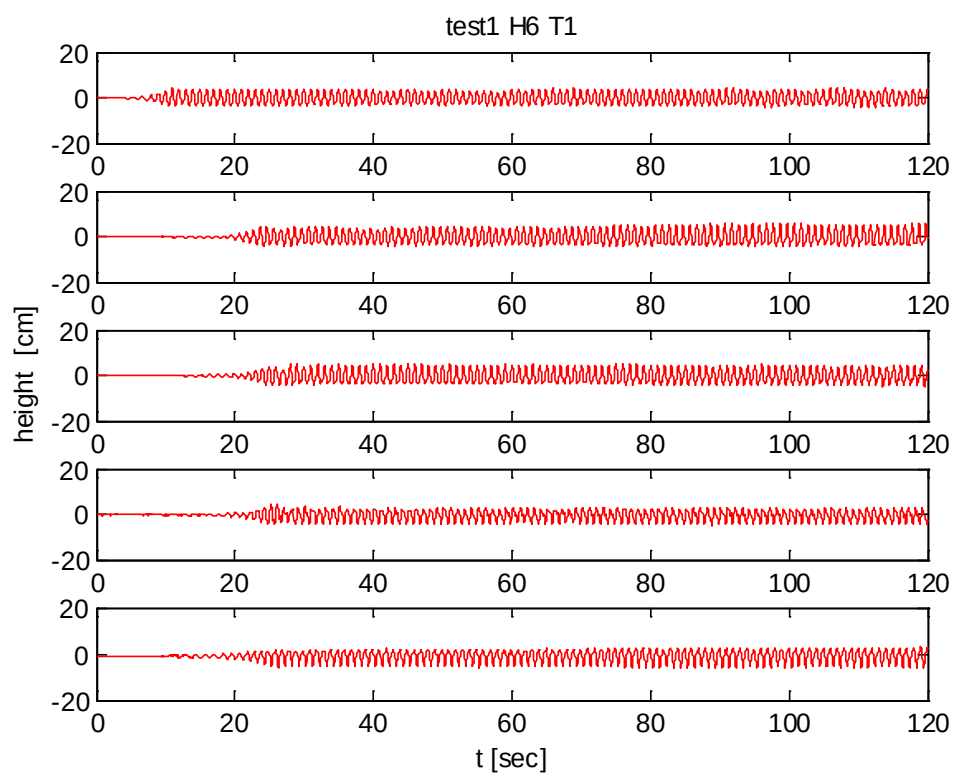
H3 [cm]=	3.2692	4.0934	1.6531	2.6469	5.9229
H10[cm] =	4.0703	5.1111	2.1273	3.3773	7.3045
Hmax [cm]=	5.5348	6.2976	3.1852	4.9276	9.6979

圖 A.6 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=4cm ,T=1.8s)



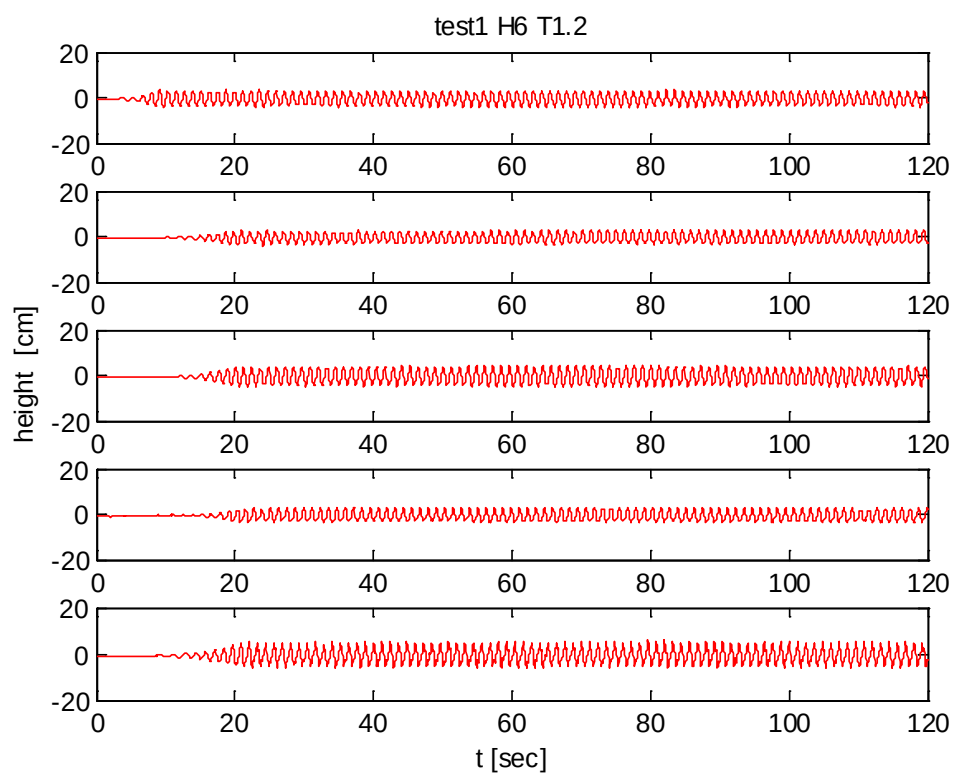
H3 [cm]=	3.1059	6.1473	2.3239	6.9811	11.2792
H10 [cm]=	3.8057	7.6423	2.7419	7.8281	12.4669
Hmax [cm]=	4.9843	8.7153	3.2674	8.7748	13.7464

圖 A.7 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=4cm ,T=2s)



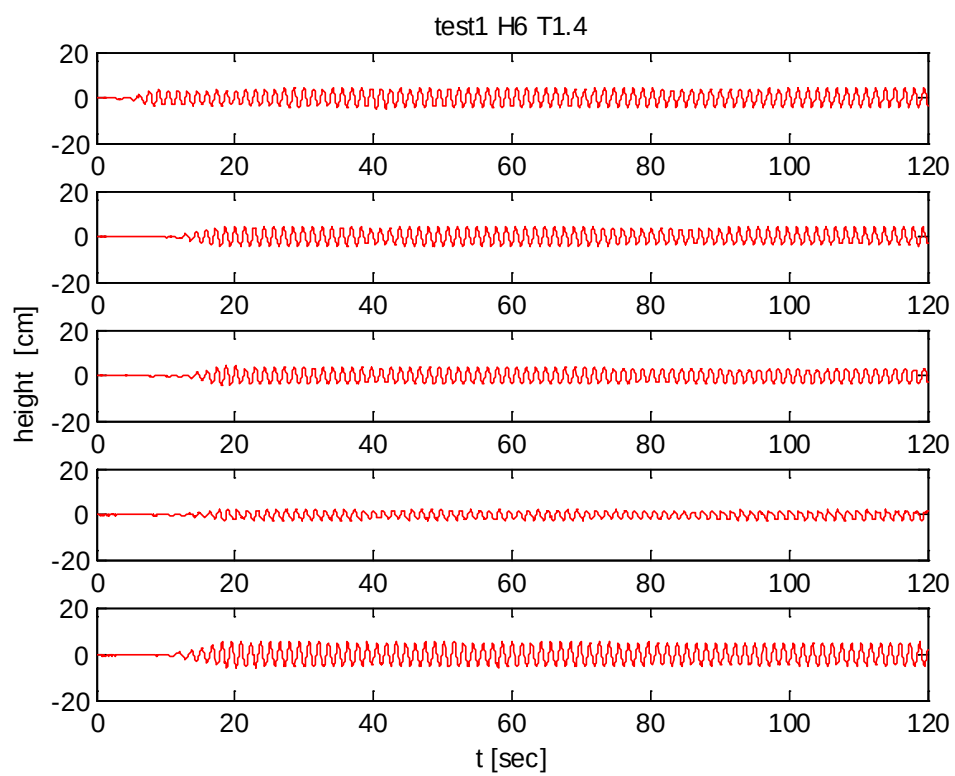
H3 [cm]=	6.6103	7.7860	7.6068	6.3214	7.1447
H10 [cm]=	7.3535	9.3712	8.7770	8.3243	10.5432
Hmax [cm]=	8.6120	11.7142	10.2388	9.4846	12.6504

圖 A.8 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6cm ,T=1s)



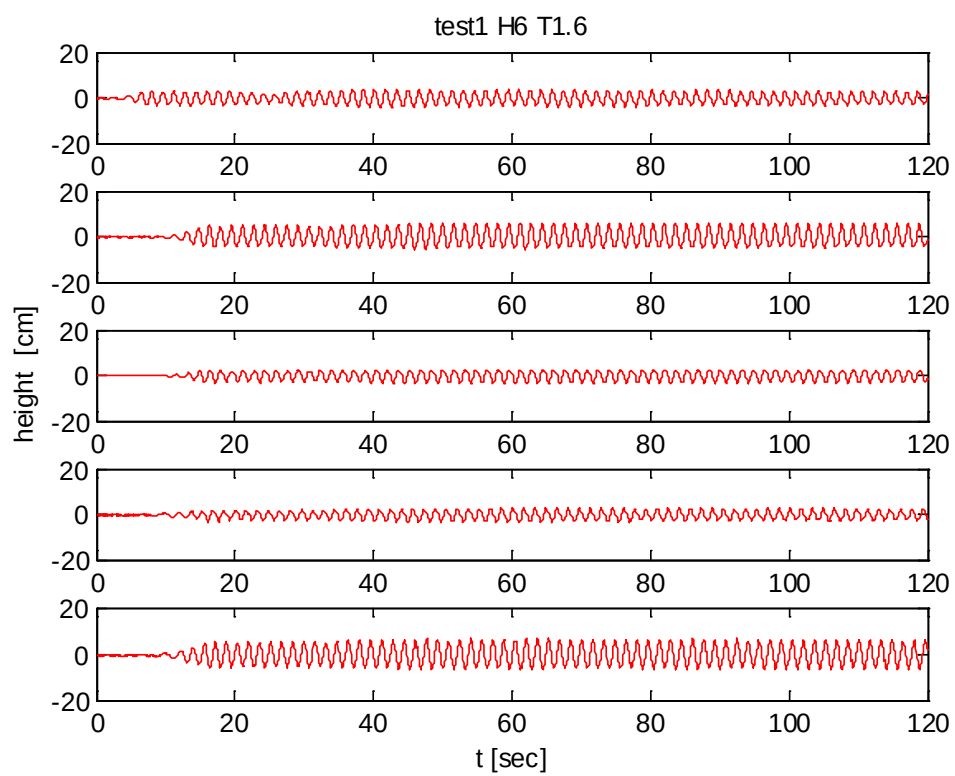
H3 [cm]=	6.7123	5.6984	8.1491	5.8902	8.7909
H10[cm] =	7.8477	6.3961	9.1989	6.5149	10.7792
Hmax [cm]=	8.8344	8.1483	10.7093	7.6535	12.1457

圖 A.9 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6cm ,T=1.2s)



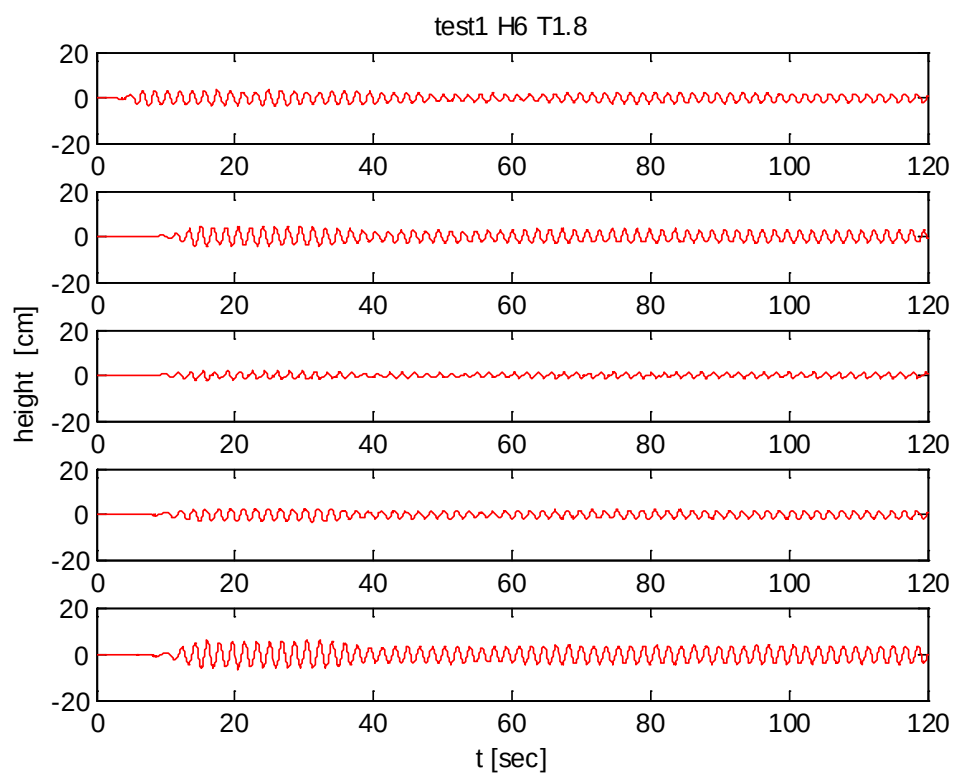
H3 [cm]=	7.6226	7.5026	6.6940	4.1186	9.3801
H10[cm] =	8.4410	8.3884	7.2739	5.0963	10.3402
Hmax[cm] =	9.6602	9.3882	8.7417	6.2355	12.1457

圖 A.10 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6cm ,T=1.4s)



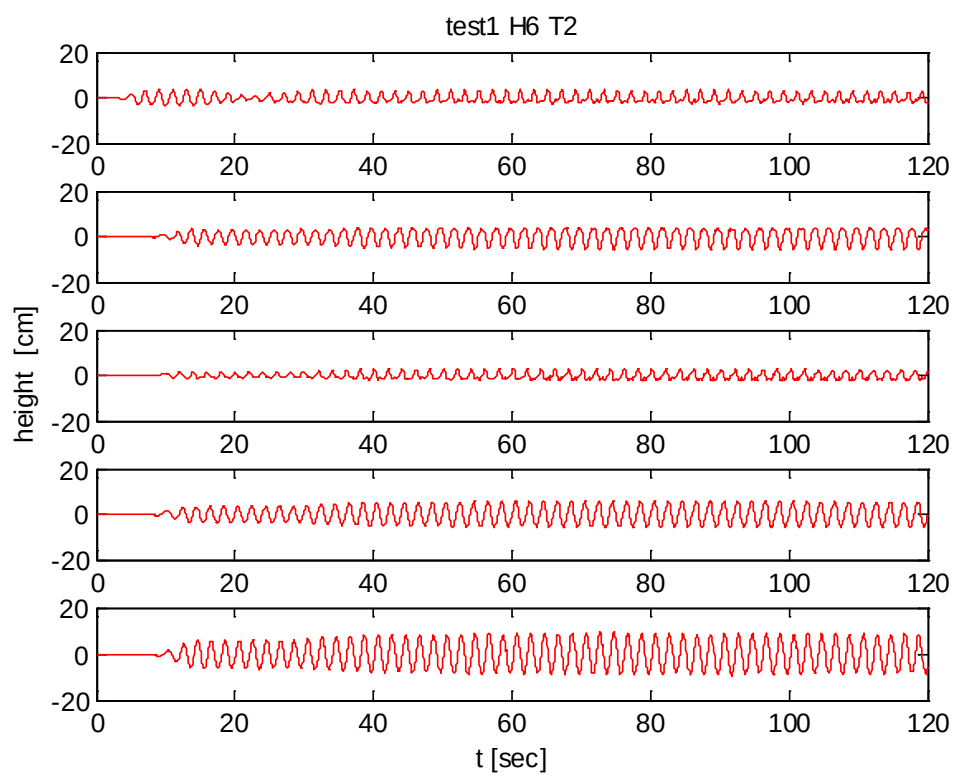
H3 [cm]=	6.3236	9.7485	5.4178	5.1349	11.0557
H10 [cm]=	7.2250	11.0487	6.7180	6.0107	12.4054
Hmax [cm]=	8.4819	12.1043	7.9134	7.2053	14.2546

圖 A.11 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6cm ,T=1.6s)



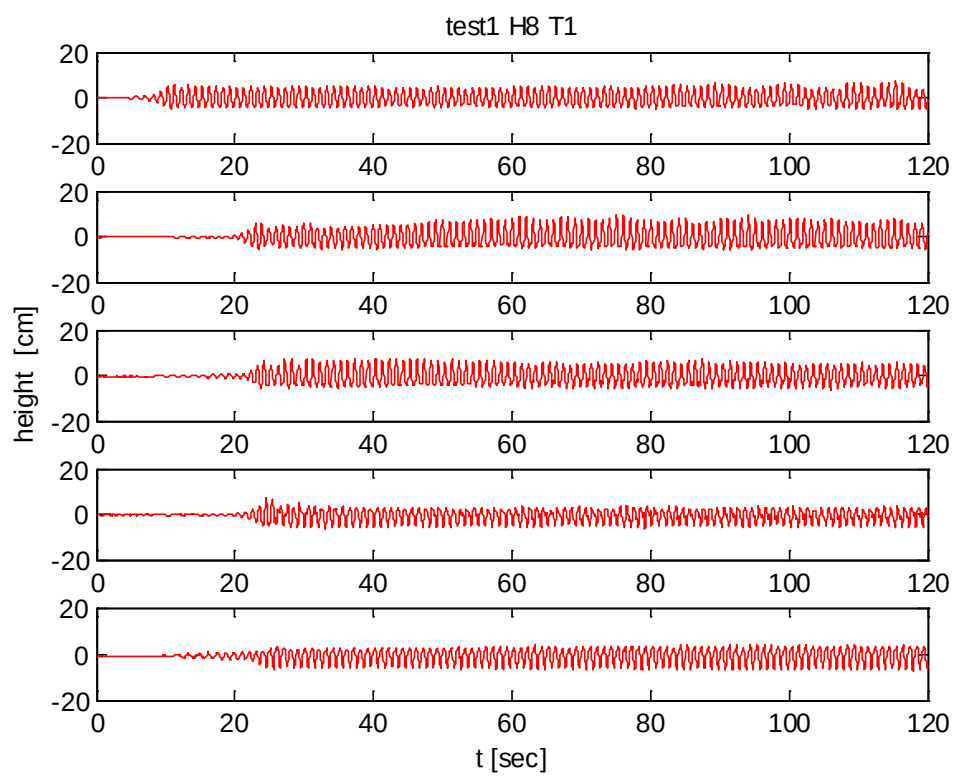
H3[cm] =	4.8558	5.9810	2.5754	3.9962	8.2284
H10 [cm]=	5.9918	7.3695	3.2502	4.9638	10.0646
Hmax [cm]=	7.8912	9.1647	4.8419	7.2436	12.9028

圖 A.12 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6cm ,T=1.8s)



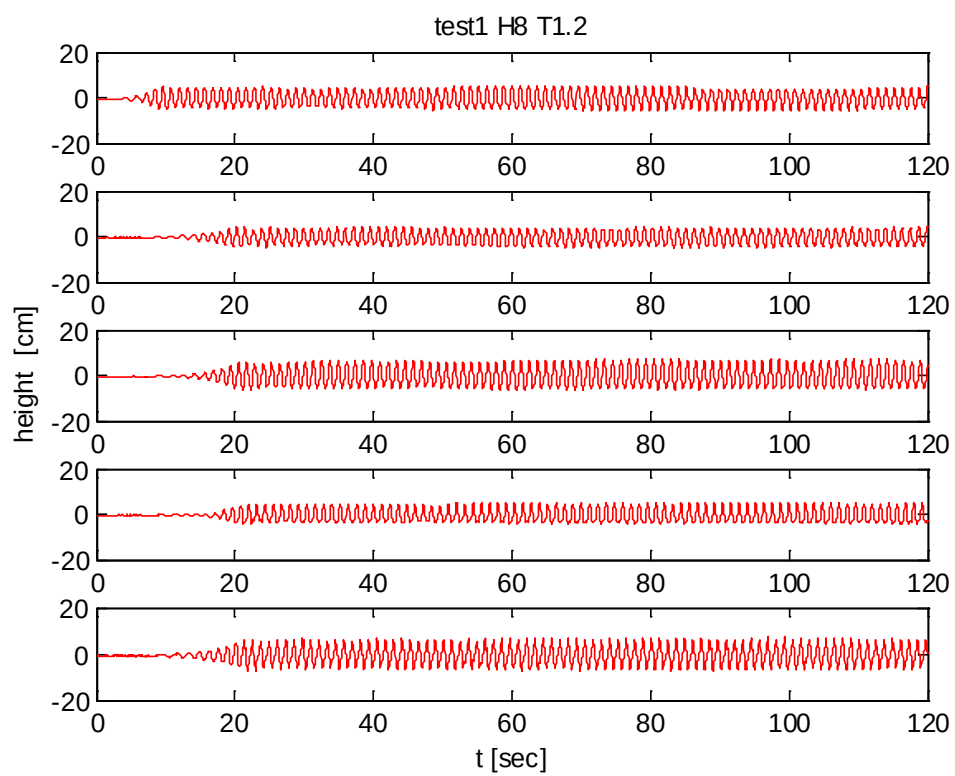
H3 [cm]=	5.1658	8.5724	4.1359	10.1565	15.4648
H10 [cm]=	6.2615	10.8073	5.1939	11.3217	17.0909
Hmax [cm]=	7.1585	12.3264	6.4421	12.3589	19.9314

圖 A.13 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=6cm ,T=2s)



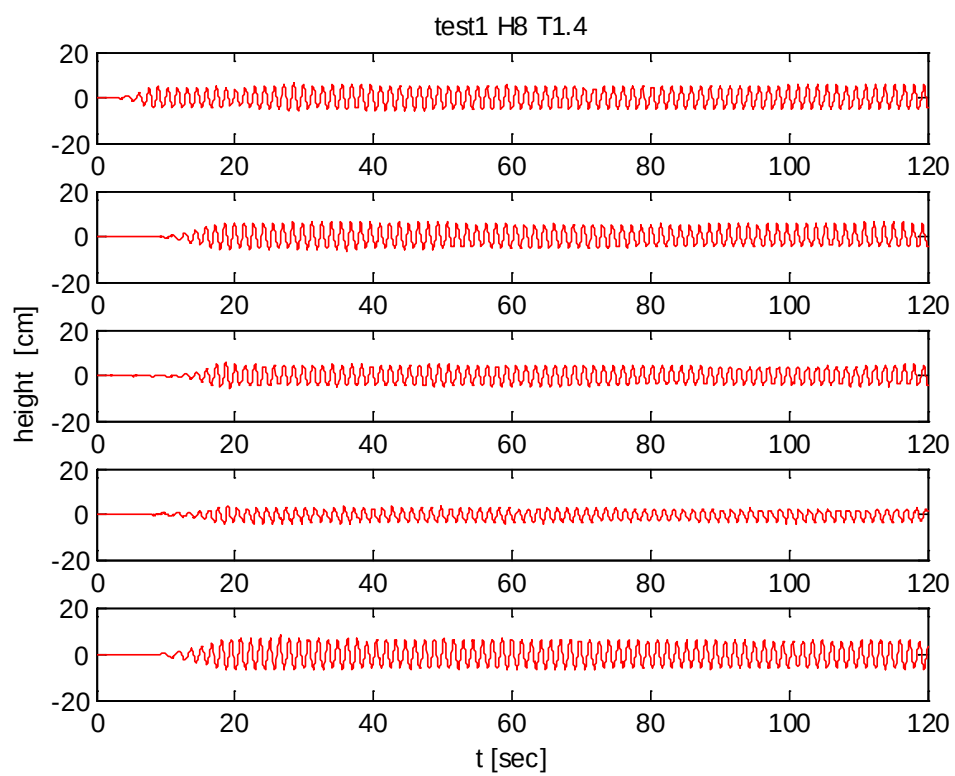
H3[cm] =	8.6686	10.7438	9.8644	7.7031	8.7832
H10 [cm]=	10.0450	13.6820	11.8170	10.5237	12.2302
Hmax [cm]=	14.7816	18.9727	14.7931	14.0823	14.4240

圖 A.14 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=8cm ,T=1s)



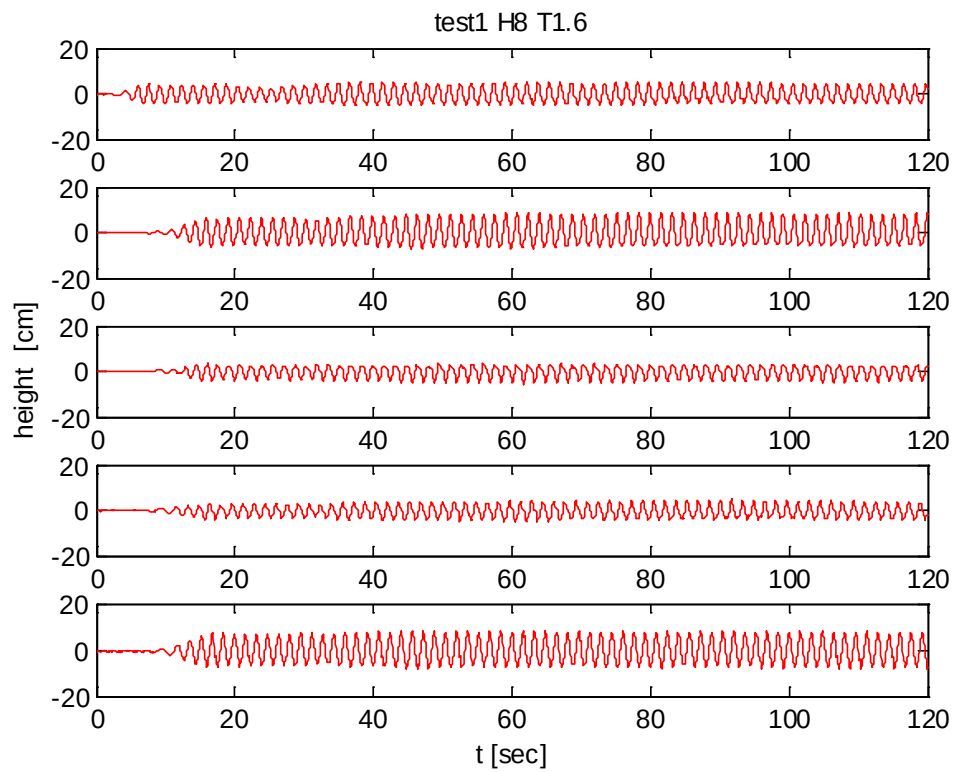
H3 [cm]=	9.1038	7.7128	11.4440	7.9623	10.9735
H10 [cm]=	10.4497	8.7407	12.7994	9.2172	12.9920
Hmax [cm]=	12.0569	10.2018	14.4482	10.8699	15.0982

圖 A.15 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=8cm ,T=1.2s)



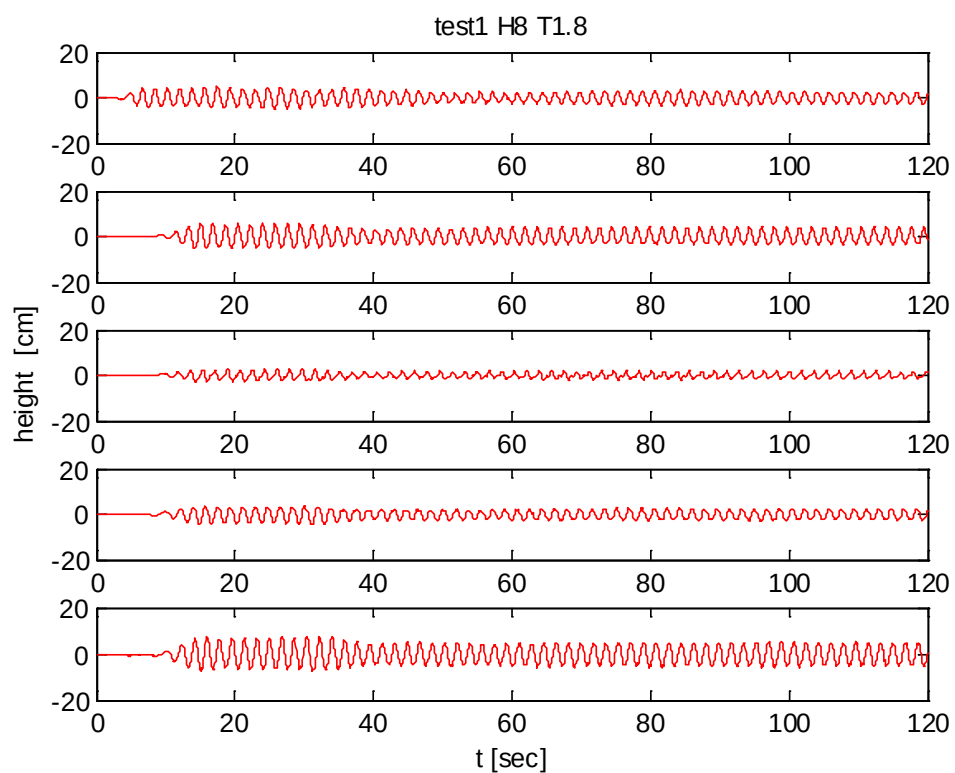
H3 [cm]=	9.6643	9.9974	8.3898	5.6271	11.3104
H10[cm] =	10.6711	11.5530	9.2469	7.0131	12.5458
Hmax [cm]=	12.4638	13.1659	11.2266	8.9981	16.1318

圖 A.16 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=8cm ,T=1.4s)



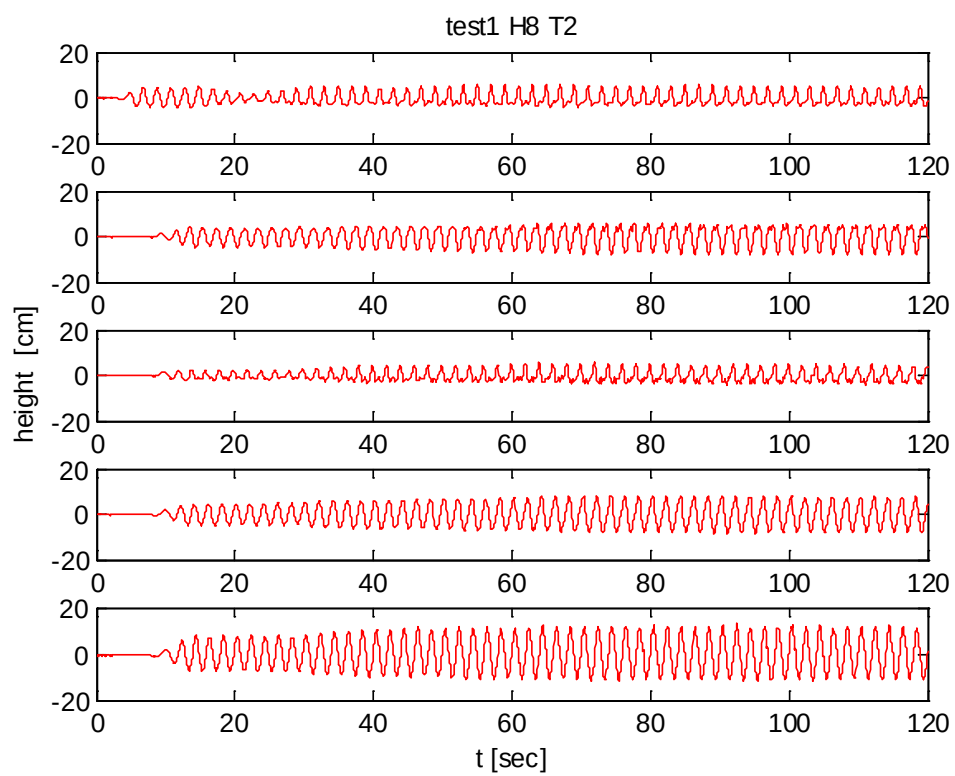
H3 [cm]=	8.6070	13.0440	6.9209	7.3829	13.5665
H10 [cm]=	9.6538	15.6180	8.8858	8.5420	15.1542
Hmax[cm] =	10.6420	17.5210	11.1235	10.0445	17.0618

圖 A.17 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=8cm ,T=1.6s)



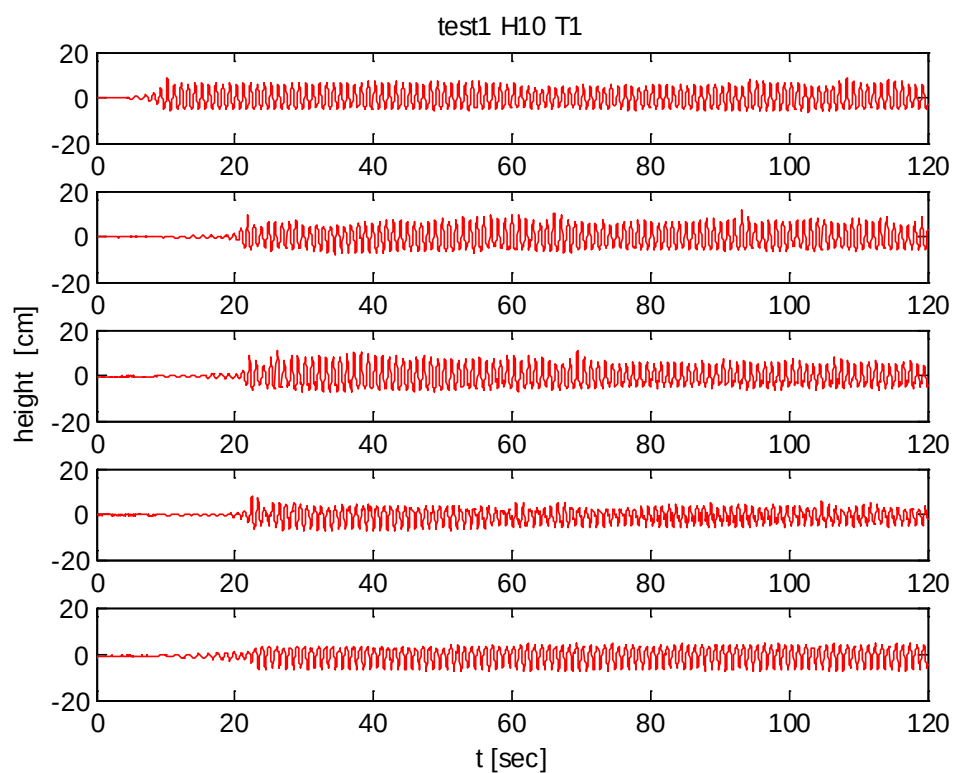
H3[cm] =	6.5405	7.8755	3.5458	5.4211	10.4653
H10 [cm]=	8.0390	9.5271	4.4430	6.7778	12.5812
Hmax [cm]=	10.2895	12.1754	6.3600	9.8196	15.2676

圖 A.18 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=8cm ,T=1.8s)



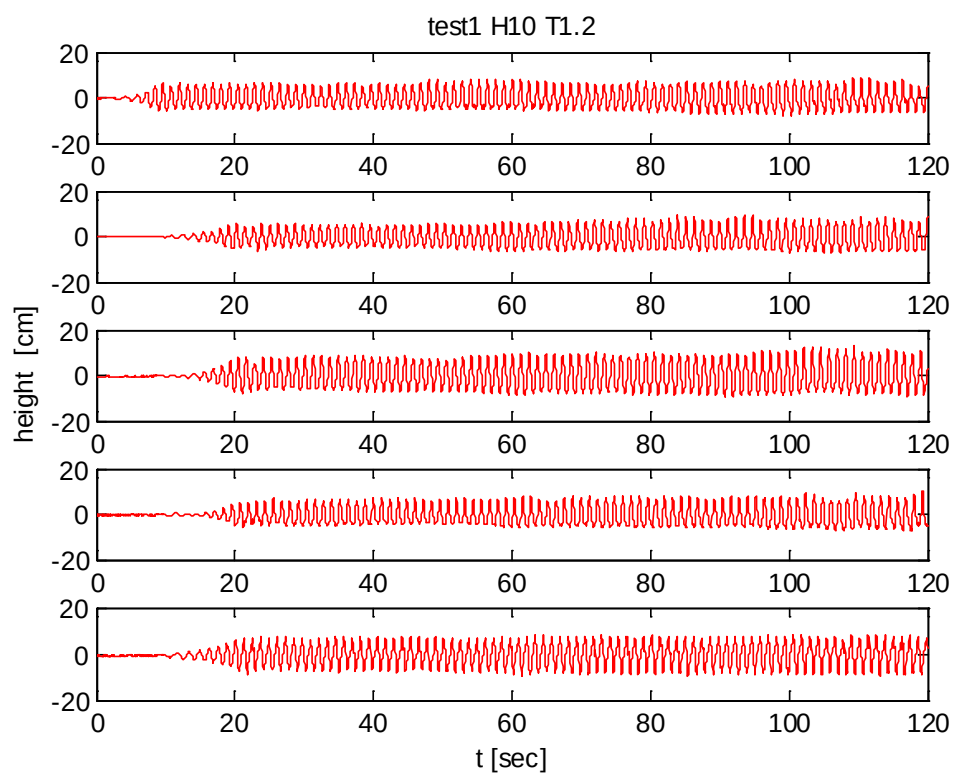
H3 [cm]=	7.8165	11.0881	6.7708	13.5373	19.6387
H10 [cm]=	9.7538	13.9243	8.7522	15.5086	22.1469
Hmax [cm]=	11.7958	16.4683	11.1703	17.5508	25.9229

圖 A.19 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=8cm ,T=2s)



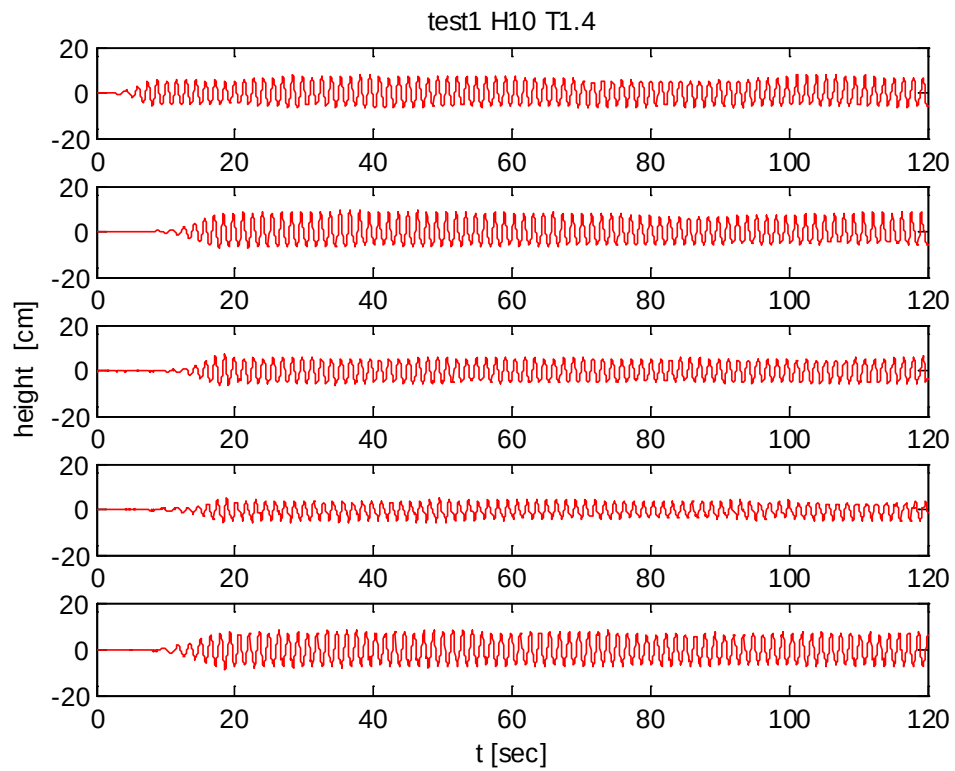
H3 [cm]=	10.6924	11.8927	11.6380	8.7378	9.7147
H10 [cm]=	12.5073	14.2721	14.3468	11.6258	13.2071
Hmax [cm]=	17.2974	22.6200	21.9369	15.3137	15.5200

圖 A.20 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=10cm ,T=1s)



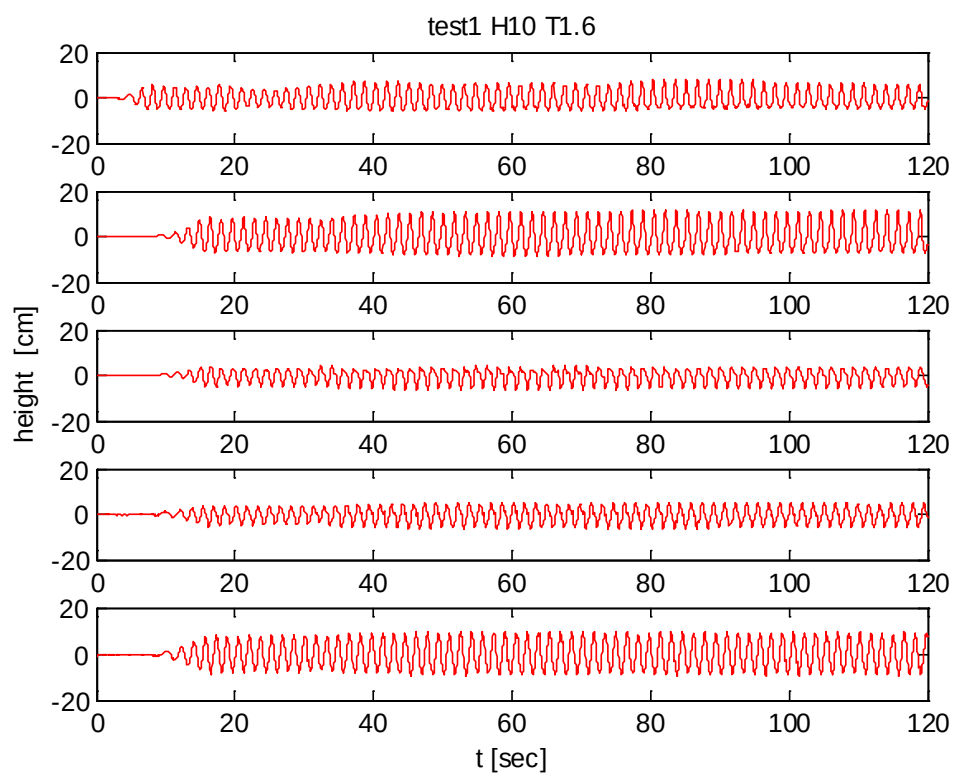
H3 [cm]=	11.7375	11.6497	15.8885	11.7142	13.4040
H10[cm] =	13.8788	13.7753	18.6925	14.0795	16.1374
Hmax [cm]=	17.3763	18.6188	25.4565	20.4306	19.1502

圖 A.21 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=10cm ,T=1.2s)



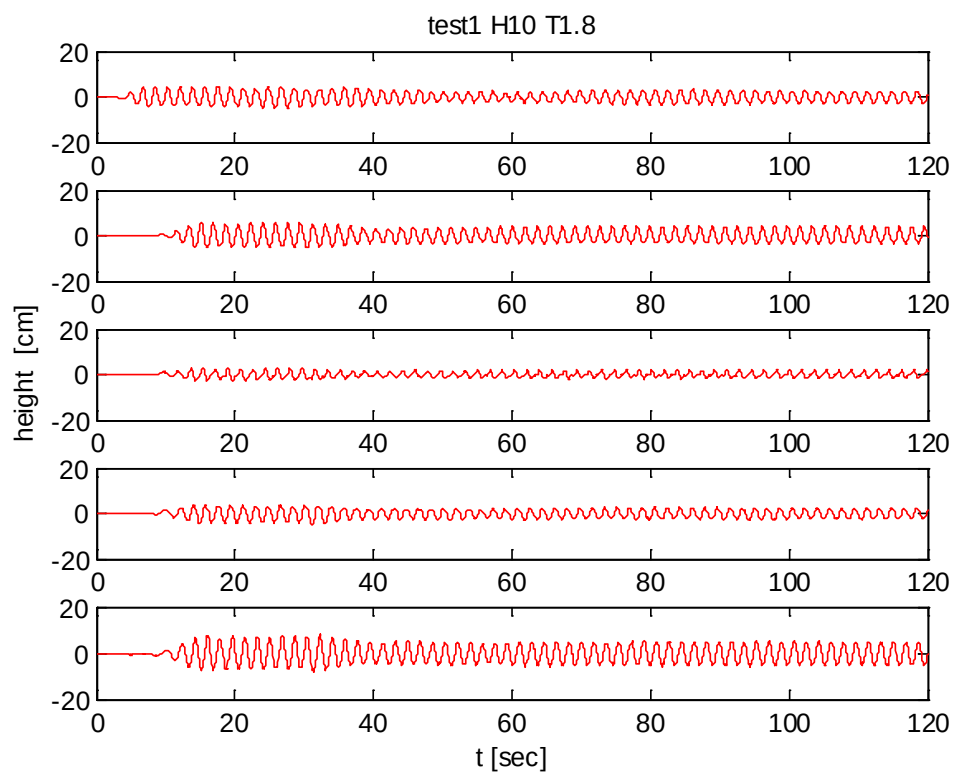
H3 [cm]=	11.8535	13.0249	10.1017	7.3573	13.0547
H10 [cm]=	13.6432	15.8109	11.1458	9.1980	14.5743
Hmax [cm]=	16.5908	18.5130	13.9308	12.0239	17.2072

圖 A.22 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=10cm ,T=1.4s)



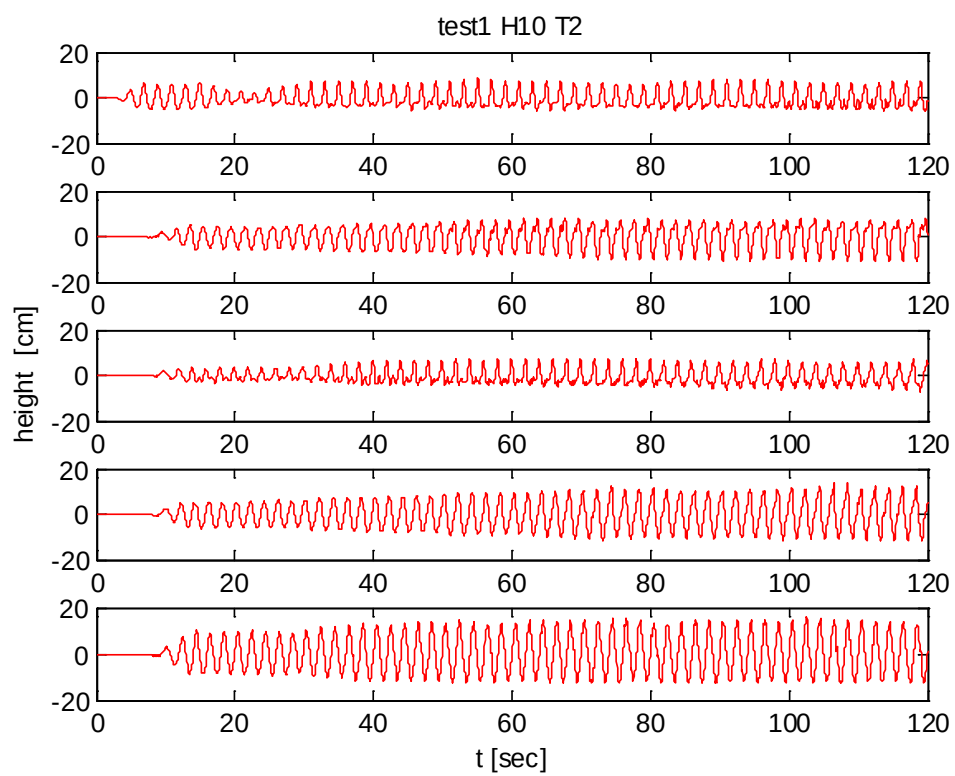
H3 [cm]=	10.8870	16.6724	8.5115	9.5274	15.8829
H10 [cm]=	12.8142	20.6903	11.1057	11.3917	17.7540
Hmax [cm]=	16.1578	23.1856	13.7455	13.7418	19.8449

圖 A.23 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=10cm ,T=1.6s)



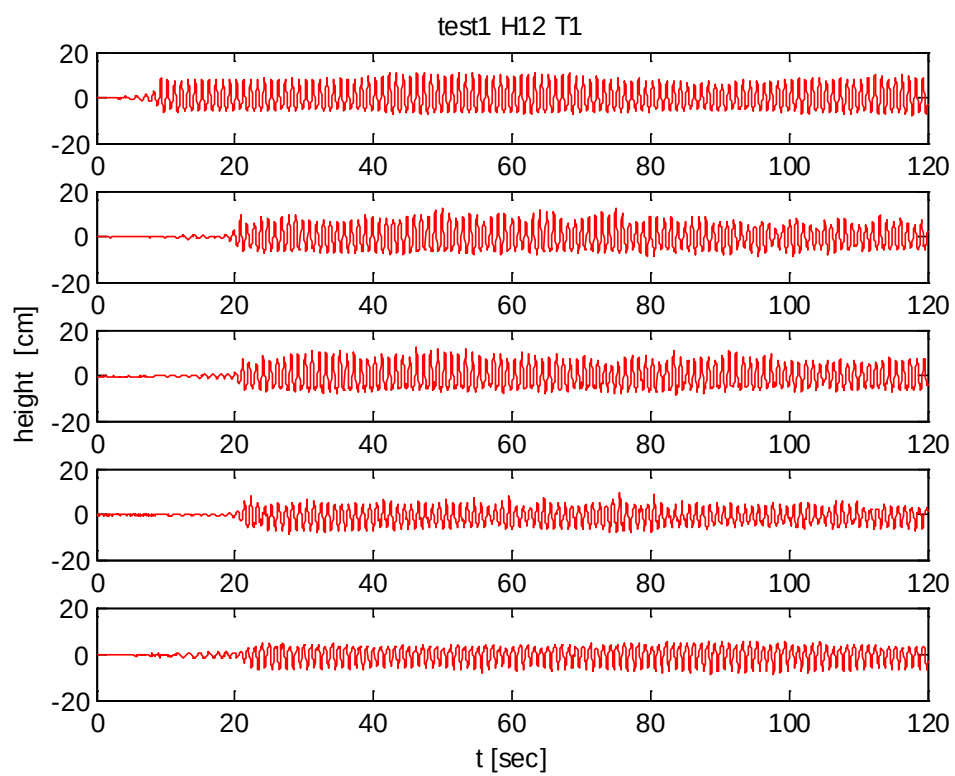
H3[cm] =	6.5757	7.8984	3.5487	5.4419	10.5081
H10[cm] =	8.1174	9.6073	4.4773	6.7856	12.7109
Hmax [cm]=	10.3281	12.3161	6.2568	10.3810	15.8794

圖 A.24 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=10cm ,T=1.8s)



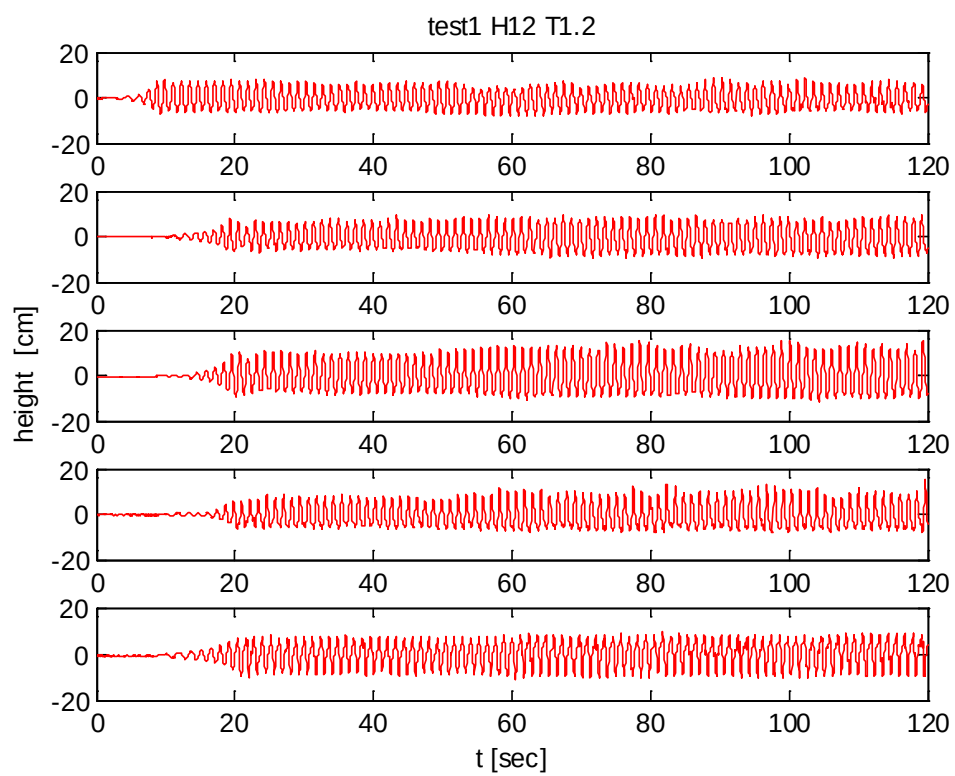
H3 [cm]=	10.4061	14.0554	9.3364	17.7008	23.0056
H10 [cm]=	13.1796	17.9452	12.2510	21.1680	26.1350
Hmax [cm]=	17.1010	22.4172	15.2426	27.1537	32.1703

圖 A.25 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=10cm ,T=2s)



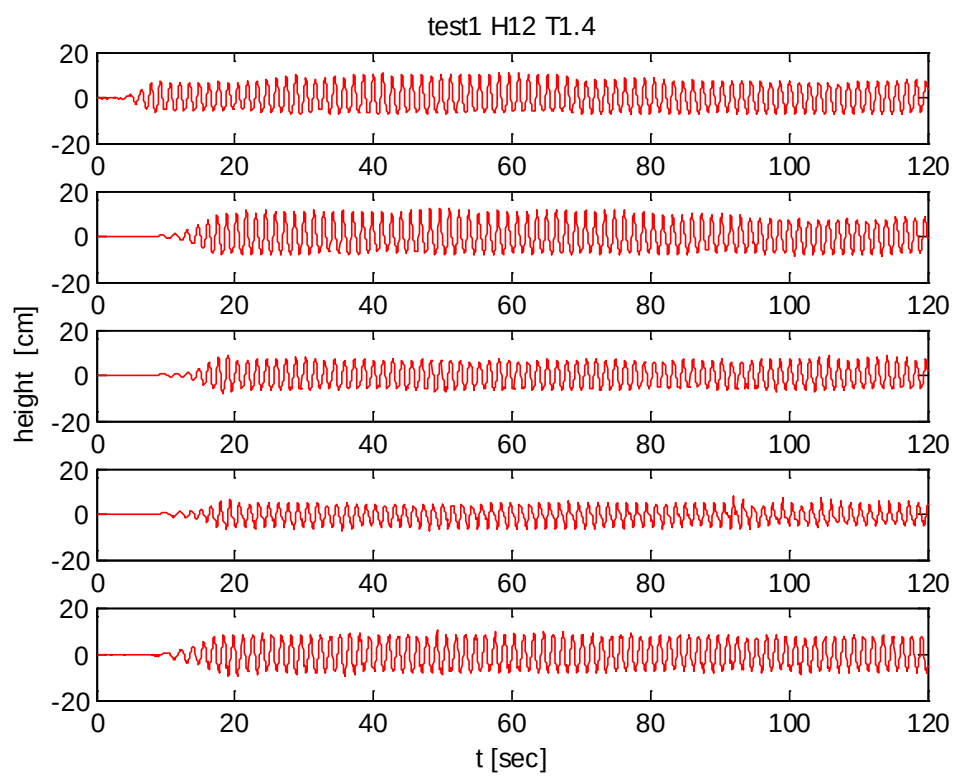
H3 [cm]=	13.8466	13.6362	13.4549	10.1585	9.6800
H10 [cm]=	17.1292	16.6149	16.5941	12.8696	13.1183
Hmax [cm]=	22.4063	24.1413	25.3533	18.2645	17.5460

圖 A.26 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=12cm ,T=1s)



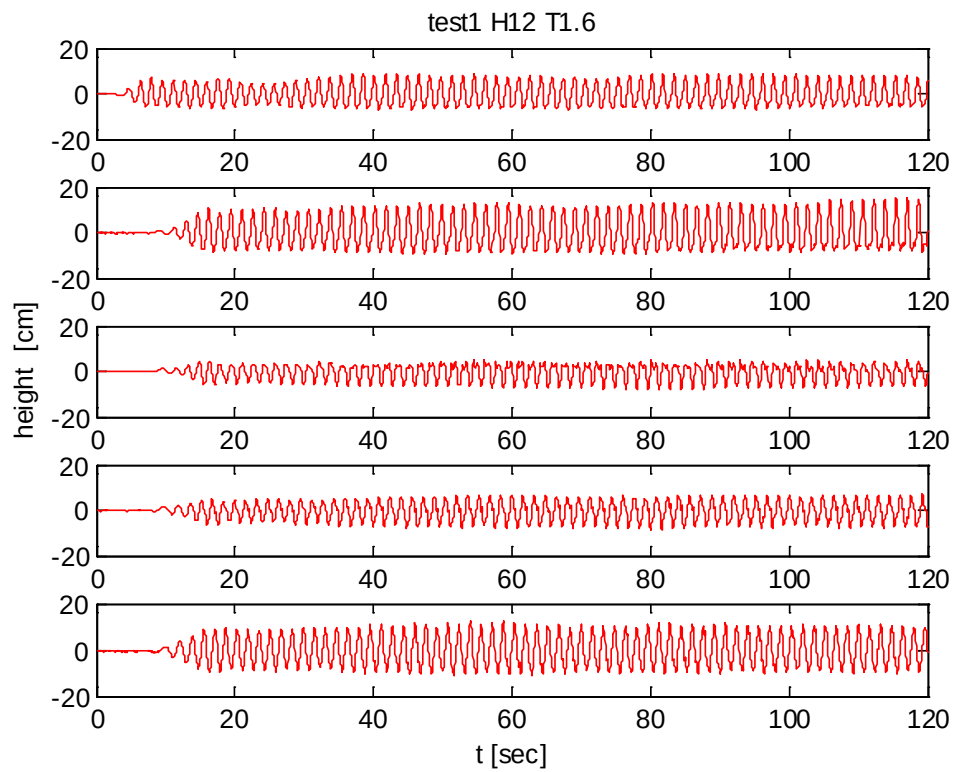
H3 [cm]=	12.2216	14.2259	19.6680	14.4518	14.7205
H10 [cm]=	14.1787	16.4887	23.7044	18.2399	18.0647
Hmax [cm]=	17.9268	19.5745	31.0130	30.7011	21.6810

圖 A.27 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=12cm ,T=1.2s)



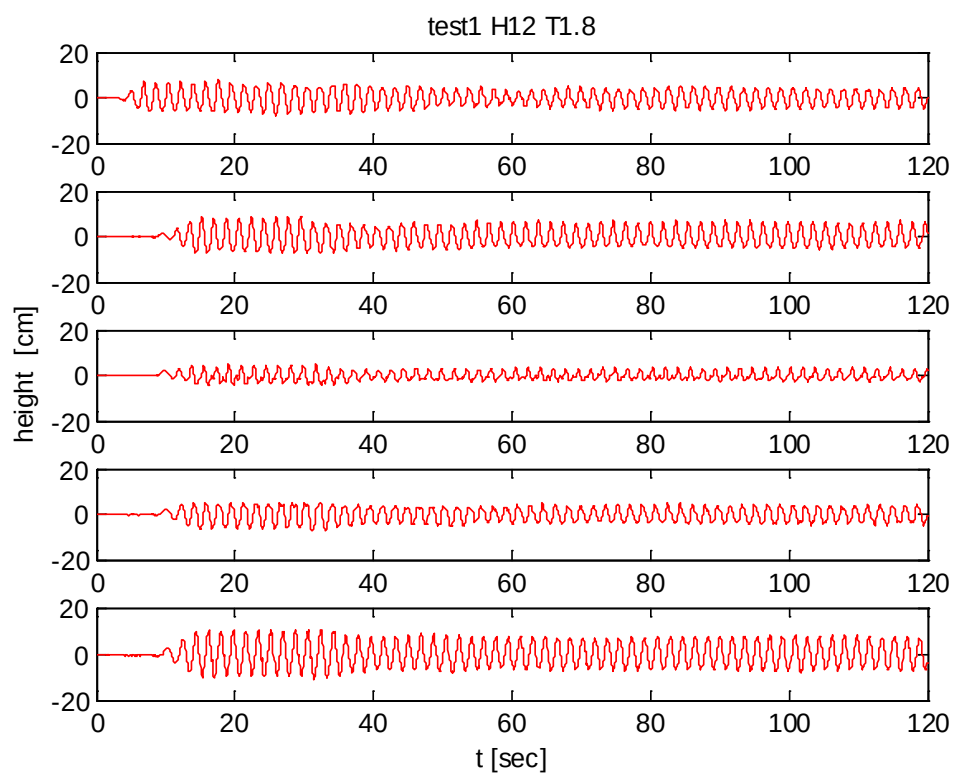
H3 [cm]=	14.4172	16.3105	12.3054	9.5053	14.7065
H10 [cm]=	17.3753	20.3467	13.8717	11.7964	16.2532
Hmax [cm]=	22.2485	24.7084	17.6229	15.5386	21.0273

圖 A.28 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=12cm ,T=1.4s)



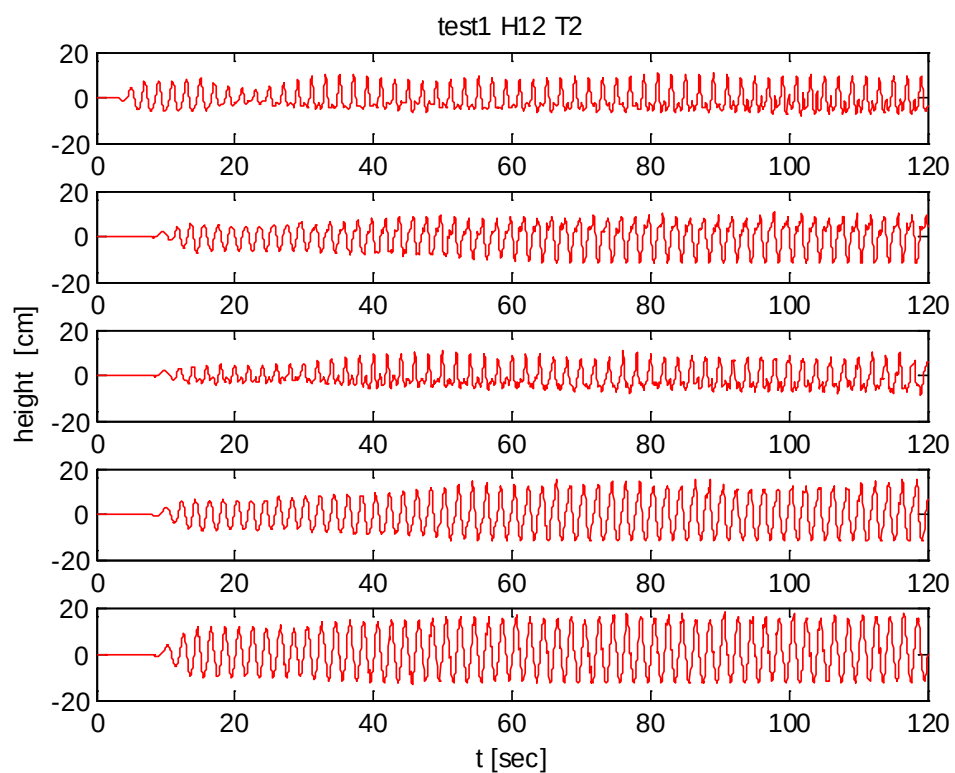
H3[cm] =	12.9610	19.7172	10.1088	11.8582	17.9857
H10 [cm]=	15.2177	24.5044	13.3716	14.0468	20.4874
Hmax [cm]=	17.8077	30.4093	16.6446	17.2525	24.9099

圖 A.29 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=12cm ,T=1.6s)



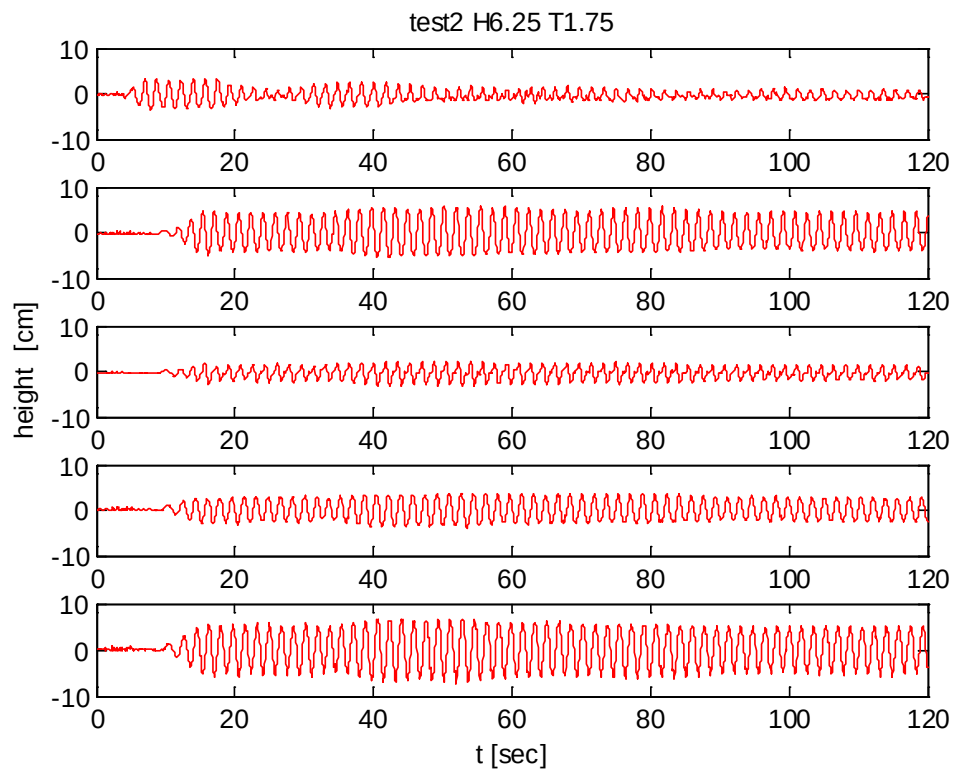
H3[cm] =	10.2286	11.5305	5.7157	8.6230	14.7496
H10 [cm]=	12.4547	13.8612	7.3740	10.6427	17.4874
Hmax [cm]=	15.6476	18.0518	10.4112	15.1231	21.8504

圖 A.30 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=12cm ,T=1.8s)



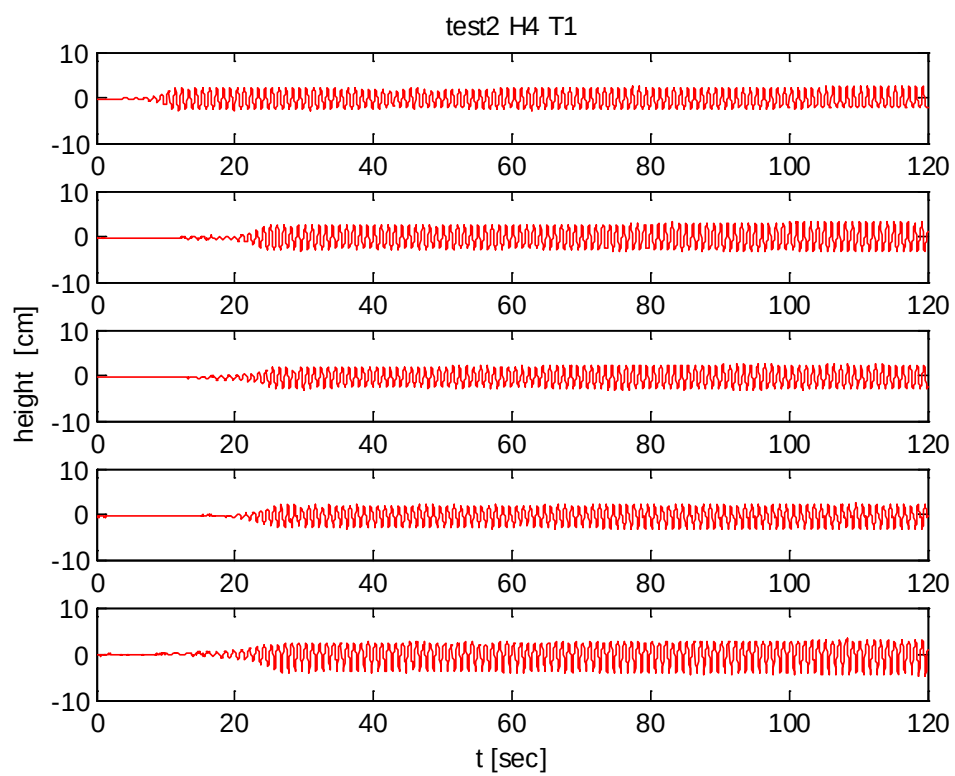
H3 [cm]=	13.0337	16.3197	12.1886	20.9458	25.3804
H10 [cm]=	16.8167	21.2369	15.5232	24.3037	29.8136
Hmax [cm]=	21.5017	23.6919	21.9708	30.9627	36.1358

圖 A.31 水工模擬試驗模型 I 波高結果(H=12cm ,T=2s)



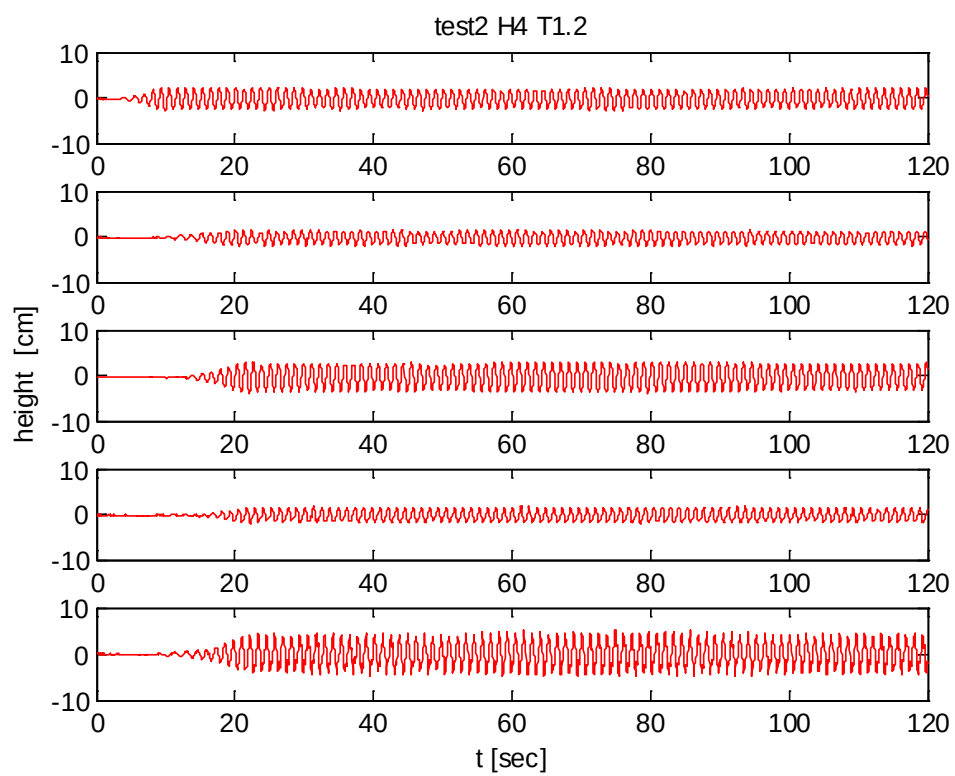
H3[cm] =	3.6676	8.8374	3.9344	5.8017	10.3205
H10 [cm]=	5.3283	10.0967	5.0506	6.7482	11.8818
Hmax [cm]=	7.2355	11.4123	6.8508	7.7934	14.8813

圖 A.32 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6.25cm ,T=1.75s)



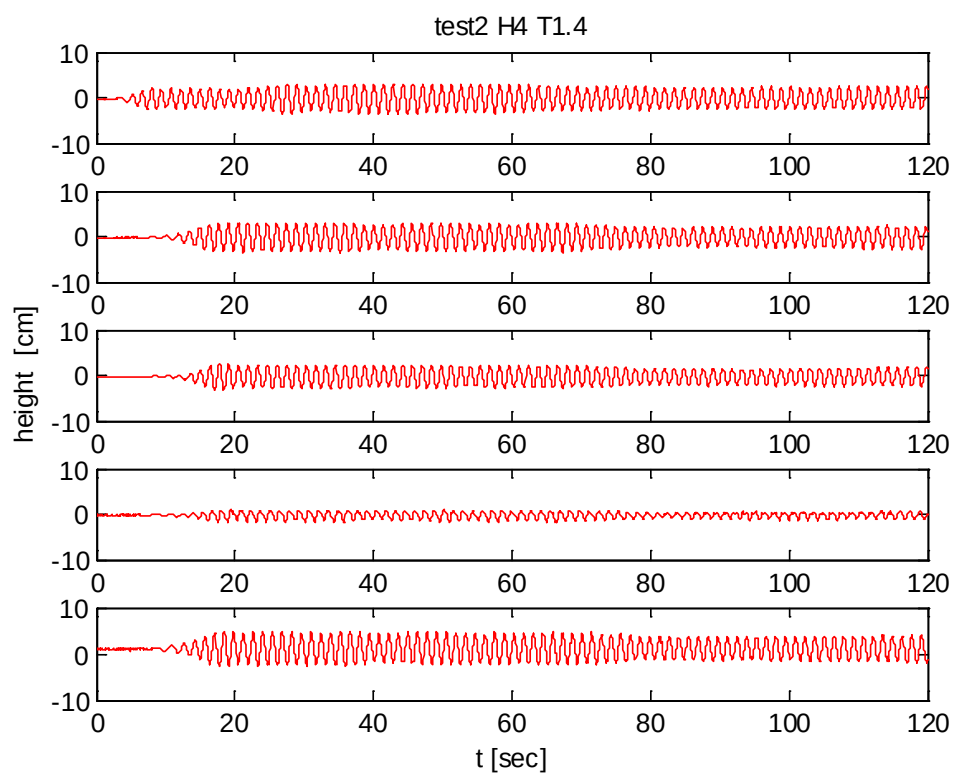
H3[cm] =	4.4482	5.3813	4.6741	4.6138	5.7838
H10 [cm]=	4.9641	6.1036	5.5477	5.9384	7.5551
Hmax[cm] =	5.9407	6.8810	6.5757	6.8385	9.5070

圖 A.33 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=4cm ,T=1s)



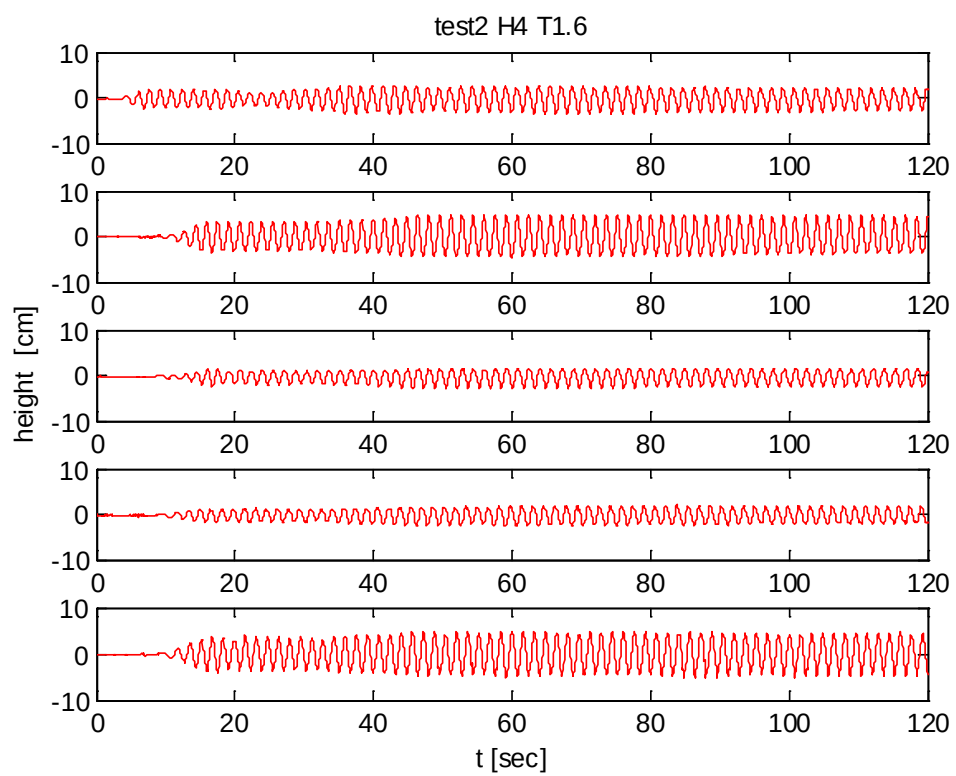
H3 [cm]=	4.3764	3.1476	5.9404	3.0925	7.1534
H10[cm] =	5.0230	3.8401	6.9272	3.4159	8.6197
Hmax [cm]=	5.8618	4.6519	7.8497	4.4885	10.3307

圖 A.34 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=4cm ,T=1.2s)



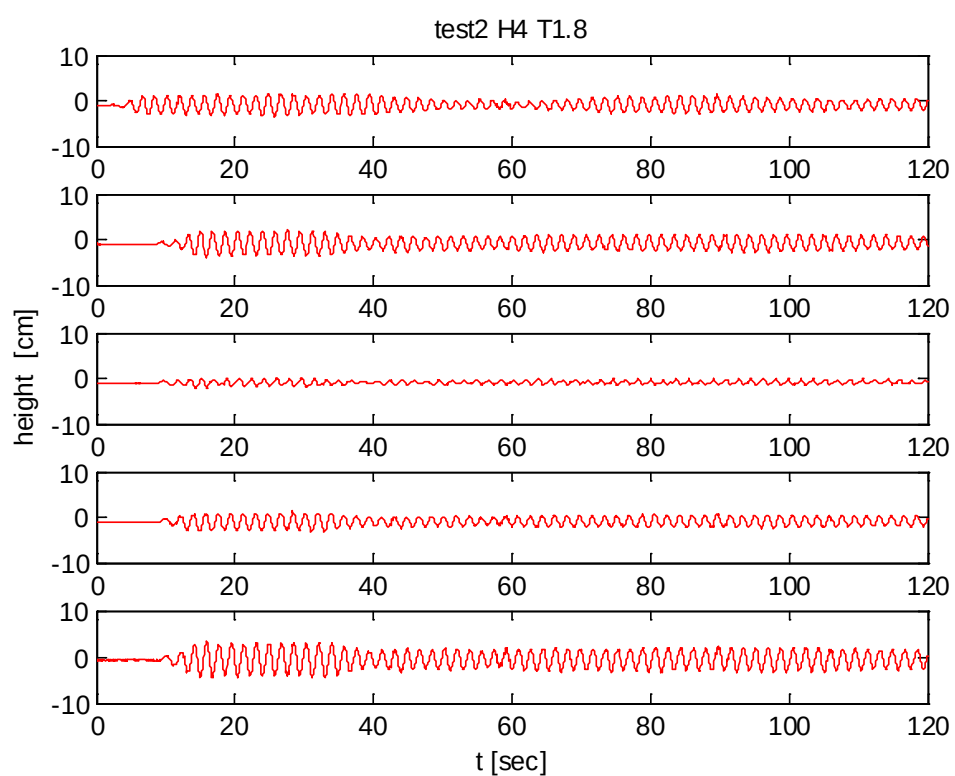
H3 [cm]=	5.1987	5.2061	4.5462	2.0772	6.9747
H10 [cm]=	6.0832	6.0583	5.2514	2.7923	8.6258
Hmax[cm] =	7.3931	7.4114	6.6095	3.9293	9.9918

圖 A.35 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=4cm ,T=1.4s)



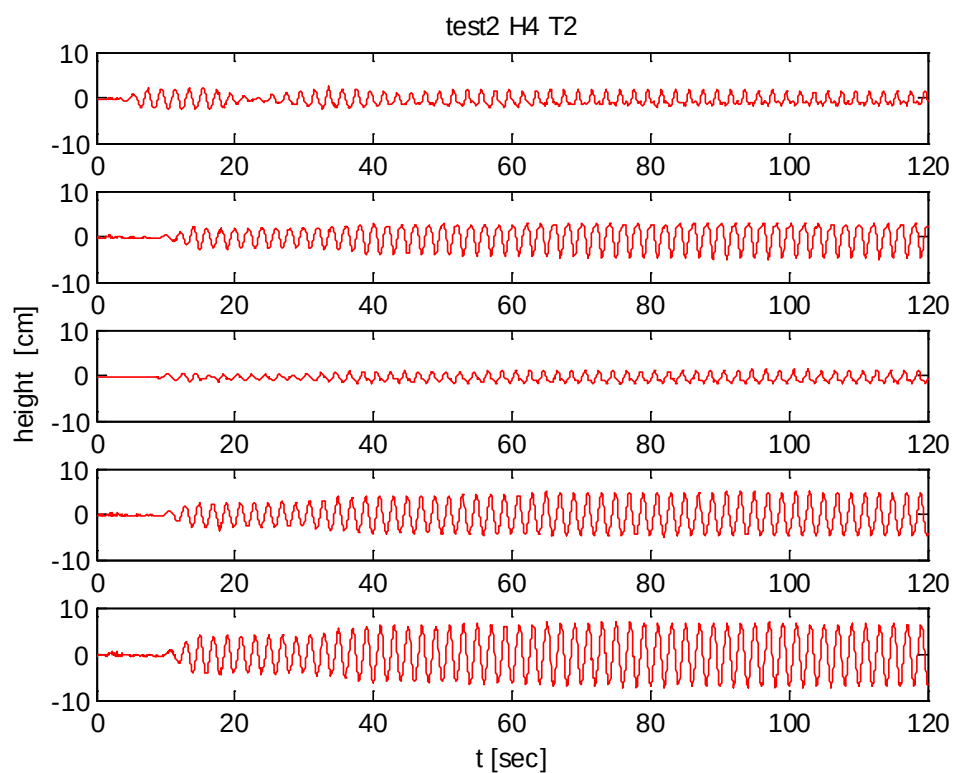
H3[cm] =	5.2111	7.9174	3.9021	3.8164	8.0494
H10[cm] =	6.3870	9.0759	5.1239	4.5844	9.1349
Hmax[cm] =	7.5105	9.7847	6.1623	5.3839	10.3506

圖 A.36 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=4cm ,T=1.6s)



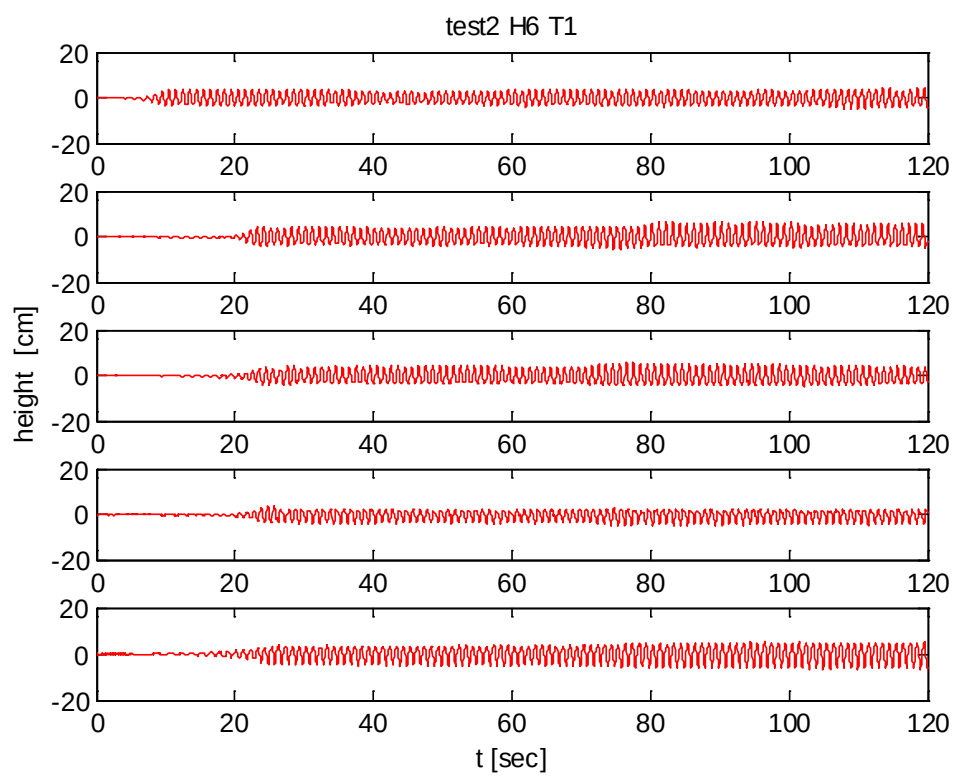
H3 [cm]=	4.5135	4.6738	2.6420	4.1052	5.4566
H10[cm] =	5.6632	5.8593	3.0594	4.9976	6.8549
Hmax [cm]=	7.1969	7.7303	4.3704	6.6888	9.2512

圖 A.37 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=4cm ,T=1.8s)



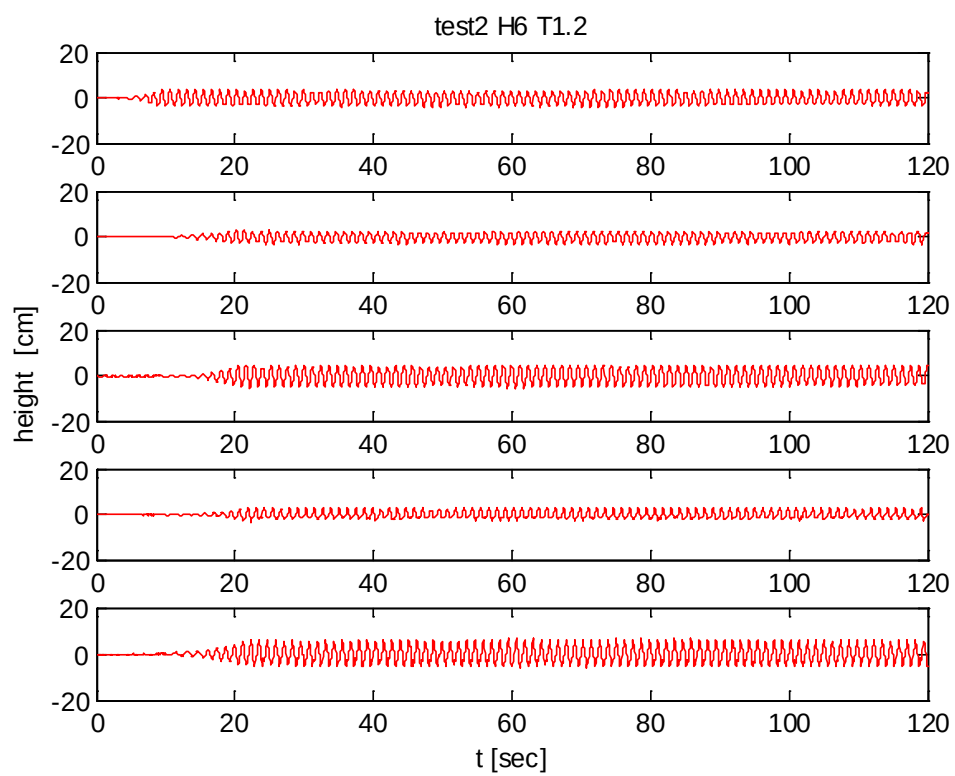
H3 [cm]=	3.3261	6.5121	2.5491	8.2336	11.6400
H10[cm] =	4.0336	8.6014	3.2193	9.3501	13.1714
Hmax [cm]=	5.2732	9.9941	3.7849	10.1725	14.8242

圖 A.38 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=4cm ,T=2s)



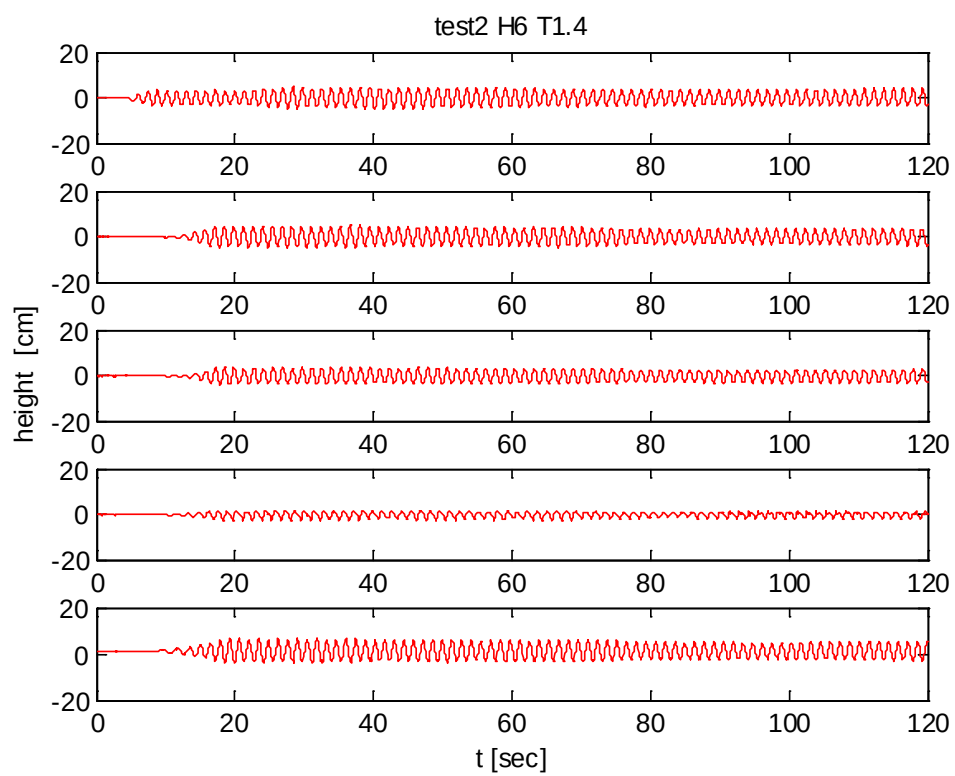
H3 [cm]=	6.6548	8.3429	7.6495	5.9833	8.5988
H10 [cm]=	7.5856	10.0221	8.8736	8.2676	10.7478
Hmax [cm]=	10.4556	13.2530	11.7844	10.4201	13.4724

圖 A.39 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6cm ,T=1s)



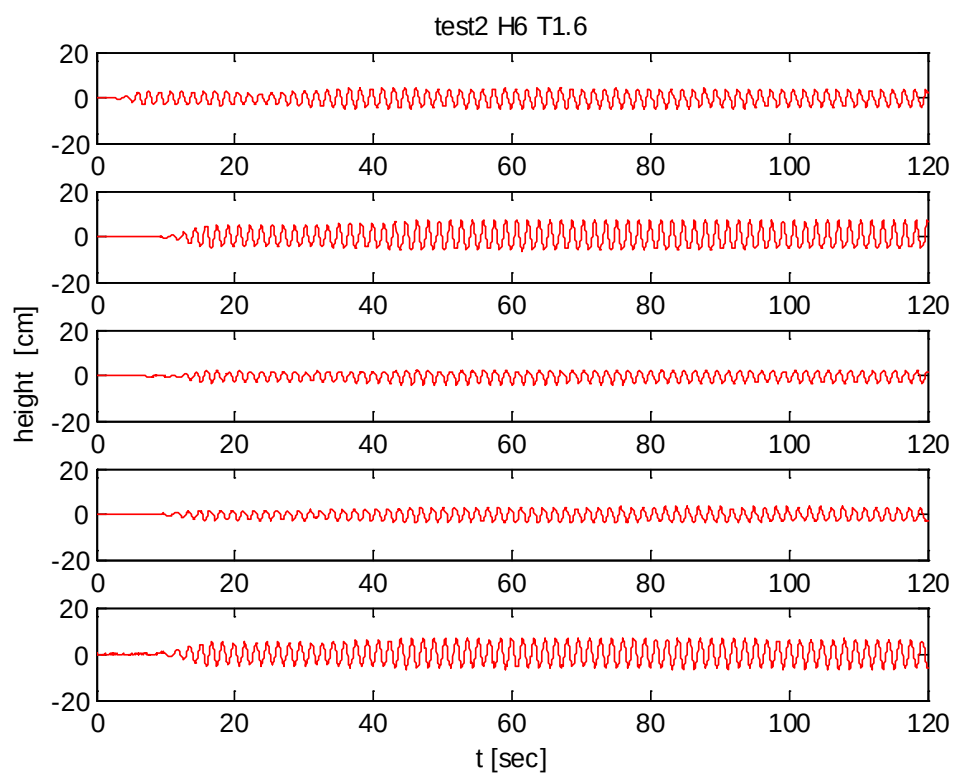
H3 [cm]=	6.5655	5.1229	8.6405	4.5292	9.5695
H10 [cm]=	7.3678	6.2607	9.8292	5.4456	11.2758
Hmax [cm]=	8.7281	7.4477	10.9847	6.5773	13.2831

圖 A.40 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6cm ,T=1.2s)



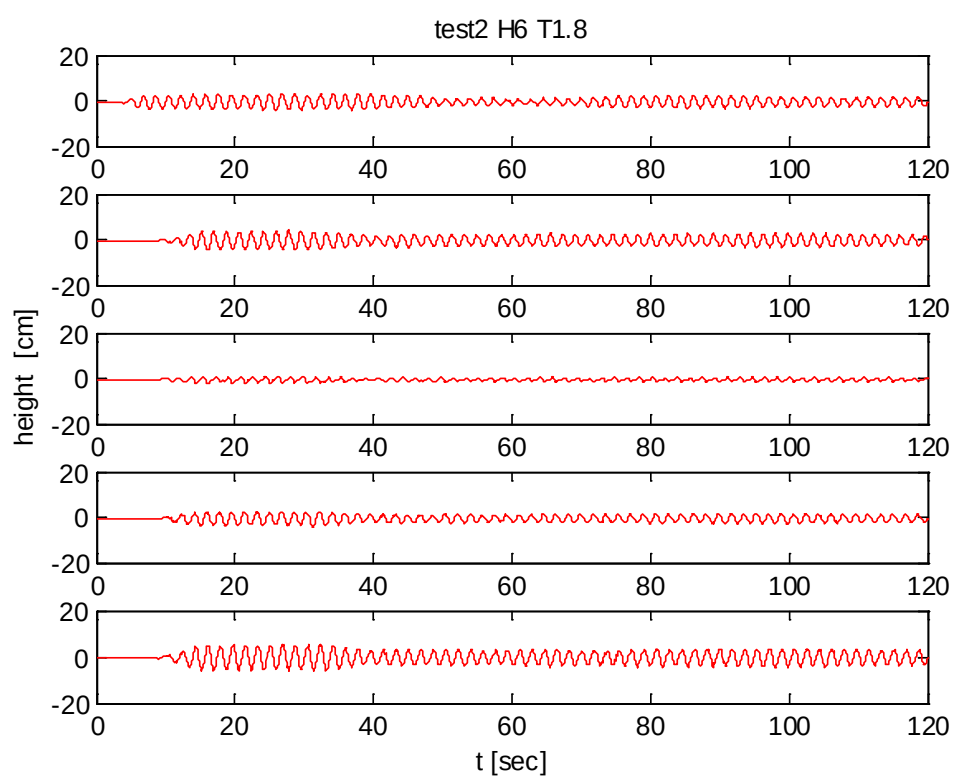
H3[cm] =	7.4707	7.6682	6.3582	3.4536	9.1045
H10[cm] =	8.5053	8.8670	7.1712	4.7249	11.4185
Hmax [cm]=	10.1821	10.1709	8.8825	6.2793	13.6219

圖 A.41 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6cm ,T=1.4s)



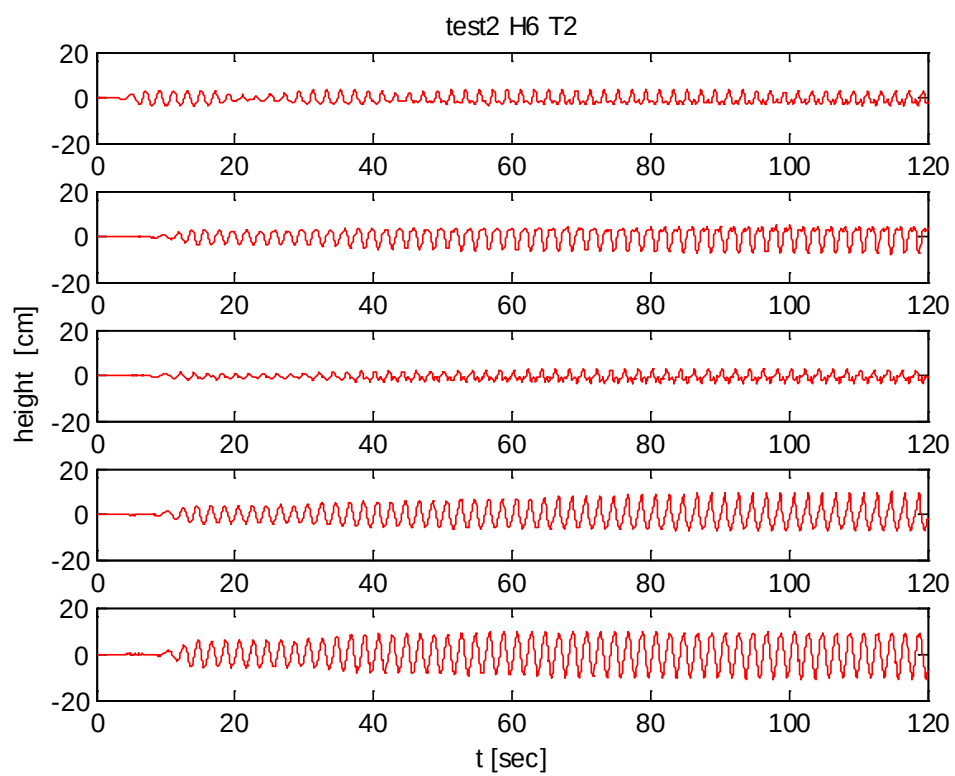
H3 [cm]=	7.7173	11.4375	5.4435	5.9305	11.0070
H10 [cm]=	9.0216	13.5615	7.1303	6.8176	12.5686
Hmax [cm]=	10.5344	14.7385	8.5382	7.8455	13.8743

圖 A.42 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6cm ,T=1.6s)



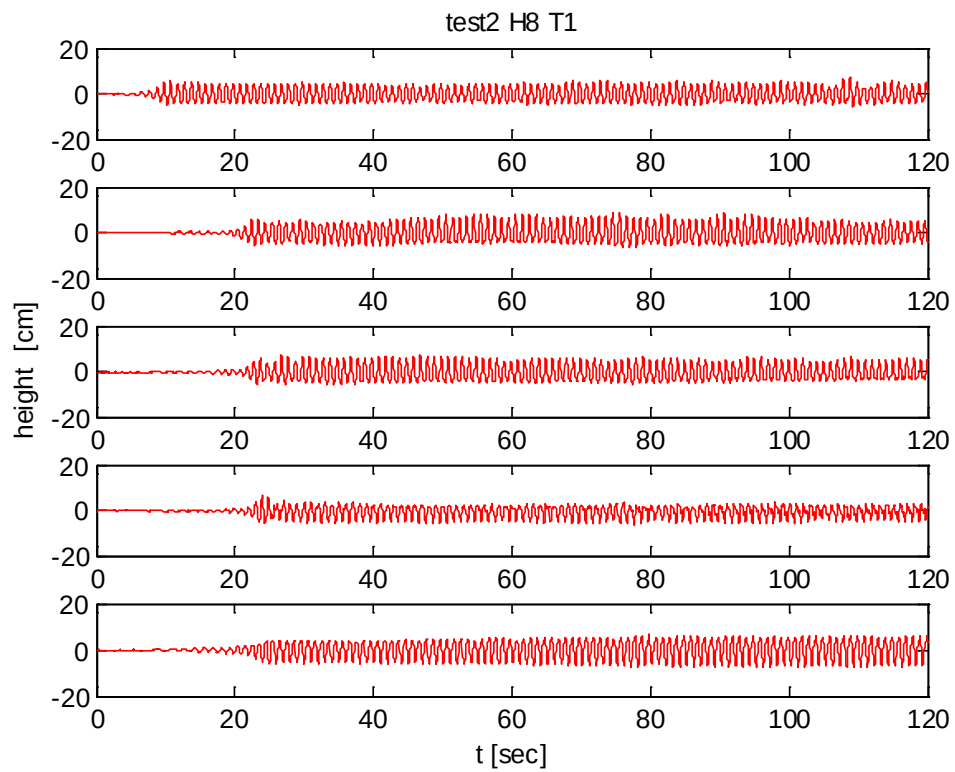
H3 [cm]=	5.5961	5.9086	2.6412	4.7232	7.5596
H10[cm] =	6.8798	7.3036	3.3251	5.9735	9.3647
Hmax[cm] =	9.1994	9.5695	5.3355	8.4429	12.2071

圖 A.43 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6cm ,T=1.8s)



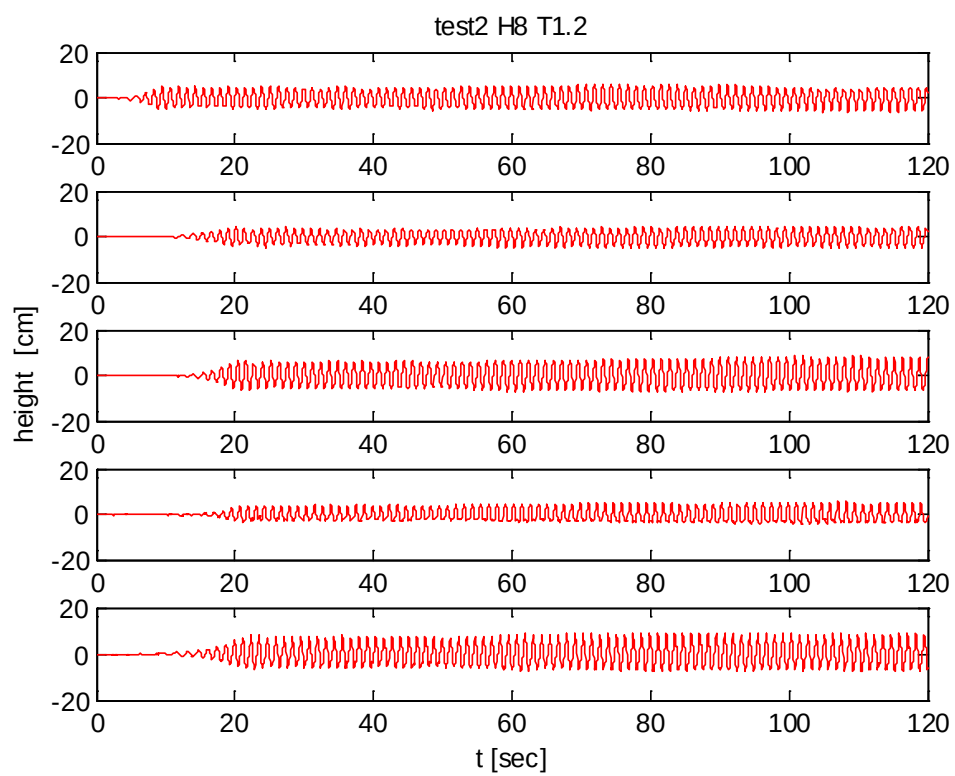
H3[cm] =	5.5630	9.5607	4.5842	12.1778	16.6368
H10[cm] =	6.4965	12.9249	5.8657	14.7905	19.1757
Hmax [cm]=	7.5284	15.4436	7.9188	19.7590	22.0810

圖 A.44 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=6cm ,T=2s)



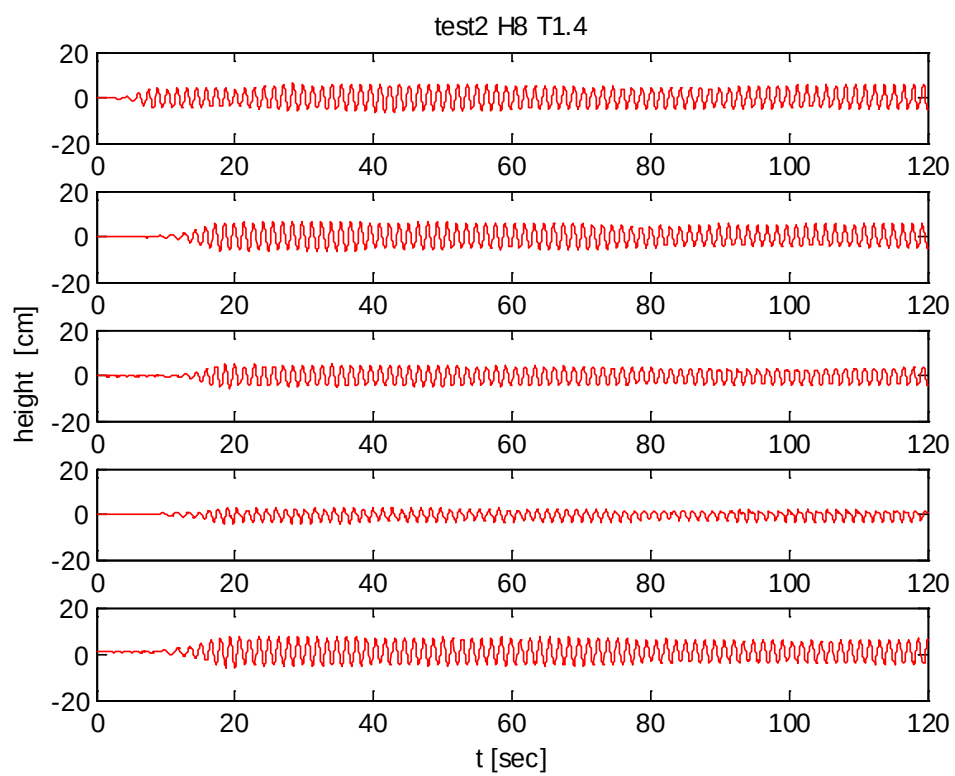
H3[cm] =	8.5478	10.4547	9.4799	7.2584	10.5242
H10 [cm]=	9.6952	12.7912	11.2548	10.1032	12.7253
Hmax [cm]=	14.6361	16.8966	15.0224	12.8586	14.9936

圖 A.45 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=8cm ,T=1s)



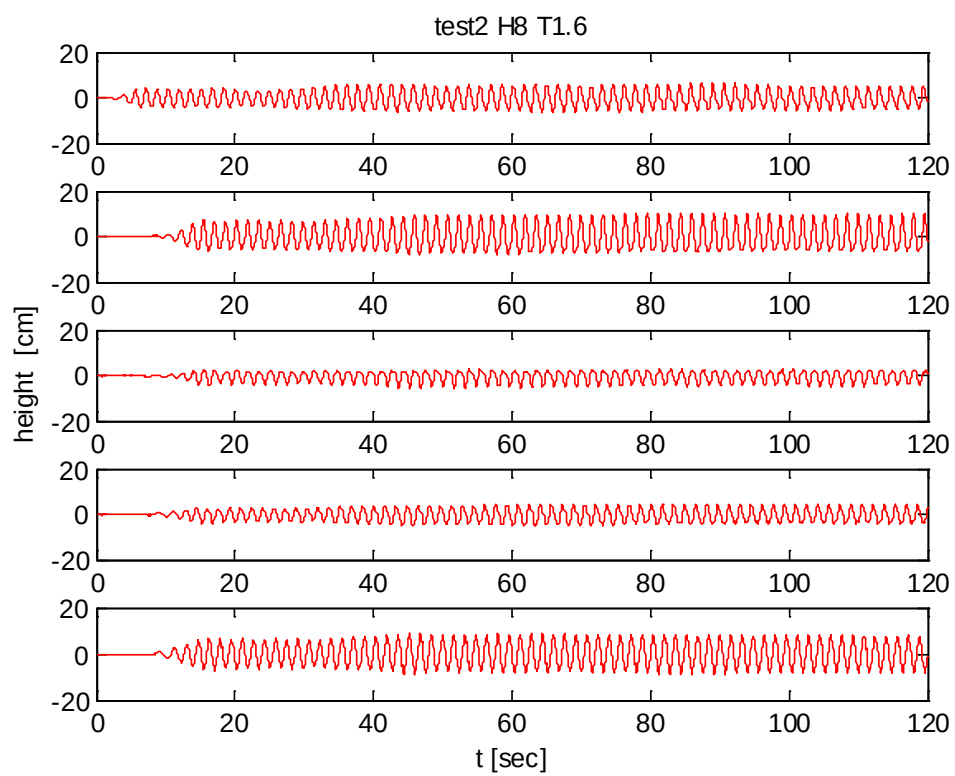
H3 [cm]=	9.4564	7.6005	12.6044	7.3891	12.9917
H10 [cm]=	10.8318	8.9029	14.3830	8.9680	15.3364
Hmax [cm]=	12.6559	10.3130	16.8820	11.5904	18.2650

圖 A.46 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=8cm ,T=1.2s)



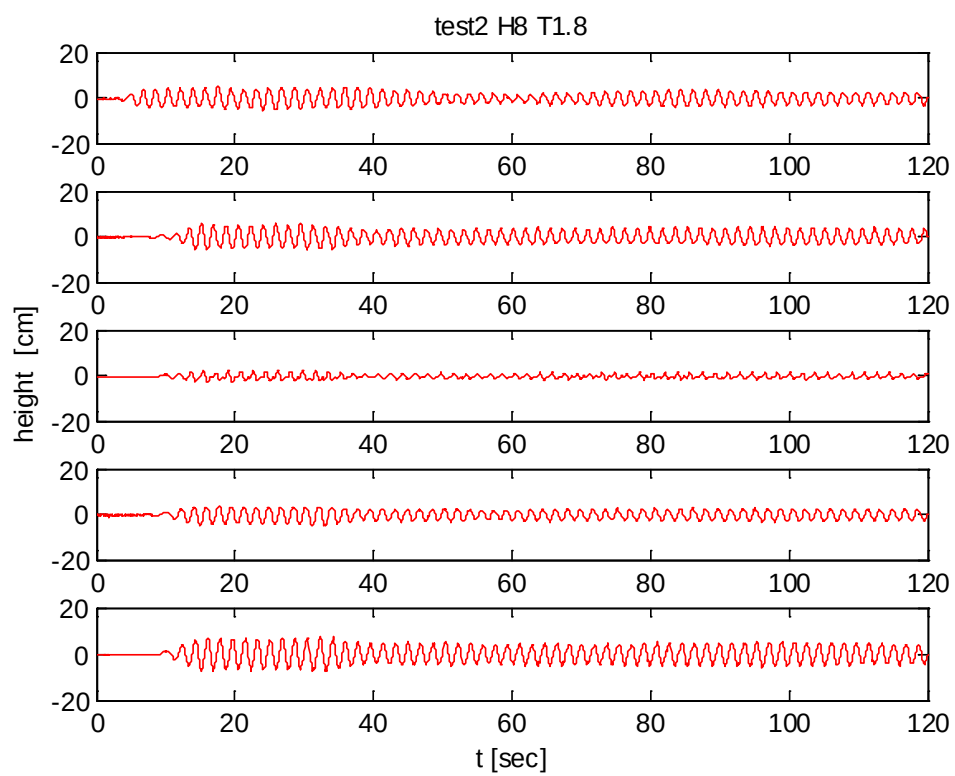
H3 [cm]=	9.7533	10.3049	8.0858	4.9977	10.7541
H10 [cm]=	11.0911	11.8317	9.1061	6.6363	13.0906
Hmax[cm] =	13.1837	13.6776	11.3981	8.5545	15.5615

圖 A.47 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=8cm ,T=1.4s)



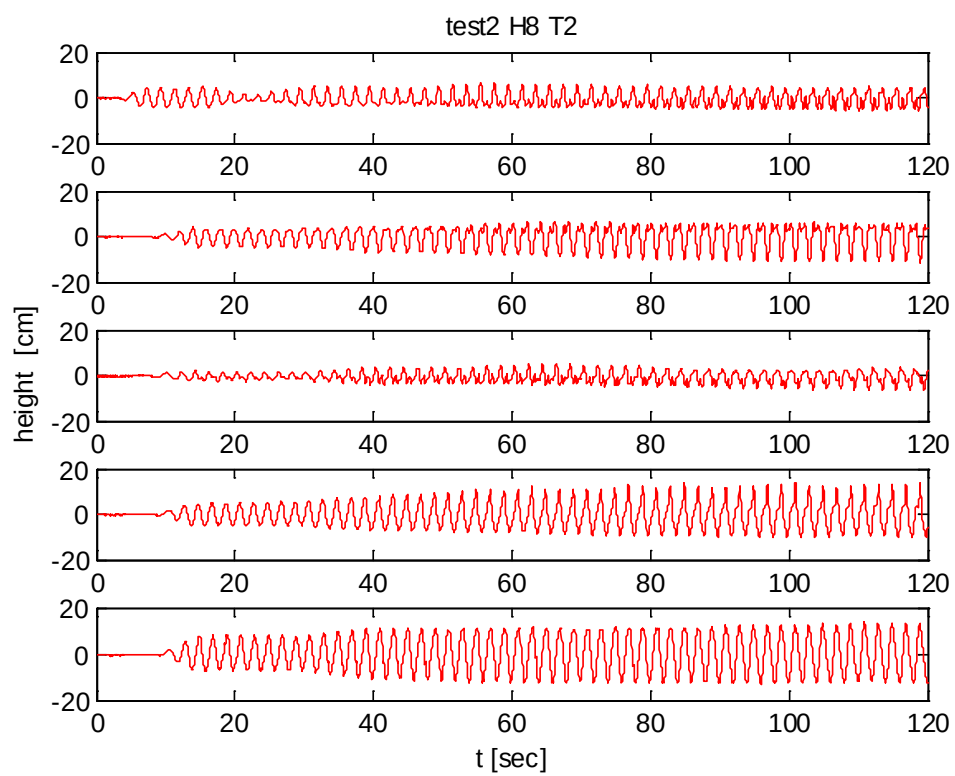
H3[cm] =	10.1731	14.8557	6.9754	7.9110	13.7842
H10[cm] =	11.5479	18.4628	9.3690	8.8593	15.9332
Hmax[cm] =	12.9695	20.5068	11.3981	10.0840	18.4543

圖 A.48 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=8cm ,T=1.6s)



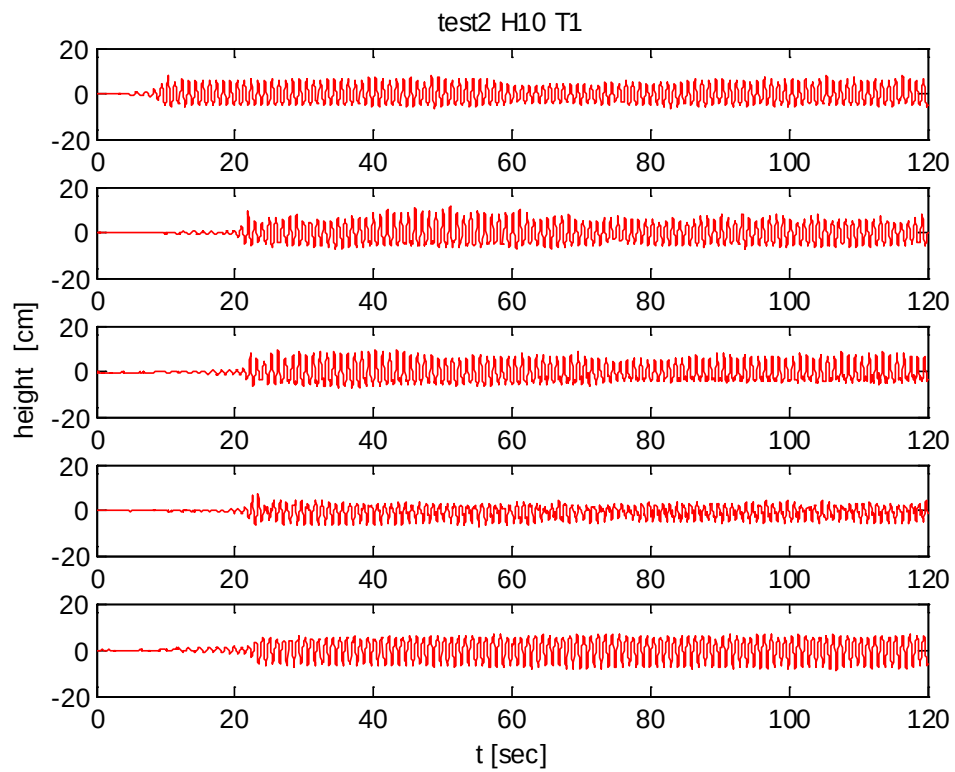
H3 [cm]=	7.1647	7.6424	3.1036	5.8630	9.7799
H10 [cm]=	8.6628	9.3398	4.0081	7.2305	11.9897
Hmax [cm]=	11.3981	11.2681	6.4713	10.4201	15.1397

圖 A.49 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=8cm ,T=1.8s)



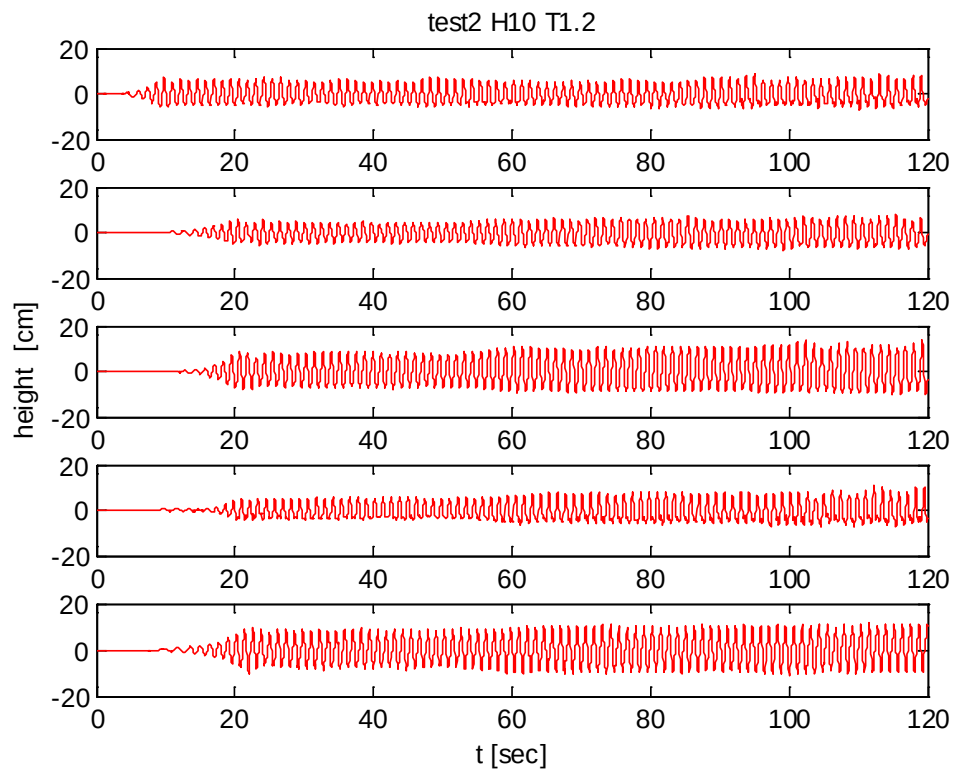
H3[cm] =	8.5823	12.9200	7.1398	15.9060	21.3569
H10[cm] =	10.1426	17.9199	9.4154	20.5122	24.1552
Hmax [cm]=	13.1049	22.7684	13.6358	28.3401	27.3783

圖 A.50 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=8cm ,T=2s)



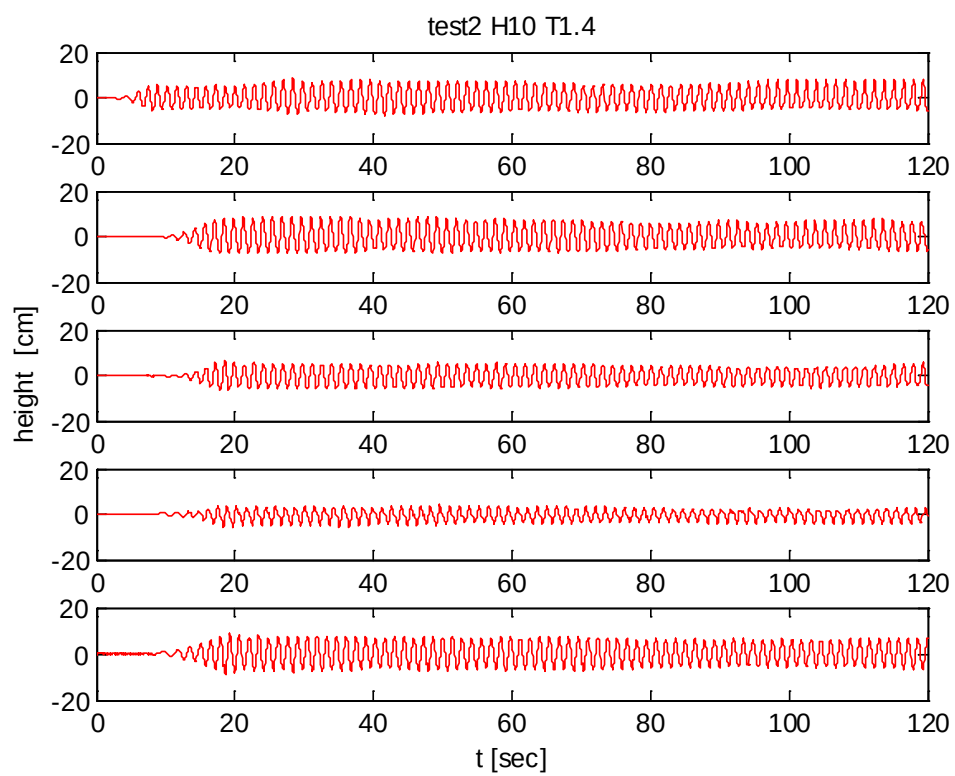
H3[cm] =	10.4139	11.8163	11.2943	7.9237	11.9619
H10 [cm]=	12.1114	14.5374	14.0754	10.9549	14.2858
Hmax [cm]=	16.4826	23.0185	19.3285	14.0520	17.4414

圖 A.51 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=10cm ,T=1s)



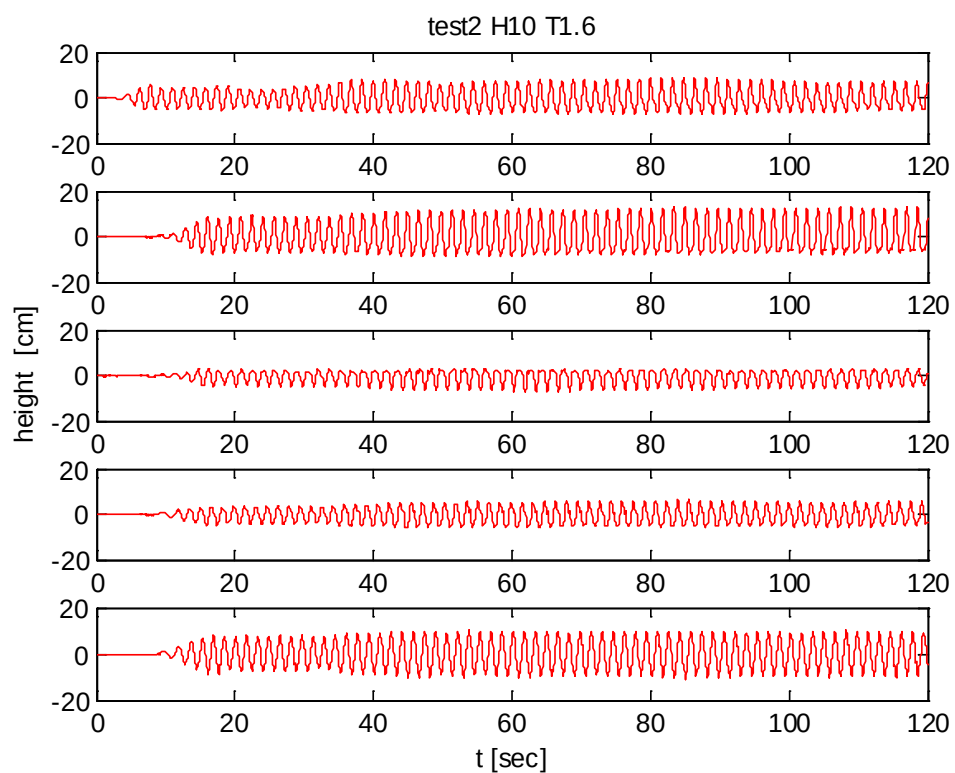
H3 [cm]=	10.7831	10.7969	17.3856	11.1186	16.5058
H10 [cm]=	12.7058	12.7612	20.6083	14.2067	19.5665
Hmax [cm]=	18.1699	15.6226	27.9745	21.3267	23.6652

圖 A.52 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=10cm ,T=1.2s)



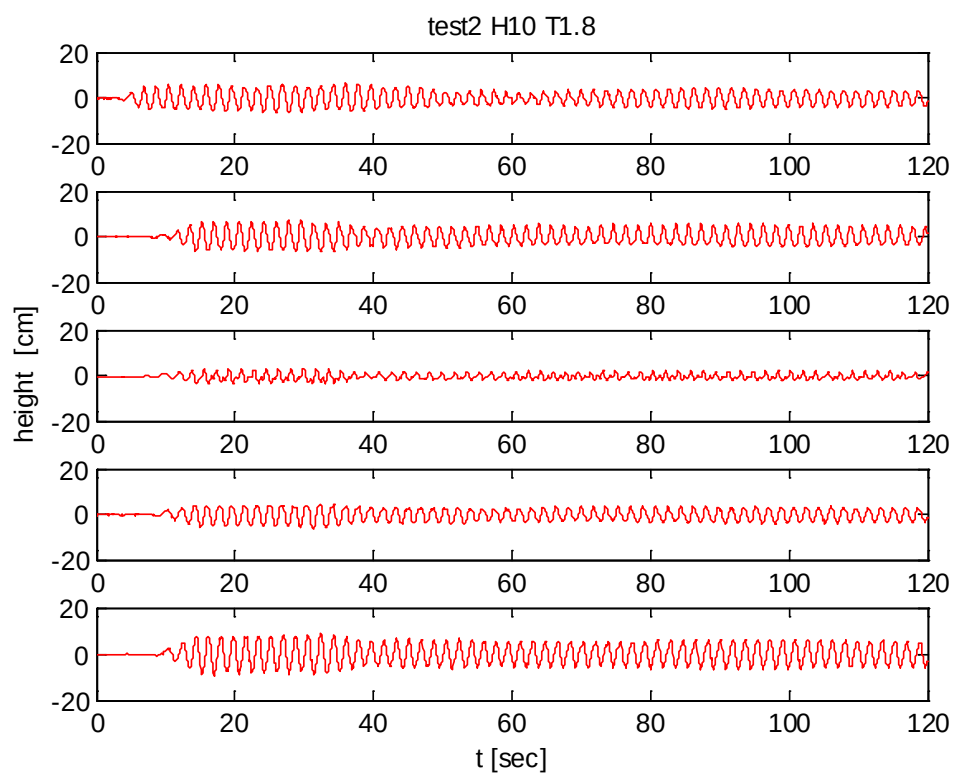
H3 [cm]=	12.1235	13.0143	9.7140	6.5835	12.4476
H10 [cm]=	14.1788	15.0259	10.9562	8.5409	14.1629
Hmax [cm]=	16.9925	17.4285	13.7049	11.7999	17.7767

圖 A.53 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=10cm ,T=1.4s)



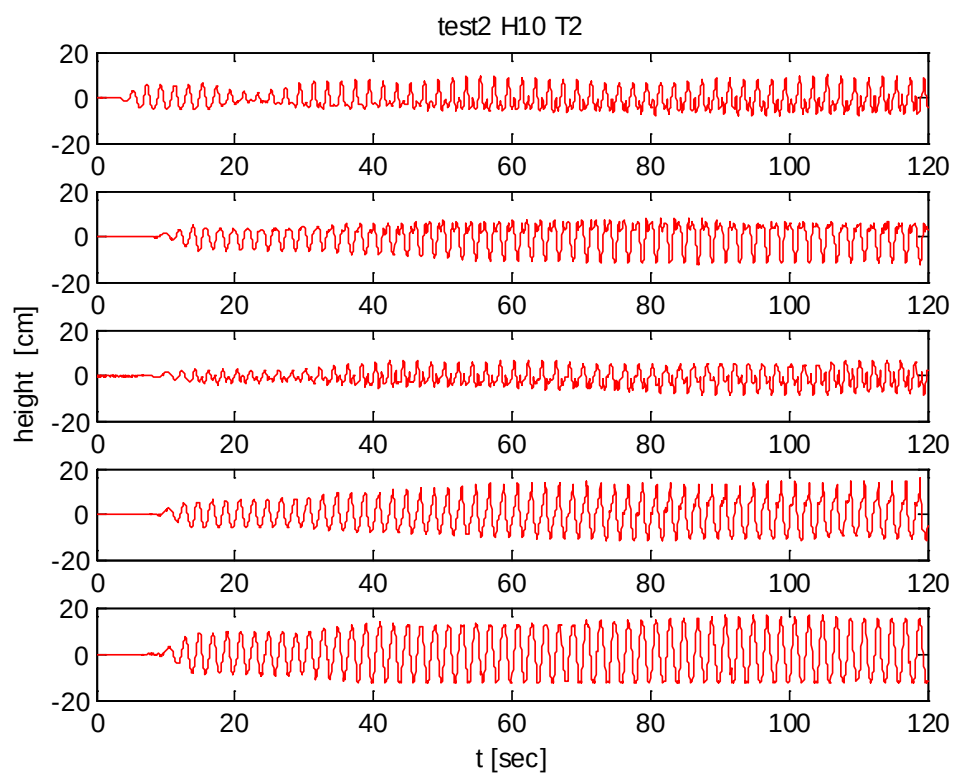
H3 [cm]=	12.5735	18.2249	8.4282	9.9608	16.5168
H10 [cm]=	14.6218	23.0918	11.7069	11.0855	18.9189
Hmax [cm]=	17.1099	25.8490	14.6700	12.7320	22.2504

圖 A.54 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=10cm ,T=1.6s)



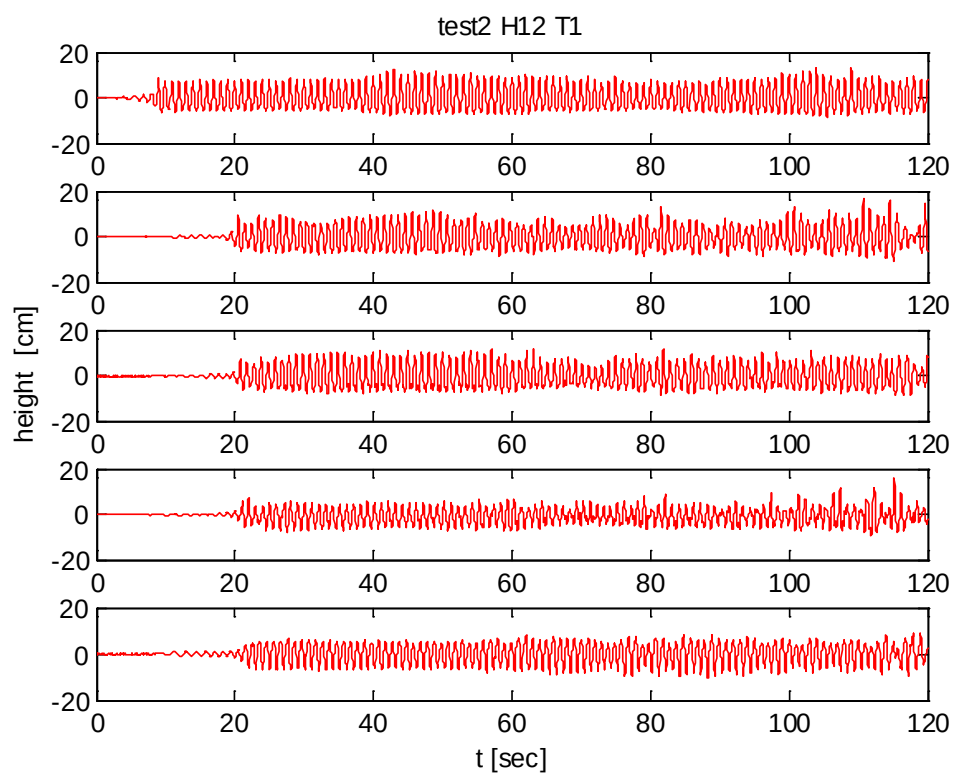
H3 [cm]=	8.9114	9.5459	4.0560	7.2991	11.9815
H10[cm] =	10.7855	11.6171	5.2919	8.9266	14.4498
Hmax [cm]=	13.7545	14.7385	7.9880	12.5838	18.9591

圖 A.55 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=10cm ,T=1.8s)



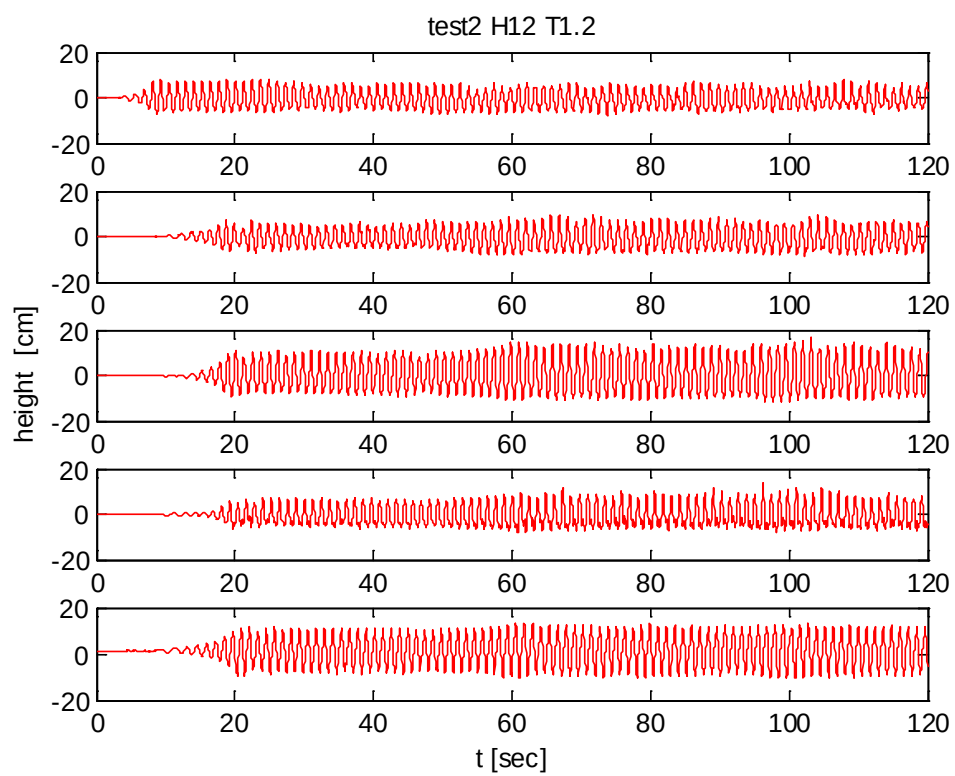
H3 [cm]=	12.1148	15.3225	10.3681	18.3722	24.8960
H10 [cm]=	15.2284	21.1467	13.6950	23.0403	27.8376
Hmax [cm]=	19.7413	24.2540	18.1140	31.6971	33.8779

圖 A.56 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=10cm ,T=2s)



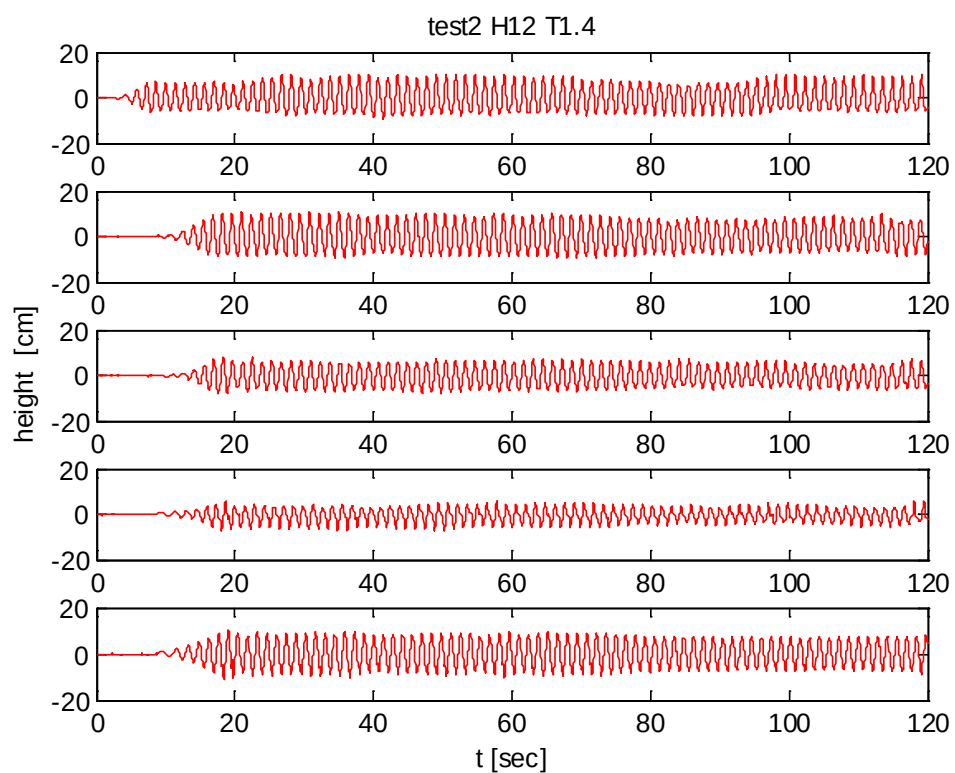
H3 [cm]=	14.3240	14.1203	13.8982	10.2528	12.0398
H10[cm] =	17.7128	17.7600	17.2146	13.4274	14.7750
Hmax [cm]=	26.4163	33.0681	23.3241	31.2861	20.9021

圖 A.57 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=12cm ,T=1s)



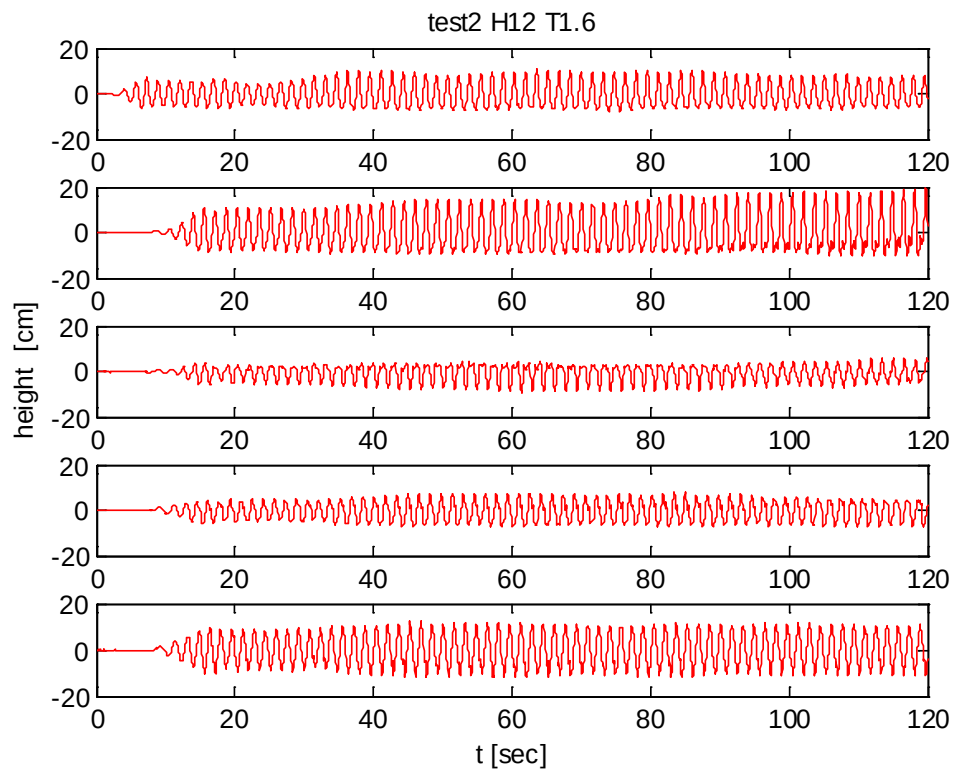
H3 [cm]=	11.4179	12.6558	20.2428	12.8771	18.3402
H10[cm] =	13.2454	14.9354	24.2933	16.2089	22.1879
Hmax [cm]=	16.3636	19.1966	32.7278	26.9588	26.4518

圖 A.58 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=12cm ,T=1.2s)



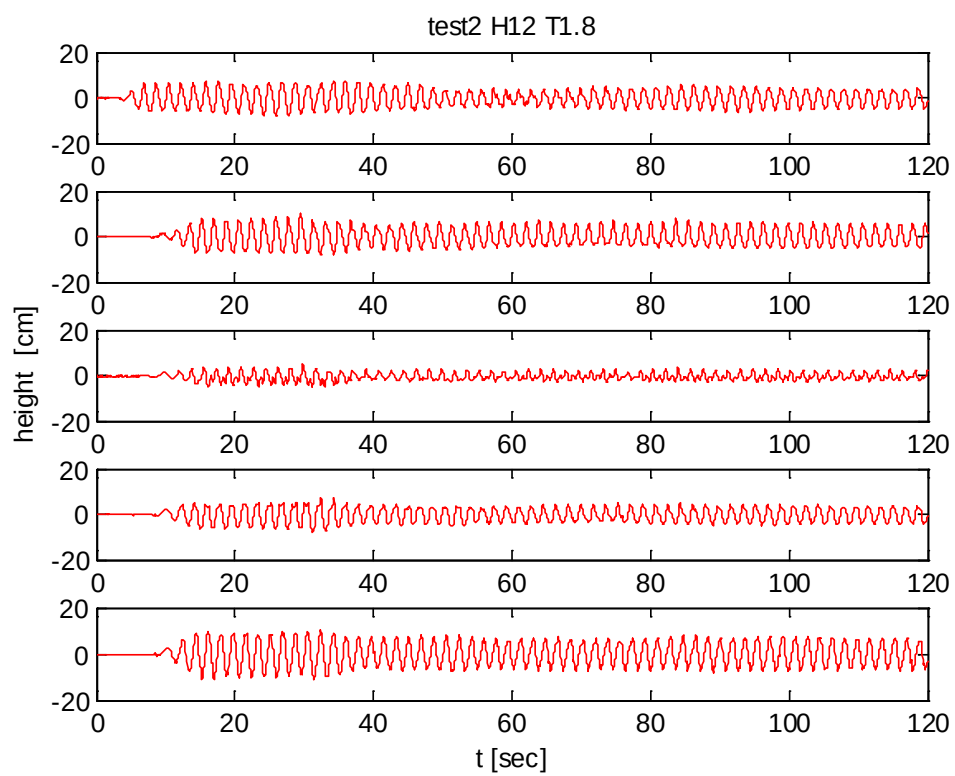
H3[cm] =	14.8683	16.1368	11.7645	8.5077	14.9851
H10 [cm]=	17.8324	18.5230	13.3786	11.0298	17.3700
Hmax [cm]=	21.0763	21.3909	16.1934	14.3363	22.6722

圖 A.59 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=12cm ,T=1.4s)



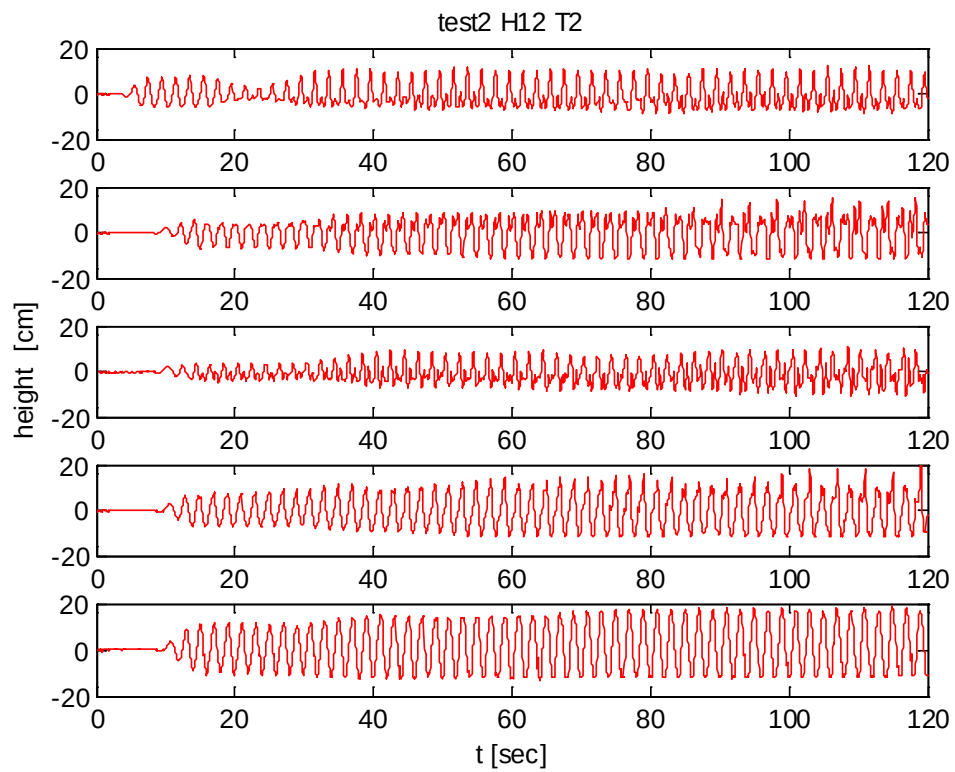
H3[cm] =	14.2519	22.4122	10.2783	12.0117	18.8912
H10 [cm]=	17.2494	29.9007	14.4064	13.6871	21.6194
Hmax[cm] =	21.4688	38.9407	18.3214	16.0292	24.5952

圖 A.60 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=12cm ,T=1.6s)



H3 [cm]=	10.7184	11.4278	5.1597	8.7879	14.1518
H10 [cm]=	12.9469	13.8225	6.7577	10.7622	16.9265
Hmax[cm] =	16.5435	19.9401	9.9167	15.3433	22.5028

圖 A.61 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=12cm ,T=1.8s)



H3 [cm]=	14.5308	17.9412	13.3789	20.3427	27.1488
H10[cm] =	18.4544	22.6353	17.1407	24.5217	32.4388
Hmax[cm] =	24.9253	31.1564	22.3944	47.6263	38.2686

圖 A.62 水工模擬試驗模型 II 波高結果(H=12cm ,T=2s)

附錄 B

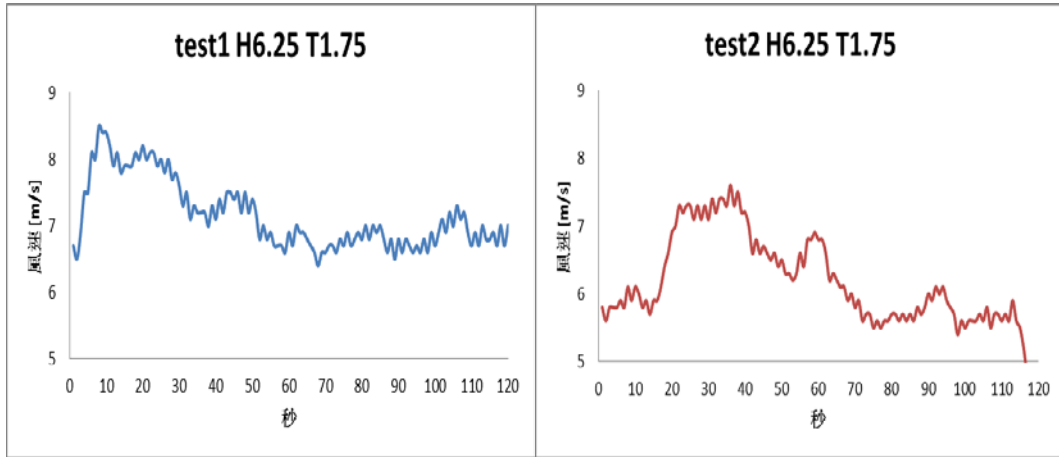


圖 B.1 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=6.25cm，T=1.75s)

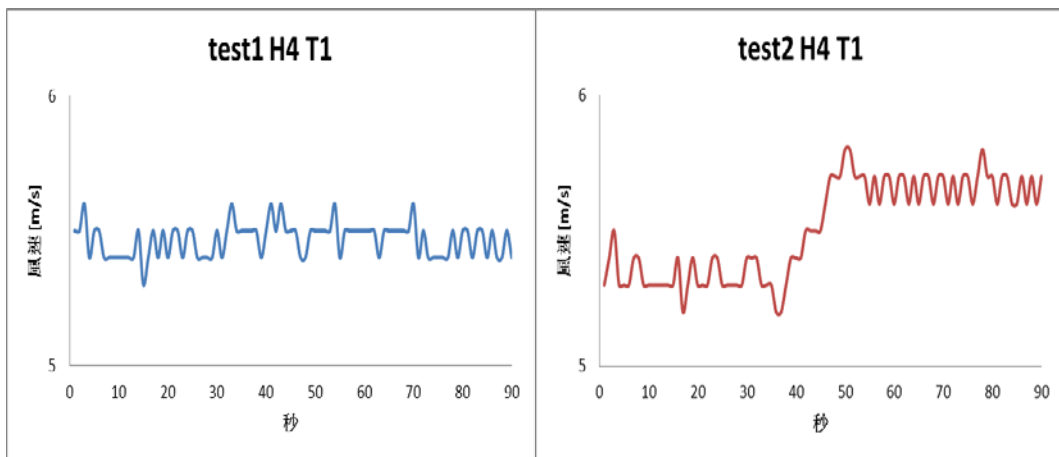


圖 B.2 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=4cm，T=1s)

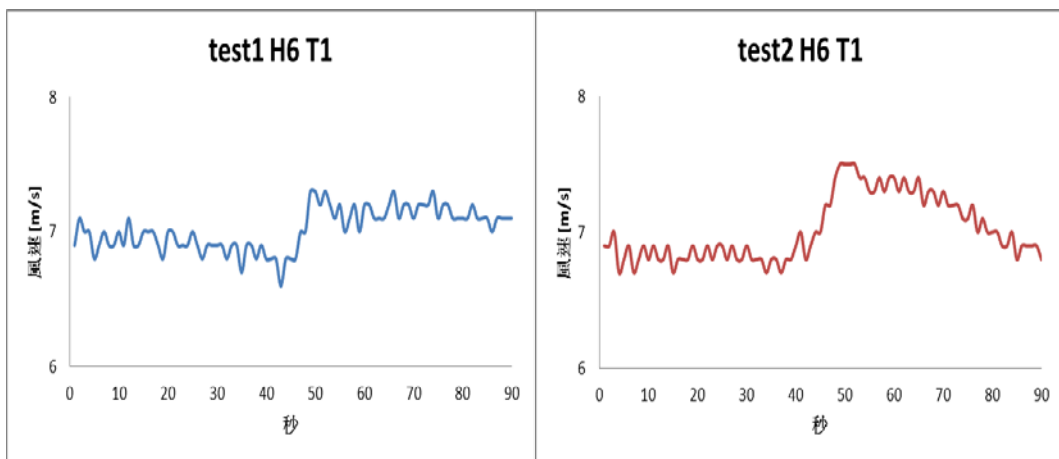


圖 B.3 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=6\text{cm}$ ， $T=1\text{s}$)

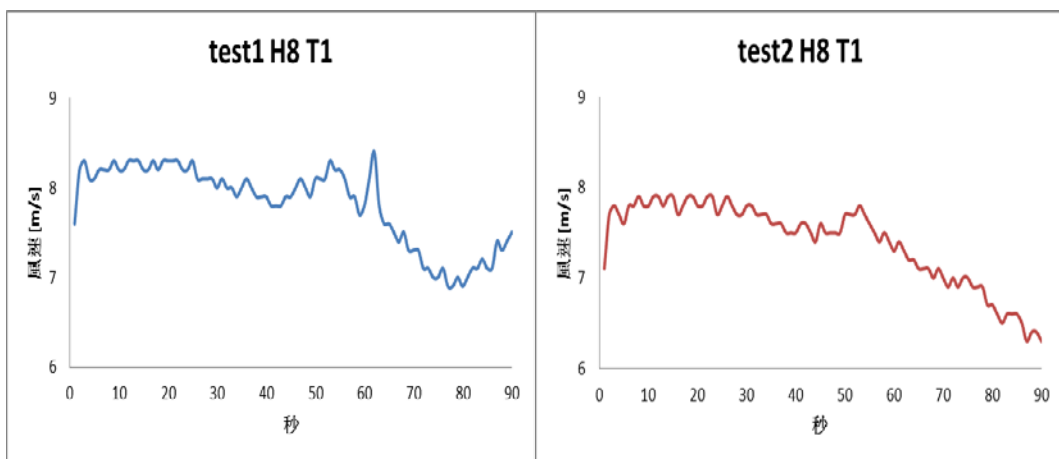


圖 B.4 模型 I 與模型 II 氣流速度結果($H=8\text{cm}$ ， $T=1\text{s}$)

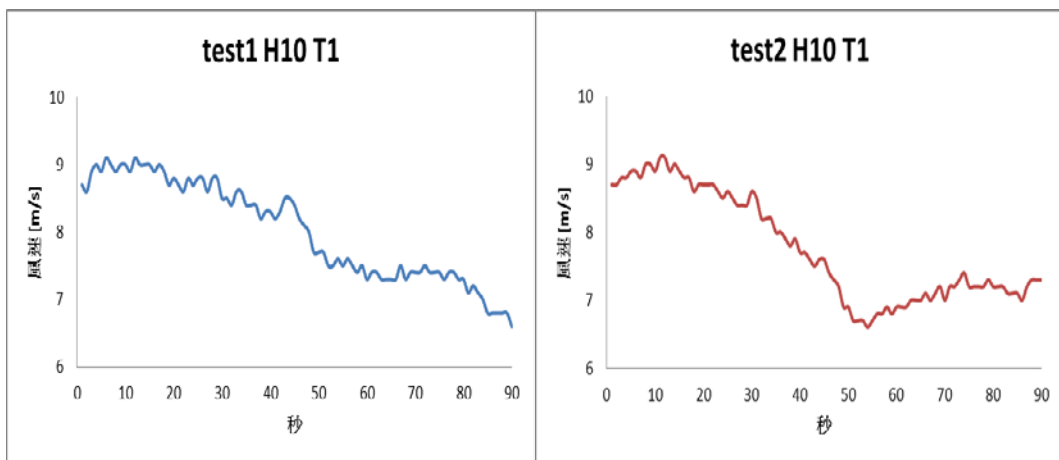


圖 B.5 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm , T=1s)

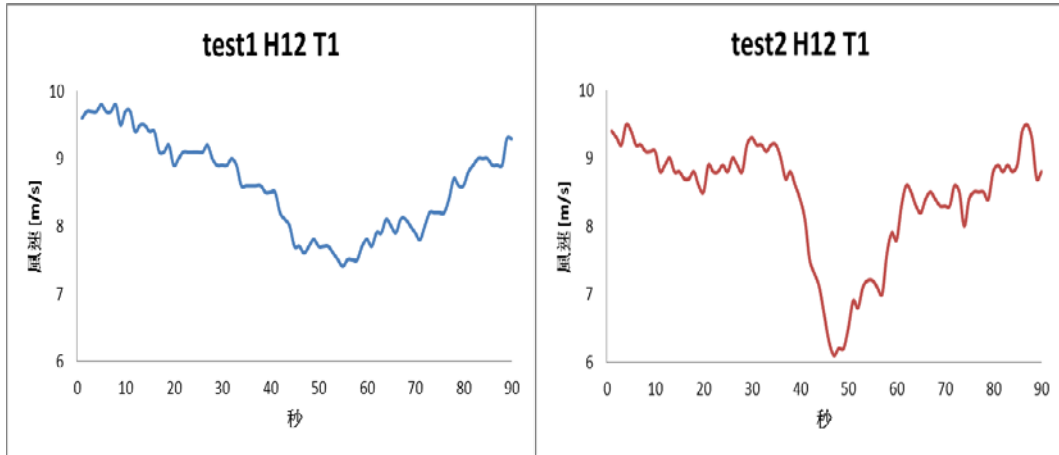


圖 B.6 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=12cm , T=1s)

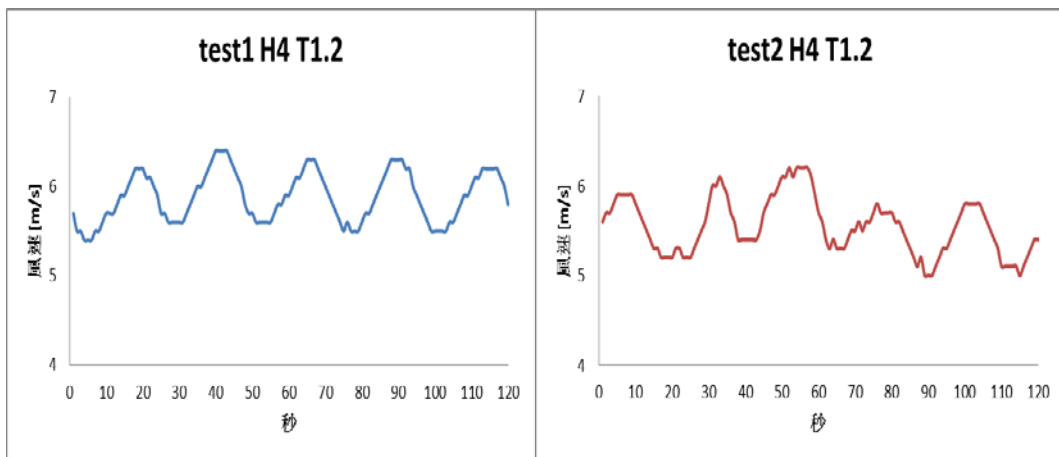


圖 B.7 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=4cm , T=1.2s)

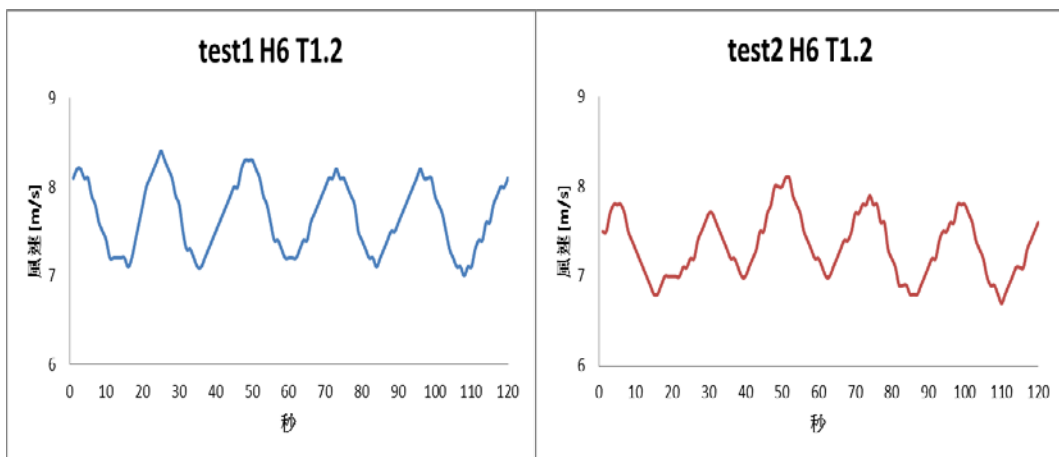


圖 B.8 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=6cm，T=1.2s)

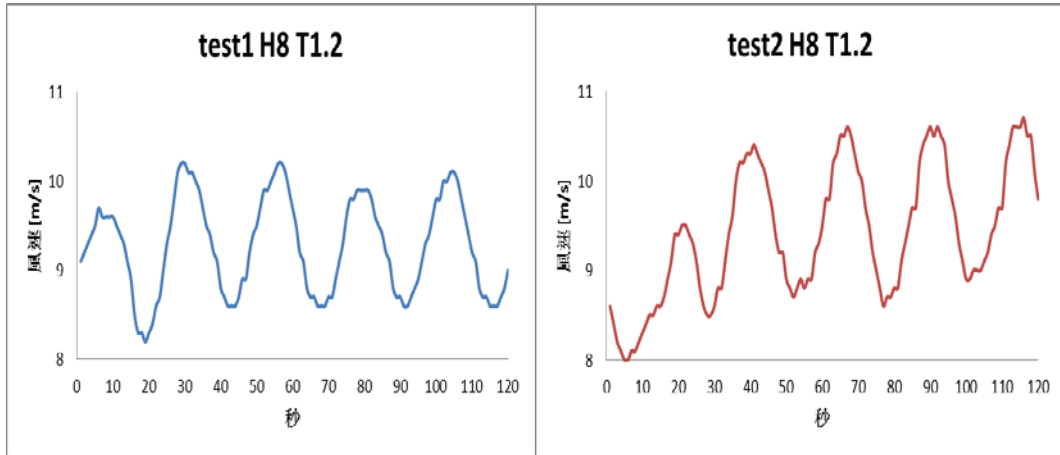


圖 B.9 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=8cm，T=1.2s)

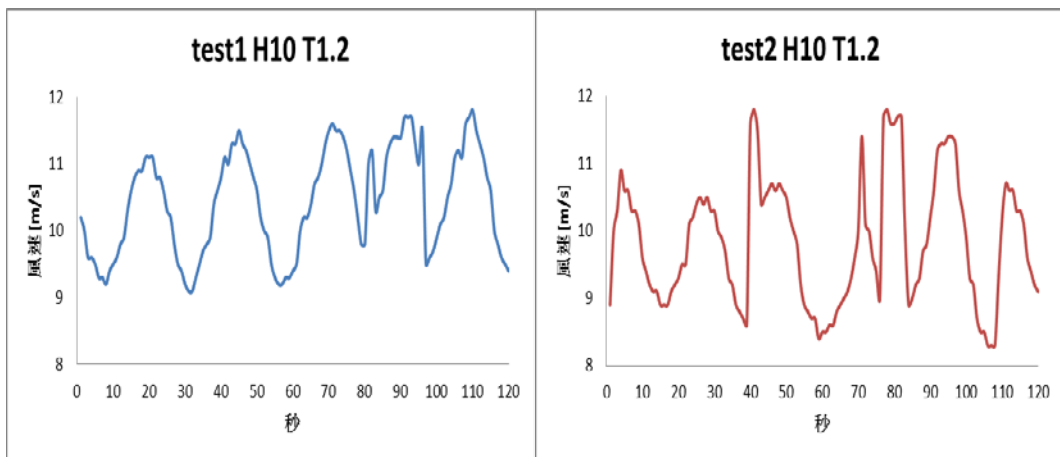


圖 B.10 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm，T=1.2s)

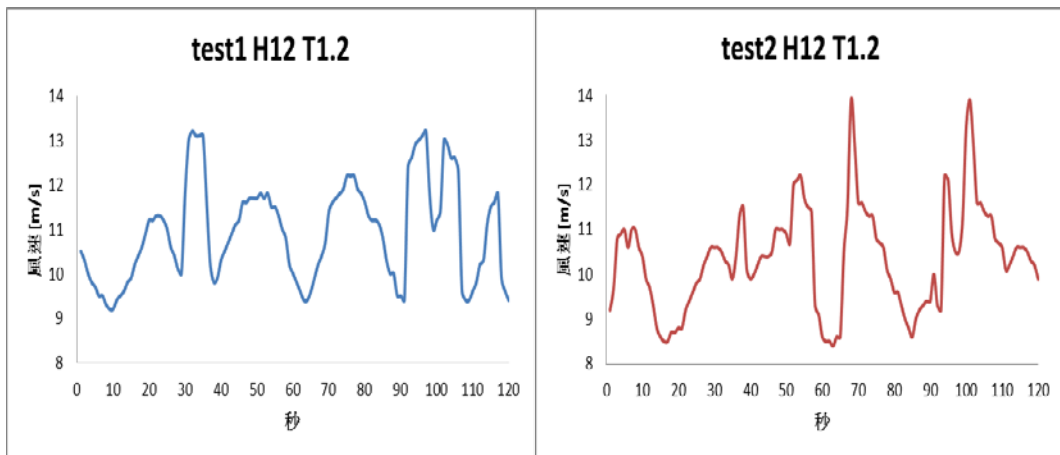


圖 B.11 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=12cm，T=1.2s)

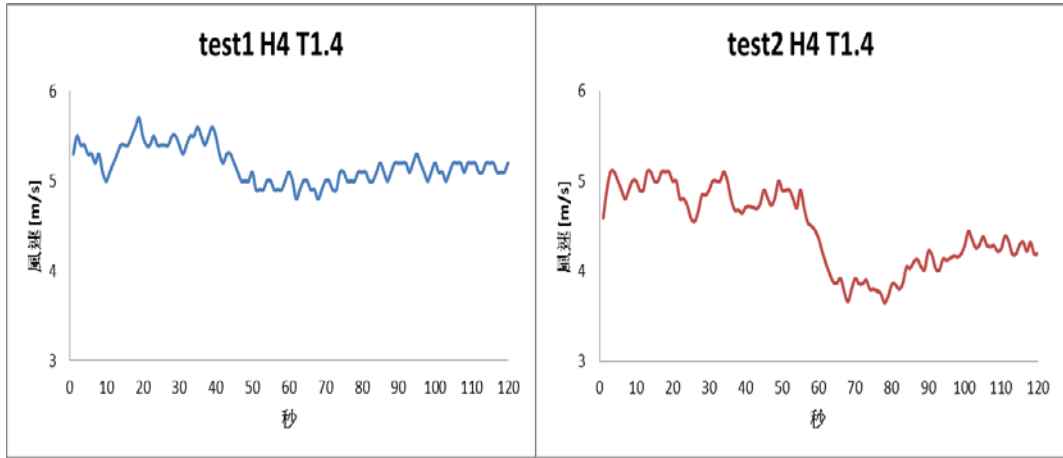


圖 B.12 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=4cm，T=1.4s)

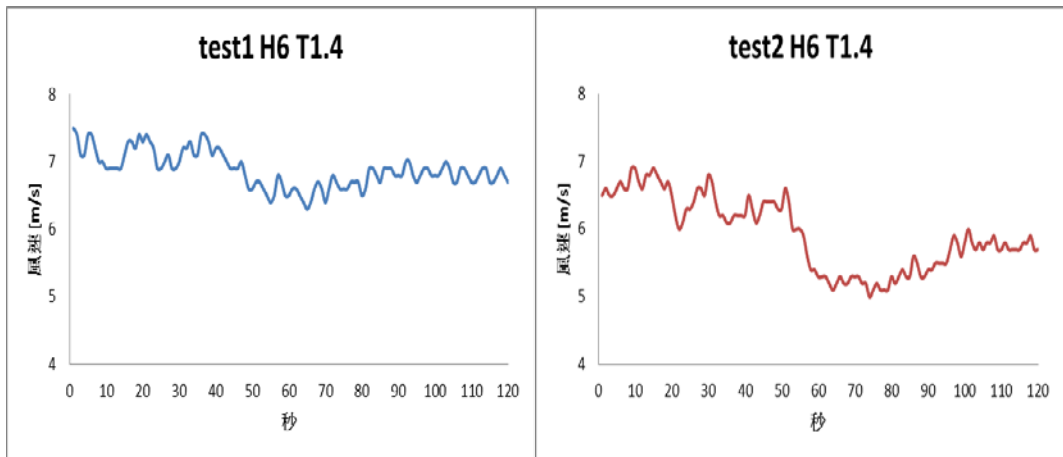


圖 B.13 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=6cm，T=1.4s)

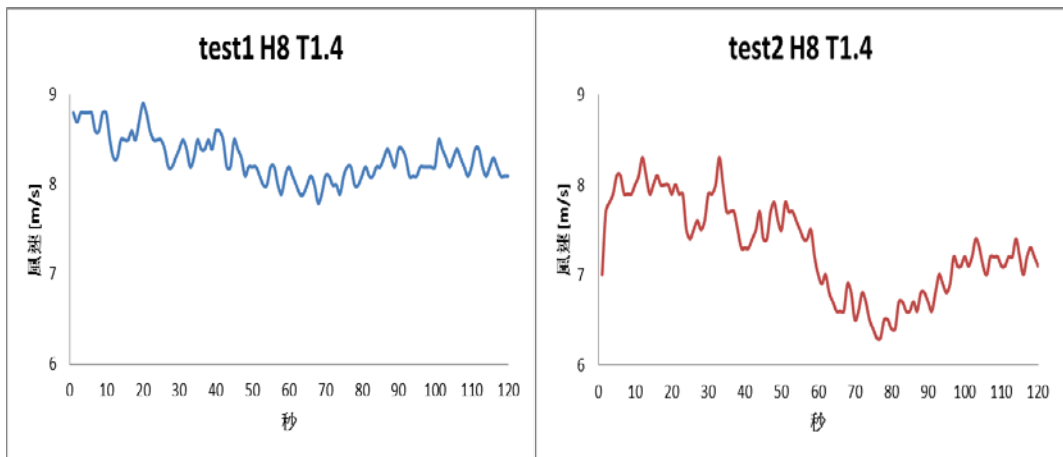


圖 B.14 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=8cm，T=1.4s)

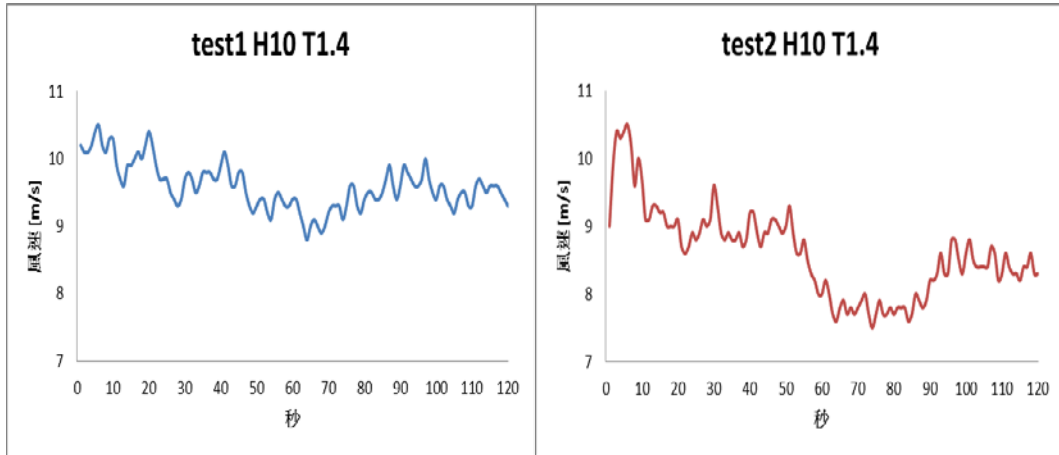


圖 B.15 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm，T=1.4s)

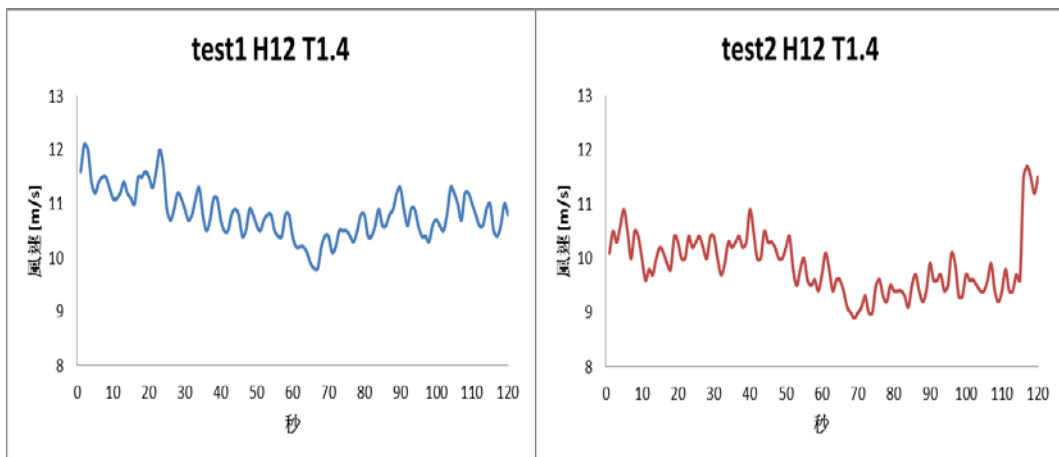


圖 B.16 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm，T=1.4s)

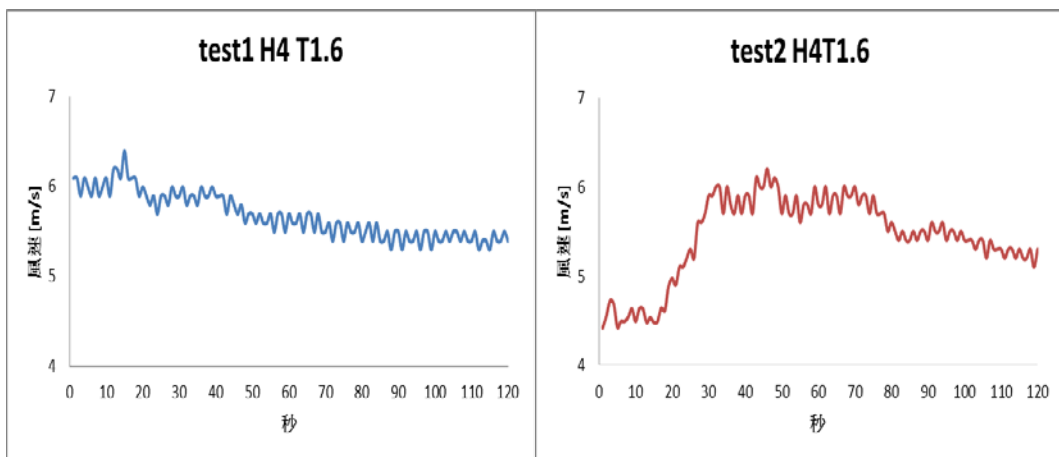


圖 B.17 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=4cm , T=1.6s)

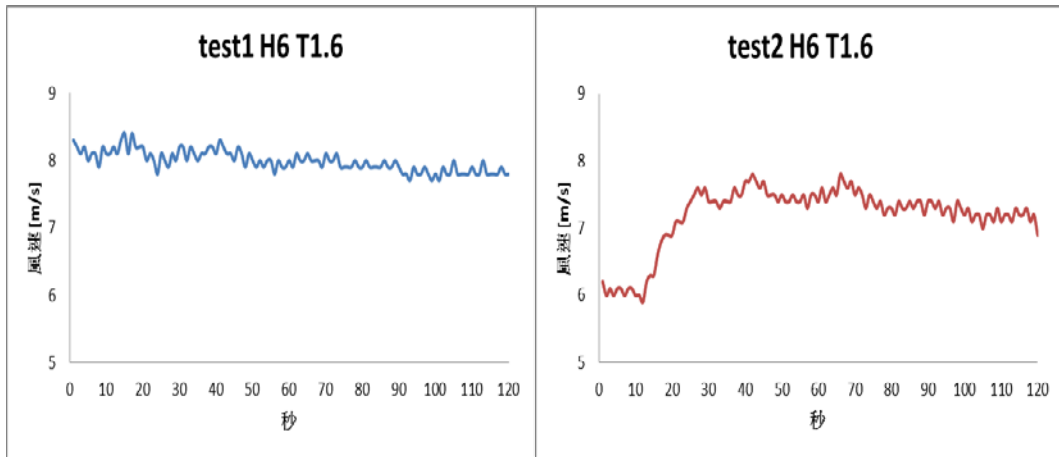


圖 B.18 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=6cm , T=1.6s)

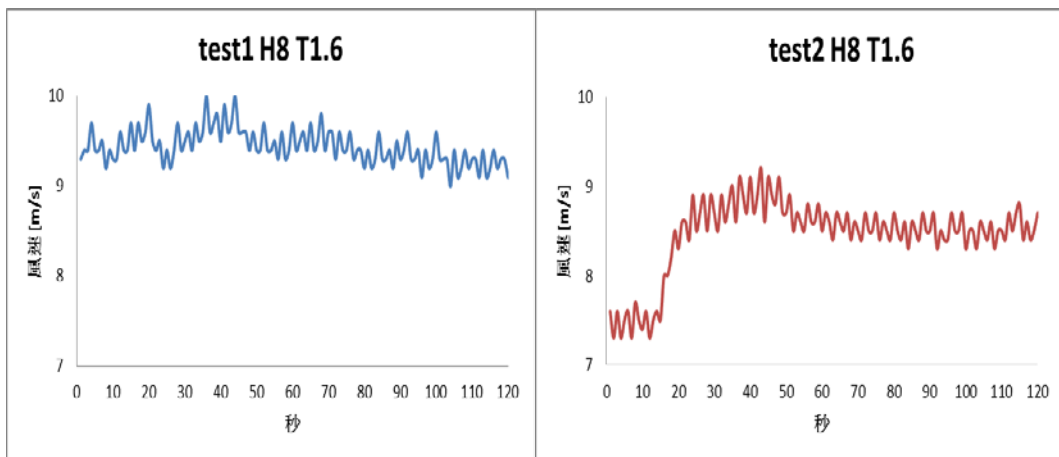


圖 B.19 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=8cm , T=1.6s)

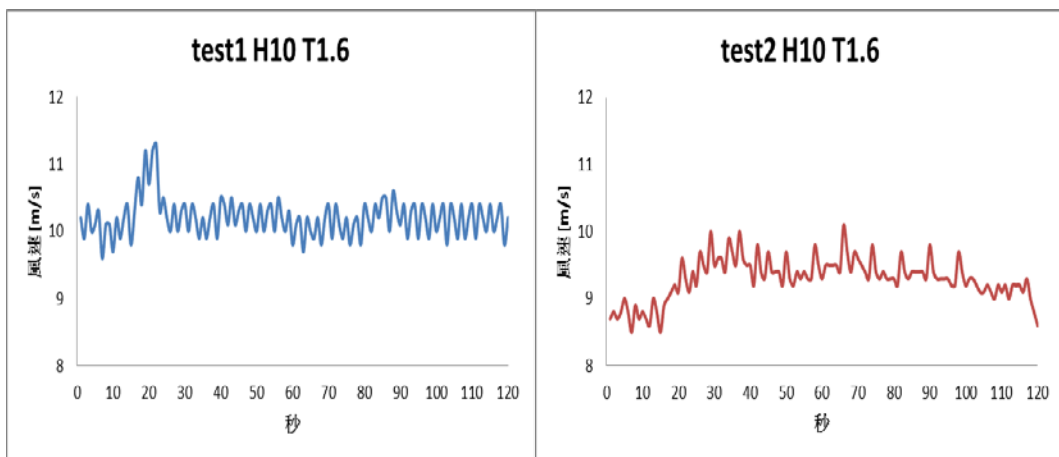


圖 B.20 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm，T=1.6s)

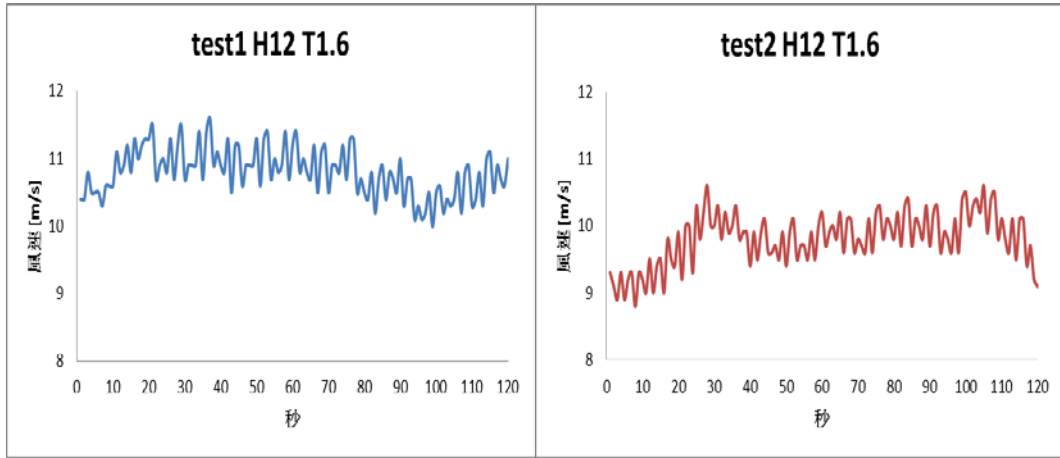


圖 B.21 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=12cm，T=1.6s)

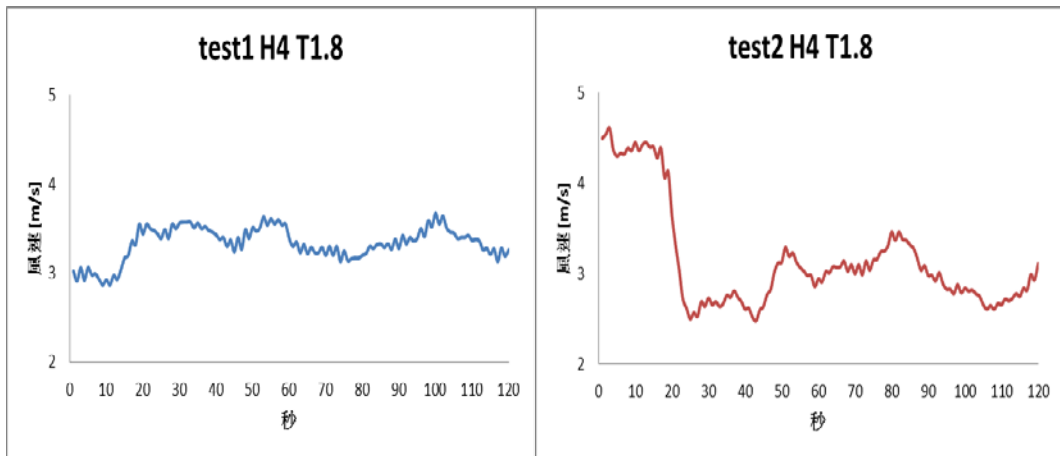
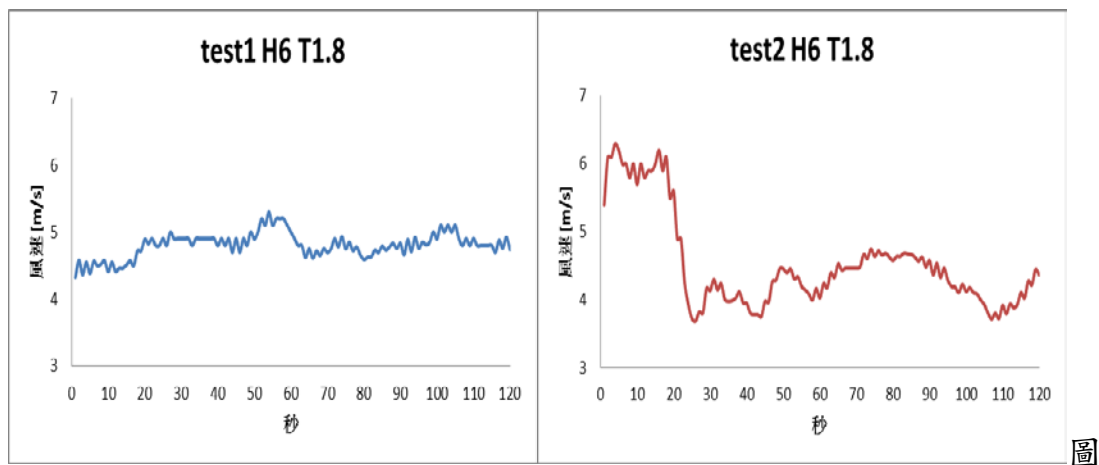


圖 B.22 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=4cm，T=1.8s)



B.23 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=6cm ， T=1.8s)

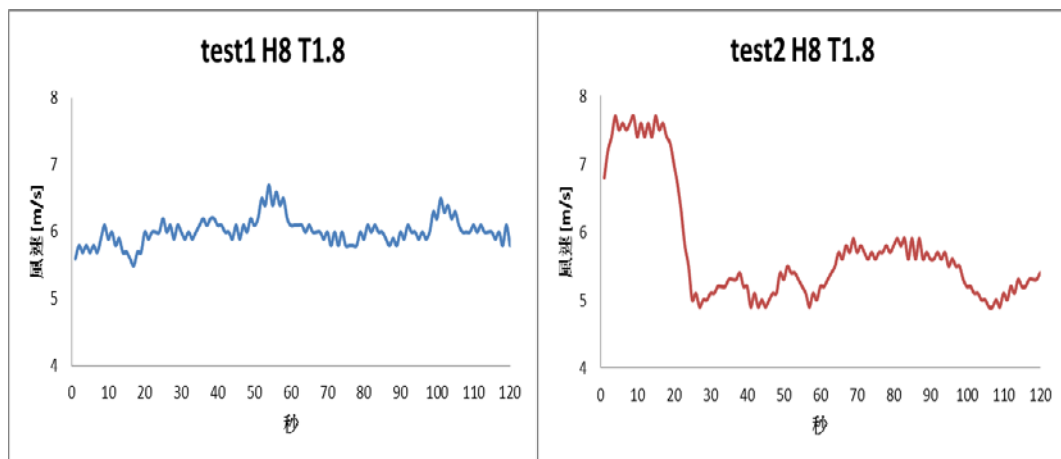


圖 B.24 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=8cm ， T=1.8s)

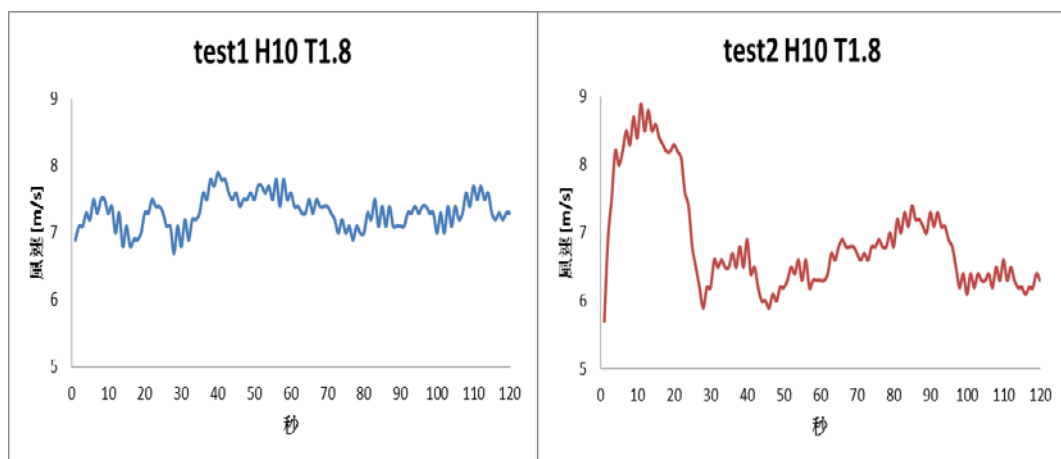


圖 B.25 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm ， T=1.8s)

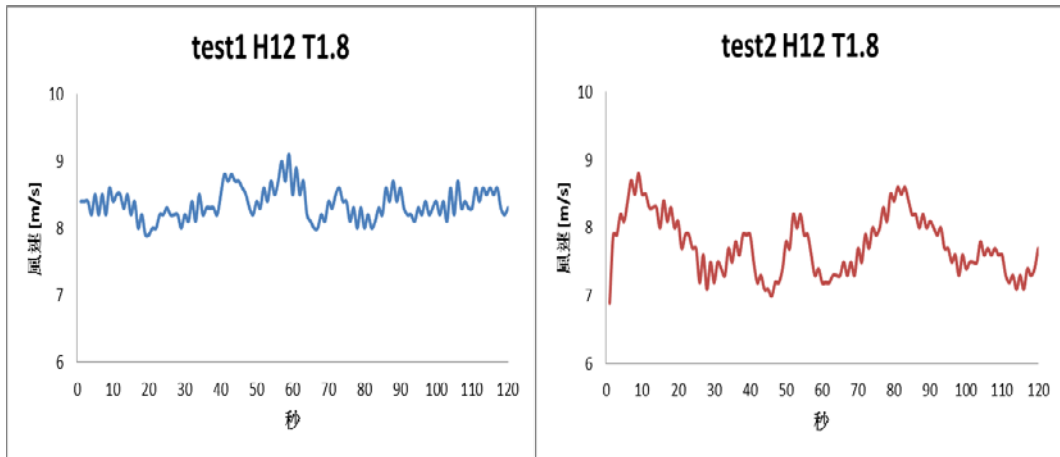


圖 B.26 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=12cm，T=1.8s)

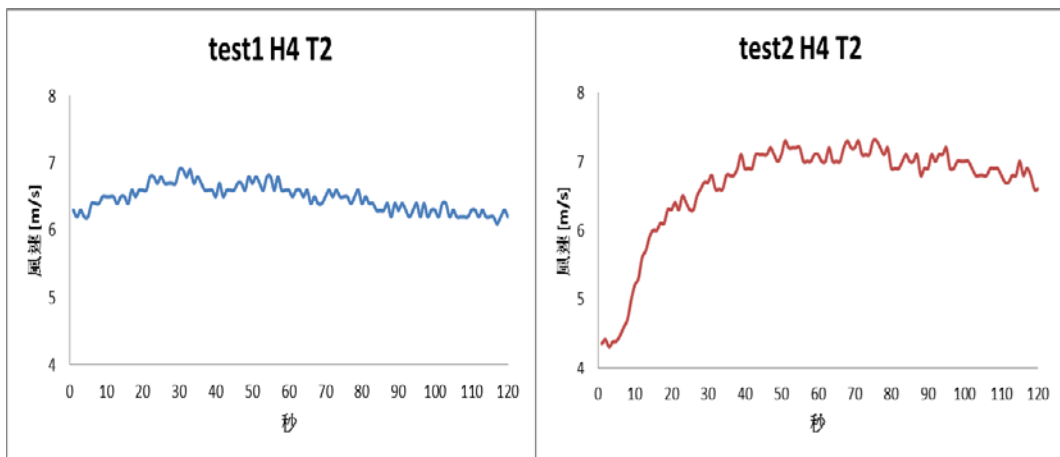


圖 B.27 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=4cm，T=2s)

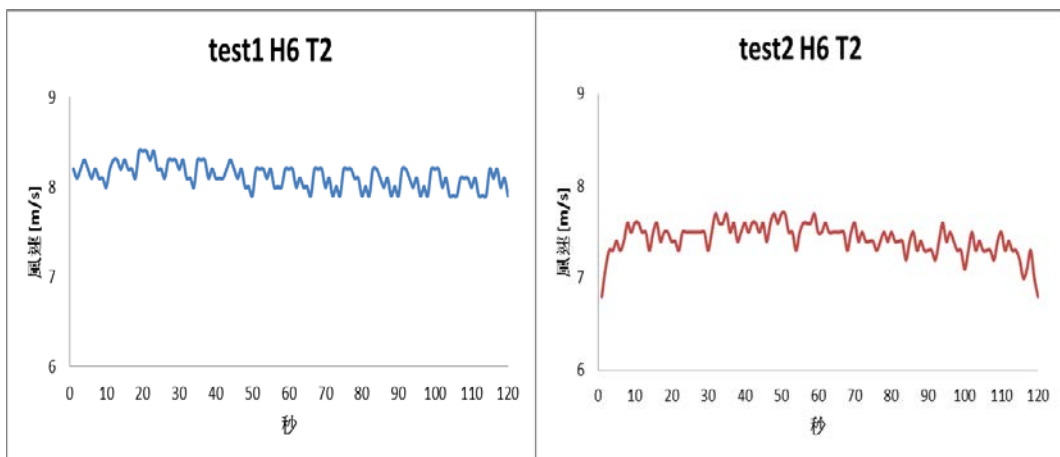


圖 B.28 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=6cm , T=2s)

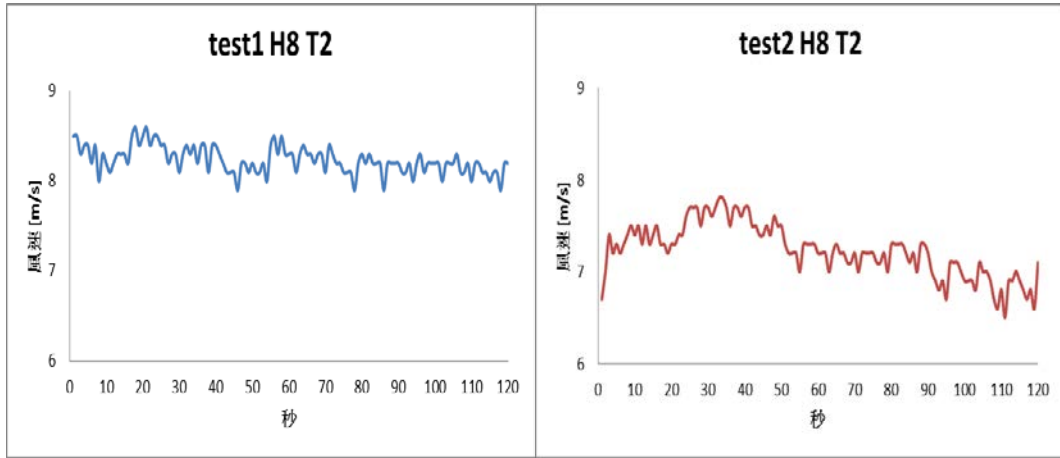


圖 B.29 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=8cm , T=2s)

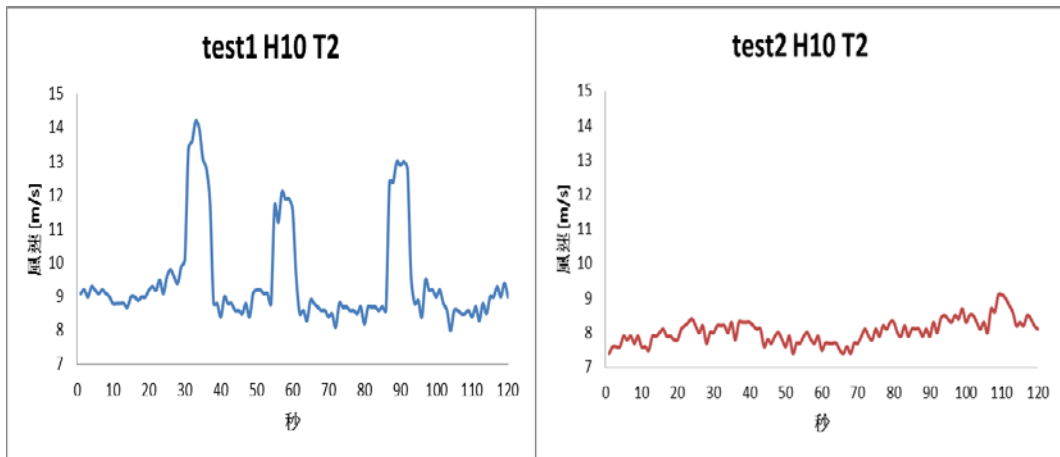


圖 B.30 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=10cm , T=2s)

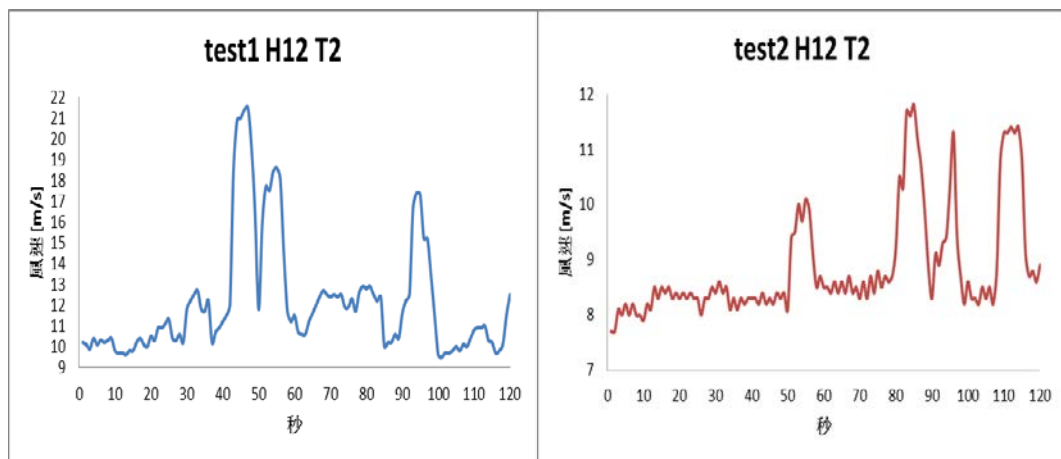


圖 B.31 模型 I 與模型 II 氣流速度結果(H=12cm，T=2s)

附錄 C

表 C-1 基隆港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計

(資料來源:本所港研中心)

基隆港年份					
2001-2010	H1/3 平均值 (m)	T1/3 (s)	H1/3 最大值 (m)	H1/3 最大值 對應 週期(s)	H1/3 最大值 對應 波向
2001/夏	0.53	5.6	2.57	5.5	ENE
2001/秋	1.86	6	10.12	5.4	W
2001/年	1.24	5.8	10.12	5.4	W
2002/冬	1.63	6.3	5.98	7.5	NE
2002/春	1.05	5.7	4.73	6.5	ENE
2002/夏	0.76	6.3	6.78	6.6	ENE
2002/秋	1.28	6.6	11.35	5.5	N
2002/年	1.19	6.2	11.35	5.5	N
2003/冬	1.28	6.8	3.38	7.1	NE
2003/春	0.86	6.5	4.38	5.6	ENE
2003/夏	0.58	6.1	2.51	5.8	S
2003/秋	1.81	6	4.75	7.3	NNE
2003/年	1.13	6.2	4.75	7.3	NNW
2004/冬	1.64	5.8	5.69	6.6	NNE
2004/春	1.02	6.2	5.74	5.6	NNE
2004/夏	0.75	7.3	6.82	10.8	NNE
2004/秋	2.01	7.8	11.6	12.2	NNW
2004/年	1.3	6.4	11.6	12.2	NNW
2005/冬	1.91	8	5.6	9.9	NNE

2005/春	1.09	7.4	5.01	10.2	NE
2005/夏	0.66	6.8	7.41	7.3	NNE
2005/秋	1.48	7.7	4.87	6.2	ENE
2005/年	1.28	7.5	7.41	7.3	NNE
2006/冬	2.14	7.6	8.14	10.1	WSW
2006/春	1.11	7	5.25	9.8	NNE
2006/夏	0.53	7.5	1.69	5.5	NNE
2006/秋	1.28	8.2	4.67	8.9	NNE
2006/年	1.5	7.7	8.14	10.1	WSW
2007/冬	1.81	8	3.72	9.4	NNE
2007/春	0.8	7.1	4.09	9.8	NNE
2007/夏	0.49	7.2	2.51	7.3	ENE
2007/秋	1.63	8.1	7.06	11.1	NNE
2007/年	1.21	7.6	7.06	11.1	NNE
2008/冬	1.84	8.1	4.29	10.2	NNE
2008/春	0.95	7.4	3.11	9.4	NNE
2008/夏	0.41	6.9	3.19	9.9	NE
2008/秋	1.28	7.6	4.82	10.1	NNE
2008/年	1.13	7.5	4.82	10.1	NNE
2009/冬	1.55	7.8	5.76	10.9	NNE
2009/春	1.04	7.5	4.05	10.2	NNE
2009/夏	0.47	6.9	4.51	12.9	NE
2009/秋	1.47	8.2	5.17	11.4	NNE
2009/年	1.13	7.6	5.76	10.9	NNE
2010/冬	1.46	7.8	4.83	10.3	NNE
2010/春	1.08	7.8	4.09	9.9	NNE
2010/夏	0.46	6.8	2.29	9.6	NNE
2010/秋	1.37	7.7	6.1	12	NNE
2010/年	1.09	7.5	6.1	12	NNE

歷年/冬	1.7	7.4	8.1	10.1	WSW
歷年/春	1.0	7.0	5.7	5.6	NNE
歷年/夏	0.6	6.7	7.4	7.3	NNE
歷年/秋	1.5	7.4	11.6	12.2	NNW
歷年	1.2	7.0	11.6	12.2	NNW

表 C-2 基隆港颱風資訊與其對應最大波高

(資料來源:本所港研中心)

年份	颱風名稱	颱風名稱	最大風速 (knot)	最大波高 (m)
2001	桃芝	TORAJI	75.00	1.30
2001	納莉	NARI	75.00	7.43
2001	海燕	HAIYAN	70.00	10.12
2002	雷馬遜	RAMMASUN	85.00	6.78
2002	辛樂克	SINLAKU	80.00	11.35
2003	蘇迪勒	SOUDELOR	80.00	2.19
2003	杜鵑	DUJUAN	80.00	2.50
2003	梅米	MAEMI	105.00	4.20
2003	米勒	MELOR	50.00	3.81
2004	敏督利	MINDULLE	95.00	1.43
2004	蘭寧	RANANIM	80.00	4.35
2004	梅姬	MEGI	65.00	1.91
2004	艾利	AERE	80.00	6.82
2004	陶卡基	TOKAGE	85.00	4.97
2004	納坦	NOCK TEN	85.00	4.31
2005	海棠	HAITANG	105.00	5.80
2005	馬莎	MATSA	80.00	7.41
2005	泰利	TALIM	95.00	5.44
2005	卡努	KHANUN	85.00	3.79
2005	龍王	LONGWANG	95.00	3.05
2006	珊珊	SHANSHAN	110.00	4.67
2007	萬宜	MAN_YI	95.00	1.89
2007	帕布	PABUK	65.00	2.01
2007	聖帕	SEPAT	110.00	2.51
2007	韋帕	WIPHA	100.00	4.22
2007	柯羅莎	KROSA	105.00	7.06
2008	鳳凰	FUNG_WONG	75.00	3.19
2008	辛樂克	SINLAKU	100.00	4.19
2008	薔蜜	JANGMI	115.00	4.78
2009	莫拉克	MORAKOT	75.00	4.51
2010	凡那比	FANAPI	95.00	3.29
2010	梅姬	MEGI	125.00	4.94

表 C-3 臺中港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計

(資料來源:本所港研中心)

臺中港年份	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3 最大值 (m)	H1/3 最大值 對應 週期(s)	H1/3 最大值 對應 波向
2001-2010					
2003/夏	0.61	5.5	1.83	5.2	NNE
2003/秋	1.83	5.5	5.92	5.6	NNE
2003/年	1.53	5.5	5.92	5.6	NNE
2004/冬	1.84	5.3	4.68	5.2	N
2004/春	1.34	5.3	7.5	6.2	WSW
2004/夏	0.96	6	3.44	8.6	N
2004/秋	1.95	7	4.74	9.3	N
2004/年	1.51	5.9	7.5	6.2	WSW
2005/冬	2.21	7.1	6.24	6.2	NW
2005/春	1.22	6.3	6.91	6.2	N
2005/夏	1.13	9.8	6.96	8.9	N
2005/秋	1.78	7.1	6.26	9.3	N
2005/年	1.59	7.5	6.96	8.9	N
2006/冬	2.2	7.2	4.88	10.1	N
2006/春	1.32	6	4.93	12.1	N
2006/夏	0.79	5.8	4.72	7.9	NW
2006/秋	1.66	6.7	4.86	10.2	N
2006/年	1.43	6.4	4.93	12.1	N
2007/冬	2.11	7	5.21	6.9	N
2007/春	1.29	5.9	5.86	9.3	N
2007/夏	0.68	5.6	5.43	9.1	N
2007/秋	1.81	6.7	6.74	9.8	
2007/年	1.43	6.2	6.74	9.8	N
2008/冬	3.27	7.5	5.28	7.6	N

2008/春	2.11	6.5	14.49	3.5	ENE
2008/夏	0.76	5.6	6.24	7.7	NNE
2008/秋	1.52	6.9	7.29	10.8	N
2008/年	1.53	6.3	14.49	3.5	ENE
2009/夏	0.82	6.1	7.78	8.7	
2009/秋	1.98	7.1	5.36	11.2	N
2009/年	1.46	6.7	7.78	8.7	
2010/冬	1.95	6.6	4.07	9.4	N
2010/春	1.6	6.3	4.58	9.8	N
2010/夏	1.03	5.4	2.99	7.7	NNE
2010/秋	2.08	7.2	6.25	9.2	N
2010/年	1.66	6.3	6.25	9.2	N
歷年/冬	2.3	6.8	6.2	6.2	NW
歷年/春	1.5	6.1	14.5	3.5	ENE
歷年/夏	0.8	6.2	7.8	8.7	N
歷年/秋	1.8	6.8	7.3	10.8	NNW
歷年	1.5	6.4	14.5	3.5	ENE

表 C-4 臺中港颱風資訊與其對應最大波高

(資料來源:本所港研中心)

年份	颱風名稱	颱風名稱	最大風速 (knot)	最大波高 (m)
2003	柯羅旺	KROVANH	65	1.24
2003	杜鵑	DUJUAN	80	3.30
2003	梅米	MAEMI	105	2.20
2003	米勒	MELOR	50	4.20
2004	康森	CONSON	80	3.34
2004	蘭寧	RANANIM	80	2.55
2004	艾利	AERE	80	3.44
2004	陶卡基	TOKAGE	85	3.99
2004	納坦	NOCK_TEN	85	4.56
2004	敏督利	MINDULLE	95	3.05
2005	海棠	HAITANG	105	6.96
2005	泰利	TALIM	95	6.26
2005	卡努	KHANUN	85	3.15
2005	丹瑞	DAMREY	80	3.27
2005	龍王	LONGWANG	95	5.58
2006	珍珠	CHANCHU	95	3.86
2006	碧利斯	BILIS	60	4.72
2006	凱米	KAEMI	80	3.63
2006	桑美	SAOMAI	105	3.02
2006	寶發	BOPHA	55	2.67
2006	珊珊	SHANSHAN	110	3.20
2006	西馬隆	CIMARON	100	3.69
2006	奇比	CHEBI	100	3.18
2007	帕布	PABUK	65	1.94
2007	聖帕	SEPAT	110	5.43
2007	韋帕	WIPHA	100	4.62
2007	柯羅莎	KROSA	105	6.74
2008	卡玫基	KALMAEGI	65	3.28
2008	鳳凰	FUNG_WONG	75	6.24
2008	辛樂克	SINLAKU	100	5.24
2008	哈格比	HAGUPIT	90	3.64
2009	蓮花	LINFA	60	2.76
2009	莫拉菲	MOLAVE	65	1.22
2009	莫拉克	MORAKOT	75	7.78
2009	芭瑪	PARMA	100	4.35
2010	凡那比	FANAPI	95	5.09
2010	梅姬	MEGI	125	4.83

表 C-5 花蓮港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計

(資料來源：本所港研中心)

花蓮港年份	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3 最大值 (m)	H1/3 最大值 對應 週期(s)	H1/3 最大值 對應 波向
2001-2010					
2001/冬	1.53	6.6	3.24	7	NE
2001/春	0.98	6.1	3.3	7.1	ESE
2001/夏	0.9	6.3	5.79	7.5	SSE
2001/秋	1.38	6.3	4.48	7.3	ENE
2001/年	1.28	6.4	5.79	7.5	SSE
2002/冬	1.47	6.4	3.3	6.6	
2002/春	1.18	6.4	3.27	7.1	
2002/夏	1.24	6.5	8.18	6.4	ENE
2002/秋	1.22	6.7	4.53	12.5	ESE
2002/年	1.25	6.5	8.18	6.4	ENE
2003/冬	1.66	6.3	3.58	6.3	E
2003/春	1.26	6.5	3.76	6.3	SE
2003/夏	0.83	6.2	3.71	7.5	SSE
2003/秋	1.81	6.5	3.49	7.5	ESE

2003/年	1.31	6.4	3.76	6.3	SE
2004/冬	1.59	6.2	3.21	7.2	E
2004/春	1.15	8.6	2.77	10.2	E
2004/夏	1.29	8.3	5.5	8.9	SE
2004/秋	1.47	9	5.72	14	ESE
2004/年	1.38	8	5.72	14	ESE
2005/冬	1.52	8.5	4.38	9.6	SE
2005/春	1.08	8	3.52	9.1	ESE
2005/夏	1.08	8	7.5	12.8	ESE
2005/秋	1.52	8.5	10.85	12.4	ESE
2005/年	1.3	8.2	10.85	12.4	ESE
2006/冬	1.64	8.7	3.37	9.7	ENE
2006/春	1.11	7.7	3.62	11.5	E
2006/夏	1.02	8.1	5.25	8.4	SE
2006/秋	1.28	8.8	4.24	12.6	ESE
2006/年	1.29	8.4	5.25	8.4	SE
2007/冬	1.53	8.4	3.36	8.4	E
2007/春	1.08	8	2.85	5.6	E
2007/夏	0.94	7.9	9.26	11.9	NNE

2007/秋	1.62	8.8	6.49	13.3	ESE
2007/年	1.31	8.3	9.26	11.9	NNE
2008/冬	1.56	8.7	3.14	10.2	E
2008/春	1.05	8.3	2.73	8.5	ESE
2008/夏	0.86	7.7	7.32	12.1	ESE
2008/秋	1.33	8.5	6	11.5	SE
2008/年	1.2	8.3	7.32	12.1	ESE
2009/冬	1.45	9	3.24	5.7	ENE
2009/春	1.13	8.3	2.8	9.81	ESE
2009/夏	0.98	8	6.53	13.6	ESE
2009/秋	1.54	9.3	3.51	11	SE
2009/年	1.27	8.6	6.53	13.6	ESE
2010/冬	1.35	8.5	2.9	8.6	E
2010/春	1.16	8.4	3.77	11.1	ESE
2010/夏	0.77	7.5	2.24	6.8	SSE
2010/秋	1.37	8.5	9.25	12.1	ESE
2010/年	1.18	8.2	9.25	12.1	ESE
歷年/冬	1.5	7.7	4.4	9.6	SE
歷年/春	1.1	7.6	3.8	6.3	SE

歷年/夏	1.0	7.5	9.3	11.9	NNE
歷年/秋	1.5	8.1	10.9	12.4	ESE
歷年	1.3	7.7	10.9	12.4	ESE

表 C-6 花蓮港颱風資訊與其對應最大波高

(資料來源：本所港研中心)

年份	颱風名稱(中文)	最大波高(m)	對應週期(s)
2001	西馬隆	3.3	7.1
2001	奇比	1.1	5.3
2001	尤特	5.8	7.5
2001	潭美	1.9	7.1
2001	玉兔	1.8	6.6
2001	桃芝	3.9	6.9
2001	納莉	2.1	8.6
2001	利奇馬	3.2	7.1
2001	海燕	4.5	7.3
2002	雷馬遜	8.2	6.4
2002	納克莉	3.8	6.3
2002	哈隆	4.8	5.8
2002	風神	5	5.8
2002	卡莫里	2.1	10.4
2002	玉峰	2.1	10.4
2002	露莎	3.3	8.4
2002	辛樂克	4.5	12.5
2003	柯吉拉	3.8	6.3
2003	南卡	1.3	5.1
2003	蘇迪勒	3.7	7.5
2003	尹布都	3.7	8.4
2003	莫拉克	2.9	5.9
2003	梵高	2.1	6.6
2003	科羅旺	2.7	7.2
2003	杜鵑	1.5	5.5
2003	米勒	1.5	7.2

2004	康森	1.6	7.9
2004	敏督利	3.7	11.2
2004	康伯斯	3.8	6.3
2004	蘭寧	3.5	11.6
2004	艾利	3.7	10.4
2004	海馬	2.8	8.4
2004	米雷	2.2	10.6
2004	納坦	3.8	14.3
2004	南瑪都	4.4	9.6
2005	海棠	7.5	12.8
2005	瑪莎	3.2	10.6
2005	珊瑚	3.9	9.2
2005	泰利	6	12.6
2005	卡努	2.3	10
2005	丹瑞	3.1	8.1
2005	龍王	1.9	11.2
2006	珍珠	2.9	6.4
2006	艾維尼	2.2	10.9
2006	碧利斯	5.3	8.4
2006	珊珊	4.2	12.6
2007	帕布	4.9	10.3
2007	梧提	4.9	10.3
2007	聖帕	9.3	11.9
2007	韋帕	3.7	12.6
2007	柯羅莎	6.5	13.3
2007	米塔	4.4	11.7
2008	卡玫基	2.8	8.6
2008	鳳凰	7.3	12.1
2008	如麗	3	11.6

2008	辛樂克	5.4	12.5
2008	哈格比	3.4	11
2008	薔蜜	6	11.5

表 C-7 高雄港 2001 年-2010 年的波浪資料的統計

(資料來源：本所港研中心)

高雄港年份	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3 最大值 (m)	H1/3 最大值 對應 週期(s)	H1/3 最大值 對應 波向
2001-2010					
2001/冬	0.57	5.7	1.3	4.3	N
2001/春	0.38	5.4	2.23	5	S
2001/夏	0.87	5.8	7.95	7.8	WSW
2001/秋	0.97	5.4	3.77	5.3	SE
2001/年	0.64	5.6	7.95	7.8	WSW
2002/夏	1.02	7.1	5.38	8.8	WSW
2002/秋	0.54	5.8	2.2	7.4	SW
2002/年	0.78	6.4	5.38	8.8	WSW
2003/冬	0.51	5.7	1.59	4.7	S
2003/春	0.46	5.8	1.69	8.3	SW
2003/夏	0.99	6	4.16	8.1	SW
2003/秋	0.58	6.8	4.96	5.8	S
2003/年	0.66	5.9	4.96	5.8	S
2004/春	0.67	6	3.42	4.8	SW
2004/夏	1.1	7.4	4.94	10	SW
2004/秋	0.81	6	3.59	8.3	WSW

2004/年	0.88	6.5	4.94	10	SW
2005/冬	0.84	5.8	4.06	11.8	SSW
2005/春	0.99	6	1.55	4.5	NW
2005/夏	1.36	7.2	6.46	8.4	W
2005/秋	0.79	6.5	4.94	7.2	W
2005/年	1	6.5	6.46	8.4	W
2006/冬	0.8	6.7	1.48	6	SSW
2006/春	0.6	5.2	1.53	5.1	S
2006/秋	0.63	6.1	1.91	5.3	NW
2006/年	0.69	6.1	1.91	5.3	NW
2007/冬	0.82	7	1.2	5.9	WNW
2007/春	0.53	5	1.42	5.1	NW
2007/夏	0.89	6.7	2.91	10.7	SW
2007/秋	0.86	6.6	4.18	8	W
2007/年	0.77	6.2	4.18	8	W
2008/冬	0.73	6.1	1.39	5.8	NW
2008/春	0.56	5.4	1.4	6	SW
2008/夏	1.17	7	6.12	13.7	SW
2008/秋	0.74	6.4	3.53	11.1	SW
2008/年	0.79	6.2	6.12	13.7	SW
2009/冬	0.64	6.1	1.28	6.2	NW
2009/春	0.59	5.9	1.56	5.3	NW
2009/夏	0.9	6.7	6.41	11.2	SW
2009/秋	0.89	7.3	4.17	13.1	SW
2009/年	0.75	6.5	6.41	11.2	SW
2010/冬	0.63	6.1	1.4	9.8	SSW
2010/春	0.6	5.4	3.02	5.3	SW
2010/夏	0.8	6.7	3.29	10.9	WSW
2010/秋	1.02	6.7	6.8	12.6	SW

2010/年	0.76	6.2	6.8	12.6	SW
歷年/冬	0.7	6.2	4.1	11.8	SSW
歷年/春	0.6	5.6	3.4	4.8	SW
歷年/夏	1.0	6.7	8.0	7.8	WSW
歷年/秋	0.8	6.4	6.8	12.6	SW
歷年	0.8	6.2	8.0	7.8	WSW

表 C-8 高雄港颱風資訊與其對應最大波高

(資料來源：本所港研中心)

年份	颱風名稱(英文)	颱風名稱(中文)	最大波高(m)
2001	CIMARON	西馬隆	0.87
2001	CHEBI	奇比	7.95
2001	LEKIMA	利奇馬	3.77
2002	RAMMASUN	雷馬遜	1.97
2002	NAKRI	娜克莉	3.74
2002	SINLAKU	辛樂克	0.91
2003	KUJIRA	柯吉拉	0.98
2003	NANGKA	南卡	2.57
2003	SOUDELOR	蘇迪勒	2.16
2003	IMBUDO	尹布都	4.16
2003	MORAKOT	莫拉克	3.21
2003	KROVANH	柯羅旺	3.57
2003	DUJUAN	杜鵑	4.96
2003	MELOR	米勒	1.42
2004	CONSON	康森	2.13
2004	MINDULLE	敏督利	4.94
2004	KOMPASU	康柏斯	1.58
2004	RANANIM	蘭寧	2.32
2004	AERE	艾利	3.09
2004	HAIMA	海馬	3.08
2004	MEARI	米雷	1.45
2004	NOCK_TEN	納坦	1.88
2004	NANMADOL	南瑪都	4.06
2005	HAITANG	海棠	6.46

2005	MATSA	馬莎	3.13
2005	SANVU	珊瑚	4.75
2005	TALIM	泰利	4.94
2005	KHANUN	卡努	1.09
2005	DAMREY	丹瑞	3.84
2005	LONGWANG	龍王	2.79
2006	SHANSHAN	珊珊	1.91
2007	WUTIP	梧提	2.51
2007	WIPHA	韋帕	1.98
2007	KROSA	柯羅莎	4.18
2007	MITAG	米塔	1.83
2008	KALMAEGI	卡玫基	3.05
2008	FUNG_WONG	鳳凰	5.27
2008	NURI	如麗	6.12
2008	SINLAKU	辛樂克	3.53
2008	HAGUPIT	哈格比	3.53
2008	JANGMI	薔蜜	3.51

附錄一 期中簡報資料



交通部運輸研究所 MOTC-IOT-103-H2DB005c
國立中山大學 合作辦理

可循環式(再生)綠色能源結合港灣 結構以建構綠色港灣之發展研究 (2/4)

計畫主持人：李賢華 教授

協同主持人：陳陽益 教授、陸曉筠 助理教授

計畫研究員：方鉢淳、張正憲、鄭聿翔、陳勝傑
周帛縈、林雋祐、吳宗燁、陳政翰
劉雨慈

國立中山大學海洋環境及工程學系 Department of Marine Environment and Engineering



1. 計畫背景分析

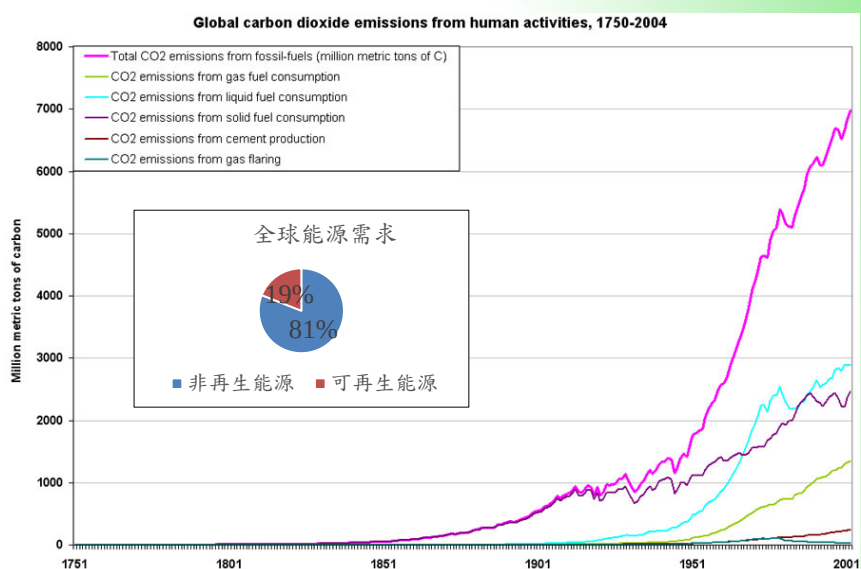


本計畫目的及其重要性

- 研究目的
 - － 有效建置以波浪能擷取為主之綠能系統
 - － 將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中
 - － 同時增進港灣構造物使用之安全及耐久性
- 計畫重要性
 - － 科技白皮書:於2020年我國成為綠能科技與智慧生活的全球創新領航者
 - － 全球能源需求增加、環境負荷、排碳單價提升
 - － 台灣各種能源使用，再生能源成長緩慢



人類活動所造成二氧化碳排放之年增長情形



2011年台電統計台灣各種能源使用情形（資料來源：台電）

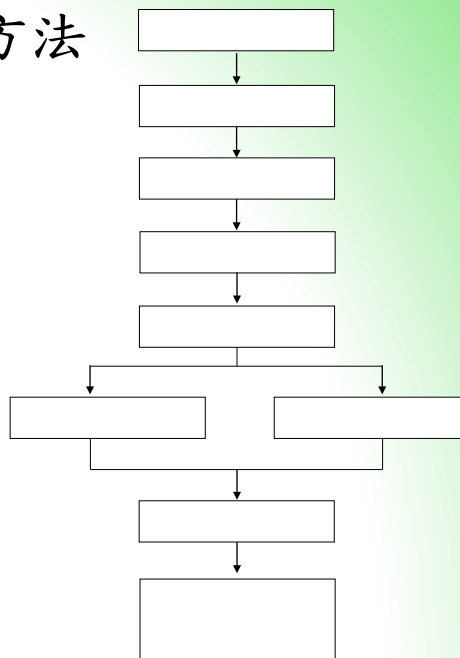
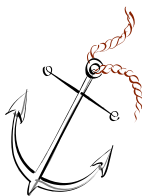
類別 Item			發購電量 (百萬度) Energy Produced and Purchased (GWh)	構成比 (%)	年成長率 Growth Rate (%)
抽蓄水力 P.S. Hydro			2,889	1.4	-5.2
火力 Thermal	台電自有 Taipower		115,272	54.1	4.1
	民營電廠 IPP		39,558	18.6	1.8
	汽電共生 Cogen.		9,255	4.3	-2.6
	小 計 Subtotal		164,085	77.0	3.1
核 能 Nuclear			40,522	19.0	1.2
再生能源 Renewable Energy	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

本計畫研究內容工作項目

- 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計
 - － 波浪引導或集中之設計考慮
 - － 波浪能擷取系統及波能轉換系統於不同港灣構造應用之可行性
 - － 波浪能擷取及轉換系統之效能優化
- 波浪能擷取系統實體試驗模型之建立
- 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究
 - － 結構分析模型之建立
 - － 結構使用材料之確認及建立材料相關之特性於模組中
 - － 環境外力數據之取得及應用於分析系統

本計畫之研究方法 及研究架構

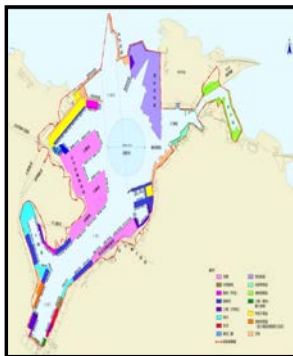
1. 資料蒐集及理論推導
2. 數學分析模型之建立
3. 數值及數學分析
4. 試驗模型之建立及分析



2. 太陽能與風能及其於台灣 港灣應用分析



太陽能發電適用於基隆港之概略分析



基隆港

1. 港區總面積：572公頃（陸域面積196公頃；水域面積376公頃）
2. 港區內有建築物屋頂覆蓋面積約為26萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為19萬平方公尺。）
3. 港區所在地區之近五年平均日照時間：1388.8小時

發電量及成本預估

可裝設之屋頂面積為19萬平方公尺，根據設置條件：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，將值輸入進概算機，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；而裝設成本約為19,000 kWp*8萬元/kWp=15.2億元。

太陽能發電適用於台中港之概略分析



台中港

1. 港區總面積：3793公頃（陸域面積2820公頃；水域面積973公頃）
2. 港區內有建築物屋頂覆蓋面積約為126萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為76萬平方公尺。）
3. 港區所在地區之近五年平均日照時間：1914.1小時

發電量及成本預估

可裝設之屋頂面積為76萬平方公尺，根據設置條件：每10平方公尺的太陽能電池功率為1kWp，故台中港的設置容量大約為76000 kWp，將值輸入進概算機，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；而裝設成本約為76,000kWp*8萬元/kWp=60.8億元。

太陽能發電適用於高雄港之概略分析



高雄港

1. 港區總面積：17678公頃（陸域面積1442公頃；水域面積16236公頃）
2. 港區內有建築物屋頂覆蓋面積約為136萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為96萬平方公尺）
3. 港區所在地區之近五年平均日照時間：2315.2小時

發電量及成本預估

可裝設之屋頂面積為96萬平方公尺，根據設置條件：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，將值輸入進概算機，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；而裝設成本約為96,000 kWp*8萬元/kWp=76.8億元。

太陽能發電適用於花蓮港之概略分析



花蓮港

1. 港區總面積：308公頃（陸域面積172公頃；水域面積136公頃）
2. 港區內有建築物屋頂覆蓋面積約為10萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為8.1萬平方公尺。）
3. 港區所在地區之近五年平均日照時間：1597.7小時

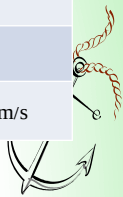
發電量及成本預估

可裝設之屋頂面積為8.1萬平方公尺，根據設置條件：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，將值輸入進概算機，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；而裝設成本約為8100 kWp*8萬元/kWp=6.4億元。

太陽能發電適用於各港口之分析比較

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公頃	19萬平方公尺	1388.8小時	1087萬度	15.2億元	1398萬元
台中港	3793公頃	76萬平方公尺	1914.1小時	6369萬度	60.8億元	954.6萬元
高雄港	17678公頃	96萬平方公尺	2315.2小時	8290萬度	76.8億元	926.4萬元
花蓮港	308公頃	8.1萬平方公尺	1597.7小時	559萬度	6.4億元	1144.9萬元

風速					風速	55 m/s	55 m/s





各港口各級風速概率資料

花蓮港歷年各級風速概率																
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	5.9	19.4	24.6	18.6	11.8	7.1	4.9	3.3	3.3	0.9	0.2	0	0	0	0	0
高雄港歷年各級風速概率																
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	23.7	26.8	22.3	14.1	6.9	3	1.5	0.8	0.6	0.2	0.1	0	0	0	0	0
台中港歷年各級風速概率																
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	3.5	16.4	16.7	13	9.4	7.2	5.5	4.9	9.3	6.9	4.3	1.7	0.8	0.3	0.3	0
基隆港歷年各級風速概率																
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30
百分比(%)	12.7	22.7	18.5	12.9	9.9	7.9	6.1	4.4	3.5	1.1	0.3	0.1	0	0	0	0



風力發電適用理想化分析模式

- 由Google Earth粗略估計得知，台中港之屋頂面積為76萬平方公尺，估算方法分為兩種：
 - 台中港的屋頂數量為225座，平均每座屋頂大約為3377.8平方公尺，假設每座屋頂皆為邊長58.1平方公尺的正方形，將小型風力發電機以每10公尺裝設一台的方式裝在屋頂的四周邊緣，每個屋頂可以裝設16台，整個台中港總共能裝設3600台小型風力發電機；
 - 將屋頂總面積想成一個大屋頂，每兩百平方公尺架設一座風力發電機，總共可以裝設3800台。
- 架設可架設之海岸線，由Google Earth粗略估計得知，台中港沿著海岸邊之路徑總長扣除一些明顯建築、地形問題估計為12945公尺，為了避免影響港邊作業，假設每100公尺裝設一台小型風力發電機，總共可以裝設129台，加上裝設在屋頂上的總共為(1)3729台或(2)3929台。將此帶入計算可得到台中港各種型號之風機一年可發之總電量

4kW VAWT	2.52	1.94	22.91	24.14	2.48	2.93	0.88	0.7

3. 波浪能之發展與應用



國際上之波浪發電發展

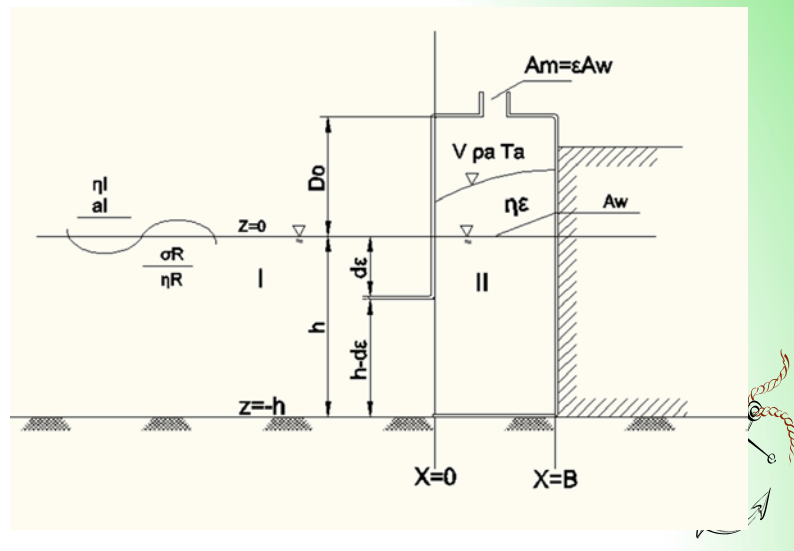
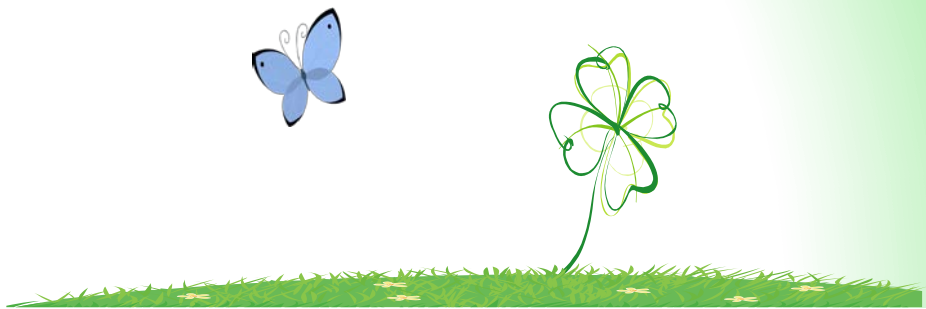
- 國際上從事波浪發電開發的國家有英國、日本、美國、加拿大、丹麥、挪威、蘇俄、以色列及中國等國。
- **澳洲:**發展出一種雙通道渦輪，此渦輪設計較一般的威爾斯渦輪更具效率，此渦輪被裝置於震盪水柱式(OWC式)發電系統
- **丹麥:**發展出由許多創新元件構成之新裝置：Wave plane - 是一種楔型構造，波可由水道進入螺旋槽，此可產生一渦流驅動渦輪機，其型式接近溯升及越波流驅動式（Overtopping and Terminator）波能轉換系統
- **日本:**早在1980年代開發水柱振動型之波能轉換系統。該系統結合了波浪發電以及防波堤沉箱，此種沉箱能使用於防波堤以及護岸，除了具備防波以及攔砂機能，還能對波能量加以利用。
- **中國:**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。



台灣之波浪發電發展

- 台電公司於民國76年曾進行台灣地區波浪發電先驅計畫，進行波浪發電系統之研究，調查評估台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，但採取技術自行研發設計波浪發電系統。

4. 沉箱堤為基礎之波能轉換理論說明



Unsteady Navier-Stokes Equations in conservation form

- Continuity equation

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

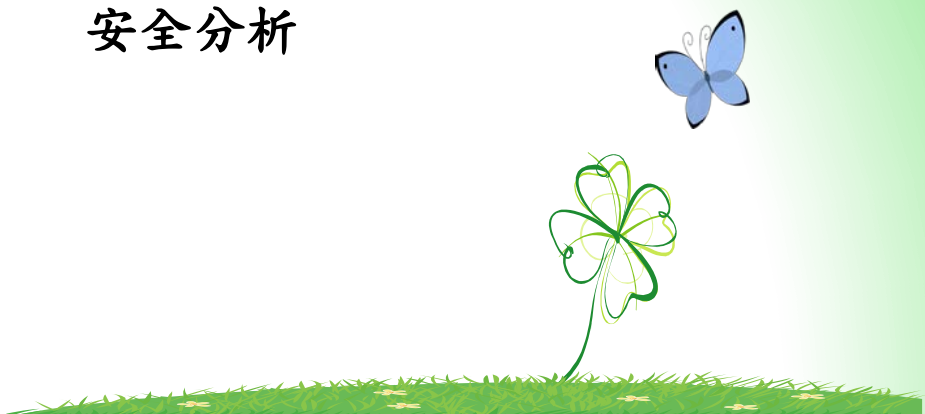
- Eq. of momentum

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

- Eq. of turbulence dynamic energy

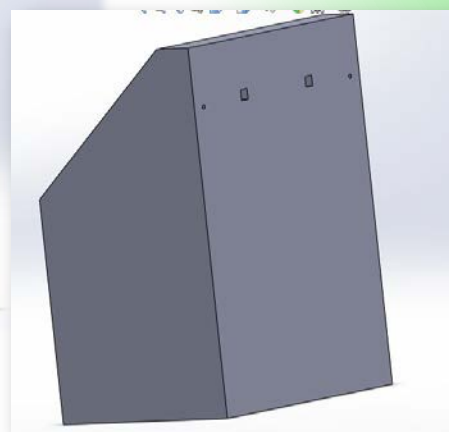
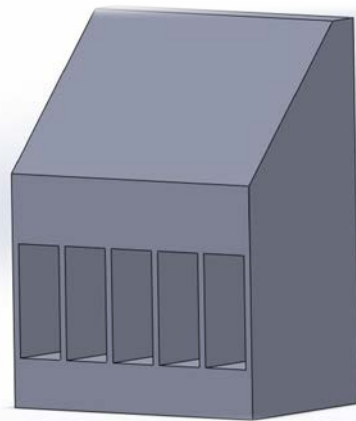
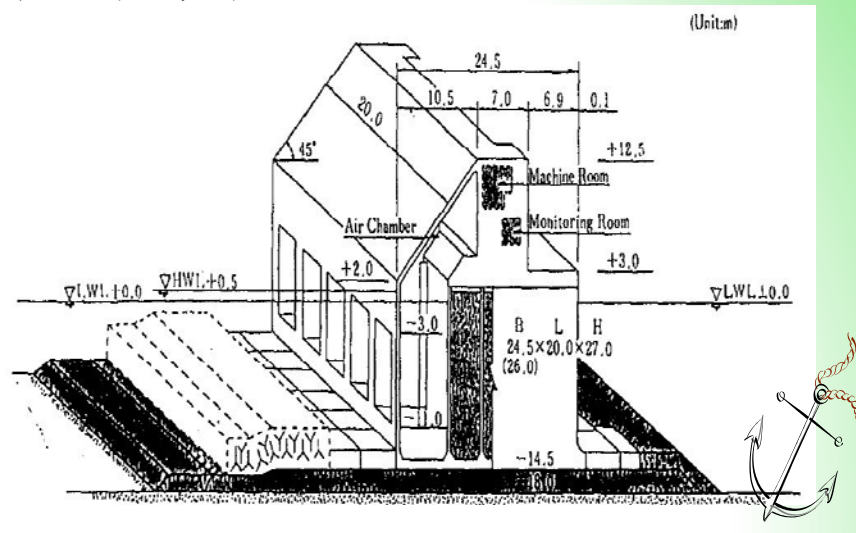
$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon$$

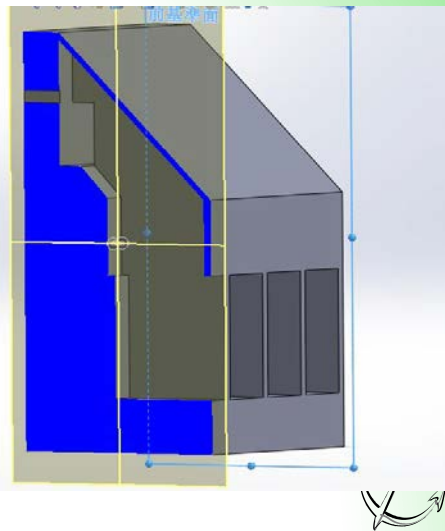
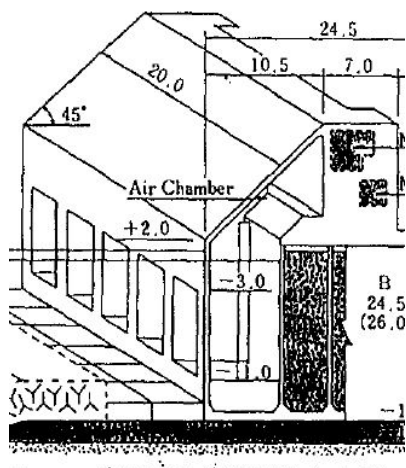
5. 波浪發電複合式防波堤應用及結構 安全分析



波能轉換模擬-酒田港之OWC尺寸

- 當地波高約為2到3m

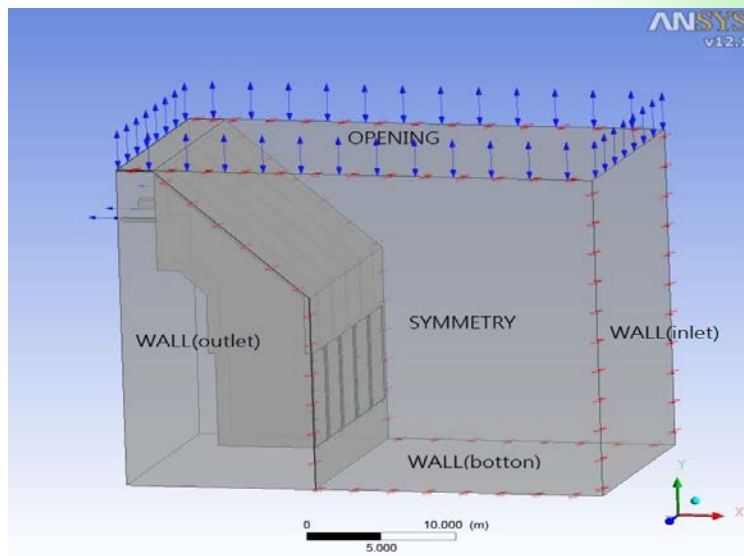




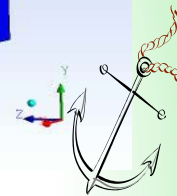
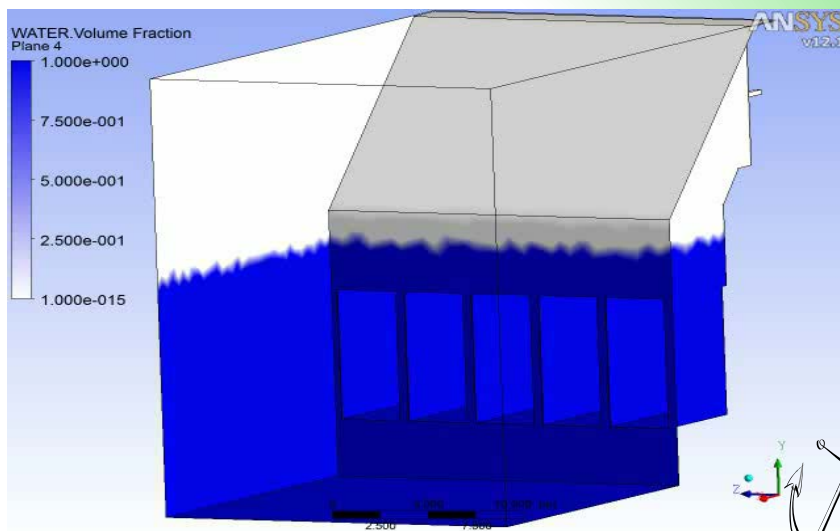
ANSYS CFX數值模擬

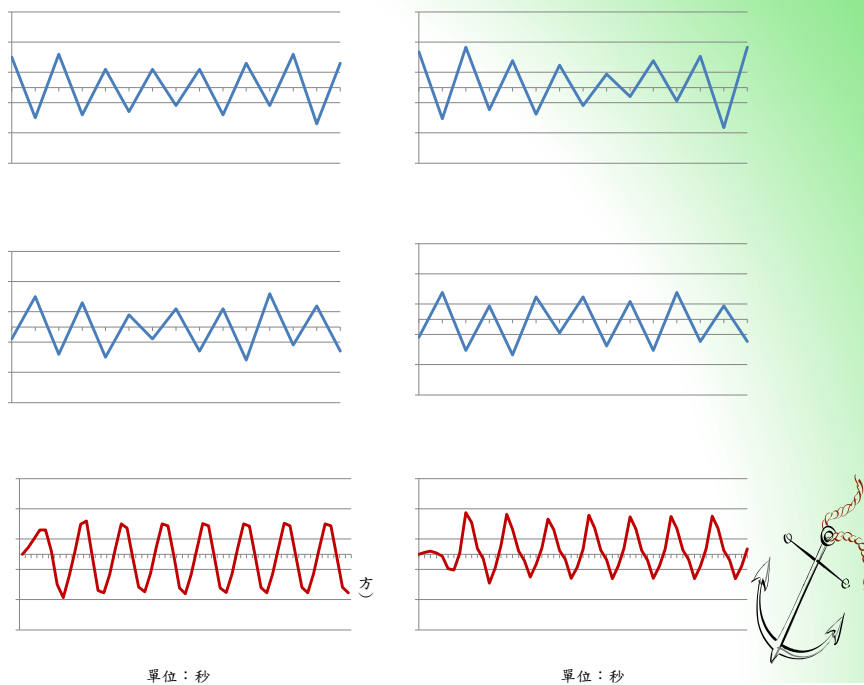
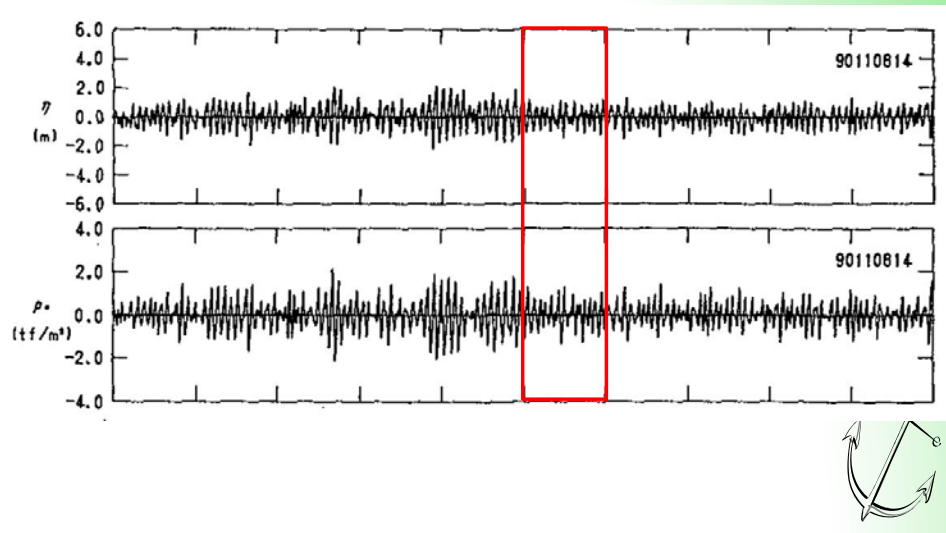
- 1.導入幾何建置其數值模型:
- 2.生成網格透過ANSYS Workbench將模型網格化:
- 3.設置流體介值的物理及化學屬性:
- 4.設置邊界條件:
 - (1)入口邊界(inlet):
 - (2).出口邊界(outlet):
 - (3).開放邊界(opening):
 - (4).壁面邊界(wall):
 - (5).對稱邊界(symmetry):
- 5.求解:
- 6.後處理、定量化分析:

波能轉換-數值水槽建立



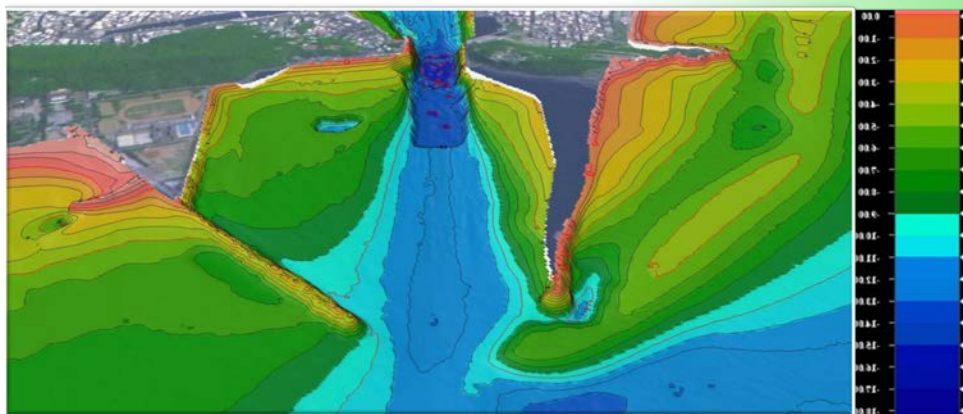
波能轉換-沒水狀況





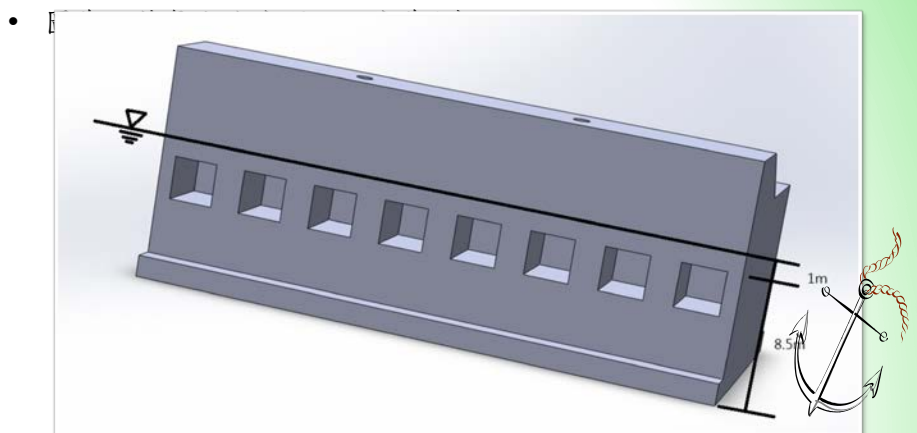
模擬結果與酒田港實驗數據比較

模擬結果與實驗數據比較表(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
數值模擬	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)
模擬結果與實驗數據比較表(氣室內波高)			
氣室內波高(m)	極值平均值	最大值	最小值
數值模擬	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)

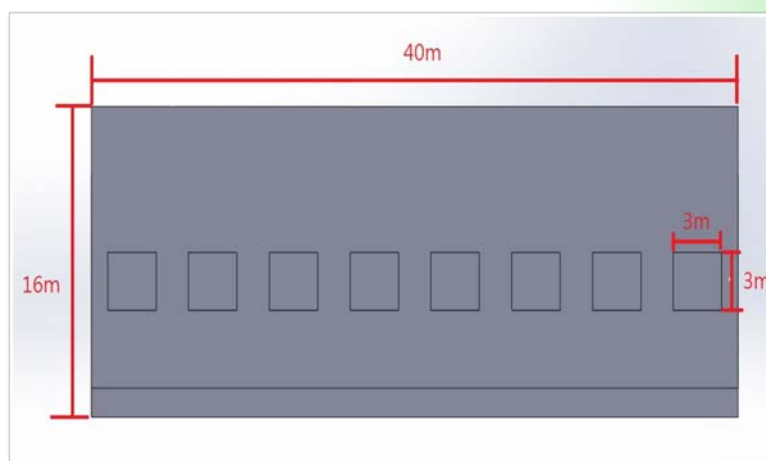


研究計畫模型設計圖－3D正視圖

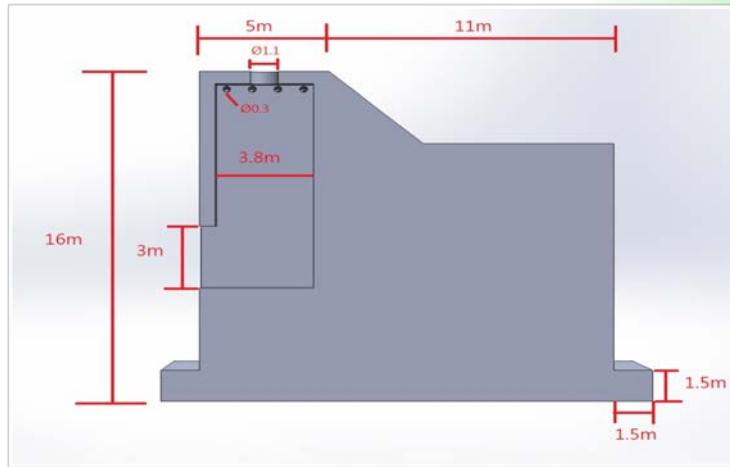
- 本防波堤迎波面之幾何形狀與尺寸係參考高雄港第一港口之北側防波堤沉箱大小，以及港灣結構物設計規範所給定。



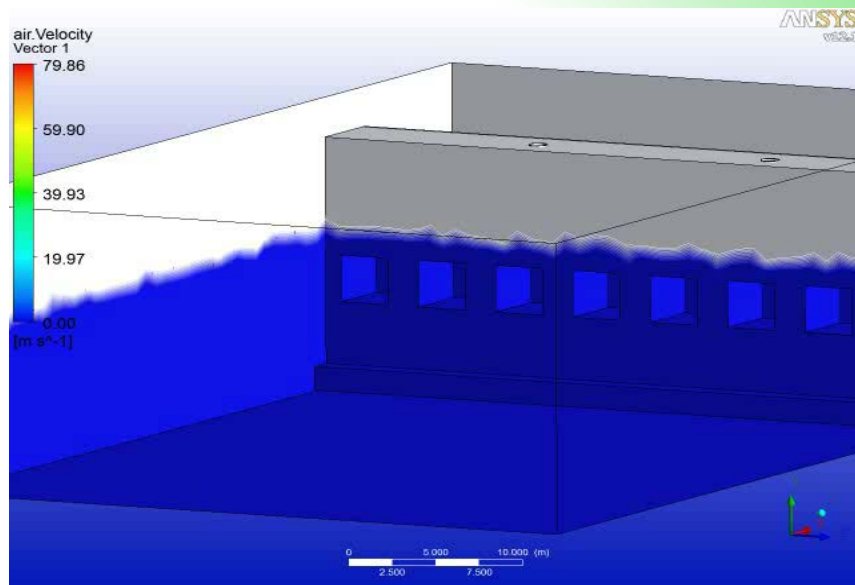
計畫模型設計圖－平面正視圖



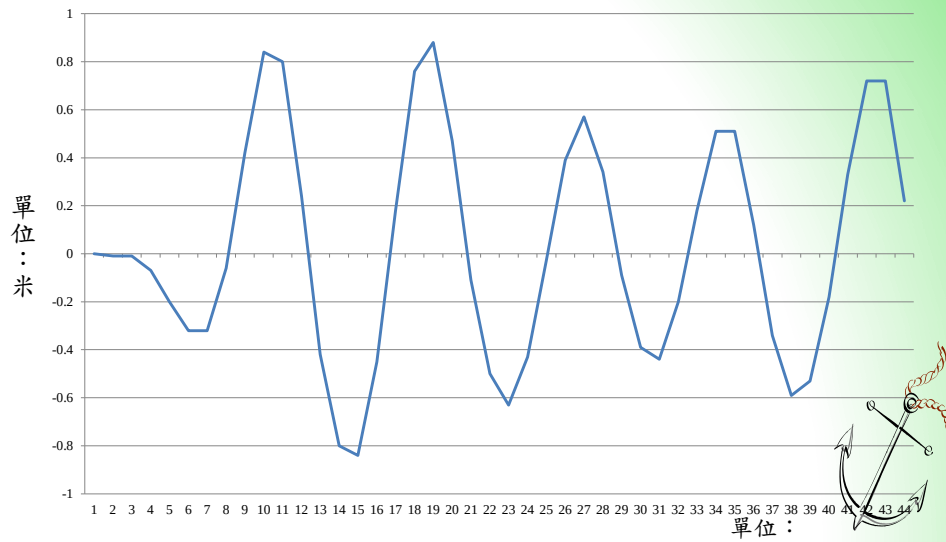
計畫模型設計圖－平面側視圖



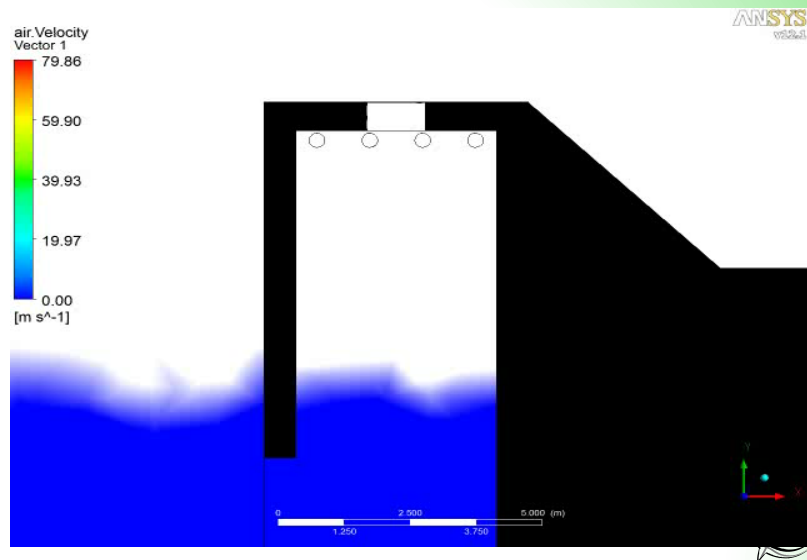
波能轉換-位於高雄港之模型示意圖



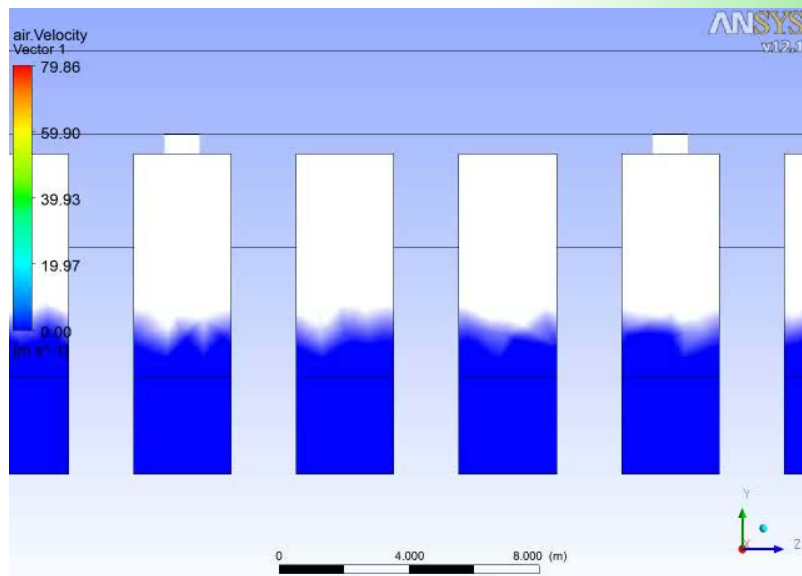
波能轉換-氣室內部波高(m)



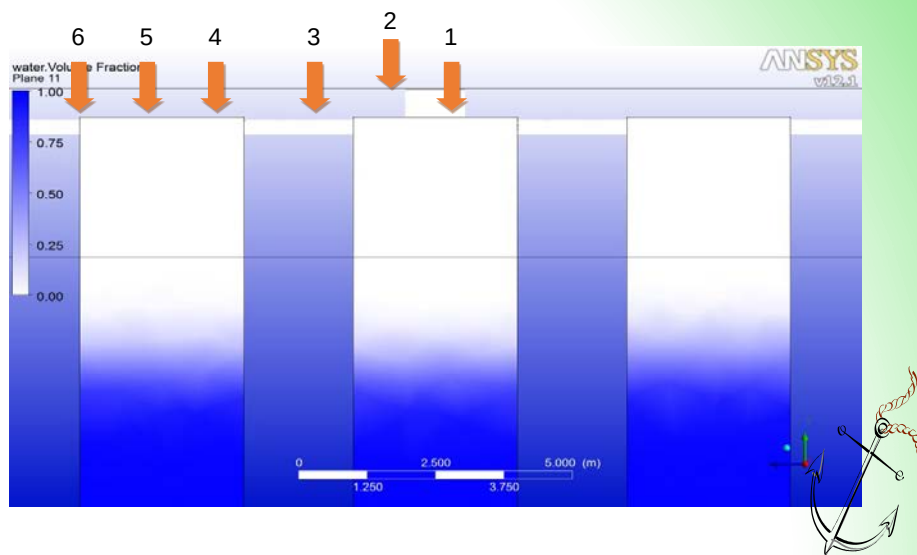
波能轉換-氣室內水位以及空氣流速



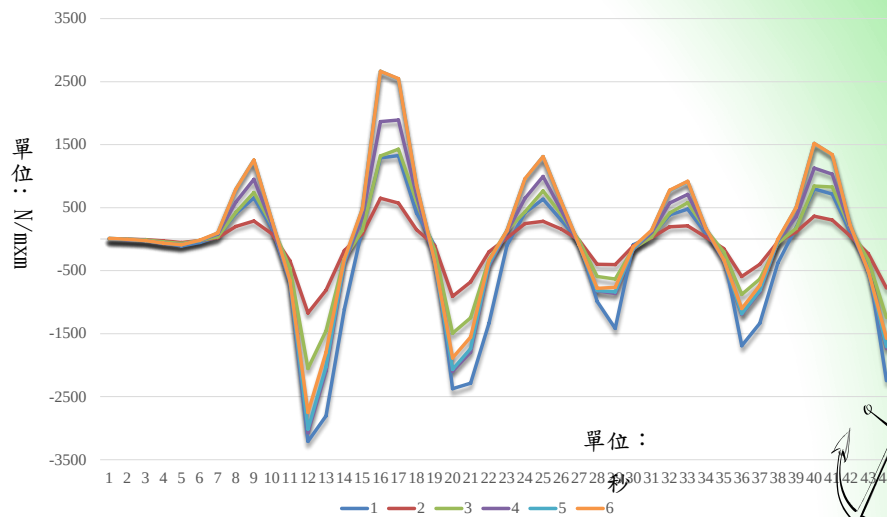
Inside the chamber - front view



波能轉換-監測點編號圖



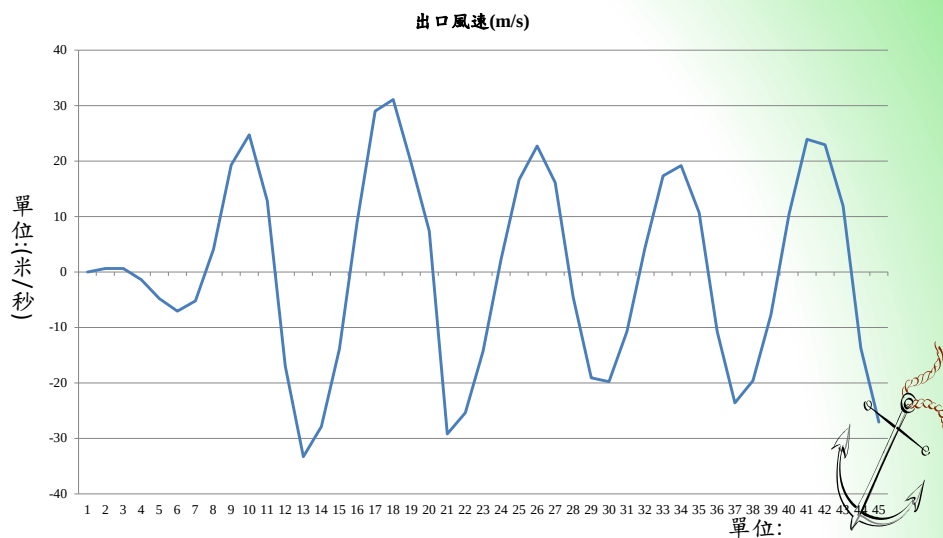
波能轉換-綜合壓力變化圖



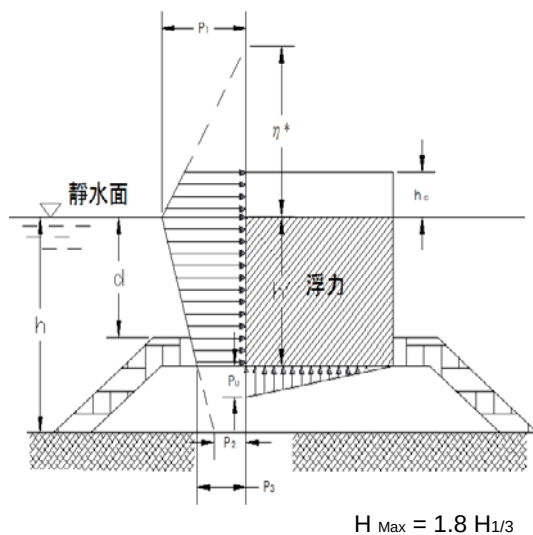
波能轉換-綜合壓力表

綜合壓力表			
監測點位置	平均值	最大值	最小值
編號1	719(Pa)	1325(Pa)	-3210(Pa)
編號2	265(Pa)	648(Pa)	-1172(Pa)
編號3	505(Pa)	1428(Pa)	-2053(Pa)
編號4	700(Pa)	1889(Pa)	-3072(Pa)
編號5	791(Pa)	2664(Pa)	-3017(Pa)
編號6	759(Pa)	2665(Pa)	-2751(Pa)

波能轉換-出口風速



結構安全分析: 作用力-合田公式



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

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

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

$$P_3 = \alpha_3 P$$

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

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

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

迴歸期 (年) 波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
NW	5.3	9.7	5.2	9.6	4.9	9.3	4.5	8.9	4.1	8.5	3.9	8.3	3.5	7.9
WNW	6.2	10.5	6.1	10.4	5.7	10.0	5.3	9.7	4.8	9.2	4.6	9.0	4.1	8.5
W	6.6	10.8	6.5	10.7	6.0	10.3	5.5	9.8	5.0	9.4	4.8	9.2	4.3	8.7
WSW	8.9	12.5	8.6	12.3	7.8	11.7	6.9	11.0	6.0	10.3	5.7	10.0	4.8	9.2
SW	10.0	13.3	9.7	13.1	8.7	12.4	7.7	11.7	6.7	10.9	6.3	10.5	5.2	9.6
SSW	12.0	14.5	11.6	14.3	10.4	13.5	9.2	12.7	7.9	11.8	7.5	11.5	6.1	10.4
S	13.0	15.1	12.6	14.9	11.5	14.2	10.3	13.5	9.0	12.6	8.5	12.2	7.1	11.2
SSE	13.3	15.3	13.0	15.1	11.9	14.5	10.8	13.8	9.5	12.9	9.1	12.7	7.6	11.6

註：1. 依據 1940~2009 年間之颱風資料推算。

2. 推算目標區為 120.26°E，22.47°N。

4. $Ts = 4.2 \times Hs^{0.5}$ 。

5. Hs 單位為 m， Ts 單位為 sec。

台灣港灣構造物動態資訊管理系統

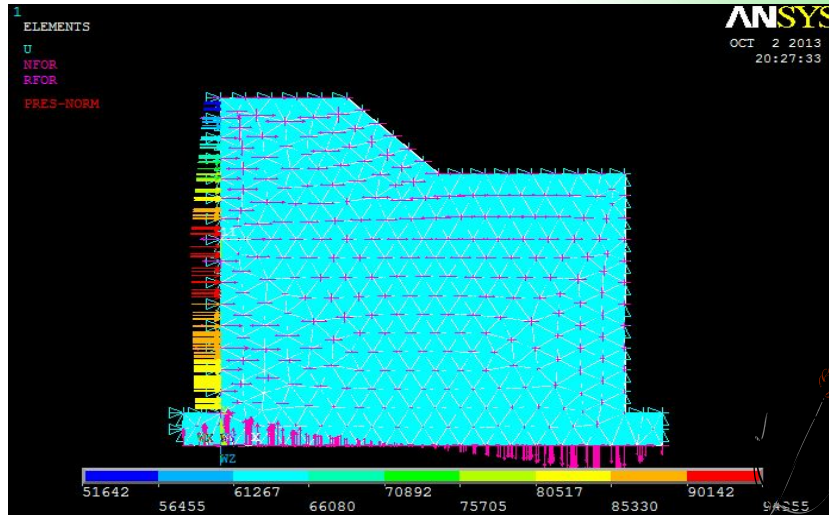
表 4-5.1 水深-週期-波長-波速關係表

週期(sec) 水深(m)	3		4		5		6		7		8		9		10	
	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)
0.5	6.39	2.13	8.67	2.17	10.92	2.18	13.16	2.19	15.39	2.20	17.62	2.22	19.81	2.20	22.07	2.21
1.0	8.69	2.90	11.99	3.00	15.23	3.05	18.44	3.07	21.62	3.09	24.78	3.10	27.91	3.10	31.10	3.11
1.5	10.22	3.40	14.37	3.59	18.40	3.68	22.37	3.73	26.28	3.75	30.19	3.77	34.08	3.79	37.95	3.79
2.0	11.30	3.76	16.22	4.05	20.91	4.19	25.58	4.26	30.11	4.31	34.70	4.33	39.19	4.35	43.68	4.37
2.5	12.10	4.03	17.71	4.43	23.10	4.62	28.31	4.72	33.46	4.78	38.56	4.82	43.63	4.85	48.67	4.87
3.0	12.68	4.23	18.95	4.74	24.91	4.98	30.71	5.12	36.37	5.20	42.01	5.25	47.58	5.29	53.23	5.31
3.5	13.10	4.37	19.99	4.99	26.52	5.30	32.83	5.47	39.03	5.57	45.13	5.61	51.18	5.69	57.19	5.72
4.0	13.40	4.47	20.84	5.21	27.93	5.59	34.75	5.79	41.42	5.92	47.98	6.00	54.48	6.05	60.92	6.09
4.5	13.61	4.54	21.58	5.39	29.18	5.81	36.49	6.08	43.61	6.23	50.61	6.33	57.53	6.39	64.40	6.41
5.0	13.76	4.59	22.18	5.55	30.29	6.06	38.07	6.34	45.63	6.52	53.05	6.63	60.38	6.71	67.61	6.76
6.0	13.92	4.64	23.12	5.78	32.17	6.43	40.81	6.81	49.21	7.04	57.47	7.18	65.58	7.28	73.88	7.37
7.0			23.76	5.94	33.67	6.73	43.18	7.20	52.38	7.49	61.39	7.67	70.20	7.80	78.91	7.89
8.0			24.19	6.05	34.86	6.97	45.20	7.53	55.15	7.88	64.87	8.11	74.36	8.26	83.77	8.38
9.0			24.47	6.12	35.81	7.16	46.89	7.82	57.60	8.23	68.01	8.50	78.18	8.69	88.21	8.82
10.0			24.65	6.16	36.56	7.31	48.38	8.06	59.80	8.54	70.85	8.86	81.67	9.08	92.33	9.23
12.0			24.81	6.21	37.61	7.52	50.69	8.45	63.46	9.06	75.82	9.48	87.86	9.76	99.63	9.97
14.0					38.22	7.61	52.38	8.73	66.36	9.48	79.96	9.99	93.13	10.35	106.1	10.61
16.0					38.57	7.71	53.57	8.93	68.68	9.81	83.36	10.42	97.75	10.86	111.8	11.17

)港灣構造物設計基準修訂(交通部運輸研究所)

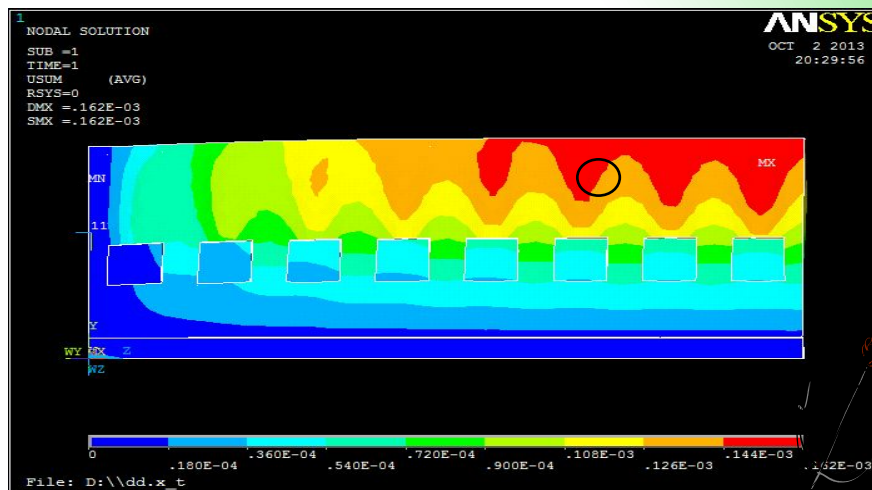
結構安全分析-波力分佈圖(側視圖)

- 最大波浪作用力於靜水面處，值約為95,000Pa

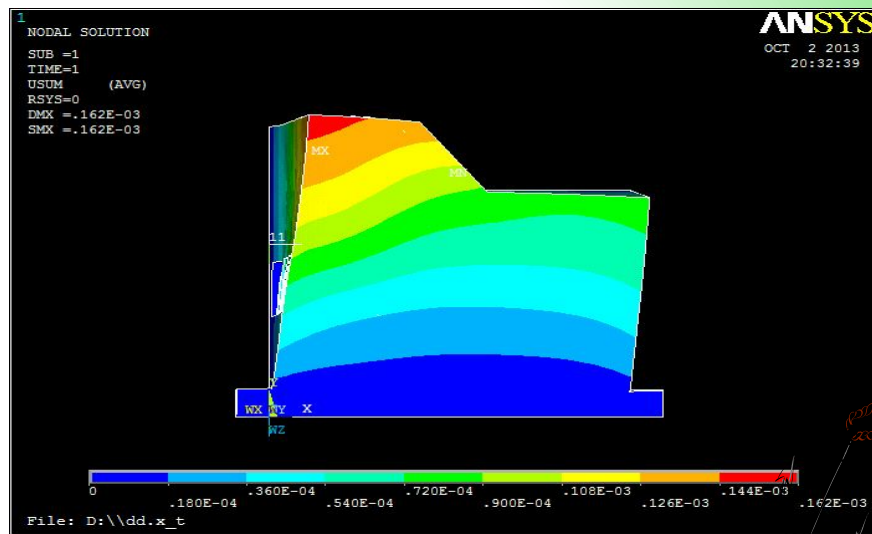


結構安全分析-變形結果(正視)

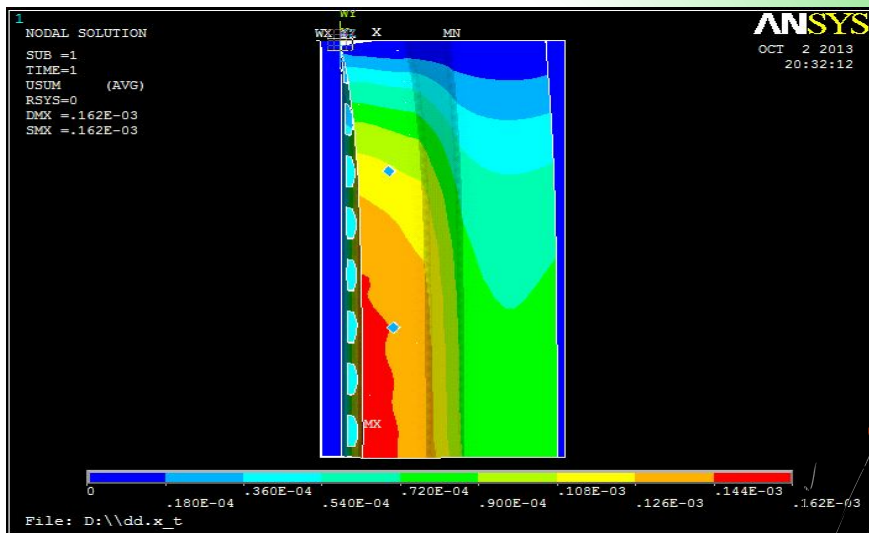
- 彈性係數設定為30GPa，拘束面為防波堤之底面及右側面，最大位移發生在圖中的MX點(黑圈處)，其值約為0.16mm



結構安全分析-變形結果(側視)

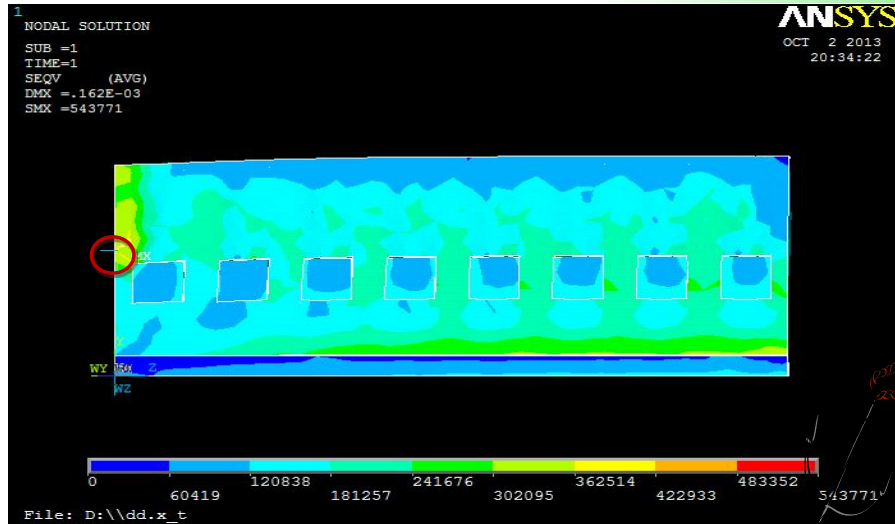


結構安全分析-變形結果(上視)

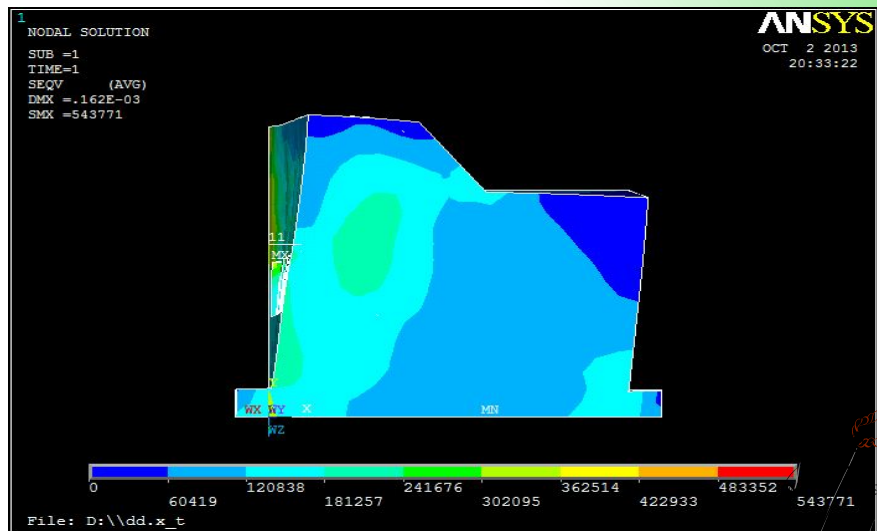


結構安全分析-破壞應力圖(正視)

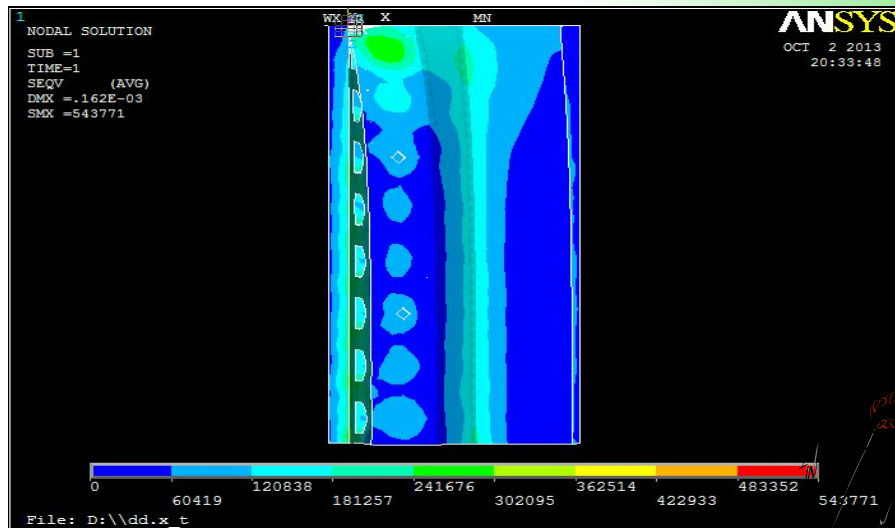
- 最大Von Mises發生在圖中的MX點(紅圈處)，其值約為561970Pa



結構安全分析-破壞應力圖(側視)



結構安全分析-破壞應力圖(上視)



結構安全分析結果－破壞應力分析

- 混凝土材料屬於脆性材料，脆性材料並無明顯的降伏現象，脆性材料之絕對最大的主應力(正向應力)若達到拉伸試驗之破壞強度時即會破裂，因此若結構是由脆性材料製成，必須使用其他準則來判斷材料是否破壞，例如最大正向應力準則。
- 於「畸變能破壞理論」中，主要以 von Mises 應力來判別材料是否發生破壞。若 Mises 應力小於或等於降伏應力，材料為安全，反之則為破壞。
- 混凝土之劈裂抗拉強度需依據 CNS 3801 試驗來得知，但常重混凝土抗拉強度一般約為抗壓強度開根號的 0.8 倍 (0.8)，因此由本研究當初給定之混凝土抗壓強度可約略推出抗拉強度約為 2.94MPa，約為破壞應力之 5.2 倍。

6. 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析



6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

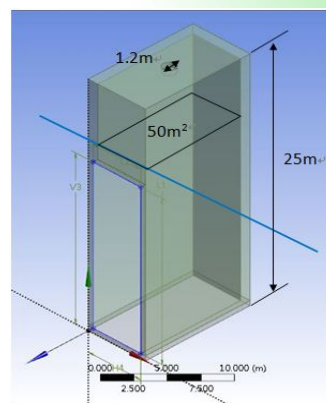
沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數(波浪及固定幾何參數)

選定三組波高以及三組波浪週期，總共9組波浪尖銳度

週期T(s)	6	7.5	9
波高H(m)	1.5	2	2.5
波長L(m)	L1=54.30	L2=79.66	L3=105.28
水深(m)	20	20	20

固定幾何參數:

出氣孔直徑(m)	1.2
氣室蓋水面積(m ²)	50
壁厚(m)	0.5
外部高(m)	25



海洋環境及工程學系

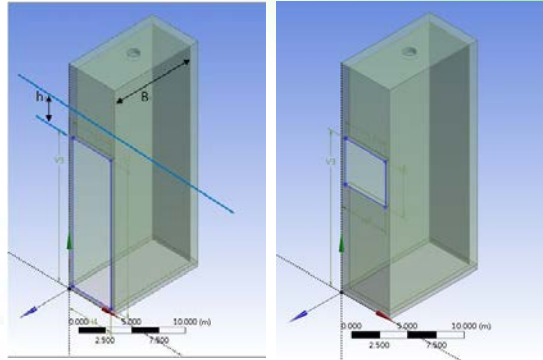
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

沉箱式防波堤結合波能轉換系統系統幾何參數(無因次幾何變數)

無因次幾何變數有3種:

1. 無因次前牆開口沒水深比 (h/H): 分別為入射波高之2倍、3倍、4倍
2. 無因次氣室寬度: (B/L): 氣室寬度分別為入射波長之0.125、0.15、0.175倍。
3. 前牆水下開口率設為定值25%:

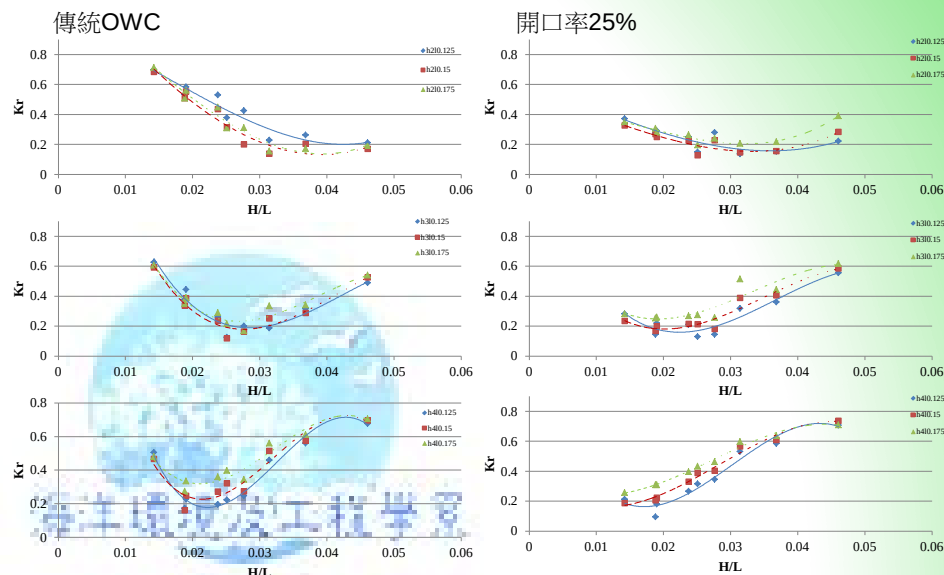
在水下增加一檔板使前牆水下開口率變為25%; 上述傳統震盪水柱波能轉換系統水下開口率為85%到50%。



海洋環境及工程學系

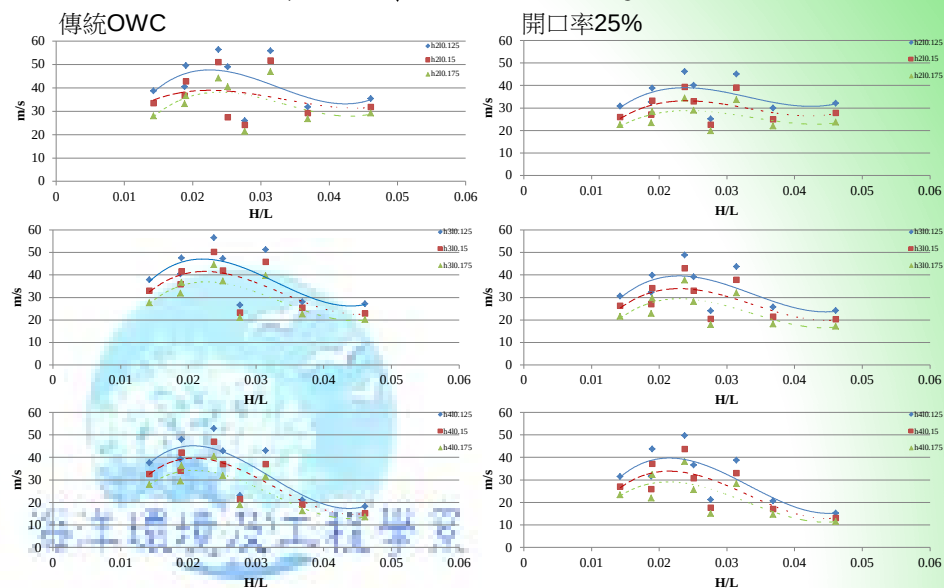
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

反射率比較



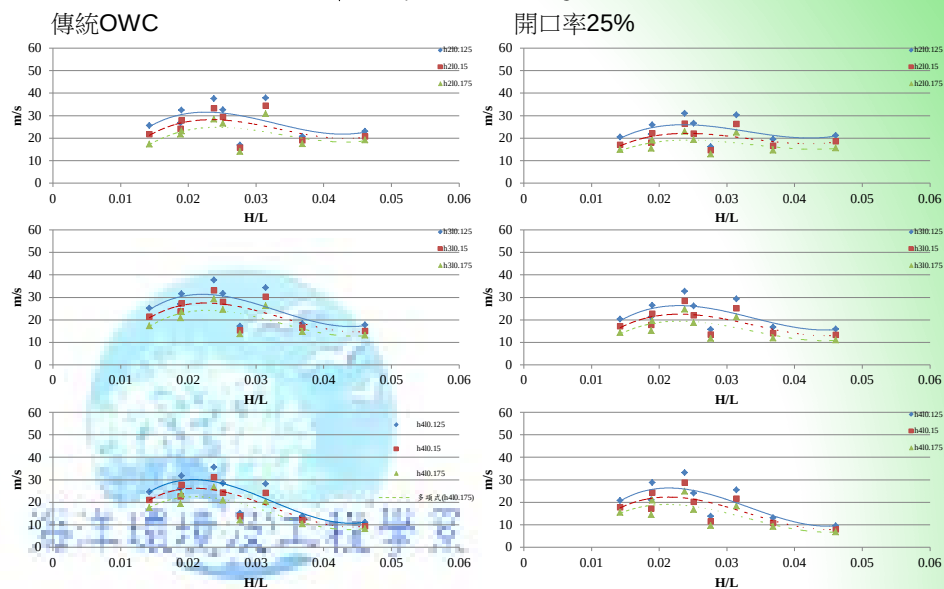
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

前1/3最大氣流速度



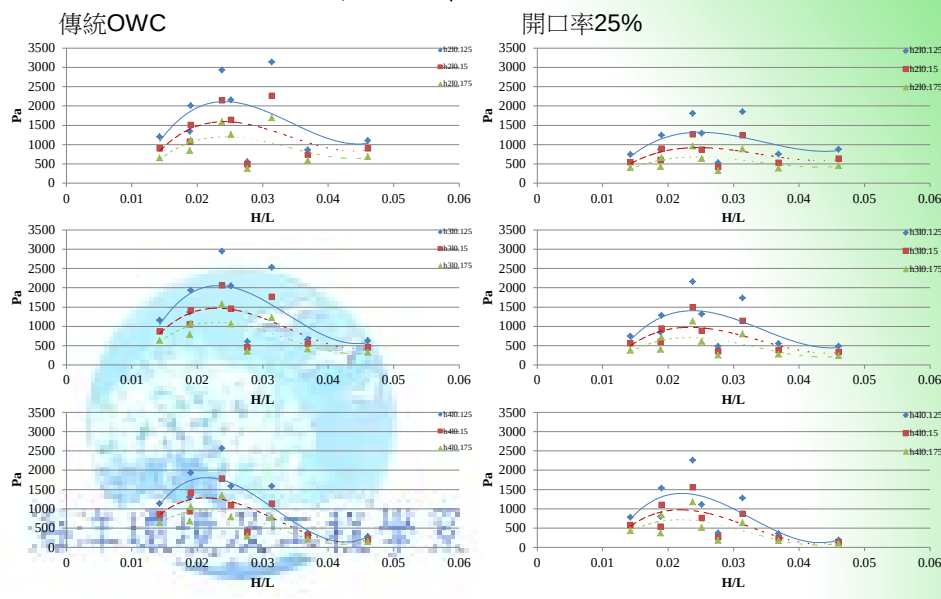
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

平均氣流速度



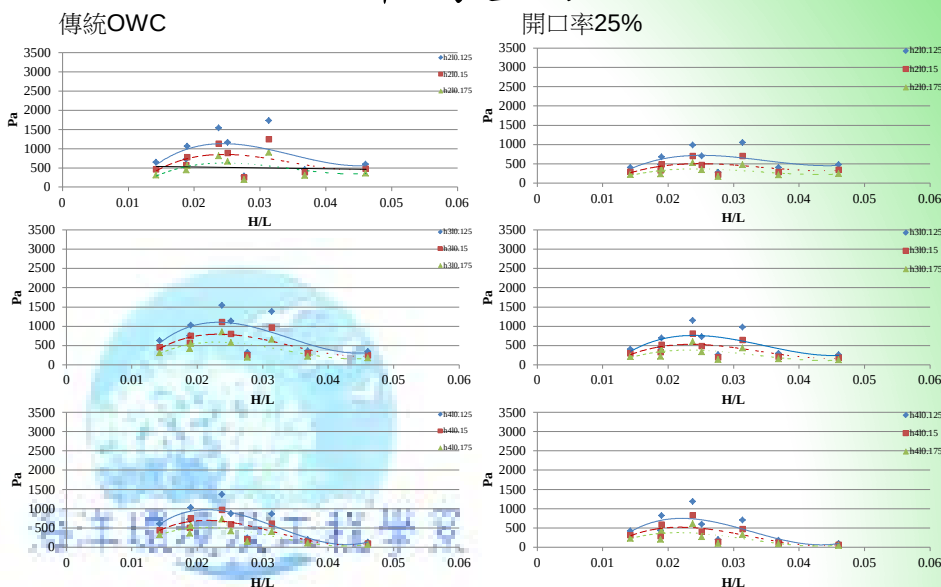
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

前1/3最大壓力



6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

平均壓力



7. 實驗模型設計及水工試驗規畫



7 實體模型設計及水工試驗規畫

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)。
- 福祿數(Froude similarity)為動力相似為主要依據，如下所示：

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

- 模型(model)與實物原型(prototype)的關係如下： $\left[\frac{V}{\sqrt{gL}}\right]_m = \left[\frac{V}{\sqrt{gL}}\right]_p$

(下標m表示模型model；下標p表示原型實體prototype)

- 本文定義之模型比例縮尺(scale ratio)為 λ ，則表示如下所示： $\lambda = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)$

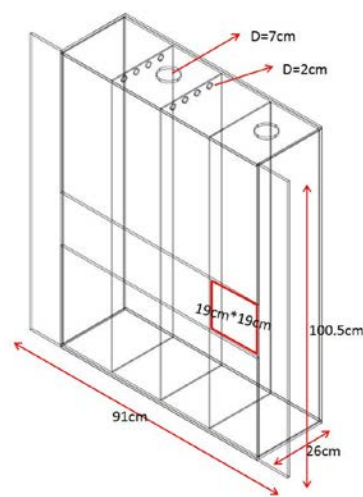
海洋環境及工程學系

7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗模型製作

- 本實驗考慮縮尺為1/16，則實際水深為9.5公尺，模型試驗水深為0.6公尺。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、以及高100.5cm如圖所示。

parameter	Dimension/Ratio
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
氣室內部長	24 cm
沒水深(靜水深至開口上緣)	6 cm
出風口直徑	7 cm
氣室連通洞直徑	2 cm



水槽試驗模型尺寸圖

7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗儀器及設備

造波水槽



造波機



波高計



訊號增幅器



擷取卡



訊號放大器



風速計



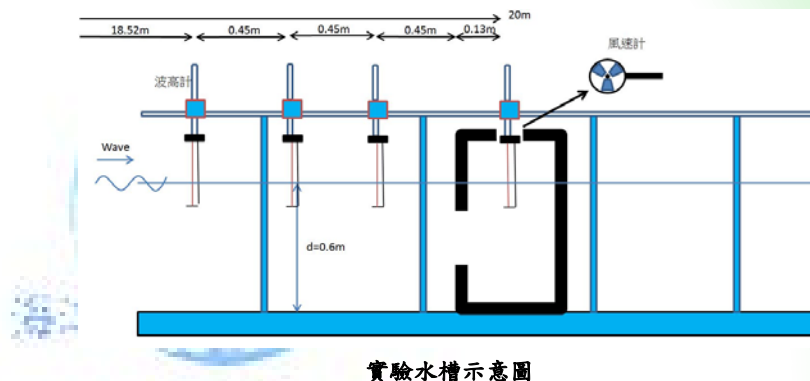
7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗佈置

- 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 $x > 0.1L$



7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗參數設定

- 本實驗使用模型，尺寸長、寬、高各為26cm、81cm、100.5cm，實驗有六組不同週期，及五組不同波高，如表7-2所示，對同一試驗模型，將進行30組不同波浪參數之實驗。
- 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。

Parameter	Modal	Prototype
週期 T(sec)	1 sec	4 sec
	1.2 sec	4.8 sec
	1.4 sec	5.6 sec
	1.6 sec	6.4 sec
	1.8 sec	7.2 sec
	2 sec	8 sec
波高 H(cm/m)	4 cm	0.64 m
	6 cm	0.96 m
	8 cm	1.28 m
	10 cm	1.6 m
	12 cm	1.92 m

海洋環境及工程學系

實驗步驟

- 本實驗所蒐集數據主要為波高資料、氣流速度資料及氣室內之空氣壓力。分析時除了瞭解氣室內為波高變化、通氣口氣流速度及氣室內相關位置之氣壓變化外，波浪之反射率與傳統沉箱式碼頭之差異亦將予以考慮。
- 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。
- 氣流速度量測：將風速計設置於波能轉換沉箱氣室上方出氣口，搭配軟體介面擷取系統得風速計上所量測到的風速值。

Thanks for your attention
請指教

已發表成果：

Y.-F. Chiu, F.T. Chang, Hsien Hua Lee*, C.-Y. Lin, and C.-H. Chen, 2014, "Study on the Performance of a Caisson Breakwater Combined with Wave Power Converting System", Proceedings of 34th ICCE 2014, Seoul, Korea, Jul. 15-20, 2014.

附錄二 期中報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-102-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(2/4)

執行單位：國立中山大學

審查日期：103 年 7 月 16 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
國立交通大學 張憲國 教授		
1. 在前言先定義綠色能源及綠色港灣。	感謝委員的建議與指教，本計畫已在報告中加入 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.)	已依照委員意見辦理。

2. 表格內名詞盡量使用中文即可，有英文說明必要時在內文敘述。	感謝委員的建議與指教，本計畫已在報告中作修正	已依照委員意見辦理。
3. 本計畫的理論公式請再檢查符號，如公式(4-17)是否為 $\sigma t + kx - \psi R$ 。	感謝委員的建議與指教本計畫已在報告中作修正， $\sigma t + kx - \psi R$ 。	已依照委員意見辦理。
4. 公式(4-34)中何謂淺水參數。	感謝委員的建議與指教，已在報告中做更正修改為淺化係數	已依照委員意見辦理。
5. 波能計算的理論中，雷諾數估算大約是多少？	感謝委員的建議與指教，因本計畫之數值計算結果是在網格節點上，各節點判斷結果中有紊流有層流，計算結果不盡相同，節點上差異甚巨，故無法概述之	已依照委員意見辦理。
6. 紊流模式中常用為 $k-\epsilon$ 。	感謝委員的建議與指教，本計畫紊流模式中採用 $k-\epsilon$ 。	已依照委員意見辦理。
7. 第六章的圖縱座標要列出物理量，橫坐標為何取出 H/L 尖銳度，當為分析自變數(因為理論為線性波理論)。	感謝委員的建議與指教，本計畫圖表縱軸採用無因次化表示，以方便做數據資料分析比較。	已依照委員意見辦理。
8. 水工試驗主要探討主題是波力，水理還是發電效能。	感謝委員的建議與指教，本計畫水工試驗主要探討主題是發電效能，但因為附屬結構，主結構受力作用及水理反應仍加以探討。	已依照委員意見辦理。
國立臺灣海洋大學 蕭松山 教授		
1. 波浪資料引用建議採用中心公布之最新版本資料(目前資料僅至 2008 年)。	感謝委員的建議與指教，本計畫將波浪資料更新至 2012 年	已依照委員意見辦理。
2. 防波堤波力計算採用合田公式，本計畫防波堤為開孔式，合田公式(會	感謝委員之建議與指教，本計畫之結構	已依照委員意見

反射岩壁)計算波力是否需做修正?	並非開孔式，而是結合傳統防波堤加上氣室，日本相關研究亦以合田公式之應用為主，未來將評估是否做相關的修正。	見辦理。
3. 波浪發電複合式防波堤設計須考量堤體安全及發電效能評估，圖 6.4~圖 6.33 等分析結果建議進一步解析以上兩者之評估。	感謝委員的建議與指教，本計畫將分析結果建議進一步解析以上兩者之評估於後續計畫的執行	已依照委員意見辦理。
4. 未來建議考量現有防波堤改設為「波浪發電複合式防波堤」的可能性。	感謝委員的建議與指教，本計畫將納入委員之建議	已依照委員意見辦理。
5. 期中進度已達預定進度要求。	感謝委員的建議與指教	已依照委員意見辦理。
運輸研究所港研中心 張金機 委員		
1. 波能發電實際安裝情形(P.60-70) 1.表 3.3 起 Depth at lip 波長， Lip depth before MWL 非水面下深度。 2.實際安裝系統均已完成多年，營運情形建議能蒐集資料作為參考。	感謝委員的建議與指教，Depth at lip 改為 Depth 水深，而 Lip depth before MWL 為迎波面前牆沒水深。營運情形資料之蒐集文獻有限，本計畫仍將盡力蒐集	已依照委員意見辦理。
2. 港口波浪資料 1.蒐集各港資料均引用且各港資料不一致，並做進一步分析整理，波浪資料並要用於評估考量波向等。 2.波浪最大值主要作為推算回歸期波浪作為設計用。潮位等與同。	感謝委員的建議與指教，本計畫將在未來計畫作相關資料之收集分析及評估	已依照委員意見辦理。
3. 結構安全 1.波力公布，波力計算不等同堤體安全。 2.堤體因設計氣室重量減小，上揚力增加，必須檢討滑移、傾倒。 3.堤體直接擺放於底床，造成堤地冲刷或淤積可能使氣室淤沙。	感謝委員的建議與指教，本計畫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，固本計畫僅探討外部加裝之結構安	已依照委員意見辦理。

	全。關於委員 2 及 3 項建議，亦於會議中具體回覆。	
4. 圖號與文章不一致，如 5-19、5-20 等。	感謝委員的建議與指教，計劃書已進行修正。	已依照委員意見辦理。
成大水工試驗所 余進利 副所長		
1. 文中對太陽能、風能、波能資料收集頗為完善，而臺灣東部有黑潮經過可運用潛力極大，建議增加相關資料收集與分析。	感謝委員的建議與指教，本計畫後續將加入黑潮之相關資料收集與分析。	已依照委員意見辦理。
2. 本文針對波浪發電複合式防坡堤進行相關應用及結構安全分析，後續亦將進行水工模型試驗，但除文中所進行之相關研究，建議應再增加發電量之探討。	感謝委員的建議與指教，相關發電量之探討將在後續計畫中進行。	已依照委員意見辦理。
3. 建議報告應增加結論與建議章節。	感謝委員的建議與指教，本計畫將在期末報告中加入結論與建議章節。	已依照委員意見辦理。
本所港研中心 邱永芳 主任		
1. 符合工作內容與進度。	感謝委員的建議與指教	已依照委員意見辦理。
本所港研中心 蔡立宏 研究員		
1. 報告格式請依本所規定編撰。	感謝委員的建議與指教，本計畫將進行相關之修正。	已依照委員意見辦理。
2. 建議增列第一年成果，以及分年工作項目，並應有初步的成果結論與建議。	感謝委員的建議與指教，本計畫將進行相關之修正。	已依照委員意見辦理。
3. 各港口波浪資料，建議收集至最近年份。	感謝委員的建議與指教，本計畫將波浪資料更新至 2012 年	已依照委員意見辦理。
4. 第五章 P.118 壓力及波高分布為何成	感謝委員的建議與指教，為配合 Goda	已依照委員意

鋸齒狀?	之實驗結果，故本計畫只取模擬結果之峰值以便與之比較，因此呈現鋸齒狀之分布。	見辦理。
5. P.155~169 途中符號、曲線代表意義請修飾，另圖說明應以途中要呈現的現象為主。	感謝委員的建議與指教，本計畫已進行修正。	已依照委員意見辦理。

附錄三 期末簡報資料



交通部運輸研究所 MOTC-IOT-103-H2DB005c
國立中山大學 合作辦理

可循環式(再生)綠色能源結合港灣 結構以建構綠色港灣之發展研究 (2/4)

計畫主持人：李賢華 教授

協同主持人：陳陽益 教授、陸曉筠 助理教授

計畫研究員：方鉢淳、張正憲、鄭聿翔、陳勝傑
林雋祐、吳宗燁、陳政翰、劉雨慈

國立中山大學海洋環境及工程學系 Department of Marine Environment and Engineering

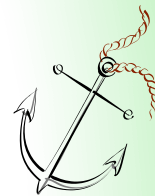


1. 計畫背景分析

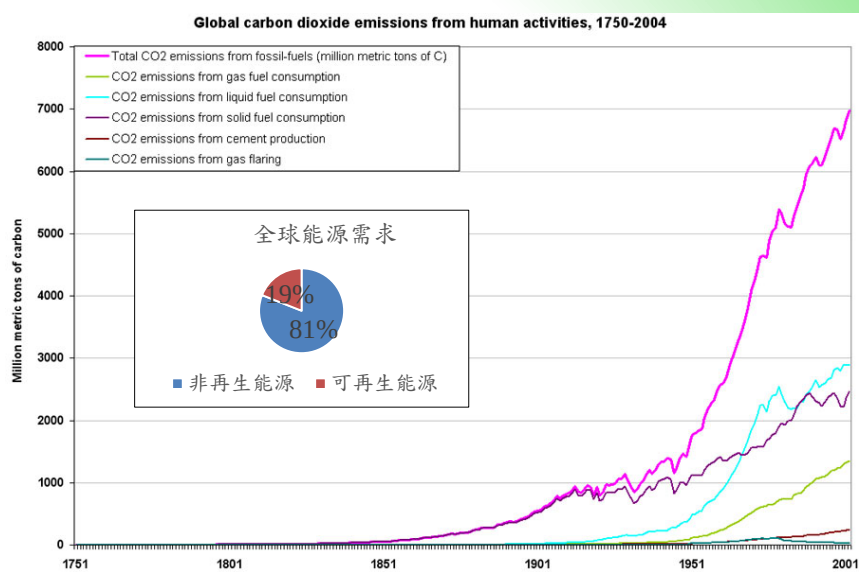


本計畫目的及其重要性

- 研究目的
 - － 有效建置以波浪能擷取為主之綠能系統
 - － 將波浪能擷取之系統結合於港灣構造物中
 - － 同時增進港灣構造物使用之安全及耐久性
- 計畫重要性
 - － 科技白皮書:於2020年我國成為綠能科技與智慧生活的全球創新領航者
 - － 全球能源需求增加、環境負荷、排碳單價提升
 - － 台灣各種能源使用，再生能源成長緩慢



人類活動所造成二氧化碳排放之年增長情形



2011年台電統計台灣各種能源使用情形（資料來源：台電）

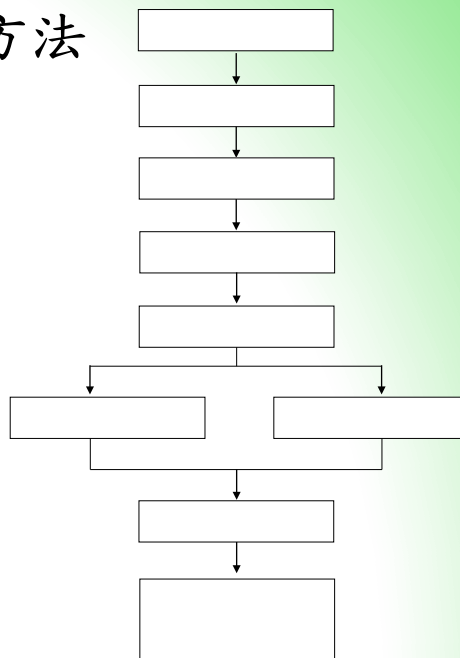
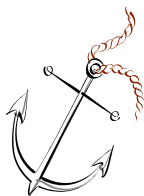
類別 Item			發購電量 (百萬度) Energy Produced and Purchased (GWh)	構成比 (%)	年成長率 Growth Rate (%)
抽蓄水力 P.S. Hydro			2,889	1.4	-5.2
火力 Thermal	台電自有 Taipower		115,272	54.1	4.1
	民營電廠 IPP		39,558	18.6	1.8
	汽電共生 Cogen.		9,255	4.3	-2.6
	小 計 Subtotal		164,085	77.0	3.1
核 能 Nuclear			40,522	19.0	1.2
再生能源 Renewable Energy	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

本計畫研究內容工作項目

- 波浪能擷取系統及波能轉換系統模型設計
 - － 波浪引導或集中之設計考慮
 - － 波浪能擷取系統及波能轉換系統於不同港灣構造應用之可行性
 - － 波浪能擷取及轉換系統之效能優化
- 波浪能擷取系統實體試驗模型之建立
- 波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究
 - － 結構分析模型之建立
 - － 結構使用材料之確認及建立材料相關之特性於模組中
 - － 環境外力數據之取得及應用於分析系統

本計畫之研究方法 及研究架構

1. 資料蒐集及理論推導
2. 數學分析模型之建立
3. 數值及數學分析
4. 試驗模型之建立及分析



2. 太陽能與風能及其於台灣 港灣應用分析



太陽能發電適用於高雄港之概略分析



高雄港

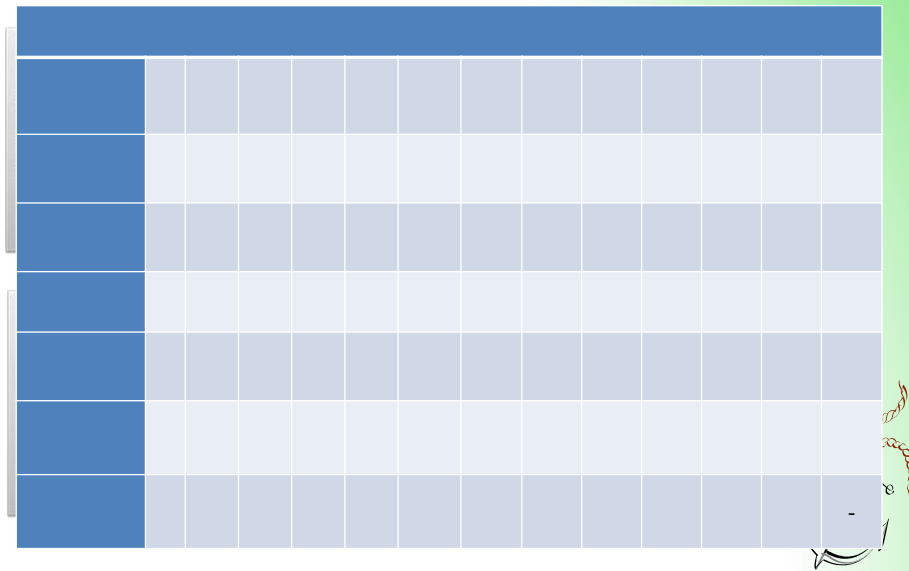
1. 港區總面積：17678公頃（陸域面積1442公頃；水域面積16236公頃）
2. 港區內有建築物屋頂覆蓋面積約為136萬平方公尺（其中能安裝太陽能板之屋頂面積約為96萬平方公尺）
3. 港區所在地區之近五年平均日照時間：2315.2小時

發電量及成本預估

可裝設之屋頂面積為96萬平方公尺，根據設置條件：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，將值輸入進概算機，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；而裝設成本約為96,000 kWp*8萬元/kWp=76.8億元。

太陽能發電適用於各港口之分析比較

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公頃	19萬平方公尺	1388.8小時	1087萬度	15.2億元	1398萬元
台中港	3793公頃	76萬平方公尺	1914.1小時	6369萬度	60.8億元	954.6萬元
高雄港	17678公頃	96萬平方公尺	2315.2小時	8290萬度	76.8億元	926.4萬元
花蓮港	308公頃	8.1萬平方公尺	1597.7小時	559萬度	6.4億元	1144.9萬元



各港口各級風速概率資料

花蓮港歷年各級風速概率																	
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30	
百分比(%)	5.9	19.4	24.6	18.6	11.8	7.1	4.9	3.3	3.3	0.9	0.2	0	0	0	0	0	
高雄港歷年各級風速概率																	
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30	
百分比(%)	23.7	26.8	22.3	14.1	6.9	3	1.5	0.8	0.6	0.2	0.1	0	0	0	0	0	
台中港歷年各級風速概率																	
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30	
百分比(%)	3.5	16.4	16.7	13	9.4	7.2	5.5	4.9	9.3	6.9	4.3	1.7	0.8	0.3	0.3	0	
基隆港歷年各級風速概率																	
風速 (m/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	30	
百分比(%)	12.7	22.7	18.5	12.9	9.9	7.9	6.1	4.4	3.5	1.1	0.3	0.1	0	0	0	0	



4kW VAWT	2.52	1.94	22.91	24.14	2.48	2.93	0.88	0.7

3. 波浪能之發展與應用



國際上之波浪發電發展

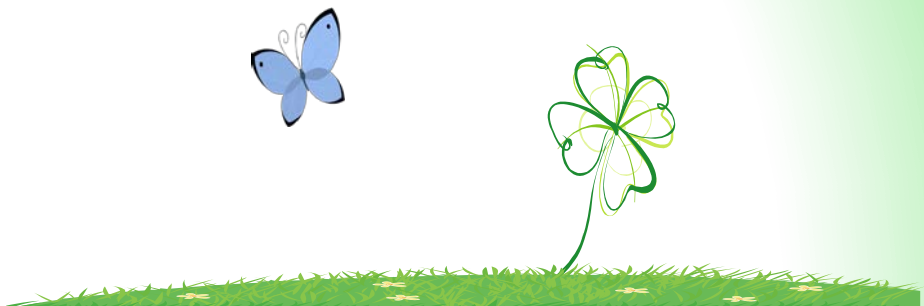
- 國際上從事波浪發電開發的國家有英國、日本、美國、加拿大、丹麥、挪威、蘇俄、以色列及中國等國。
- **澳洲:** 發展出一種雙通道渦輪，此渦輪設計較一般的威爾斯渦輪更具效率，此渦輪被裝置於震盪水柱式(OWC式)發電系統
- **丹麥:** 發展出由許多創新元件構成之新裝置：Wave plane - 是一種楔型構造，波可由水道進入螺旋槽，此可產生一渦流驅動渦輪機，其型式接近溯升及越波流驅動式（Overtopping and Terminator）波能轉換系統
- **日本:** 早在1980年代開發水柱振動型之波能轉換系統。該系統結合了波浪發電以及防波堤沉箱，此種沉箱能使用於防波堤以及護岸，除了具備防波以及攔砂機能，還能對波能量加以利用。
- **中國:** 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。



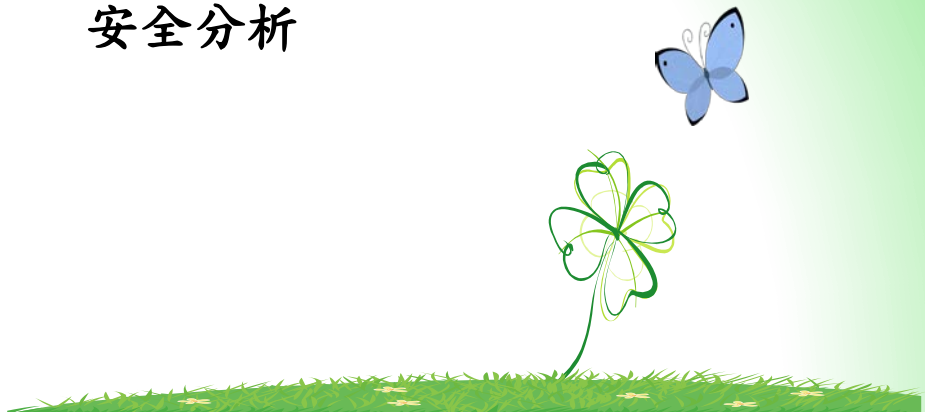
台灣之波浪發電發展

- 台電公司於民國76年曾進行台灣地區波浪發電先驅計畫，進行波浪發電系統之研究，調查評估台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，但採取技術自行研發設計波浪發電系統。

4. 沉箱堤為基礎之波能轉換理論說明

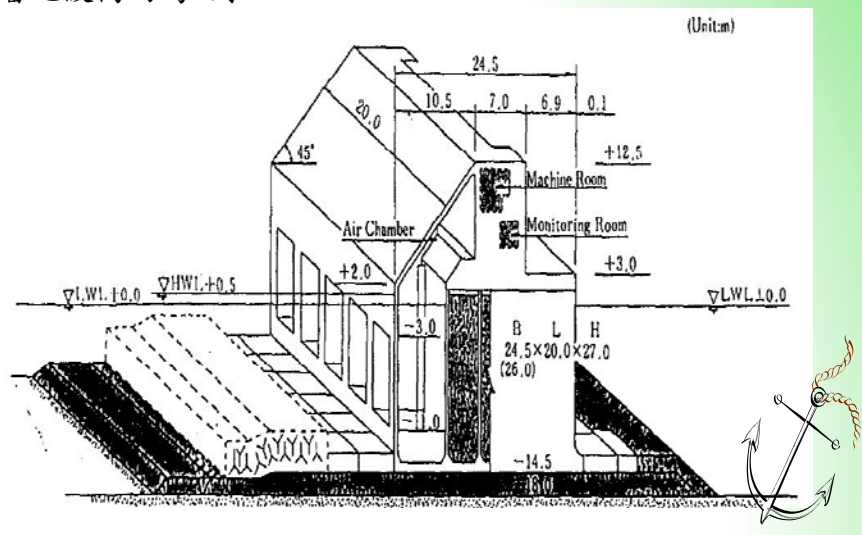


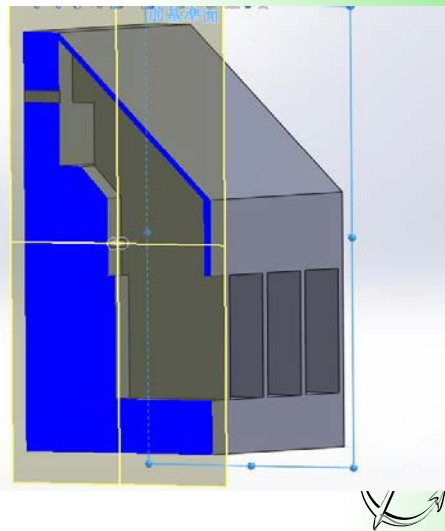
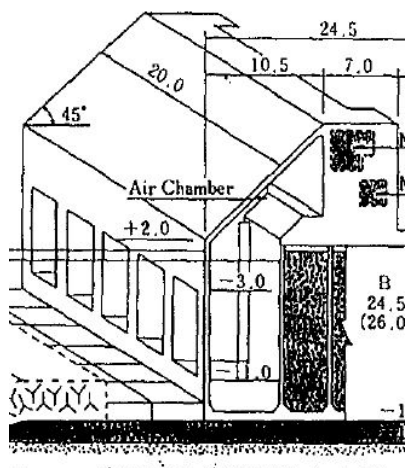
5. 波浪發電複合式防波堤應用及結構安全分析



波能轉換模擬-酒田港之OWC尺寸

- 當地波高約為2到3m

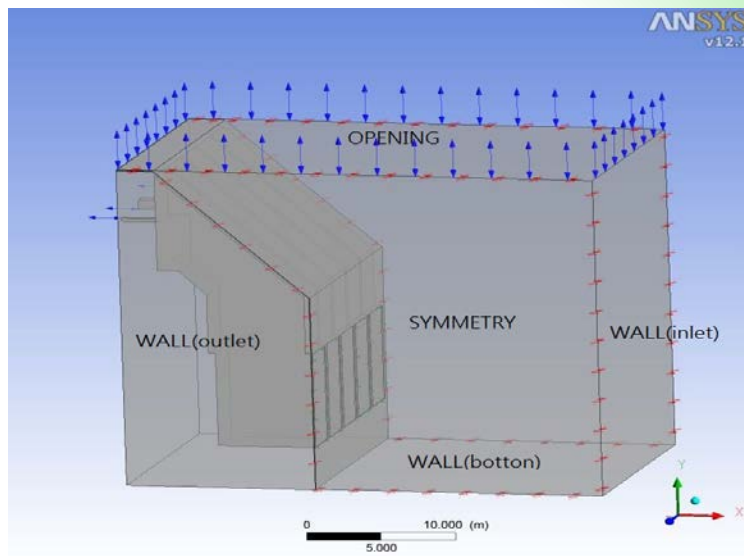




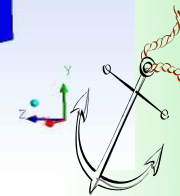
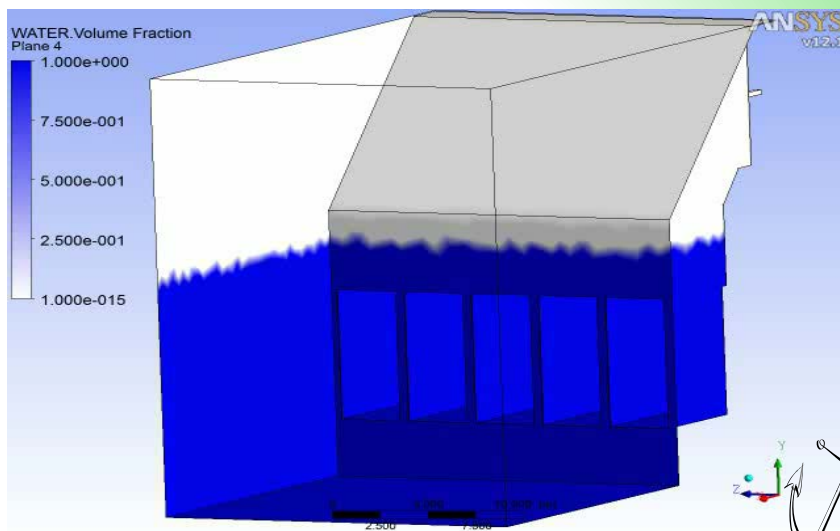
ANSYS CFX數值模擬

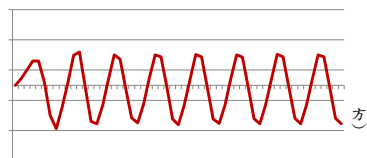
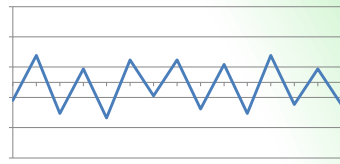
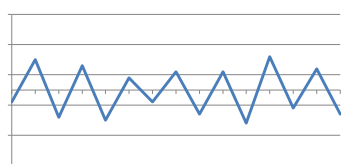
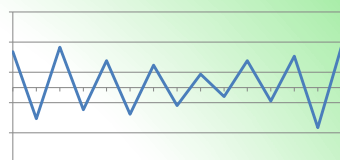
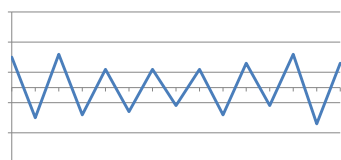
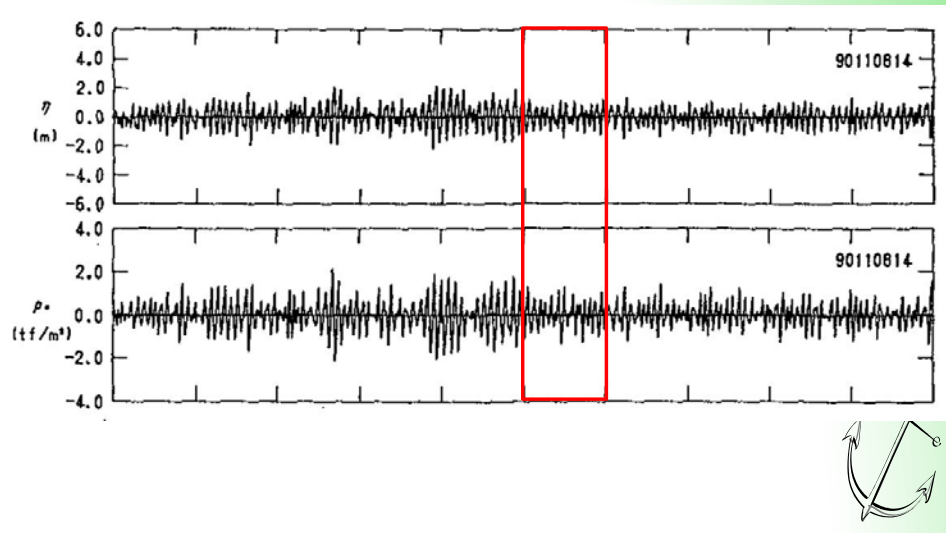
- 1.導入幾何建置其數值模型:
- 2.生成網格透過ANSYS Workbench將模型網格化:
- 3.設置流體介值的物理及化學屬性:
- 4.設置邊界條件:
 - (1)入口邊界(inlet):
 - (2).出口邊界(outlet):
 - (3).開放邊界(opening):
 - (4).壁面邊界(wall):
 - (5).對稱邊界(symmetry):
- 5.求解:
- 6.後處理、定量化分析:

波能轉換-數值水槽建立

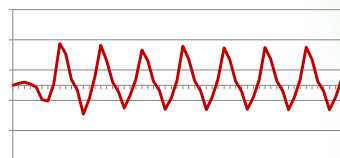


波能轉換-沒水狀況



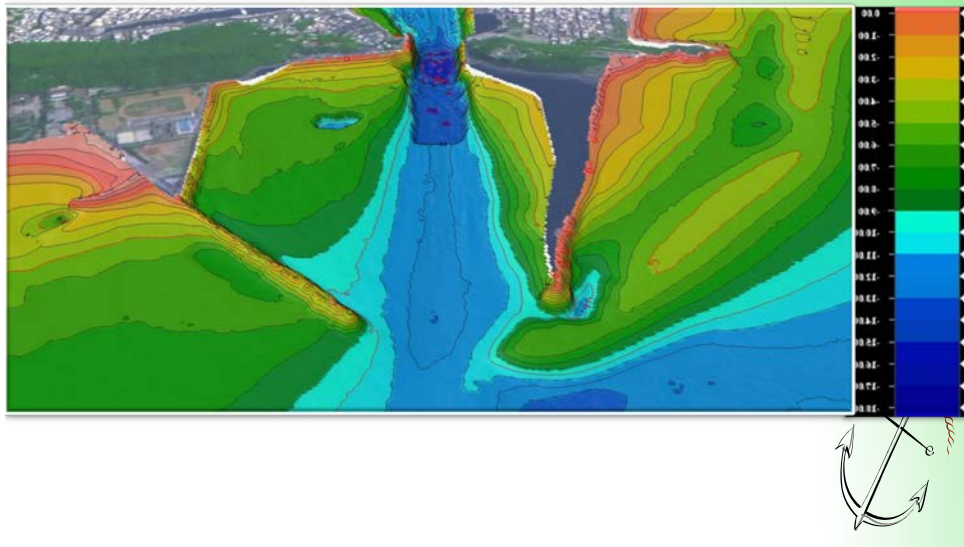


單位：秒



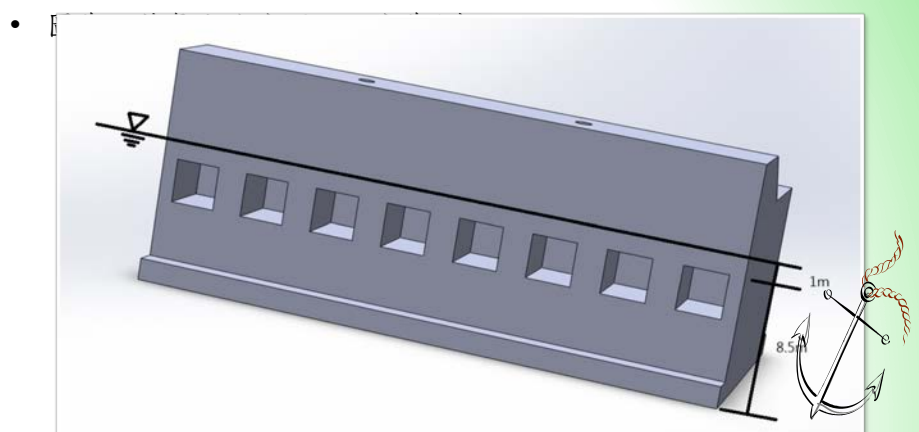
單位：秒



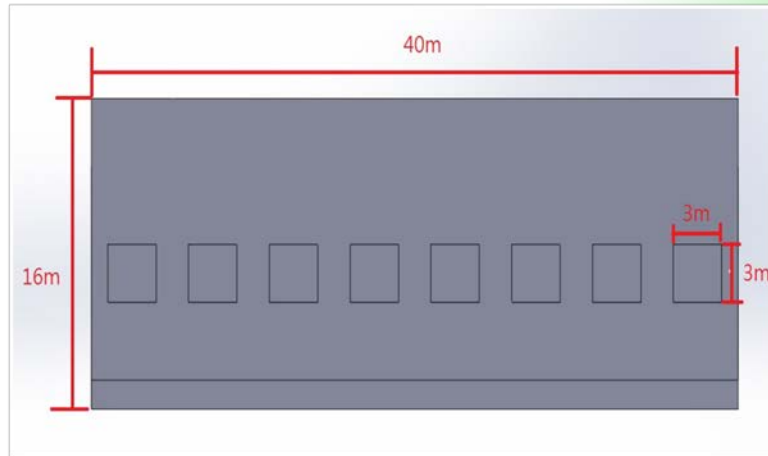


研究計畫模型設計圖－3D正視圖

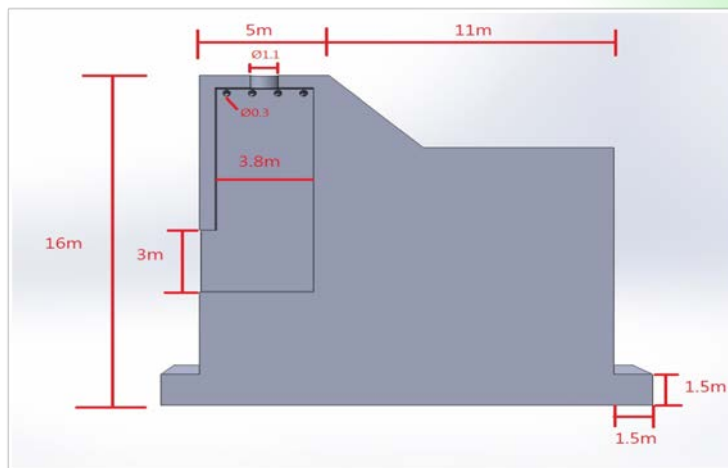
- 本防波堤迎波面之幾何形狀與尺寸係參考高雄港第一港口之北側防波堤沉箱大小，以及港灣結構物設計規範所給定。



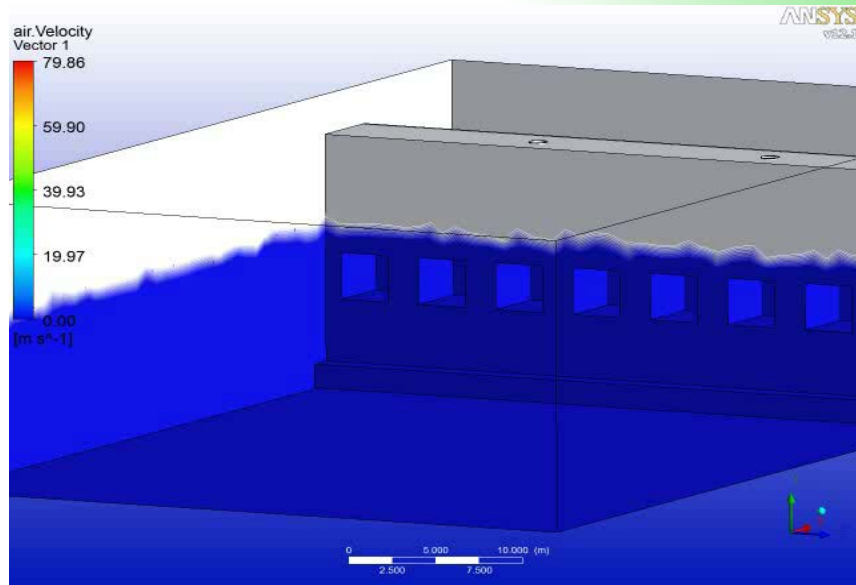
計畫模型設計圖－平面正視圖



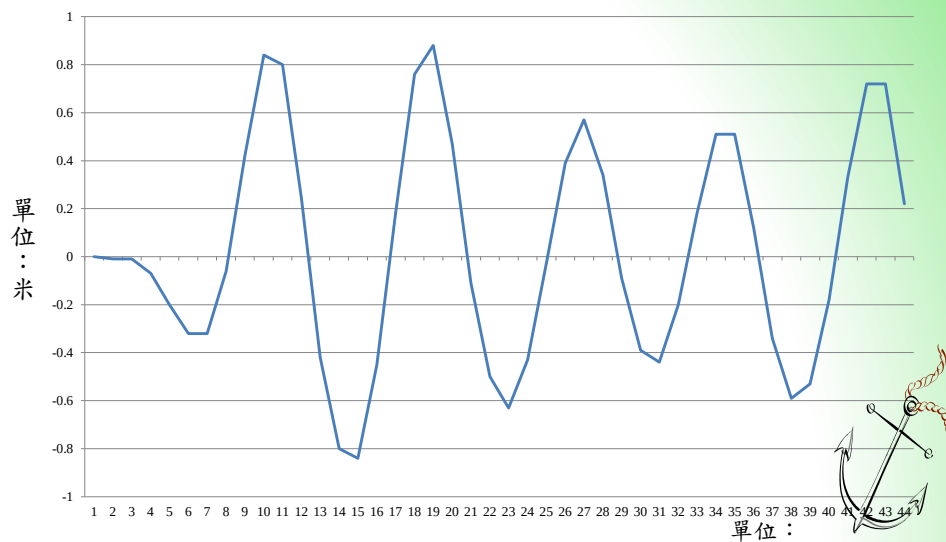
計畫模型設計圖－平面側視圖



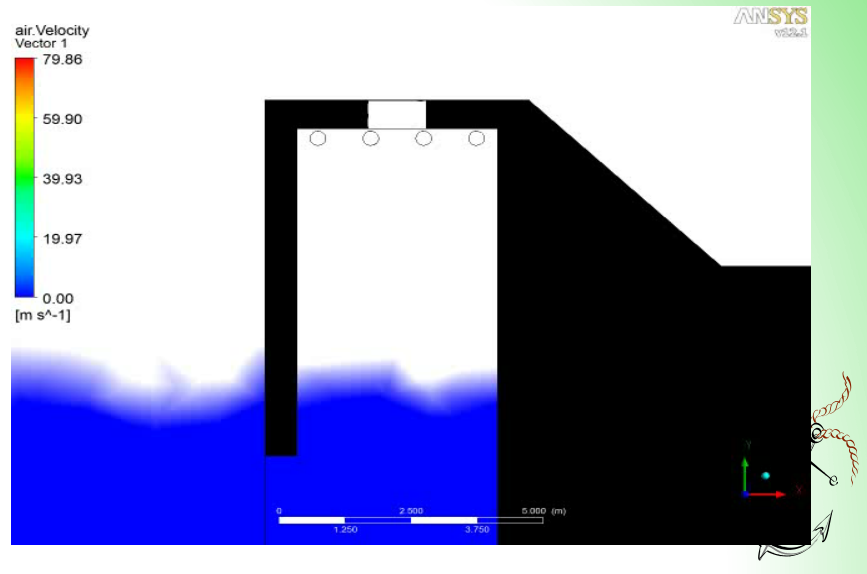
波能轉換-位於高雄港之模型示意圖



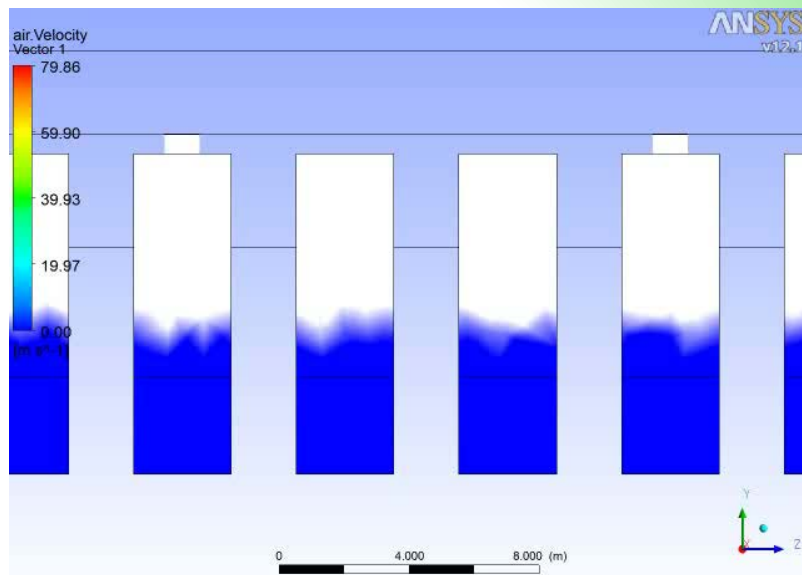
波能轉換-氣室內部波高(m)



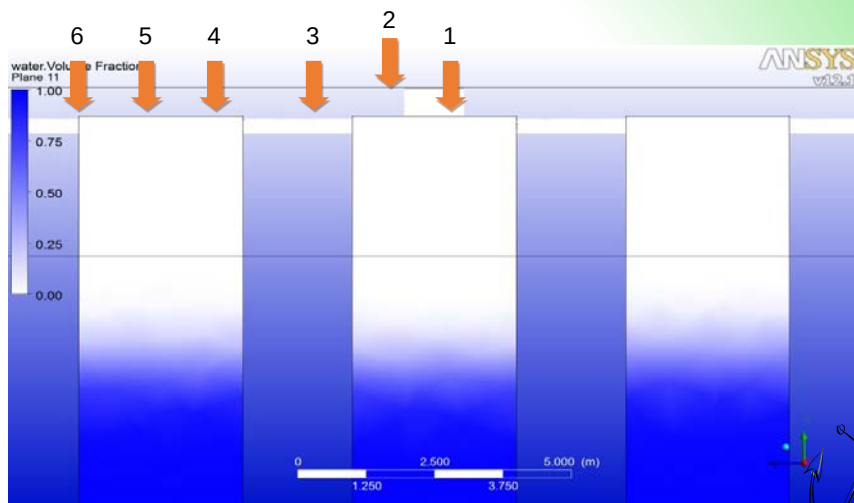
波能轉換-氣室內水位以及空氣流速



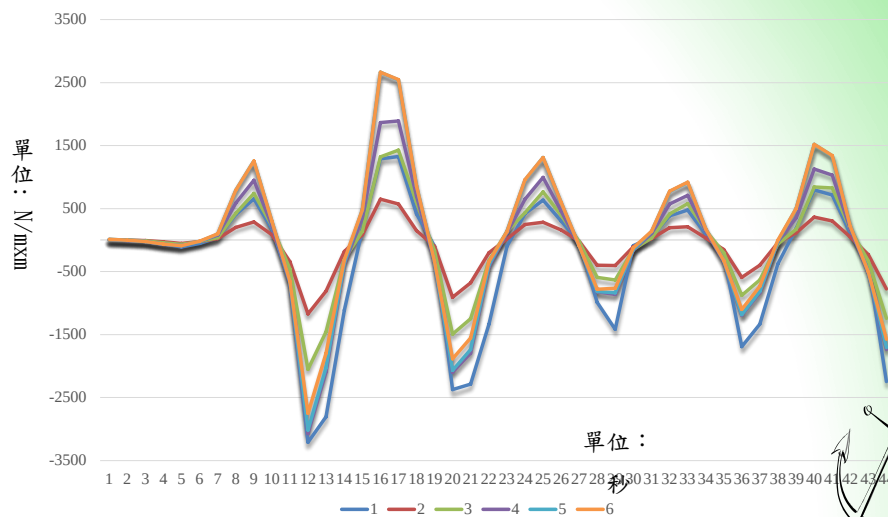
Inside the chamber - front view



波能轉換-監測點編號圖



波能轉換-綜合壓力變化圖



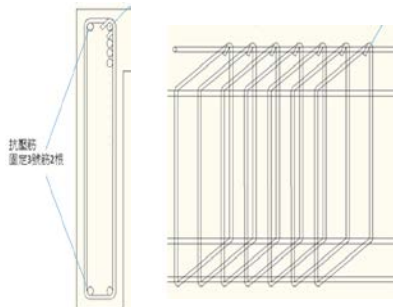
波能轉換-綜合壓力表

綜合壓力表			
監測點位置	平均值	最大值	最小值
編號1	719(Pa)	1325(Pa)	-3210(Pa)
編號2	265(Pa)	648(Pa)	-1172(Pa)
編號3	505(Pa)	1428(Pa)	-2053(Pa)
編號4	700(Pa)	1889(Pa)	-3072(Pa)
編號5	791(Pa)	2664(Pa)	-3017(Pa)
編號6	759(Pa)	2665(Pa)	-2751(Pa)

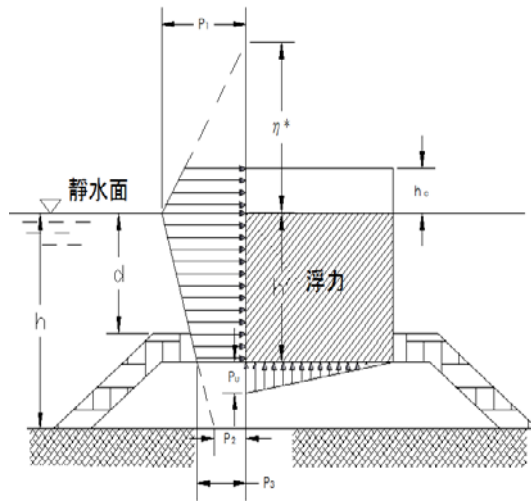


鋼筋混凝土設計原則

- 全部以雙排筋設計
- 皆設有抗裂縫之全封閉式剪力箍筋
- 依土木406-100規範採取拉力控制設計
- 抗壓筋經計算以最小3號2根
- 混凝土保護層(混凝土與鋼筋絕對距離)依土木406-100規範與海水接觸處固定在10cm



結構安全分析: 作用力-合田公式



$$H_{\text{Max}} = 1.8 H_{1/3}$$

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

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

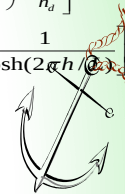
$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$P_3 = \alpha_3 P$$

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

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

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



迴歸期 (年) 波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
NW	5.3	9.7	5.2	9.6	4.9	9.3	4.5	8.9	4.1	8.5	3.9	8.3	3.5	7.9
WNW	6.2	10.5	6.1	10.4	5.7	10.0	5.3	9.7	4.8	9.2	4.6	9.0	4.1	8.5
W	6.6	10.8	6.5	10.7	6.0	10.3	5.5	9.8	5.0	9.4	4.8	9.2	4.3	8.7
WSW	8.9	12.5	8.6	12.3	7.8	11.7	6.9	11.0	6.0	10.3	5.7	10.0	4.8	9.2
SW	10.0	13.3	9.7	13.1	8.7	12.4	7.7	11.7	6.7	10.9	6.3	10.5	5.2	9.6
SSW	12.0	14.5	11.6	14.3	10.4	13.5	9.2	12.7	7.9	11.8	7.5	11.5	6.1	10.4
S	13.0	15.1	12.6	14.9	11.5	14.2	10.3	13.5	9.0	12.6	8.5	12.2	7.1	11.2
SSE	13.3	15.3	13.0	15.1	11.9	14.5	10.8	13.8	9.5	12.9	9.1	12.7	7.6	11.6

註：1. 依據 1940~2009 年間之颱風資料推算。

2. 推算目標區為 120.26°E, 22.47°N。

4. $T_s = 4.2 \times H_s^{0.5}$ 。

5. H_s 單位為 m, T_s 單位為 sec。

台灣港灣構造物動態資訊管理系統

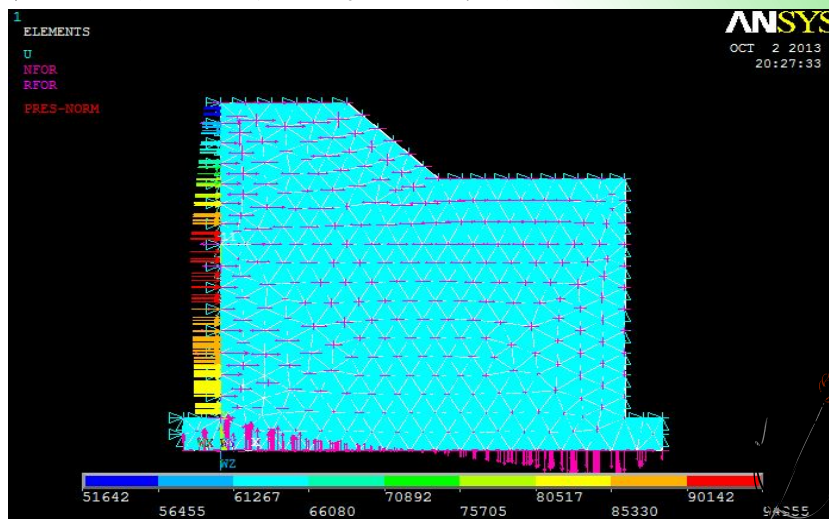
表 4-5.1 水深-週期-波長-波速關係表

週期(sec) 水深(m)	3		4		5		6		7		8		9		10	
	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)	波長 (m)	波速 (m/sec)
0.5	6.39	2.13	8.67	2.17	10.92	2.18	13.16	2.19	15.39	2.20	17.62	2.22	19.81	2.20	22.07	2.21
1.0	8.69	2.90	11.99	3.00	15.23	3.05	18.44	3.07	21.62	3.09	21.78	3.10	27.91	3.10	31.10	3.11
1.5	10.22	3.40	14.37	3.59	18.40	3.68	22.37	3.73	26.28	3.75	30.19	3.77	34.08	3.79	37.95	3.79
2.0	11.30	3.76	16.22	4.05	20.91	4.19	25.58	4.26	30.11	4.31	34.70	4.33	39.19	4.35	43.68	4.37
2.5	12.10	4.03	17.71	4.43	23.10	4.62	28.31	4.72	33.46	4.78	38.56	4.82	43.63	4.85	48.67	4.87
3.0	12.68	4.23	18.95	4.74	24.91	4.98	30.71	5.12	36.37	5.20	42.01	5.25	47.58	5.29	53.23	5.31
3.5	13.10	4.37	19.99	4.99	26.52	5.30	32.83	5.47	39.03	5.57	45.13	5.61	51.18	5.69	57.19	5.72
4.0	13.40	4.47	20.84	5.21	27.93	5.59	34.75	5.79	41.42	5.92	47.98	6.00	54.48	6.05	60.92	6.09
4.5	13.61	4.54	21.58	5.39	29.18	5.81	36.49	6.08	43.61	6.23	50.61	6.33	57.53	6.39	61.40	6.41
5.0	13.76	4.59	22.18	5.55	30.29	6.06	38.07	6.34	45.63	6.52	53.05	6.63	60.38	6.71	67.61	6.76
6.0	13.92	4.64	23.12	5.78	32.17	6.43	40.81	6.81	49.21	7.04	57.47	7.18	65.58	7.28	73.68	7.37
7.0			23.76	5.94	33.67	6.73	43.18	7.20	52.38	7.49	61.39	7.67	70.20	7.80	78.91	7.89
8.0			24.19	6.05	34.86	6.97	45.20	7.53	55.15	7.88	64.87	8.11	74.36	8.26	83.77	8.38
9.0			24.47	6.12	35.81	7.16	46.89	7.82	57.60	8.23	68.01	8.50	78.18	8.69	88.21	8.82
10.0			24.65	6.16	36.56	7.31	48.38	8.06	59.80	8.54	70.85	8.86	81.67	9.08	92.33	9.23
12.0			24.81	6.21	37.61	7.52	50.69	8.45	63.46	9.06	75.82	9.48	87.86	9.76	99.63	9.97
14.0					38.22	7.61	52.38	8.73	66.36	9.48	79.96	9.99	93.13	10.35	106.1	10.61
16.0					38.57	7.71	53.57	8.93	68.68	9.81	83.36	10.42	97.75	10.86	111.8	11.17

港灣構造物設計基準修訂(交通部運輸研究所)

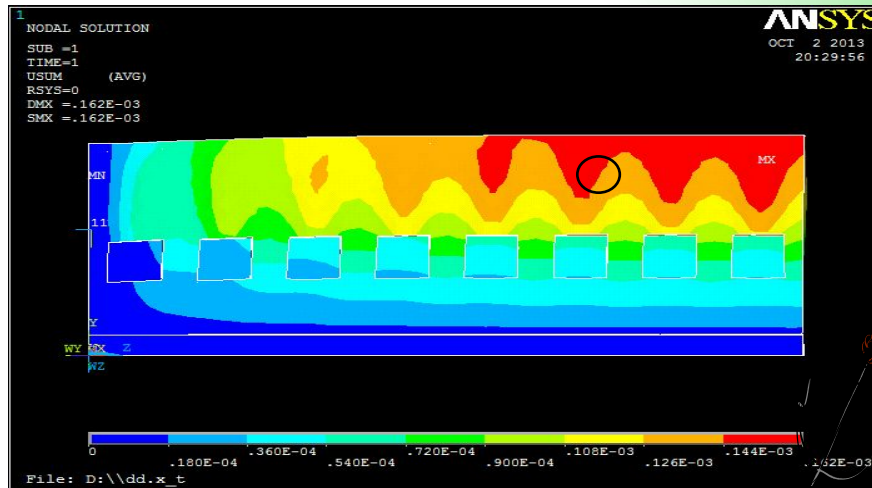
結構安全分析-波力分佈圖(側視圖)

- 最大波浪作用力於靜水面處，值約為95,000Pa

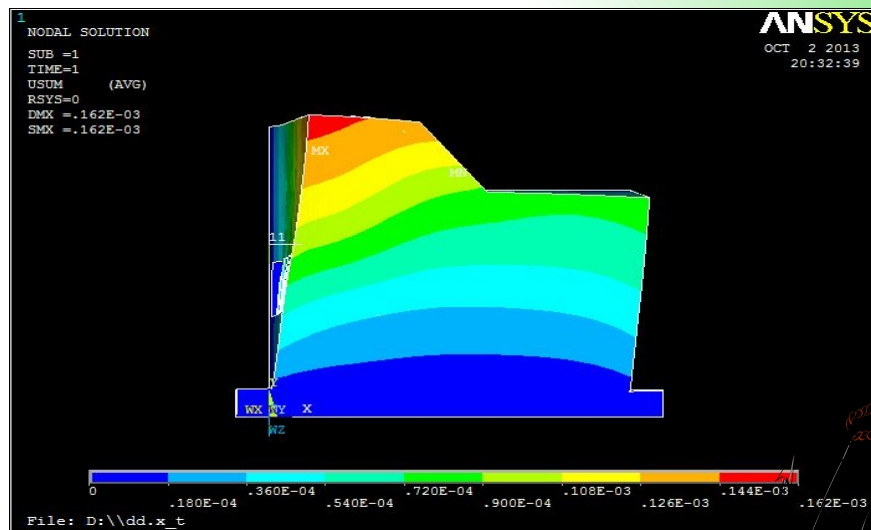


結構安全分析-變形結果(正視)

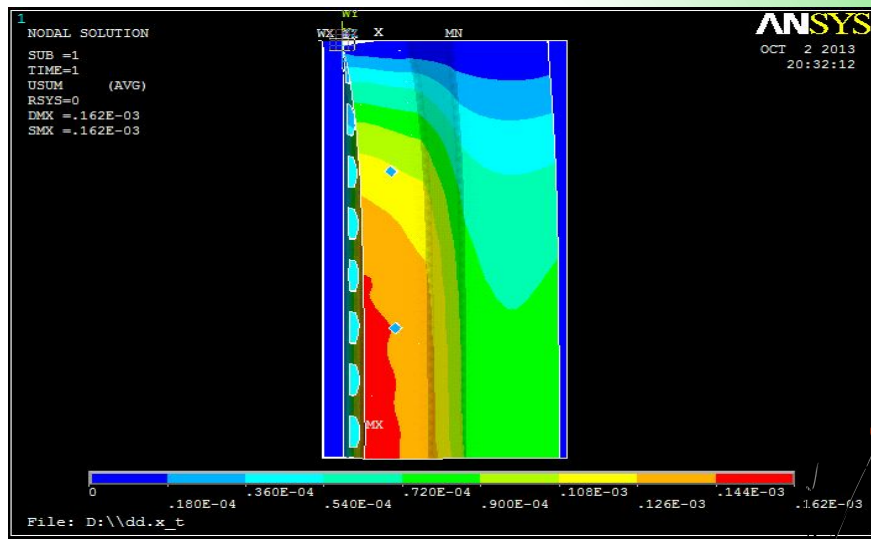
- 彈性係數設定為30GPa，拘束面為防波堤之底面及右側面，最大位移發生在圖中的MX點(黑圈處)，其值約為0.16mm



結構安全分析-變形結果(側視)

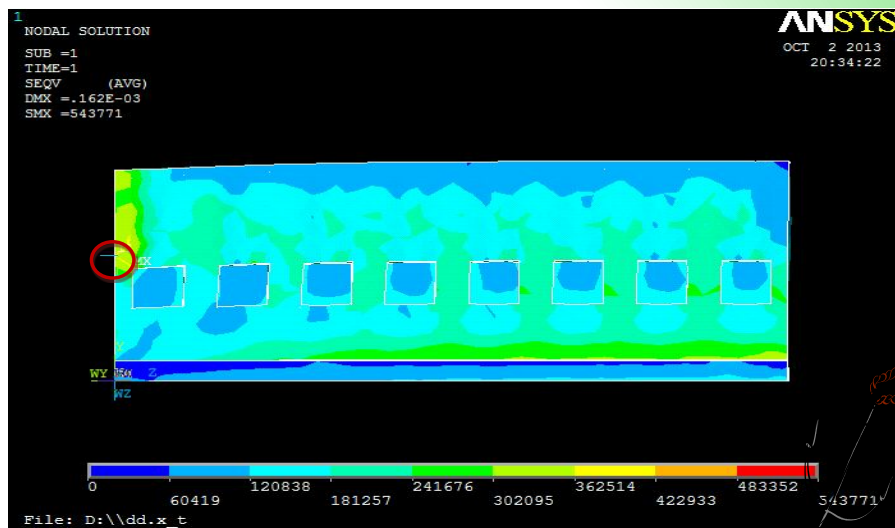


結構安全分析-變形結果(上視)

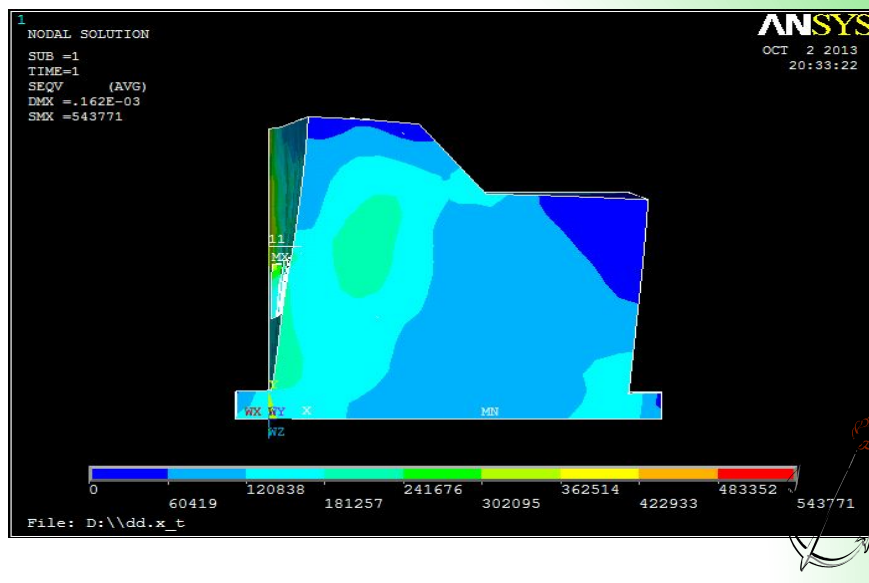


結構安全分析-破壞應力圖(正視)

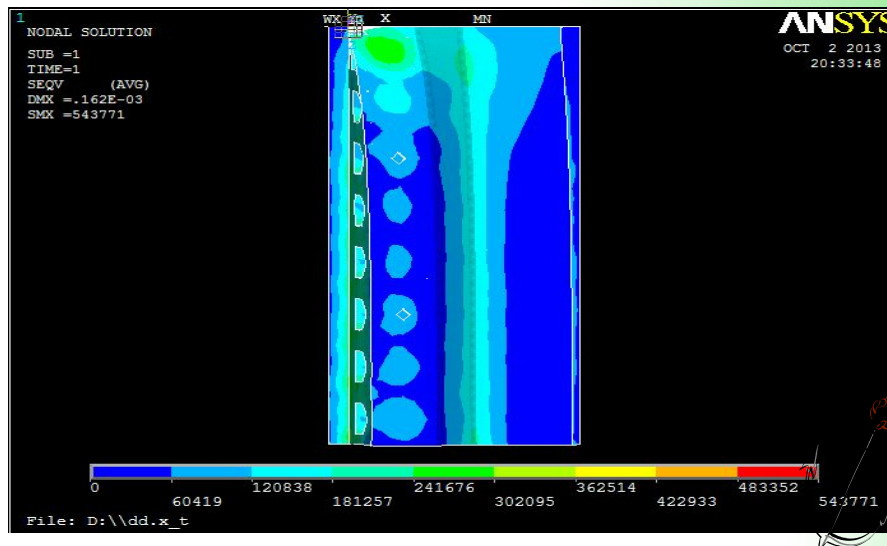
- 最大Von Mises發生在圖中的MX點(紅圈處)，其值約為561970Pa



結構安全分析-破壞應力圖(側視)

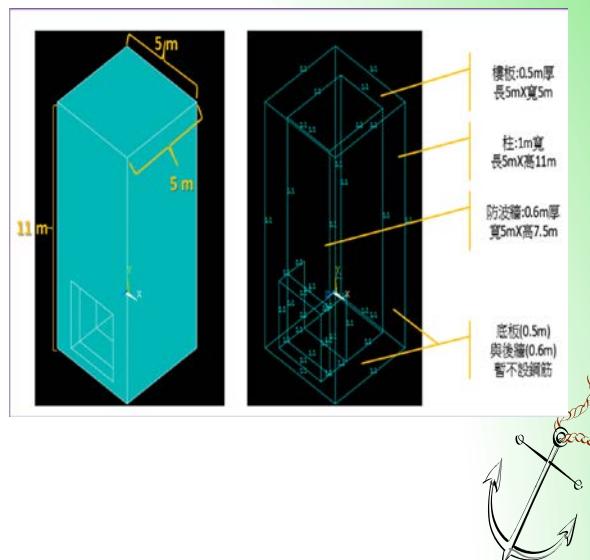
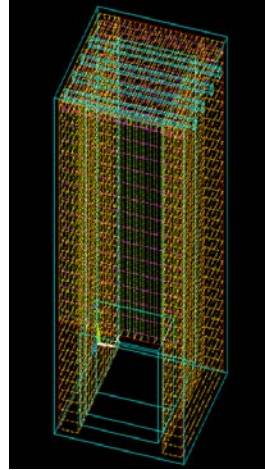


結構安全分析-破壞應力圖(上視)



氣室局部ANSYS MAPDL數值模擬

- 1.設置各材料性質
- 2.繪製幾何建置其模型
- 3.將模型網狀分割
- 4.設置邊界條件
- 5.求解



分析結果1—應變圖

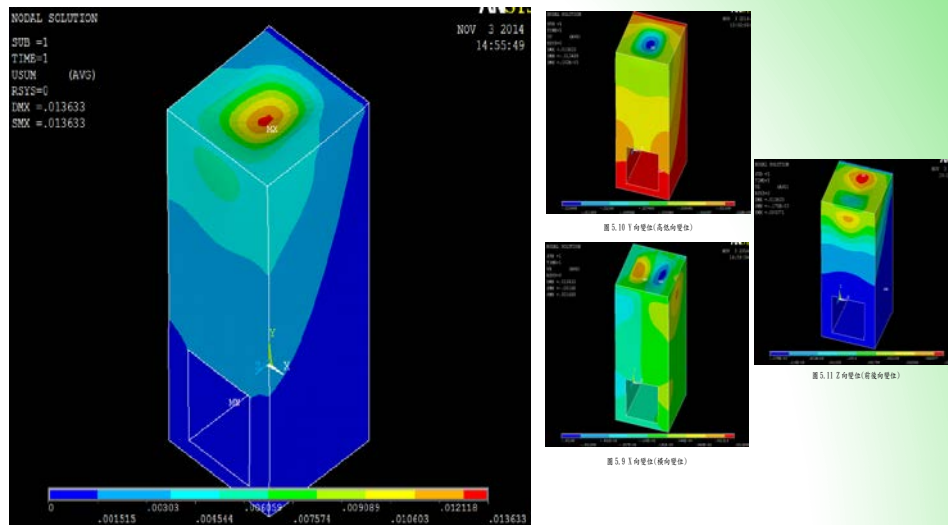


圖 5.8 整體變位

分析結果2—混凝土可能裂縫

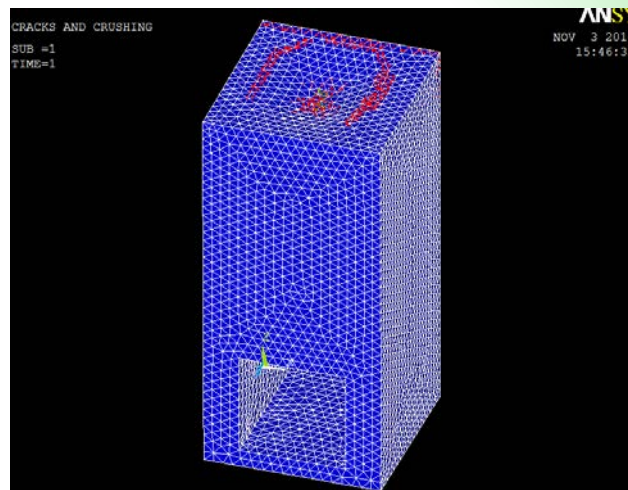


圖 5.12 混凝土裂痕情形如圖

結構安全分析結果－破壞應力分析

- 混凝土材料屬於脆性材料，脆性材料並無明顯的降伏現象，脆性材料之絕對最大的主應力(正向應力)若達到拉伸試驗之破壞強度時即會破裂，因此若結構是由脆性材料製成，必須使用其他準則來判斷材料是否破壞，例如最大正向應力準則。
- 於「畸變能破壞理論」中，主要以 von Mises 應力來判別材料是否發生破壞。若 Mises 應力小於或等於降伏應力，材料為安全，反之則為破壞。
- 混凝土之劈裂抗拉強度需依據 CNS 3801 試驗來得知，但常重混凝土抗拉強度一般約為抗壓強度開根號的 0.8 倍 (0.8)，因此由本研究當初給定之混凝土抗壓強度可約略推出抗拉強度約為 2.94MPa，約為破壞應力之 5.2 倍。

6. 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析



6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

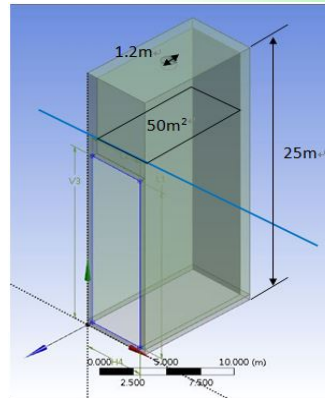
沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數(波浪及固定幾何參數)

選定三組波高以及五組波浪週期，總共15組波浪尖銳度

波高H	1.5m	2m	2.5m		
週期T	6s	7.5s	9s	10.5s	12s
水深	20m	20m	20m	20m	20m

固定幾何參數:

出氣孔直徑	1.2m
氣室蓋水面積	50m ²
壁厚	0.5m
外部高	25m



6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

沉箱式防波堤結合波能轉換系統幾何參數(無因次幾何變數)

1. 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。

波浪週期 無因次氣室長	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

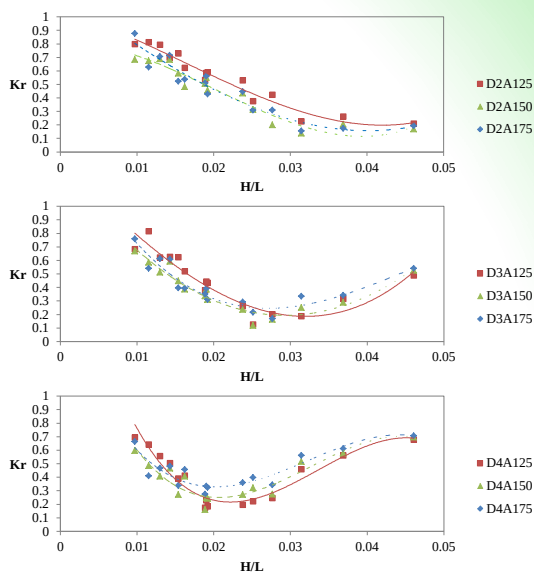
2. 無因次前牆沒水深(D):

無因次前牆開口沒水深分別為入射波高之2倍、3倍、4倍

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

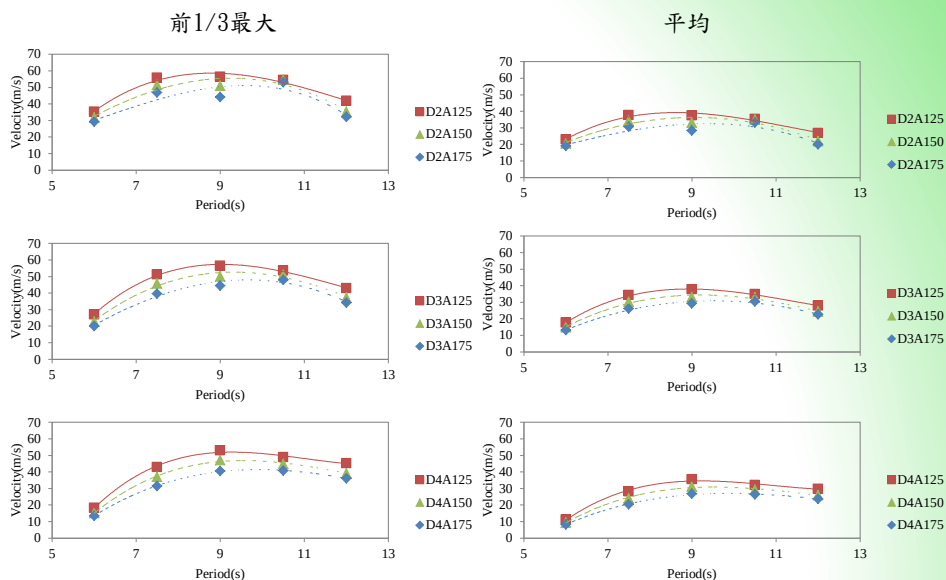
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

無因次氣室長度變化之影響-反射率



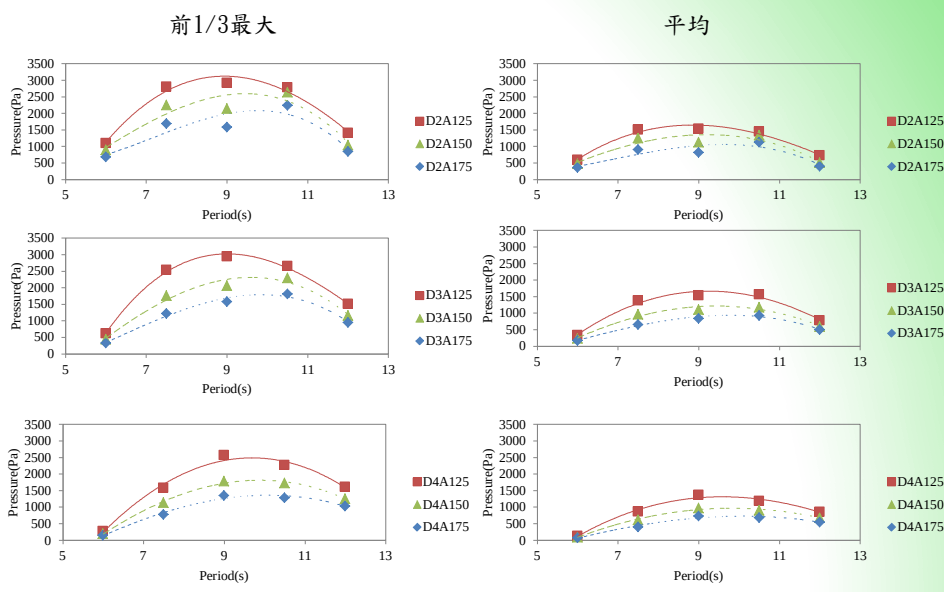
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

無因次氣室長度變化之影響-氣流速度($H=2.5m$)



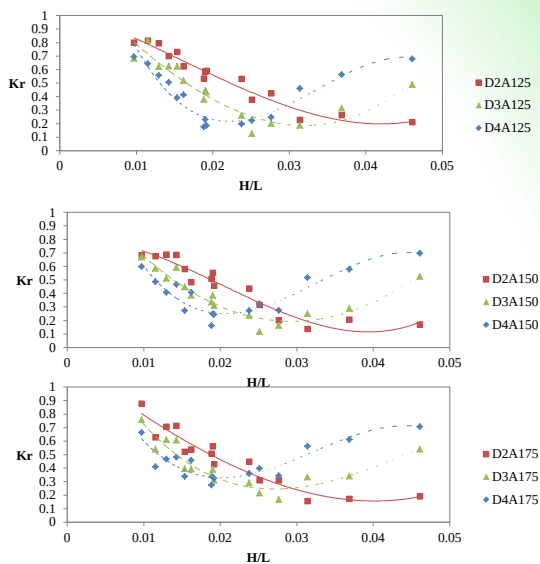
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

無因次氣室長度變化之影響-氣室壓力(H=2.5m)



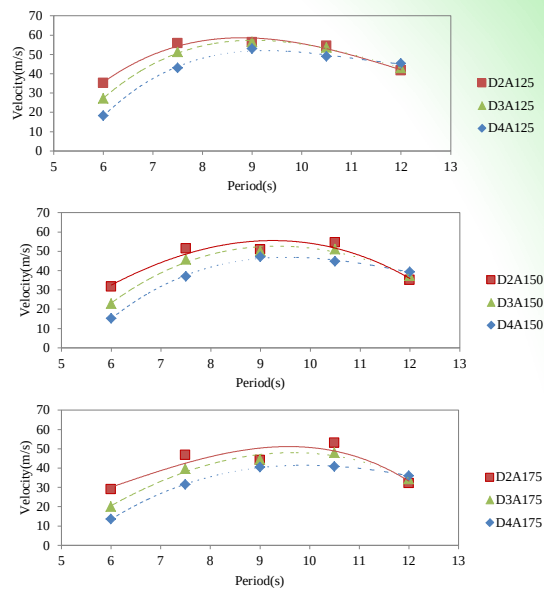
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

無因次沒水深變化之影響-反射率



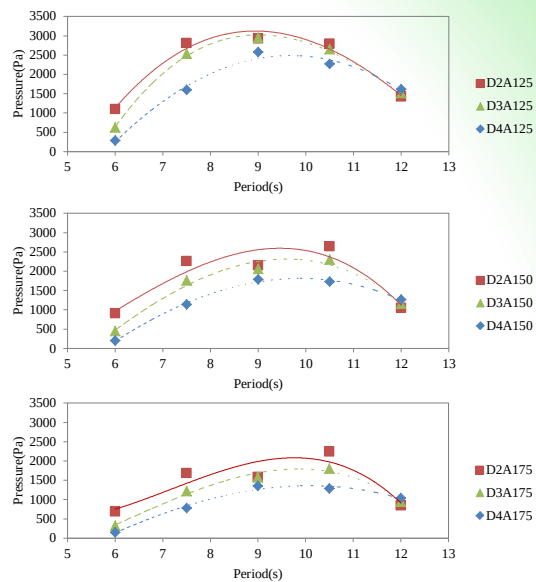
6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

無因次沒水深變化影響-前1/3最大氣流速度(H=2.5m)



6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

無因次沒水深變化之影響-前1/3大壓力(H=2.5m)



分析結果討論

- 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改變，其中以無因次氣室長度0.125有較小值出現。
- 無因次氣室長度0.125不論何種波浪週期所產生之風速皆大於另兩者，因此可以推論無因次氣室長度越小其產生之風速越大。
- 隨著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。
- 無論何種波浪條件下，無因次前牆開口沒水深越小會有較佳之轉換效果。

7. 實驗模型設計及水工試驗規畫

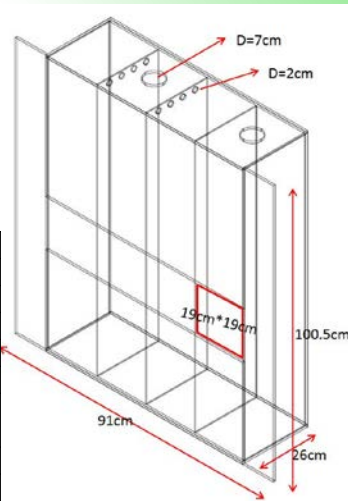


7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗模型製作

- 本實驗考慮縮尺為1/16，則實際水深為9.5公尺，模型試驗水深為0.6公尺。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、以及高100.5cm如圖所示。

parameter	Test.1	Test.2
模型總長	26 cm	26 cm
模型總寬	81+10 cm	81+10 cm
模型總高	100.5 cm	100.5 cm
氣室下方開口寬*高	19cm*19cm	19cm*53.5cm
氣室內部長	24 cm	24 cm
沒水深(靜水深至開口上緣)	6 cm	6 cm
出風口直徑	7 cm	7 cm
氣室連通洞直徑	2 cm	2 cm



水槽試驗模型尺寸圖

7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗儀器及設備

造波水槽



造波機



波高計



訊號增幅器



擷取卡



訊號放大器



風速計



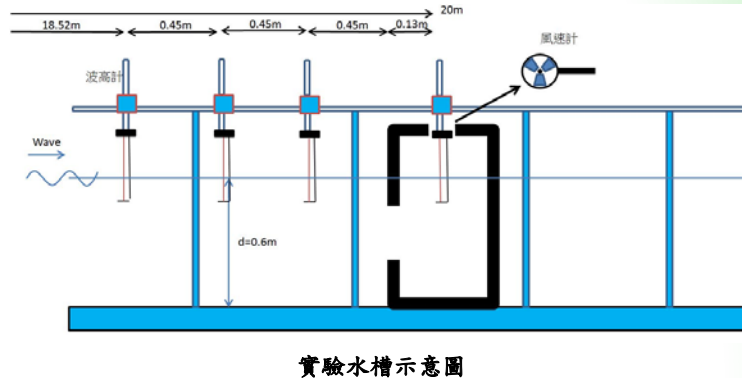
7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗佈置

- 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 $x > 0.1L$



7 實體模型設計及水工試驗規畫

實驗參數設定

- 本實驗使用模型，尺寸長、寬、高各為26cm、81cm、100.5cm，實驗有六組不同週期，及五組不同波高，如表7-2所示，對同一試驗模型，將進行30組不同波浪參數之實驗。
- 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。

Parameter	Modal	Prototype
週期 T(sec)	1 sec	4 sec
	1.2 sec	4.8 sec
	1.4 sec	5.6 sec
	1.6 sec	6.4 sec
	1.8 sec	7.2 sec
	2 sec	8 sec
波高 H(cm/m)	4 cm	0.64 m
	6 cm	0.96 m
	8 cm	1.28 m
	10 cm	1.6 m
	12 cm	1.92 m

實驗模型

實驗模型



內部氣室波高計



內部氣室波高計位置



模型架設於水槽中情形



8. 水工模擬試驗結果與分析



6 波浪發電複合式防波堤試驗參數分析

水工模擬試驗波浪參數及幾何參數

波高6.25cm週期1.75sec波浪條件與數值模擬做比較，以及選定五組波高以及六組波浪週期，總共31組波浪條件

模型I是依據數值模擬模型，以1:16的縮尺進行水工模擬試驗

模型II是依據模型I將其迎波面之開口面積由模型I 19cm*19cm改為模型II 19cm*53.5cm，模型II模型開口面積為模型I開口面積的2.8倍。

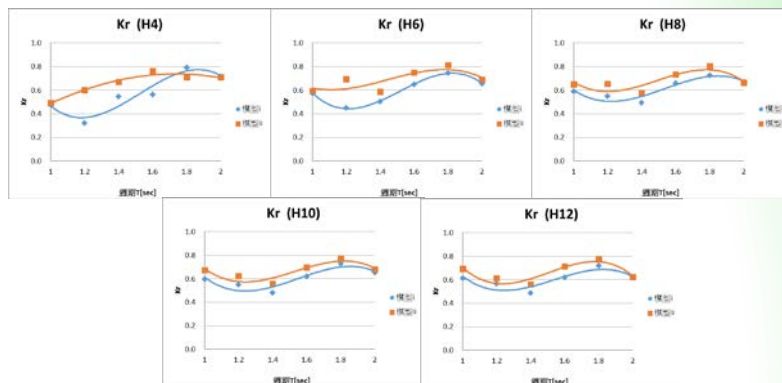
探討：其波浪條件對其對應產生之反射率、氣流速度、內部波高及其效能

parameter	Model I	Model II
模型總長	26 cm	26 cm
模型總寬	81+10 cm	81+10 cm
模型總高	100.5 cm	100.5 cm
氣室下方開口 寬*高	19cm*19cm	19cm*53.5cm
氣室內部長	24 cm	24 cm
沒水深(靜水深 至開口上緣)	6 cm	6 cm
出風口直徑	7 cm	7 cm
氣室連通洞直徑	2 cm	2 cm

7 實體模型設計及水工試驗規畫

模型I與模型II於不同波浪條件下之比較-反射率

模型I		波高H[cm]						模型II		波高H[cm]					
反射率Kr		4	6	8	10	12		反射率Kr		4	6	8	10	12	
週期 T[sec]	1	0.4776	0.5730	0.5889	0.5970	0.6125		週期 T[SEC]	1	0.4887	0.5935	0.6500	0.6731	0.6915	
	1.2	0.3200	0.4508	0.5489	0.5496	0.5669			1.2	0.5987	0.6924	0.6513	0.6213	0.6120	
	1.4	0.5474	0.5019	0.4951	0.4801	0.4876			1.4	0.6693	0.5870	0.5731	0.5575	0.5608	
	1.6	0.5645	0.6480	0.6590	0.6199	0.6200			1.6	0.7623	0.7481	0.7333	0.6956	0.7116	
	1.8	0.7922	0.7470	0.7263	0.7300	0.7187			1.8	0.7073	0.8102	0.8009	0.7696	0.7703	
	2	0.7172	0.6543	0.6705	0.6516	0.6155			2	0.7104	0.6904	0.6609	0.6798	0.6238	

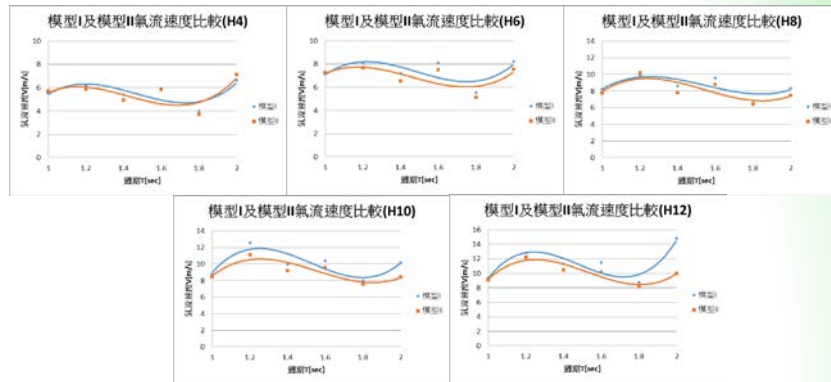


7 實體模型設計及水工試驗規畫

模型I與模型II於不同波浪條件下之比較-氣流速度

模型I		波高H[cm]					
週期 T[sec]	氣流速度[m/s]	4	6	8	10	12	
	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	

模型II		波高H[cm]					
週期 T[sec]	氣流速度[m/s]	4	6	8	10	12	
	1	5.7	7.26	7.78	8.46	9.08	
	1.2	5.87	7.7	10.18	11.1	12.26	
	1.4	4.93	6.55	7.83	9.22	10.47	
	1.6	5.86	7.53	8.79	9.58	10.18	
	1.8	3.72	5.13	6.47	7.57	8.19	
	2	7.11	7.56	7.47	8.41	10.01	

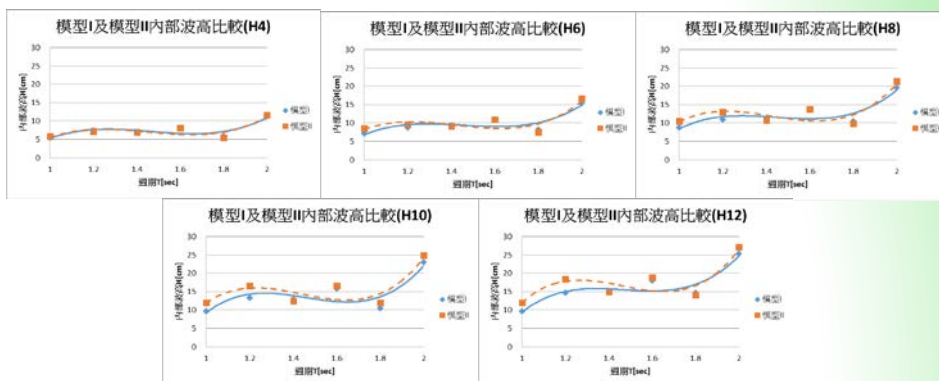


7 實體模型設計及水工試驗規畫

模型I與模型II於不同波浪條件下之比較-內部波高

模型I		波高H[cm]					
週期 T[sec]	內部波高[cm]	4	6	8	10	12	
	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	

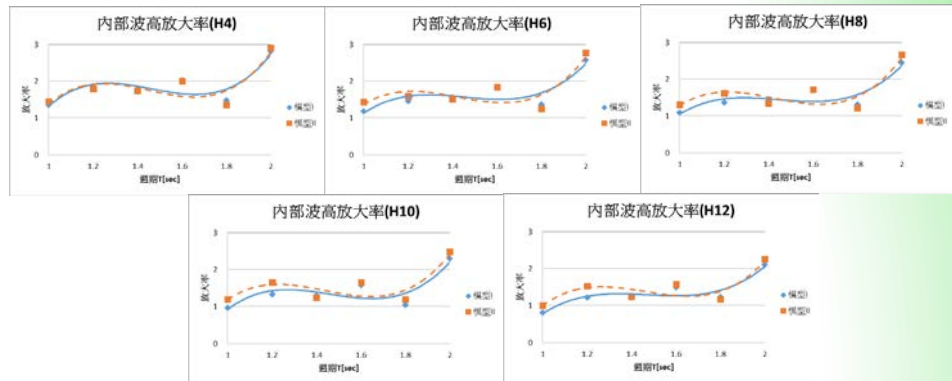
模型II		波高H[cm]					
週期 T[sec]	內部波高[cm]	4	6	8	10	12	
	1	5.78	8.60	10.52	11.96	12.04	
	1.2	7.15	9.57	12.99	16.51	18.34	
	1.4	6.97	9.10	10.75	12.45	14.99	
	1.6	8.05	11.01	13.78	16.52	18.89	
	1.8	5.46	7.56	9.78	11.98	14.15	
	2	11.64	16.64	21.36	24.90	27.15	



7 實體模型設計及水工試驗規畫

模型I與模型II於不同波浪條件下之比較-內部波高放大率

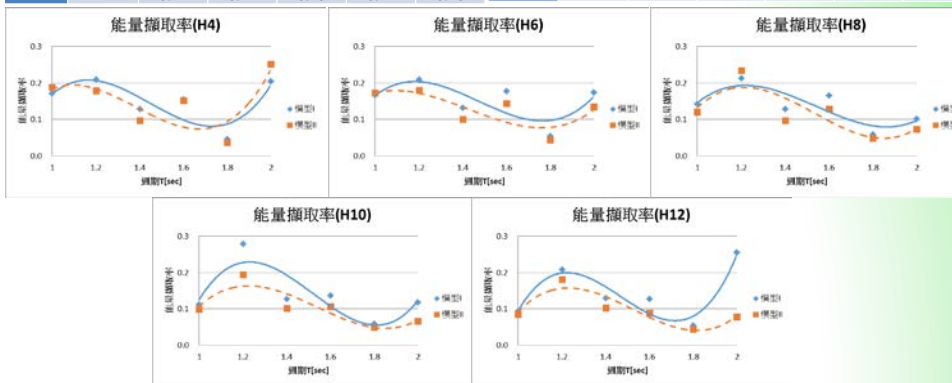
模型I		波高H[cm]					模型II		波高H[cm]				
內部波高放大率		4	6	8	10	12	內部波高放大率		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	1.36	1.19	1.10	0.97	0.81	週期 T[sec]	1	1.45	1.43	1.32	1.20	1.00
	1.2	1.86	1.47	1.37	1.34	1.23		1.2	1.79	1.59	1.62	1.65	1.53
	1.4	1.73	1.56	1.41	1.31	1.23		1.4	1.74	1.52	1.34	1.24	1.25
	1.6	2.04	1.84	1.70	1.59	1.50		1.6	2.01	1.83	1.72	1.65	1.57
	1.8	1.48	1.37	1.31	1.05	1.23		1.8	1.36	1.26	1.22	1.20	1.18
	2	2.82	2.58	2.45	2.30	2.12		2	2.91	2.77	2.67	2.49	2.26



7 實體模型設計及水工試驗規畫

模型I與模型II於不同波浪條件下之比較-能量擷取率

模型I		波高H[cm]					模型II		波高H[cm]				
能量擷取率 入射波能/氣流速度能		4	6	8	10	12	能量擷取率 入射波能/氣流速度能		4	6	8	10	12
週期 T[sec]	1	0.17	0.17	0.14	0.11	0.09	週期 T[sec]	1	0.19	0.17	0.12	0.10	0.08
	1.2	0.21	0.21	0.21	0.28	0.21		1.2	0.18	0.18	0.23	0.19	0.18
	1.4	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13		1.4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	1.6	0.16	0.18	0.17	0.14	0.13		1.6	0.15	0.14	0.13	0.11	0.09
	1.8	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05		1.8	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
	2	0.21	0.17	0.10	0.12	0.26		2	0.25	0.13	0.07	0.07	0.08



水工模擬試驗



水工模擬試驗模型I與模型II結果分析

- 開口率較小的模型I產生之反射率小於開口率較大的模型II
- 反射率在週期1.2sec有較小值發生，在週期1.8sec有較大值發生
- 開口率較小的模型I產生之氣流速度優於開口率較大的模型II
- 氣流速度在週期1.2sec有較大值發生，在週期1.8sec有較小值發生。
- 開口率較小的模型I之能量擷取率優於開口率較大的模型II
- 週期1.2sec有較大值發生，週期1.8sec有較小值發生。
- 綜合以上上述可知，其開口率較小可產生較大的氣流速度值，較小的反射率。開口率較大會產生較小的氣流速度值，較大的反射率。故可依使用之目的用途，搭配現地的波浪條件，選擇較適當的幾何模型設計。

9. 結論與建議



結論與建議

- 結論

- 本階段計畫中並計了兩組縮尺模型，以便在造波水槽中進行波浪模擬之實驗。在設計時依據全尺度之波能轉換系統，以及動力及運動相似度之考慮，設計為1/16縮尺之波能轉換系統。
- 完成波浪能擷取系統縮尺實體模型之建立，並於造波水槽中順利進行了，實體模擬之試驗，對於各項參數及對應之波浪性能均有實際之瞭解。
- 完成波浪能港灣構造物之安全及耐久性研究，結構物本體無論就變形檢視或受力狀態之應力變化，均處於安全範圍。而波能轉換系統之氣室結構，以鋼筋混凝土為建材，並根據內政部營建署訂定之暴露於氯離子環境混凝土之最低規定強度350(kgf/cm²)來設計，分析後均能處於安全範圍。



Thanks for your attention

請指教

已發表成果：

1. Chiu Y.-F., #Lee, H. H., C.-Y. Lin, and F.-T. Chang, 2014, "*Study on a Caisson Based OWC Wave Energy Converting System*", J. Advanced Materials Research, 2014 (EI Journal, to appear)
2. Chiu Y.-F., #Lee H. H., C.-H. Chen and F.-T. Chang (2014), "*Study on the Performance of a Caisson Breakwater Combined with Wave Power Converting System*", presented in Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE), Seoul, Korea, June 15-20, 2014

附錄四 期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-102-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(2/4)

執行單位：國立中山大學

審查日期：103 年 11 月 26 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
一、張憲國委員 1. 報告內容若引用資料應統一修改成一致性的敘述及編輯(如 P.17 及 18 頁底線)，收集的資料若不應用至本計畫目標上，可考慮放在附錄。以增加閱讀之流暢。 2. 第四章的理論介紹，能有系統地撰寫理論推導，不然要精簡敘述理論如何應用至本計畫，此章與後續內容似乎較無連結。 3. 第五章中計算結果條件是否可以考慮 Goda 的波浪分布(如果有)，不然比對截圖出來的數據似乎太過於粗糙，另外表 5.2 最大值居然小於極值	1. 感謝委員的建議與指教，本計畫已在報告中作修正。 2. 本計畫於第五章及第六章之模擬參數建立皆採用第四章之理論公式。 3. 因文獻年代久遠，資料來源較不完整，故目前僅能以此方法擷取數據。表 5.2 極值平均值為將所有最大值及最小值取其絕對值後所計算之平均值。	已依照委員意見辦理。 已依照委員意見辦理 已依照委員意見辦理。

的平均值。		
4. 模型試驗應著重在氣孔的速度及流量，反射率應不會此研究的重點，空氣的流速與流量是否可以用福祿數來模擬呢？	4. 因反射率為港灣結構體安全設計上之重要考量，故本計畫於探討擷取波浪能量的同時也探討其反射率是否會對港灣結構物產生影響。	已依照委員意見辦理。
5. 第八章模型試驗中的圖中曲線的意義為何，本計畫最後結論可以提供綠色能源防波堤的設計參考嗎？	5. 感謝委員建議與指教，此曲線為三次回歸線，方便觀察其趨勢變化。本計畫最後結論可以提供綠色能源防波堤的設計參考。	已依照委員意見辦理。
二、蕭松山委員		
1. 建議補列期中審查回覆處理情形。	1. 感謝委員建議與指教，已依照委員意見補上	已依照委員意見辦理。
2. 建議改善圖表符號說明、文字，提升報告書品質(請參閱報告書標示)。	2. 感謝委員建議與指教，已依照委員意見修改	已依照委員意見辦理。
3. 第六章試驗參數分析選用之三組波高、五組週期之依據理由為何？第七章實驗模型附採用之五組波高、六組週期依據又如何？兩者為何不同？	3. 第六章之三組波高、五組週期之依據理由為選用臺灣海域較發生之波浪條件作為探討各種波浪條件下與數值模型幾何變數之相互關係。第七章實驗設計目的為與第五章之數值模擬成果做比較，其採用之五組	已依照委員意見辦理。

4.實驗布置圖 7.2 波高計位置決定建議依式(7.9)Goda 兩點法之要求詳述之。另 1/16 縮尺之決定理由(P.172)敘述建議改寫。 5.第六章、第七章探討許多反射率變化似乎與發電能量關聯性有限，建議再加強探討氣流部分的分析及反射率對防坡堤安全探討。	波高、六組週期是依據造波機輸出範圍之限制。 4.已依照委員意見修改 5.感謝委員建議，本計畫將在後續的研究中作探討。	已依照委員意見辦理。 已依照委員意見辦理。
三、余進利委員 1. 綠色能源在目前國際能源議題上是一個相當重要且新興的議題，我國四面環海，具有豐沛之海洋能源，若能有效開發，對我國綠色能源產業及替代能源具有重大之實用性，研究團隊之貢獻十方值得讚許。 2.由於我國能源多仰賴進口且為獨立電網，故電力來源之穩定度相對而言十分重要；我國雖然四面環海，但海洋災害	1.感謝委員讚許。 2.感謝委員建議，本計畫將在後續的研究中作探討。並已於第九章報告中提出可行之構想。	已依照委員意見辦理。 已依照委員意見辦理。

亦不在少數，尤以颱風最為常見，是否影響供電穩定度?請研究團隊說明各國應用案例中是否有類似之案例。若有，請於報告中補充說明；若無，亦請研究團隊於報告中提出可行之構想。		
3.若以現行試驗結果，可否估算發電效率、最大發電量以及發電效應(例如可供電範圍，可供多少人使用等)?	3.感謝委員建議與指教，目前尚在探討波能轉換成風能階段，於後	已依照委員意見辦理。
4.波浪發電是否有其他限制條件?若有，請研究團隊於書面報告中補充說明。	4.感謝委員建議與指教，本計畫之波能轉換系統之限制為無法設置於潮差過大之區域，將於後續研究中進行相關之探討。	已依照委員意見辦理。
四、張金機委員 1.試驗水槽長度不足，造波機與試體距離僅 12M，周期 1.0-2.0sec，採用 1/16 縮尺，水深 60cm，波長為 1.55m 至 4.3m，造波機與試體間能有 1.1-2.8 個波。造成反射波重複影響，如何選取樣本相當困難。	1.感謝委員建議與指教，分析反射時採用反射波浪到達造波板之前此區段所擷取之波浪資料來做分析。	已依照委員意見辦理。

2.從附錄 A 波浪延時所錄同一測點呈現長周期波動現象，且點與點間不一致，如何取向是否可採 Goda 方式選擇再作分析。附錄 AB 波浪作用及風速延時關係如何建立？	3.感謝委員建議與指教，在附錄 A 的觀察下長周期波動現象並不明顯。	已依照委員意見辦理。
3.試驗呈現相當一次性結果，但為何造成如此現象，建議再加以分析。例如反射率為何在 1.8S 最大。是否因水槽有距 12M 與周期 1.8sec，波長 4m，造成共振現象，測點 3.4 是否接近節點，測得偏低之振福。	3.感謝委員建議與指教，本計畫此階段為波浪轉換效能之探討為主軸，將在後續的計畫研究中加入相關試驗之探討分析。	已依照委員意見辦理。
4.建議以模型試驗原型數值計算。再與模型試驗結果作檢驗。	4.感謝委員建議與指教，已於表 8.1 中相關對照。	已依照委員意見辦理。
五、蔡立宏委員 1. 數值計算防波堤模型之水深條件請補充。 2.第九章結論中建議說明報告研究成果。	1.感謝委員建議與指教，已於表 6.1 補充 2.感謝委員建議與指教，已於第九章結論中建議說明	已依照委員意見辦理。 已依照委員意見辦理。

	報告研究成果。	
3.無因次氣室長，無因次沒水深，用 A125、D2、D3…是否恰當。	3.感謝委員建議與指教，本計畫以此為模擬參數代號。	已依照委員意見辦理。
4. 報告格式請依本所規定編寫，錯字及標點符號請再檢查。	4.感謝委員建議與指教，已進行相關之修正。	已依照委員意見辦理。
5. 試驗水槽長較短，分析反射時須特別注意造波板反射問題。	5.感謝委員建議與指教，分析反射時採用反射波浪到達造波板之前此區段所擷取之波浪資料來做分析。	已依照委員意見辦理。