

99-124-7500

NSC：96-2918-I-172-001

花蓮港港池共振機制及改善 對策之研究



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 10 月

99-124-7500

NSC：96-2918-I-172-001

花蓮港港池共振機制及改善 對策之研究

著 者：蔡立宏

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 10 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

花蓮港港池共振機制及改善對策之研究 / 蔡立宏著.

--初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民 99. 10

面 ; 公分

ISBN : 978-986-02-4804-3 (平裝)

1.港埠管理 2.波動 3.臺灣

443.2

99019083

花蓮港港池共振機制及改善對策之研究

著 者：蔡立宏

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 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 99 年 10 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：200 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：1009903295

ISBN：978-986-02-4804-3 (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。

GPN : 1009903295

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：花蓮港港池共振機制及改善對策之研究			
國際標準書號 ISBN978-986-02-4804-3(平裝)	政府出版品統一編號 1009903295	運輸研究所出版品編號 99-124-7500	計畫編號 96-2918-I-172-001
主辦單位：港灣技術研究中心 主 管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 光碟製作：單誠基、馬維倫 聯絡電話：04-26587177 傳真號碼：04-26571329			研究期間 自 96 年 03 月 至 97 年 01 月
關鍵詞：港池共振；颱風；港池穩靜；改善對策；數值模式			
摘要： 花蓮港自從東防波堤擴建後，港池共振問題常造成船舶繫泊困難，人員登船及下船工作之危險性，更甚者造成船隻斷纜碰撞，導致船損或沈船之危險。如何解決共振問題一直為施政及專家學者所關切。本研究以 Lee 等人 (1998) 的港池共振波場數值模式為基礎，建置花蓮港港池共振數值模式，以有限元素法作數值模擬計算。模式中以緩坡方程式為控制方程式，利用不同的邊界條件求解，包括完全及部分反射邊界、透過邊界、能量損失(港口分流及底床摩擦)等，模式可適當模擬多變化的港灣結構物以及不同水深地形所造成之波浪折射、繞射、反射以及能量損失現象。本研究利用所建置之模式，探討不同改善佈置，其港池共振改善的效果。 本研究以 1994.6 提姆颱風所量測之現場波浪資料，作為模式修正及驗證之依據，驗證結果顯示所建置之數值模式在共振週期、共振強度以及共振的頻寬，均能與現場資料相近。本研究提出 10 種不同的改善佈置方案，包括拆除部分東防波堤、航道封閉、碼頭堤壁增加消波設施、增加突堤以及各式的改變港池形狀佈置等。結果顯示：港灣作局部之形狀改變，如拆除防波堤、增設突堤與防波堤，均無法有效減輕港池共振強度。而以碼頭堤壁增加消波設施之改善方案，於內港及外港均能達到共振強度減弱的效果，而且其他非共振週期之波浪，亦能有效減弱波高放大率，達到港池穩靜的效果。 本研究成果可提供花蓮港務局以及主管港務單位為解決港池共振問題之參考，亦可提供學術研究單位以及港灣設計相關顧問公司，進行港灣規劃以及研究之參考			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
99 年 10 月	58	200 元	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：1.本研究之結論與建議不代表交通部之意見。 2.本研究系使用國家科學委員會經費辦理。			

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

TITLE: Resonant Problems and Improving Strategies at Hualien Harbor			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-02-4804-3(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009903295	IOT SERIAL NUMBER 99-124-7500	PROJECT NUMBER 96-2981-I-172-001
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-hung PHONE: +886-4-26587177 FAX: +886-4-26560661			PROJECT PERIOD FROM March 2007 TO January 2008
KEY WORDS: harbor resonance, typhoon, computer model, improving strategy			
ABSTRACT: Hualien Harbor has a long history of harbor resonance problems induced by typhoons during the typhoon seasons. Over the last twenty years, on several occasions, harbor resonances have made mooring ropes broken and ships and dock facilities severely damaged. To avoid damage as typhoons approaching, the ships were ordered to move out of the harbor. This paper presents the results of a computer model focusing on reducing the harbor resonance of Hualien Harbor through modification of harbor layout, installation of energy absorbing or dissipating boundaries as well as judicious combination of other measures. A finite element computer model, used as an extended and improved finite element model from Lee et al. (1998), has been applied to Hualien Harbor. The model incorporates the effects of variable water depth, wave refraction, wave diffraction, reflection from fully reflecting or partially energy absorbing boundaries, wave transmission through porous breakwater and energy dissipation at the bottom boundary. The model for the present condition is simulated and compared with the field data measured by HMTC during typhoon Tim (July 1994). The comparison between the model results and field data is quite good with respect to resonant periods, resonant bandwidth and peak amplification factors. The result clearly indicate that there exists, in Hualien Harbor, a broadband of resonant response for wave periods between 100 sec and 160 sec. There are 10 strategies related to modifications of the harbor layout have been studied. Two of these strategies installed of energy dissipaters, the resonance conditions in both inner basin and outer basin of the harbor have been reduced significantly. This study provides the government organizations and private sectors, including the Harbor Bureaus, the Ministry of Transportation and Communications, consultant incorporations, Institute of Transportation, et al., with references to improve and research the problem of harbor resonance.			
DATE OF PUBLICATION October 2010	NUMBER OF PAGES 58	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
1.The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications. 2.The budget of this research project is contributed by the National Science Council.			

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
表目錄	V
圖目錄	VI
第一章 緒論	1-1
1.1 前言	1-1
1.2 文獻回顧	1-2
1.3 研究目的	1-3
1.4 本研究組織	1-4
第二章 花蓮港自然條件特性	2-1
2.1 花蓮港船隻避颱斷纜探討	2-1
2.2 現場觀測波浪特	2-1
第三章 數值模式	3-1
3.1 控制方程式	3-1
3.2 混合有限元素法	3-1
3.3 邊界條件	3-4
3.4 數值方法	3-7
3.5 模式驗證	3-9
3.6 實例比較	3-13

第四章 港池改善方案研擬.....	4-1
4.1 模式建立.....	4-1
4.2 改善方案研擬.....	4-5
第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 結論與建議.....	5-1
5.2 成果效益及後續應用情形.....	5-2
參考文獻.....	6-1

表目錄

表 2-1	花蓮港各碼頭船隻於民國 79 至 83 年間出港避颱次數統計表.....	2-2
表 2-2	花蓮港各碼頭船隻於民國 79 至 83 年間斷纜次數統計表..	2-3

圖目錄

圖 2-1	花蓮港易發生斷纜或船隻必須出港避颱碼頭位置圖	2-1
圖 3-1	模式計算範圍示意圖	3-2
圖 3-2	FEM 模式計算矩形港灣的網格示意圖	3-10
圖 3-3	矩形港池的波浪振福放大係數 R 與 kl 關係圖	3-11
圖 3-4	Pumping mode 在矩形港池的波高放大率分佈圖	3-12
圖 3-5	Sloshing mode 在矩形港池的波高放大率分佈圖	3-13
圖 3-6	洛杉磯港及長堤港之港灣佈置示意圖	3-14
圖 3-7	長堤港 J 碼頭區港池共振改善結果圖	3-14
圖 4-1	花蓮港現有佈置及模式計算範圍示意圖	4-2
圖 4-2	FEM 模式計算元素切割示意圖 (左：全區。右：內港區)	4-2
圖 4-3	模式計算分析及驗證碼頭分佈圖	4-3
圖 4-4	#8 碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較圖	4-4
圖 4-5	#10 碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較 圖	4-4
圖 4-6	#17 碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較 圖	4-4
圖 4-7	#22 碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較 圖	4-4
圖 4-8	改善佈置 1 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-6
圖 4-9	改善佈置 2 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-8

圖 4-10 改善佈置 3 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-9
圖 4-11 改善佈置 4 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-12
圖 4-12 改善佈置 5 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-13
圖 4-13 改善佈置 6 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-15
圖 4-14 改善佈置 7 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-16
圖 4-15 改善佈置 8 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-18
圖 4-16 改善佈置 9 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-19
圖 4-17 改善佈置 10 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖	4-21

第一章 緒論

1.1 前言

花蓮港為臺灣之國際商港，位於台灣東部，面臨太平洋，港池座向西南。花蓮港於 1991 年第四期擴建工程完成後，港口至港池底端成狹長形，縱深長約 4 公里，港口寬約 300 公尺，港池內航道甚窄，寬度約 80 公尺，整個港池形狀近似漏斗狀。夏季颱風來襲時，港內經常發生港池共振現象，不但造成船舶繫泊困難，人員登船及下船工作之危險性，更甚者造成船隻斷纜碰撞導致船損或沈船之危險。花蓮港務局為了安全考量，於颱風來襲期間，除停止船隻進港外，亦建議船隻出港錨泊，以避免不幸發生。然而颱風期間，港外波浪巨大，船隻即使下雙錨仍可能因流錨而發生擱淺事故。因此，颱風期間船隻無法進港避風浪，反而須出港錨泊或駛往其他港口，顯示花蓮港並非理想的國際港。

花蓮港港池共振問題，長久以來一直是臺灣執政單位以及管轄機構花蓮港務局的困擾，同時也引起國內外專家學者的興趣與關注。1990年起交通處港灣技術研究所（交通部運輸研究所港灣技術研究中心前身）即著手進行一系列的研究，包括波浪觀測、地形調查、水工試驗、數值模擬計算、理論解析及船舶動態分析等，積極謀求解決或改善的方法。邱等人 (2004) 從改善花蓮港長週期振盪為出發點，整理過去相關的現場觀測、模型試驗及數值計算所提出許多共振機制的研究成果，其中港池不穩靜現象，係由港池共振所造成之結論，已獲得大多數專家學者的認同。但對於發生港池共振的物理機制，仍有不同的觀點，更遑論改善方案有更多的看法。因此，在改善方案未定案前，花蓮港務局無法進行任何具體改善工程，但對這個芒刺在背的苦惱問題，仍極思早日獲得解決。有鑑於此，交通部運輸研究所（簡稱運研所）依據花蓮港務局委託研擬「花蓮港港池共振改善計畫」，由運研所及委辦顧問公司組成研究團隊，進行花蓮港港池共振機制相關的研究，期能對於共振機制能更深入探討，並提出可行性改善方

案，以解決或減輕花蓮港港池不穩靜的情形，使船舶靠泊及裝卸安全無虞，擺脫長期以來的的困擾，以及改變國際對花蓮港的印象，將花蓮港發揮其地理優勢，朝港埠多元化及國計畫經營目標發展。

1.2 文獻回顧

有關港池共振數值推算問題，在地形變化不劇烈，底床為緩變之海域或港池，Berkhoff (1972) 提出緩坡方程式(mild-slope equation)，應用有限元素法求解波浪之折繞射共同效應，Chen 和 Mei (1974) 及 Chen (1986) 提出混合有限元素法(hybrid finite element method)，以有限元素法計算邊界內，而港口邊界外則以解析解求之。Tsay 和 Liu (1983)、Tsay 等人 (1989)、林和謝 (1985)、歐等人 (1990) 及 Lee 等人 (1998) 以利用相似方式求解緩坡方程式，其中 Lee 等人 (1998) 的模式，更利用適當的邊界條件，能正確模擬波浪傳送中變形效應如：淺化、繞射、反射、折射、底床摩擦、邊界吸收及港口分離損失等。Lee (1969, 1971) 及 Lee 和 Raichlen (1972) 利用荷姆茲方程式(Helmholtz equation)的基本解，使用邊界元素法計算港池共振問題。此外，蘇等人 (1996) 利用近岸波場數值模式-Model WP21 探討港內共振問題。莊和江 (2000) 及 Chen 等人 (2004) 應用 MIKE21-EMS 探討花蓮港港池不穩靜問題及，認為亞重力波亦可能支配花蓮港的共振特性。蕭等人 (2000) 利用雙互換邊界元素法，指出港內增設消波設施可改善共振之波動。李等人 (2001) 利用緩坡方程式及邊界元素法指出引起港池共振的入射波週期。蘇 (2003) 從物理性質角度推論花蓮港池共振應是由緣岸波造成。上述研究對引起共振的週期雖因所用模式方法不同而略有差異，但可確認花蓮港港池共振確實為長週期波所引起。

1.3 研究目的

作者鑑於花蓮港港池共振問題解決的迫切性，並期望能與國

際港池共振專家共同研討，以及吸收國外經驗。遂於2006年向行政院國家科學委員會申請「第45屆補助科學與技術人員國外短期研究」，並經核准在案，研究題目為「花蓮港港池共振機制及改善對策之研究」，研究進修地點為美國南加州大學土木及環境工程系，共同合作研究對象為李錦珍教授，李教授為國際港灣工程專家，在港池共振研究上已具近40年經驗，本研究在李教授及其研究團隊協助下完成。期本研究成果能對花蓮港共振機制以及改善對策，提出更進一步的見解，以供後續施政以及學者專家之參酌。

本研究以模式計算方式，探討花蓮港港池共振的機制，研提不同的改善對策，俾提供花蓮港務局及其他施政與學術單位之參酌。其研究項目說明如下：

1. 文獻收集及整理分析

收集有關花蓮港港池共振相關文獻、港灣結構物佈置、水深地形以及現場觀測之海象資料，整理並分析以供後續研究探討及模式驗證之參考。

2. 模式建置

依據花蓮港以及鄰近地區之海岸結構物與水深資料，建構適當範圍的計算領域，並利用網格自動生成技巧，依不同入射波浪週期，於不同地區產生不同密度之網格。

3. 模式驗證

利用現場觀測資料，驗證所建構之模式，並進一步作模式的修正。

4. 改善對策研擬及計算分析

依據花蓮港現況，以不同週期入射波浪，利用模式計算港池波浪波高分佈的情形，並研擬改善佈置方案。

1.3 本研究組織

本研究共分為五章，第一章為緒論，說明本研究研究背景、動機及目的；第二章為花蓮港自然條件特性，包括颱風波浪條件以及船隻安全威脅原因探討；第三章數值模式，說明本研究所應用之數值模式，包括控制方程式、邊界條件、數值方法以及模式驗證等；第四章港池共振改善方案研擬，研擬不同的改善布置方案，並利用數值模式計算，探討其改善之效果；第五章為結論與建議，並說明成果效益及後續應用情形。

第二章 花蓮港自然條件特性

2.1 花蓮港船隻避颱與斷纜探討

花蓮港自1991年擴建後，幾乎每年夏季颱風期間，均會發生港內停泊船隻或無法作業，必須出港避颱的情形，勉強靠泊或來不及出港船隻，甚至常發生斷纜的情形。茲統計民國79至83年間，各碼頭區船隻必須出港避颱之次數，以及斷纜次數，如表2-1及表2-2所示。

表中顯示船隻出港避颱的碼頭並無侷限在少數碼頭，其中以#10及#19碼頭區船隻出港避颱之次數最高，碼頭位置示意如圖2-1所示。而發生斷纜的碼頭區亦分佈零散，其中以#19及#20碼頭之斷纜次數最多。由上述結果顯示，港池共振於港內任何位置均可能發生，故探討港池共振問題，應作全面性研究及探討。



資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(96~100年)」，花蓮港務局(民95年)

圖 2-1 花蓮港易發生斷纜或船隻必須出港避颱碼頭位置圖

表 2-1 花蓮港各碼頭船隻於民國 79 至 83 年間出港避颱風次數統計表

碼頭編號 颱風名稱	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13
歐菲莉(1990)										√			
蓓琪(1990)						√							
楊希(1990)													
黛特(1990)				√									
露絲(1991)													
泰德(1992)											√		
艾爾西(1992)								√					
漢特(1992)													
蓋伊(1992)										√	√		
珂茵(1993)				√				√		√			
塔莎(1993)													
亞伯(1993)													
楊希(1993)					√					√	√		
提姆(1994)													
凱特琳(1994)										√			
道格(1994)													
弗雷特(1994)						√							
席斯(1994)						√							
葛拉絲(1994)			√							√			
發生次數	0	0	1	2	1	3	0	2	0	6	3	0	0
碼頭編號 颱風名稱	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23	#24	#25	
歐菲莉(1990)						√							
蓓琪(1990)						√							
楊希(1990)	√			√									
黛特(1990)													
露絲(1991)	√	√			ㄟ								
泰德(1992)					ㄟ	√							
艾爾西(1992)				√		√	√						
漢特(1992)						√						√	
蓋伊(1992)							√						
珂茵(1993)	√				ㄟ			√					
塔莎(1993)						√							
亞伯(1993)						√							

楊希(1993)		√				√	√						
提姆(1994)		√		√						√			
凱特琳(1994)											√		
道格(1994)									√	√	√		
弗雷特(1994)						√	√				√		
席斯(1994)									√				
葛拉絲(1994)												√	
發生次數	3	3	0	3	3	9	4	1	2	2	3	2	

資料來源：「花蓮港港灣設施改善計畫之研究」，港研中心(1996)

表 2-2 花蓮港各碼頭船隻於民國 79 至 83 年間斷纜次數統計表

碼頭編號 颱風名稱	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13
歐菲莉(1990)										√			
艾爾西(1992)				√				√					
漢特(1992)													
蓋伊(1992)											√		
提姆(1994)													
弗雷特(1994)						√							
葛拉絲(1994)			√							√			
發生次數	0	0	1	1	0	1	0	1	0	2	1	0	0
碼頭編號 颱風名稱	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23	#24	#25	
歐菲莉(1990)		√				√	√						
艾爾西(1992)				√		√	√						
漢特(1992)						√	√					√	
蓋伊(1992)							√						
提姆(1994)		√		√						√			
弗雷特(1994)						√	√				√		
葛拉絲(1994)												√	
發生次數	0	1	0	1	0	4	5	0	0	1	1	2	

資料來源：「花蓮港港灣設施改善計畫之研究」，港研中心(1996)

2.2 現場觀測波浪特性

依據單和林「淺談花蓮港港池共振研究經驗與未來方向」(2007)一文所述內容，花蓮港現場觀測波浪特性、檢討與建議，茲摘述如后說明：

「曾(1996)分析民國 79 至 85 年間的 31 個港外颱風波浪，其中民國 83 年的 6 個颱風(提姆、凱特琳、道格、弗雷特、葛拉絲及席斯)，以及民國 84 年的肯特颱風期間港內也進行了同步觀測。分析結果指出外海颱風波能多集中在 11 至 15 秒之間，但在港口外側觀測結果顯示，長週期成份波的能量顯著增加；內港區長週期能量集中在 147 及 158 秒左右，而外港區則在 137、147 及 185 秒左右。由於東防波堤的遮蔽效應，外港區水域週期能量可降低一階，而內港區水域則降了兩階，然而 160 秒左右的波能卻增加二階。該文並指出引起港內超長重力波的機制可能有二：碎波點位置振盪所生的自由長波；或者伴隨短波群前進之強制長波。曾及簡(1996)分析民國 78 年至 82 年現場的觀測資料，也指出在民國 83 年提姆颱風侵襲期間港內有能量明顯的集中在 47、82、98、114 及 158 秒成份波處。簡及曾(1999)分析民國 79 年至 87 年間 45 個颱風動態資料與現場波浪資料指出，颱風波浪的波高逐時變化除與颱風行進路徑、強度規模及移動速度有關外，也和背景波浪場、陸地遮蔽效應有密切關聯。對花蓮港而言，颱風波浪的總作用時間大約 1 至 2 天；颱風波浪明顯增大的時間，大約是颱風中心距花蓮港約 500~900 公里。郭等人(2002)利用民國 83 年至 86 年間的五個颱風時期所觀測的港內及港外波浪資料進行分析，以探討港池振盪的發生機制。其認為港內振盪的機制大致與線性波理論吻合，是由港外波浪低頻域能量所引起。但也指出港外風浪愈大，不一定港內振盪就大，必須視港外低頻成份波的波向而定，而港外低頻波之波向也不一定與風浪主方向相同。顯示港池振盪的機制有著很複雜的關係。張及林(2003)利用最小二乘法發展出兩種可辨識水位訊號之主成份波週期及振幅的模式，並將其應用在花蓮港民國 83 年提姆(Tim)颱風的港內波動訊號上，辨識出港內主要成份波週期為 87.6 及 152 秒，而港外為 15、52、80 及 130 秒。」

「從現場觀測的觀點來看，包括港內外的波浪觀測以及港內水位觀測，花蓮港裡可發現有極長週期的水面變動，而且其波動振幅隨著港外的海象變動。然而目前通用的波浪觀測取樣方式不論是以 2Hz 連續取樣 20 分鐘或者是以 4Hz 連續取樣 10 分鐘，其分析都似乎僅能涵蓋到重力波至亞重力波的範圍(如果取 2,048 各資料點進行頻譜分析，最長解析週期分別為 512 及 256 秒)。未來的觀測有必要研商是否加長取樣的時間。目前的水位觀測結果顯示，颱風侵襲期間長週期的能量有相當明顯地增加，連 1,000 秒至 10,000 秒間的波動能量也明顯地增加，由於沒有同步量測外海的水位變化，無法判斷是否外海就有此能量，因此其原因尚不清楚。」

本研究依據上述結果，亦認為花蓮港港池共振為外海入射波浪，具有引起共振的成份波。而引起港池船隻斷纜之內港共振的成份波週期（依據現場實測資料）大致介於 148sec~152sec 間，而外港為介於 130sec~150sec 間。

第三章 數值模式

本計畫以 Lee 等人 (1998) 的港池共振波場數值模式為基礎，建置花蓮港港池共振數值模式，並以有限元素法作數值模擬計算，有限元素法在處理不規則又複雜之港池問題，元素取用方便，為一便利有效之數值方法。模式中以緩坡方程式為控制方程式，利用不同的邊界條件求解，包括完全及部分反射邊界、透過邊界、能量損失(港口分流及底床摩擦)等，模式可適當模擬多變化的港灣結構物以及不同水深地形所造成之波浪折射、繞射、反射以及能量損失現象，茲將理論基礎及數值方法說明如下：

3.1 控制方程式

本研究所應用之為 Berkhoff (1972) 所提出之緩坡方程式 (Mild Slope Equation, MSE)：

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g \omega^2}{C} \phi = 0 \quad (1)$$

其中 $\phi = \phi(x, y)$ 為流速勢 (velocity potential) 的水平變動量， $C = \frac{\omega}{k}$ 為波速 (wave celerity)， $C_g = \frac{C}{2}(1+G) = \frac{C}{2}\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)$ 為群波速 (group velocity)，其中 $G = \frac{2kh}{\sinh 2kh}$ 。 k 和 ω 分別為波數和角頻率， h 為水深。

3.2 混合有限元素方法

模式計算範圍包含內部區及外部區，如圖 1 所示。內部區包括港口以及相鄰的半圓區域，外部區則為半徑為無限的半環形區域。波浪能量守恆於內部區及外部區可以下式表示：

$$\frac{\partial}{\partial t} E_A + \int_{\partial A + \partial R} E_F^A ds = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} E_R + \int_{\partial A + \partial R} E_F^R ds = 0 \quad (3)$$

其中 A 表示內部區， R 表示外部區， B 表示陸側， E_A 和 E_R 分別為內部及外部區域瞬時波浪能量。 E_F^A 和 E_F^R 分別為通過內部及外部區邊界，瞬時波浪能量通量。

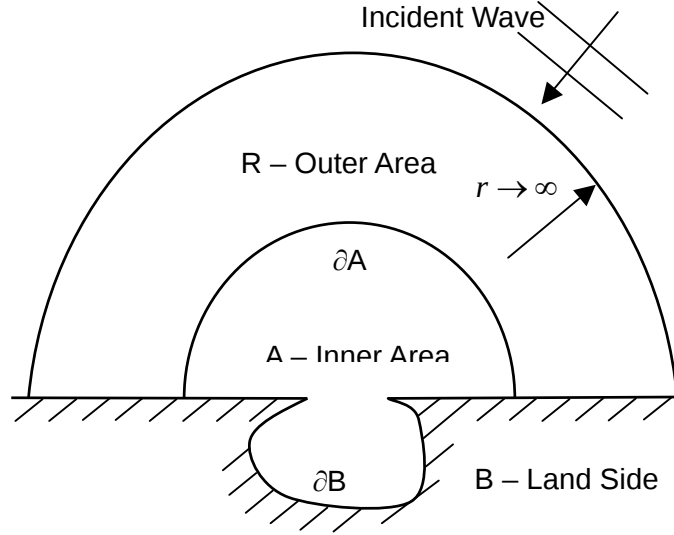


圖 3-1 模式計算範圍示意圖

每單位水平面積之勢能量 E_p 為

$$E_p = \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \quad (4)$$

其中 η 為自由水位

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{z=0} = -\frac{1}{g} (-i\omega) \phi \exp(-i\omega t) \quad (5)$$

代入式(4)中，則

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2} \rho g \eta^2 = \frac{1}{2} \rho g (-\omega^2) \frac{1}{g^2} \phi^2 \exp(-2i\omega t) \\ &= -\frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \left(\frac{1}{2} \omega^2 \phi^2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

每單位面積水平之運動能量為

$$\begin{aligned} E_K &= \int_{-h}^0 \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2 + w^2) dz \\ &= \frac{\rho}{2} (\nabla \phi)^2 \exp(-2i\omega t) \frac{\tanh kh}{\sinh kh \cosh kh} \frac{1}{k} \left(\frac{\sinh 2kh}{4} + \frac{kh}{2} \right) \end{aligned}$$

$$+ \frac{\rho}{2} \phi^2 \exp(-2i\omega t) \frac{\tanh kh}{\sinh kh \cosh kh} \left[k \left(\frac{\sinh 2kh}{4} - \frac{kh}{2} \right) \right] \quad (7)$$

離散方程式 (dispersion relation) $\omega^2 = gk \tanh kh$ 應用至上式中，則每單位面積水平之運動能量為

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{\rho}{2} (\nabla \phi)^2 \exp(-2i\omega t) \frac{\omega^2}{gk \sinh 2kh} \frac{1}{k} \left(\frac{\sinh 2kh}{2} + kh \right) \\ &\quad + \frac{\rho}{2} \phi^2 \exp(-2i\omega t) \frac{\omega^2}{gk \sinh 2kh} \left[k \left(\frac{\sinh 2kh}{2} - kh \right) \right] \\ &= \frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \frac{1}{2} \left[cc_g (\nabla \phi)^2 + \frac{1}{2} (1-G) \omega^2 \phi^2 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

則總波浪能量密度為

$$\begin{aligned} E &= E_p + E_k \\ &= \frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \frac{1}{2} \left[cc_g (\nabla \phi)^2 - \frac{c_g \omega^2}{c} \phi^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

在任意方向通過 $\vec{n}$ 方向之單位寬度斷面的瞬間能量通量為

$$E_f = - \int_{-h}^0 p_d u_n dz \quad (10)$$

其中 p_d 為動力壓力 (dynamic pressure)， U_n 為沿著 $\vec{n}$ 方向之水粒子速度，可表示為

$$p_d = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = (-i\omega) \phi \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp(-i\omega t) \quad (11)$$

則

$$\begin{aligned} E_f &= -\rho \int_{-h}^0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \frac{\partial \Phi}{\partial n} dz \\ &= \frac{\rho}{g} (i\omega) \exp(-2i\omega t) cc_g \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} \end{aligned} \quad (12)$$

混合有限元素方法為利用上述方程式，應用至不同的邊界條件。

3.3 邊界條件

1. 部分吸收邊界(Partial Absorption Boundary)

實體邊界如垂直強或沙灘，波浪入射會發生部分吸收及反射效應，即具有能量消散效應的邊界，其能量通率考慮至二階可表示為

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -i\alpha k\phi - \frac{i\alpha}{2k} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} \quad (13)$$

其中 α 是吸收係數 (absorption coefficient)，範圍為 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。當 $\alpha = 0$ 時，表示為全反射條件 (fully reflecting condition) 則 $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ 。當 $\alpha = 1$ 時，表示為全部吸收條件 (fully absorbing condition)。當入射波浪角度為 θ^i ，則吸收係數 α 與反射係數 R 關係為

$$R = -\frac{(\alpha \cos \theta^i)^2 - 2\alpha \cos \theta^i + \alpha^2}{(\alpha \cos \theta^i)^2 + 2\alpha \cos \theta^i + \alpha^2} \quad (14)$$

上述吸收邊界可包含一項如：

$$\begin{aligned} \iint_{\partial B} E_f dt ds &= \frac{\rho}{g - 2i\omega} \exp(-2i\omega t) \int_{\partial B} i\omega C C_g \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \\ &= \frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \int_{\partial B} \frac{1}{2} i\omega C_g \alpha \phi^2 ds \end{aligned} \quad (15)$$

2. 底床摩擦邊界(Bottom Friction Boundary)

以底床瞬時能量通量表示因底床摩擦所產生的能量消散，表示如下

$$E_f = \tau_b U_b \quad (16)$$

其中 τ_b 底床的瞬時剪應力，其可以底床水粒子速度表示為

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho K_b |U_b| U_b \quad (17)$$

其中 where K_b 無因次摩擦係數 (dimensionless friction coefficient)。底床水粒子速度 (particle velocity near the bed) 為

$$U_b = \left. \frac{\partial \phi}{\partial s} \right|_b = \nabla \phi \left(\frac{1}{\cosh kh} \right) \exp(-2i\omega t) \quad (18)$$

而底床摩擦係數 (bottom friction coefficient) 為 $f_\omega = \frac{1}{2} g K_b |U_b|$ ，則底床瞬時能量通量可表示為

$$E_f = \frac{\rho}{g} f_\omega \left(\frac{1}{\cosh kh} \right)^2 (\nabla \phi)^2 \exp(-2i\omega t) \quad (19)$$

為了得到頻率域之方程式，將能通量在時間以及空間上積分，則底床摩擦能通量為

$$\iint_A E_f dt dA = \frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \int_A \frac{i}{2\omega} f_\omega \left(\frac{1}{\cosh kh} \right)^2 (\nabla \phi)^2 dA \quad (20)$$

摩擦係數利用 Jonsson (1976)、Jonsson 和 Carlsen (1976) 在粗糙底床的研究結果方程式表示如下：

$$\begin{aligned} f_\omega &= 0.2g\omega C_{bf}^{0.75} \alpha_b^{0.25}, & 1.6 < \frac{\alpha_b}{C_{bf}} < 100 \\ f_\omega &= 0.15g\omega \alpha_b, & \frac{\alpha_b}{C_{bf}} < 1.6 \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $\alpha_b = \frac{a}{\sinh kh}$ ， C_{bf} 為 Nikuradse 粗糙高度（Nikuradse roughness height）， a 為波浪振幅（wave amplitude）。

3. 進港損失（Entrance Loss）

波浪通過港口時的二次進港損失（quadratic entrance head loss）則應用

$$\Delta H = f_e \frac{U^2}{2g} = f_e |U_0| \frac{U}{2g} = K_e U \quad (22)$$

其中 $K_e = \frac{f_e}{2g} |U_0|$ ， f_e 為無因次進港損失係數（dimensionless entrance loss coefficient）。 $|U_0|$ 為進港無能損之平均速度， U 為考慮進港損失後的新進港速度。因此進港速度勢可表示為

$$\phi_1 = \phi_2 + \Delta\phi = \phi_2 + \frac{g}{i\omega} f_e |U| \frac{U}{2g} \quad (23)$$

加權剩餘法（weighted residual method）應用於進港方程式，如下

$$\delta F_e = \int_{\partial E} \delta\phi^* C C_g \left(\phi_1 - \phi_2 - \frac{g}{i\omega} f_e |U| \frac{U}{2g} \right) ds \quad (24)$$

其中 ϕ_1 和 ϕ_2 為進港前後之速度勢。

4. 經過孔隙堤之透過波（Wave Transmission through Porous Breakwater）

當波浪通過孔隙堤，部分波能將被吸收及透過，透過波速度勢 ϕ_T 假設正比於入射波速度勢 ϕ_i

$$\frac{\partial \phi_T}{\partial n} = K_T \frac{\partial \phi_i}{\partial n} = ikK_T \phi_i \quad (25)$$

其中 K_T 通過防波堤之透過係數。

透過波能可積分推導如下：

$$\begin{aligned} \iint_{\partial T} E_f dt ds &= -\frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \iint_{\partial T} \frac{1}{2} CC_g \phi_T \frac{\partial \phi_T}{\partial n} ds \\ &= -\frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \iint_{\partial T} \frac{1}{2} C_g i\omega K_T^2 \phi_i^2 ds \end{aligned} \quad (26)$$

5. 遠端邊界 (Far Field Boundary)

遠端邊界則應用 Sommerfeld (1964) 輻射條件，表示如下：

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi_s = 0 \quad (27)$$

其中 $\phi_s = \phi_R - \phi_I$ 。 ϕ_I 、 ϕ_R 和 ϕ_s 分別為入射波流速勢、外界流速勢以及反射波流速勢。反射波流速勢滿足荷姆茲方程 (Helmholtz equation) 和輻射條件表示如下

$$\phi_s = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n H_n(\mathbf{kr}) \cos n\theta \quad (28)$$

其中 α_n 為未知係數和 H_n 為 Hankel 函數

對式(2) 及式(3) 積分則

$$E_A + \iint_{\partial A + \partial B} E_f^A dt ds = \text{const} \quad (29)$$

$$E_R + \iint_{\partial A + \partial R} E_f^R dt ds = \text{const} \quad (30)$$

再將式(29) 及式(30)帶入之前所推倒之方程，則混和方程 (Hybrid function) 可推導如下

$$\begin{aligned} F(\phi) &= \frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t) \left\{ \iint_A \frac{1}{2} \left[CC_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g \omega^2}{C} \phi^2 \right] dx dy \right. \\ &\quad \left. + \int_{\partial A} CC_g \left[\frac{1}{2} \phi_s - (\phi_A - \phi_I) \right] \frac{\partial \phi_R}{\partial n_A} ds \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{\partial A} \frac{1}{2} CC_g \phi_s \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} ds - \int_A \frac{i}{2\omega} f_\omega \left(\frac{1}{\cosh kh} \right)^2 (\nabla \phi)^2 dx dy \\
& - \int_{\partial B} \frac{1}{2} i\omega C_g \alpha \phi^2 ds + \int_{\partial T} \frac{1}{2} C_g i\omega K_T^2 \phi_i^2 ds \\
& - \int_{\partial E} \delta \phi^* i\omega CC_g \left(\phi_1 - \phi_2 - \frac{g}{i\omega} f_e |U_0| \frac{U}{2g} \right) ds \Big\} \\
& = const
\end{aligned} \tag{31}$$

其中 $\frac{\rho}{g} \exp(-2i\omega t)$ 在上式中可刪除。只考慮邊界 ∂A 條件，則可改寫為

$$\begin{aligned}
& \int_{\partial A} CC_g \left[\frac{1}{2} \phi_s - (\phi_A - \phi_I) \right] \frac{\partial \phi_R}{\partial n_A} ds - \int_{\partial A} \frac{1}{2} CC_g \phi_s \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} ds \\
& = \int_{\partial A} CC_g \left(\frac{1}{2} \phi_s \frac{\partial \phi_s}{\partial n_A} - \phi_A \frac{\partial \phi_s}{\partial n_A} - \phi_A \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} + \phi_I \frac{\partial \phi_s}{\partial n_A} + \phi_I \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} \right) ds
\end{aligned} \tag{32}$$

3.4 數值方法

計算時所選用之數值方法有限元素法 (Finite element method, FEM)，以變異原理 (variational principle) 和形狀函數應用至 FEM 矩陣。利用形狀函數、流速勢及其變異數則可轉換為

$$\begin{aligned}
\phi &= N^i \phi^i \\
\nabla \phi &= \nabla N^i \phi^i = B^i \phi^i \\
\phi_s &= N_s^i \phi_s^i \\
\frac{\partial \phi_s}{\partial r} &= \frac{\partial N_s^i}{\partial r} \phi_s^i = P_s^i \phi_s^i
\end{aligned} \tag{33}$$

第一項可再表示為

$$\iint_A \frac{1}{2} \left[CC_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g \omega^2}{C} \phi^2 \right] dx dy = \phi^T \left(\iint_A CC_g B^T B - \frac{C_g \omega^2}{C} N^T N dx dy \right) \phi \tag{34}$$

而 ∂A 邊界可表示為

$$\begin{aligned}
& \int_{\partial A} CC_g \left(\frac{1}{2} \phi_s \frac{\partial \phi_s}{\partial n_A} - \phi_A \frac{\partial \phi_s}{\partial n_A} - \phi_A \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} + \phi_I \frac{\partial \phi_s}{\partial n_A} + \phi_I \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} \right) ds \\
& = \phi_s^T \left(\int_{\partial A} \frac{1}{2} CC_g P_s^T N_s ds \right) \phi_s - \phi^T \left(\int_{\partial A} CC_g N^T P_s ds \right) \phi_s - \phi^T \left(\int_{\partial A} CC_g N^T \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} \right)
\end{aligned}$$

$$+\phi_s^T \left(\int_{\partial A} CC_g P_s^T \phi_I ds \right) + \int_{\partial A} CC_g \phi_I \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} ds \quad (35)$$

式 (35)最後一項為常數

而底床摩擦損失項為

$$-\int_A \frac{i}{2\omega} f_\omega \left(\frac{1}{\cosh kh} \right)^2 (\nabla \phi)^2 dx dy = -\phi^T \left[\int_A \frac{i}{2\omega} f_\omega \left(\frac{1}{\cosh kh} \right)^2 B^T B dx dy \right] \phi \quad (36)$$

邊界吸收項為

$$-\int_{\partial B} \frac{1}{2} i \omega C_g \alpha \phi^2 ds = -\phi^T \left(\int_{\partial B} \frac{1}{2} i \omega C_g \alpha N^T N ds \right) \phi \quad (37)$$

透過損失項為

$$\int_{\partial T} \frac{1}{2} C_g i \omega K_T^2 \phi_i^2 ds = \phi^T \left(\int_{\partial T} \frac{1}{2} i \omega C_g K_T^2 N^T N ds \right) \phi \quad (38)$$

入港損失為

$$\begin{aligned} & - \int_{\partial E} \delta \phi^* i \omega CC_g \left(\phi_1 - \phi_2 - \frac{g}{i \omega} f_e |U_0| \frac{U}{2g} \right) ds \Big\} \\ & = - \int_{\partial E} \nabla \phi i \omega CC_g \left((1 - k_j) \phi - \frac{g}{i \omega} K_e U \right) ds \\ & = -\phi^T \left\{ \int_{\partial E} i \omega CC_g \left[(1 - k_j) N^T B - \frac{g}{i \omega} K_e B^T B \right] ds \right\} \phi \end{aligned} \quad (39)$$

其中 $\phi_1 - \phi_2 = (1 - K_j) \phi$ 和 $K_e = \frac{f_e U_o}{2g}$ 。

在變異原理下，函數的第一變異數為 0，即

$$\delta F(\phi) = 0 \quad (40)$$

則矩陣方程式可表示為

$$[K][\Psi] + [Q] = 0 \quad (41)$$

其中 $[\Psi]$ 為未知矩陣，且

$$K = \begin{bmatrix} [M] & [M_2] \\ [M_2]^T & [M_1] \end{bmatrix} \quad (42)$$

其中

$$M = \int_A \left(CC_g B^T B - \frac{C_g \omega^2}{C} N^T N \right) dx dy$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{\partial B} i\omega C_g \alpha N^T N ds \\
& + \int_{\partial T} i\omega C_g K_t^2 N^T N ds \\
& - \int_A \frac{i}{\omega} f_\omega \left(\frac{1}{\cosh kh} \right)^2 B^T B dx dy \\
& - \int_{\partial E} i\omega C C_g \left[(1 - K_j) N^T B - \frac{g}{i\omega} K_e B^T B \right] ds
\end{aligned} \tag{43}$$

$$M_1 = \int_{\partial A} C C_g P_S^T N_S ds \tag{44}$$

$$M_2 = - \int_{\partial A} C C_g N^T P_S ds \tag{45}$$

$$Q_1 = - \int_{\partial A} C C_g N^T \frac{\partial \phi_I}{\partial n_A} ds \tag{46}$$

$$Q_2 = \int_{\partial A} C C_g P_S^T \phi_I ds \tag{47}$$

二次 Lagrange 元素被使用在向岸的 ∂A 邊界，在外海開放邊界則以 eigen function 展開法表示。以上述兩區的解加以計算 ∂A 邊界。次結構技術 (substructure technique) 被應用在本模式，即計算的領域被分為許多小領域去計算。矩陣方程則由次計算領域所組成，次領域由其個別的邊界條件求得其解。整個計算領域的解則由這些次領域的解所求得。這項技術大大降低了矩陣的大小，也使計算的效率提高。

3.5 模式驗證

本模式利用 Ippen、Goda (1963) 和 Lee (1969) 在矩形港池的試驗以及理論解析的結果，驗證其港內共振的正確性。Ippen、Goda (1963) 設置矩形港池長為 12.25 in，寬為 2.38 in，港內外水深為 0.844 ft，能量消散 (energy dissipators) 被設置在港池四周。Lee (1969) 則在相同條件下，設置更大比尺的港池以及更有效的能量消散，進行相同的試驗。為了本研究數值的結果能與他們的研究結果比較，數值網格的設置亦跟試驗室相同，如圖 3-2 所示。右圖為整個計算的計算域，而左圖則顯示包含港灣的部分。

全反射邊界條件使用在垂直牆上，進港損失係數設為 $f_e = 0.8$ 。在

後方堤壁的中間點的波高放大係數 (amplification factor) R 為 kl 的函數。本模式計算與 Ippen、Goda (1963) 和 Lee (1969) 的試驗及理論結果比較如圖 3-3 所示。其中 $R = \frac{a_R}{a_I}$, a_R 和 a_I 分別為反射以及入射波之振幅。 $k = \frac{2\pi}{L}$ 為波數 (wave number), $l = 12.25 \text{ in}$ 為港池長度, h 為水深, C_{bf} 為 Nikuradse 粗糙高度。在後方堤壁的中間點的放大係數 R 為 kl 的函數。本模式計算與 Ippen、Goda (1963) 和 Lee (1969) 的試驗及理論結果比較如圖 3-3 所示。其中 $R = \frac{a_R}{a_I}$, a_R 和 a_I 分別為反射以及入射波之振幅。 $k = \frac{2\pi}{L}$ 為波數 (wave number), $l = 12.25 \text{ in}$ 為港池長度, h 為水深, C_{bf} 為 Nikuradse 粗糙高度。

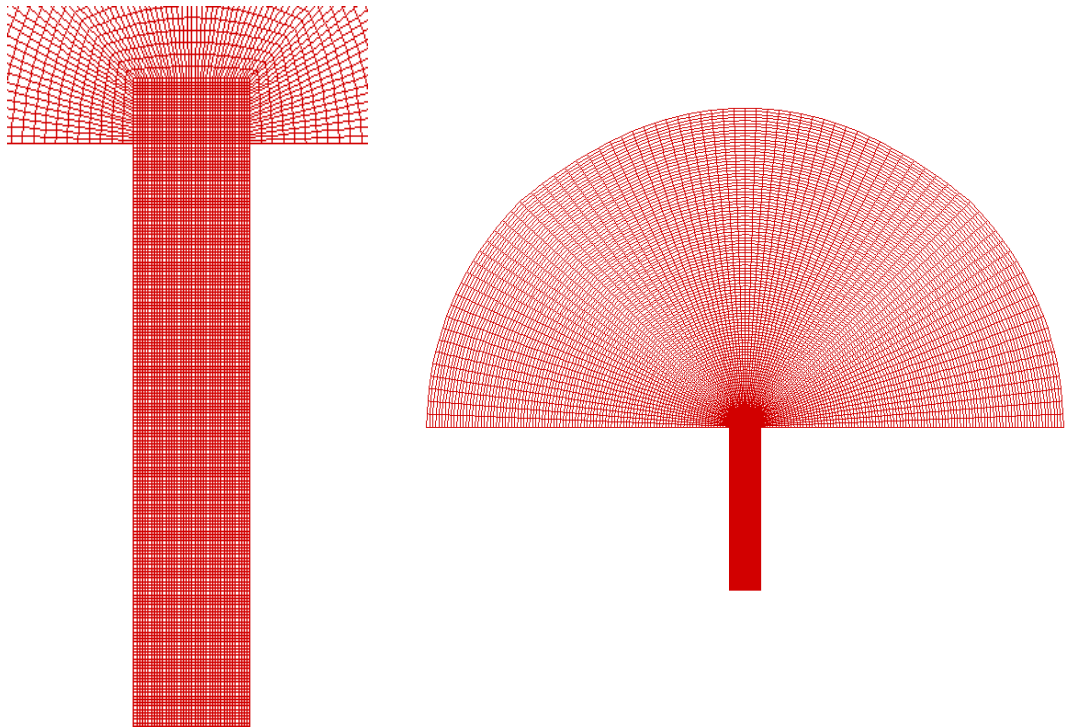


圖 3-2 FEM 模式計算矩形港灣的網格示意圖

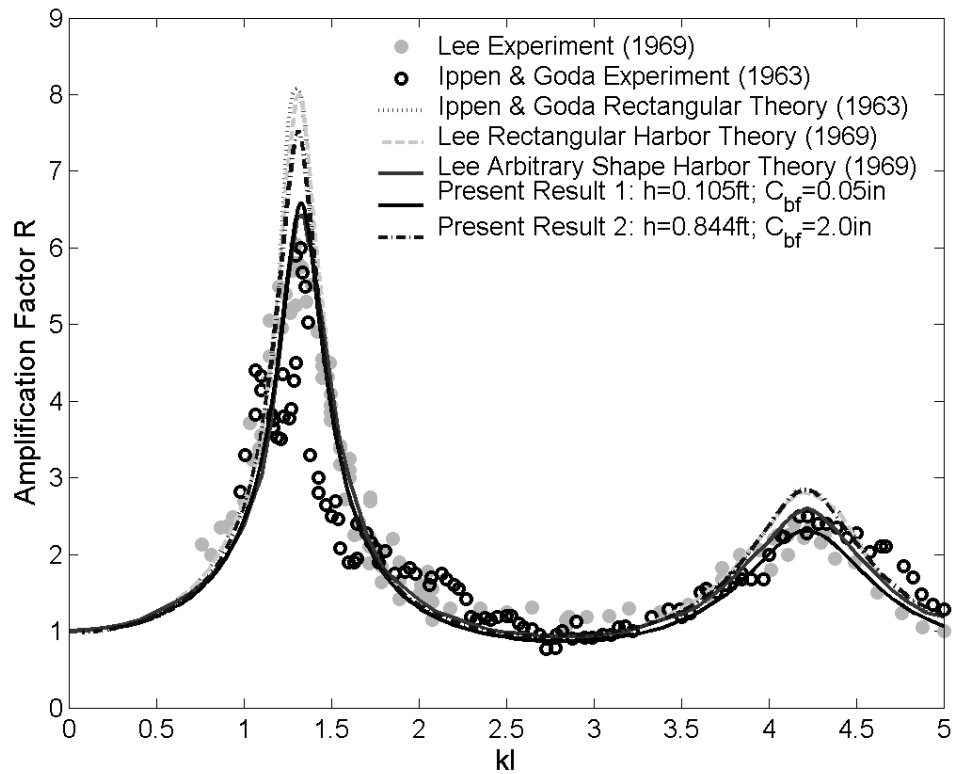


圖 3-3 矩形港池的波浪振幅放大係數 R 與 kl 關係圖

圖中藍色虛點線為水深 0.105 ft 以及 Nikuradse 粗糙高度 C_{bf} 為 0.05 in 模式計算的結果，另外設置淺水深為 $h=0.105$ ft 以及 $C_{bf}=2.0$ in 以測試底床的摩擦效應，其結果如圖中黑色實線。結果顯示淺水設定的計算結果比深水好，表示當水深較淺時，其摩擦效應比深水時明顯。圖中顯示本模式與試驗及理論值趨勢一致，且較其他的理論計算結果更為接近試驗值。以水深 $h=0.105$ ft 的計算結果較為接近試驗值，尤其在第二個共振尖峰附近 $kl=4.25$ 。

圖 3-3 中的第一共振尖峰為「pumping mode」，在此條件下表示整個港池水位為同時的升高或降低，波高放大係數分佈繪製如圖 3-4，其中波浪週期為 $T=26.4$ sec。其中負的放大係數 R 表示與正的放大係數 R 相差 π 的相位。圖中由於港內放大係數 R 值全為正值，所以整個港池在此週期下為同時上升或下降。

圖 3-3 中第二個共振尖峰稱為「sloshing mode」，此條件在港池內

最內及最外位置的水位振盪為相反相位，在此條件之放大係數分佈如圖 3-5 所示，此條件之波浪週期為 $T = 0.85 \text{ sec}$ ，圖形顯示港池最內側及最外側位置其波高放大率值相同但正負值相反，顯示當港池內側波浪水位為正值時，港池外側波浪水位為負值。圖 3-3 中顯示 sloshing mode 的共振比 pumping mode 小，由圖 3-4 及圖 3-5 的波高放大率分佈圖，更清楚看出 pumping mode 條件比 sloshing mode 條件港池的共振強度大。

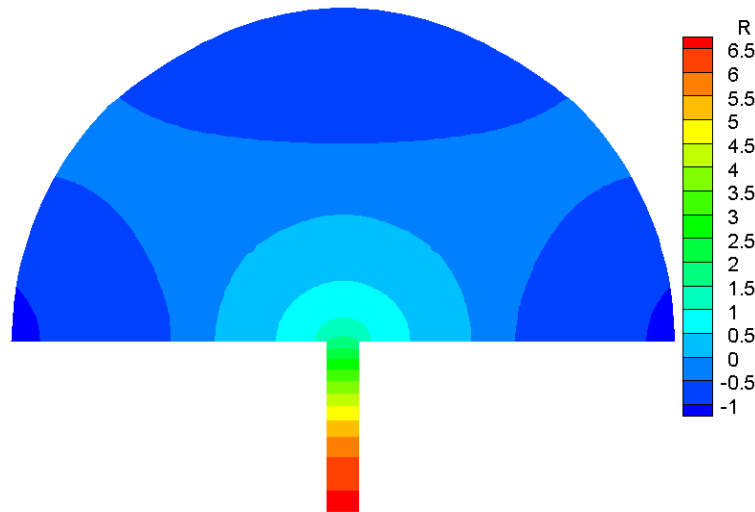


圖 3-4 Pumping mode 在矩形港池的波高放大率分佈圖

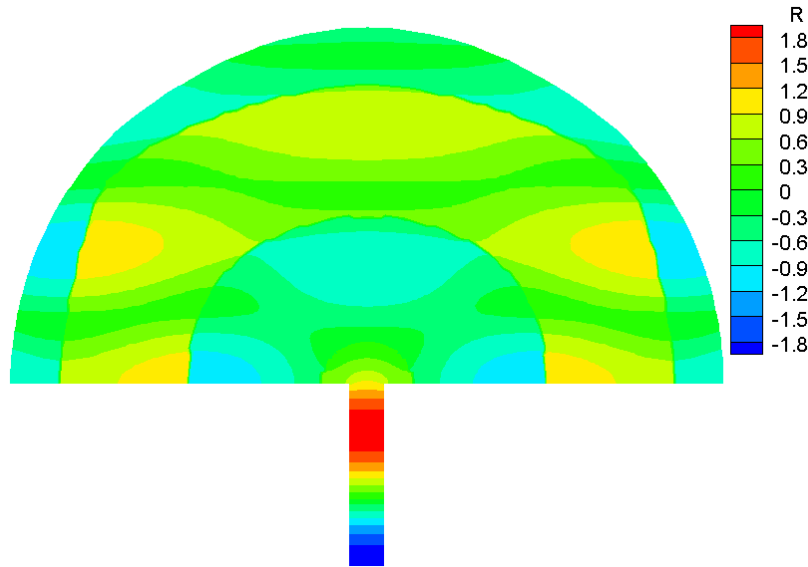


圖 3-5 Sloshing mode 在矩形港池的波高放大率分佈圖

3.6 實例驗證

上述模式曾有效應用在美國洛杉磯長堤港(Long Beach Harbor) (Lee et al., 1998)、韓國(Korea)的浦漢港(Pohang Harbor)(Kwak et al. 2007)、美國加州新月市(Crescent City)等港池之共振模擬計算。長堤港採用 Lee et al.(1998) 研究成果裡，模式計算所建議的改善佈置，實際作港池改善，佈置後共振現象如研究結果所預測，已獲得實質改善。茲將長堤濱港成功案例說明如下：

洛杉磯市位於面臨太平洋之美國西南岸，因此，時常受到湧浪之影響。洛杉磯市西南方有相鄰的洛杉磯港以及長堤港，兩港合併營運量為美國第一位，故為美國港灣營運極重要港口，雖然港外有極長的離岸防波堤作遮蔽，然長堤港的 Pier J 港池，卻仍常發生共振現象，位置如圖 3-6 所示。該改善方案的目的為將造成船隻斷纜或危及安全之共振波，設法減小以及往其他週期平移，結果如圖 3-7。圖形顯示，港池外構築外廓防波堤，使港池的特性長度加長，則共振週期 120 秒左右之波高放大率大幅降低，並往 170 秒以上平移，其已超出危及船隻的週期範圍，甚至較小週期之波浪，亦得到波高減低的效果，成功決解了共振問題。



圖3-6 洛杉磯港及長堤港之港灣佈置示意圖

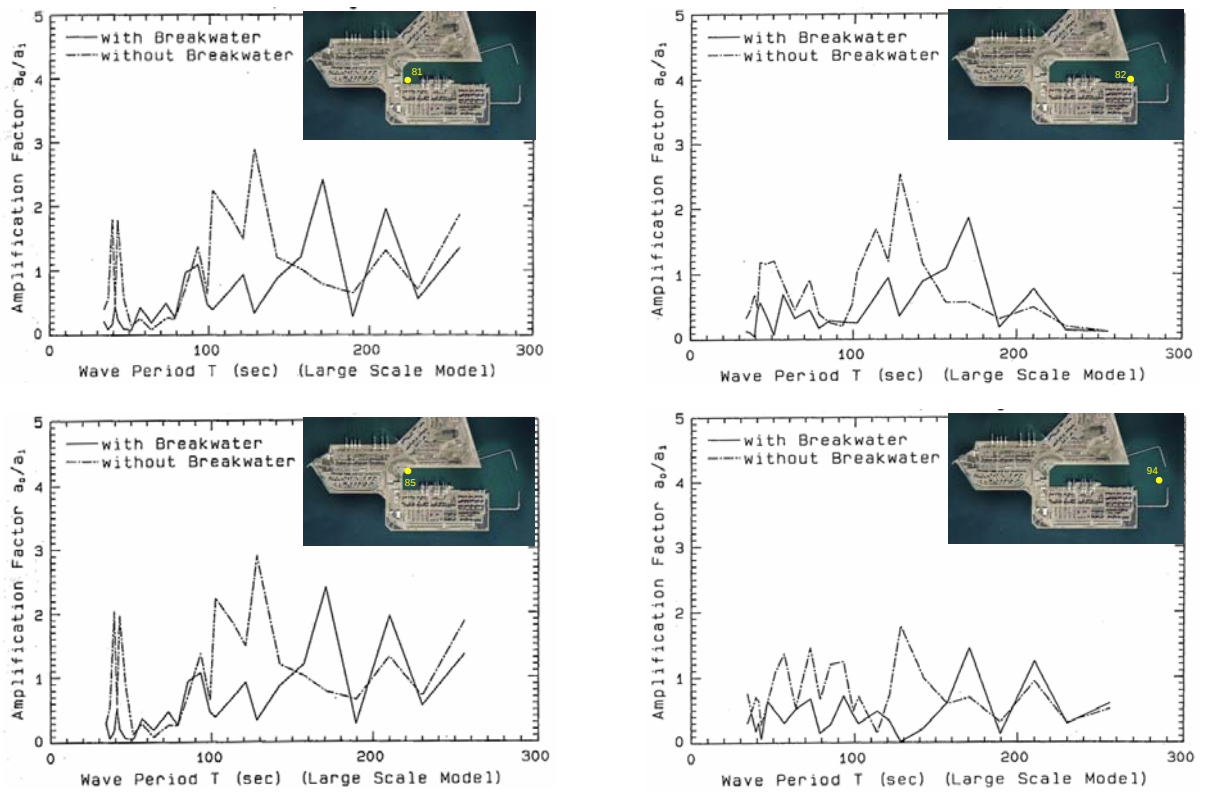


圖 3-7 長堤港 J 碼頭區港池共振改善結果圖

第四章 港池共振改善方案研擬

花蓮港港池共振為影響花蓮港船隻停泊及斷纜的主要因素，而颱風波浪又為引起花蓮港港池共振的主要原因。故本研究港池共振改善方案均針對颱風波浪為主，先依據現場颱風觀測資料，驗證本研究之數值模式，再根據修正後之數值模式，以改變不同的港灣佈置，探討其共振問題改善的效果。

4.1 模式建立

依據花蓮港現有的港灣佈置以及水深地形，建置花蓮港波浪數值模式，為考量波浪與結構物及底床等互制作用，以及港口南部南濱邊界影響，並考量改善佈置可能對東防波堤以及北部地區作改變，故本研究的計算領域北部涵蓋整個港池，南部則達到花蓮溪口，計算範圍如圖4-1所示。計算網域的半徑約4 km，計算的網格則以 Lee et al. (1998) 提出的自動網格生成法劃分本研究範圍網格，網格於港內面積較小，而於港外面積較大，網格節點個數為72,955，網格元素個數為17,823，計算網格示意如圖4-2，左圖為全計算範圍，右圖為內港網格劃分示意圖。

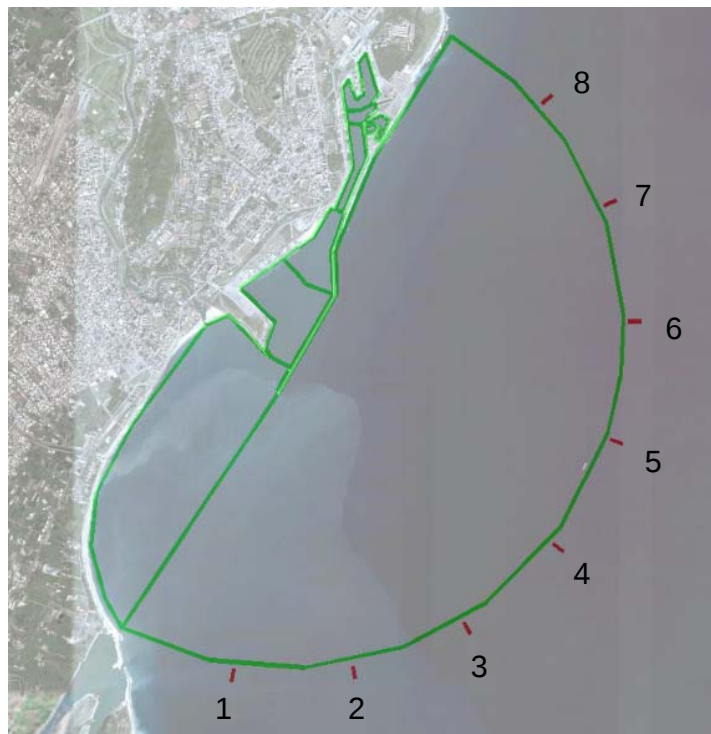


圖4-1 花蓮港現有佈置及模式計算範圍示意圖

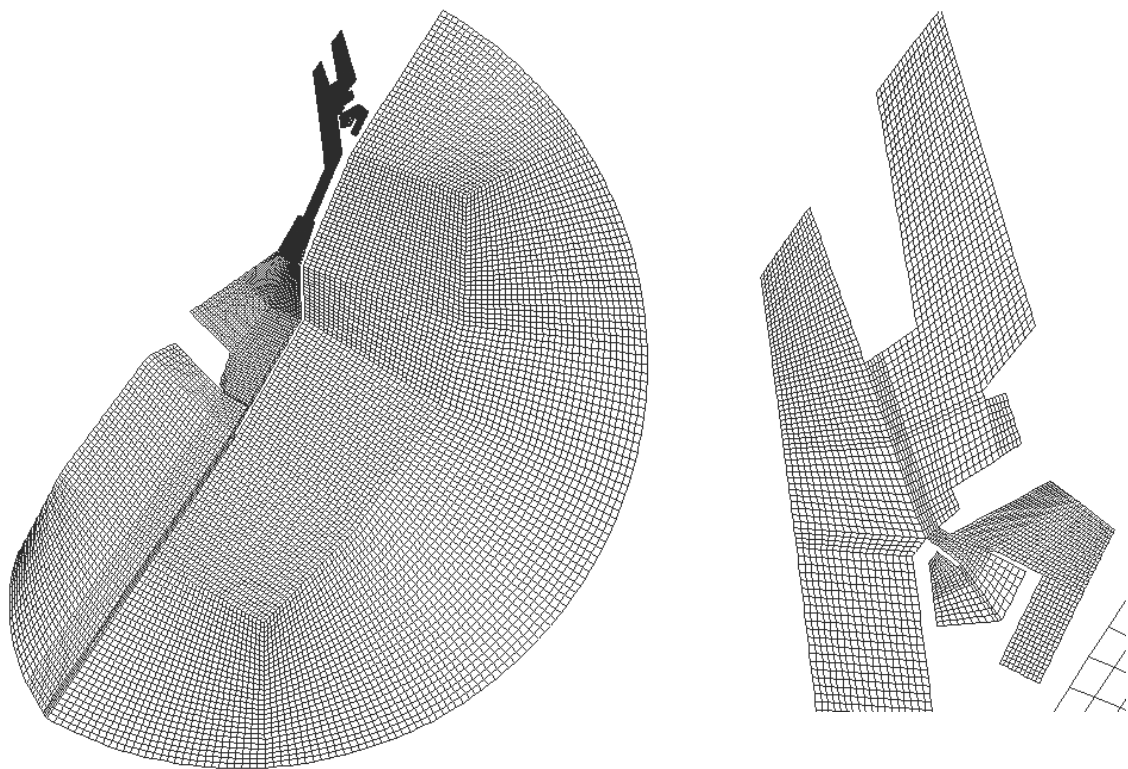


圖4-2 FEM模式計算元素切割示意圖（左：全區。右：內港區）

花蓮港港池共振模式的驗證，以1994年間堤姆颱風時，現場所量測得到的水位資料，所計算得到的週期域上之放大率 R 分佈圖（蘇和蔡，2002），作為模式計算驗證之參考。主要驗證的位置為 #8、#10、#17及#22碼頭附近之港池，碼頭的相關位置圖如圖4-3所示，計算比較結果如圖4-4至圖4-7。本模式驗證由週期5sec至200sec，圖4-4及圖4-5顯示實測資料於#8及#10碼頭附近，在160sec均有一明顯的共振尖峰值，而本研究模式計算結果，在此週期附近亦能表現明顯的共振現象，尤其以#8碼頭的共振之放大率尖峰值以及頻寬與實測值較接近。另外本研究模式在其他週期的計算結果，亦與實測值相差不大。圖4-6顯示於#17碼頭附近之實測值，在102sec附近及145sec附近有共振現象，但放大率值不大，本研究模式亦能表現相同趨勢，惟其發生共振尖峰的週期稍往長週期平移。圖4-7顯示#22碼頭附近的實測值，在140sec附近有共振現象，本研究模式計算結果具相同之現象，且其共振頻寬亦相近。

以上結果顯示：本研究所建立之花蓮港共振模式，均能表現花蓮港不同港池位置的共振現象，故以本模式作為港池共振改善之計算模式。

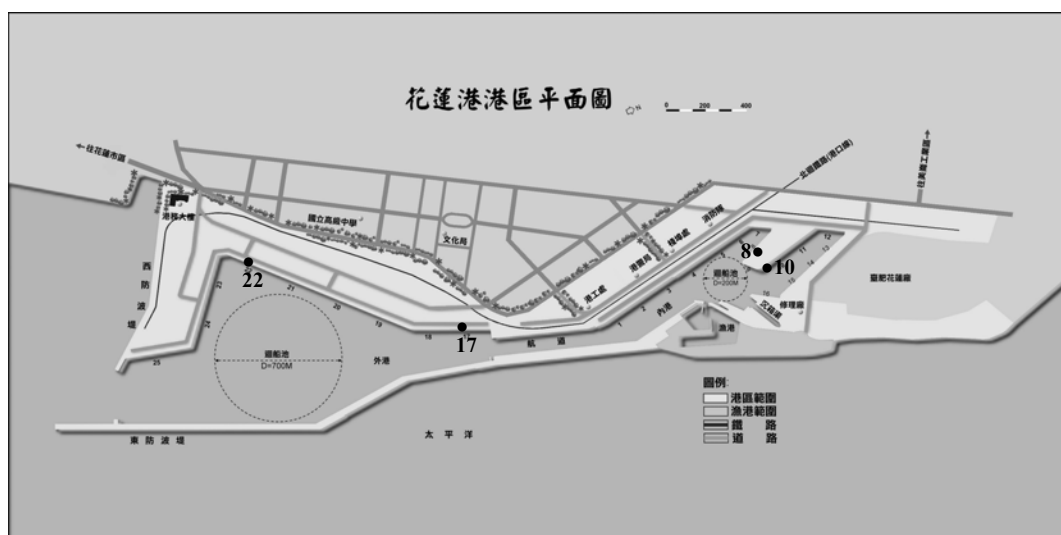


圖4-3 模式計算分析及驗證碼頭分佈圖

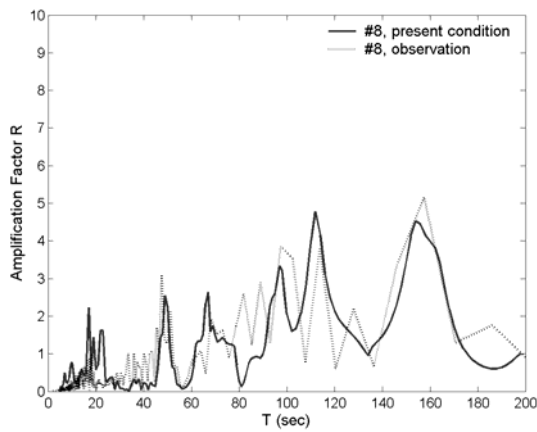


圖4-4 #8碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較圖

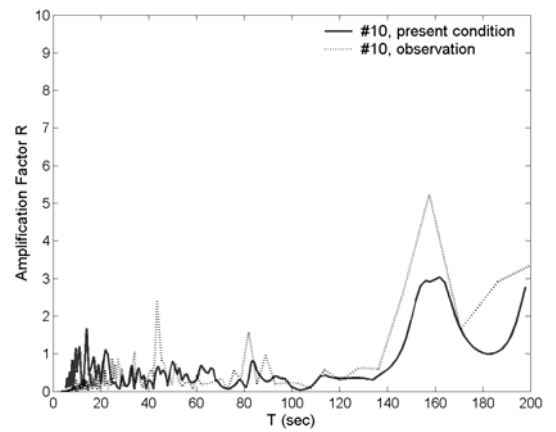


圖4-5 #10碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較圖

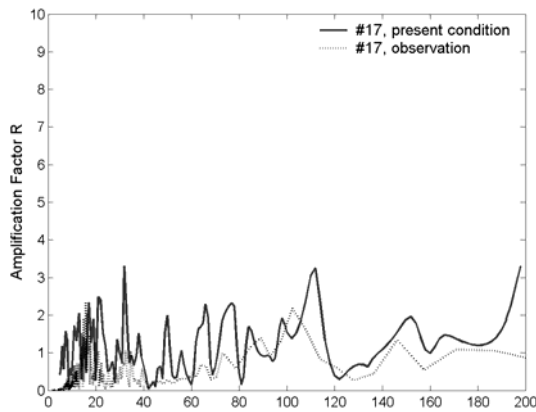


圖 4-6 #17 碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較圖

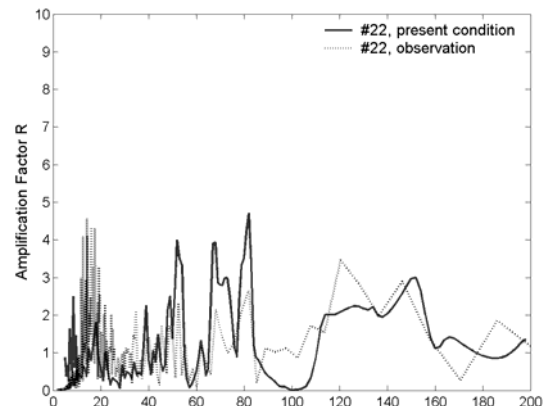


圖 4-7 #22 碼頭附近之放大率實測與本研究模式計算結果比較圖

4.2 改善方案研擬

依據文獻的結果以及波浪傳遞的特性，研擬本研究改善方案，並根據前一次研擬改善的結果，作為下一次改善佈置設計之依據。本研究共研擬十個改善方案，茲將計算研究結果討論如下：

1. 舊東堤打開200m

改善佈置 1 以舊東堤打掉200m的防波堤，此改善目的為試圖讓港池內的波浪能量，由這個開口傳遞出港外，若此佈置可行，再進一步設計細部的外廓防波設施，改善後港池示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖如圖4-8所示，圖中黑色曲線為實測資料（提姆颱風），紅色曲線為與實測資料相同的花蓮港現狀佈置條件，本研究模式計算的結果，綠色曲線則為改善佈置1，本研究模式的計算結果。圖形顯示在#8碼頭位置，在改善佈置1條件，共振週期往較低週期平移，約發生在100sec~130sec，且波高放大率比原始佈置大；在較小週期的波高放大率亦均比原始佈置大。在#10碼頭位置改善佈置1條件下，雖160sec共振週期的放大率 $R=5.2$ 比原始佈置 $R=3.1$ 增加，但發生共振條件週期往較高週期（ $T=190\text{sec}$ ）平移，表示本改善佈置在#10碼頭位置，能獲得改善。在#17號碼頭位置，在130sec ~170sec 週期之波高放大率比原始佈置大，表示改善效果更差。在#22碼頭附近，在130sec ~170sec 週期之波高放大率比原始佈置小，但在140sec~170sec則無改善效果。改善佈置1在上述四個碼頭附近於100sec以下，尤其在50sec以下週期的波高放大率比原始佈置大，表示低週期的穩靜效果比原始佈置差。綜合以上結果，港口外側東防波堤開口，以抒解港內波浪的能量的構想並不可行，因開口可能導致更多的外海波能進入港內，導致許多週期的波高放大率都無法有效減低。

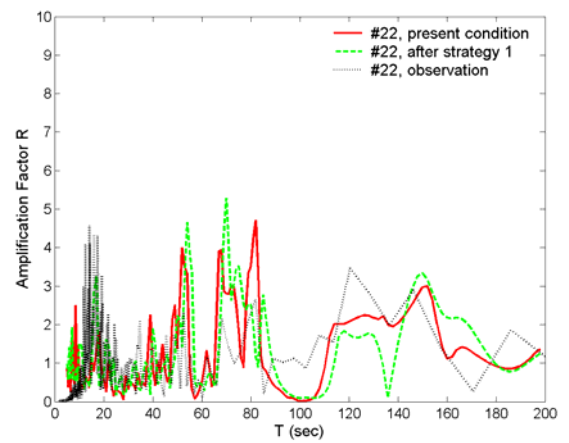
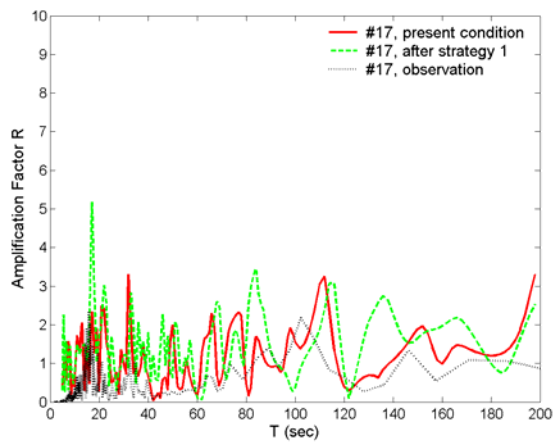
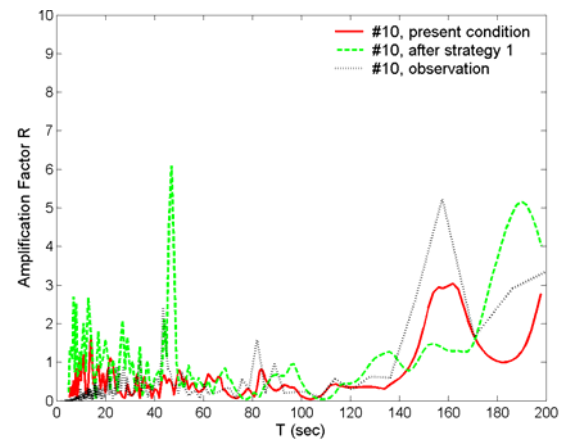
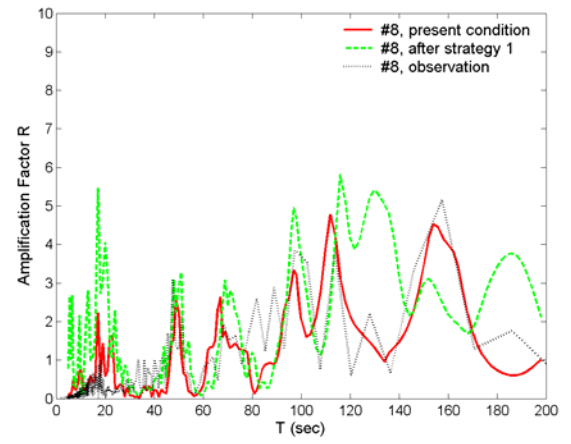


圖4-8 改善佈置1 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

2. 港池分割

改善佈置2 以舊東堤打掉200m的防波堤並將內外港間之航道封閉，此改善目的為改變池內的特性長度，試圖破壞原有共振機制或使共振週期改變。改善佈置2 港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較如圖4-9所示。圖形顯示在#8碼頭位置，本改善佈置條件，其160sec的波高放大率雖比原始佈置稍減，但卻在140sec 及180sec附近出現新的共振尖峰，而且比原始佈置在160sec的共振尖峰值大。在#10碼頭位置改善佈置2條件下，雖160sec共振週期的波高放大率 $R=7.5$ 比原始佈置 $R=3.1$ 增加，但發生共振條件週期往較高週期（ $T=185\text{sec}$ ）平移，表示本改善佈置在#10碼頭位置，共振週期可平移至對船隻較小危害之位置。

在#17號碼頭位置，在108sec 週期之共振尖峰雖消失，但卻平移至125sec週期，而且共振的波高放大率尖峰值比原來大一倍，表示改善效果更差。在#22碼頭附近，其情形與#17碼頭相似，共振週期往長週期平移且波高放大率比原始佈置大。改善佈置2在上述四個碼頭附近在100sec以下，尤其在40sec以下週期的波高放大率比原始佈置大，表示低週期的穩靜效果比原始佈置差。綜合以上結果，港口外側東防波堤開口並將港池劃分為二的構想並不可行，因開口導致更多的外海波能進入港內，而航道封閉的垂直壁，亦無法消減進入港內的波浪能量。

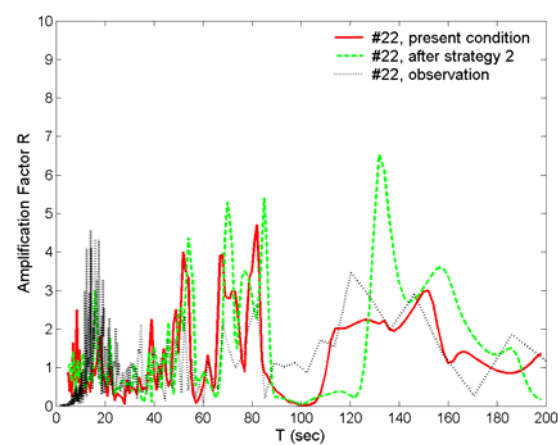
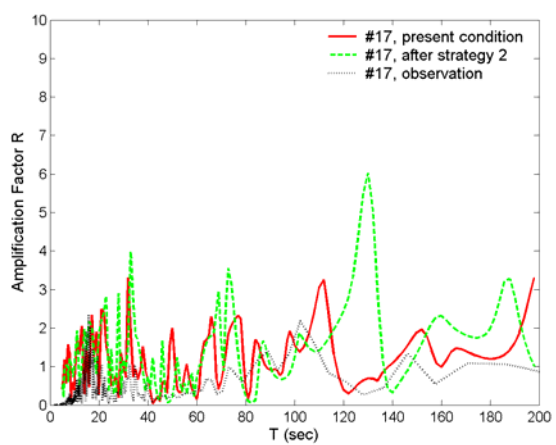
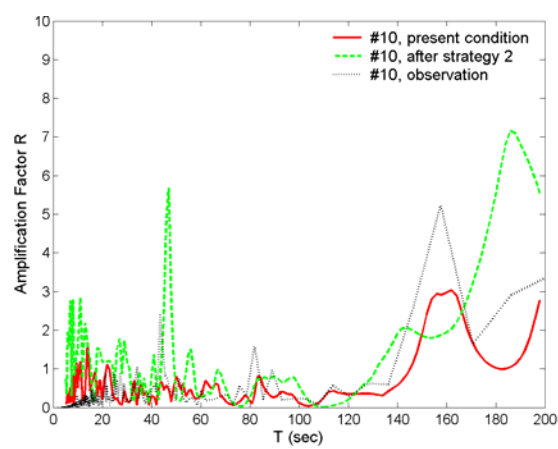
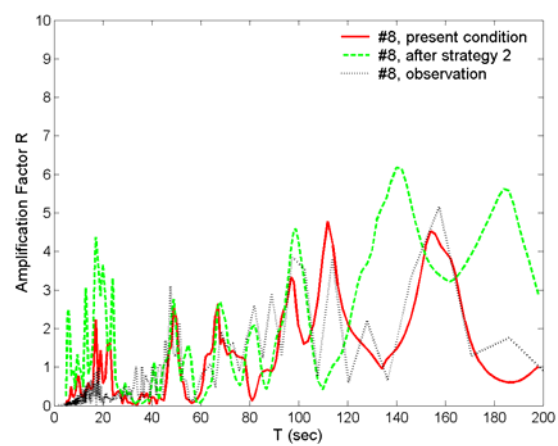


圖4-9 改善佈置2 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

3. 舊東堤打開200m加航道吸能

改善佈置3 以舊東堤打掉200m的防波堤並將內外港航道的堤壁加裝吸波設施，此改善目的為加裝吸波設施若能改善共振問題，再進一步設計消波堤壁。圖4-10為改善佈置3 港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖。結果顯示於本改善佈置條件下，#8碼頭位置其原始佈置的110sec及160sec附近的共振，平移至130sec及180sec，尖峰值雖有減弱但是不多，顯示改善效果有限。在#10碼頭位置改善佈置3條件下，雖160sec共振週期的放大率 $R=4.8$ 比原始佈置 $R=3.1$ 增加，但發生共振條件週期往較高週期（ $T=182\text{sec}$ ）平移，表示本改善佈置在#10碼頭位置，共振週期已平移至對船隻較小危害之位置。

在#17號碼頭位置，在108sec 週期之共振尖峰已消失，其他週期亦無明顯的共振發生，表示已達到改善效果。但在#22碼頭附近，120sec至160sec的共振強度，並無減小，表示在此碼頭附近改善效果不佳。改善佈置3於#10、#17及#22碼頭附近，在100sec以下的波高放大率比原始佈置小，表示低週期的穩靜效果比原始佈置好。綜合上述結果，於港池航道加裝吸能設施，在#10及#17碼頭附近，能得到較好的改善效果。

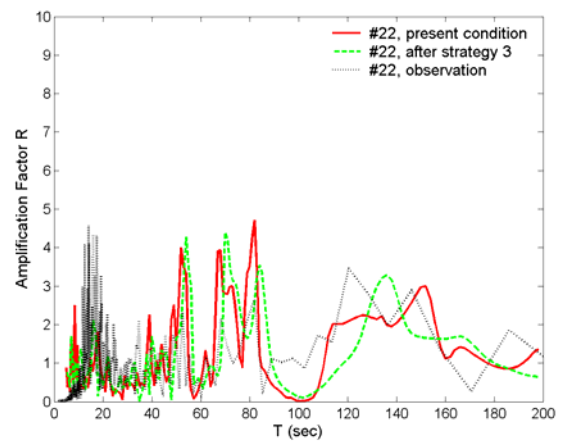
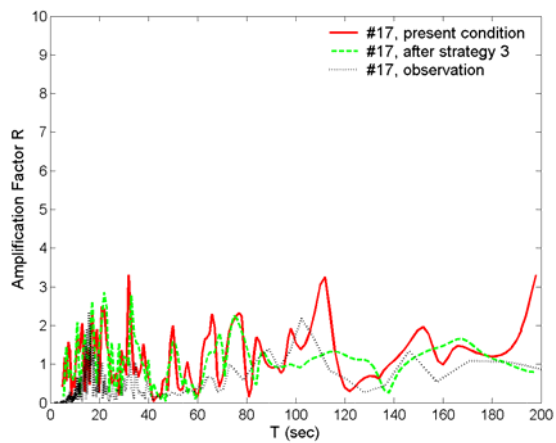
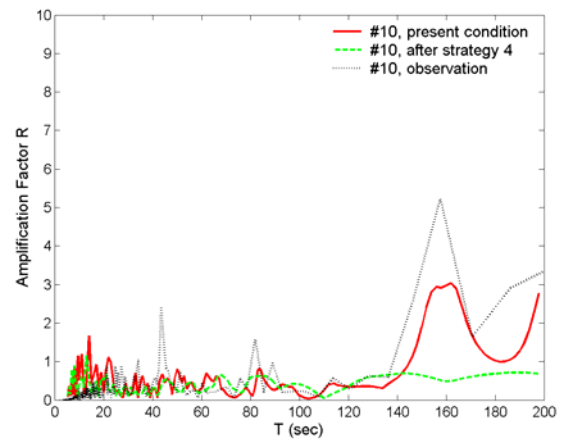
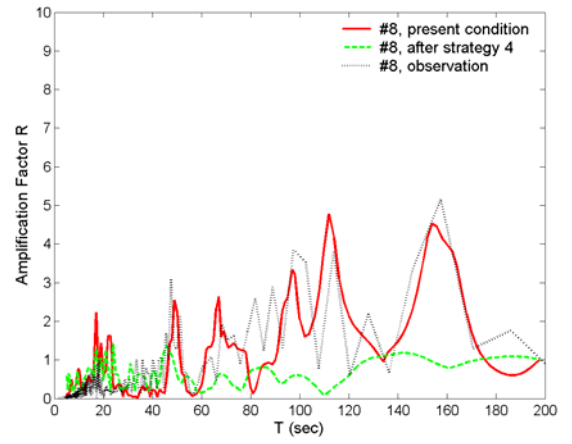


圖4-10 改善佈置3 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

4. 舊東堤打開200m加航道吸能及碼頭消波

改善佈置 4 以改善佈置 3 的舊東堤打掉 200m 的防波堤並將內外港航道的堤壁加裝吸波設施條件，並於內外港池碼頭壁加裝消波設施，此改善目的為加裝吸波及消波設施，若能改善共振問題，再進一步設計消波堤壁。港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖如圖 4-11 所示。圖中在#8、#10、#17 及#22 附近的長波港池共振現象已消失，且低週期波浪亦能一併改善，故此改善佈置能達到解決共振問題。但碼頭的消波設計，尤其對於長週期波浪，較為困難。本研究提出將#13 及#14 碼頭形式，變更為棧橋式碼頭，且必須於碼頭後側陸域的防風林帶（台肥花蓮分公司所有），加以浚挖使內部港池與北部外海相通，惟水深不能太深（避免外海波浪進入），或作迂迴水道，其目的在使長週期波浪進入港內後，在#13 及#14 號碼頭能進可能完全透過，無反射波回港池，如此達到消滅共振強度效果。

5. 舊東堤打開200m加航道吸能及東堤打開400m

改善佈置5 以舊東堤打掉200m的防波堤並將內外港航道的堤壁加裝吸波設施，並將東堤打開400m，此改善目的為東堤打開400m，若能改善共振問題，再進一步設計防波堤。圖4-12為改善佈置5 港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖。結果顯示在本改善佈置條件下，#8碼頭位置於原始佈置110sec及160sec附近的共振，變成120sec至180sec的寬頻共振，尖峰值雖有減弱但是不多，顯示改善效果有限。在#10碼頭位置改善佈置5條件下，雖160sec共振週期的放大率 $R=3.9$ 比原始佈置 $R=3.1$ 增加，但發生共振條件週期往較高週期（ $T=182\text{sec}$ ）平移，表示本改善佈置在#10碼頭位置，共振週期可平移至對船隻較小危害之位置。

在#17號碼頭位置，在108sec 週期之共振尖峰已消失，其他週期亦無明顯的共振發生，表示已達到改善效果。但在#22碼頭附近，120sec至160sec的共振強度比原始佈置大，表示在此碼頭附近改善效果不佳。

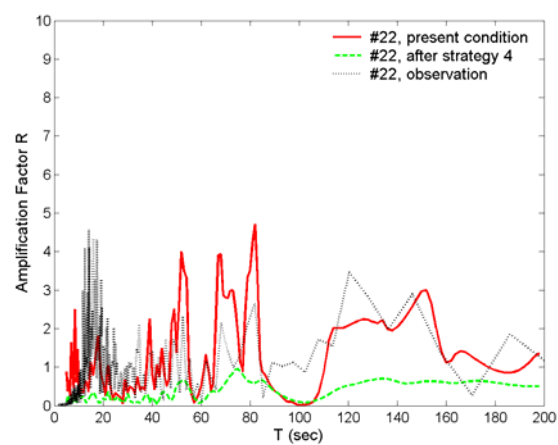
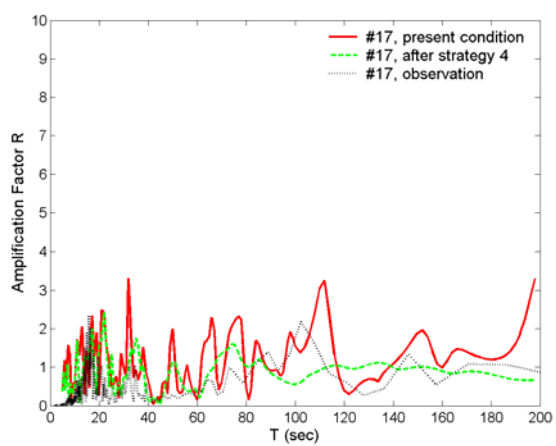
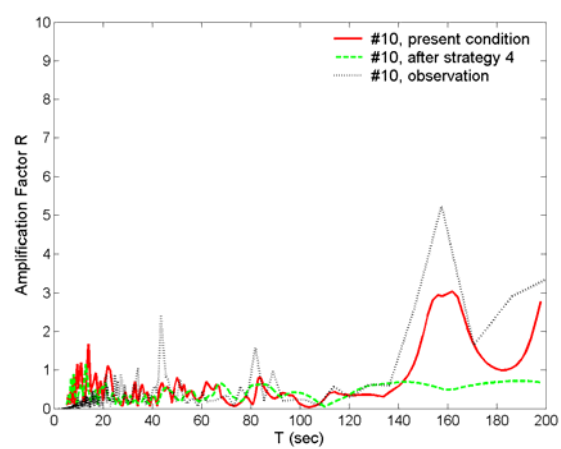
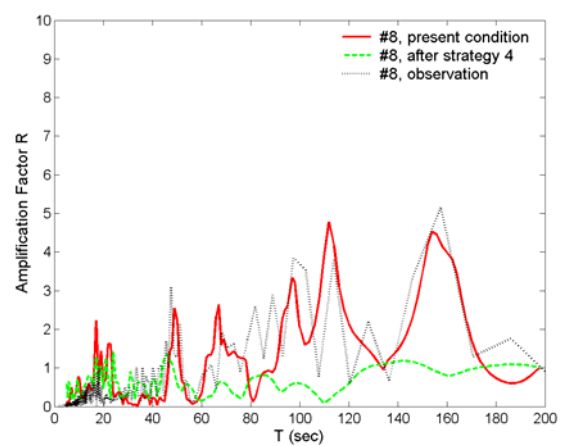


圖4-11 改善佈置4 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

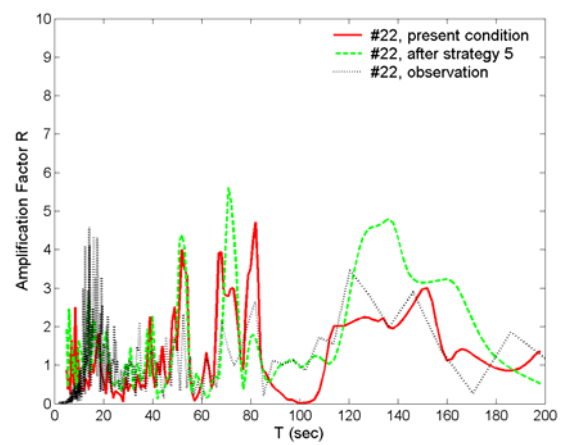
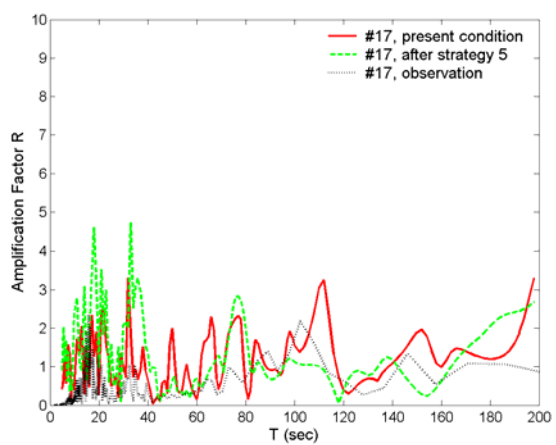
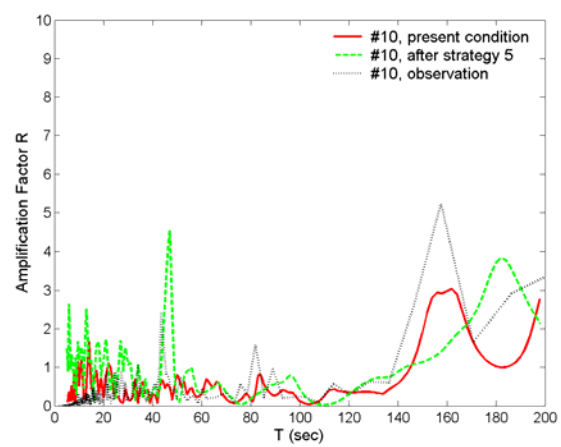
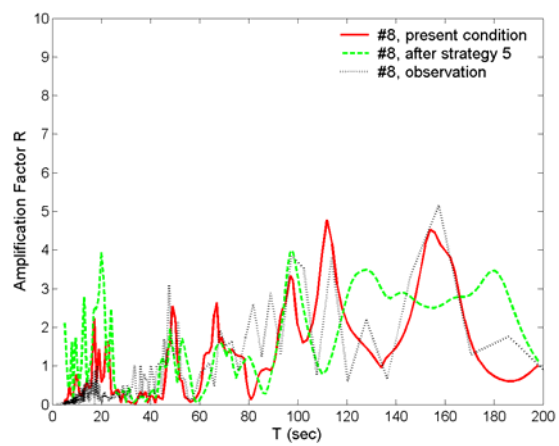


圖4-12 改善佈置5 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

6. 碼頭消波A

在外港及內港之碼頭堤壁均加裝消波設施，堤壁反射係數分為 0.5 及 0.8，改善佈置 6 示意如圖 4-13 左上圖。此改善目的為探討只有加裝消波設施，其共振問題改善的效果。在不同反射係數堤壁，於各碼頭位置之波高放大率比較圖如圖 4-13 所示。圖形顯示在#8、#10、#17 及#22 附近的波浪，不論在 100sec 以上長波或 100 以下波浪，其共振強度都能明顯的減小，而且反射係數愈小，其改善效果更佳。港池共振現象已消失，且低週期波浪亦能一併改善，故此改善佈置能達到解決共振問題。與改善佈置 5 比較下，顯示只要作好堤壁的消波功能即能達到改善共振的目的。但如上節所提到，要設計消除長波的碼頭斷面，困難度很高。目前想到的構想如上節所提。

7. 碼頭消波B

上節改善佈置 6 能有效解決花蓮港共振問題，所以繼續深入探討若消波的堤壁長度減小條件下，其共振改善的效果。改善佈置 7 依然在外港及內港之碼頭堤壁均加裝消波設施，只是長度較改善佈置 6 短，如圖 4-14 左上所示。各碼頭位置在不同的反射係數堤壁條件之波高放大率比較如圖 4-14 所示。計算結果顯示在#8、#10、#17 及#22 附近的長波港池共振現象雖無法完全消失，但比原始佈置的共振強度明顯減弱，其中以#8 及#10 碼頭位置的改善效果較佳，而碼頭消波功能較佳的反射係數 0.5 條件，其改善共振的效果更佳，故此改善佈置亦能達到改善港池共振問題。

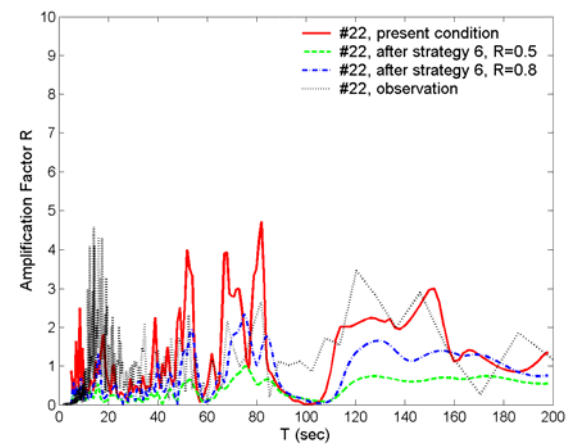
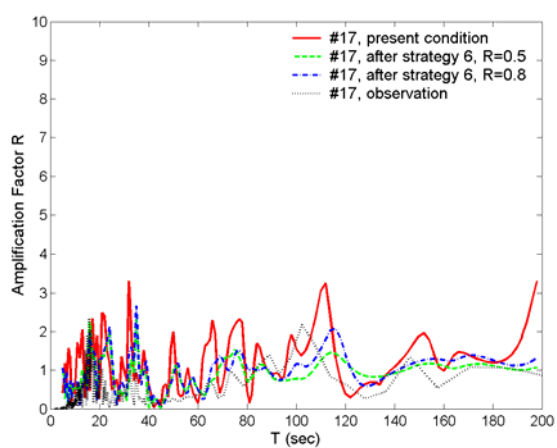
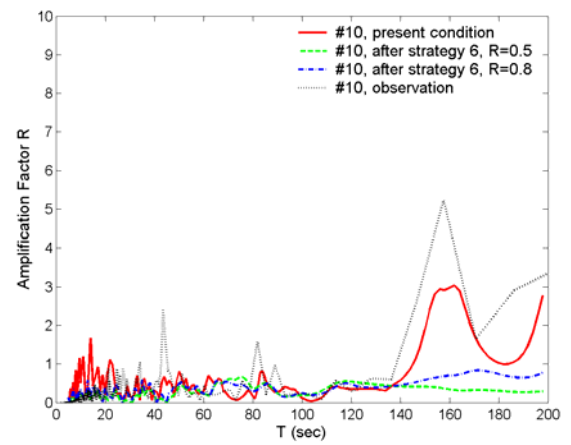
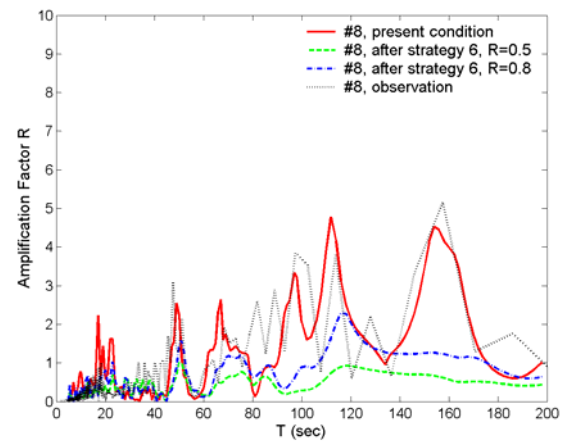


圖4-13 改善佈置6 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

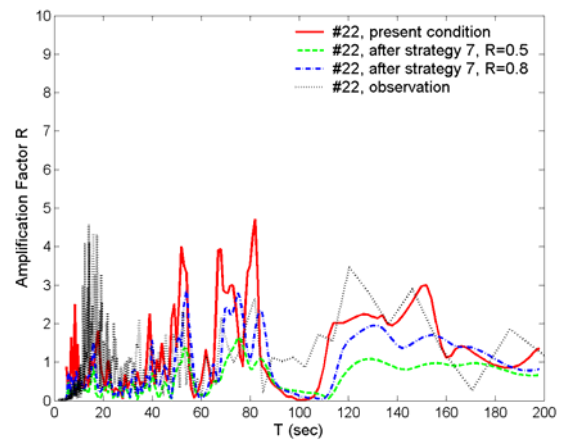
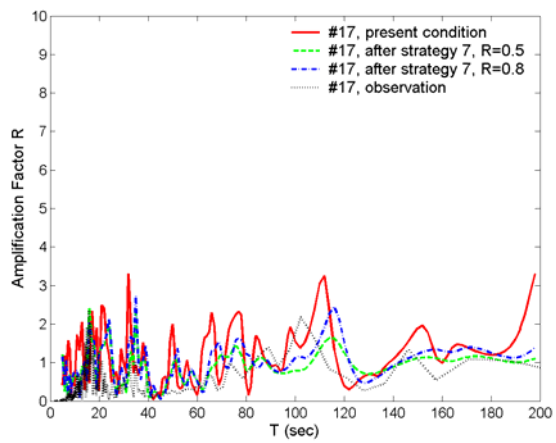
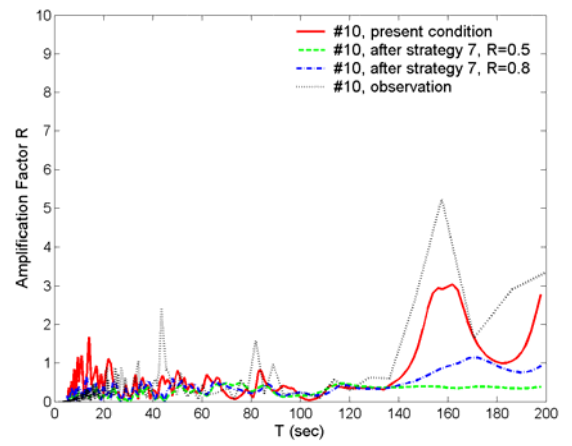
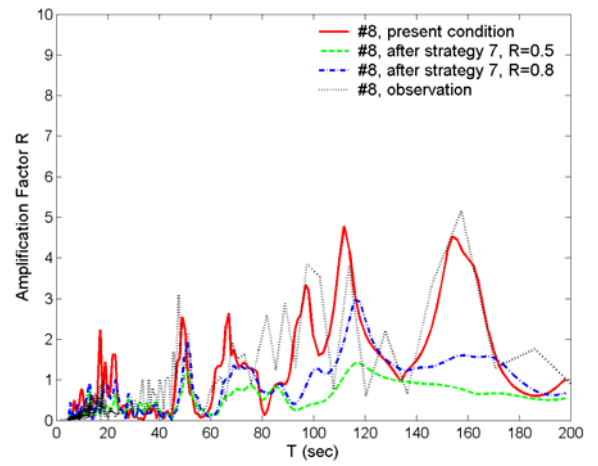


圖4-14 改善佈置7 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

8. 舊東堤打開200m加航道封閉及東堤打開400m

改善佈置8 以舊東堤打掉200m的防波堤並將內外港航道封閉，且將東堤打開400m。圖4-15為改善佈置8 港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖。結果顯示在本改善佈置條件下，#8碼頭位置在160sec附近的共振強度比原始佈置大，且頻寬亦更大，其他較小週期，共振強度亦沒改善。在#10碼頭位置的160sec共振週期的放大率 $R=5.6$ 比原始佈置 $R=3.1$ 增加，但發生共振條件週期往 $T=192\text{sec}$ 平移，達到移轉共振週期的效果。#17號碼頭位置，亦如#10碼頭般，具有使共振週期往對船隻危害較小的長週期平移。在#22碼頭附近，120sec至160sec的共振強度比原始佈置大，表示在此碼頭附近改善效果不佳。

9. 新建東防波堤

改善佈置9 將舊東防波堤以及新東防波堤均拆除，往外海深水處重建新東防波堤，此改善目的企圖將港池面積增加，使形狀作更大的改變，期能改變共振機制。改善佈置9 港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖如圖4-16所示。圖形顯示內港的#8及#10碼頭位置的共振週期均往長週期平移，為平移的量依然不夠。而在120sec週期以下之波高放大率，則與原始佈置差不多。在#17號碼頭位置，100sec週期以上的波高放大率均比原始佈置小，表示改善效果佳，但於83ec附近卻出現新的共振尖峰，其值達 $R=6.0$ ，本週期是否會危及船隻，值得進一步探討。在#22碼頭附近，120sec至160sec週期的共振強度與原始佈置相差不大，表示在此碼頭附近並無改善效果。綜合上述結果，顯示要改變港池形狀，是無法達到港池共振改善的效果。其原因如前所提到，港灣一旦形成，其特性長度約已固定，共振機制亦已決定，所以改變形狀是無法達到共振改善的效果。

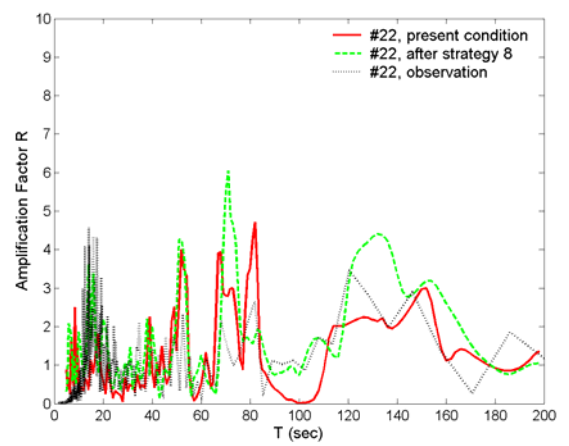
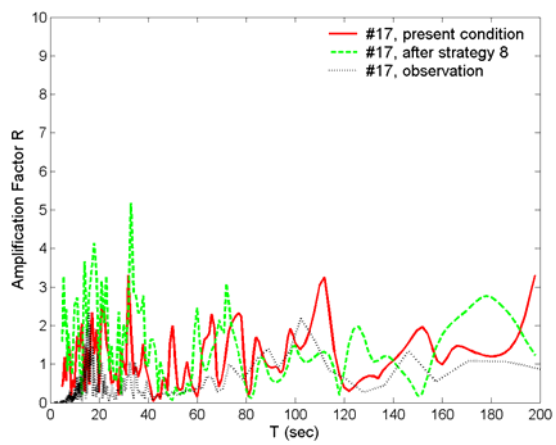
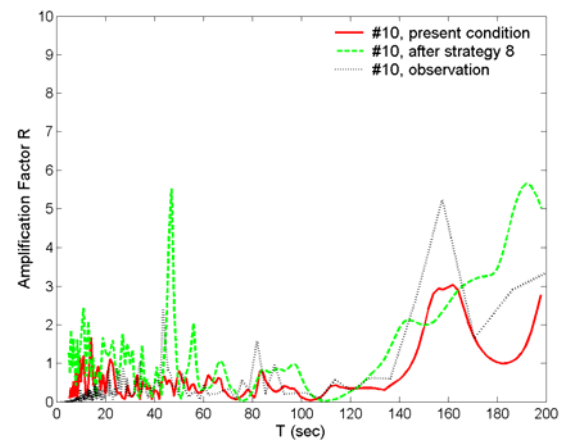
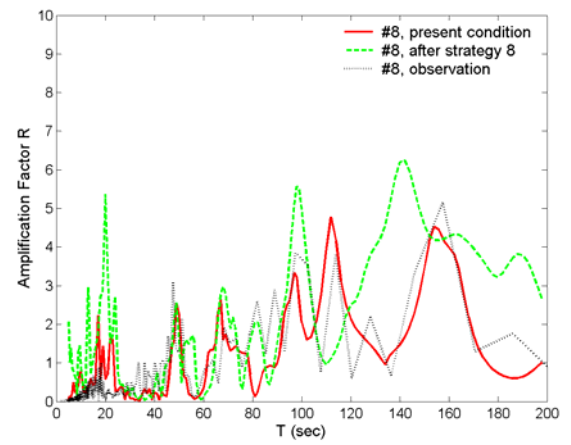


圖4-15 改善佈置8 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

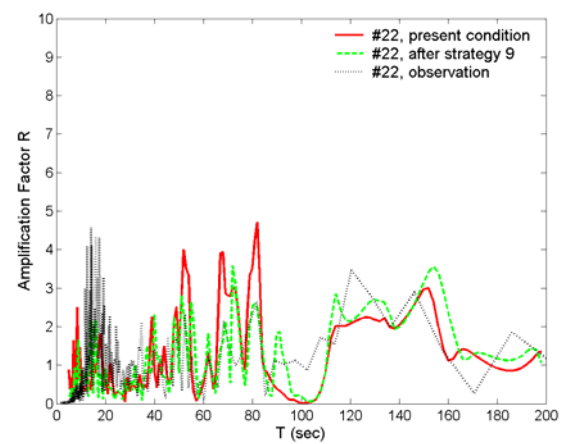
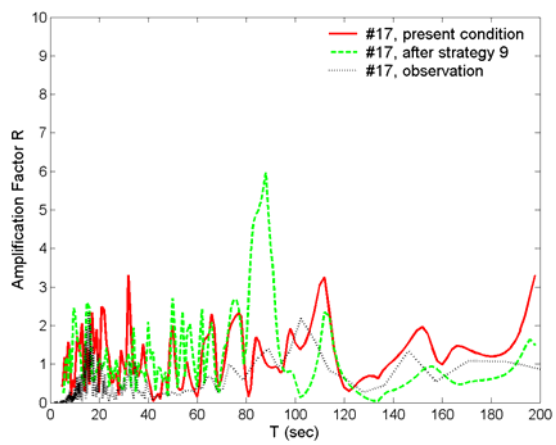
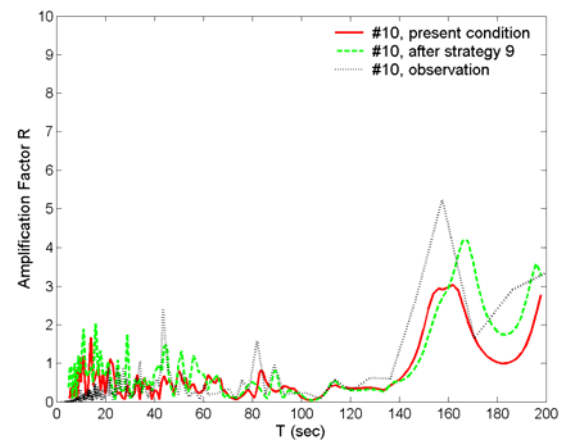
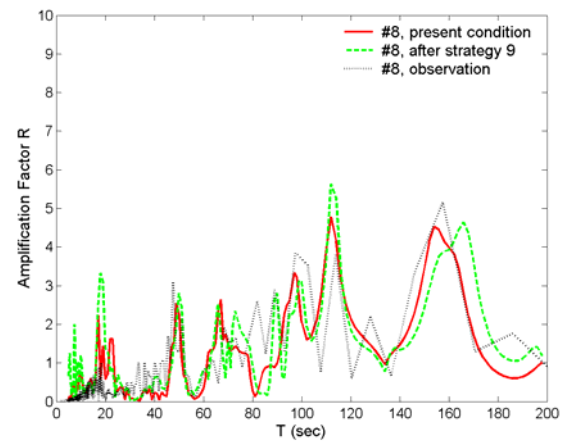


圖4-16 改善佈置9 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

10. 新建東防波堤

改善佈置10 在外港池之東防波堤往港池建築一350m突堤，此改善目的企圖利用突堤，阻擋進入港內之波浪，並改變港池特性長度，使港池共振機制改變。此改善佈置之港池佈置示意圖以及各碼頭位置之波高放大率比較圖如圖4-17所示。圖形顯示內港#8碼頭位置的158sec週期之共振強度並無改善，且共振的頻寬往低週期增加，使本共振週期介於140sec~170sec之間，另外在130sec以下週期之波高放大率值，均比原始佈置小，表示在較小週期的條件，本佈置能獲改善。內港#10碼頭位置的160sec週期之共振強度仍然無改善，且共振的頻寬較原始佈置增加。另外在130sec以下較小週期條件之波高放大率值，則與原始佈置差不多

在#17號碼頭位置之140sec~170sec週期波高放大率值，比原始佈置大，表示本改善效果在此週期條件不佳，但於110sec附近共振週期其波高放大率值比原始佈置小，但效果有限。在100sec以下週期條件，則與原始佈置的波高放大率值增減互見。

在#22碼頭附近，於120sec至160sec週期與原始佈置同樣出現共振現象，且於138sec出現極高的波高放大率值。在100sec以下週期條件下，本改善佈置與原始佈置之波高放大率值相近。

以上結果顯示本改善佈置並無達到共振改善的效果。探究其原因為：於港內加設突堤，進港之波浪尤其是長週期波，依然能繞過突堤堤頭，於港內發生共振現象，此與之前提到，港灣一旦形成，其特性長度約已固定，其共振機制亦已決定，所以港內作局部之改變，並無法達到共振改善的效果。

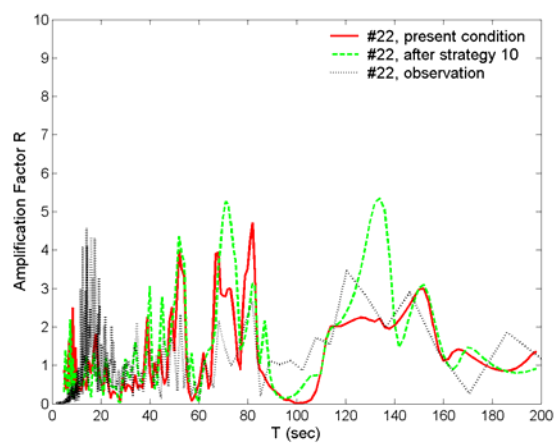
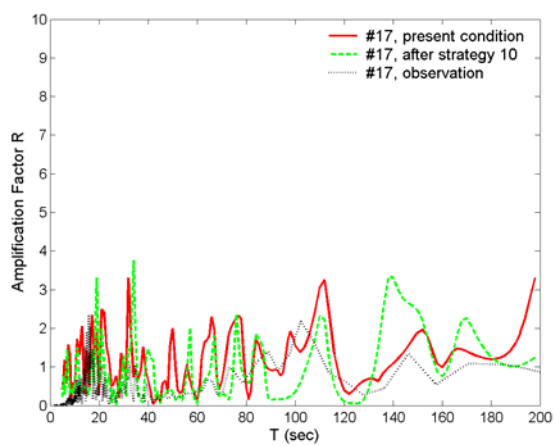
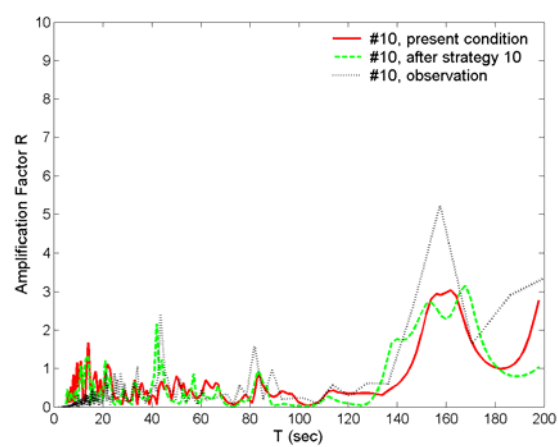
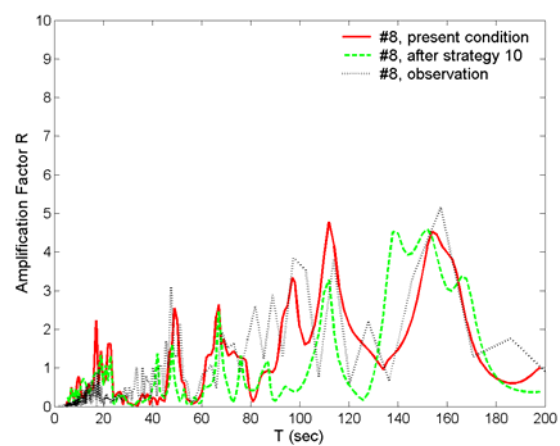
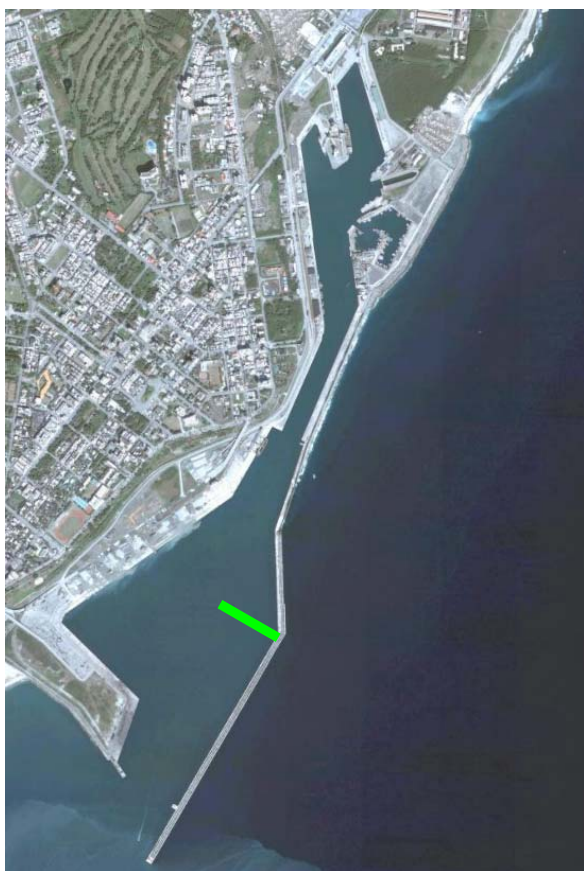


圖4-17 改善佈置10 之佈置示意圖及港池波高放大率比較圖

第五章 結論與建議

花蓮港港池共振問題，長期影響港務營運以及船隻安全，一直為施政及專家學者所關切。本研究以 Lee 等人 (1998) 的港池共振波場數值模式為基礎，建置花蓮港港池共振數值模式，並以花蓮港現場所量測波浪資料，作模式修正及驗證。本研究共提出 10 種不同的改善佈置方案，包括拆除部分東防波堤、航道封閉、碼頭堤壁增加消波設施、增加突堤以及各式的改變港池形狀佈置等，依據不同改善佈置探討其改善效果。

5-1 結論與建議

本研究依據上述分析討論結果，提出以下結論與建議，以供專家學者參酌：

1. 港灣主體完成後，因港池的特性長度固定，作局部的形狀改變，港池共振問題的改善均有限。因花蓮港南部至花蓮溪尚有北濱及南濱等腹地，若在政府政策及經費允許下，可朝將港灣再往南擴建至花蓮溪口附近。惟實施前需再作詳盡的理論、數值及水工試驗分析，才不致重蹈東防波堤增建導致共振問題的發生。
2. 由模式計算結果顯示，碼頭壁若加設消波設施，將長週期波消減，則能有效降低共振強度，但實際上，碼頭堤壁作消波設施無法對 100sec 以上長波消能。本研究提出將#13 及#14 碼頭形式，變更為棧橋式碼頭，且必須於碼頭後側陸域的防風林帶（台肥公司所有），加以浚挖使內部港池與北部外海相通，惟水深不能太深（避免外海波浪進入），或作迂迴水道，其目的在使長週期波浪進入港內後，在#13 及#14 號碼頭能盡量完全透過，無反射波回港池，而達到消減共振強度效果。
3. 造成花蓮港船隻斷纜原因，可能為港池共振發生時，停泊船隻長度與波浪互制作用，而產生極大的拉力，花蓮港其颱風

波浪週期約在 120sec 至 140sec 間，故若能將共振週期往高頻或低頻處平移，可防止船隻斷纜。又因港池內之水深幾乎相等，相近週期的波浪進入港池，波長幾乎都相等，相同波長波浪在港池內交互作用，容易互相疊加而發生共振。建議可朝改變局部水深，擾亂原有共振機制，作進一步改善共振之研究。

5-2 成果效益及後續應用情形

本研究利用數值模式以及現場波浪資料，探討花蓮港發生港池共振之原因，提出 10 種不同的改善布置方案，並根據不同佈置方案，探討其改善效果。本研究成果可提供本所以及政府相關單位施政之參考，亦可提供顧問公司以及學術研究單位在處理港池共振問題上研究以及設計之參考。

參考文獻

1. Berkhoff, J.C.W. (1972) "Computation of Combined Refraction-Diffraction," Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 705-720.
2. Chen, G.Y., C.C. Chien, C.H. Su, Hsiang-Mao Tseng (2004) "Resonance Induced by Edge Waves in Hua-Lien Harbor," Journal of Oceanography, Vol.60, pp. 1035-1043.
3. Chen, H. S. and C. C. Mei, (1974) "Oscillations and Wave Forces in an Offshore Harbor," Ralph M. Parsons Laboratory, Report No. 190, MIT.
4. Chen, H. S., (1986) "Effects of Bottom Friction and Boundary Absorption on Water Wave Scattering," *Applied Ocean Research*, Vol. 8, pp. 99-104.
5. Kwak, M.S., W.M. Jeong, C.K. Pyun, X.Y. Xing, and J.J. Lee, (2008) "Computer Simulation of Pohang New Harbor for Seiche Reduction," The 31st International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany.
6. Lee, J. J., (1969) "Wave-Induced Oscillation in Harbors of Arbitrary Shape," Report, KH-R-20, W. M. Kerk Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California, Institute of Technology, Berkeley, California.
7. Lee, J. J., (1971) "Wave-Induced Oscillation in Harbors of Arbitrary Geometry," Journal of Mechanics, Vol. 45, pp. 375-394.
8. Lee, J. J., and Raichlen, F. (1972) "Oscillations in Harbors with Connected Basins," Journal Waterways Ports, Coastal and Ocean Divisions, ASCE, Vol. 98, No. WW3, pp. 311-332.
9. Lee, J. J., C. P. Lai and Y.G. Li, (1998) "Application of Computer Modeling for Harbor Resonance Studies of Long Beach and Los Angeles Harbor Basin," Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 1196-1209.

10. Tsai L.H., X.Y. Xing, and J.J. Lee, (2008) "Improving Harbor Resonance Induced by Typhoon Waves for Hualien Harbor," Proceedings of 31st International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, ASCE, pp. 1236-1248.
11. Tsay, T. K. and P. L-F, Liu, (1983) "A finites Element Model for Wave Refraction and Diffraction," *Applied Ocean Research*, Vol. 5, pp. 30-37.
12. Tsay, T., K., W.Zhu and P. L-F, Liu, (1989) "A finites Element Model for Wave Refraction, Diffraction, Reflection and Dissipation," *Applied Ocean Research*, Vol. 11, pp. 33-38.
13. 林明崇、謝宗誠 (1985), 「波浪折射-繞射有限-邊界元素解析」, 中華造船工程學刊, 第四期, 第 131~137 頁。
14. 歐善惠、林西川、林火旺、蘇青和 (1990), 「不等水深多孔岸壁港池之共振模式」, 第 12 屆海洋工程研討會, 第 74~94 頁。
15. 曾相茂、簡仲璟 (1996), 「花蓮港海域海象現場調查與分析」, 交通處港灣技術研究所。
16. 簡仲璟、曾相茂 (1999), 「花蓮港颱風波浪特性研究」, 第 21 屆海洋工程研討會, 第 55~62 頁。
17. 莊文傑、江中權 (2000), 「亞重力波與花蓮港之共振機制與對策」, 第 22 屆海洋工程研討會, 第 578~585 頁。
18. 蕭松山、王昭文、方惠民、陳建興 (2000), 「雙互換邊界元素法解析花蓮港港池波動問題」, 第 22 屆海洋工程研討會, 第 327~334 頁。
19. 李兆芳、劉正琪、張憲國 (2001), 「港池振盪之數值計算模擬計算」, 海洋工程學刊, 第一卷, 第一期, 第 1~22 頁。
20. 郭一羽、林明儀、曾相茂 (2002), 「花蓮港池震盪現象的探討」, 海洋工程學刊, 第二卷, 第一期, 第 55~71 頁。
21. 張憲國、林立青 (2003), 「花蓮港港池振盪之頻率與振福辨識之

- 模式」，第 25 屆海洋工程研討會，第 103～110 頁。
22. 蘇明陽 (2003)，「花蓮港港池振盪入射波種類之探討及建議」，第 25 屆海洋工程研討會，第 917～923 頁。
23. 邱永芳、林炤圭、簡仲璟 (2004)，「花蓮港長浪特性試驗探討」，海洋工程學刊，第四卷，第一期，第 89～121 頁。