

岸壁非定值反射率對港灣波動評估模式之影響

林炤圭¹ 許師瑜²

¹ 國立臺灣海洋大學教授(退休)

² 交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

摘要

本研究係為能系統性地瞭解港灣波動機制，考慮到可能的大量情境模擬與計算，乃延續林等人(2002)有關非定值反射率港灣波動模式，並引進李(2011)有關消能斜坡等研究，建立各區段岸線的波浪週期-反射率對照表，進一步優化 Lin(1995)模式。由於林等人(2002)以人工方式逐一修改與週期相關的反射率定義岸壁消波能力，無法適切反應海岸結構物隨波浪週期變化的消波特性，本研究乃引入不同岸壁之土工模型斷面試驗反射率資料，並藉此建立一套系統性港灣波動評估程序，以便能評估不同岸壁的消波能力對整體港灣波動之影響。首先以部分開口矩形港池為例，模擬港灣多種區段岸壁完全反射、定值反射、非定值反射等多種情境進行比較，過程中顯示港灣波動不能只以單一的物理現象解讀。藉由優化 Lin(1995)模式，可更貼切應用於港灣工程之規劃設計，評估多種消波設施方案的港灣波動情形。最後以花蓮港#7 號碼頭做為應用例。

一、前言

港灣工程之規劃設計大多將港灣波動數值模擬與平面土工模型港灣遮蔽試驗，做為評選港灣最佳配置方案的必要工具，後者因為土工模型製作費用高，試驗進行與資料分析也耗時耗力，無法就每一個可能的配置方案都進行詳細評估。拜電子計算機相關軟硬體快速升級之賜，港灣波動數值模擬已提升為相對成本較低的工具，不論是建立數值模型或進行數值模擬與分析都可快速完成，也充分提供各種配置方案的模擬結果。讓港灣規劃人員可回歸到從物理性觀點，專注於最佳方案研選，而不必忙碌於數值模擬計算與資料分析繪圖，例如，藉由多種網格產生軟體，不論結構性網格或非結構性網格，都能在遠低於人工建置所花的時間內完成，要修改部分港灣配置更是輕而易舉。記憶體之擴充與多核心的運算，使得較細的元素或較大的計算範圍，動輒數十萬甚至數百萬的節點運算，在個人電腦上成為可能。因此，於規劃設計階段，港灣波動數值模擬可扮演比土工模型試驗更重要的角色，也就是應該利用上述的優點，將各種可能的配置方案分別建模，包括港形配置與消能設施的選擇，如拋放消波塊、建置消能斜坡或採用直立式消能結構物等，皆關係到邊界條件的設定。建模後快速地進行數值模擬，並利用巨集指令產生大量必要的後處理圖表，再針對模擬結果進行綜合評比，或做局部修正後，再重複進行數值模擬。最後再研選最佳配置方案，交付土工模型試驗執行最後的物理性驗證。

要能夠合理地執行以上的程序，邊界條件設定往往是建模工作中的最大負擔，其原因之一除了光滑直立壁為全反射及沙灘視為完全消波外，其它港灣/海岸結構物的消波能力，常與波浪週期、波高和波向、結構物型式與消能設施的規模及類型有關，甚至漲退潮也直接影響到消能的有效空間，並非一個簡單的數學公式可以表達。基於結構物型式與消能機制的複雜性，在實務上仍多以反射率來評估，並藉由斷面水工模型試驗來獲得反射率值，過往的諸多試驗結果均顯示反射率至少與週期有關。然而，在港灣波動模擬中，為了簡化計算，岸壁卻常常是假設邊界具有其特定的反射率經驗值，而不論其縱深或型式。林等人(2002)已經開始考慮岸壁的反射率與波浪週期有關，但當時仍以人工方式修改邊界條件，對於多種入射波條件的數值模擬有諸多不便。

基於以上的考量，本研究乃從文獻與自行規劃執行的反射率水工模型試驗中，蒐集多種消能結構物的反射率曲線。經多方評估後，本研究改進林等人(2002)以人工方式，逐點修改各岸壁所對應之入射波週期反射率，而改依港灣的防波堤及碼頭岸壁類型，進行分類及編碼。同時建立週期-反射率關係表，以便能在港灣波動數值模擬中，連續模擬各種波浪條件時，能直接利用週期參考關係表，進行線性內插反射率繼續計算。

有關港灣波動模式是沿用 Lin(1995)的版本，進行邊界條件的設定改善，其數值模式的理論與推導可參考 Lin(1995) 或林及陳(1996)，在此不贅述。本文共分 6 章，第二章首先整理多種港灣內可能使用的消能結構物消波能力；第三章說明數值模型建立；第四章討論數值模擬結果；第五章是港灣波動評估模式初探；最後是結論與建議。

二、港內消能結構物之文獻回顧

波浪的反射一般常以波動的觀念來解釋，但只是一種巨觀敘述，若以水動力觀念來看，可能會更容易掌握。當波浪遇到結構物的光滑表面時，不論是直立壁或斜面，水體都會因為空間的擠壓而堆高。遇到直立壁時，其動量的水平分向量會直接反彈，垂直分向量因為重力的作用，水體先沿著直立面持續堆高，直到完全轉化為位能後，才開始由位能轉動能而下降造出反射波。類似地，在遇到斜面時，原本向前運動的水平分向量，被迫改為沿著斜面方向運動，垂直分量則持續因淺化效應，堆高波形直到發生碎波，部分水體則沿著斜面向上溯升，直到完全轉化為位能後，才開始由位能轉動能的溯降造出反射波。假如結構物表面為光滑不透水時，由於能量不減緣故，直立壁會產生完全反射，斜面上則為扣除因碎波所造成能量損失後，剩餘的形成反射波。從這樣的角度來詮釋波浪的反射時，會粗略發現碎波能量損失與淺化過程中的波高及波長變化有關。不同尺度的表面粗糙度，可製造邊界層的紊流，能促成摩擦損失與碎波的發生。多孔隙入滲可吸收部分波能，但當孔隙飽和含水時，將會失去消能效果。如能充分掌握上述機制，應可從整個運動過程中，吸收或轉移掉某些波動能量，以降低波浪的反射。

海岸工程消能結構物的討論內容很多樣化，如港內、港外、海岸、出水及沒水結構物等，但鮮少有較完整的消波能力的資訊，雖然應用理論推導或數值模擬的文獻也很多，有關波浪遇到結構物的文獻回顧在蔡等人(2023)已有相當回顧，本章僅做與港內消能設施有關的簡單整理。

1. 自然海灘：Taira & Nagata (1968)以 3 種週期，針對不同坡度的自然海灘，進行波浪反射率試驗研究，並換算為波形尖銳度(H/L)檢討，如圖 1 所示。Seelig & Ahren (1981)蒐集 4,000 個自然海灘、護坡及防波堤的反射率試驗資料，並嘗試建立推估公式，如圖 2 所示，為反射率與 Iribarren 數(ξ)的關係圖。然而，比對圖 1 及圖 2 的反射率與波長的關係，雖然自然沙灘一直被視為完全消波的象徵，但試驗資料顯示其在長週期波作用下，反射率仍高。實務上不適合將自然沙灘視為完全消波的岸線，尤其是對長週期波而言。

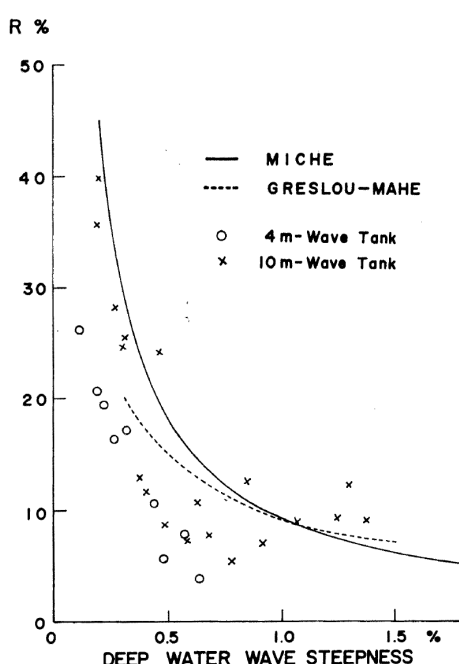
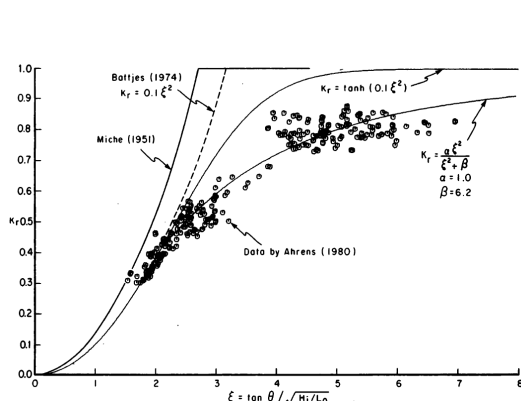
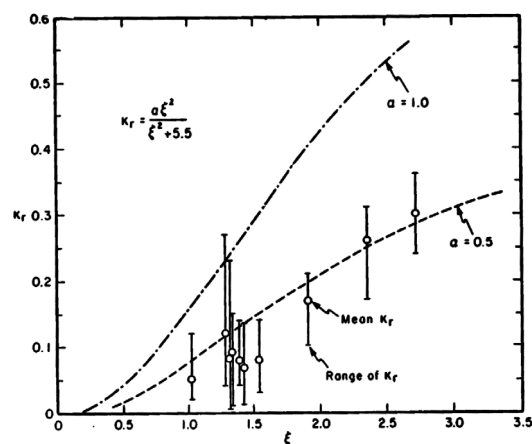


圖 1 6°斜坡上之反射率與波形尖銳度(H/L)的關係(Taira & Nagata, 1968)



(a) 不同坡度之經驗公式值



(b) 試驗值

圖 2 斜坡反射率與 Iribarren number(碎波指數)的關係圖(Seelig & Ahren, 1981)

2. 拋石堤：Allsop & Hettiarachchi (1989)蒐集多種斜坡拋石堤的反射率試驗資料，如圖 3(a)所示。Zanuttigh & van der Meer (2007)蒐集多種消能斜坡的反射率試驗資料，如拋消波塊堤、光滑斜坡、不透水拋石堤及透水拋石堤，如圖 3(b)所示。圖中顯示透水性結構物的消能效果優於不透水之多孔隙結構物，而光滑表面最差，但仍因波浪碎波與否而有所不同。拋石堤是利用波浪在孔隙間的衝撞，以及表面摩擦損失來削減波能，但反射率仍高。

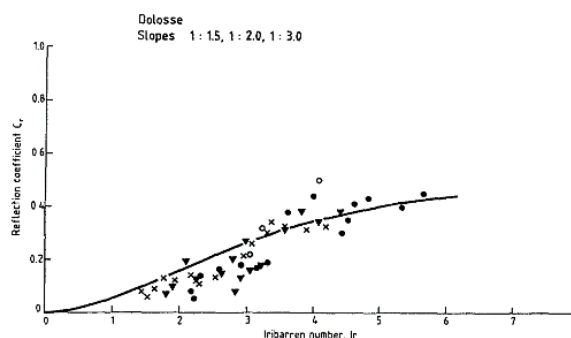
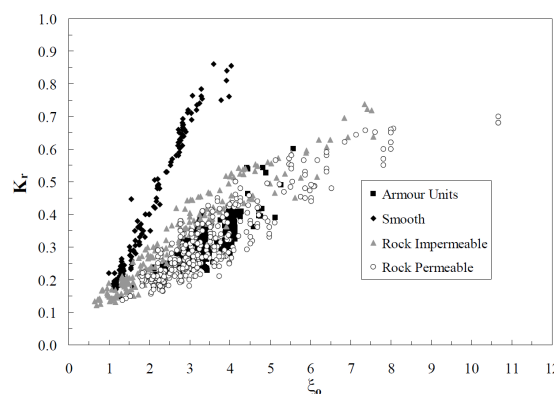


Fig 3 Reflection performance of Dolos armoured slopes, regular waves

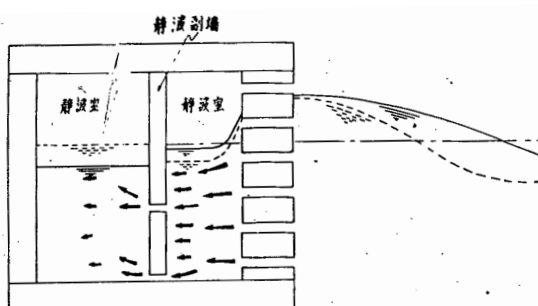
(a) 雙 T 塊(Allsop & Hettiarachchi, 1989)



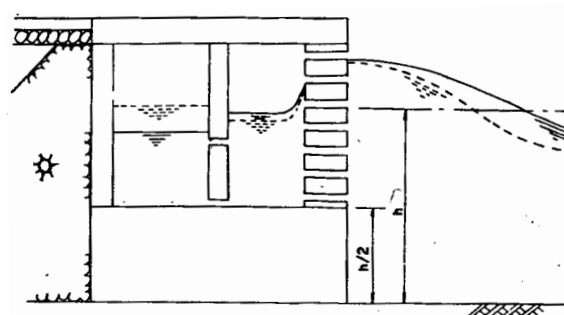
(b) 多種材料(Zanuttigh & van der Meer, 2007)

圖 3 斜坡拋石堤之反射率與 Iribarren number(碎波指數)的關係圖

3. 直立式消能結構物：井島等人(1979)及蘇等人(1979)研究開發直立開孔式靜波牆沉箱碼頭，如圖 4 及圖 5 所示；蘇等人(1979)修改為國內所熟悉的萬代福組立式消波塊碼頭，如圖 6 所示。雖然圖 5 顯示消波效果似乎不錯，但若換算水深(30cm 及 45cm)波長比，其討論的週期大約只在一般風波範圍。



(a) 基本型



(b) 混合型

圖 4 直立開孔式靜波牆沉箱碼頭示意圖(蘇等人，1979)

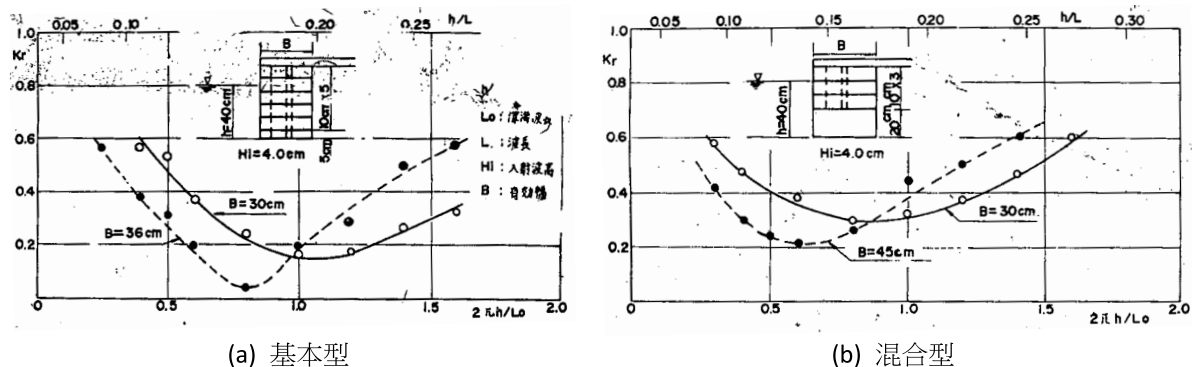


圖 5 直立開孔式靜波牆沉箱碼頭反射係數與水深波長比關係圖(蘇等人，1979)

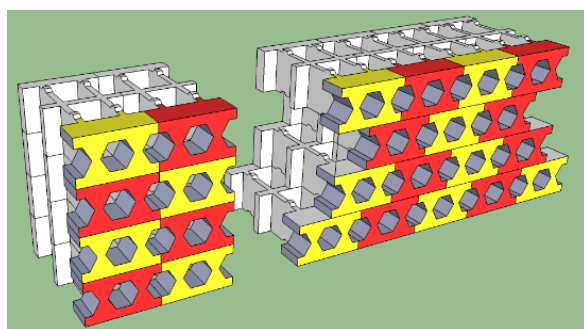


圖 6 萬代福直立開孔式消能碼頭的組立方式(作者繪製)

4. 迴路型低反射性沉箱：Gonzalez-Ecival 等人(2018)參考利用開孔圓柱的相互連結形成不同長度通路之低反射率沉箱(如圖 7)，並延長通路長度來遲滯長週期波浪，但對長週期波的反射率仍在 0.8 以上，且該結構物之開孔率似乎不高又開在靜水位附近，當波動以正向入射時，每個開孔都會進水，應無法反射大部分入射波能。

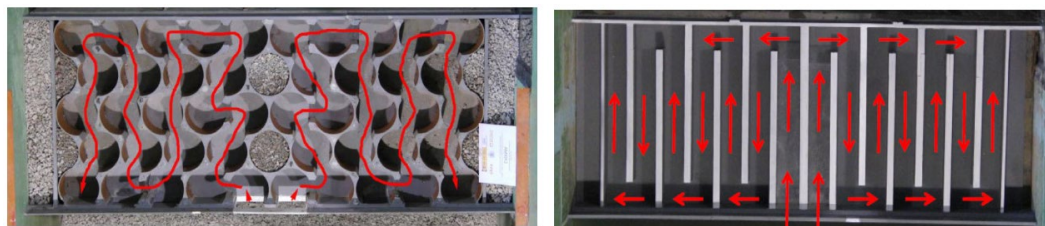


圖 7 低反射性沉箱示意圖(Gonzalez-Ecival 等人，2018)

5. 越波排水式消能斜坡：李(2011)及林等人(2012)利用斜坡促使波浪淺化、碎波、溯升與越波，再加上後置集水槽與進行下方排水(如圖 8)可得到相當好的消波效果，如圖 9 所示，在週期界於 1.1 秒至 2.5 秒之間反射率可以降至 0.5 以下，而其關鍵在於建置的斜坡(坡度及高度)是

否能促成有效的越波與排水。本消能斜坡的研發過程，可參考交通部運輸研究所運輸技術研究中心於 2009 年至 2012 年之「消能式結構物特性之研究」合作研究計畫報告。

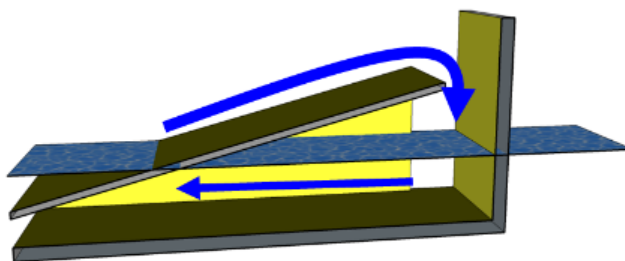


圖 8 越波排水式消能斜坡(李，2011 及林等人，2012)

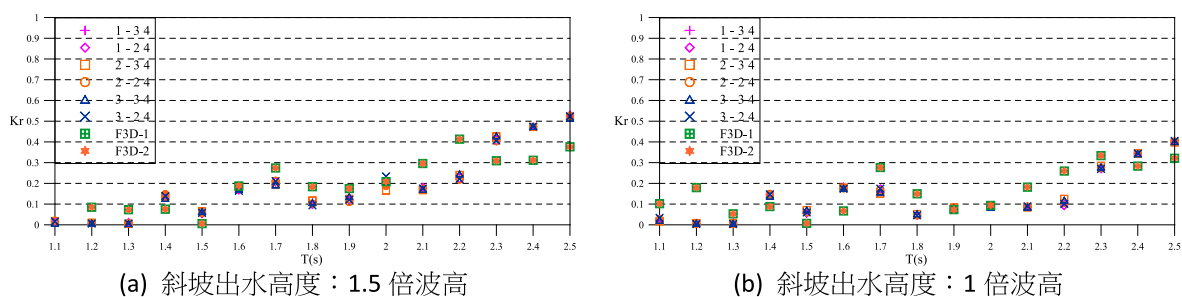


圖 9 越波排水式消能斜坡水工模型與數值模擬之反射率比較(李，2011)

- 排水式消能結構物：林等人(2012)及許等人(2017)提出 1 種內建斜坡排水式消能碼頭，如圖 10 所示，其中 $D3S1/8$ ($D3$ =內建斜坡與消波室之縱深比、 $S1/8$ =斜坡坡度)配置之反射率與週期關係，如圖 11 所示。不論是水工模型試驗或 FLOW3D 數值模擬，在週期界於 3 秒至 7 秒之間反射率都在 0.5 以下。後續還有林等人(2017)、林等人(2018)及蔡等人(2023)陸續提出多種新型直立式消能碼頭的構想。

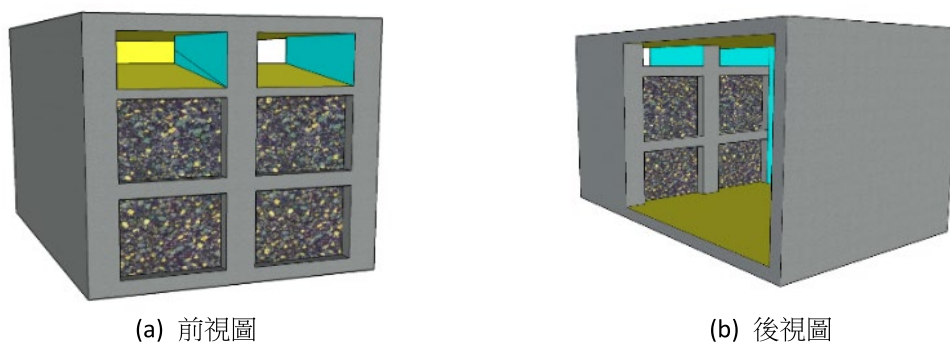


圖 10 內建斜坡越波排水式消能碼頭斷面試驗模型配置(林等人，2012)

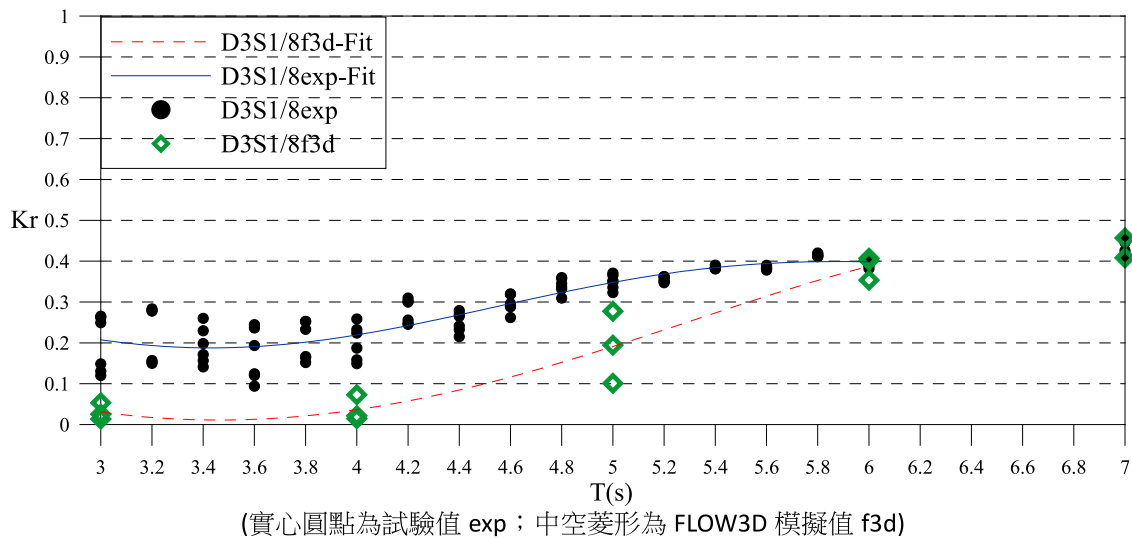


圖 11 消能碼頭斷面 D3S1/8 型配置之反射率模型試驗及數模結果(林等人，2012)

綜合而言，消能結構物的消波機制包含：

1. 利用多孔隙來破壞波浪結構，並促使其在消波艙產生渦流造成水粒子間的衝撞消耗部分能量，再利用滲流路徑加長增加摩擦損失的機會，也導致波形相位遲滯。但當孔隙充滿水時，其消能能力會明顯下降。
2. 利用結構物的部分開孔型式，可在表面反射部分能量，也讓大部分能量進入堤體消波艙內。在開孔後側產生渦流消耗部分能量外，還可利用消波艙內增設的消能材料來削減波能。但除非消波艙很深，否則對相位遲滯的效用不大，消能能力則較有限。
3. 排水式消能結構物相關研究中，發現並確認在波浪從入射進結構物至結構物反射的過程中，若能加強排水及干擾消波艙內波動可使反射波明顯減小，如李(2011)、林等人(2012)、許等人(2017)、林等人(2017)、林等人(2018)及蔡等人(2023)。
4. 消能斜坡如果只是在斜面上設置更多的粗糙度，將會因粗糙表面所造成的反射，且無法發生溯上越波排水，而只能溯降造出部分反射波，這可能是人工消能斜坡的消波效果有限的主因。如想模仿自然沙灘的入滲消波功能，需留意到大約是平均水面以上沙灘才能發揮此一消波功能，主要是因為平均水面以下沙灘的孔隙內幾乎是飽和含水。

三、數值模型之建立

為瞭解岸壁消波能力對港灣波動模擬之影響，本研究首先以一部分開口矩形港池(如圖 12 所示)進行多種岸壁反射率的港灣波動數值模擬。矩形港池寬 1,600m、縱深 800m、港口寬度 200m，港內水深設定等水深 20m，港外假想半圓半徑為 1,200m。計算網格以三角元素切割，計

有 40,431 個節點及 79,803 個元素，岸壁邊界有 680 個線元素，假想半圓邊界有 377 個線元素。透過分散關係式計算對應波長，可知對入口寬度 200m 與水深 20m 的港灣而言，3~5 秒為深水波；16 秒以下則有波浪直接入射及不同程度的繞射效應；而 16 秒以上的波浪則以繞射效應為主。

數值成果的比較是以波高增幅係數與入射波週期間的關係來討論，圖 12 中之黑色圓點是用來討論波高增幅係數(K_D)與週期(T)關係的各指定測點座標，其周圍方框則是用來求 100m×100m 測區範圍內所有節點 K_D 的平均值，以便與單一測點的結果相比較，此種方法也可用來評估船席水域內的波動情形(Lin, 1995)。考慮到實務上不同的配置方案會有不同的三角網格分割，計算節點編號與位置不會一致，測點的 K_D 搜尋採用 6m×6m 範圍搜尋最近節點。

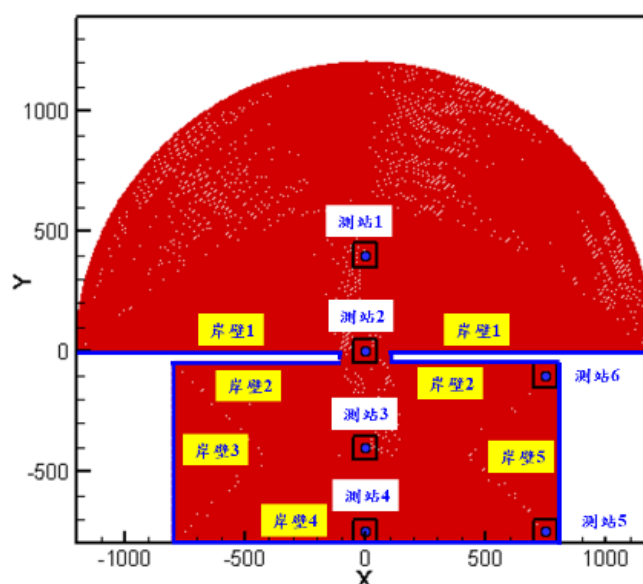


圖 12 部分開口矩形港池之網格、測點位置及岸壁類型

在港灣波動評估過程中，本研究首先觀察港灣靜穩度最差及最佳狀況，其次再依序調整各岸壁的岸壁消波功能，如表 1 配合圖 12 測試了 5 種單一區段的配置。KR1 為一般港灣波動模擬的作法，5 種岸壁均可各自設定固定反射率，為減少防波堤對入射波浪之影響，假設防波堤外側為完全消波，但港內各岸壁則幾乎為完全反射；KR2 僅改變正向面對港口的內側岸壁反射率，假設為變動性反射率之消能斜坡，引用圖 13 之變動反射率值製做週期-反射率對照表，圖 13 為參考圖 9(李, 2011)之試驗結果所設置的岸壁變動性反射率曲線，其餘岸壁同 KR1 設定；KR3 則將內側末端岸壁改為完全消波，其餘岸壁同 KR1 設定；KR4 模擬最惡劣情境，即所有岸壁皆為完全反射狀態；KR5 則模擬最佳情境，即所有岸壁皆為完全消波狀態(實際上不存在)。本模擬以規則波正向入射，週期界於 3~25 秒，間距為 0.1 秒進行模擬，波浪振幅假設為 1。

表 1 各實體邊界之反射率設定情形 (F：定值反射率；V：變動反射率)

實體邊界 配置	左防波堤 外側岸壁 1	左防波堤 內側岸壁 2	左側岸壁 岸壁 3	末端岸壁 岸壁 4	右側岸壁 岸壁 5	右防波堤 內側岸壁 2	右防波堤 外側岸壁 1
KR1	0.0(F)	0.9(F)	1.0(F)	1.0(F)	1.0(F)	0.9(F)	0.0(F)
KR2	0.0(F)	0.9(F)	1.0(F)	0.2~0.39(V)	1.0(F)	0.9(F)	0.0(F)
KR3	0.0(F)	0.9(F)	1.0(F)	0.0(F)	1.0(F)	0.9(F)	0.0(F)
KR4	1.0(F)	1.0(F)	1.0(F)	1.0(F)	1.0(F)	1.0(F)	1.0(F)
KR5	0.0(F)	0.0(F)	0.0(F)	0.0(F)	0.0(F)	0.0(F)	0.0(F)

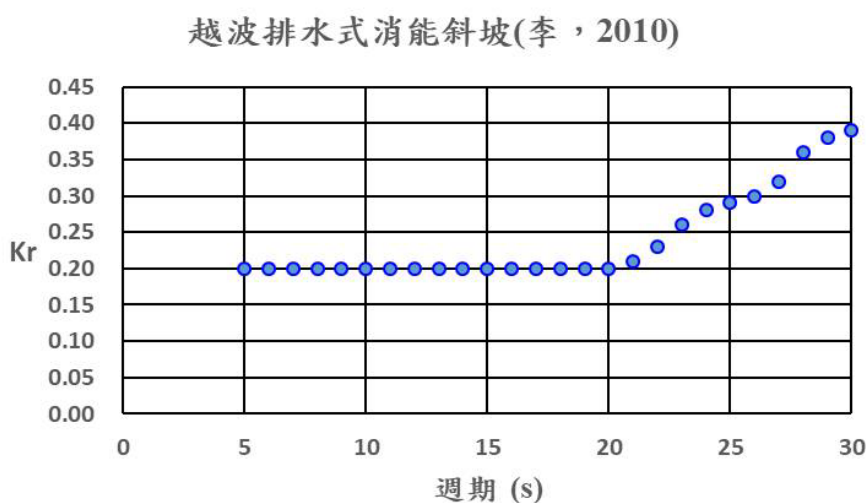


圖 13 消能斜坡之變動性反射率

四、數值模擬結果與討論

一般港灣波動的評估多以無因次 K_D 值來進行評估，若 $K_D \geq 2$ 即視為該水域發生共振；或以 K_D 值乘上外海入射波波高，並評估水域波高不得大於 30cm(小艇碼頭)、50cm(一般貨船)或 1m(大型船舶如貨櫃船或油輪)。第 2 種作法主要是考量大波高時的小 K_D 值或小波高時的大 K_D 值，都可能引發誤會，而建議直接以波高量化進行評估，但也僅是個原則宣示，未有明文規定。探究原因應是各種形式及規模的船舶對作用波浪的反應皆有不同，因而需求也不同，例如，郵輪要求的是舒適度及人員上下安全性；貨輪或油輪、LNG 輪、LPG 輪主要是裝卸作業安全性，而繫纜系統的安全性則是共同要求。圖 14 為週期 15 秒 ($L=197.46\text{m}$) 5 種配置的 K_D 分布圖，港池縱深約為 4.1 倍波長，而寬度約為 8.1 倍波長。圖 14(d) KR4 配置為所有岸壁完全反射，港外為完全反射的長峰波，港內則發生縱橫方向的振盪。圖 14(e) KR5 配置為所有岸壁完全消波，因此，港外只看到港口散射的圓弧形波動，而港內因波長與港灣開口(200m)約略相等，繞射效應開始顯著，港內出現明顯繞射波。圖 14(a) KR1 配置則因設定左右兩側及港池底端岸壁為全反射，等 K_D

值分布有呈橫向與縱向振盪的情形與圖 14(d)類似。圖 14(b) KR2 配置因港池底端反射率非定值且較小，港內波動與圖 14(c) KR3 配置及圖 14(e) KR5 配置類似。

圖 15 中 2 個子圖依序分別為 KR4(最差狀況)及 KR5(最佳狀況)兩配置的波高增幅曲線($K_D - T$)圖，各圖中黑色線顯示 6 個測點的單一節點在不同週期波浪作用下的 K_D 值；藍色線是以各測點為中心 100m x100m 方形測區範圍內所有節點 K_D 的平均值；而紅色線則為該方形測區裡的最大 K_D 值。從這些圖中可以發現 3 種波高增幅曲線所表達出的資訊迥然不同，整體而言，以測區平均值來表現該區的波動情形較為適合。從圖 15(a)的 6 個子圖中發現不論是否為自然週期，KR4 的 6 個測站的波動都偏大。而圖 15(b)則顯示從 6 個子圖中發現 KR5 沿港口法線上的 4 個測站的波動，幾乎都等於入射波高，而由於港池底部的完全消波，測站 5 及 6 因為沒有反射波，使得 K_D 值幾乎為 0。

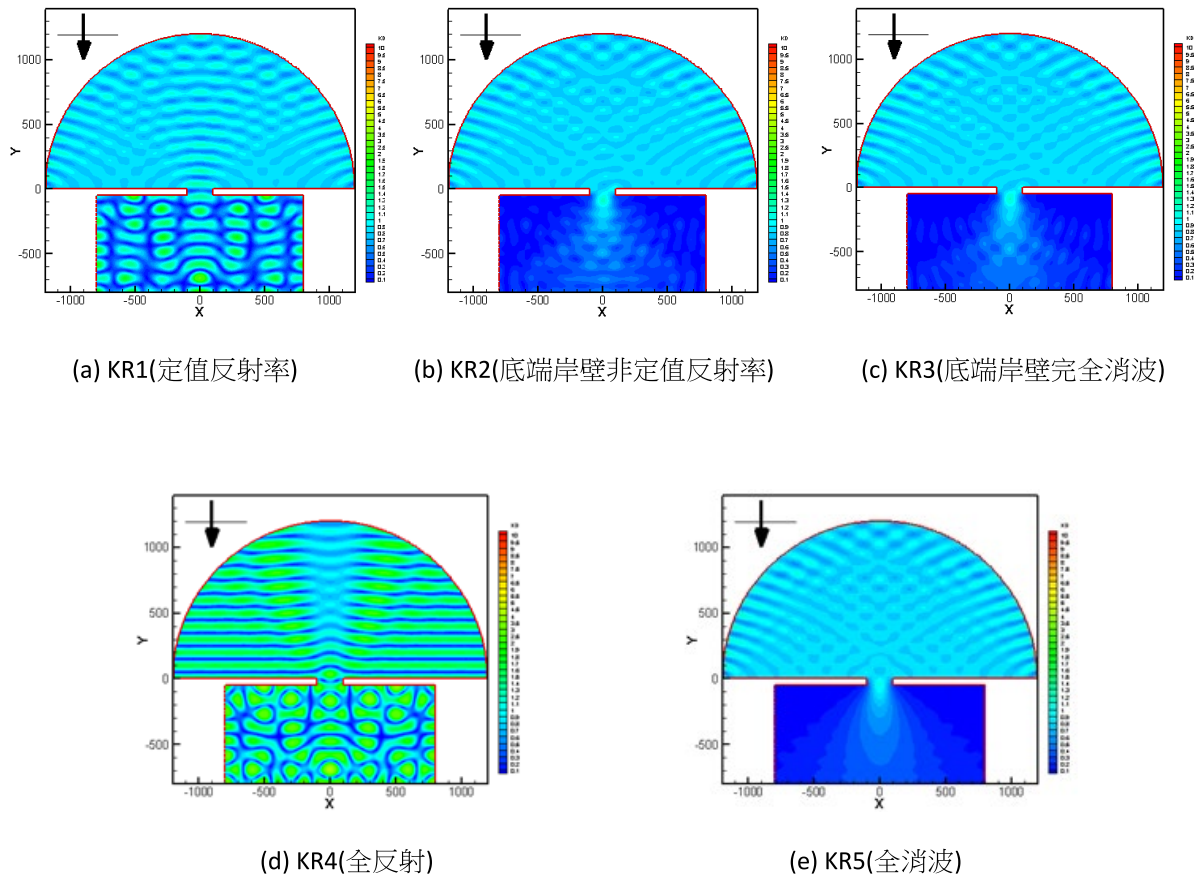
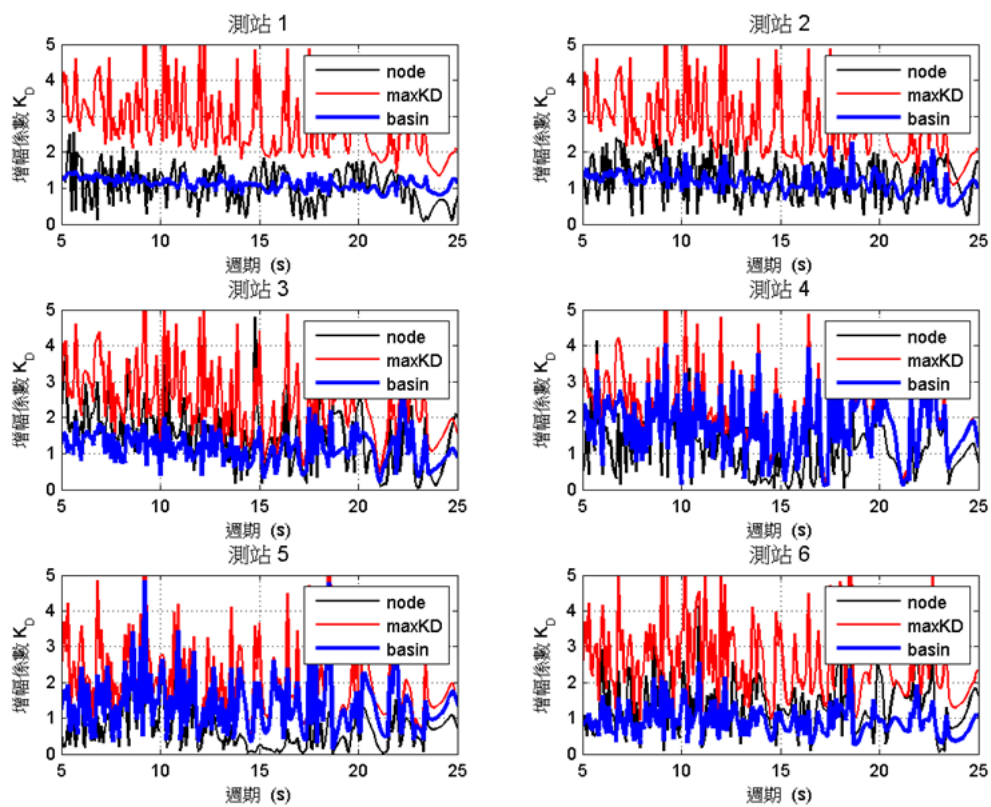
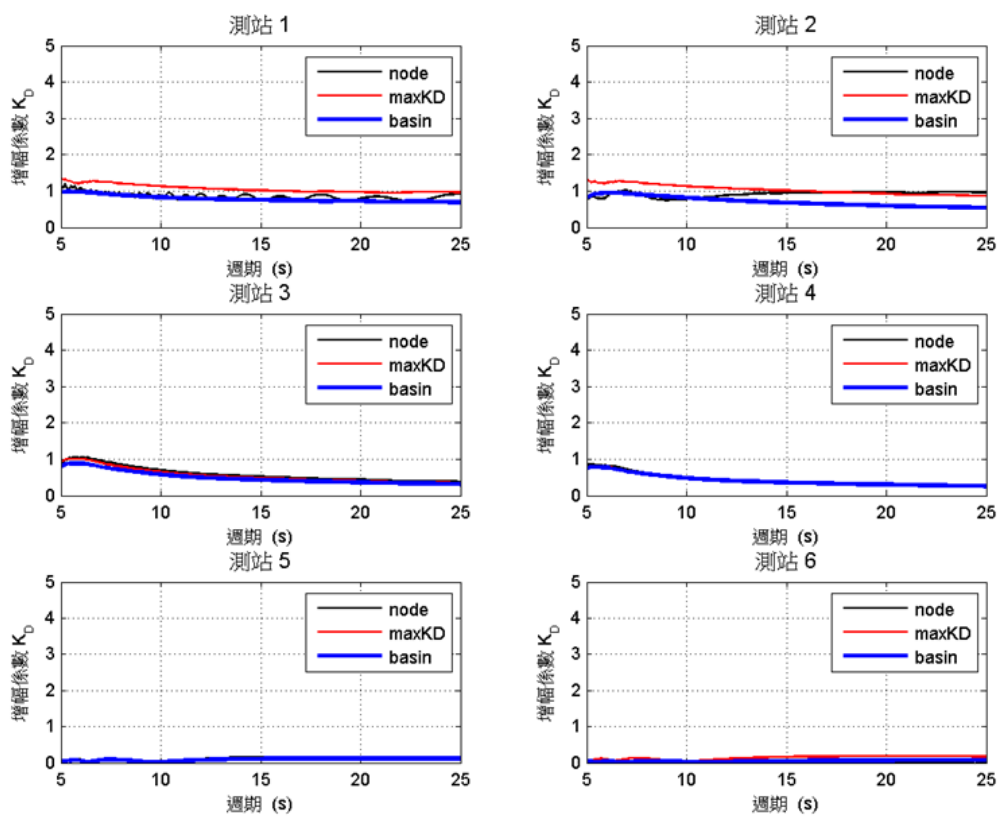


圖 14 週期 15 秒 ($L=197.46\text{m}$) 5 種配置的 K_D 分布圖



(a) 配置方案 KR4



(b) 配置方案 KR5

圖 15 各測點及測區的波高增幅曲線圖

從各個子圖的交叉比對中可以發現，測區最大值(紅色線)明顯地大於測區平均值(藍色線)很多，而指定點(黑色線)的變化則與藍色或紅色線都不一致，時有最大或最小的值出現。如前所述，不同週期波浪的波長不同，多重反射後水域裡的波動有大有小，而不是均勻的定值。選測點時無法掌握到定常狀態的最大波動位置，且一旦有所偏移就會選到或大或小的值，波高增幅曲線只是該測點的波動變化，而不是一個趨勢。事實上，每個週期波浪的波長都不一樣，不會在同一個位置上產生最大值，因此，選點的方式有很高的機率不能抓到最大波動值。反之，抓到最大 K_D 值所代表的物理意義為何也值得思考，因為單點的大波高不一定代表會對該水域裡的船舶造成威脅。Lin(1995)、林及陳(1996)開始討論採用指定船席水域平均 K_D 值來評估該區的波動情形，以反映水域波動可能受到船舶運動壓制，而不宜以單點 K_D 值來評估的想法，惟至今尚無進一步的結論。本研究中可以發現單點或最大 K_D 值都不足以充分表達港灣波動的程度，如果後續能以平均 K_D 值、波浪週期 T 值再配合對船舶運動特性進行討論，應可獲取港灣波動對港區作業影響的更合理資訊。

五、港灣波動模式評估步驟

藉由前章對岸壁非定值反射率數港灣波動模式的建立與測試，可以系統性地進行複式(多區段)區段岸壁的消波能力評估，清楚地瞭解各區段岸壁對整體港灣波動之影響，初步擬定港灣波動模式評估步驟如下：

1. 選定可能之港灣配置方案，依照碼頭與岸壁可能使用情形或可能採用之消波設施型態進行分類，在數值模式邊界設定上以代碼定義。
2. 蒐集各種消波設施之反射率曲線資料，不足時，應進行消能結構物反射率水工斷面模型試驗，並依預定模擬之週期範圍，以線性內插求得各反射率值，建立 $K_R - T$ 對照表且建成檔案。
3. 先假設所有岸壁完全反射及完全消波，以模擬最差消波及最佳消波的情境。
4. 針對每一個獨立岸壁，假設其為完全反射，而其他岸壁為完全消波，逐一檢討各岸壁的反射對整個港灣波動之影響。
5. 啟動複式(多區段)消波岸壁重複上一項作業，如各港分區，以瞭解其對全港波動之影響。
6. 進行綜合評估，瞭解主要影響港灣波動的主要區段後，再啟動其非定值反射率的模擬。

六、花蓮港#7 碼頭消波能力對港灣波動之影響初評

本章選定花蓮港位於內港西船渠的#7 碼頭，以改善該碼頭的消波能力對全港區靜穩度影響做為應用例說明，圖 16 為數值模擬範圍及水深。模擬的港形有兩種：港形一為現況(Lay01)設置，而港形二(Lay02)為假設不拆除現有設施，但犧牲西船渠約 30m 縱深做為消能設施的改善空間。Lay01 計有 281,530 個三角元素網格、142,060 個節點、岸壁邊界 1,428 個線元素及假想邊界為 1,160 個線元素；Lay02 計有 281,504 個三角元素網格、142,046 個節點、岸壁邊界 1,424 個線元素及假想邊界為 1,160 個線元素。波浪條件為正東向，週期 3~30 秒間距 0.1 秒，以及 30~250 秒間距 1 秒，波高則假設為 1m。

在假設其他岸壁採用定值反射率前提下，#7 碼頭岸壁的消波能力配置有 3 種。配置一：港形一假設#7 碼頭為完全反射(模擬最惡劣情形，LAY01KR1)；配置二：港形一假設#7 碼頭為完全消波(模擬最佳情形，LAY01KR3)；配置三：港形二假設 #7 碼頭為非定值反射率岸壁(LAY02KR2)。圖 17 為花蓮港數值網格，有 8 個測點位置及 3 種討論水域(全港域、外港區及內港區)。表 2 為 9 種岸壁類型的反射率設定情形，其中 LAY02KR2 的 Type 7 非定值反射率設定值，如圖 13 所示。目前本應用例僅模擬東向入射波浪，分析結果以波浪繞射效應為主。

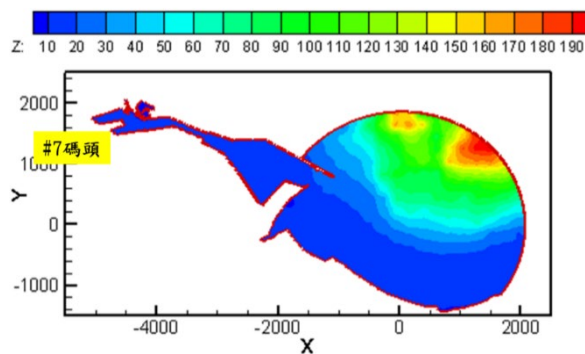


圖 16 數值模擬範圍及地形

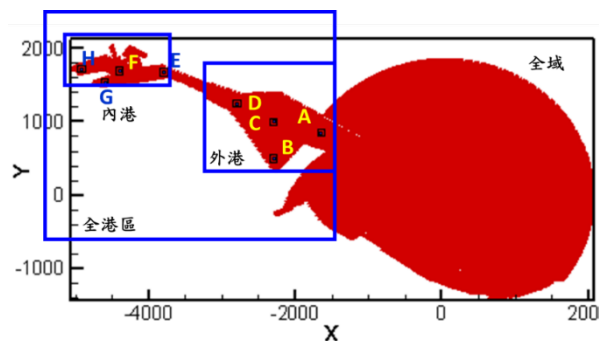


圖 17 數值網格、測點位置及討論水域

表 2 9 個位置岸壁類型的反射率設定情形

Case	週期	岸壁類型									備 註
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
LAY01 KR1	5s~30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	Type 1：東防波堤外測及至東縮水道前的內側 Type 2：東縮水道 Type 3：漁港全區 Type 4：#13~#16碼頭 Type 5：#12碼頭 Type 6：#8~#11碼頭 Type 7：#7碼頭 Type 8：所有西岸碼頭 Type 9：西防波堤外測及南北濱海岸 v：隨週期變動之反射率
	>30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	
LAY02 KR2	5s~30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0.2~0.39(v)	1.0	0.5	
	>30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0.39	1.0	0.5	
LAY01 KR3	5s~30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0	1.0	0.5	
	>30s	0.8	0.8	0.5	1.0	1.0	1.0	0	1.0	0.5	

圖 18 為 3~250 秒週期入射波作用之波高增幅曲線比較圖，分為外港區(A、B、C、D 測站)及內港區(E、F、G、H 測站)，圖中繪製了 3 種波高增幅曲線，分別為測區最大值(紅色線)、測區平均值(藍色線)及測點值(黑色線)；圖 19 為 3 種配置全港區波高增幅係數分布情形，入射波作用週期為 25s、30s、60s、100s、150s 及 200s，為能清楚觀察港灣波動的差異性，本圖設定了門檻值($0.5 < K_D < 2.0$)。從圖 18 各測站波高增幅曲線可發現：

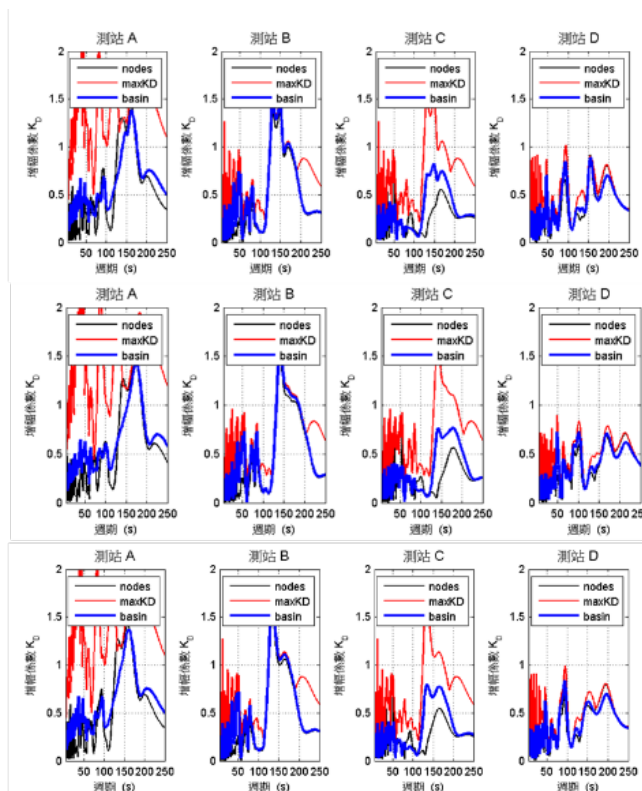
1. 測區最大值始終大於測區平均值及測點值；而測點值則極不穩定，顯示用測區最大值或測點值的 K_D 均較不恰當，無法代表該港區的波動特性。
2. 比較 LAY01KR1(完全反射)與 LAY01KR3(完全消波)的 K_D 變化，外港區由於邊界條件設定相同，其趨勢幾乎相同，但仍略為受#7 碼頭的完全消波之影響。內港區則明顯表現出#7 碼頭的完全消波對內港區之影響。
3. LAY02KR2(非定值反射)的波高變化趨勢介於 LAY01KR1 與 LAY01KR3 之間，推測其原因除了消波能力外，可能是港形二的碼頭岸線少了 60m，改變了西船渠的縱深以及港灣共振特性，詳細原因則需要另外深入探討。然而，也須留意到 LAY01KR3 的完全消波是一種理想狀態，實際港灣很難達到此一境界。

外港區
3s~250s

#7完全反射
LAY01KR1

#7改善
LAY02KR2

#7完全消波
LAY01KR3



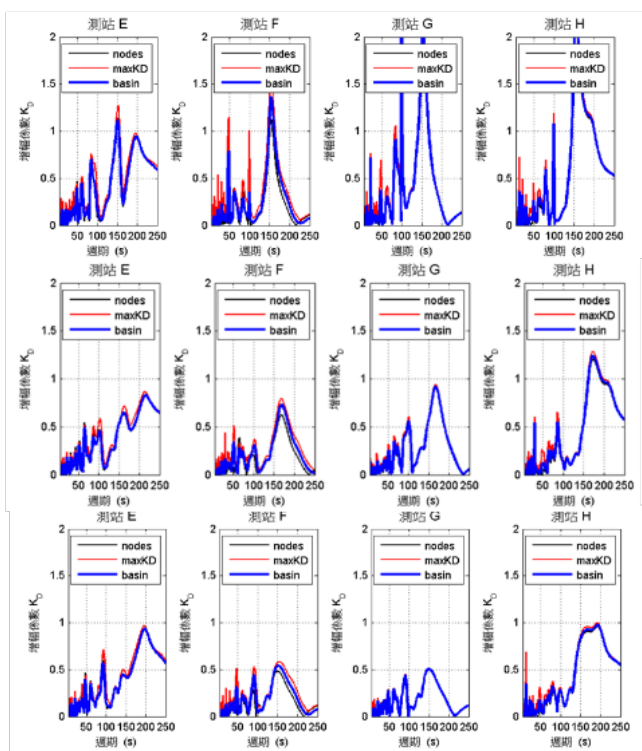
(a) 外港區

內港區
3s~250s

#7完全反射
LAY01KR1

#7改善
LAY02KR2

#7完全消波
LAY01KR3



(b) 內港區

圖 18 花蓮港 3~250 秒週期入射波作用之波高增幅曲線比較圖

圖 19 顯示外港區的波動差異不大，主要差異從受限水道開始，而且入侵波浪似乎以#19 及 #20 碼頭為第一主要反射區；內港區則顯示#7 碼頭的消波功能有明顯正面影響。

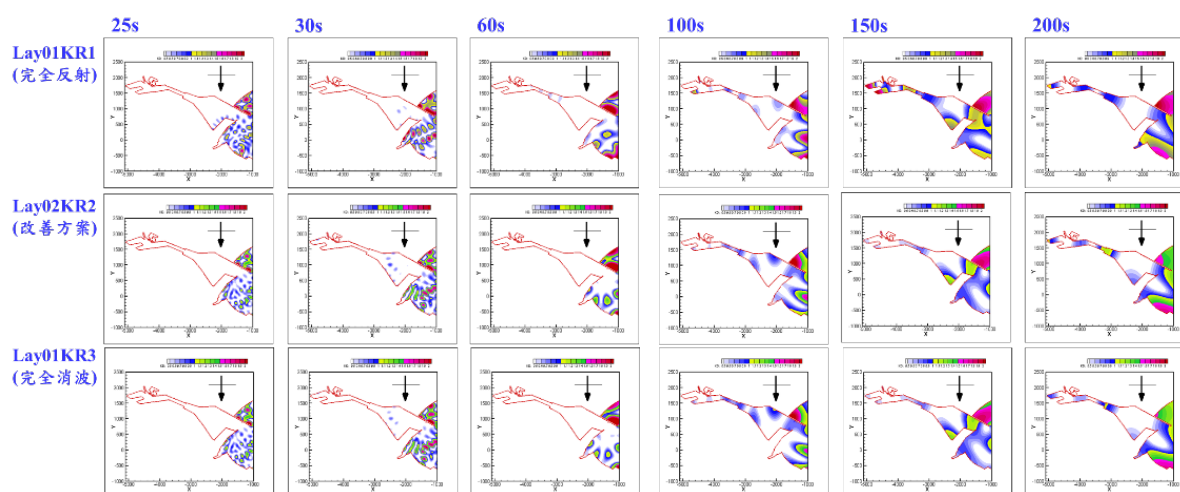


圖 19 花蓮港不同配置與週期之波高增幅係數($0.5 < K_D < 2.0$)分布情形

圖 20 及圖 21 為 LAY01KR1(完全反射) 分別與 LAY01KR3(完全消波)及 LAY02KR2(非定值反射)的 8 個測區平均 K_D 值差值，在交叉比較中獲致下列初步心得：

1. 由於兩種港形(LAY01 及 LAY02)的縱深與網格分割不同，指定座標值的測點與港灣水域的相對位置(例如距離岸壁的遠近)會有不同，因此，兩港型的變化趨勢可能會有差異。
2. LAY01KR1 及 LAY01KR3 為相同港型，僅有#7 碼頭的消波能力不同，比較其 K_D 差值 (正值表示完全反射 KR1 的波動的較大，也是完全消波 KR3 有較佳靜穩度)，外港區在 135 秒至 185 秒之間差異較大，顯示#7 碼頭消波能力的改善，對外港區(測點 B、C 及 D)有較多正面改善，但入口航道(測點 A)則可能因合成波能之影響，反而大於完全反射 KR1 狀態而有負值情形；束縮水道末端(測點 E) 在 160 秒至 180 秒之間亦有類似情形；但是內港區(測點 F、G 及 H)則顯示#7 碼頭消波能力的改善，對於大部分波浪週期都有助益。
3. LAY01KR1 及 LAY02KR2 的港型不同，比較其 K_D 差值 (正值表示完全反射 KR1 的波動較大，也表示非定值消波 KR2 有較佳靜穩度)，顯示#7 碼頭的消波能力的改善，對整個港區大部分週期的波動都有助益；外港區與內港區皆有較多負差值的原因，應是西船渠的長度縮短改變了自然週期所致。

綜合而言，從 3 種配置方案的比較中發現以取單點 K_D 值的方式來評估港灣靜穩度時，容易因座標錯位而有低估情形。但若以一個船席水域裡的最大 K_D 值又可能過於高估，因為船舶實際上會因船體運動特性有壓波情形，因此，目前建議以船席水域的平均 K_D 值來評估。未來如能瞭解波高與船舶運動量間的關係，靜穩度的評估將更能符合需求。

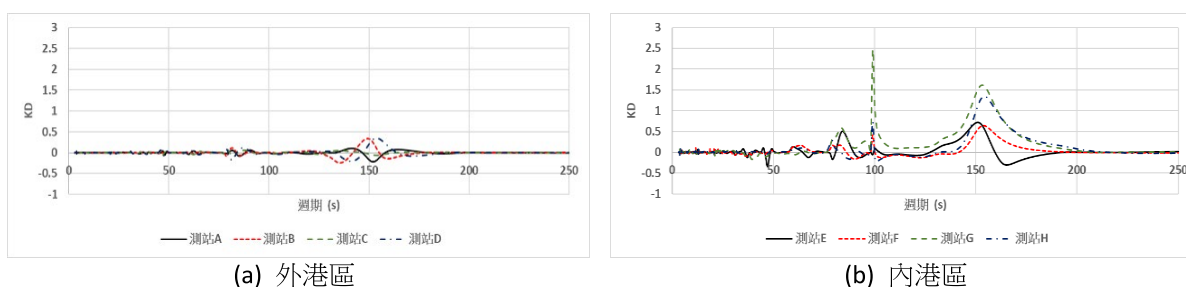


圖 20 LAY01KR1(完全反射)與 LAY01KR3(完全消波)的 K_D 差值

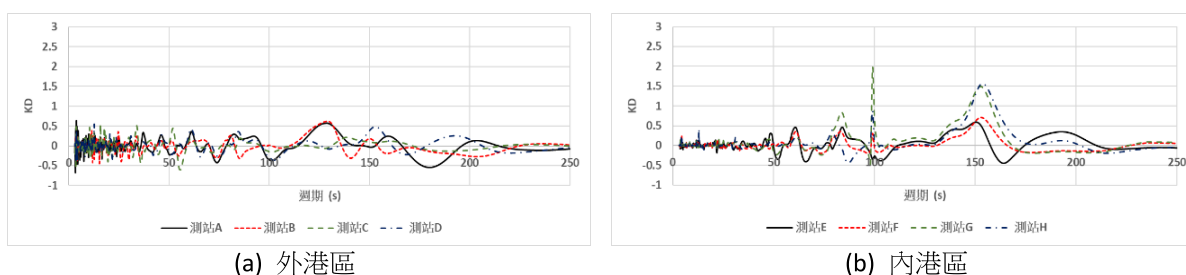


圖 21 LAY01KR1(完全反射)與 LAY02KR2(非定值反射)的 K_D 差值

七、結論與建議

7.1 結論

1. 港灣共振發生原因主要是入侵波浪在港內發生多次反射，導致能量累積而引發的自然振盪。常用的港灣波動評估方法包括進行系列性多個週期的模擬，以尋找港內各水域的自然共振週期，或是針對某些特定週期評估港區水面可能的波動情形。如想瞭解港區各岸壁段的消波能力對港區靜穩度有多少貢獻，則可先模擬全港區岸壁為完全反射及完全消波，以極端的 2 種情境來瞭解最差及最佳的波動情形。其次可將港區岸壁依其消波特性分類，且蒐集其波浪週期與反射率相關曲線來建立變動反射率對照表，以便模擬符合港區現況之波動情形，接著再針對可能改善之岸線段與可能選用之消波結構物(假設其它岸壁之邊界條件不變)進行模擬，透過交叉比較可瞭解影響港灣靜穩度的各項因子，並評估其改善的成效，本研究建議以船席水域的 K_D 平均值進行評估。
2. 港灣靜穩度的評估應包含各個分區水域，在各種波浪週期條件下的波動情形。港灣共振的發生並不全然是整個港域，而可能只發生在某些局部水域內，但也可能港灣並未發生共振，而某些水域如船渠的末端、角隅或束縮水道等水域的波動特別大。長方形港池底端的波高增幅曲線常被用來觀察港灣靜穩情形，但換個位置或換個港形就又另當別論。因此，如何選擇適當的位置來繪製波高增幅曲線，以便能適切地評估港灣靜穩度，應列為港灣規劃的先決課題。
3. 利用週期-反射率對照表的建立，使 Lin(1995)模式可以進一步地藉由與波浪週期有強烈相關的非定值反射率來定義實體邊界消波能力，也較有機會能反映實務上港灣各種消波岸壁的消波特性。本模式的改進也容許港灣波動模擬時，可藉由反射率表的採用，快速地選用不同型式之消能設施與進行評估。
4. 在數值模擬過程中，岸壁消波能力的改變會影響到港內波高；而港形改變則因改變了港灣特性長度，而影響到自然共振週期。本研究刻意參考工程實務，將港形 LAY01 改變成港形 LA02，主要是想凸顯港區內岸線的改變，可能會影響到整個港灣的波動情形。

7.2 建議

1. 探討港灣的自然週期時需要有較細密變化的週期(例如間隔 0.1 秒)模擬，如果能妥善規劃所模擬的週期區段，使其與不規則波的成分波週期相配合，則可進一步做不規則波作用下的港灣波動評估(Lin, 1995)，也能建立起港灣波動資料庫，配合港外風波預報系統進一步預測港內的波動(林等人，2008)。不過，由於港灣波動與波浪週期/頻率有強烈相關，需要審慎處理波譜成分波的分割方式，以免失去自然週期資訊。

2. 本研究係以建立各種消能設施配置的週期-反射率對照表來進行內插求反射率值，但也發現該項資料嚴重欠缺，如能透過水工模型試驗蒐集更多的週期-反射率值，獲得迴歸經驗公式或以減少線性內插的誤差，將可進行更貼近現實港域的港灣模擬。
3. 除了提供不同的消波能力(反射率)外，消能結構物的縱深可能引起的波動的相位偏移，此一相位偏移對港灣波動之影響，目前尚未掌握，有待進一步研究。第二章有關港內消能結構物消波能力的文獻回顧凸顯了此一部份資訊的匱乏，有必要做進一步補足；對於斜向入射波浪的反射率，則可考慮在平面造波水槽裡以方向波浪量測方式進行。
4. 港灣波動數值模擬與水工模型試驗是相輔相成的，前者可做通盤檢討，而後者則可做關鍵性的驗證與觀察。數值模式質量的提升連帶著對很多輸入資料品質要求也跟著提高，如水深地形資料的測繪、各種港灣構造物的消波能力(反射率與相位延遲)、波浪條件及水位條件的統計分析等，都需要重新審視或加強蒐集建立。
5. 透過本研究提供之港灣波動模擬程序，可充分瞭解一個港灣的波動特性以及各碼頭岸線的消波能力對港灣靜穩度之影響，無庸置疑地這將是個很費時的工作(一個波浪條件需要約 15 分鐘作業時間)，但可藉由提升電腦的計算能力及擴大記憶容量，甚至採用多台電腦同時執行模擬運算再進行(雲端)彙整，以達到港灣模擬結果之完整性並節省模擬時間。

參考文獻

1. Taira Keisuke, & Nagata Yutaka. (1968). Experimental study of wave reflection by slopes. *Journal of the Oceanographic Society of Japan*, 24(5), 242-252.
2. 井島武士、奧蘭英明、蘇棋福、牛房幸光、米村幸久 (1979)，「作用於擁有靜波室開孔防波堤之碎波壓力試驗研究及實例」，第 3 屆海洋工程研討會論文集，63-77 頁，臺灣。
3. 蘇棋福、井島武士、詹政祥、陳樹旺、村山盛見 (1979)，「萬代福直立式靜波牆沉箱碼頭在本省各海岸應用之特徵」，第 3 屆海洋工程研討會論文集，139-157 頁，臺灣。
4. Seelig, W. N., & Ahrens, J. P. (1981). Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters. Technical Paper No. 81-1, CERC, U.S. Army, Corps of Engineers, 40 pages.
5. Allsop, N. W. H., & Hettiarachchi, S. S. L. (1989). Reflections from coastal structures. In *Coastal Engineering 1988*, 782-794.
6. Lin, J. G. (1995). Statistical properties of wave conditions in harbors (Doctoral dissertation, The Department of Civil Engineering, North Carolina State University).
7. 林昭圭、陳炫杉 (1996)，「外海底床坡度在港灣波動模擬上的影響」，第 18 屆海洋工程研討會論文集，55~62 頁，臺灣。
8. 林昭圭、蕭松山、方惠民、陳建興 (2002)，「岸壁非定值反射率對港池水面波動之影響」，

- 第 24 屆海洋工程研討會論文集，5 頁，臺灣。
9. Zanuttigh, B., & Van der Meer, J. W. (2007). Wave reflection from coastal structures. In *Coastal Engineering 2006: Vol.5*, 4337-4349.
 10. 林炤圭、岳景雲、林玉峰、涂宗男 (2008)，「花蓮港港池共振機制研究(4/4)」，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-97-H3DB002。
 11. 李健鴻 (2011)，「越波式消能結構物之研究」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士論文。
 12. 林炤圭，許師瑜，楊國誠 (2012)，「新型消能式碼頭的開發研究」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，321-326 頁，臺灣。
 13. 林炤圭、連皓宇、張維庭、蔡世璿、李大鴻、林蔚、林鵬、阮天野、陳池威、陳德鋼、楊升耀、楊輝斌、歐陽榮桓 (2017)，「新型設置導流板之直立開孔式結構物的消波特性初期研究」，*海洋工程學刊*，17(4)，245-268 頁。
 14. 許師瑜、李建鴻、楊國誠、蔡金吉、邱永芳、林炤圭 (2017)，「內建斜坡式消能碼頭之開發研究」，*海洋工程學刊*，17(2)，91-113 頁。
 15. Gonzalez-Escriba, J. A., Molines, J., Medina, J. R., & Gómez-Martín, M. E. (2018). Analysis of long-circuit type caissons for attenuation of long-period waves. *Coastal Engineering Proceedings*, (36), 19 pages.
 16. 林炤圭、陳文生、許師瑜、尹彰、黃偉柏 (2018)，「多孔隙消波性結構物前後之不規則波特特性試驗研究」，*海洋工程學刊*，18(1)，39-57 頁。
 17. 蔡世璿、張維庭、許師瑜、林炤圭 (2023)，「開孔結構物消能機制探討與啟發」，*港灣季刊*，(126)，39-55 頁。