

# 開孔結構物的消能機制探討與啟發

蔡世璿<sup>1</sup> 張維庭<sup>2</sup> 許師瑜<sup>1</sup> 林焯圭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學河海工程系碩士

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學河海工程系教授(退休)

## 摘要

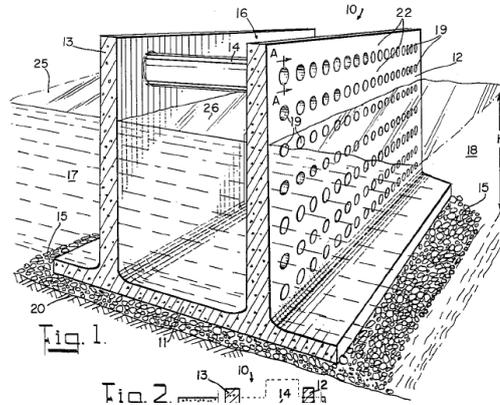
本文針對 2016 年與 2017 年多種直立開孔式消能結構物的水工模型試驗成果做綜合比較，並辨識出多種開孔結構物的消能機制，包括多孔隙壁與消波室的消能特性，以及消波室的排水功能，並從波動及流體運動兩方面來解讀消能結構物的消波特性的。多孔隙壁利用開孔的形狀除了能反射部分波能外，也讓進入消波室內的波能造成散射進而擾亂波動結構，另外，孔口處流體運動的堰口效應亦發揮削減入射波能量的功效；消波室的空間配置可能造成波動的衝撞與消能，但也可能引發艙室內的水體振盪與波動相位的改變。消波室的排水機制讓進入艙內的水體從低動能區的洩水孔排出，降低反射波的量體。本文比較活動式摺葉板、上斜板、下斜板、狹縫型及輪胎型開孔直立式消能結構物的反射率試驗結果，其中包含單消波室及雙消波室的配置，發現消能結構物的消能特性為前述 3 種機制的交互作用的整體表現，且可分別先針對各機制進行單項測試、瞭解與改良，再評估其整合與互制效果，不僅是透過水工模型試驗對結構物的消波表現進行整體評估，更有利於啟發新型消能結構物的思維。

## 一、前言

基於港灣空間的充分應用，並為減少港內的震盪問題，將直立式消能結構物應用於直立式消波碼頭，已經成為國內港灣建設必然考量的項目，其目的為使用較少工程量體與有效利用空間，發揮消波效果並提供靜穩水域，讓船舶能安全地進出港、靠泊及裝卸貨物與人員上下。兼具碼頭用途的直立式開孔結構物的研發，自從 Jarlan(1960)首次提出由開孔前牆與不透水後牆所構成的一個具消波室的防波堤(如圖 1 所示)之後，陸續有許多專家學者提出不同具消波室的多孔性(perforated structures)及開孔型結構物(slotted structures)的研究構想與成果，例如井島等人(1978 及 1979)、蘇等人(1979a 及 1979b)曾以水工模型試驗方式探討直立開孔岸壁的波力作用情形。

港灣規劃設計首要工作為針對港內水域因入射波的多重反射及船行波所造成的振盪問題，進行評估及尋求最佳的解決方案。既有觀念是設法於第一時間削減外海波能的入射，例如調整外廓設施的角度與長度或縮小入口寬度，或是在正對入射波浪方向的水道末端設置自然消波海

灘，直接削減入射波能量以減少反射，後者一直被認為是省錢省工的最佳方案，但為營造更多的碼頭船席，大多數的岸線都被內置拋石消能斜坡的棧橋式碼頭或直立式開孔式結構物所取代。受限於消波段長度不足以應付各種週期的波浪，尤其是長週期波，其消波功能遠不如自然消能海灘，隨之便衍生出港內不靜穩、港池的長週期振盪與靠泊船舶的斷纜事件。



(資料來源：US3118282:Breakwater Structures 美國專利申請書)

圖 1 Jarlan 型式消波結構物 (Jarlan, 1961)

傳統概念中，大部分消能結構物係結合多孔隙(圓孔或直立或水平狹縫型)的形狀，並利用縱深不等並配置多孔隙材料的消波室來消減波能，對於一般常時波浪(ordinary waves)的消波效果還算滿意，反射率(reflection coefficient,  $K_r$ )大約在 0.6 或較小，但在颱風時期可能發生的長週期浪的消波表現則很差， $K_r$  可達 0.8 以上，

本文中的研究係延續陳(1999)成果，瞭解多孔隙結構物(如圖 2 所示)的消波能力與波浪的週期、波高、孔隙率及長度有關(林等人，2018)，李(2010)提出越波排水式消能斜坡(如圖 3 所示)及林等人(2012)提出的內建斜坡消能結構物(如圖 4a 及圖 5 所示)促使入射波浪在斜坡上淺化、碎波、溯升及越波並導引排水，使  $K_r$  能降至 0.5 以下(如圖 4b 所示)。然而，前述構造物的結構設計較為複雜(許等人，2017)，因此，2016 年與 2017 年則針對不同直立壁開孔結構物進行研究，本文針對該 2 年的研究成果進行綜整討論。



圖 2 多孔隙結構物(陳，1999 及林等人，2018)

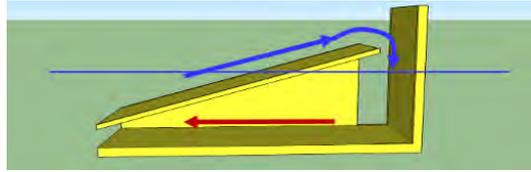
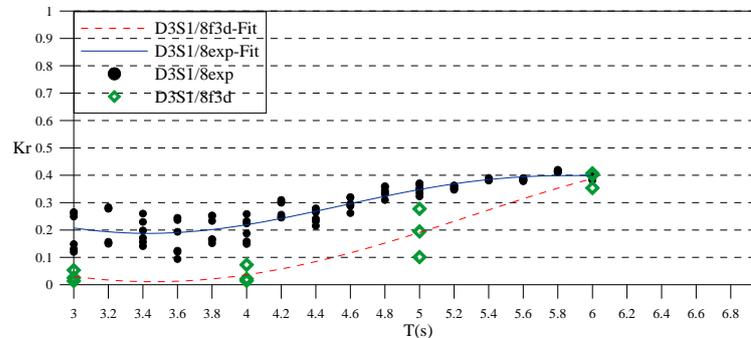


圖 3 越波排水式消能斜坡(李，2010 及林等人，2012)



(a) 模型配置



(實心圓點為試驗值；中空菱形為 FLOW3D 模擬值)

(b) 反射率模型試驗及數模結果

圖 4 內建斜坡消能結構物模型與反射率 (林等人，2012)

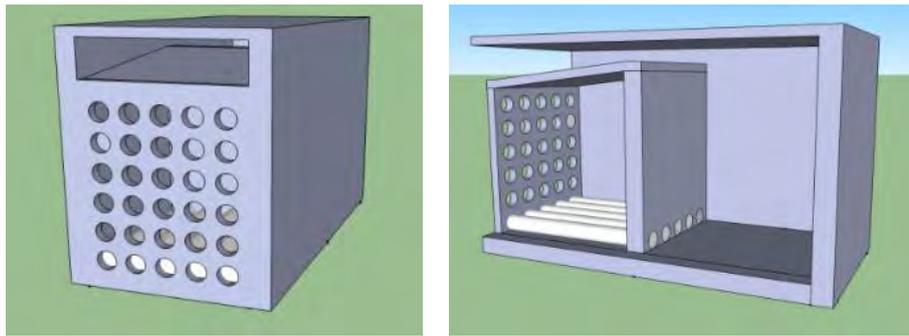


圖 5 內建斜坡消能結構物建議圖(林等人，2012)

## 二、文獻回顧

本文針對直立開孔式消能結構物且具有不同消波機制的部分文獻進行說明，Jarlan(1961)首次提出由開孔前牆與不透水後牆所構成一個具消波室的開孔式消能結構物(如圖 1 所示)，其構想係利用入射波進入直立前壁之開孔時，產生部分透過及部分反射來破壞入射波波形的完整，再利用不透水直立後壁之反射造成消波室的振盪來抵消部分波能，該結構物原設計為防波堤所用，但後來成為具消波室的開孔式消能結構物之起源。井島等人(1979)以水工模型試驗探討多孔隙直立岸壁防波堤的波力作用情形(如圖 6 所示)，透過改變開孔牆厚度、開孔率及消波艙長度來尋找最佳的消波效果，後續應用井島等人(1978 及 1979)所開發的萬代福靜波牆碼頭結構物(蘇等人，1979，如圖 7 所示)，則被廣泛應用於碼頭載重較低的漁港中。Tanimoto 和 Yoshimoto(1982)分析水流通過狹縫開孔所造成的水頭損失，以近似理論推導不同波浪條件及不同結構物尺寸直狹縫型沉箱(如圖 8 所示)的水理特性，並以水工模型試驗進行驗證，指出影響直立狹縫型沉箱反射率的因素，包含相對水深( $h/L$ )、波浪尖銳度( $H/L$ )，結構物的構造條件包含狹

縫壁的開口比、消波室的水深、開孔壁的厚度以及消波室的寬度，結論為部分開孔岸壁沉箱於「開孔深度為半水深( $q=0.5$ )，艙室縱身波長比( $l_2/L_2$ )為  $0.15\sim 0.25$  時，有最小反射率」。Huang 等人(2011)整理 1974 年至 2010 年間的 109 篇 Jarlan 型直立式消能結構物的相關文獻，並將其歸納為前壁充分開孔型、前壁部分開孔型、多重開孔牆型、有頂蓋開孔型、內填塊石開孔型及內加水平孔板開孔型等 6 類防波堤結構(如圖 9 所示)，也彙整出消能機制與消波室的縱深及開孔比例有關，提出當消波室縱深( $B$ )約為  $(2n+1)/4$  倍波長( $L_s$ )時，可能會得到最低的反射率，其中  $n$  為整數值，但開孔的幾何及慣性特性會使得發生最低反射率的消波室縱深與波長比值( $B/L_s$ )略有改變。Lee 等人(2014)針對部分開孔沉箱(如圖 10 所示)進行了一系列的評估，主要包含利用孔洞的寬度及數量來調整不同的孔隙率、單消波室及雙消波室及消波室的寬度等。該研究指出，單消波室部分，前牆的孔隙率較小時有較低的反射率，大多數結果顯示( $B/L_s$ )為  $0.15$  左右有最小的反射率。另狹縫的數量對反射率的影響不大。雙消波室部分，等寬度消波室的消波效果較非等寬度的配置好。當孔隙率在  $20\sim 60\%$  範圍內時，隔間牆的孔隙率小於前牆的孔隙率時有較好的消波效果。雙消波室的大小對反射率的影響不明顯，但雙消波室在隔間牆具較低孔隙率時，相較於單消波室有比較好的消波表現。

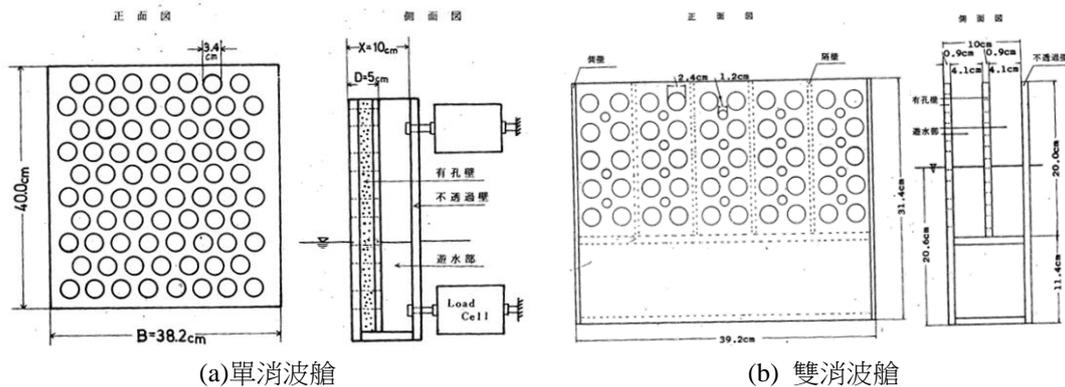


圖 6 井島等人(1979)多孔隙消波艙消能結構物模型

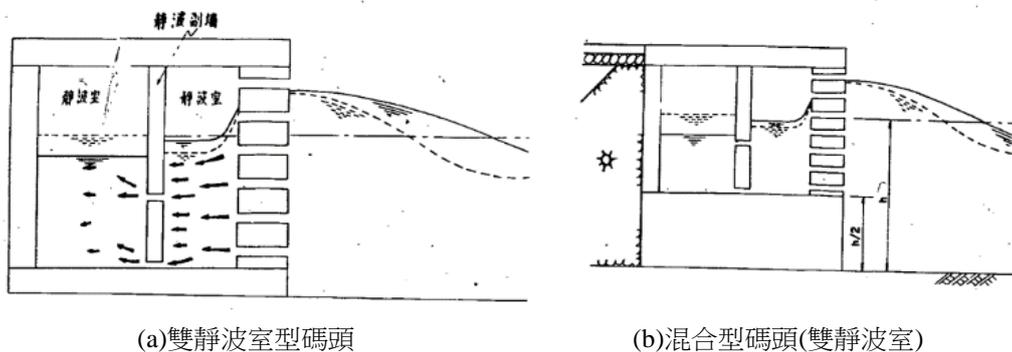


圖 7 萬代福靜波牆消能結構物(蘇等人, 1979)



式研究在消波室內設置水平或傾斜多孔板的消能結構物(如圖 12 所示)的消能效果，認為適當地安排水平孔板的傾斜角、開孔率與沒水深度，以及多片孔板的適當配置，可以有效地減少長週期波的反射。Garrido 等人(2010) 提出一種低反射率消能結構物，利用開孔圓柱的相互連結形成不同長度的通路(如圖 13 所示)來遲滯長週期波浪，但對長週期波的反射率仍高。

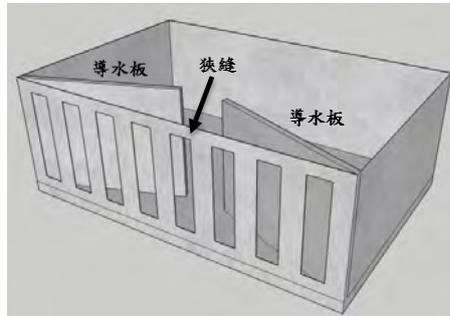
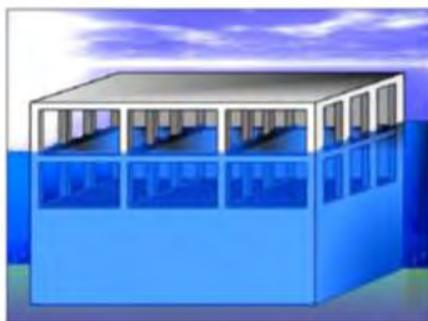
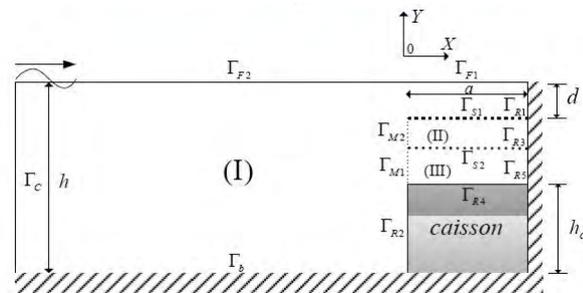


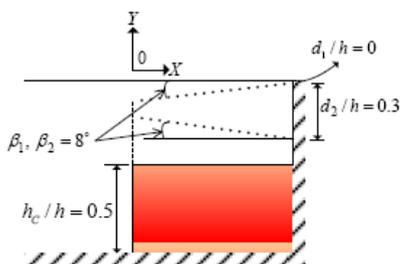
圖 11 Ohshima 及 Moriya(2005)的導水式開孔消能結構物



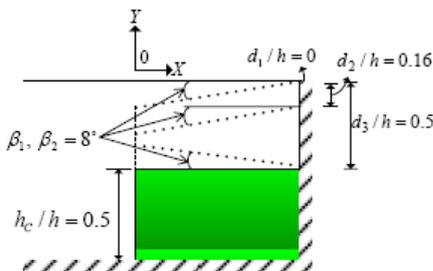
(a)立體模型示意圖



(b)三層水平板



(c)兩層傾斜板



(d)三層傾斜板

圖 12 Kee 等人(2006)之消波室內置水平版開孔沉箱

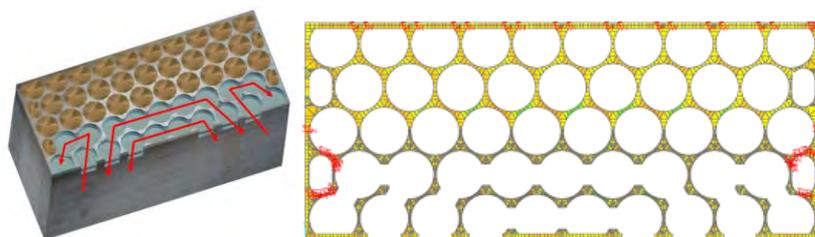


圖 13 低反射性沉箱示意圖(Garrido, 2010)

綜上所述，港灣結構物利用波浪水流通過結構物前牆的開孔大小所產生不同的堰口效應與消波室來消減波能，即所謂的開孔(slotted)/多孔性(perforated)消能結構物。而水面以下的開孔會造成內外通水現象，波動與水流可以排出亦能流入，故消波室內在不論有無填充多孔隙介質時，靜水位以下都應視為飽和狀態，如此一來波動與水流的運動，不論進或出，都會受到阻礙。意即，當波浪進入空的消波室，波浪就在消波室內產生多重反射與碰撞；若填充了多孔隙材料，入射波浪便轉為孔隙水流而不再是波動，此二者均會有遲滯現象。而當波或流要向外散射時，受阻於入射波浪的反向流入阻擋，而導致消波室的水位抬升，但同樣地逆向水流也造成入射波的反射，此一現象可能是導致開孔式消能結構物的消波效果很難改善的原因。

林等人(2012)累積多年水工模型試驗的的觀察經驗，嘗試設置消能斜坡並縮短其長度與高度，同時在後方加上落水槽，使波浪在斜坡上在淺化、碎波、溯升後繼續發生越波，再利用內外水位差從孔隙材料將水排出(如圖 4a 所示)，試驗結果發現其消波效果明顯改善(如圖 4b 所示)，並發展成開孔式消能結構物的內建斜坡，促進越波與底部預埋排水管(如圖 5 所示)以達減波的功能，使波浪在各種型式岸壁的反射與透過，若從波動的角度解釋較為複雜，但若從水粒子的運動來解釋便較為清晰。例如，不論直立壁或斜坡，波浪的入射可視為一個動能轉位能的行為；而反射則可解釋為水體運動由位能轉動能的新(逆向)造波運動。水流經過孔口會發生堰口效應有渦流與摩擦損失；底床表面粗糙度或許可以明渠流的曼寧係數來說明；而多孔隙材料的流動則可嘗試以滲流理論來看待。在掌握了排水減波的要領後，2016 年林等人(2017b)提出配置活動式摺葉板之開孔消能結構物，歐陽等人(2018)提出開孔結構物內建上斜板及下斜板應用於港灣的碼頭設施，前者以摺葉板的開合阻擋波動直接散射出消波室，後者則以斜板改變波動為流動，但兩者均強迫從下方排水。從水工模型試驗證明其可提供相當好的消波效果。2017 年為持續檢討及改善開孔結構物的消波功能，進行了活動式摺葉板(王等人，2019)以及玩具車輪胎模擬彈性壁消能結構物(葉等人，2018)的消波室長度研究。以下針對前述試驗進行檢討，並提出後續研究的建議。

### 三、水工模型試驗

本文所討論之試驗皆於國立臺灣海洋大學河海工程系的斷面水槽進行。以規則波的形式對各個模型配置進行不同週期( $T$ )及多種波高( $H$ )的造波試驗，並量測結構物前的水面波動變化，以進行反射率分析( $K_r$ )與評估各個結構物的消波功能，使用試驗設備和儀器說明如下：

#### 1. 斷面造波水槽及造波設備

斷面造波水槽尺寸為 28m×0.8m×0.8m(長×寬×高)，有效造波段長 25.65m(如圖 14 所示)，水槽主體為不銹鋼板，兩側鑲嵌透明強化玻璃以便觀測試驗中的波浪變化過程及全程拍照攝

影。造波機為英國愛丁堡設計公司(Edinburg Designs Ltd.)產製的活塞式造波機，造波板寬度為 0.77m。該造波機可造規則波與不規則波，建議造波水深為 0.5m。

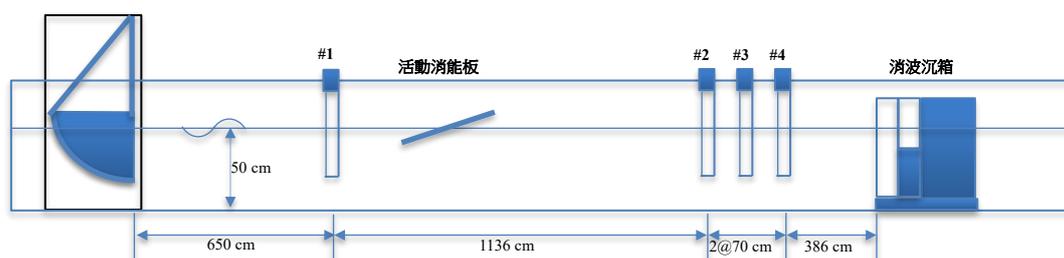


圖 14 斷面造波水槽及試驗佈置示意圖

## 2. 波高量測擷取系統

資料擷取系統是係由日本 Union Engineering 株式會社電容式波高計(U.E.W1-1，測定範圍  $\pm 15\text{cm}$ )、增幅器及 InstruNet 類比-數位訊號轉換系統所組成。波高計在測得水位變化後，經增幅器放大訊號，以電壓型式傳送至資料擷取系統，進行訊號轉換及數位資料存檔。

## 3. 波高計配置

試驗採用 Goda 兩點法測定反射率，由於進行多種造波週期，考量因入射波與反射波的相位差，可能於不確定位置處發生重複波的波峰或波節，造成量測誤差問題，乃設置多支波高計，並於分析時採多組配對方式分析。2016 年共設置 7 支波高計，以造波板為起點，沉箱模型放置於 23.12 m 處，波高計(W1~W7)依序設置於 6.5m、13.86 m、14.56 m、15.26 m、17.86 m、18.56 m 及 19.26 m。2017 年亦使用 7 支波高計(W1~W7)，依序設置於距造波板 7m、17.92m、18.33m、18.73m、19.13m、19.53m 及 19.93m 處，實驗架置於 21m 處，W1 用於量測入射波。

## 4. 監視錄影裝置

為便於觀察及檢討水理現象，試驗中在不同角度安裝了一組有 4 台 CCD 的監視設備及 1 個螢幕，記錄整個試驗造波過程。

## 5. 模型設計

參考實際的港內水深大約為 15~18m，而造波水槽的可造水深最大為 0.5m。依照 Froude 相似定律，結構物合理尺寸及造波可能條件，選用比例縮尺為 1:36。

## 6. 模型構想

(1)模型 I：活動式摺葉板(flap plate type)開孔沉箱(林等人，2017b)

該結構物係結合開孔沉箱與活動摺葉板，在沉箱前壁上矩形開孔的內側加裝活動摺葉板，並設置第 2 消波室，下側則保留洩水孔以利排水(如圖 15a 所示)。其構想為當波峰作用於前壁時，由於水平作用力較大可以推開摺葉板而使得水體進入消波室；而當波谷作用時，則因為波浪水粒子後退，水平推力減小或向外，不足以支撐摺折葉板的重量加上消波室的內外水位差促使摺葉板關閉，阻止水體直接外流產生反射波，並導引水體從下方孔洞排出，以提升消波效果。此與一般消能結構物利用水體在有限空間內相互碰撞以達到消波目的不同，該結構物加強了排水功能(其消波構想如圖 16 所示)。

2016 年試驗採用的基本開孔沉箱模型是由厚度為 1cm 的壓克力板製作，長×寬×高為 0.79m×0.77m×0.5m，於迎波面做開孔處理，孔洞尺寸為 3cm×13cm，水平開設 4 行孔洞，垂直方向開設 9 個孔洞，該試驗也引進消波室排水的構想，在深水處波浪波動較小的最下方保留 1 列泄水孔，並在孔洞內側上端添加活動摺葉板，配重 36g，其尺寸為 3.5cm×13cm，活動摺葉板垂直方向設有 8 片，水平方向設有 4 行，共 32 片。

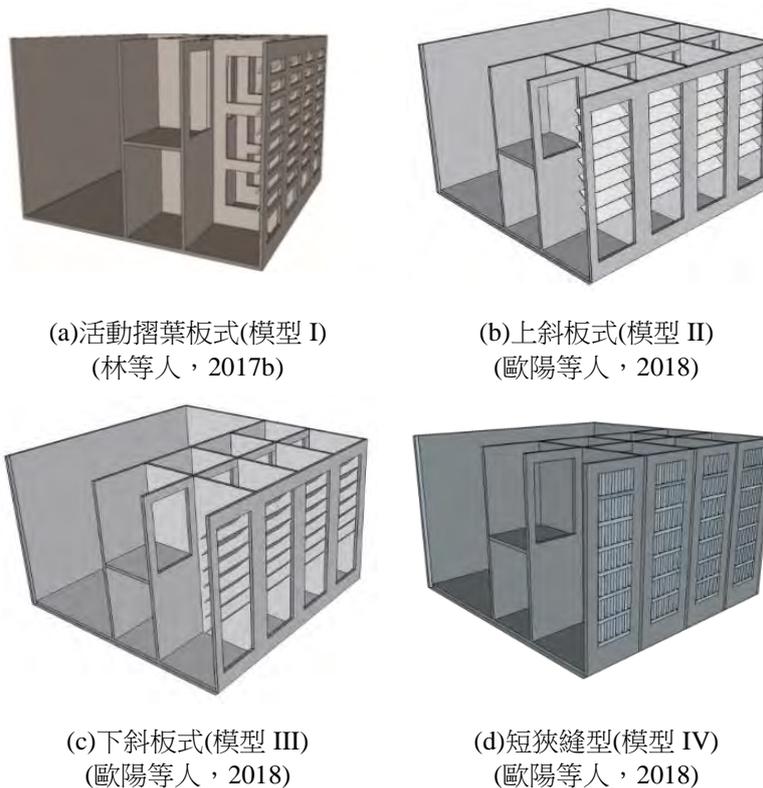


圖 15 2016 年開孔沉箱各式模型

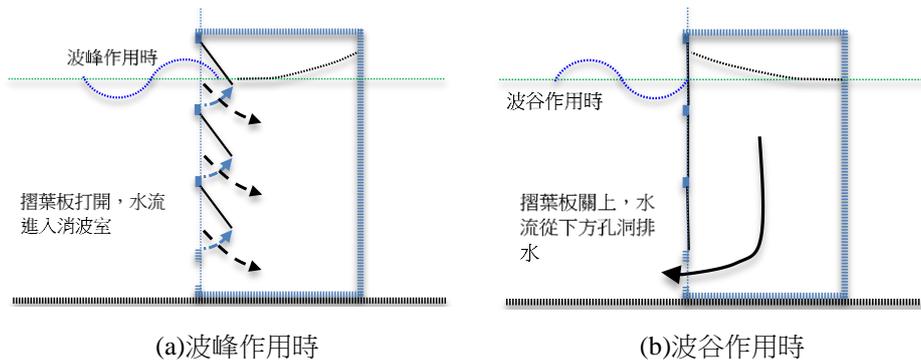


圖 16 活動式摺葉板開孔沉箱消波構想圖

(2)模型 II：上斜板(ascending slope type)開孔消能沉箱(歐陽等人，2018)

上斜板沉箱以 7 片×4 列布置，每片板長 13cm，寬 6.5cm，傾斜角  $\theta$  約為  $35^\circ$  (如圖 15b 所示)，下方保留洩水空間，其目的為強迫波形抬升，但斜板長度尚不足以促成溯上。

(3)模型 III：下斜板(descending slope type)開孔消能沉箱(歐陽等人，2018)

下斜板沉箱以 8 片×4 列布置，每片板長 13cm，寬 6.5cm，傾斜角  $\theta$  為  $-45^\circ$  (如圖 15c 所示)，下方保留洩水空間，其目的是強迫波形向下運動。

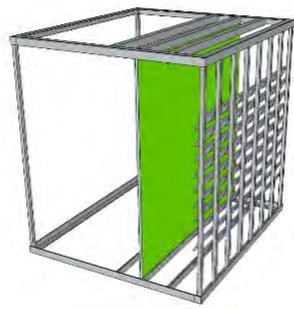
(4)模型 IV：短狹縫型(slitt type)開孔消能沉箱(歐陽等人，2018)

短狹縫型沉箱的狹縫直孔寬為 1.5cm，高為 4cm，沉箱上一共有 4 排，每排有 9×4 狹縫開孔，水平間隔為 1.5cm，垂直格梁寬為 1cm (如圖 15d 所示)，本模型主要是作為一般消能結構物的對照組。

(5)模型 V：活動式摺葉板之開孔消能結構物(王等人，2019)

為了探討消波室縱深對反射率的影響，2017 年的專題研究設計了一個長×寬×高為 0.78m×0.78m×0.8m 的實驗架(如圖 17a 所示)，並製作成活動式摺葉板開孔沉箱結構，其正面以方管作為小柱，等間距分隔成 7 個開孔，而縱向以間隔 10cm 設置導槽，並可調整 10cm、20cm 及 30cm 共 3 種不同的艙室寬度。

活動式摺葉板選擇單片摺葉板尺寸為 9.7cm×3cm×0.2cm，配重為 5.25g，於實驗架的迎波面分別以 7 行 14 列用鋁合金角條作為小梁安裝摺葉板，一共設有 98 塊摺葉板，頂端因波浪無作用及底端保留為洩水孔而未安裝。



(a)活動折葉板式(模型 V)  
(王等人, 2019)



(b)輪胎彈性壁(模型 VI)  
(葉等人, 2018)

圖 17 2017 年開孔消能結構物

(6)模型 VI：輪胎壁式(waste tire net type)消能結構物沉箱(葉等人, 2018)

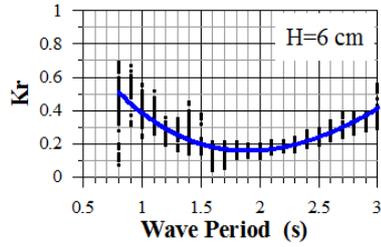
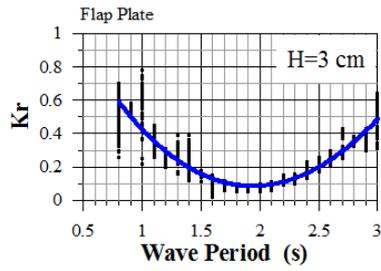
如圖 17b 所示，輪胎彈性壁係以直徑 4.4cm 的模型車用輪胎，在輪胎面打孔並以金屬螺絲螺帽連結以保持輪胎彈性，在構成整片輪胎面後將其安置於實驗架的迎波面，輪胎面規格為 16 行 17 列，共使用 272 個輪胎，沉箱最下方保留一排洩水孔。

#### 7.試驗造波條件與量測記錄

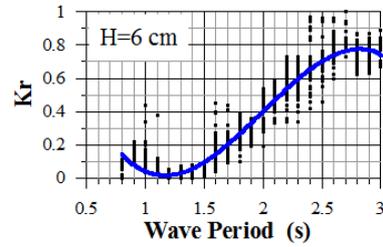
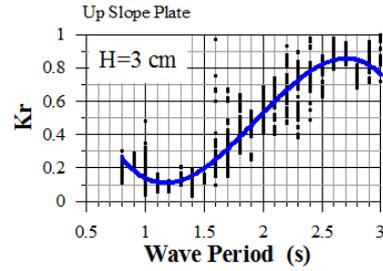
試驗造波以不發生碎波為原則，設定週期為 0.8s 至 3.0s，間隔 0.1s(共 23 種週期，相當於實際的 4.8s 至 18s)，波高設定為  $H=3\text{cm}$  及  $6\text{cm}$  兩種(相當於實際波高 1.08m 及 2.16m)，故共有 46 組造波條件，各條件均重複試驗 3 次，每次造波時間約 90 秒，取樣頻率為 25Hz。

## 四、反射率分析結果

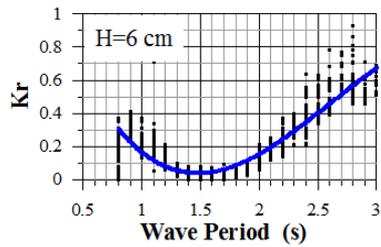
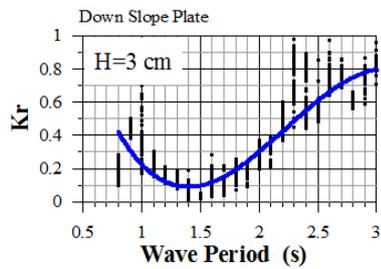
為便於觀察，2016 年模型 I~模型 IV 的試驗結果均繪製 2 種波高的反射率分布( $K_r - T$ )及迴歸曲線圖顯示於圖 18 中，各子圖由上而下依序為造波波高 3cm 及 6cm 的反射率分布( $K_r - T$ )關係及迴歸曲線圖，圖中藍色實線為三次迴歸曲線。2017 年模型 V 及模型 VI 的試驗結果均分別繪製造波波高 3cm 及 6cm 及所有波高的反射率分布( $K_r - T$ )及迴歸曲線圖顯示於圖 19 及圖 20 中，各子圖包含 3 種縱深的結果，分別以黑色、紅色及藍色圓點與三次迴歸曲線依序顯示。



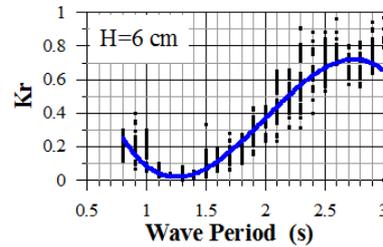
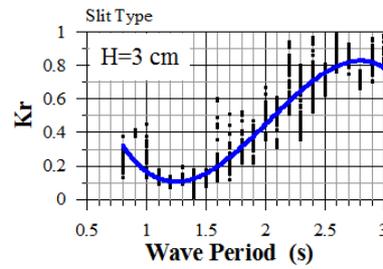
(a)模型 I  
(林等人, 2017b)



(b)模型 II  
(歐陽等人, 2018)

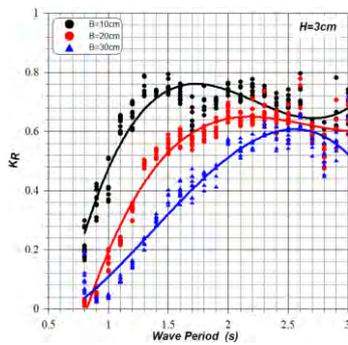


(c)模型 III  
(歐陽等人, 2018)

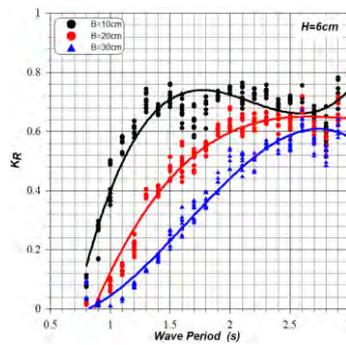


(d)模型 IV  
(歐陽等人, 2018)

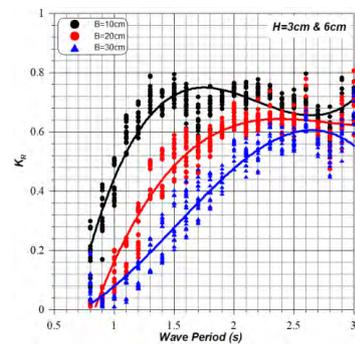
圖 18 2016 年各模型的( $K_r - T$ )關係圖



(a)波高 3cm



(b)波高 6cm



(c)所有波高

圖 19 模型 V 的( $K_r - T$ )關係圖(王等人, 2019)

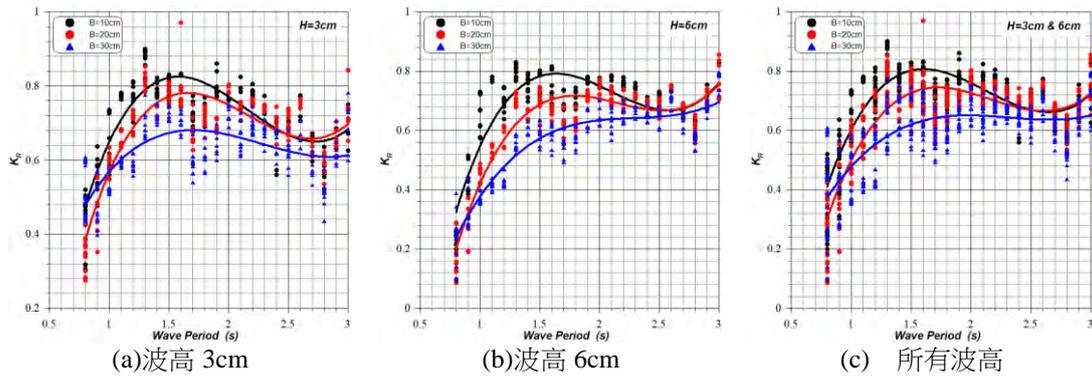


圖 20 模型 VI 的( $K_r - T$ )關係圖(葉等人, 2018)

- 1.模型 I：如圖 18(a)所示，曲線呈現一向上凹的變化，也就是波浪週期大約在 2s 左右， $K_r$  最小， $T=0.8s$  與  $T=3.0s$  處  $K_r$  略大，但多小於 0.6，而  $T=1.5s \sim 2.5s$  之間  $K_r$  小於 0.2。
- 2.模型 II：如圖 18(b)所示， $H=3\text{ cm}$  在  $T=0.8s \sim 1.8s$  左右時  $K_r$  保持在 0.4 以下，於  $T=1.2\text{ s}$  左右達到最低值； $H=6\text{ cm}$  在  $T=0.8 \sim 2.1\text{ s}$  左右  $K_r$  保持在 0.4 以下，於  $T=1.2\text{ s}$  達到最低值。
- 3.模型 III：如圖 18(c)所示， $H=3\text{ cm}$  在  $T=1.0 \sim 1.8\text{ s}$  左右時  $K_r$  保持在 0.2 以下，於  $T=1.5\text{ s}$  左右達到最低值； $H=6\text{ cm}$  在  $T=0.9 \sim 2.1\text{ s}$  左右  $K_r$  保持在 0.2 以下，於  $T=1.4\text{ s}$  左右達到最低值。
- 4.模型 IV：如圖 18(d)所示， $H=3\text{cm}$  在  $T=0.8s \sim 1.8s$  左右時  $K_r$  保持在 0.2 以下， $T=0.8s \sim 2.0s$  左右時  $K_r$  在 0.4 以下，於  $T=1.3s$  附近達到最佳值； $H=6\text{cm}$  在  $T=0.85s \sim 1.25s$  左右時  $K_r$  保持在 0.2 以下， $T=0.8s \sim 2.0s$  左右時  $K_r$  也保持在 0.4 以下，於  $T=1.3s$  左右達到最佳值，顯示本型結構物對於削減  $T=2.2s$  以下的波浪相當有效， $K_r$  在 0.5 以下。
- 5.模型 V：圖 19 為模型 V 的試驗結果，圖中  $H=3\text{cm}$  與  $H=6\text{cm}$  的  $K_r$  變化類似，整體  $K_r$  隨週期增加而增加之趨勢的線形。以縱深 20cm 為例， $T=1.4s$  以下， $K_r$  在 0.5 以下，但隨週期增長而變大，最大值  $K_r=0.65$  約發生在  $T=2.2s$  附近；縱深 10cm 的最大值  $K_r=0.76$  發生在  $T=1.7s$  附近；而縱深 30cm 的最大值  $K_r=0.61$  發生在  $T=2.6s$  附近。可以看到消波室縱深愈長，最大  $K_r$  發生向長週期偏移，但  $K_r$  略小，相差不到 0.15，且均大於 0.6。
- 6.模型 VI：圖 20 為模型 VI 的試驗結果，各迴歸趨勢也呈現為向增加再降低的線形，以縱深 20cm 為例， $T=0.9s$  以下， $K_r$  在 0.5 以下，但隨週期增長而變大，最大值  $K_r=0.78$  約發生在  $T=1.7s$  附近；縱深 10cm 的最大值  $K_r=0.83$  發生在  $T=1.6s$  附近；而縱深 30cm 的最大  $K_r=0.61$  發生在  $T=2.6s$  附近。可以看到消波室縱深愈長，最大  $K_r$  發生在愈長週期處，但  $K_r$  略小，相差不到 0.16，且均大於 0.6。

## 五、 綜合比較

上一節的各迴歸曲線明顯呈現了 2016 年與 2017 年有很大不同的變化趨勢。圖 21 及圖 22 分別顯示不同波高的( $K_r - T$ )迴歸曲線，圖中綜整了模型 I~模型 IV 的反射率。

### 5.1 雙消波室的消能特性

圖 21 中呈現模型 I、模型 II、模型 III 及模型 IV 不同的消波特性，也就是 2016 年的活動摺葉板型、上斜板型、下斜板型及短狹縫型有不同的消波效果，後 3 者變化趨勢大致相同， $K_r$  在  $T=1.2s \sim 1.5s$  的區間達到最低的 0.2 以下，但  $T=2.7s$  以後達到最高的 0.85。然而，摺葉板型則在  $T=2s$  達到最低的 0.2 以下，在  $T=0.8s$  與  $T=3.0s$  有最高反射率，但  $K_r$  仍小於 0.6。此一部分的差異性應在於模型 I 有強迫的排水功能，而模型 II、模型 III 及模型 IV 由於通水的關係，排水功能較弱。

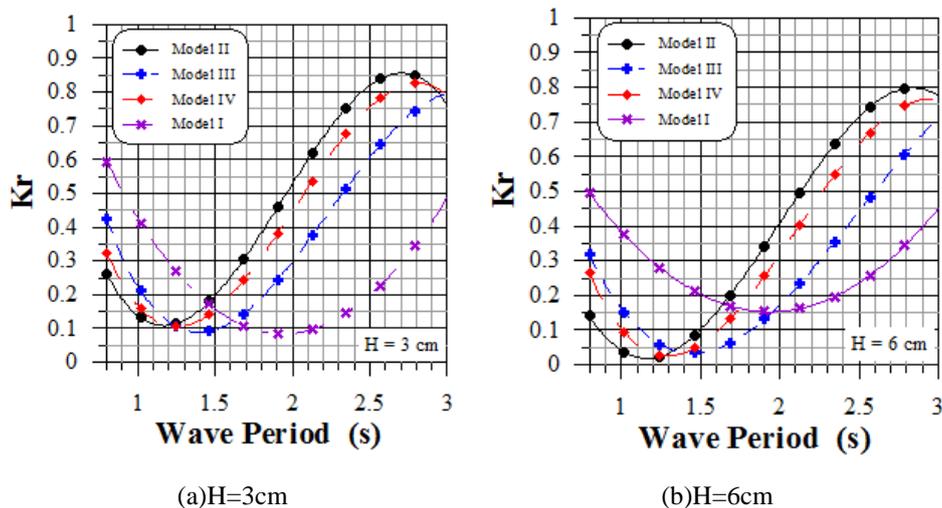


圖 21 雙消波室各種模型之  $K_r - T$  比較

### 5.2 單消波室的消能特性

圖 22 顯示模型 V 與模型 VI 的兩個試驗有不同的消波效果，但變化趨勢大致相同。2 者  $K_r$  隨週期增加而增加之趨勢，特別是模型 V 在  $T=0.8s$  時有最小反射率，且隨著消波室縱身增加而反射率降低，此部分經過試驗影片的紀錄比較，應是波浪入射消波艙後的反射與摺葉板啟閉的時間差，所產生的艙室內外相位差有關。

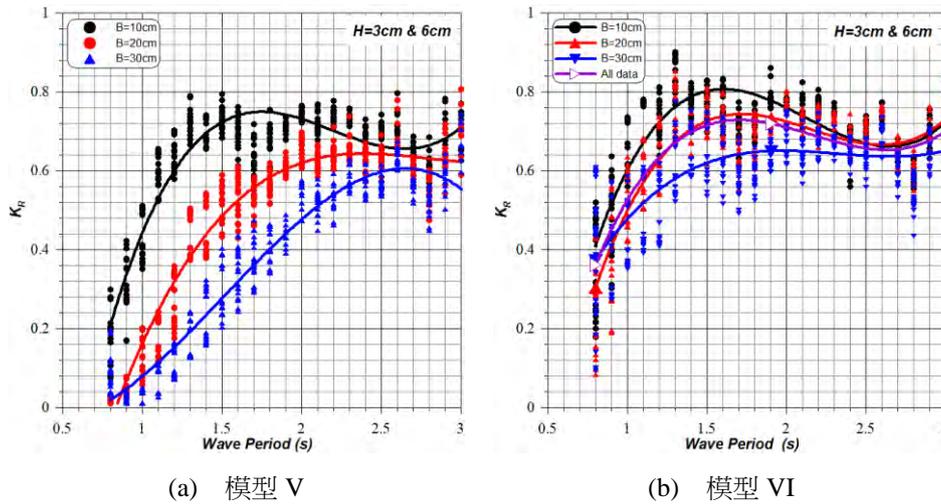


圖 22 單消波室之  $K_r - T$  比較

圖 23 顯示同樣為活動式摺葉板的模型 I 與模型 V 反射率比較圖，但 2016 年與 2017 年有完全不同的變化趨勢，經過比對並回看試驗過程的攝影紀錄，研判應該與 2016 年的沉箱模型屬於雙消波室結構，而 2017 年則屬於單消波室的型式有關。單消波室雖然有不同的縱深，但因屬於單純矩形空間，容易與波動的特性產生共振現象，使消波室內發生較大振盪，能量不易消散。最大反射率隨消波室縱深的加長而向長週期移動，應與是否引發腔內的水體振盪有關。因此，從本文的研究中所對「主導開孔結構物消能效果」的主要機制有 4 個，包含多孔隙岸壁、兩個消波室的消波特性以及消波室的排水功能。藉由波浪(水粒子)通過多孔隙的孔洞時所產生的水動力變化，例如波浪的繞射以及類似的堰口效應，可能對入射波浪產生干擾或消能。消波室的長寬可能對特定週期的入射波浪造成共鳴箱效應導致水體的堆積與振盪。然而研究中尚未找到與  $1/4$  或  $1/2$  波長有關的參數，但發現反射波有相位的遲滯，所以多孔隙岸壁以及消波室可能造成相位上的變化。最後，增加消波室內的消能工有助於加強整體的消波效果，包含其排水功能。

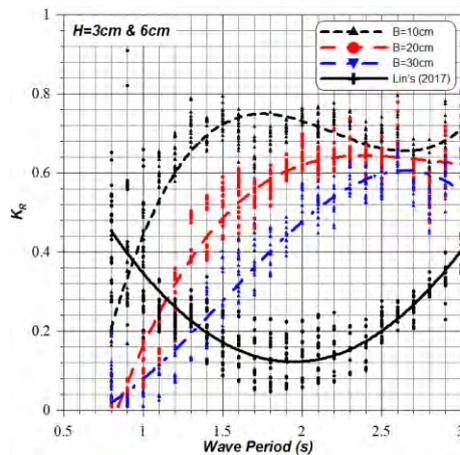


圖 23 雙消波室模型 I(實線)與單消波室模型 V(虛線)之比較

## 六、 結論與建議

1. 開孔式結構物的消能能力取決於幾個主要機制，包括多孔隙岸壁、消波室的消波特性以及排水功能。岸壁的開孔形狀、大小可能會影響波浪通過孔洞時所產生的水動力變化，例如波浪的繞射以及類似的堰口效應，可能對入射波浪產生干擾或能量損失。消波室的長、寬可能對特定週期的入射波浪造成共鳴箱效應導致水體的堆積與振盪，多孔隙岸壁以及消波室可能造成反射波相位上的變化，而使得重複波發生的位置可能偏離岸壁。消波室的排水功能有助於整體的消波效果。
2. 消波室的消波能力主要是依賴消波室的消波功能而非其縱深長度，如能有效地消波與排水，例如林等人(2012 及 2017a)，即嘗試排水減少艙室裡發生振盪機會，以提升消波能力。
3. 利用廢胎構成多孔隙彈性壁，從試驗已證明其具備基本消波能力，後續可再加強消波室內的消波能力。Huang(2011)曾提出消波室內填塊石的型式，但因塊石的孔隙可消減波能，也可能因阻滯水流運動導致孔隙充滿水而水位抬升及降低消波效果。如能利用廢輪胎進行捆紮組合使保持彈性結構特性並放置於消波室內或沉箱前壁，或可構成彈性消能材料，吸收衝擊波力，並兼顧廢輪胎資源再利用、施工簡單、維修容易、工程費低廉等優點，應可思考應用於地方財政困難的漁港碼頭，又可舒緩每年產生且無法處理大量的廢輪胎所衍生的一系列環境問題。
4. 本文針對多種新型開孔型結構物作初期的消能特性探討，證明其可達傳統開孔結構物的消波效果甚至更好，如能從消能機制分項研究改良再進行整合，應可達到更為優秀的消波效果，例如加強第 2 消波室的消波功能、控制輪胎擺放個數以及相對深度等。

## 參考文獻

1. Garrido, J. M., de León, D. P., Berruete, A., Martínez, S., Manuel, J., Fort, L., ... & Medina, J. R. (2010). Study of reflection of new low-reflectivity quay wall caisson. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), 27-27.
2. Goda, Y. (1985). *Random seas and design of Marine structures*, Univ.
3. Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. In *Coastal Engineering 1976* (pp. 828-845).
4. Hiraishi, T., & Nagase, K. (2002). Long period wave absorbing by artificial beach. *Proc. 6th, LITTORAL 2002, EUROCOAST*, 601-606.
5. Hiraishi, T. (2006, May). Development of long period wave absorber. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
6. Huang, Z., Li, Y., & Liu, Y. (2011). Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted

- coastal structures: A review. *Ocean Engineering*, 38(10), 1031-1053.
7. Jarlan G.E. (1964) "Breakwater Structure". U.S. Patent No.3,118,282. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office.
  8. Kee, S. T., Lee, S. H., & Ko, J. S. (2006, May). Submerged porous plate wave absorber. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (pp. ISOPE-I). ISOPE.
  9. Lee, J. I., & Shin, S. (2014). Experimental study on the wave reflection of partially perforated wall caissons with single and double chambers. *Ocean Engineering*, 91, 1-10.
  10. Ohshima, K., & Moriya, Y. (2005). Long-period wave absorbing characteristics for slit-type structures. In *Proceedings of Civil Engineering in the Ocean* (Vol. 21, pp. 791-796). Japan Society of Civil Engineers.
  11. Tanimoto, K. (1982). Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall. *Report of the Port and harbour Research Institute*, 21(3), 44-77.
  12. 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實驗研究及實例」, 第3屆海洋工程研討會論文專輯, 63-77頁。
  13. 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專輯, 139-157頁。
  14. 陳文生 (1999), 「孔隙結構物附近之不規則波斷面試驗研究」, 國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士論文。
  15. 李健鴻 (2010), 「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。
  16. 林昭圭、岳景雲、翁文凱、楊國誠 (2012), 「消能式結構物特性之研究(4/4)」, 交通部運輸研究所合作研究計畫成果報告。
  17. 林昭圭、連皓宇、張維庭、蔡世璿、李大鴻、林蔚、...&、楊輝斌 (2017), 「新型設置導流板之直立開孔式結構物的消波特性和初期研究」, *海洋工程學刊*, 17(4), 245-268頁。
  18. 林蔚、林鵬、陳池威、李大鴻、陳德鋼、楊升耀、...&、林昭圭 (2017), 「直立折葉板開孔式沉箱之消波特性和初期研究」, *海岸工程*, 36(4), 10-19頁。
  19. 許師瑜、李建鴻、楊國誠、蔡金吉、邱永芳、林昭圭 (2017), 「內建斜坡式消能碼頭之開發研究」, *海洋工程學刊*, 17(2), 91-114頁。
  20. 葉子怡、王雪迎、倪旭暉、施俊超、陳燕玲、林嘉琪、...&、林昭圭 (2019), 「廢輪胎多孔隙消波結構物特性之初期研究」, *海岸工程*, 38(1), 40-51頁。
  21. 歐陽榮桓、楊升耀、阮天野、楊輝斌、林昭圭、林蔚、...&、陳德鋼 (2018), 「內建斜板直立開孔式消能結構物的消波特性和研究」, *水運工程*, (2), 29-35頁。
  22. 林昭圭、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性試驗研究」, *海洋工程學刊*, 18(1), 39-57頁。
  23. 王芳宇、巫子揚、黃劭華、鄭智超、鄭劍豪、林昭圭 (2019), 「直立折葉板開孔式結構物之消波特性和改善研究」, *水道港口*, 40(1), 35-40頁。