

離岸堤周圍波場特性之研究

周宗仁¹ 黃偉柏² 尹彰¹

1. 教授, 國立台灣海洋大學河海工程學系, 基隆市北寧路2號
2. 博士後研究, 國立台灣海洋大學河海工程學系, 基隆市北寧路2號
電子郵件: paulhw@ind.ntou.edu.tw

摘要

本研究利用方向頻譜探論離岸堤周圍波場的特性。首先在水槽裡進行僅有一個單一的離岸堤的試驗。利用堤前的方向頻譜在方向域裡分離向堤和離堤波能量；並藉著比對堤前和堤後波場能量而得到堤體距離和波浪方向性的關係式。接續再以八斗子漁港離岸堤模型試驗結果驗證此兩關係式應用的可行性。不論從趨勢或是相對誤差的結果來看，以回歸式所推估的結果與實測值皆比極為相符。

關鍵詞：反射率、方向頻譜、離岸堤。

A study on the characteristics of the wave field around detached breakwaters

Chun-Ren Chou¹ Wei-Po Huang² John Z. Yim¹

Abstract

Using the concept of directional wave fields, the characteristics of the wave field around a detached breakwater were studied. At first, qualitative experiments were carried out for the case where a breakwater is the sole factor affecting the wave field. With the aids of these estimated directional spectra, outgoing and incoming wave energies in front of the detached breakwater were then separated in the spatial domain. Relationships between the wave energies, the distances of the measuring stations to the breakwater, and the directionality of the wave field were obtained. These results were then applied for the experiments where the fishing harbour Ba-Do-Zhi (BDZ) was used as model. Comparisons of results predicted by the empirical relations and those from the measurements are favorable. It is therefore proposed that the relationships presented here in this paper can be used for engineering purposes.

Keywords: reflection, directional spectrum, detached breakwater.

一、前言

離岸堤為未銜接沿岸陸地，獨立於海中用來抵擋外海入射波能量，使堤後遮蔽處成為靜穩海面、保護沿岸設施和海岸線完整的結構物。其周圍波場是由各種方向的入射、反射、散射和繞射波所組成，因此如果要合理地計算出離岸堤周圍波場的特性變化，就需將波場能量分佈的方向特性加入考量。

然而早期的水工實驗，受制於電腦的技術和相關理論的發展，大多以二維波場(波高和週期)的方式進行試驗，雖然其結果已可以達到某種程度的需求，但是由於並未將波場的方向性加以代入考慮，所提出的設計，往往隱含著一定的風險。隨著多方向造波機問世，實驗室裡已可造出與實際海面相似的三維波場，也就是除了原來的二維訊號外還加入了波場方向性的訊號，相對的，實驗結果也與實際現象更為接近。

Funke 和 Mansard (1992)整理歸納了一系列世界各著名水工實驗室裡進行的二維波場、三維波場水工模型試驗和數值模擬結果後發現，無論是針對波浪在經過結構物或地形後的水面變化，或是水中結構物受到波浪作用力的影響，二維波場和三維波場之間的實驗結果差異程度最大可達到 50%。就結構物與波浪之間的非線性交互作用而言，二維的數值模擬並不能模擬出結構物在現場量測的結果；對港池靜穩度試驗來說，二維波場在港池內的水面變化則比三維波場的實驗結果大。

Mory 和 Hamm (1997)比較了單方向規則和不規則波以及多方向不規則波作用下離岸堤周圍波場的變化。他們發現，在開放的水域裡，多方向波經過緩坡度(1/50)的地形後，其低頻部分能量的削減程度比單方向波明顯。另外，以多方向波實驗時，離岸堤堤尾附近會產生旋流，而這個現象在單方向規則和不規則波的波場並不明顯。對於堤後遮蔽處的波高來說，多方向也會比單方向波場的量測結果來得大。

由上述研究可知，雖然二維的波場下試驗可以得到定性的結果，但是實際上，波浪的能量在方向域裡的傳動以及消散機制，也具有相同的重要性。如果在設計海事結構物時，忽略波場的方向性，只以二維波場實驗結果做為依據，往往會發生與實際現象不相符的情形。正因為如此，如何量測波場的方向性並加以計算和考量，遂成為重要的課題。

方向頻譜的估算提供了解決上述問題的一個良好工具。方向頻譜可同時表現出波場能量於方向和頻率域的分佈情形。近二、三十年來各國學者對於方向頻譜推估計算的研究不遺餘力，也獲得相當不錯的成果。本研究是使用 Hashimoto 等人(1993)所發展的「擴張最大熵值法」(Extended Maximum Entropy Principle Method, EMEP)來進行方向頻譜的推估。擴張最大熵值法是假設方向散佈函數為指數函數的型態，因此，計算的方向散佈函數皆能保持為正值，同時，指數函數也具有相當大的撓曲性

(flexibility)，所以能夠表現波場裡各種型態的方向性。

本研究的實驗主要是在海洋大學『海洋工程綜合實驗館』裡的平面造波水槽裡進行。主要可分為兩大部分；首先是以定性實驗在未設置其它地形地物時，討論離岸堤前後波浪能量的分佈特性，並回歸波浪能量與堤體距離和波浪方向性的關係式。接續再以八斗子漁港在外海建築離岸堤的計畫實驗，討論離岸堤興建後，對港池內波場特性的影響，並評估所提經驗公式的適用性。

二、理論基礎

2.1 方向頻譜

一般方向頻譜是以 $s(f, \theta)$ 來表示波場裡能量在頻率和方向域上的分佈情形，至於波場能量分佈則是以函數 $G(f, \theta)$ 表示，並稱之為方向散佈函數。方向頻譜 $s(f, \theta)$ 與頻率譜 $s(f)$ 間存在下列的關係：

$$s(f, \theta) = s(f) \cdot G(f, \theta) \quad (1)$$

雖然一個波場的能量可能分佈在不同方向上，但是理論上來說，其總能量應該是固定的。所以方向散佈函數應符合下面的條件：

$$\int_0^{2\pi} G(f, \theta) d\theta = 1 \quad (2)$$

本研究計算方向頻譜的方法是採用 EMEP 法，其優點是在交譜運算的過程中，能將誤差加以考慮，並運用反覆疊代的計算方式，降低交譜誤差對計算結果的影響，計算精度也相對地提高。其中反覆疊代的計算過程，在統計上可視為從有限的資訊，找出最佳分佈模式的方法。EMEP 假設方向散佈函數為指數函數的型態，表示為：

$$G(f, \theta) = \frac{\exp\left[\sum_{m=1}^K \{a_m(f) \cos m\theta + b_m(f) \sin m\theta\}\right]}{\int_0^{2\pi} \exp\left[\sum_{m=1}^K \{a_m(f) \cos m\theta + b_m(f) \sin m\theta\}\right] d\theta} \quad (3)$$

其中 K 代表反覆疊代計算的最高階數，為未定值。而 a_m 和 b_m 則為待求之係數。

2.2 離堤與向堤波比值均方根

一般來說，離岸堤前的波場主要是由入射波和反射波所構成，而反射係數則是評估離岸堤設計優劣的指標之一。在分離入射波和反射波的能量後，即可著手反射係數的計算。Frigaard 等人(1997)所整理的 IAHR (International Association for Hydraulic Research) 波浪參數表裡提到，若假設司奈爾法則(Snell's law)成立的話，結構物前的方向頻譜與反射率 Kr 之間的關係為：

$$Kr(f, \theta) = \sqrt{\frac{s_r(f, \theta_r)}{s_i(f, \theta_i)}} \quad (4)$$

其中下標 r 表示反射波, i 表示入射波。然而, 離岸堤前的波場除了入射波和反射波外還包含了散射波, 如只以 IAHR 參數的定義方式在方向域裡以入射和反射波做為分野, 極易產生混淆。這是因為入射波是代表由外海向結構物前進的波浪; 反射波為單指由入射波接觸結構物後所產生向海前進的波浪; 而散射波則是反射波與結構物間兩者交互作用所產生的波浪, 其在方向域裡的分佈情形是與入射和反射波相互重疊的。同時, 局部地區的風場會提供波場另一部份的能量供給。相同地, 此部分的能量在方向域裡也會與入射和反射波的能量相互重疊。因此, 本研究為了避免這種限制較多的定義, 採用較早由 Elgar (1994) 等人提出的觀念, 直接將波場的能量在方向域裡分為向岸波 $E_{shoreward}(f)$ (式 5) 和離岸波的能量 $E_{seaward}(f)$ (式 6) (如圖 1)。圖中方向座標軸是以度除以 π , 以無因次化的方式表示。定義為:

$$E_{shoreward}(f) = \int_{180^\circ}^{360^\circ} s(f, \theta) d\theta \quad (5)$$

$$E_{seaward}(f) = \int_{0^\circ}^{180^\circ} s(f, \theta) d\theta \quad (6)$$

由於反射係數等於反射和入射波能量比值的均方根, 因此本文綜合前述論點, 將離岸堤前的波場能量在方向域裡區分為離堤和向堤波的能量後, 以其比值的均方根來取代反射係數。主要是希望藉由這樣的方式, 同時保有與反射係數相似的物理意義, 以供參考比較。其中向堤波的能量是指由造波機產生後, 向離岸堤前進的波浪能量, 其在方向域的分佈範圍是從 180° 至 360° ; 離堤波的能量則代表由造波機所產生的波浪在接觸離岸堤後, 產生向造波機前進的波浪能量, 其在方向域的分佈範圍則是從 0° 至 180° 。若離堤和向堤波的能量均方根比在頻率域則表為式 7, 如再於方向域積分後, 可取單一比值做為代表(式 8)。

離堤波和向堤波能量均方根比(頻率域)

$$\sqrt{E_{seaward}(f)/E_{shoreward}(f)} \quad (7)$$

離堤波和向堤波能量均方根比

$$\sqrt{\frac{m_{0,seaward}}{m_{0,shoreward}}} = \sqrt{\frac{\int_0^F \int_{0^\circ}^{180^\circ} s(f, \theta) d\theta df}{\int_0^F \int_{180^\circ}^{360^\circ} s(f, \theta) d\theta df}} \quad (8)$$

其中 F 代表截斷頻率(cut-off frequency), m_0 代表頻譜的零次矩。

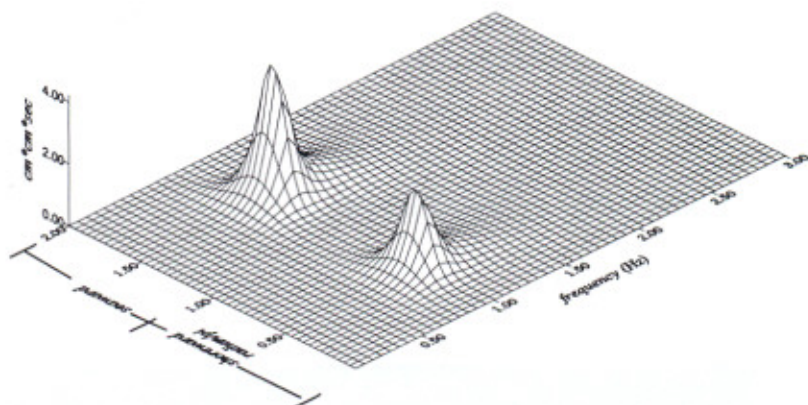


圖 1 堤前波場方向頻譜示意圖

三、實驗佈置

本研究進行的實驗共分為兩大部分，一是定性試驗，實驗水槽內僅佈置離岸堤，並無另外設置其它地形或地物。二是以八斗子漁港為模型，並於港口外設置離岸堤進行試驗。用 JONSWAP 頻譜為目標頻譜，進行單方向和多方向不規則波實驗，並比較不同波場下，兩種離岸堤周圍的波場變化。

實驗時是以星形波高計陣列進行量測以計算波場的方向性。星形波高計陣列的優點在於所使用的波高計數目少且能達到一定的精度。Hiraishi 和 Kanazawa (1995)、Chadwick 等人(1995)和 Hashimoto 等人(1987)曾經在現場和實驗室裡利用相同的方式進行量測，且都得到不錯的結果。

定性實驗裡七個測站的波高計間最短距離皆為 30 公分；而八斗子實驗 A、B 和 C 測站波高計間最短距離為 15 公分，設置於港內的 D 測站則為 10 公分。這是因為八斗子實驗裡水池鋪設了漁港周圍的地形，愈靠近沿岸，也就是愈接近港區，水深漸淺，導致波長也漸漸縮短，為了符合解析波長的需求，所以波高計間的距離也不相同。

為減少二次反射對實驗的影響，兩實驗在造波機的對面皆設置斜率為 1/6 砂石消波斜坡，水槽兩側則設置塑膠製的消波網。從準備實驗，也就是水槽裡未設置任何地形地物時，以方向頻譜計算的結果發現向造波機方向前進的反射波能量小於 5%。

3.1 定性實驗

定性實驗所佈置的離岸堤長 4 公尺、寬 0.6 公尺、高 0.9 公尺，為一般沈箱式不

透水的離岸堤縮尺模型，擺設位置距離造波機 18.5 公尺。為減少實驗的變因，堤腳處未擺設任何消波設施，堤壁塗上油漆，減少摩擦。另外，為了避免越波現象的發生，離岸堤高度較一般比例尺高。量測時的取樣頻率 20 Hz，每一次實驗記錄組數為 16384 筆，再切割成每段為 512 筆的子序列。堤前設置六個測站，分置距離堤體於 1、2.5、3.5、4.5、7.5 和 9.5 公尺處；另外，堤後設置一個測站，距離堤體後壁 1.4 公尺，其實驗佈置表示於圖 2。需注意的是，上述的距離皆以星形波高計陣列中的中心點做為基準點。測站以距離造波機由近到遠分別編號為 1、2...至 7。

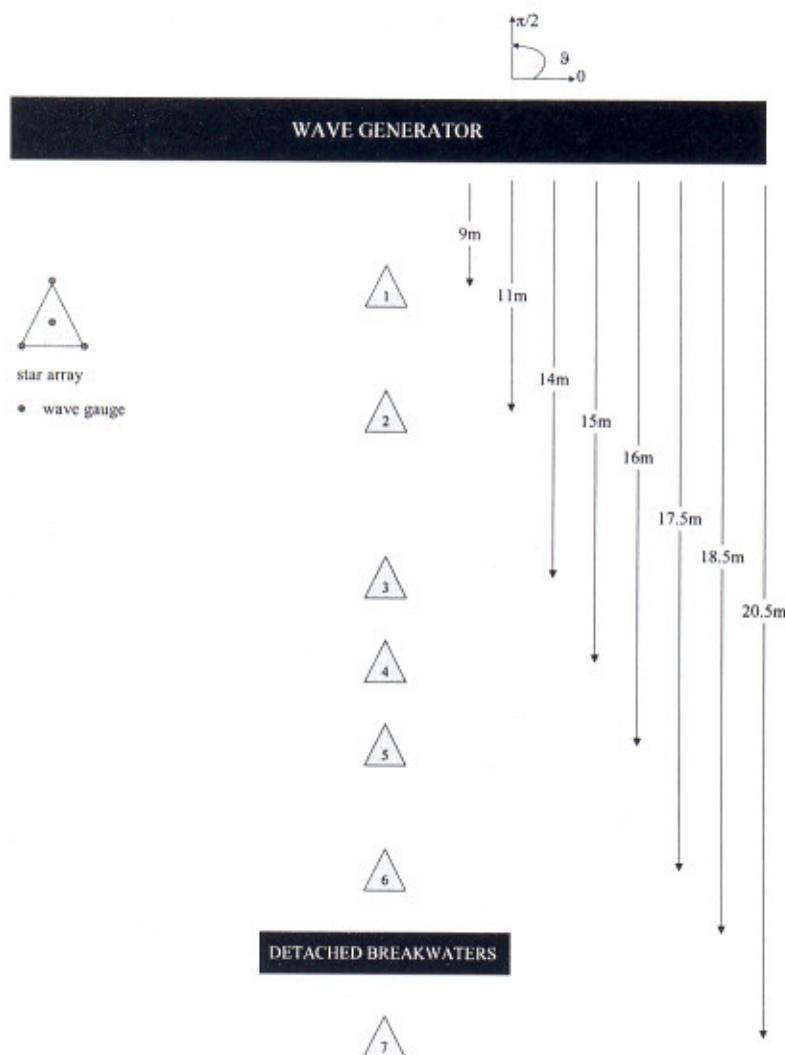


圖 2 定性試驗實驗佈置示意圖

3.2 八斗子實驗

八斗子漁港位於基隆商港東方約兩公里，泊地面積約 30 公頃，為天然港灣。東側以八斗子和長潭尾與深澳灣比鄰，南靠牛稠嶺，西南倚槓子寮山，西面遙對和平島，為目前台灣北區最大之漁港。為使港池內的穩靜度達颱風期間安全避風停泊之要求，計劃在八斗子漁港東防波堤外側水深-25 公尺~35 公尺處建造離岸堤。本港受東北季風影響，主要波向為 NE~NNE 向；離岸堤設計長度為 150 公尺、寬 31 公尺(台灣漁業技術顧問社，1997)。水工模型試驗縮尺是 1/81，地形鋪設以-50 公尺的等深線為界。換算為實驗條件時，實驗水深 60 公分、示性波高 7 公分、離岸堤堤長 187 公分、寬和高各為 38 公分、擺設位置距離造波機 10 公尺。主波向分別為 270° 和 292.5° 。

波高計陣列擺設位置如圖 3，實驗時共設置四個測站，距離造波板 3.2、8.4、11.4 和 13.9 公尺，水深分別為 60、47.5、36.5 和 29 公分。取樣頻率 50Hz，每一次取樣 6144 組數據，分割成六段分進行傅利葉轉換，分別計算頻譜和交譜後再加總平均。

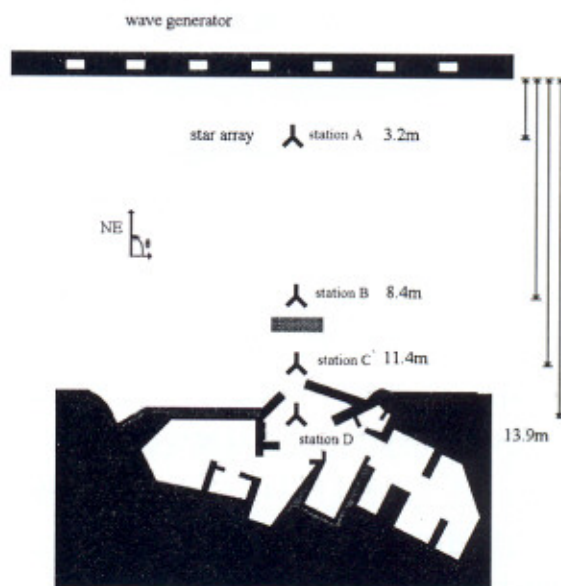


圖 3 八斗子試驗實驗佈置示意圖

3.3 實驗條件

本研究主要是比較離岸堤周圍波場在不同波浪方向性下的變化。多方向波浪的方

向散佈函數是依據 Mitsuyasu 散佈函數(式 9)來設定。

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2sp} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (9)$$

其中 θ 是成分波波向和行進主方向以橫軸向逆時針方向所求的夾角。

$$G_0 = \left[\int_0^{2\pi} \cos^{2sp} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (10)$$

參數 sp 代表方向頻譜在主頻方向能量的集中度。Goda(2000)爲了工程應用的方便性將參數 sp 修正爲式 11:

$$sp = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f / f_p)^{-2.5} : f \geq f_p \\ S_{\max} \cdot (f / f_p)^5 : f \leq f_p \end{cases} \quad (11)$$

其中 S_{\max} 爲方向散佈參數 sp 尖峰值、 f 代表分頻、 f_p 則爲尖峰頻率。方向散佈參數 S_{\max} 值愈大, 表示波浪於波浪行進主方向的能量愈集中; 反之, S_{\max} 值愈小, 能量散佈於方向域的範圍則愈大。所有的實驗條件詳列於表 1。

四、結果與討論

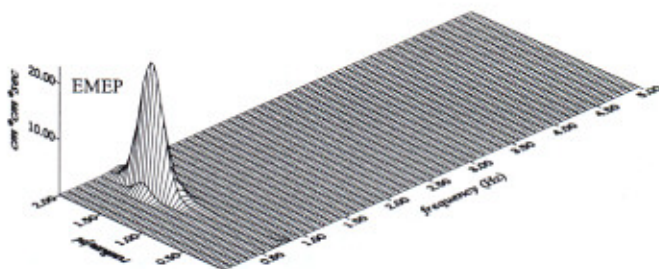
4.1 定性實驗

就堤前波場來說, 其最主要是由向堤和離堤波所組成。圖 4(a)和 4(b)是於示性週期 1.5 秒、示性波高 8.0 公分、 S_{\max} 等於 50 和波浪行進主方向爲 270° 時, 分別爲在無堤及設置離岸堤後, 利用堤前 3.5 公尺處、測站 4 所量測的水面變化序列所計算的方向頻譜。方向頻譜的方向軸是強度除以 π 的無因次化座標。在無設置堤體時, 所計算的方向頻譜正確地估算出波浪行進的主方向, 峰值出現於方向座標軸 1.5 (270°) 處; 在設置堤體後, 方向頻譜除了原來代表向離岸堤行進的入射波譜峰外, 在方向座標軸 0.5 (90°) 處出現了另外一個因爲向堤波在接觸堤體後, 產生由反射和散射波所組成的離堤波能量。該處的示性波高增高爲 14.6 公分, 示性週期則沒有改變。

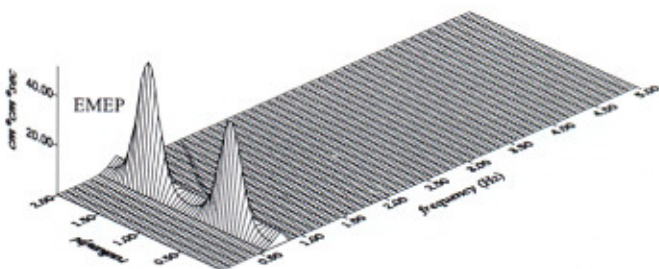
利用估算的方向頻譜在方向域裡分離向堤和離堤波能量後, 接續討論離堤和向堤波能量比值均方根(式 8)與堤體距離和波浪方向性的關係。圖 5 是離堤和向堤波能量比值均方根和 D/L 比值的關係圖。其中 D 代表測站與堤體距離; L 代表向堤波主頻所對應的波長, 而不同 S_{\max} 值的實驗結果則以不同符號表示, 以做區隔比較。

對於多方向不規則波的實驗結果來說, 堤前測站距離堤體於四倍波長的範圍內, S_{\max} 的值愈小, 比值均方根下降的速率也愈快。這也就是說, 當向堤波愈趨近於短峰波時, 離堤波的能量隨著測站與堤體的距離增加, 消散愈快。就相同 D/L 比值所對應

的離堤和向堤波能量比值均方根來看，波浪愈趨近於長峰波，離堤波的能量也就愈明顯。在大於四倍波長距離的範圍，比值均方根則逐漸趨近於定值。



(a)



(b)

圖 4 未設置(a)和設置離岸堤(b)時測站 4 的方向頻譜(定性試驗)

就單方向不規則波而言，其比值均方根皆分佈於 1.0 附近，並不會因與堤體距離的遠近，而有所改變。Goda (2000)指出防波堤的長度並非無限延長的，所以反射波波連的長度也是有限的，而反射波消散的方式與波浪繞射的方式類似，有一定的範圍。對於本實驗來說，堤體長度是固定，測站皆設置於堤體正中央的法線處。所以，當波場波浪為多方向不規則波時，向堤波的方向性分佈愈廣，離堤波的能量在方向域消散的方向範圍則會愈大；而在測站距離堤體越遠情況下，經過測站的離堤波能量也就會越少。相對的，對於單方向不規則波而言，離堤波僅有一個行進方向，除了部分能量於前進傳動時損失外，能量並不會分散於方向域上，因此，其比值幾乎保持恆定。

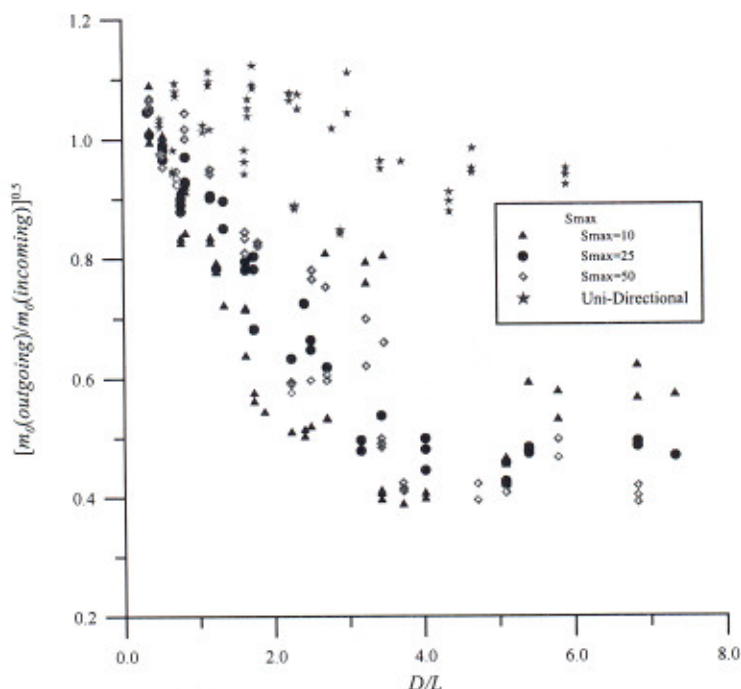


圖 5 離堤和向堤能量的比值均方根和 D/L 之關係(定性試驗)

另外，當向堤波為多方向不規則波， D/L 比值小於 1 的範圍內；或是以單方向不規則波進行實驗時，EMEP 計算的離堤和向堤波能量比值均方根皆會出現大於 1.0 的情形，這表示離堤波的能量大於向堤波的能量。由於實驗進行時，並未另外提供離堤波任何其它的能量，因此，這樣的計算結果與實際的現象並不相符。而這樣的誤差是因為計算的方向頻譜在方向域的分佈情形比實際現象更為發散所造成。離岸堤的前方會因為相位鎖定形成駐波而有節點和腹點的現象，當波高計剛好座落或是接近這些位置時，量測的數據會受到干擾。以這些數據計算波高計間波浪的相位差時，則會得到錯誤的訊息，導致方向頻譜計算的波浪能量散佈於整個方向域上，無法分離向堤和離堤波能量，所計算的離堤和向堤波能量比值均方根也就會大於 1。

圖 6 為利用前述 D/L 與離堤和向堤波能量比值均方根在不同 S_{max} 下所回歸的曲線。由圖 5 多方向不規則波的結果來看，其分佈的形式大致屬於對數曲線，因此將數據取自然對數，剔除了離堤和向堤波能量比值均方根大於 1 不合乎實際現象的部分，表示於圖。其回歸結果的通式可表為：

$$\sqrt{\frac{m_{0,seaward}}{m_{0,shoreward}}} = \alpha \left(\frac{D}{L}\right)^\beta \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} 0.77 \leq \alpha \leq 0.85 \\ -0.28 \leq \beta \leq -0.38 \end{cases} \quad (13)$$

由圖 6 可以發現實驗結果的三條近似曲線十分接近，因此可以將所有實驗的結果一起進行回歸，所得到的通式係數 α 等於 0.84， β 等於 -0.34，即為式 12 中係數的平均值。

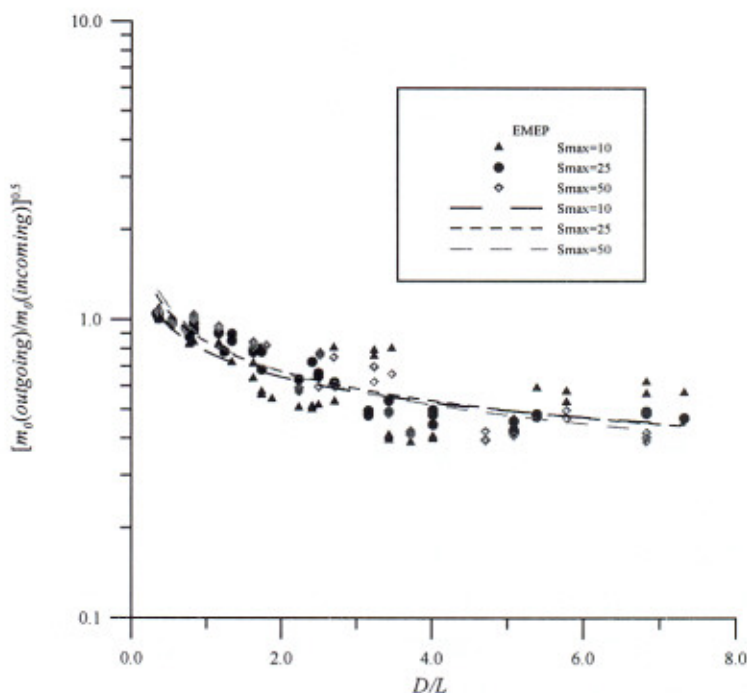


圖 6 D/L 與離堤和向堤波能量比值均方根之回歸式(定性試驗)

對於堤後波場來說，其主要的成份是由直接斜向的入射波以及由堤尾繞射的波浪所組成。測站 7 設置於堤體正後方，其中心點距離堤體後方垂直壁 1.4 公尺。圖 7 為波場示性週期等於 1.1 秒、 S_{max} 等於 10 時，由 EMEP 計算的堤後方向頻譜。需注意的是，方向頻譜裡方向座標軸的 0 和 2 (0° 和 360°) 是同相的，因此，所表現的圖形雖然是展開的，但在方向域所代表的意義卻是連續循環的。由計算的結果發現每張圖裡皆有三個峰值，大約於無因次座標軸的 0、1 和 2 處 (0° 、 180° 和 360°)，但實際上，在 0

和 $2(0^\circ$ 和 $360^\circ)$ 附近處的這兩個峰值是應該是同一個。所以，方向軸裡應只剩下兩個峰值，分別出現於 1.13 和 1.87 處，換言之，繞射的波浪行進主方向與離岸堤成 23.4° 的夾角以對稱的方式由堤尾兩側繞射於堤後。在造波的 S_{\max} 等於 25 和 50 時，堤後方向頻譜的峰值出現位置也皆為相同，由此可知波場的方向性並不會影響波浪繞射後的行進主方向。

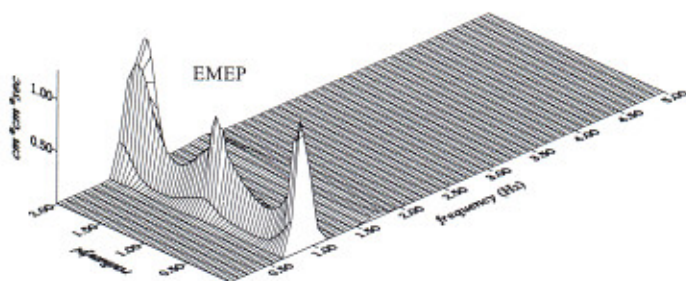


圖 7 $S_{\max} = 10$ 測站 7 之方向頻譜(定性試驗)

Briggs 等人(1995)提到，在考量多方向波場堤後的繞數能量時，波場的方向性比週期對結果的影響大。本研究的遮蔽係數 KD 為堤後的測站 7 在設置離岸堤後和未設離岸堤時，所量測得的示性波高比(式 14)，其示性波高和週期的計算方式是以該測站四根波高計所量測的平均值做為代表。 KD 值愈大，代表入射波浪繞射至後方的能量愈大，離岸堤阻隔入射波能量的效能愈低。圖 8 為 KD 值、標準偏差與波場方向性之關係。圖中較大的符號為該 S_{\max} 實驗條件下， KD 的平均值。由多方向波的實驗結果發現，隨著 S_{\max} 增加， KD 值則明顯的下降，也就是當波場愈趨近於長峰波時，入射波繞射至堤後的能量也愈小。由圖上的標準偏差來看，隨著入射波的 S_{\max} 增加而變大，尤其以單方向不規則波實驗的結果分佈最為明顯。另外，以圖上多方向不規則波實驗的 KD 值與 S_{\max} 的關係回歸出離岸堤興建前後示性波高變化比例與波浪方向性的關係(式 15)，可以提供後續比較參考。然而，由前述已知，隨著波場的 S_{\max} 增加，標準偏差也就越大，因此，式 15 的適用範圍應界定在 S_{\max} 小於 50 下使用。

$$KD = \frac{H_{1/3, \text{ with breakwater}}}{H_{1/3, \text{ without breakwater}}} \quad (14)$$

$$KD = -0.0019 \cdot S_{\max} + 0.5432 \quad (15)$$

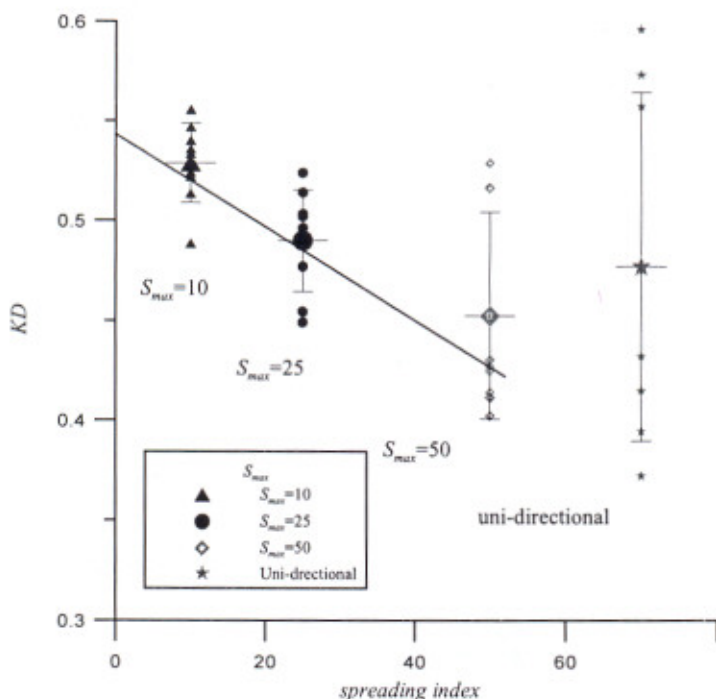


圖 8 KD 值與波浪方向性之關係圖(定性試驗)

4.2 八斗子漁港實驗

接續是以定性實驗結果所回歸的式 12 和式 15(其中式 12 的係數 α 與 β 分別以前述的平均值代入)，分別代入八斗子的實驗條件，比較推估與實測值間的差異程度，驗證本研究所推估堤前和堤後波場能量分佈回歸式的可靠性。

圖 9 為向堤波行進主方向 270° ，垂直入射於堤體時，測站 B 的堤前離堤和向堤波能量比值均方根的實測與推估值比較圖。其中，推估值(式 12)以實線代表，實測值則以符號表示。由結果來看，實測值大致分佈於推估值曲線附近，證明本研究所推估堤前 D/L 與離堤和向堤波能量比值均方根間關係式的實用性。

圖 10 是向堤波行進主方向為 292.5° 時，離岸堤前離堤和向堤波能量比值均方根的實測與推估值比較圖。然而，本圖裡實驗的向堤波行進主方向皆屬於斜向入射堤體，而式 12 的回歸式是以向堤波垂直入射堤體實驗的計算結果，為了進一步修正，減低誤差，本研究採用 Dickson 等人(1995)提出分離向堤與離堤波能量的作法，將斜向入射於堤體的波浪能量轉換為垂直入射的分量，因此，將式 12 修正為：

$$\sqrt{\frac{m_{0,seaward}}{m_{0,shoreward}}} = 0.8427 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^{-0.3409} \cdot \cos(\Theta) \quad (16)$$

其中 Θ 為向堤波行進主方向與堤體法線的夾角。

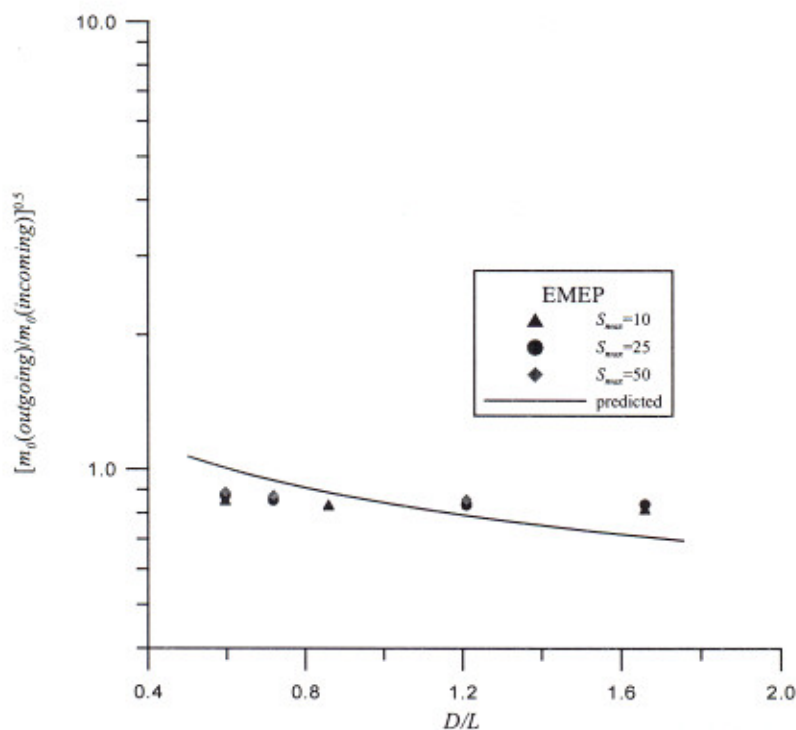


圖 9 離岸堤前離堤和向堤波能量比值均方根實測值與推估值比較圖(向堤波主波向 270° , 八斗子試驗)

綜合言之，當向堤波行進主方向為 270° ，垂直入射於堤體時，利用定性實驗所回歸堤前離堤和向堤波能量比值均方根與 D/L 的關係式套配於八斗子漁港的離岸堤實驗結果時，所有的推估與實測值之間的平均相對誤差約為 0.10；另外，當向堤波行進主方向為 292.5° ，斜向入射於堤體，平均相對誤差約則為 0.05。由於在定性實驗裡，當波浪垂直入射於堤體時，堤前的相位鎖定現象較為明顯，所計算的方向頻譜在方向域裡發生發散的情形，以致計算的堤前離堤和向堤波能量比值的均方根在波長較長的實驗裡都有高估的現象。

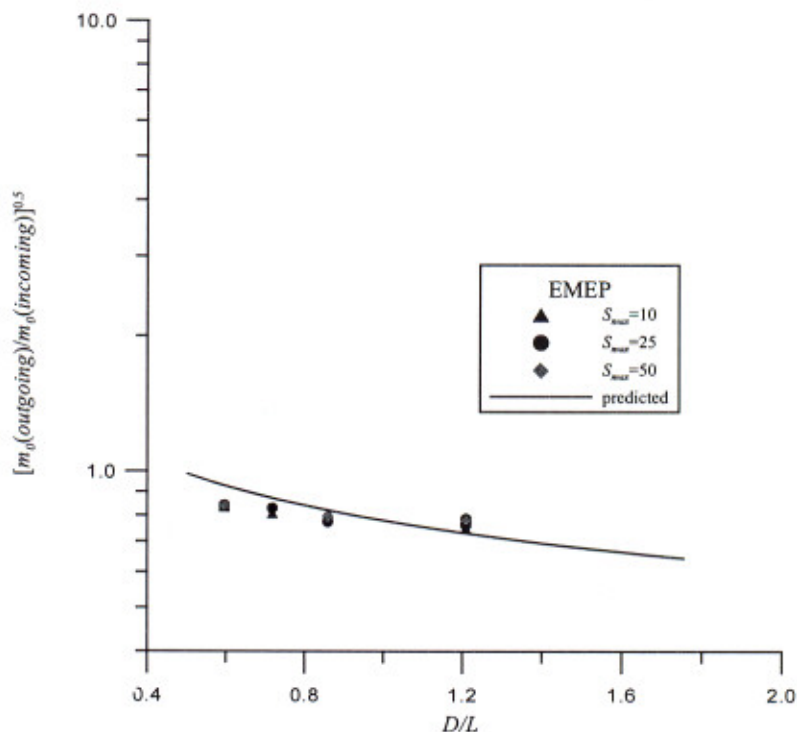


圖 10 離岸堤前離堤和向堤波能量比值均方根實測值與推估值比較圖(離堤波主波向 292.5° ，八斗子試驗)

圖 11 是測站 C、入射波為多方向不規則波、行進主方向 270° 時的 KD 值。 KD 值是由式 14 所計算，而測站 3 設置於堤體正後方，介於離岸堤和八斗子漁港出海口之間，其中心點距離堤體後方垂直壁 1 公尺。圖中的虛線是實驗的 KD 值與 S_{max} 之間關係的回歸結果(式 17)，實線則是前述定性實驗的回歸結果(式 15)。由兩條回歸線幾乎為平行線的趨勢來看， KD 值皆隨著 S_{max} 增加而降低。因此，不論有無設置其它地形地物，當波場愈趨近於長峰波時，入射波繞射至堤後的能量也愈小。另外，八斗子漁港離岸堤實驗的 KD 值很明顯的比定性實驗結果大，這是因為在定性實驗裡，堤後並無設置任何結構物，所以，堤後遮蔽處的波浪除了繞射和斜向入射波外，並無其它的波浪能量；反觀八斗子漁港實驗，堤後遮蔽處除了繞射和斜向入射波外，還包含了由離岸堤後方八斗子漁港防波堤所造成的反射波，所以堤後的相對波高則比定性實驗時高， KD 值也就較大。

$$KD = -0.0018 \cdot S_{max} + 0.5917 \quad (17)$$

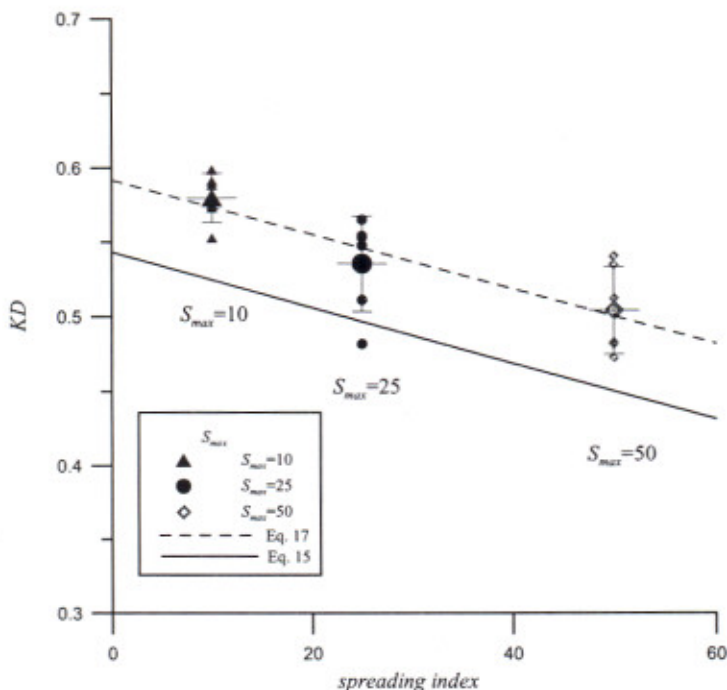


圖 11 KD 值與波浪方向性之關係圖(八斗子試驗)

五、結論

本研究主要是討論離岸堤周圍方向性波場的能量分佈特性。對於多方向不規則波來說，測站距離堤體於四倍波長以內的範圍內， S_{max} 的值愈小，離堤和向堤波能量比值的均方根下降的速率也愈快。在大於四倍波場距離的範圍，離堤和向堤波能量比值的均方根則逐漸趨近於定值。對於單方向不規則波而言，堤前離堤波的能量並不會在方向域裡消散，所以其比值均方根皆分佈於 1.0 附近。

本研究以 D/L 和 EMEP 計算的離堤和向堤波能量比值均方根的多方向波實驗結果回歸關係式。藉由此關係式，可以推估直立壁沈箱式的離岸堤，在八倍波長範圍以內的堤前離堤和向堤波能量比值均方根，以推估離岸堤興建後，堤前波場能量的傳輸機制。應用在八斗子漁港離岸堤實驗時，推估值與實際量測計算值之間的平均相對誤差皆小於 0.10，證實本研究提出關係式的適用性。而其中誤差發生的原因為在進行定性實驗時，並未鋪設地形，實驗水深保持一致，而八斗子漁港實驗裡，則因鋪設地形使得水深隨著測站位置不同而改變。由於回歸式並未將水深列入考慮，使得波浪能量在經過地形時的淺化、能量消散和折射機制都未代入考量。因此，建議未來再進行相關的實驗時，可利用緩坡度的地形進行定性實驗，將水深的參數加入回歸式中一併計

算，可以使得回歸式的適用度更加提高。

就堤後的遮蔽係數 KD 實驗結果而言，對於多方向波場來說， S_{\max} 值愈大，其 KD 值則愈小。本研究以定性實驗的結果回歸出 KD 與 S_{\max} 值的關係式，並與八斗子漁港實驗的結果相互比較，發現兩個實驗的回歸結果呈現平行的直線，而八斗子漁港離岸堤實驗的回歸值皆比定性實驗結果大，這是因對於八斗子漁港實驗來說，堤後遮蔽處除了繞射和斜向入射波外，還包含了原本由八斗子漁港防波堤所造成的反射波，所以堤後的相對波高則要比定性實驗時要高，造成 KD 值也較大。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「多方向波場中離岸堤前反射率之研究」（編號 NSC 90-2611-019-002）和「利用高感度遙測系統 CCD 進行實驗水槽波浪觀測」（編號 NSC-90-2611-E-019-001）之研究成果，承蒙國科會經費之贊助使本研究得以順利完成，謹至感謝之意。

參考文獻

1. 台灣漁業技術顧問社 (1997) 「八斗子漁港東外廓防波堤(離岸堤)工程設計工作服務建議書」，台灣省漁業局，第1-4頁。
2. Briggs, M. J., Thompson, E. F., and Vincent, C. L. (1995) "Wave diffraction around breakwater," *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 121, pp. 23-35.
3. Chadwick, A. J., Pope, D. J., Borges, J., and Ilic, S. (1995) "Shoreline directional wave spectra part 1: an investigation of spectral and directional analysis techniques," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, Maritime and Energy*, Vol. 112, pp. 198-209.
4. Dickson, W. S., Herbers, T. H. C., and Thornton, E. B. (1995) "Wave reflection from breakwater," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 121, pp. 262-268.
5. Elgar, S., Herbers, T. H. C., and Guza, R. T. (1994) "Reflection of ocean surface gravity waves from a natural beach," *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 24, pp. 1503-1510.
6. Frigaard, P., Helm-Petersen, J., Klopman, G., Stansberg, C. T., and Benoit, M. (1997) "IAHR list of sea state parameters," *Proceedings of the 27th IAHR Congress, Seminar: Multi-Directional Waves and Their Interaction with Structures*, pp. 15-19.
7. Funke, E. R., and Mansard, E. P. D. (1992) "On the testing of models in multi-directional seas," *Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering*, Capetown, ASCE, pp. 3454-3467.

8. Goda, Y. (2000) *Random Seas and Design of Maritime Structures*, World Scientific, Singapore, pp. 12-43.
 9. Hashimoto, N., Kobune, K., and Kameyama, Y. (1987) "Estimation of directional spectrum using the bayesian approach, and its application to field data analysis," *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 26, pp. 57-100.
 10. Hashimoto, N., Nagai, T., Asai, T., and Sugahara, K. (1993) "Extension of the maximum entropy principle method for estimating directional ocean wave spectrum," *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 32, No. 1, pp. 3-25 (In Japanese).
 11. Hiraishi, T., and Kanazawa (1995) "Effective test area of multi-face wave generator," *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 34, No. 2, pp. 3-37.
 12. Mory, M., and Hamm, L. (1997) "Wave height, setup and currents around breakwater submitted to regular or random wave forcing," *Coastal Engineering*, Vol. 31, pp. 77-96.
-

2003年 3月 4日 收稿

2003年 4月 22日 修改

2003年 5月 6日 接受