

## 離岸堤對波場方向性的影響

尹 彰<sup>1</sup> 黃偉柏<sup>2</sup> 周宗仁<sup>3</sup>

關鍵詞：方向頻譜、散佈函數。

### 摘 要

本研究利用多方向蛇形造波機進行了單方向和多方向不規則波的水工模型實驗，以最大似然估計法 (maximum likelihood method) 估算出來的方向頻譜，探討實體模型兩種離岸堤設計和離岸堤設置前後整個波場的變化。另外，本文以方向頻譜，分離出入射波和反射波的能量並與前人的兩點法所計算的堤前反射率比較，發現兩者結果相當吻合，確立以方向頻譜計算反射率的適用性。分析結果顯示，斜向入射的反射率較正向入射反射率小且反射率隨著頻率變動。最後，就波場的方向性變化、能量分佈的特性、和離岸堤前的反射係數等提出離岸堤的較佳擺設位置。

## EFFECTS OF DETACHED BREAKWATER ON THE DIRECTIONALITY OF A WAVE FIELD

John Z. Yim      Wei-Po Huang      Chung-Ren Chou

*Department of Harbour and River Engineering  
National Taiwan Ocean University  
Keelung, Taiwan 20224, R.O.C.*

*Key Words:* directional spectrum, spreading function.

### ABSTRACT

Experiments with uni- and multi-directional wave fields are carried out to investigate the characteristics of the wave fields around a detached breakwater in a directional wave basin. The method of maximum likelihood method is used to estimate the directional spectrum. The calculated directional spectra is separated into two parts, referred as incident and reflected waves, the reflection coefficients of the breakwater then can be obtained from the ratio of the energy of these two parts. The present results agree well with those from two-points method proposed by previous study. The results revealed that the reflection coefficients are varied with the wave frequency. It is also found that the reflection coefficients for the oblique incident waves are smaller than those of the normal incident waves. Using information concerning wave directionality, the distribution of wave energy, and the reflection coefficients of the breakwater, an optimal layout of the breakwater is then proposed.

### 一、前 言

海面上的波動是水面受到各種干擾源作用，經過傳遞組合後，成為紛紜雜亂的狀態。早期學者企圖利用統計方

<sup>1</sup> 國立台灣海洋大學河海工程學系副教授

<sup>2</sup> 國立台灣海洋大學河海工程學系博士班研究生

<sup>3</sup> 國立台灣海洋大學河海工程學系教授

法以較具體的參數來描述波動現象。後來學者引進電子學中頻譜的觀念，將海面上不規則波浪視為由不同週期、振幅和相位的正弦波所組成。經過傅利葉轉換後，可以從頻率域內得知各個週期成份波所佔的比例。

然而，實際的海面上並不是每條波峰線都成直線且相互平行，由此可以得知波場裡的波浪不只含有週期的訊號，同時也具有方向性。因此，如果將二維的頻率譜加入一個描述方向的參數；也就是將波場的能量以三維（頻率、波向、能量）的方向頻譜來表示，可以得到比較完整的資訊。

一般來說，波浪經過地形和結構物的影響後，會因為折射、繞射和反射等作用而改變它們的各種特性，因而使得波場變得更加複雜。因此如果要合理地計算出波場波動特性變化、結構物所受的力、或所產生的振動，或是漂沙活動等，都需將波場裡能量分佈的方向特性加入考量。方向頻譜的估算則提供了解決上述問題的一個良好途徑。近二、三十年來各國學者對於方向頻譜的研究不遺餘力，獲得相當不錯的成果。

傳統進行水工模型試驗時，是在斷面水槽利用單方向的長峰 (long-crested) 規則或不規則波的波場進行。通常隨機波的部份則是以波高、週期為變數進行二維 (2-D) 造波。大致上來說，這樣的實驗方式，也可以得到不錯的結果。不過，隨著科技的進步，高速電腦發展日趨成熟，多方向造波機隨著問世。實驗室已經可進一步的模擬出與實際海面相似的短峰波 (short-crested) 波場，因而使實驗結果與實際現象更相符。所謂的短峰波波場，就是以波高、週期和方向為變數呈現三維 (3-D) 的隨機波波場。1992 年 Funke 和 Mansard 兩人 [1] 整理了一系列的二維和三維造波波場的數值模擬和實驗結果。經比較後他們發現，不管是針對結構物的運動和受力，或是波場波浪的定性分析，兩者之間的差異最大可達 50%。他們指出，在設計海工結構物時，如果以二維波場水工實驗的結果做為依據，往往大部份設計都會超過實際所需的安全係數，以致形成不必要的浪費。他認為以三維波場進行實驗的話，可以得到較符合實際海象的結果。

Mathieu 和 Hamm [2] 於 1997 年在實驗室內利用 3-D 造波水槽造波。他們比較了在單方向規則、不規則波和多方向不規則波作用下離岸堤周圍波場的改變，並與各種數值模式做比對。他們發現，如果是多方向不規則波波場的話，離岸堤的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則並不明顯。旋流會引起較不穩定的流場，所以該區域的等波高線與單方向規則和不規則波的結果比較起來顯得相當的紊亂。另外，在多方向不規則波的波場，堤後遮蔽處的波高也會比單方向波場的量測結果來得大。在比較了多方向波場下數值模擬結果與實驗的數據後，他們發現兩者之間有相當大的差異。

反射係數是評估防波結構物設計優劣的指標之一。Goda 和 Suzuki [3] 以數值模擬和斷面水槽實驗中堤前兩個測點的自由水面變化記錄，經由運算後分離入射波和反射波能量。此模式是假設入射波和反射波為單方向的長峰波且行進方向相差 180°。然而，在實際應用於現場的短峰波波場的量測時則需要進行某部份的修正。Yokoki、Isobe [4]

和 Kondo [5] 等人則是利用方向頻譜可以在方向域裡辨識波浪能量分佈情形的特性，分離入射波和反射波的能量；理論上來說，本方法比較適合直接應用於在現場多方向不規則波波場的量測與計算。

為了瞭解結構物和地形對波場特性的影響，本文利用平面造波水槽 (50m × 50m × 1m)，進行了一系列以實體模型為對象的有關折射、繞射和反射等的單方向不規則與多方向不規則波的實驗。本文以基隆八斗子漁港興建離岸堤的兩種設計為實例，探討波場在離岸堤興建前後的各種特性變化和離岸堤的反射率。

本文共分為四節：第二節簡單地敘述一些相關的理論基礎；第三節介紹所使用的儀器、設備和實驗條件；第四節將實驗結果比較討論；最後一節則為結論。

## 二、理論基礎

一般來說，關於波浪的實測資料大部份都是將在單一一個量測點所量測到波浪特性如波動、流速和波壓等變化以時間序列的形式記錄下來，然後在時間領域，或是頻率領域裡進行分析。但是在計算波浪的方向性時，則需要將多個測點同時量測到的時間序列經過傅利葉轉換後，在頻率域裡以這些測點之間的相位差關係來估算。由於上述原因，有關方向頻譜的實測資料並不多。另外，描述海面上波場能量分佈情形的散佈函數標準式，至今也尚未有定論。

大致上來說，量測波浪方向的方式，常用的可分成三種 (1) 遙測照相；(2) 浮球；(3) 陣列等。本研究是以波高計陣列量測，藉由以下的步驟，計算出散佈函數和方向頻譜。

水面變化記錄  $\eta_n$ ，在時間 0 至  $T$  時內以  $\Delta t$  的取樣間隔擷取資料，可以得到離散序列  $\{\eta_n\}$ ， $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  為擷取資料之總個數。把這些序列做離散傅利葉轉換 (discrete Fourier transform, DFT) 得到：

$$F_{\eta}(f_n) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i2\pi n f / N} \quad (1)$$

頻譜  $s(f)$  則以下式表示：

$$s(f) = \frac{1}{N \Delta t} \left[ \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i2\pi n f / N} \right]^2 \quad (2)$$

目前大部份分析方向頻譜的方法是利用交譜 (cross spectrum)，經由不同的數學運算方式，分析估算波浪的方向性。以波高計陣列來說，是利用波高計之間的交譜，計算波浪的相位變化，估算波浪的行進方向。

如果以位置向量  $\vec{x}_1$  及  $\vec{x}_2$  來表示波高計陣列中的分別位於座標  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  兩點的兩根波高計的話，那麼對它們所量測到的波面記錄  $\eta_{n1}$  和  $\eta_{n2}$  進行離散傅利葉變換就可以得到  $F_{\eta_1}(\vec{x}_1, f_n)$  和  $F_{\eta_2}(\vec{x}_2, f_n)$ 。根據定義，兩測點的交譜  $s_{x_1, x_2}$  可以表示為：

$$s_{x_1 x_2}(\bar{\mathbf{x}}_{\eta_1 \eta_2}, f_n) = E[F_{\eta_1}^*(\bar{\mathbf{x}}_1, f_n) F_{\eta_2}(\bar{\mathbf{x}}_2, f_n)] \\ = c_{\eta_1 \eta_2}(\bar{\mathbf{x}}_{\eta_1 \eta_2}, f_n) - i q_{\eta_1 \eta_2}(\bar{\mathbf{x}}_{\eta_1 \eta_2}, f_n) \quad (3)$$

其中  $\bar{\mathbf{x}}_{\eta_1 \eta_2}$  表示兩波高計的位置向量關係， $\bar{\mathbf{x}}_{\eta_1 \eta_2} = \bar{\mathbf{x}}_2 - \bar{\mathbf{x}}_1 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$ 。另外， $F^*$  表示複數的共軛函數， $E[\ ]$  表示期望值。

函數  $c_{\eta_1 \eta_2}$  和  $q_{\eta_1 \eta_2}$  分別稱為同相譜與正交譜 (co-spectrum 和 quadrature-spectrum)。根據 Borgman [6] 指出，它們與方向頻譜  $s(f, \theta)$  之間的關係是：

$$c_{\eta_1 \eta_2} - i q_{\eta_1 \eta_2} = \int_{-\pi}^{\pi} s(f, \theta) \exp\{-i\bar{\mathbf{k}} \cdot (\bar{\mathbf{x}}_2 - \bar{\mathbf{x}}_1)\} d\theta \\ = \int_{-\pi}^{\pi} s(f, \theta) \cos\{\bar{\mathbf{k}} \cdot (\bar{\mathbf{x}}_2 - \bar{\mathbf{x}}_1)\} d\theta \\ - i \int_{-\pi}^{\pi} s(f, \theta) \sin\{\bar{\mathbf{k}} \cdot (\bar{\mathbf{x}}_2 - \bar{\mathbf{x}}_1)\} d\theta \quad (4)$$

其中， $\bar{\mathbf{k}}$  為波數向量。

一般是以方向頻譜  $s(f, \theta)$  來表示波場裡能量在頻率和方向上的分佈情形，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：

$$s(f, \theta) = s(f) \cdot G(f, \theta) \quad (5)$$

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：

$$\int_0^{2\pi} G(f, \theta) d\theta = 1 \quad (6)$$

在計算散佈函數時，Borgman [6] 採用波高計陣列擷取波面記錄並以傅利葉級數展開法 (discrete Fourier expansion, DFE) 估算波場裡的方向散佈函數。針對每一分頻  $f$  來說，方向散佈函數  $G(f, \theta)$  的傅利葉級數展開式可表式(7)：

$$G(f, \theta) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (7)$$

其中  $a_n$ 、 $b_n$  為傅利葉級數解。

另外，最大似然估計法是利用機率理論裡推導套配模式參數的一種方法 (Nwogu [7])。換言之，就是在估計方向散佈函數時，可以把交譜對估算結果在加權後的總和影響減到最小。Ilic 等人 [8] 提到最大似然估計法適合解析非線性紛紜波場中的方向性。他們指出由於最大似然估計法把波高計間的交譜對散佈函數結果的影響減低，所以當波高計陣列中任一波高計受到不確定因素的影響時，最大似然估計法的計算結果仍然相當可信。最大似然估計法的公式[7]可表示為：

$$G(f, \theta) = \frac{\alpha_0}{\{\gamma\}^* [P]^{-1} \{\gamma\}} \quad (8)$$

其中  $\alpha_0$  為滿足式(7)的無因次參數， $\{\gamma\}$  是加權函數矩陣。

$$\{\gamma\} = \begin{bmatrix} \exp\{i\bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_1\} \\ \exp\{i\bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_2\} \\ \vdots \\ \exp\{i\bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_N\} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$[P]$  是無因次交譜所構成之矩陣

$$[P] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中  $S_{jk}$  是無因次的交譜：

$$S_{jk} = \frac{S_{jk}}{\sqrt{S_{jj} S_{kk}}} \quad (11)$$

Brissette [9] 於 1992 年提到在計算方向頻譜時，所使用的解析方法、波高計陣列擺設的幾何形狀和波高計數目對計算的結果都會有相當大的影響。在決定以何種方法量測解析時，不論是利用實驗室水槽或是現場量測的數據進行測試比對皆不適宜，因為這些數據中都可能有不確定的雜訊因素干擾，會造成判斷錯誤的結果。他建議以理論的交譜，加上固定成份的雜訊 (white noise)，在控制各種變因的情況下，經計算後再來決定的方式較佳。本研究採用 Borgman [6] 所提出的方法，將波高計陣列中各測點，給定理論的交譜進行計算，將估算的散佈函數再與原來的目標值比對，可以瞭解波高計陣列的擺設方式和計算方法的誤差率 (參考式(22))。

波場會因結構物產生波浪反射和繞射的現象。本研究先以單方向不規則長峰波波場進行實驗，以 Goda 等人 [3] 所提出的兩點法和利用方向頻譜，以提前星形波高計陣列中測點的量測紀錄來計算反射率  $K_r$  值與分離入射波和反射波能量，經比較評估後以證明方向頻譜分離能量方法的適用性。並將結果應用到多方向不規則短峰波波場的計算。Frigaard 等人 [10] 指出，假設 Snell's law 成立的話可以把方向頻譜與反射率之間的關係寫成：

$$K_r(f, \theta) = \sqrt{\frac{s_r(f, \theta_r)}{s_i(f, \theta_i)}} \quad (12)$$

其中下標  $r$  表示反射波， $i$  表示入射波。Elgar [11] 等人直接利用方向頻譜將入射  $E_R(f)$  和反射  $E_I(f)$  的能量在方向域裡做分離。定義為：

$$E_R(f) = \int_{180^\circ}^{360^\circ} s(f, \theta) d\theta \quad (13)$$

$$E_I(f) = \int_0^{180^\circ} s(f, \theta) d\theta \quad (14)$$

本文分別以入射波與反射波的總能量和對方向域積分(參考式(15))的兩種反射率進行分析討論。反射率定義為

$$Kr(f) = \sqrt{E_R(f)/E_I(f)} \quad (15)$$

### 三、實驗設備和條件

#### 3.1 八斗子漁港

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，碼頭最大水深為-10m。本港分為兩大船區，第一船區穩靜度已達颱風期間安全避風停泊之要求，唯第二船區受防波堤配置及內堤反射等因素影響，使得港區穩靜未能合乎要求。有關單位計劃在八斗子漁港東防波堤外側水深-25m~-35m處建造離岸堤。本港受東北季風影響，主要波向為NE~NNE向；颱風波浪示性波高約為7.5m；離岸堤設計長度為150m [12]；本研究的水工模型試驗縮尺是1/81。換算為實驗條件時，實驗水深60cm、示性波高9cm、堤長185分、主波向分別為90°和112.5°。

#### 3.2 實驗設備

本研究是在台灣海洋大學的海洋工程綜合實驗館的平面水槽中進行，使用到的相關設備簡述如下：

1. 實驗水槽：水槽長、寬各50m，深1m。水池底部及側壁為鋼筋混凝土結構。
2. 造波機：實驗館內現有造波機機組由七部日本本田工業株式會社 (Honda Engineering Co. Ltd.) 出廠的多方向不規則造波機所組成。每部造波機控制八片造波板，每塊造波板寬50cm，而造波板總長為28m。可造出任一方向 ( $0 \leq \theta_0 \leq \pi$ ,  $\theta_0$ 是造波主方向)、不同週期 ( $0.5\text{sec} \leq T_{1/3} \leq 5\text{sec}$ ) 之規則波與不規則波波列。

#### 3.3 實驗條件

目標頻率譜 JONSWAP 頻譜是北海聯合觀測 (Joint North Sea Wave Project) 所得資料，選擇 JONSWAP 頻譜為目標頻譜原因有二：

1. 藉由調整尖峰集中度係數  $\gamma$  值，可調整波場的波浪為完全成熟發展 (fully-development) 或是風域成長中的波浪。由於其適用性較廣，在往後進一步實驗討論時，較為方便進行比較。
2. 相較於其他頻譜，JONSWAP 頻譜在主頻處的能量較其他頻譜顯著，在定性分析時，較易尋找出波場變化的特性。其形式整理如下 [13]：

$$s(f) = \alpha(2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right] \gamma^{\exp[-(f/f_p-1)^2/2\sigma^2]} \quad (16)$$

$f_p$ ：波譜密度值最大時的頻率，稱為尖峰頻率 (peak frequency)

$$f_p = 1/1.05T_{1/3} \quad (17)$$

$$\alpha = 0.081$$

$\gamma$ ：尖峰集中度係數 (peak enhancement factor),  $\gamma = 1 \sim 7$ , 平均值 = 3.3。在實驗室造波時是用平均值 3.3。

$\sigma$ ：代表譜峰的寬度

$$\sigma = 0.07: f \leq f_p$$

$$= 0.09: f > f_p \quad (18)$$

本實驗室的多方向造波機造波程式中的方向散佈函數。其形式為：

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right) \quad (19)$$

其中  $\theta_0$  是依波浪的主方向以造波機為軸向逆時針方向所求的夾角。

$$G_0 = \left[ \int_{-\pi}^{\pi} \cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right) d\theta \right]^{-1} \quad (20)$$

參數  $s$  代表方向頻譜中每一個分頻在波浪行進主方向能量的集中度。Goda [13] 為了工程應用的方便性將參數  $s$  修正為式(21)：

$$s = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f \geq f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \end{cases} \quad (21)$$

其中  $S_{\max}$  為散佈參數  $s$  的尖峰值。 $S_{\max}$  值愈大，表示波場的能量愈集中在波浪行進的主方向，波浪愈趨近於長峰波的形式；值愈小代表波場的能量愈發散，幾乎每個方向都有波場能量的分佈。Goda [13] 提到  $S_{\max} = 10$  時，代表風域中成長的波場，由於受到風場裡的紊流及碎波的影響，波場裡各種頻率和方向的波都可能存在，因此能量比較分散； $S_{\max} = 75$  則代表遠離風域，已呈湧浪形式的波場。

本研究是利用星形波高計陣列 (參考圖 1) 來量測波面變化記錄，以計算方向頻譜。星形波高計陣列一組需要四根波高計。本實驗總共設置四組。星形陣列的尺度是決定方向頻譜計算正確與否的重要因素之一。Paniker [14] 提及波高計之間距離需小於欲解析波長的 1/2，才可得到較佳解析解。陣列中各個波高計間距離較小，則可量測較小的波長；相反地，陣列中各個波高計間的距離如較大，比較適合解析出較大的波長，但是求得的散佈值可能會受到波長較短的波影響，而使方向頻譜顯得不合理。

波高計陣列擺設位置如圖 2，在第一、二、三測站，波高計間最小距離是 15cm，第四測站為 10cm。距離造波板分別為 3.2、8.4、11.4 和 13.9m，水深分別為 60、47.5、36.5 和 29cm。取樣頻率 50Hz，一次取樣 6144 組數據，分割成六段分進行傅利葉轉換，計算頻譜和交譜。Chadwick

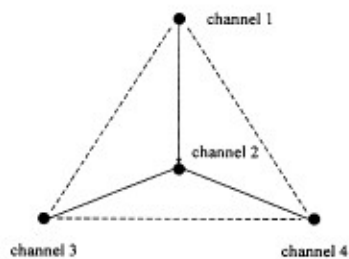


圖 1 星形波高計陣列示意圖

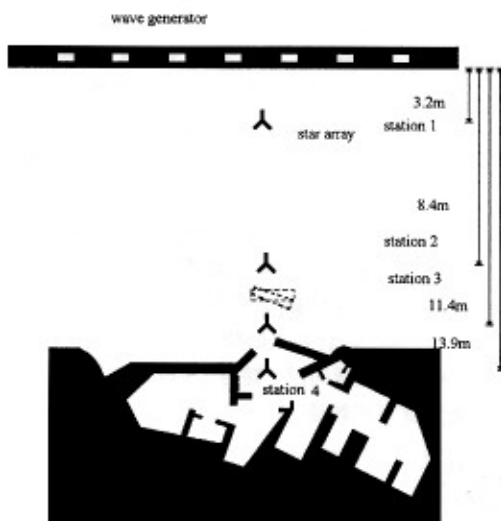


圖 2 實驗佈置圖

等人 [15] 在計算方向頻譜時發現能量洩漏 (spectral leakage) 會造成結果出現異常的峰值。因此建議數據在時間域需扣除平均值和趨勢；在頻率域需以數學視窗平滑增加計算結果的自由度。本研究數據參考其步驟分別在時間域移動平均和在頻率以漢寧視窗 (Hanning Window) 平滑處理。

本研究離岸堤攔設方式共三種，分別是無設置離岸堤時的現狀、離岸堤呈東南-西北走向平行於造波板、和離岸堤呈東南東-西北西走向與造波板成  $22.5^\circ$ 。造波板法線在現場為東北向。為方便起見，在本文後面分別以 Case 1、2、3 表示這三種實驗情形。造波條件如表 1。

表 1 造波條件

目標頻譜	JONSWAP
主頻 (Hz)	0.7, 0.9, 1.1
示性波高 $H_{1/3}$ (cm)	9
示性週期 $T_{1/3}$ (sec)	1.51, 1.15, 0.93
波浪入射方向	$90^\circ$ (NE), $112.5^\circ$ (NNE)
散佈參數 $S_{max}$	10, 25, 50 和單方向不規則波

## 四、結果與討論

### 4.1 數值計算

利用理論的交譜，代入各解析方法計算，並與目標值

比對，可以瞭解解析方法和波高計陣列設計的適用性。圖 3 分別是當目標頻譜是 JONSWAP、主頻  $0.9\text{Hz}$ 、散佈參數  $S_{max} = 50$ 、波浪入射角  $\theta_0$  是  $112.5^\circ$  時，以星形波高計陣列中波高計間的理論交譜所估算的方向散佈函數與目標值互相比較的結果。從圖裡可以看出來，最大似然法所估計出來的結果與目標值非常接近。而利用傅利葉級數展開法所估算的方向散佈函數，能量則顯得比較發散。這是由於傅利葉級數展開法受限制於波高計陣列裡波高計的數目，僅能計算出有限項的傅利葉級數，所以用來表示方向散佈函數時會有失真的情形發生。但是整體上來說，兩種方法皆能正確地估算出波浪行進的主方向。歸納上述結果，決定以最大似然法做為分析方向頻譜的模式，減少計算結果的誤差。

為了檢查在所有的實驗條件裡，用最大似然估計法估算時理論上所可能產生的誤差，Young [16] 利用誤差的大小來檢定目標散佈函數在主頻上的理論值與估算結果之間的差異。誤差， $\epsilon$ ，的定義如下：

$$\epsilon(f_{\text{peak}}) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\hat{s}(f_{\text{peak}}, \theta_i) - s(f_{\text{peak}}, \theta_i)]^2} \quad (22)$$

其中，散佈函數具上標  $\hat{s}$  表示以最大似然法的估算結果，未具上標者表示理論目標值。結果列於表 2。

Young 等人 [16] 認為檢定值如果大於 0.01 的話就表示套配度則不佳。從表 2 檢定值皆小於 0.01，可以確定以星形波高計陣列量測和利用最大似然法估算方向頻譜的可行性。

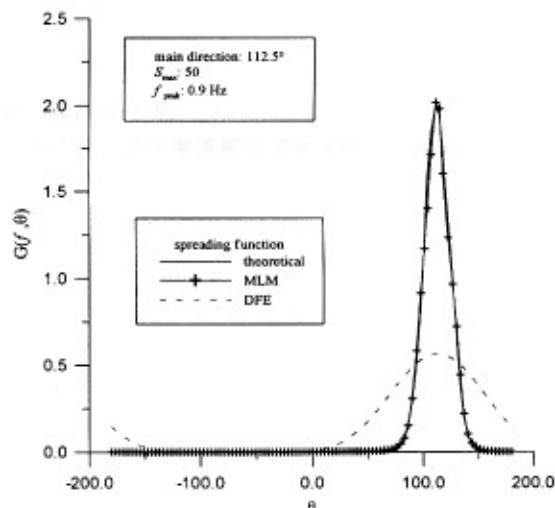


圖 3 理論方向散佈函數比較圖

表 2 數值計算誤差結果

波浪行進主方向	散佈函數尖峰值 $S_{max}$	主頻		
		0.7Hz	0.9Hz	1.1Hz
$90^\circ$	10	0.004995	0.004969	0.004709
	25	0.005914	0.005803	0.005680
	50	0.005821	0.006668	0.006642
$112.5^\circ$	10	0.003811	0.003796	0.003830
	25	0.003165	0.003252	0.003220
	50	0.003079	0.003138	0.003203

## 4.2 實驗結果

一般來說，外海波浪經過地形產生折射作用後，加上港口的開口處對入射波浪能量的方向分佈產生濾波作用，使得入射至港內的波浪能量的方向分佈比外海集中。圖 4 和圖 5 分別是主頻 1.1Hz、波浪行進主方向 112.5°、多方向與單方向不規則波在無離岸堤擺設時，港內測站所量測得的方向頻譜。多方向不規則波所用的散佈參數  $S_{max} = 10$ 。圖中的無因次方向軸座標為強度除以  $\pi$ ，以造波機為 x 軸，波浪行進方向向前為正，反之為負。比較圖 4 與圖 5 可以發現，在港池內測得的尖峰能量，多方向不規則波的實驗結果小於單方向不規則波。另外圖 5 中的方向頻譜入射條件雖然為單方向入射波，但是其在方向軸上，能量仍有發散的現象，推究其中可能的原因有二：

1. 外海入射波經過地形以及港外廓的堤防，折射、繞射、散射以及碎波的現象皆可能會發生，造成能量在方向域發散。
2. 由解析方法造成的。利用最大似然估計法計算方向頻譜時，計算每根波高計間的交錯時需在頻率域經過漢寧視窗平滑步驟，以增加自由度和防止能量洩漏造成的異常峰值。所以，在平滑處理後，峰值會下降，使能量分散到方向域上，但能量總和並不會改變。

為了解多方向和單方向不規則波入射至港內波浪的能量之間的差異，圖 6 是在無離岸堤佈置 (case 1) 入射波主波向分別為 90° 和 112.5° 時，港內測站 (第四測站) 除入射波測站 (第一測站) 零次矩譜總能量(式(23))的比值。從圖上可以發現，不管入射波的主波向為何，當入射波愈趨近於長峰波時，比值愈大。這也就是說，在相同的造波條件下，單方向不規則波波場入射至港內所造成的能量要比多方向不規則波的結果大。這是由於對同樣能量的波場來說，單方向不規則波的能量都集中在一個方向，而多方向不規則波波場裡的能量則是分散在各個方向上的，

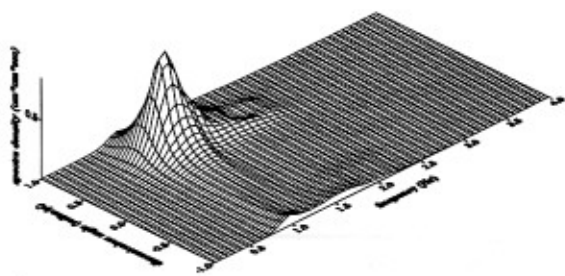


圖 4 多方向不規則波波場港內方向頻譜圖

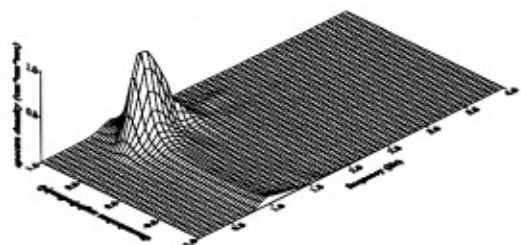


圖 5 單方向不規則波波場港內頻譜圖

在波浪能量通過堤口入射至港口內時，波浪愈趨近於長峰波的條件，波浪入射至港內的機率也就愈大。

$$m_0 = \iint s(f, \theta) df d\theta \quad (23)$$

圖 7 是在主頻 0.9Hz、 $S_{max} = 25$ 、波浪行進主方向 112.5° 的造波條件下，分別在 case 1、case 2、case 3 港內測站量測記錄所得到的頻譜圖。從圖上可以發現離岸堤的興建，確實削減入射至港內的波浪能量——在 case 2 和 case 3 的兩種離岸堤的佈置裡，港內測站所量測到的零次矩譜能量分別減少了 53.66% 和 48.11%；在所有造波條件下，零次矩譜能量則平均減少了 53.5% 和 34.5%。仔細比較 case 1 與 case 2 港內的頻譜後可以發現，波浪能量的主頻有往高頻移動的趨勢。另外，原來未置設離岸堤頻譜中的第二和第三個譜峰並未出現，這表示離岸堤興建後港內整個波場的結構都已經改變。另外，在 case 3 佈置下的港內頻譜中，可以發現主頻所在的位置與未設置離岸堤 (case 1) 的頻譜比較起來並沒有變動。同時，頻譜中第二和第三個譜峰出現的位置，也與原來無離岸堤時的頻譜完全相同。這表示 case 3 的離岸堤的設計並未改變港內波場成份波的比例，只是將能量平均的降低而已。綜合上述結果，可以得知 case 2 的離岸堤佈置方式較佳。

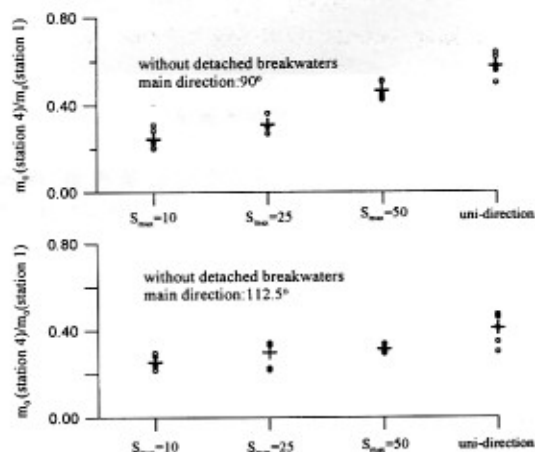


圖 6 港內零次矩譜總能量比值比較圖

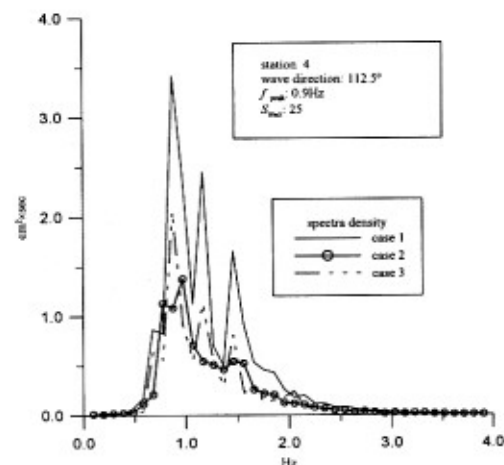


圖 7 港內頻譜比較圖

圖 8 在為單方向不規則長峰波分別是在主頻 0.7、0.9、1.1Hz 的造波條件下，以第二測站的量測結果，利用 Goda 等人 [3] 的兩點法和方向頻譜兩種方法分離入射波和反射波後計算的反射係數比較圖。圓形標記代表 case 2 的計算結果，三角形標記則為 case 3 的計算結果。從結果可以發現兩種方法計算的反射係數，相當接近。Case 2 和 case 3 的平均相對誤差分別為 6.88% 和 2.63%。由此可以證明利用方向頻譜分離入射波和反射波能量的適用性。但是在 case 2，主頻 0.7Hz 的實驗條件下，兩者的差異程度比其他條件要大。原因是測站過於接近離岸堤；在應用兩點法時，測點需與結構物距離至少一倍的波長以上。針對主頻 0.7Hz 的實驗條件，波長為 2.6m，而測站與堤體的距離為 1.6m。至於主頻 0.9Hz 和 1.1Hz 的實驗條件，波長則分別為 1.7m 和 1.2m。因此，就兩點法來說，主頻 0.9Hz 和 1.1Hz 計算結果的可信度較 0.7Hz 高。

圖 9 與圖 10 分別是主頻 0.9Hz、 $S_{max} = 50$ 、入射主方向  $90^\circ$ ，有離岸堤 (case 2) 和無離岸堤時 (case 1) 第二測站的方向頻譜圖。比較兩圖後可以發現，波場能量分佈在設置離岸堤的前後有明顯的改變。就方向域來說，方向頻譜從一個譜峰 (圖 9)，轉變為兩個 (圖 10)。Yokoki [4]、Isobe [5] 和 Davidson 等人 [17] 指出，其中一個屬於入射波的能量，另一個則代表反射波的能量。藉由方向頻譜將能量分離後，代入式(13)求得反射係數，整理的結果如表 3。如同預期地，case 2 的反射係數大於 case 3 的反射係數。

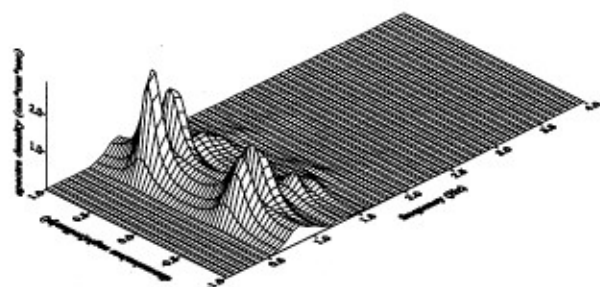


圖 10 有離岸堤第二測站方向頻譜圖

表 3 反射係數  $K_r$  比較值

主波向	$S_{max}$	主頻			
		0.7Hz	0.9Hz	1.1Hz	
$90^\circ$	10	case 2	0.842	0.857	0.842
		case 3	0.761	0.813	0.822
	25	case 2	0.835	0.871	0.881
		case 3	0.796	0.798	0.809
	50	case 2	0.891	0.836	0.895
		case 3	0.839	0.796	0.798
$112.5^\circ$	10	case 2	0.805	0.807	0.792
		case 3	0.784	0.772	0.782
	25	case 2	0.844	0.811	0.795
		case 3	0.723	0.769	0.763
	50	case 2	0.802	0.813	0.816
		case 3	0.706	0.711	0.724

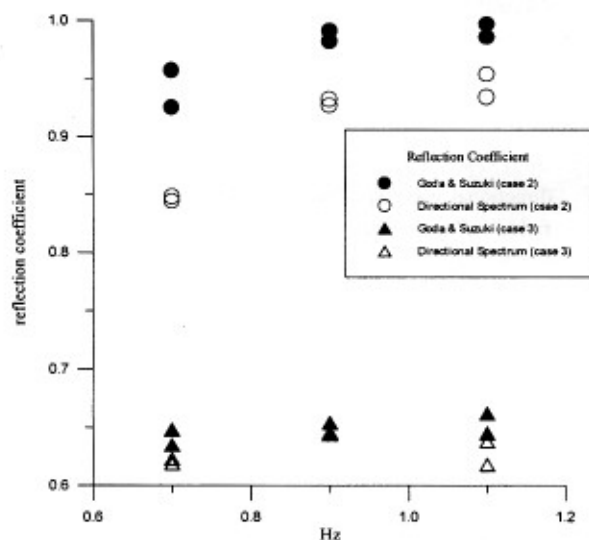


圖 8 反射係數比較圖

這是因為對 case 2 來說，波浪是正向入射至堤體。與先前討論的港內頻譜能量比較後發現，反射率愈大，港內的能量愈小，遮蔽效應則較佳；波浪斜向入射的實驗結果，反射率較小。

圖 11 是主頻 0.9Hz、 $S_{max} = 25$ 、造波主方向  $112.5^\circ$  在 case 2 的離岸堤佈置下，第二測站的無因次頻譜與反射係數比較圖。在計算反射係數時，所考慮的頻率範圍是  $0.5f_p \leq f \leq 2f_p$ 。這也就是說，大於兩倍主頻和小於 0.5 倍主頻的頻率，都不考慮。Ilic 等人 [8] 指出，這些頻率的成份波能量

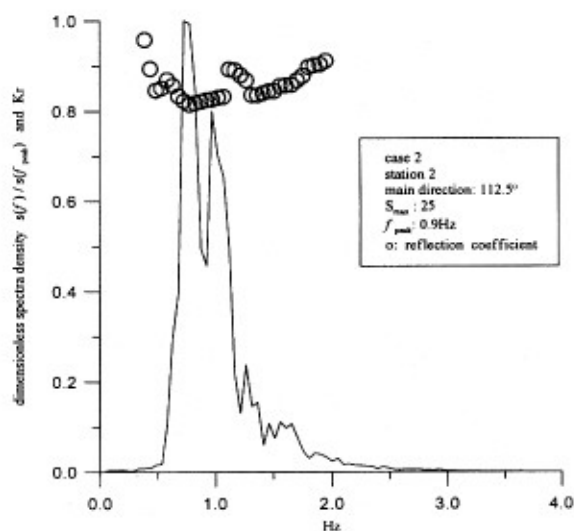


圖 11 無因次頻譜與反射係數比較圖

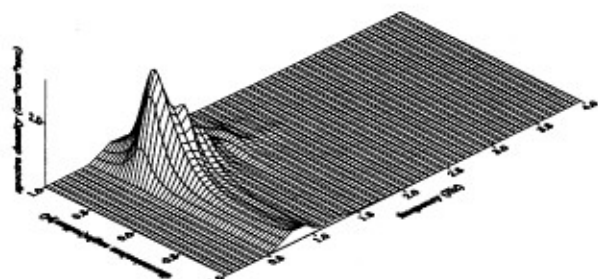


圖 9 無離岸堤第二測站方向頻譜圖

極小，如果不去除的話，反而會使計算的結果出現一些不具意義的峰值。從圖 11 可以看到每個頻率所對應的反射率，並不相同。這是因為，在一個線性的多方向波場裡每個成份波有其各自的行進方向，因此每個週期的成份波反射率也應該有所不同。

另外，於高於主頻 3~5 個  $\Delta f$  處，反射係數突然變大，然後下降。在其它實驗條件針對 case 2 的離岸堤擺設方式下，反射係數也有相同的趨勢。前述指出圖 5 港內 case 1 和 case 2 的頻譜中，原來未擺設離岸堤和離岸堤擺設後第二個峰值和第三個峰值消失的現象；而這第二個峰值和第三個峰值所對應的頻率範圍，剛好是與反射係數變大的頻率範圍吻合。這似乎是表示，這些頻率的能量，被阻擋在離岸堤外，導致港內第二個峰值和第三個峰值的消失。因此，利用上圖的表示方式，理論上可以瞭解離岸堤對那些週期的成份波的阻擋作用並不明顯，進而改進設計。

## 五、結論與建議

本研究是利用傅利葉級數展開法和最大似然法，估算波場的方向頻譜，並比較離岸堤的興建對波場能量的改變；最後嘗試利用方向頻譜計算離岸堤前的反射率。根據上述的討論與分析得到下列幾點結論與建議。

1. 傳統計算結構物的反射率，需要假入射波和反射波為單方向不規則波，相位差為  $180^\circ$ ，但是此方法卻無法實際應用到現場的多方向波場。本實驗在單方向不規則波波場的實驗條件下，比較 Goda 等人 [3] 的兩點法和方向頻譜計算所得的反射係數，發現兩者結果相當接近。證明利用方向頻譜分離入射波和反射波的適用性，並應用到計算多方向不規則波波場中結構物的反射率。
2. 在實際應用時，利用最大似然估計法估算的方向頻譜分析離岸堤前較複雜的波場時，仍然能清楚合理的表現波場能量的分佈特性。但是有一點需注意的是，Ilic 等人 [8] 提到在量測時發現，有許多波長小於波高計陣列所能解析的波通過波高計陣列。在計算時，最大似然估計法並不能辨識出這些能量是來自於入射波或是反射波。這些高頻的波動，會直接影響方向頻譜的估算結果，這也就使得在計算散佈函數時，會產生能量比實際現象更為分散的結果。因為這個緣故，可能會造成低估反射率的結果。因此，發展解析度更高的方法，如最大熵值法 (maximum entropy method) 等，是極為必要的。
3. 從理論交譜計算出的散佈函數和理論目標值比較後發現，最大似然估計法的精度比傅利葉級數展開法佳。
4. 比較港內頻譜的能量在離岸堤興建後的削減率，發現 case 2 離岸堤的設計，對港內的遮蔽效應較佳。
5. 比較港池內頻譜能量在單方向和多方向不規則波的實驗結果發現，在未興建離岸堤時，單方向不規則波入射至港內的能量大於多方向不規則波；興建離岸堤後，單方向不規則波入射的能量則小於多方向不規則

波，這表示多方向不規則波對離岸堤的繞射效應比單方向不規則波明顯。這與 Funke [1] 和 Methieu [2] 等人所得的結論是相同的。

6. 本研究利用方向頻譜計算反射率。結果顯示，斜向入射的反射率較小和反射率是隨著頻率變動的。從上述趨勢來看，皆符合應有的物理現象。因此，利用此模式，計算多方向波場的反射率是可行的。
7. 針對每一個分類，計算反射率，可以發現反射率是隨頻率變動的。由計算結果發現，每個成份波的反射率，直接影響港內的能量分佈；兩者應該可以計算轉換函數，此有待更進一步的研究。

## 參考文獻

1. Funke, E.R., and Mansard, E.P.D., "On the testing of models in multi-directional seas," *Proceedings of the Twenty-third International Conference on Coastal Engineering*, Capetown, ASCE, pp. 3454-3467 (1992).
2. Mathieu, M., and Hamm, L., "Wave height, setup and currents around breakwater submitted to regular or random wave forcing," *Coastal Engineering*, Elsevier Science B.V., Vol. 31, pp. 77-96 (1997).
3. Goda, Y., and Suzuki, Y., "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments," *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 828-845 (1976).
4. Yokoki, H., and Isobe, M., "A method for estimating directional spectra in a field of incident and reflected waves," *Proceedings of the Twenty-fifth Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 43-54 (1996).
5. Isobe, M., and Kondo, K., "Method for estimating directional wave spectrum in incident and reflected wave field," *Proceedings of the Nineteenth International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 467-483 (1984).
6. Borgman, L.E., "Directional spectra models for design use," Technical Report HEL 1-14, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, pp. 1-31 (1969).
7. Nwogu, O., "Analysis of fixed and floating structures in random multi-directional waves," Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B. C. Canada (1989).
8. Ilic, S., Chadwick, A.J., Davidson, M.A., Bird, P.A.D., and Hunteley, D.A., "Directional analysis of partially reflected waves," *Proceedings of the Twenty-seventh IAHR Congress, Seminar: multidirectional waves and their interaction with structures*, San Francisco, pp. 323-336 (1997).
9. Brissette, P., "Estimation of wave directional spectra and application to the study of surface gravity water waves," Ph.D Thesis, McMaster University, Canada (1992).
10. Frigaard, P., Helm-Petersen, J., Klopman, G., Stansberg, C.T., and Benoit, M., "IAHR list of sea state parameters," *Proceedings of the Twenty-seventh IAHR Congress*,



*Seminar: multi-directional waves and their interaction with structures*, pp. 15–19 (1997).

11. Elgar, S., Herbers, T.H.C., and Guza, R.T., "Reflection of ocean surface gravity waves from a natural beach." *Journal of Physical Oceanography*, AME, Vol. 24, pp. 1503–1511 (1994).
12. 台灣省漁業局，「八斗子漁港東外廓防波（離岸）堤水工模型試驗及可行性評估報告」，台灣漁業技術顧問社（1998）。
13. Goda, Y., *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press, Tokyo, pp. 23–39 (1985).
14. Panicker, N.N., and Borgman, L.E., "Enhancement of directional spectrum estimates," *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 258–279 (1974).
15. Chadwick, A.J., Pope, D.J., Borges, J., and Ilic, S., "Shoreline directional wave spectra Part 1 — An

investigation of spectral and directional analysis techniques," *Proceedings of Institution of Civil Engineering in Water, Maritime and Energy*, Vol. 112, pp. 198–209 (1995).

16. Young, I.R., Verhagen, L.A., and Khatri, S.K., "The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 3. Directional spectra," *Coastal Engineering*, Elsevier Science B.V., Vol. 39, pp. 101–121 (1996).
17. Davidson, M.A., Huntley, D.A., and Bird, P.A.D., "A practical method for estimation of directional wave spectra in reflective wave fields," *Coastal Engineering*, Elsevier Science B.V., Vol. 33, pp. 91–116 (1998)。

---

88年7月28日	收稿
89年3月15日	修改
89年4月17日	接受