

方向波場離岸堤前反射係數計算之研究

尹 彰¹ 黃偉柏² 周宗仁¹

摘要

利用非相位鎖定(non-phase-locked)的兩種方法：最大概度估計法(Maximum Likelihood Method)(Nwogu, 1989)和疊代最大熵值法(Extended Maximum Entropy Principle Method)(Hashimoto, 1997)計算離岸堤前的方向頻譜，並應用計算結果推估反射係數；比較數值計算的結果，疊代最大熵值法的計算精度優於最大概度估計法。實驗結果顯示，反射係數隨著測站與堤體的距離增加而減低。另外，在距離 0.5 波長的範圍內非相位鎖定的方法並不適用。

Estimating Reflection Coefficients of the Detached Breakwater in the Directional Wave Field

J. Z. Yim W. P. Huang C. R. Chou

ABSTRACT

Two of non-phase-locked methods, i.e., Maximum Likelihood Method and the Extended Maximum Entropy Principle Method were applied to estimate the directional spectrum in front of the detached breakwater. By separating the directional spectrum into incident and reflected energy, the reflection coefficients were estimated. According to the results of the numerical tests, the EMEP outperforms the MLM. It is shown that the reflection coefficients decrease with the increasing distance away from the detached breakwater. Within the region of 0.5 wavelength away from the detached breakwater, the non-phase-locked methods were inapplicable.

一、前言

防波堤的設計目的，除了具有保護海岸線完整、養灘功能外，保護岸邊的設施、增加遮蔽效應也是其主要的功能之一。在討論防波堤效能時，反射率是用來評估參考的一個重要參數。一般來說，防波堤堤前是一個入射波與反射波共存的波場，但是對於部分反射的波場諸如離岸堤或著堤口附近的波場，除了入射與反射波外還包含了散射波。由此可見防波堤附近波場的複雜性。

在計算波場中結構物的反射率時，早期學者如 Goda (1976) 等人的兩點計算法和 Gaillard (1980) 等人設計的三根波高計的最小二乘方法等，利用波高計間的波動記錄計算出波高計間波浪的相位差，分離出入射與反射波的振幅；為了簡化堤前波場的複雜性方便計算，往往忽略波浪的方向性，假設入射與反射波浪為單方向長峰波，行進方向相差 180° 並垂直入射於堤體。但是，實際波場的入射波會隨著風場風向的改變和海底底床地形而變化，因此會產生斜向入射或是入射波與反射波行進方向不一定相差 180° 的現象，這與初始的假設互相違背，因此在計算時會造成一定程度的誤差。

方向頻譜是將波場的能量以頻率、波向和

1. 國立台灣海洋大學教授
2. 國立台灣海洋大學博士班研究生

能量三維的方式來做表示，因此利用方向頻譜來分離入射波與反射波的能量，理論上來說，可以得到較完整的資訊。另外，結構物前入射波和反射波之間的相位是互相鎖定的 (phase-locked)，在利用方向頻譜計算堤前的反射波能量時，一種是將入射波和反射波之間的相位關係考慮並代入計算，如 Isobe (1984), Kondo (1986), Yokoki (1996) 等人利用修正最大概度估計法 (Modified Maximum Likelihood Method, MMLM) 推估方向頻譜計算出結構物的反射率。這種方法假設反射結構物上有一條反射線 (reflection line)，將量測測站與反射線之間的距離代入計算。但在實際應用時，由於反射線會隨著結構物的結構或是波浪條件而改變，並不是一個定值。因此，如果在起始假設錯誤的話，會造成計算出來的方向頻譜發生奇異的峰值，導致計算反射率時產生誤差 (Davidson et al., 1998; Huntely et al., 1998)。

另一種方法則是將反射波與入射波視作獨自行進的波，不考慮之間的相位關係 (Elgar et al., 1994; Ilic et al., 2000)。但是，一旦入射波與反射波能量週期成分相近，也就是在一個頻率的成分波裡有兩個方向以上的波浪行進方向，在結構物前相位鎖定造成的駐波的現象就會發生。這會造成波場不再具有均一性 (homogeneous) 和遍歷性 (ergodic)，此現象與在計算方向頻譜時假設波場裡的相位是隨機均勻分佈相互違背。Chadwick (1994) 和 Davidson (2000) 等人，利用時域裡量測數據的分段切割以及移動平均，或是在頻譜和交譜的計算時，增加頻寬和經過數據平滑視窗的處理，增加自由度，以解決上述的問題。

本文利用最大概度估計法和疊代最大熵值法來計算離岸堤前的方向頻譜和反射率。兩種方法皆假設波場裡的波浪是非相位鎖定的。最大概度估計法是以統計理論推導套配機率分佈模式參數的一種方法；疊代最大熵值法是利用波高計間位置向量與交譜之間的關係，反覆疊代運算將散佈函數以指數型態來表示。

二、相關理論

方向頻譜是以三維的方式將波場裡能量的分佈在頻率域和空間域做表示。在結構物前入射波與反射波共存的波場，其方向頻譜在方向域裡會有兩個峰值，也就是所謂的雙峰模式 (bimodal)。Frigaard 等人 (1997) 將多方向波場裡的反射率定義為：

$$K_R(f, \theta) = \sqrt{\frac{s_R(f, \theta_R)}{s_I(f, \theta_I)}} \quad (1)$$

其中 $s_I(f, \theta_I)$ 為入射波方向頻譜， $s_R(f, \theta_R)$ 為反射波方向頻譜。另外，在方向域積分後可以得到反射率以頻率為函數的表示方式。

$$K_R(f) = \sqrt{E_R(f)/E_I(f)} \quad (2)$$

其中

$$E_I(f) = \int_{180^\circ}^{360^\circ} s(f, \theta) d\theta \quad (3)$$

$$E_R(f) = \int_{0^\circ}^{180^\circ} s(f, \theta) d\theta \quad (4)$$

最後在頻率域積分，則可以以一個常數來代表反射率。

$$K_R = \sqrt{\int_0^\infty E_R(f) df / \int_0^\infty E_I(f) df} \quad (5)$$

三、實驗佈置

實驗是在國立台灣海洋大學海洋工程綜合實驗館裡的多方向造波水池裡進行。水池長、寬各為 50 公尺，深一公尺。實驗時，水深 0.6 公尺。為減少 2 次反射對實驗的影響，在造波機的相反方向設置斜率為 1/6 消波斜坡。離岸堤長 4 公尺、寬 0.6 公尺、高 0.9 公尺，為一般沈箱式離岸堤的縮尺模型，擺設位置距離造波機 18.5 公尺。造波的目標頻譜為 JONSWAP 頻譜。量測時的採樣頻率 20Hz。量測的電容式波高計排列成所謂的星形波高計陣列 (star array) 以利方向頻譜的計算，堤前設

置六個測站，分置距離堤體 1、2.5、3.5、4.5、7.5、9.5 公尺。試驗佈置圖以及實驗條件分列於圖 1 和表 1。

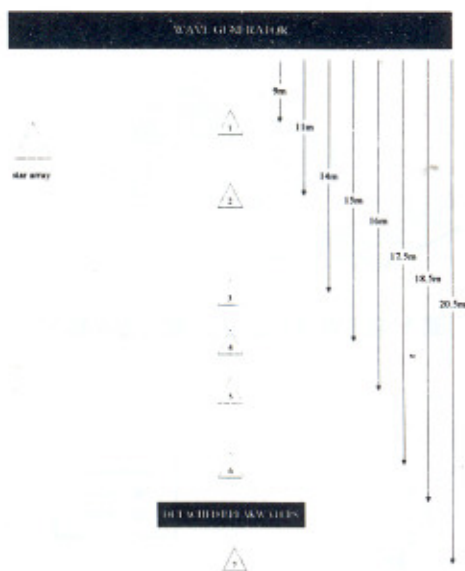


圖 1 實驗配置圖

表 1 實驗條件

Target Spectrum	JONSWAP
Peak Frequency	0.6~1.2(Hz)
$H_{1/3}$	5~9(cm)
Main Wave Direction	90°
Spreading index S_{max}	10, 25, 50

四、數值計算結果

一般在實驗進行前，為討論解析方法的精度，常利用數值模擬來進行。方向波場的模擬一般可分為從時間域或是頻率域著手，本研究是從頻率域進行。Brissette(1992)指出從頻率域模擬方向頻譜具有極大的便捷性。波高計間之交譜和方向頻譜之間的關係為：

$$c_{\eta_1 \eta_2} - iq_{\eta_1 \eta_2} = \int_{-\pi}^{\pi} s(f, \theta) \exp\left\{-i \vec{k} \cdot \left(\vec{x}_2 - \vec{x}_1\right)\right\} d\theta$$

(6)

其中 \vec{k} 為波數向量； $s(f, \theta)$ 為方向頻譜； $c_{\eta_1 \eta_2}$ 為同相譜； $q_{\eta_1 \eta_2}$ 為異相譜； \vec{x}_n 為波高計位置向量。

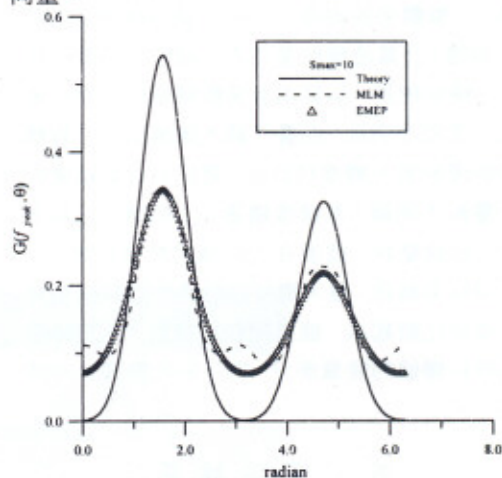


圖 2 $S_{max}=10$ 時目標散佈函數與計算結果比較圖

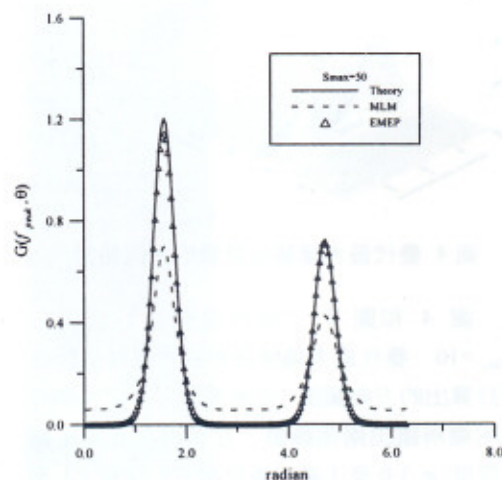


圖 3 $S_{max}=50$ 時目標散佈函數與計算結果比較圖

進行實驗時，各種來源的雜訊往往會影響計算結果的精度。Hashimoto (1987)等人，在交譜加入固定比例的雜訊，評估計算方法的適用性。噪音加入的比例是噪音的變異(variance)除以交譜中同相譜和異相譜的零次矩絕對值均方根，本研究使用的比例是 0.2。

圖 2 和 3 分別是以 $S_{max}=10$ 和 50 為目標

值和最大概度估計法和疊代最大熵值法計算的散佈函數比較圖。反射波與入射波的能量比為 60%；模擬的波高計排列方式為星形波高計陣列。整體來說兩種方法所計算的峰值皆低於理論值；計算波場能量在方向域較為發散的條件，精度較差。但是兩者皆能精確的計算出波浪行進的主方向。而疊代最大熵值法的計算精度則優於最大概度估計法，雜訊對計算結果的影響較不明顯；其精度隨著 S_{max} 的增加而越準確，也就是說，波浪在方向域的能量越集中，計算結果越佳。最大概度估計法的計算結果與目標值比較起來，能量則較為發散，在譜峰處低於目標值的能量部分，則分散在整個方向域上。

五、實驗結果

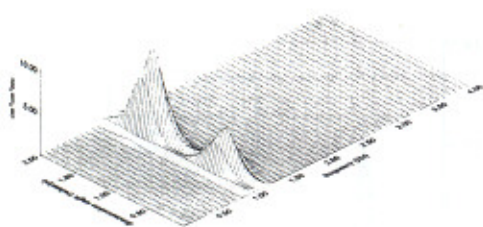


圖 4 疊代最大熵值法計算的方向頻譜

圖 4 和圖 5 分別為堤前 3.5 公尺， $S_{max}=10$ ，疊代最大熵值法和最大概度估計法所計算出的方向頻譜。從兩張圖在方向域裡可以明顯辨識出兩個峰值，在無因次波向座標（徑度/ π ）0 至 1 處代表反射波的能量；1 至 2 處代表入射波的能量。最大概度估計法所計算出的峰值低於疊代最大熵值法的計算結果，這是受到波場裡雜訊影響的結果。需注意的是，最大概度估計法在無因次的波向座標 0、1 和 2 處皆計算出有能量的分佈，但是疊代最大熵值法的計算結果則未出現。從數值計算的結果，可以斷定這些峰值是最大概度估計法先天的缺陷所造成。實驗時這個量測點附近範圍的波場，並不太可能出現完全垂直於入射波和反射波波向的能量。因此在利用最大概度

估計法計算的方向頻譜來判定波場的能量分佈時，需注意這些假峰並不存在。

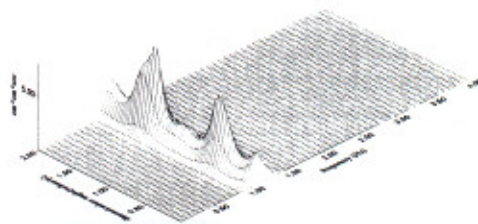


圖 5 最大概度估計法計算的方向頻譜

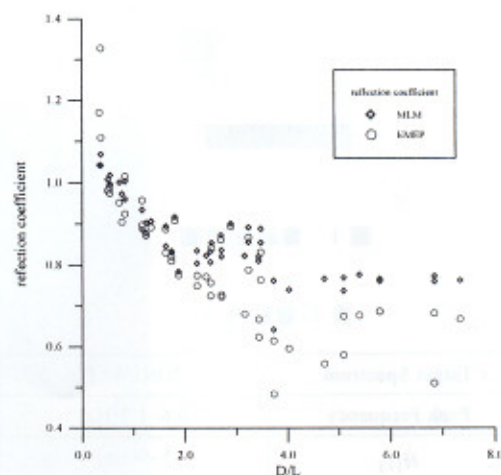


圖 6 反射係數比較圖

圖 6 是利用疊代最大熵值法和最大概度估計法所計算的方向頻譜估算出來的反射係數的平均值。橫座標 D/L 代表測站與離岸堤的距離與波長的比值。由最大概度估計法所計算出的反射係數大致大於疊代最大熵值法的計算結果。反射係數隨著與堤體的距離增加而降低；在兩倍波長的距離內下降的比例最大，在大於四倍波長距離的範圍外，反射係數趨近於定值。

另外，在 0.5 波長的距離內，兩種方法的計算結果皆出現大於 1 的情形。這是因為在堤體附近的範圍，入射波與反射波會形成共振的現象 (Huntely 1998)，當波高計陣列中任一波高計座落於接近結點處時，會造成交譜的計算

失真，無法分辨視出波浪的行進方向，使得計算出來的方向頻譜能量會散佈在整個方向域上，而無明顯的峰值，導致反射係數的計算結果產生不合理的情形。

六、結論

從數值計算的結果和實驗結果來看，在計算雙峰的方向波場，疊代最大嫡值法的計算精度優於最大概度估計法。利用非相位鎖定的計算方式，則無需要假設反射線的存在。但是在計算距離堤體 0.5 波長的波場範圍內，由於由相位鎖定產生共振的現象非常明顯，使得計算結果並不合理。因此，在這個範圍內，非相位鎖定的計算方法並不適用。

另外，反射係數隨著與堤體的距離增加而降低，在兩倍波長的範圍內下降速度較快，四倍波長以外的範圍，反射係數則趨近於定值。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「波高計陣列對方向頻譜量測之影響」(編號 NSC-89-2611-019-058)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. Borgman, L. E. (1969) "Directional spectra models for design use," *Technical Report HEL 1-14*, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, pp. 1-31.
2. Brissette, P. (1992) *Estimation of wave directional spectra and application to the study of surface gravity water waves*, Ph.D Thesis, McMaster University, Canada.
3. Chadwick, A. J., D. J. Pope, J. Borges and S. Ilic. (1995) "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.
4. Davidson, M. A., D. A. Huntely and P. A. D. Bird (1998) "A practical method for the estimation of directional wave spectra in reflective wave fields," *Coastal Engineering*, Elsevier Science, Vol. 33, pp.91-116.
5. Davidson, M. A., K. S. Kingston and D. A. Huntely (2000) "New solution for directional wave analysis in reflective wave fields," *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, pp.173-181.
6. Elgar, S., T. H. C. Herbers and R. T. Guza (1994) "Reflection of ocean surface gravity waves from a natural beach," *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 24, pp. 1503-1510.
7. Frigaard, P., J. Helm-Petersen, G. Klopman, C. T. Stansberg and M. Benoit (1997) "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.
8. Gaillard, P., M. Gauthier and F. Holly (1980) "Method of analysis of random wave experiments with reflecting coastal structures," *Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.204-220.
9. Goda, Y. and Y. Suzuki (1976) "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments," *Proceedings of the 17th International conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.828-845.
10. Hashimoto, N. K. Kobune and Y. Kameyama (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.
11. Hashimoto, N. (1997) "Analysis of the directional wave spectrum from field data," *Advanced in coastal and ocean engineering*,

- World Scientific*, Vol. 3, pp.103-143
- 12.Huntely, D. A. and M. A. Davidson (1998) "Estimating the directional spectrum of waves near a reflector," *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, pp.312-319.
 - 13.Ilic, S., A. J. Chadwick, and J. Helm-Petersen (2000) "An evaluation of directional analysis techniques for multidirectional, partially reflected waves Part 1: numerical investigations," *Journal of Hydraulic research*, Vol. 38, No. 4, pp.243-251.
 - 14.Isobe, M., and K. Kondo (1984) "Method for estimating directional wave spectrum in incident and reflected wave field," *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 467-483.
 - 15.Kondo, K., M. Akama, and M. Isobe (1986) "Measurement of reflection coefficient of sea wall in Omura bay," *Proceedings of the 20th Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp.1987-2001.
 - 16.Nwogu, O. (1989) *Analysis of fixed and floating structures in random multi-directional waves*, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B. C. Canada.
 - 17.Yokoki, H. and M. Isobe (1996) "A method for estimating directional spectra in a field of incident and reflected waves," *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.43-54.