

離岸堤前反射係數再研究

尹 彰¹ 黃偉柏² 周宗仁¹

摘要

反射波場因為相位鎖定的現象，波浪會形成重複波而產生節點及腹點。前人提及若使用『非相位鎖定』(non-phase-locked)的方式來計算堤前方向頻譜，理論的適用範圍為時間延時和子序列的長度比值需大於 1。本研究利用高階計算方向頻譜的方法 - 疊代最大熵值法(Extended Maximum Entropy Principle Method) - 以非相位鎖定的方式進行運算，使得前述比值適用範圍擴大，只需大於 0.15 即可。並應用計算結果推估反射係數。反射係數隨著測站與堤體的距離增加而減低並隨著散佈函數指數 S_{max} 增加而增加。

A Further Study on the Reflection Coefficients of a Detached Breakwater

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

ABSTRACT

In front of a breakwater, incident and reflected waves coexist. When these waves are phase locked, standing waves are formed and there are nodes and antinodes in the wave field. Researchers have shown that, if the so-called "non-phase locked methods" were to be used in estimating the directional wave spectra in front of a reflector, the ratio between the L/S should be greater than 1. L is the total of needed for waves to travel from the wave gauge to the reflector and back again; S is the total length of the data records. It is demonstrated here in this paper that, by the use of the so-called Extended Maximum Entropy Principle (EMEP) method, which is non-phase locked, this ratio can be reduced to $L/S \geq 0.15$. It is further demonstrated that the reflection coefficients decrease with increasing distances away from the reflector. On the other hand, their values increase with increasing values of the spreading index, S_{max} .

一、前言

一般來說，結構物前是入射波和反射波共存的波場，而反射係數則是評估防波結構物設計優劣的指標之一。如何分離入射波和反射波的能量，成為重要的課題。早期為了配合二維波場的實驗，未考慮波浪的方向性，而假設入射波垂直入射於結構物。量測方法多採用線型排列的波高計陣列，平行

於波浪行進方向的設置於結構物前進行量測。如 Goda 和 Suzuki(1976)的兩點量測法，假設入射波與反射波為各自獨立行進方向相差 180° 的波列，兩者之間未有非線性的擾動。藉由兩個測點測之間的距離和測得的時間序列經傅立葉轉換，代入四則運算後可以得到入射波和反射波在每一個分頻的振幅。而反射率則為反射波與入射波能量比均方根。但是，當波高計間距離為 1/2 波長的倍數時，在計算時會產生奇異值的現象。

雖然上述方法藉由增加波高的數目(Gaillard et al., 1980)，以多點的量測記錄代入計算，可以避免波高計的間距對計算結果造成影響。但是，如果應

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

用於現場的不規則短峰波波場裡結構物的反射係數計算時，則仍然需要進一步的修正。實際波場的波浪具有方向性，入射波波向會隨著地形折射或是風場吹送的方向而改變，並不一定會垂直入射於結構物。因此，如果直接按照上述方法計算，必然產生某種程度的誤差。利用方向頻譜在空間域裡分離入射波和反射波的能量則為比較可行的方法(Frigaard et al., 1997)。

方向頻譜是將波浪的能量以頻率、波向和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，可以得到較完整的資訊。一般在計算方向頻譜時，均假設波場符合均一性的原則，也就是說波高計陣列中每一根波高計量測的波動記錄計算所得的波浪頻譜，皆極為接近。但是，在接近結構物的入射和反射波共存的波場，會因部分的重複波形成節點和腹點，使得波場則不再具有均一性的特性。如任一波高計座落於節點和腹點處，計算所得的方向頻譜則極易產生奇異的峰值。

部分學者則在計算方向頻譜時考慮將相位鎖定(phase-locked)的現象。也就是將入射波和反射波之間的相位關係代入計算。學者通常將這種方法稱為『相位鎖定』法。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。這種方法是假入射波與反射波之間在結構物上沒有相位差。再以結構物為軸，將量測測站、測站鏡射虛部的相對座標和測站間的交譜代入加以計算。也就是說，將結構物視為一條反射線(reflection line)，利用測點與反射線之間的相對距離計算出波浪行進的相位。但是在實際應用時，由於反射線會隨著結構物的形狀或是波浪條件而改變，並不是一個定值。而修正最大概度估計法的精度又與估算波浪從結構物行進至測站之間的相位差正確與否有極大的關係。因此，如果起始假設錯誤的話，會造成計算出來的方向頻譜發生奇異的峰值，導致估算反射率的誤差 (Davidson et al., 1998; Huntely et al., 1998)。

另一種方法為『非相位鎖定法』(non-phase locking)將入射波和反射波視做為各自獨立前進的波列，不考慮兩者之間的相位關係，假設結構物前波浪的相位均勻隨機的分佈於 $0 \sim 2\pi$ 間。另外，為

了避免相位鎖定對計算方向頻譜造成影響，將量測波高計陣列移離結構物、減短每段時間子序列的取樣點數和增加切割時間序列的段數皆為可行的方法 (Ilic et al., 2000)。

二、相關理論

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)。IAHR(1997)將多方向波場裡的反射率定義為：

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

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以頻率為函數的反射率：

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

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。

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

也就是說反射率定義為反射波能量與入射波能量比的平方根。

基本上來說，利用『貝氏參數法』(Bayesian directional spectrum estimation method, BDM)計算方向頻譜可得到最佳的解析結果(Hashimoto, 1987)。然而，由於計算方式需要反覆的疊代計算，相當耗時。Hashimoto (1993)簡化疊代計算的步驟，發展了『疊代最大熵值法』(Extended Maximum Entropy Principle Method, EMEP)，其計算的方向散佈函數可表示為：

$$G(f, \theta) = \frac{\exp \left[\sum_{n=1}^M \{a_n(f) \cos n\theta + b_n(f) \sin n\theta\} \right]}{\int_0^{2\pi} \exp \left[\sum_{n=1}^M \{a_n(f) \cos n\theta + b_n(f) \sin n\theta\} \right] d\theta}$$

(6)

其中 $a_n(f)$, $b_n(f)$ 為疊代計算結果的係數； $G(f, \theta)$ 為方向散佈函數。

三、實驗佈置

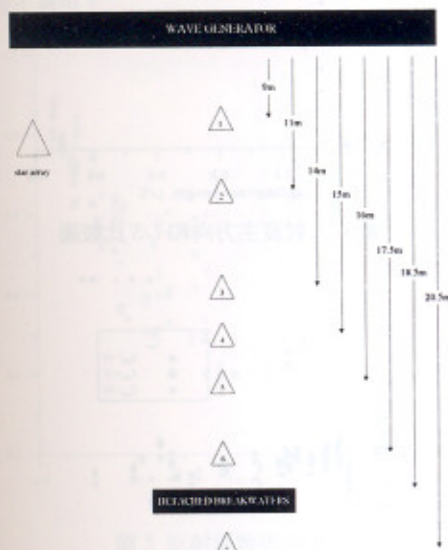


圖 1 實驗配置圖

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。目標頻譜為 JONSWAP 頻譜；目標方向散佈函數用的是 Mitsuyasu 的方向散佈函數模式。

量測時的採樣頻率 20 Hz，每一次實驗記錄點數為 16384 筆，切割成每段為 512 記錄點的子序列。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 公尺處。試驗佈置圖以及實驗條件分列於圖 1 和表 1。

表 1 實驗條件

目標頻譜	JONSWAP
主頻率 (f_{peak})	0.6~1.2
有義波高 ($H_{1/3}$) [cm]	5~9
波浪主方向	90°
大方向散佈指數 (S_{max})	10, 25, 50
[--]	

四、實驗結果

前述已提及利用相位鎖定的方法在解析反射波場方向頻譜時，可能發生的問題；包括反射線的定義問題、離結構物越遠，計算的結果越容易產生奇異的峰值等。當使用非相位鎖定的方法進行計算時，無須進行任何先前的假設，因此所受到的限制也較少。然而，由於相位鎖定的現象的確存在於反射波場中，所以採用解析度較高的方法來計算方向頻譜，應較為可行。另外，在頻率域的計算，增加解析的頻寬，使得駐波結點或腹點對其所佔分類對頻譜的影響能夠平滑，則相位鎖定對計算結果的影響可大為減低。

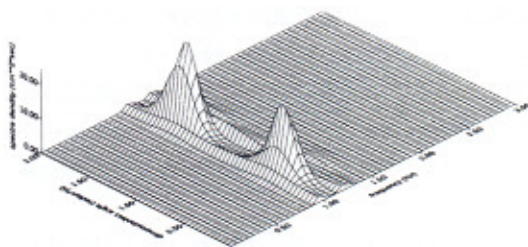


圖 2 測站六堤前方向頻譜

圖二為測站 6 為利用『疊代最大熵值法』計算的方向頻譜。測站距離離岸堤 1 公尺；造波條件為主頻 1 Hz；方向散佈函數指數 S_{max} 為 25，的方向頻譜。記錄時間共切割成 32 段子序列分別進行波高計問交譜 (cross spectrum) 的運算並加以平均和加入漢寧平滑視窗 (Hanning Window) 進行運算，以增加頻譜的自由度。圖中代表方向域的 Y 軸為強度除以 π ，其 0 至 1 處代表反射波的能量；1 至 2 處則代表入射波的能量。從圖中可以清楚的分辨出兩個峰

值，峰值對應的入射波波向為 270° ，反射波波向為 90° 。此測站為距離堤最近的測站，理論上來說，所受到相位鎖定的影響也最明顯，由結果來看，能量在方向域和頻率域的分佈情形皆未出現奇異的峰值。

Huntley 等人(1998)利用數值模擬的方法，模擬單方向入射波和反射波共存的波場時間序列。計算方向頻譜的方法在非相位鎖定的部分採用『最大概度估計法』，而相位鎖定的部分則採用『修正最大概度估計法』。他們利用計算結果是否準確計算出入射波及反射波行進的方向，評估相位鎖定法和非相位鎖定法的適用範圍。其界定範圍的方式採用 L/S 的比值。其中， L 為波浪經過波高計陣列行進至堤體然後反射回波高計陣列的時間； S 則是用於分析的時間序列裡子序列的時間長度。

如果 L/S 小於 1，則代表用於分析的時間序列長度大於波浪經過波高計陣列行進至堤體然後反射回波高計陣列的時間，那所分析的序列並不包含有相位鎖定的訊號。反之，如果 L/S 大於 1，則所分析的時間序列裡有相位鎖定的現象。因此，理論上來說非相位鎖定的方法僅適合 L/S 大於 1 的範圍。然而，本文證明藉由移動平均和平滑視窗的步驟，利用非相位鎖定法裡的『最大概度估計法』解析方向頻譜，可以正確地辨識出入射波和反射波行進方向，且方向頻譜未出現奇異的峰值， L/S 的比值可降至 0.5。至於應用相位鎖定的方式計算反射波場的方向頻譜，Isobe 等人(1984)認為 L/S 比值的應小於 0.4，若大於此比值，計算結果會產生奇異的峰值。

圖 3 是入射波行進主方向與 L/S 比值的比較圖。造波入射波方向為 270° 正向入射於堤體。由圖可以發現當 L/S 的比值小於 0.15 時，入射波波場行進主方向的計算結果開始出現偏差。這樣的結果比 Huntley 等人所提 L/S 需大於 0.5 時方能利用非相位鎖定的方法，適用度增大許多。圖 4 是反射波行進主方向與 L/S 比值的比較圖。反射波行進主方向應該出現在 90° 處。由圖發現，當 L/S 比值小於 0.05 時才開始出現嚴重的偏差。由此可以推論，以較為高階計算方向頻譜的方法和在頻率域加入平滑的步驟計算反射波場能量的分佈，較不容易受到波場裡相位鎖定的影響。另外，計算入射波和反射波的行

進方向，並不受到散佈函數指數 S_{max} 的影響，也就是說不管能量在行進主方向集中與否，皆不會影響計算的結果。

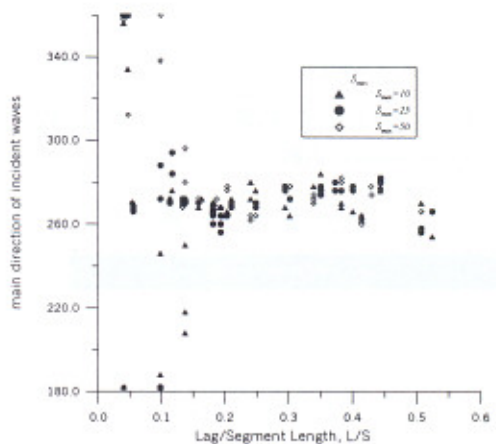


圖 3 入射波主方向和 L/S 比較圖

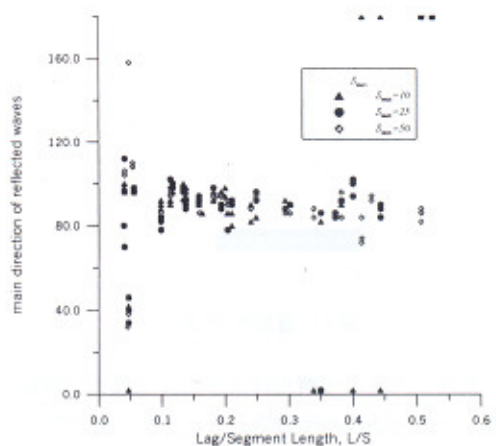


圖 4 反射波主方向和 L/S 比較圖

圖 5 為利用『疊代最大概度法』計算的方向頻譜分離入射波和反射波能量後所得到的反射係數在不同 D/WL 比值的分佈情形。其中 D 代表測站和堤體之間的距離。 WL 代表波長。由圖可以發現，反射係數在四倍波長裡的範圍裡隨著測站與堤體之間的距離增加而迅速的降低。在四倍波長以外，反射係數逐漸成為定值。再者，在四倍波長的範圍內，隨著散佈函數指數 S_{max} 增加，反射係數也愈大。也就是說，若波場愈趨近於長峰波，入射波能量越集中於行進主方向，所反射的能量也越大。反之，隨著散佈函數指數 S_{max} 降低，能量在方向域的散佈也

就越分散，所造成的反射現象也就越不明顯。另外，距離堤體四倍波長外，波浪的方向性對反射係數的影響則逐漸降低。另外，在 0.5 倍波長的範圍內，有些反射率的計算結果大於 1。這並不符合物理現象，這是由於方向頻譜在方向域裡以無法清楚的分離入射波和反射波的行進主方向。計算出的能量為均勻的散佈於方向域上。也就是說，如以波長的範圍做為界定方法時，堤體距離測站在小於 0.5 倍波長範圍內，非相位鎖定法裡的『疊代最大熵值法』並不適用。

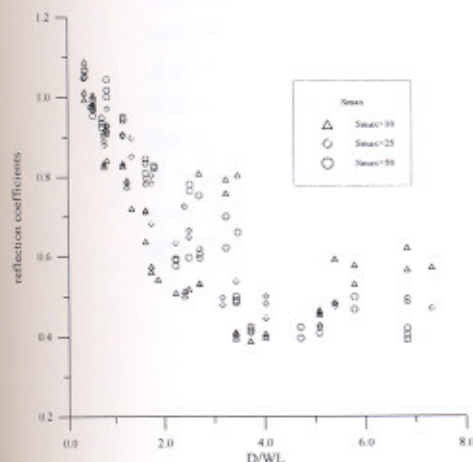


圖 5 反射係數與 D/WL 比較圖

五、結論

利用非相位鎖定法裡的『疊代最大熵值法』在頻率域加入平滑視窗的處理後，計算反射波場的方向頻譜，在受到相位鎖定的影響下，已可將 Huntley 等人所提出的 L/S 比值適用範圍從大於 0.5 降至大於 0.15。可應用的範圍更為加大。

另外，反射係數隨著測站與堤體之間的距離增加而逐漸降低，並隨著散佈函數指數 S_{max} 增加而增加。

如以波長做為非相位鎖定法裡的『疊代最大熵值法』的界定範圍時，其適用的範圍為測站與堤體之間的距離需大於 0.5 倍的波長。

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) 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

- Davidson, M. A., D. A. Huntley and P. A. D. Bird (1998) "A practical method for the estimation of directional wave spectra in reflective wave fields" *Coastal Engineering*, Vol. 33, pp. 91-116
- 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*, San Francisco, pp. 15-19
- Gaillard, P. M. Gauthier and F. Holly (1980) "Method of analysis of random wave experiments with reflecting coastal structures" *Proceedings of the International 17th Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 204-220
- Goda, Y. and Y. Suzuki (1976) "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments" *Proceedings of the International Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 828-845
- 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*, Japan, Vol. 26, pp. 57-100
- Huntley, D. A. and M. A. Davidson (1998) "Estimating the directional spectrum of waves near a reflector" *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 6, pp. 312-319
- Ilic, S., A. Chadwick, A. and J. Helm-Petersen (2000) "An evaluation of directional analysis techniques for multidirectional, partially reflected waves Part I: numerical investigations" *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No. 4, pp. 243-251
- 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

9. Kondo, K., M. Akama, and M. Isobe (1986)
"Measurement of reflection coefficient of sea wall
in Omura bay" *Proceedings of the 20th
International Conference Coastal Engineering*,
ASCE, pp. 1987-2001
10. 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 Coastal Engineering Conference*,
ASCE, pp. 43-54