

# 碎波帶附近波浪與底床上懸浮載濃度特性之研究

林柏青<sup>1</sup> 莊甲子<sup>1</sup> 周憲德<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 交通部運輸研究所港灣技術研究中心

<sup>2</sup> 國立中央大學

## 摘要

本研究於台中港海域置放深水波浪儀、淺水波浪儀，並於碎波帶內裝置流速儀、底床懸浮質濁度計等，量測波浪由深海向淺海推進後所產生之能量變化。同時利用波浪之時序列水面水位變化資料，求出其平滑化瞬時波能(SIWEH)之分佈，用之以與群波現象與特性作比較分析。其次，資料分析結果顯示近岸底床附近之懸浮質濃度具有一固定背景質，其變化則有週期性之驟增現象，並與入射波浪之群波特性有密切關係。底床附近之懸浮質濃度驟增量可達背景濃度質的 2~3 倍，影響近岸懸浮質輸砂量估算結果甚鉅。此外，波浪由碎波帶外向岸接近時其群波特性會因波浪碎波而逐漸減弱。在碎波帶外波浪群波特性較強時，由群波主控底床之懸浮質濃度變化，但在碎波帶內，此種現象則較不明顯。

## 一、前言

台灣西部海岸多屬平緩砂灘，近年來由於河川上游整治，海埔新生地開發，及港埠建設等，阻斷沿岸輸砂平衡，使海岸多呈侵蝕狀態，嚴重威脅海岸地區居民生命及財產安全。近岸淺水海域是海岸漂砂活動最劇烈的水域，碎波帶附近漂砂傳輸行為受波浪特性、流場分佈、底床邊界層影響，在海岸地形變遷上扮演重要角色，但其力學機制及底床邊界層變化，至今仍無法完全瞭解，主要原因為實驗室之漂砂試驗受水槽規模及歪比影響無法完全模擬實際海域之輸砂行為，而現場觀測又極為困難之故。因此，一般海岸輸砂模式僅能以區域性之長期平均變化量來描述當地海岸地形變遷，而對其輸砂過程及力學機制則仍有待探討。

其次，目前對於底床輸砂之研究仍多局限於個別波浪所引起懸浮質輸砂的探討，此如 Hagatun(1986)、Horikawa(1982)、Nielsen(1986)、Nakato(1977)及 Blondeaux(1990)等。再者，由於外海風浪大多有群波現象，當群波波列接近海岸時，大、小不同波浪在不同水深碎波，其碎波能量因碎波點之變化致引發碎波帶內之長波振盪(Okayasu, 1996)，惟此種群波結構或長波現象對於近岸底床輸砂之影響則尚未有詳細研究。本研究利用濁度計、壓力式波浪儀及三維超音波式流速計等同步連續觀測碎波帶內外底床附近之懸浮質濃度，流場與水位變化，藉以瞭解群波結構或長波現象對底床輸砂的影響。

## 二、理論說明

在穩定狀態下，Rouse(1964)根據懸浮質濃度擴散理論求得垂直濃度分佈式為

$$\frac{c}{c_a} = \left( \frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{w_s}{kU_*} \quad (2)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3)$$

式中  $a$  : 底床附近參考點之高度  
 $c$  : 體積濃度  
 $c_a$  : 參考點  $a$  之懸浮砂體積濃度  
 $h$  : 水深  
 $y$  : 離底床任一位置高度  
 $k$  : Von Karman's 常數( $\approx 0.435$ )  
 $U_*$  : 底床摩擦速度  
 $\tau_0$  : 底床剪應力  
 $\rho$  : 流體密度

將該式由  $a$  至  $h$  垂直積分，得單位寬度之輸砂量為

$$q_s = \int_a^h c u dy \quad (4)$$

其中  $u$  : 水粒子運動速度  
 $q_s$  : 單位寬度每單位時間之懸浮載輸砂量  
假設在垂直方向上，水平流速成對數分佈，即

$$u = 5.75 U_*' \cdot \log \frac{30.2y}{r} \quad (5)$$

式中  $U_*'$  : 純由懸浮砂粒引起之剪力速度  
 $r$  : 底床粗糙度

將(1)及(5)式代入(4)式可得

$$q_s = \int_a^h c_a \left( \frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^a \cdot 5.75 U_*' \log \frac{30.2y}{r} dy \quad (6)$$

在波浪運動下， $c$  與  $u$  均為時間之函數，屬於非穩定狀態。懸浮砂之瞬時濃度並非由底床剪應力的瞬時值決定，因為砂粒由底床懸浮後須要經過一段時間才會沉降，故底床濃度與底床剪應力兩者間會有時間差。而計算懸浮載總輸砂量時必須由其瞬時值積分而非由波動平均值，即

$$Q_s = \int_0^T \int_a^h c u dy dt \quad (7)$$

### (一) 平滑化瞬時波能(SIWEH)

Funke & Mansard(1978)為描述群波現象提出了平滑化瞬時波能歷程(Smoothed Instantaneous Wave Energy History, 簡稱 SIWEH)的方法，其定義為以水位 $\eta(t)$ 平方的移動平均來表示，即

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{t-p}^{t+p} \eta^2(t+\tau) \cdot Q(\tau) d\tau \quad (8)$$

式中 $Q(\tau)$ 為濾窗函數

另外，為描述群波現象的強弱程度，Funke 等另提出一個參數，稱為群波因子(Grouping Factor, GF)，其計算式如下

$$GF = \frac{1}{E} \cdot \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (E(t) - \bar{E})^2 \cdot dt} \quad (9)$$

GF 值愈大則大波振幅與小波振幅之比值愈大，即群波現象愈明顯。

### (二) 經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition method, 簡稱 EMD)

海面波浪或是水位變化常常是非線性或是非平穩性(nonstationary)的。在傳統上，廣泛應用的傅立葉能譜分析(Fourier spectral analysis)雖提供一簡單便捷的方法來分析這些資料的頻率與能量分佈，惟其系統必須是線性與平穩性的，否則分析出來的資料頻譜分佈將無意義。舉例來說，傅立葉頻譜在整體地定義出均勻調和函數分量時，對於非均勻非平穩性資料，它會產生很多附加調和函數分量來近似資料，使得分析結果之能量散佈在很寬的頻帶裡。再則，傅立葉分析使用三角函數作線性疊加，故對於非正弦函數波形，它需要附加的調和函數分量來模擬所謂的變形波，乃造成頻寬增加、能量發散，這些都是傅立葉分析法所難以克服之盲點。

Huang et al.(1996)提出經驗模態分解方法(EMD)

以解析非平穩性資料，其方法為利用系統內部時間尺度作能量的直接析出，將資料表達成內建模態函數(IMF)，亦即由極值包絡線所定義之模態振動，其振幅與頻率是可變動的。在作希爾伯特(Hilbert)轉換後，即可據以計算瞬頻(instantaneous frequency)。因此可以像討論頻率軸一樣，討論時間軸上的任一點之特性變化。EMD 方法的建立是基於訊號原始震盪的時間尺度，由希爾伯特轉換得其局部能量以及即時頻率，可以求出整個訊號的能量 - 頻率 - 時間分佈，稱為希爾伯特頻譜。

$$H(\omega, t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i\int \omega_j(t) dt} \quad (10)$$

此頻譜可以提供每一個分量隨時間變化的振幅及頻率函數。相同資料如以傅立葉展開則成

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (11)$$

上兩式比較結果可知 IMF 為一廣義的傅立葉展開式，其變化振幅與即時頻率不只大大地改進展開的效果，而且還能應用於非平穩性資料。如將希爾伯特頻譜在時間軸上累加，消去時間項變化後，即可得到邊際頻譜

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (12)$$

邊際頻譜雖然失去時間的變化，卻提供了較簡潔的頻率 - 能量分佈。

## 三、研究方法及內容

臺中港附近海岸是臺灣沿海最大潮差發生區域，大潮時高低潮位差最大可達五公尺。台中港北防波堤北側灘面坡度平緩大約 1/150，是研究碎波帶附近各種水理力學與漂砂機制最適宜地點之一。本研究中各測站相關配置如圖 1，測站 C 位於北防砂堤外約 15 米水深位置，測站 B 位於最低潮位線附近如圖 2，漲退潮間其相關位置幾乎含括潮間帶至碎波帶內外。安裝儀器則包括壓力式水位計、超音波式海流儀及數層之濁度計裝置以同步觀測水面波動、流況與懸浮砂濃度之垂直分佈。儀器設定為同步連續觀測，安裝以一字形平行波峰線固定於底床上，彼此間隔約一公尺以避免相互干擾。

## 四、資料分析與討論

現場調查記錄方式為同步連續觀測，時間約 15 小時，但因受限於濁度計之記憶體容量，懸浮質濃度只能記錄約三個小時，雖然如此，其也已含括低潮至高潮內相關訊息。測站 B 在潮位不斷變化中，其相關位置含括碎波帶外至近岸之潮間帶，加上外

海測點 C 之波浪測站構成一系列之觀測網。

#### (一) 沿岸流資料分析

現場海流儀為三維超音波式流速計，固定於底床上 27cm 位置，因測站 B 位於北防砂堤北側，觀測期間適逢強勁東北季風，漲潮時沿岸流大致呈東北—西南走向，而退潮時受波浪斜向入射及碎波影響，沿岸流仍為東北—西南走向流動。圖 3 表示測站 B 在漲退潮中不同水深及相關位置時其沿岸流之流速與流向，最大流速發生於碎波帶內，符合沿岸流之相關理論，但因流場受北砂堤阻擋形成裂流並在堤頭處與外海之退潮海流會合形成渦流。

#### (二) 碎波帶內之群波特性和水位之長波振盪分析

外海風浪一般有明顯的群波現象，當波浪進入近岸之碎波帶內，其群波特性會隨碎波後之波浪重組而變化。根據測站 B 連續記錄之時序列水位變化資料分析，當波浪進入碎波帶後其 GF 值逐漸變小如圖 4，亦即波浪之群波特性逐漸減弱。波浪在碎波帶內，因底床磨擦或碎波能量耗損波形改變，即波浪在行進過程中能量不再守恆，成為非平穩性發展，不適合使用傅利葉轉換方法。經根據 EMD 分解法之內建模態函數解析波浪資料，求得 Hilbert 邊際能譜如圖 5，顯示波浪在接近淺灘附近有長週期振盪能量出現。

#### (三) 流運動之長週期波動現象

圖 6 為碎波帶內時序列流速觀測資料之連續水粒子流跡，時間長 30 分鐘，圖中顯示水粒子運動除了波浪之向離岸往復振盪及由東北向西南方向之沿岸流外，尚有因淺灘動盪 (surf beat) 造成之長週期波動現象。該長波運動現象以愈接近淺灘愈明顯如圖 7，其中，流振幅譜與同時段水位振幅譜相似，但對於長週期振盪則有較明顯析出，其長波週期約 13 分鐘。至於高潮位時，測站 B 相對位置移至碎波帶外，能譜呈單一波峰，週期 6.3 秒，同風浪週期。

#### (四) 懸浮輸砂與群波能量之關係

現場懸浮質觀測利用四組光學式濁度計，分別安裝於離底床 6.5cm, 22cm, 35cm 及 76cm 位置，儀器使用前皆經率定程序取得相對濁度之濃度值，取樣頻率 1Hz，採全時間連續記錄方式。據現場觀察結果發現，近岸水中在波浪作用下常維持一定值之背景濁度。當群波中之大波列通過時，波浪能量增加使底床附近懸浮砂濃度驟增如圖 8。其發生週期與群波特性有關，據相關性分析結果，其時間差大約 10 秒如圖 9 內所示。此外，由資料分析結果中顯示，懸浮砂濃度與群波能量成正比而與水深成反比如圖 10。當群波中最大振幅大於 40cm 時，才會發生底床懸浮質濃度驟增現象。

## 五、結論

本研究利用潮差水位變化，進行碎波帶附近波浪、流與懸浮質濃度的密集觀測，觀測期間雖只有十數小時，惟外海波候變化不大，而且近岸底床坡度平緩，因此觀測範圍可由點擴及整個碎波帶。由資料分析結果顯示在碎波帶外底床懸浮質濃度隨水深變化而有不同之基本環境濃度，而濃度之暴增則與波浪之群波現象有密切關係，其濃度暴增量可達基本濃度的 2~3 倍，平均佔懸浮砂總量約 27.7%，此結果影響近岸底床輸砂量之估算甚鉅，不可不注意。至於碎波帶內，因波浪群波特性降低，致使影響底床懸浮質濃度變化的因素更為複雜，有待進一步深入研究。

## 六、誌謝

臺灣技術研究中心錢爾潔小姐的協助打字與校對，特此誌謝。

## 參考文獻

1. Blondeaux, P. and Vittor, G., 1990: "Oscillatory flow and sediment motion over a rippled bed", Proc. 22nd Coastal Eng. Conf., ASCE, PP.2186-2199.
2. Funke E.R. et al., 1978: "On the synthesis of realistic sea state in a laboratory flume", Proc. 17th Coastal Eng. Conf., Vol.3, PP.2974-2991.
3. Hagatun, K. and Eidsvik, K.J., 1986: "Oscillating turbulent boundary layers with suspended sediment", J. Geophys Res., 91(C11), PP.13045-13055.
4. Horikawa, K., Watanabe, A. and Katori, S., 1982: "Sediment transport under sheet flow condition", Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, 2, PP.1335-1352.
5. Huang, N.E., Long, S.R. and Shen, Z., 1996: "The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution", Adv. Appl. Mech. 32, PP.59-111.
6. Nakato, T., Locher, F.A., Glover, J.R. and Kennedy, J.F., 1977: "Wave entrainment of sediment from rippled beds", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 103(1), PP.83-99.
7. Nielsen, P., 1986: "Suspended sediment concentrations under waves", Coastal Engineering, 10, PP.23-31.
8. Okayasu, A., Matsumoto, T., and Suzuki, Y., 1996: "Laboratory experiments on generation of long waves in the surf zone", Coastal Eng., PP.1321-1334.

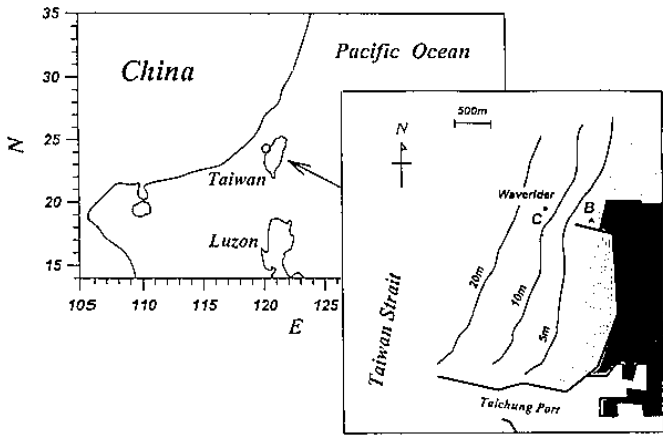


圖 1 各測站相關位置圖

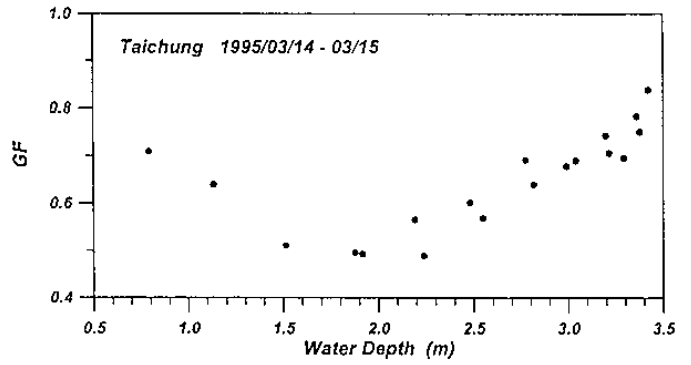


圖 4 測站 B 群波因子變化

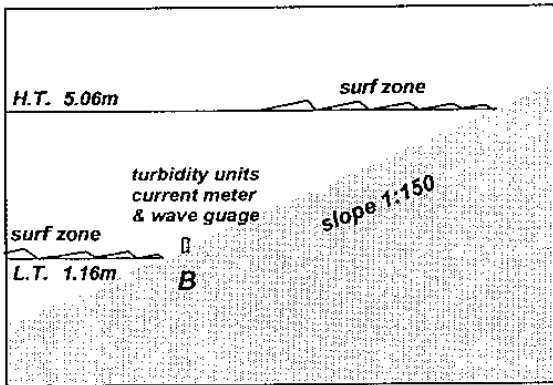


圖 2 測站 B 隨潮位變化之相關位置圖

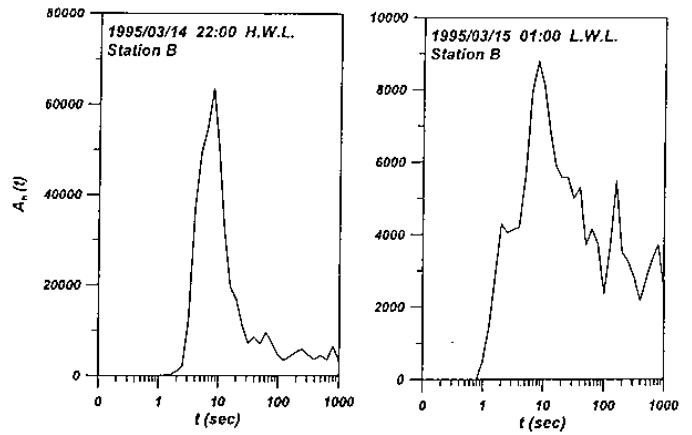


圖 5 不同潮位之水位邊際能譜

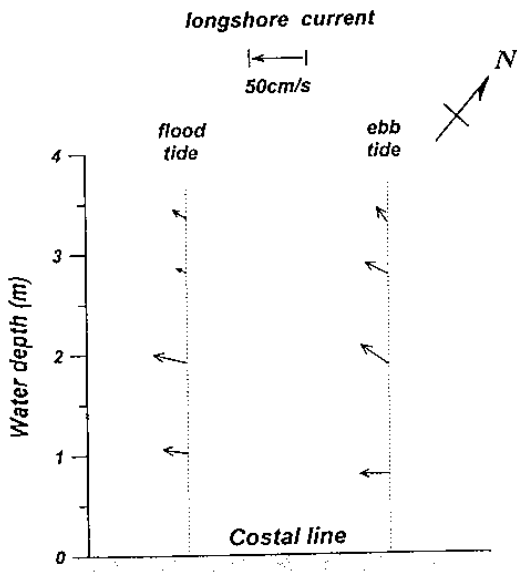


圖 3 測站 B 之沿岸流變化

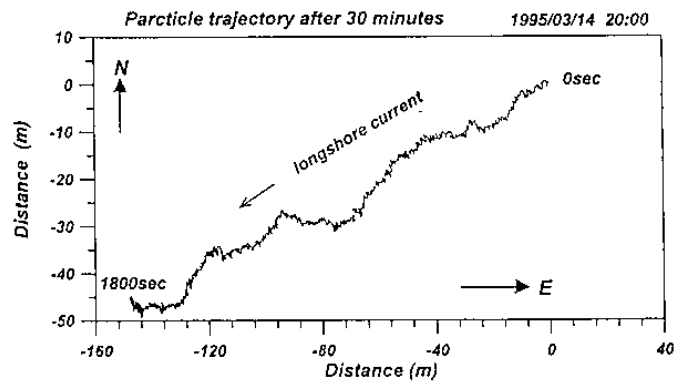


圖 6 沿岸流之水粒子流跡

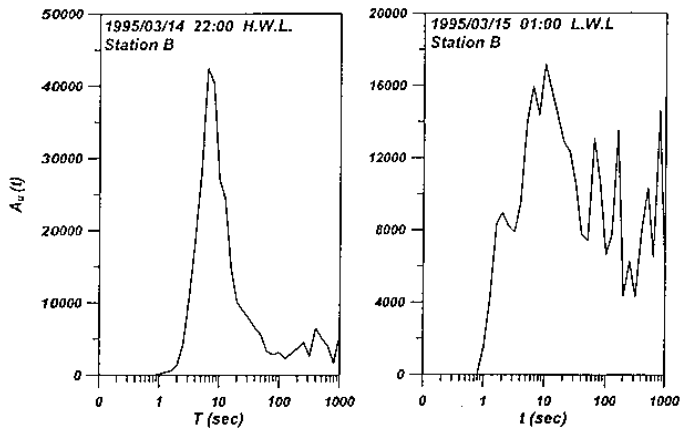


圖 7 不同潮位之流運動邊際能譜

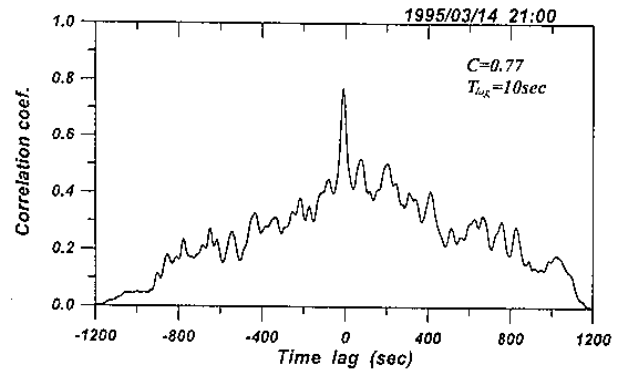


圖 9 群波與底床砂懸浮之相關性分析

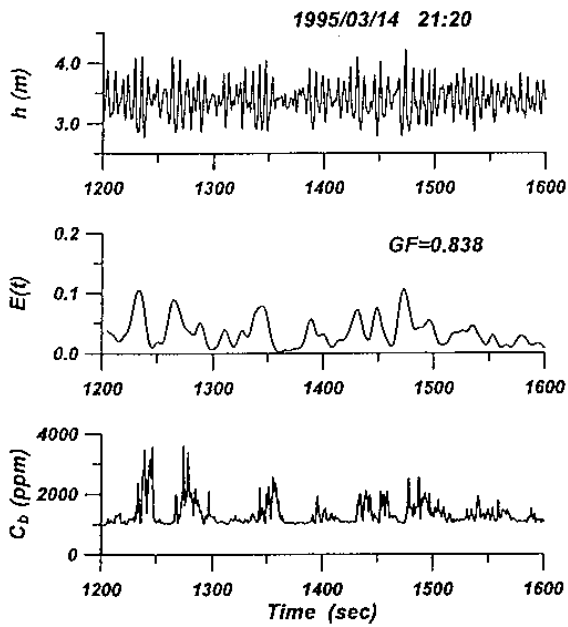


圖 8 群波與懸浮質濃度變化

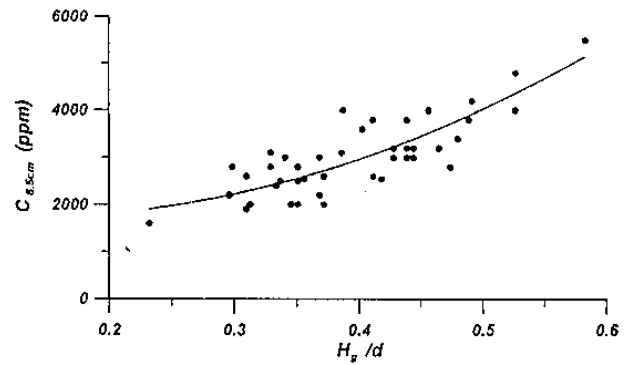


圖 10 懸浮砂濃度與群波及水深之關係