

99-73-7482

MOTC-IOT-98-H2DA001-4

臺灣港灣近岸海域漂沙調查研究 (1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99-73-7482

MOTC-IOT-98-H2DA001-4

臺灣港灣近岸海域漂沙調查研究 (1/4)

著 者：林柏青

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99 臺灣港灣近岸海域漂沙調查研究
(1/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009901779

定價 100 元

國家圖書館出版品預行編目資料

臺灣港灣近岸海域漂沙調查研究. (1/4) / 林柏青
著. -- 初版.-- 臺中市：交通部運研所，
民 99. 05

面；公分

參考書目：面

ISBN 978-986-02-3609-5 (平裝)

1. 海洋動力學 2. 海岸 3. 砂石 4. 數值分析
5. 臺灣

351.982

99009516

臺灣港灣近岸海域漂沙調查研究(1/4)

著 者：林柏青

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04) 26587190

出版年月：中華民國 99 年 5 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 100 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1009901779

ISBN：978-986-02-3609-5 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部
運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：臺灣港灣近岸海域漂沙調查研究(1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-02-3609-5(平裝)	政府出版品統一編號 1009901779	運輸研究所出版品編號 99-73-7482	計畫編號 98-H2DA001-4
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 總計畫主持人：何良勝 計畫主持人：林柏青 研究人員：林受勳、蔡瑞成 聯絡電話：(04)26587121 傳真號碼：(04)26560661			研究期間 自 98 年 01 月 至 98 年 12 月
關鍵詞：碎波帶、輸砂、剪應力			
摘要： 本研究於安平港南側海岸及臺北港北側之沙崙海灘分別進行碎波帶漂沙觀測，安平港南側海岸之砂中值粒徑較小，粒徑分佈範圍較寬，細砂質多，沉降較慢，碎波帶坡降約為 3/40，碎波形式主要為捲波型碎波，漂沙營力主要來自底床剪應力；臺北港北側沙崙海岸之砂中值粒徑較大，粒徑分佈範圍較窄，細砂質少，沉降較快，碎波帶坡降約為 1/27，碎波形式主要為溢波型碎波，但二次碎波中夾雜著似捲波型碎波，漂沙營力主要來自似捲波型二次碎波之垂直底床衝擊力。 本研究目的是根據現場觀測之剪速度與懸浮總砂量關係得出其經驗式，應用上可提供各港務單位於探討近岸輸砂量推算與海岸漂沙數值模擬之參考。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
99 年 5 月	78	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Near-shore Investigation of Sediment Transport in Taiwan Harbor Areas (1/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-02-3609-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009901779	IOT SERIAL NUMBER 99-73-7482	PROJECT NUMBER 98-H2DA001-4
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-fang Chiu PROJECT ADVISOR: Liang-Sheng Ho PRINCIPAL INVESTIGATOR: Po-Ching Lin PROJECT STAFF: Shou-Shiun Lin, Juei-Cheng Tsai PHONE: 04-26587121 FAX: 04-26560661			PROJECT PERIOD FROM January 2009 TO December 2009
KEY WORDS: Surf zone; Sediment transport; Shear stress			
ABSTRACT: This study investigates mechanisms for stirring and transporting suspended sediment in the surf zone using high frequency field measurements of horizontal and vertical flow velocities, water depths and sediment concentration profiles. The field data suggests that bed shear stress and vertical velocity can be important to the process of sediment suspension. On steep beaches in the southern Anping coastal surf zone (slope degree is about 3/40), bed sediment is predominantly driven by shear stress. Whereas on gently sloping dissipative beach in the northern Tamsui (Shalun) coastal area, it is predominantly driven by downward vertical velocity generated from secondary plunging breaker in the surf zone (slope degree is about 1/27).			
DATE OF PUBLICATION May 2010	NUMBER OF PAGES 78	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
表目錄.....	IV
圖目錄.....	V
第一章 前言.....	1-1
第二章 理論說明.....	2-1
2.1 碎波與底床輸砂推算.....	2-1
第三章 現場海域漂沙調查與分析.....	3-1
3.1 安平測站現場觀測與分析.....	3-1
3.1.1 灘線侵淤變化.....	3-1
3.1.2 近岸流觀測.....	3-3
3.1.3 碎波帶觀測與分析.....	3-10
3.2 淡水測站現場觀測與分析.....	3-24
3.2.1 現場觀測作業.....	3-24
3.2.2 資料分析與討論.....	3-28
第四章 結論與建議.....	4-1
4.1 結論.....	4-1
4.2 成果效益及後續應用情形.....	4-2
參考文獻.....	5-1

表目錄

表 3.1 底質取樣之粒徑分析	3-2
-----------------------	-----

圖目錄

圖 1.1 現場觀測位置說明	1-2
圖 1.2 現場觀測基線之灘面及海面下底床地形	1-3
圖 1.3 濁度計 ALC330 之率定曲線	1-4
圖 1.4 現場組裝之觀測儀器組	1-5
圖 1.5 淡水河口 SPOT 衛星影像(洪，2000/9/23。10:44AM，當日初滿潮，6：58AM)	1-6
圖 1.6 淡水河口福衛二號衛星影像(2006/8/1，10:01AM。當日初滿潮 4：34 AM)(中央大學太空遙測中心提供)	1-7
圖 1.7 臺北港北側之沙崙觀測站位置	1-9
圖 1.8 淡水河口北側之沙崙海岸觀測儀器安裝作業情形	1-10
圖 1.9 安裝完成之碎波帶內觀測儀器	1-10
圖 1.10 淡水測站觀測儀器組合說明	1-11
圖 3.1 基線上 0 m 高程點位置變遷圖	3-4
圖 3.2 安平港南側海岸沿岸單位寬侵淤量變化	3-5
圖 3.3 安平港南側海岸近岸 $x=100$ m 測站之水位變化	3-5
圖 3.4(a) 時段 A 東西向之剖面流時序列變化	3-6
圖 3.4(b) 時段 B 東西向之剖面流時序列變化	3-7
圖 3.4(c) 時段 C 東西向之剖面流時序列變化	3-7
圖 3.5(a) 時段 A 南北向之剖面流時序列變化	3-8
圖 3.5(b) 時段 B 南北向之剖面流時序列變化	3-8
圖 3.5(c) 時段 C 南北向之剖面流時序列變化	3-9
圖 3.6(a) 安平近岸之離岸流與底潮流	3-9
圖 3.6(b) 近岸裂流之南北向剖面流場分佈	3-10

圖 3.7(a) 近岸碎波帶內沿岸方向之流場分量分佈圖	3-12
圖 3.7(b) 近岸碎波帶內向離岸方向之流場分量分佈圖	3-12
圖 3.8 在 $x = 110\text{ m}$ 測點之 (a) 沿岸方向 (正值向北) 與 (b) 向離岸 方向 (正值向岸) 之流速時序列變化	3-13
圖 3.9 離岸不同距離測點沿岸方向流速分量之 FFT 分析結果.....	3-14
圖 3.10 基線上各測點沿岸流速分量之長週期振幅分佈.....	3-15
圖 3.11 2008/3/19 沿觀測基線之觀測結果.....	3-17
圖 3.12 剪速度與總懸浮砂量之相關性分析 (x 軸單位為秒, y 軸為其 相關性 R 值).....	3-18
圖 3.13 剪速度與剖面懸浮質濃度分佈之時序列分佈 ($x = 10\text{ m}$)...	3-21
圖 3.14 剪速度 U^* 與底床上單位面積懸浮砂量 Q 之時序列變化	3-23
圖 3.15 無因次剪速度與懸浮砂體積濃度之相關性.....	3-24
圖 3.16 臺北港北側之淡水觀測站位置	3-25
圖 3.17 淡水河口北側之沙崙海岸觀測基線.....	3-25
圖 3.18 淡水觀測站底床地形變化及測點位置	3-26
圖 3.19 淡水測站碎波帶內底質粒徑分析	3-26
圖 3.20 淡水測站之 Vector 三維督卜勒超音波式流速計	3-27
圖 3.21 Vector 流速計探頭測點示意圖	3-28
圖 3.22 碎波帶內波浪前進之狀態變化.....	3-29
圖 3.23 碎波帶內白沫狀波列	3-30
圖 3.24 似捲波型二次碎波	3-30
圖 3.25 碎波帶內單純衝擊波通過儀器位置.....	3-31
圖 3.26 碎波帶內溢波型二次碎波通過儀器位置.....	3-31
圖 3.27 碎波帶內似捲波型二次碎波通過儀器位置.....	3-32

圖 3.28 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈.....	3-33
圖 3.29 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈.....	3-35
圖 3.30 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈.....	3-36
圖 3.31 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈.....	3-37
圖 3.32 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈.....	3-39
圖 3.33 底床上 10 cm 處之水平流速變化.....	3-40
圖 3.34 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈.....	3-41
圖 3.35 底床上 10 cm 處之水平流速變化.....	3-42
圖 3.36 碎波帶內垂直灘線上輸砂率與輸砂方向變化.....	3-43

第一章 前言

臺灣西南部海岸在地殼運動上是屬於上升地形，於十七世紀初葉，臺南、岡山一帶曾有優良港灣，可泊大型帆船，近海貿易興盛。後來因河川輸砂量豐富，沿岸漂沙淤積，產生許多沙洲，沙洲群不斷成長逐漸與岸連接形成感潮湖，經移民開墾後變成海埔新生地。至二十世紀，因工商業發展及人口成長，河川上游興建水庫或攔砂壩，大量減少由河口出海之沙源，加上沿岸諸多工商、漁港，大型突堤阻斷沿岸漂沙的平衡傳遞，造成海岸侵蝕或淤積現象。台南黃金海岸即為其中之一典型案例，該海岸早期有廣大沙灘，近年來因二仁溪口出海沙源減少，河口以南海岸都已設置離岸堤發揮定砂作用，而黃金海岸北方 4 km 有安平商港防波堤阻斷沿岸漂沙的北移或南下。依海岸地理位置看，本區海岸屬為一半封閉型海岸，然而在全年吹風能量以西南風為優勢的季風作用下 (林等，2006)，以及北邊防波堤對東北季風的遮蔽效應使沿岸漂沙優勢方向為向北。長期下來，二仁溪河口北側海岸遂逐漸遭受侵蝕，而北邊安平商港防波堤南側則形成淤積。

根據港研中心 (2003) 在安平海域之觀測樁測量及蘇等 (2002) 的分析，當地平均潮差約 0.50 m，平均最大潮差約 1.01 m。冬季之平均 $H_{1/3}$ 波高為 0.45 m，春季為 0.39 m，夏季最大，達到 0.91 m，秋季則為 0.58 m；週期約 3~6 秒。波向則以冬季的 NNE、NE 方向及夏季的 SW 方向為主。另外，由岸沿垂直海岸線至水深 20 m，離岸約 7 km 底質取樣分析結果，碎波帶內 D_{50} 為 0.251 mm (林等，2002)。而由林等 (2006) 在黃金海岸同一試驗場地進行的長期灘面測量，顯示灘面會隨季節發生侵淤現象，碎波帶附近底床坡度約為 3/40，灘面坡度較陡約為 2/15。

1.1 安平測站設置與觀測作業

為瞭解台南安平港附近海域之近岸流場及碎波帶內之漂沙現象，港研中心自 2005 年 11 月起在安平港南側佈設一由岸垂直向海的觀測基線，位置如圖 1.1 所示，並在基線上適當位置安裝多部流速儀、水位計及濁度計等進行觀測，同時定期量測其高程變化，基線全長 250 m 包含寬約 50 m 的陸上灘面。由岸向海方向基線之灘面及海面下底床地形如圖 1.2，基線 0 點位置為設於灘面上之固定基準點，所有測點高程皆引自附近灣裡濱海陸橋之測地水準點 (G090)，Z 軸 0 點位於水面，向上為正。

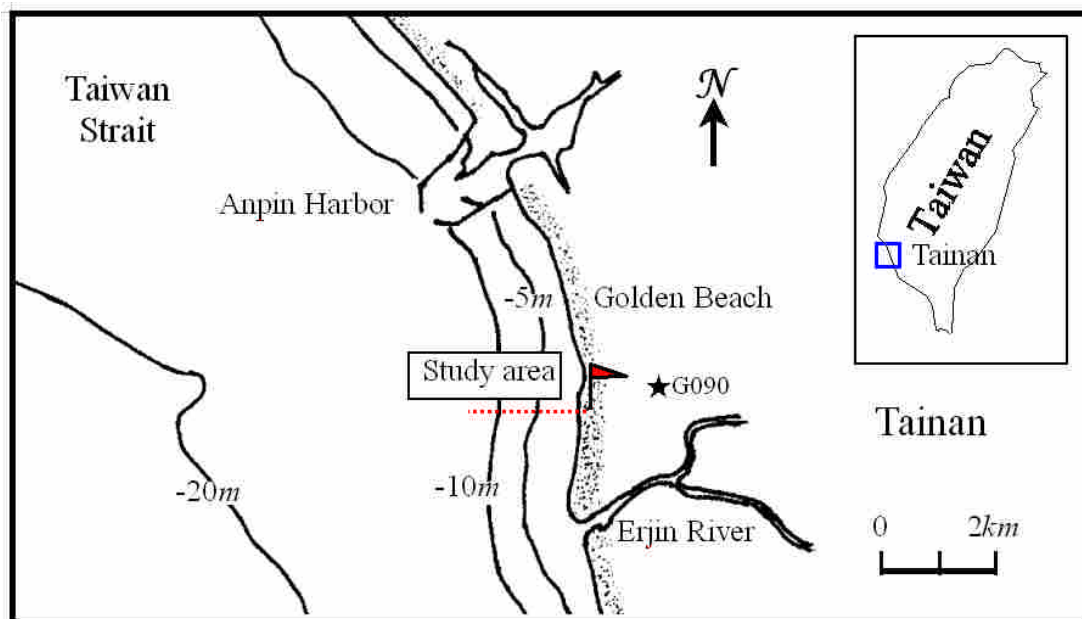


圖 1.1 現場觀測位置說明

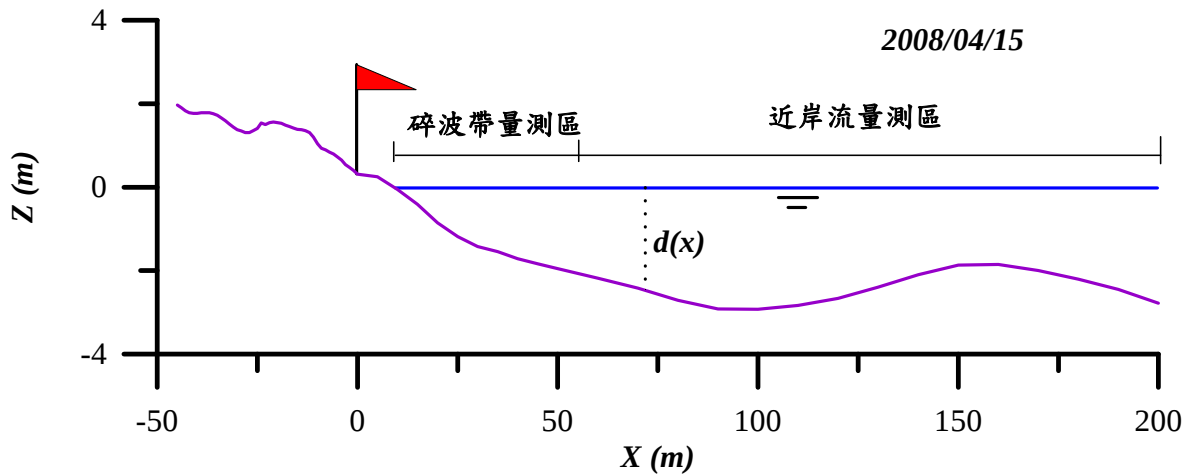


圖 1.2 現場觀測基線之灘面及海面下底床地形

海岸漂沙主要來自碎波帶之底砂懸浮與輸送，現場觀測儀器包括日製 ALEC 自記式小型電磁式流速計、濁度計、水位計、挪威 NORTEK 的 ADP (3MHz) 及 Aquadopp Profiler 剖面流速儀。水位計為壓力式，探頭向下，離底高 6.5 cm，6 具電磁式流速計量測瞬時流速，分別位於離底床高 10、29、39、48、68 及 85 cm 處；剖面流速儀則量測垂直剖面各流層之平均流速。另外，7 具光散射式濁度計分別安裝於離底 3、8、13、18、23、28 及 33 cm 高位置，底部 3 具屬於高濁度儀，量測範圍達 70,000 ppm。各濁度計皆以現場取得砂樣，調配不同濃度後進行率定，圖 1.3 為其中一部濁度計 ALC330 之率定曲線，其量測原理為量取水中懸浮物質對濁度計探頭光源之散射量變化。由於各儀器為獨立感應裝置，進行現場觀測前必須小心設定使所有儀器皆能同步運作。

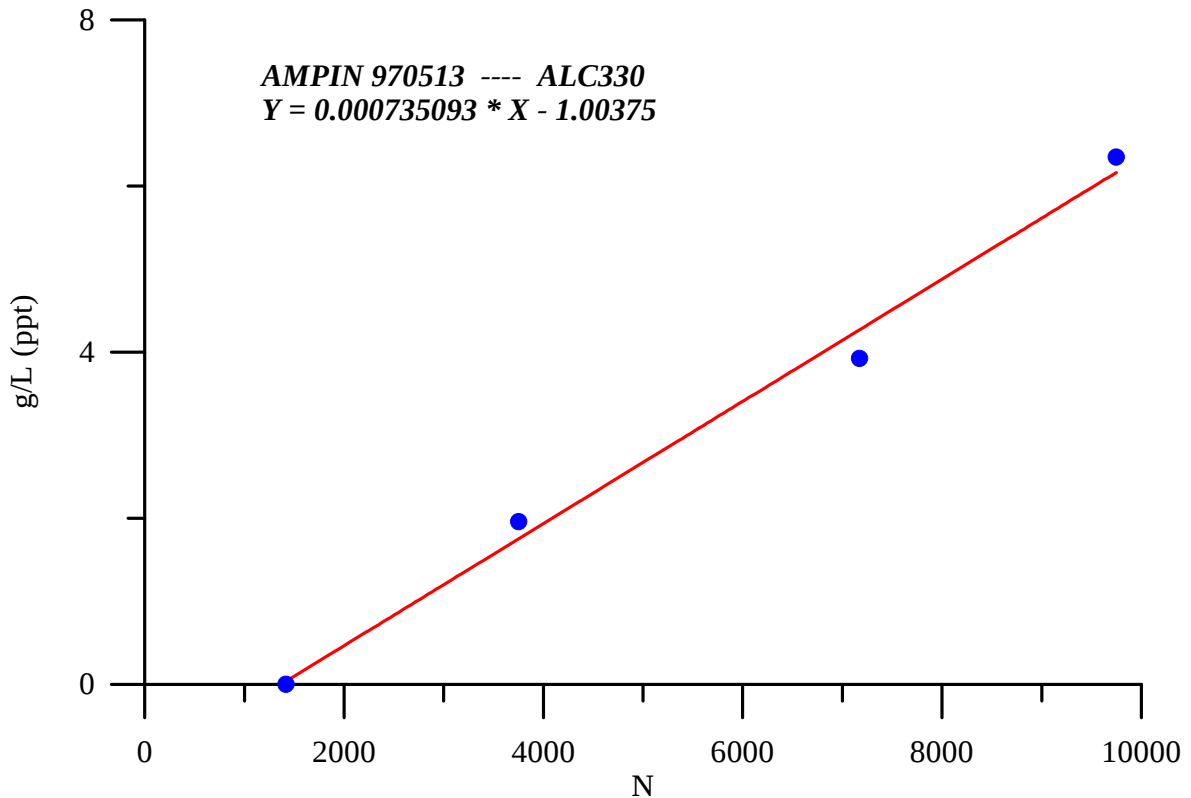


圖 1.3 濁度計 ALC330 之率定曲線

流速計與濁度計之取樣頻率同為 2 Hz，水位計則為 4 Hz；ADP 之垂直剖面流層間隔 20 cm，第一層之中心點離底高 1 m；Aquadopp Profiler 之流層間隔只有 10 cm，第一層中心點離底高 20 cm，可以量測得更詳細的剖面流場。現場作業時將所有儀器組裝在觀測架上，各儀器相關位置如圖 1.4 所示，現場觀測進行時將儀器組由岸向海沿著基線移動，同時以 1.5 m 長之鋼釘固定，避免被風、波浪與水流晃動而發生沉陷或移位情形，觀測架以間隔 1 m、2 m、5 m 或 10 m 間距移動，每測點量測時間限制在 3 分鐘以內，每次測程儘量維持在 1.5 小時內完成，避免因水位變動或天候改變，影響波浪或水流狀況，如此可以獲得基線斷面上由碎波帶延伸至外海 200 m 之流場、懸浮質濃度及波浪變化。

本研究自 2005 年 11 月起至 2009 年 10 月間除了對安平港南側海岸之垂直海岸基線進行定期測量，以瞭解現場之侵淤狀況外，同時針對碎波帶及近岸海域進行觀測。

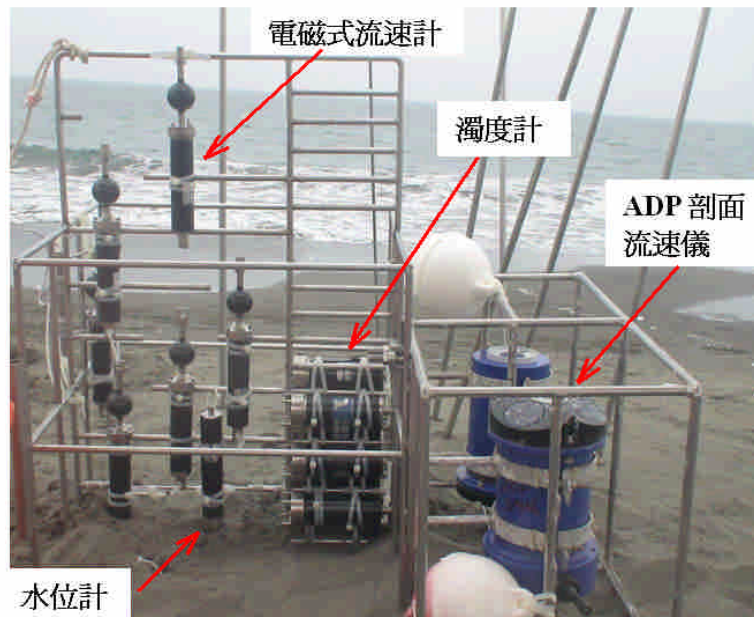


圖 1.4 現場組裝之觀測儀器組

1.2 淡水測站設置與觀測作業

河口為河川與海洋交匯之處，其流場主要受河川逕流、波浪、潮汐洋流、河口地形、鹽度及懸浮質所影響。河流之輸砂常在該處形成三角洲、沙洲、潮汐灘地等堆積型態。當泥砂淤積於河口，便受潮汐、洋流或沿岸流之搬運作用成為沿岸漂沙，對沿岸地形及港阜皆造成影響。另若河川供砂量遠大於波浪輸砂能力，則會在河口附近形成河岸三角洲或在沿岸流較緩的區位形成堆積海岸，反之則為侵蝕海岸。

淡水河口在 1960 年以前大致為淤積型態，往後則情況相反。原因為上游築壩攔砂、人為抽砂及海岸築堤建港改變沿岸輸砂平衡所致。1993 年淡水河口南側海岸興建臺北港後，其北防波堤凸出海岸達 1.6 公里，所造成之突堤效應使原先應緩慢淤積於河口以南海岸之漂沙先行落淤在北堤北側，不僅使臺北港以南海岸轉淤為侵，更可能危害南防波堤之穩定。由圖 1.5 之淡水河口 SPOT 衛星影像可看出北堤外側沙灘已浮現，海床亦趨淺化。



**圖 1.5 淡水河口 SPOT 衛星影像
(洪，2000/9/23。10:44AM，當日初滿潮，6：58AM)**

近年在臺北港北堤之突堤效應及淡水河上游颱風期間之輸砂供應作用下，泥砂逐漸淤積在河口內側左岸挖子尾地區及河口外側至北堤間之沙灘，如圖 1.6 所示。當適逢颱風暴潮，河口的淤淺是否將導致洪水宣洩困難，使淡水河兩岸及大臺北地區淹水潛勢升高，並影響臺北港航道之疏浚與鄰近海岸線的長期穩定，應予探討。同時，淡水河口之輸砂現象及其地形變遷趨勢更應深入分析且持續觀測，以因應可能發生之情況，防範未然。



圖 1.6 淡水河口福衛二號衛星影像
(2006/8/1，10:01AM。當日初滿潮 4：34 AM)
(中央大學太空遙測中心提供)

臺北港（原淡水港）位於淡水河口西南沿岸，後倚觀音山，前臨臺灣海峽。據既有文獻顯示：近十年來淡水河口以北海岸變化甚微，自挖子尾延伸至河口以南海岸則變動劇烈，主要原因為河源泥砂短少及臺北港北堤的出現所致。林銘崇（1989）以 HEC-6 一維模式計算淡水河口斷面之輸砂量，認為若海相條件不變，則河流輸砂僅影響河口以南海岸之變化。許硯蓀等（1993）使用人工岬灣理論推估河口及八里海岸之變化，認為淡水第二漁港（漁人碼頭）之興建使河口以南七公里內之海岸嚴重退縮，退縮程度並隨河源泥砂之供應有所增減。羅志堅（1995）以單線模式模擬河口附近海岸線之變化，結果顯示以北海岸呈

現沖淤動態平衡，以南海岸則具後退之趨勢，進而推測不論河川輸砂影響為何，十年後以南海岸仍將保有此趨勢。

以上模擬皆認為淡水河口以南海岸往後仍具退縮趨勢，主要模擬條件基於河源泥砂短少及海工構造物的出現。黃良雄 (2006) 蒐集並彙整十河局提供之淡水河口南北岸近海底床地形資料 (民國 75 年至 94 年)，以及淡水河系歷年河道斷面地形資料 (民國 58 年至 94 年)，初步分析河口地形之變動及沿岸侵淤趨勢，結果顯示淡水河口在臺北港未興建前已有淤積產生，由此推測水庫興建後某時間點河流輸砂量曾經增加。

李錫堤 (1998) 認為自 1994 年後，臺北港各期工程之動作及北防波堤的興建可阻擋沿岸漂沙及淡水河之輸砂，繼而評估建港後海岸將由原來之侵蝕型轉為淤積型態，並使河口內側淺灘擴大，河道增長窄縮，河口範圍逐漸外移。邱永芳等 (2000) 認為臺北港建後在淡水河口內側左岸將因淤積形成沙洲，低潮時可露出水面，且該區域之河床具季節性變化；另外在河口西南之林口發電廠前方海域亦有沙洲形成，顯示有離岸漂沙活動，同樣具季節侵淤變化。魏震 (2001) 根據 Savage 公式及改良之 Bijker 公式計算得到：臺北港建後，全年波浪可推動 164 萬立方公尺之漂沙量，少於淡水河系年平均輸砂量 185 萬立方公尺，故海岸應逐漸淤積。黃良雄 (2006) 使用動床條件輔以擬三維河口水動力計算模式評估河口輸砂情況，同樣得到河口段淤積之推論。

對於海岸地形之影響除了河川輸砂外，波浪作用力產生之沿岸漂沙或向離岸輸砂對於海岸侵淤變化也是重要影響因素。臺北港位於淡水河口南側，本研究於淡水河口北側之沙崙海灘設置觀測站，如圖 1.7。測站上由岸向海建立一觀測基線，基線長約 100 m，垂直海岸向外。圖 1.8 為基線上觀測儀器安裝作業情形，圖 1.9 則為碎波帶內安裝完成之觀測儀器。現場進行近岸碎波帶內波浪、流及懸浮質濃度分佈量測以瞭解碎波作用與當地海岸漂沙之關係。圖 1.10 為淡水測站之觀測儀器組合，包含流速計陣列，由 5 支電磁式流速計、1 支三維超

音波式流速計及剖面流速儀等組成，測點分別位於底床上 2 cm、5 cm、10 cm、20 cm、35 cm、50 cm 等處，取樣頻率有 2 Hz 及 8 Hz 兩種；濁度計陣列則包含 4 支光散射式濁度計，測點分別位於底床上 8 cm、18 cm、28 cm、38 cm 等處，取樣頻率 2 Hz，以及 2 支 OBS 濁度計，測點在底床上 1 cm 及 3 cm 位置，取樣頻率 8 Hz；以及 1 支壓力式水位計，取樣頻率 10 Hz。另外還安裝底床攝影裝置，觀察現場底床砂粒運動，所有儀器設備皆以同步方式獨立運作。



圖 1.7 臺北港北側之沙崙觀測站位置



圖 1.8 淡水河口北側之沙崙海岸觀測儀器安裝作業情形



圖 1.9 安裝完成之碎波帶內觀測儀器

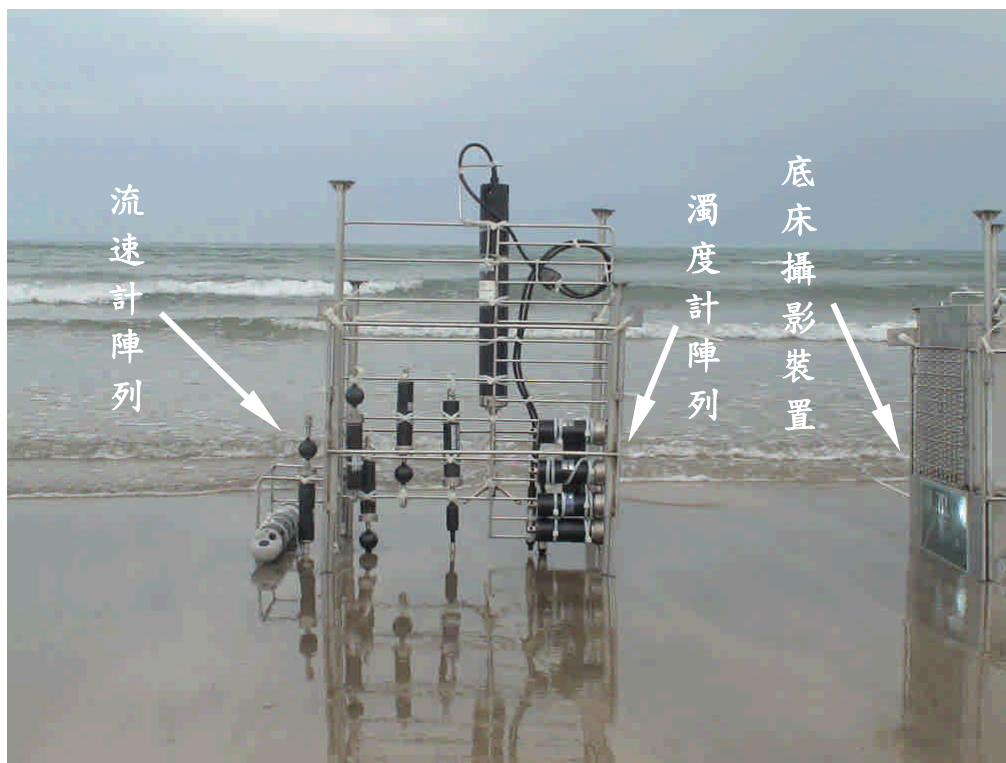


圖 1.10 淡水測站觀測儀器組合說明

第二章 理論與說明

波浪由深海傳播至淺海時，因水深逐漸變淺，其波長減少、波高增大且波速變小。波浪形態呈現波峰尖銳度 (wave steepness) 增加，波谷平緩，波形前後不對稱之不穩定情況，其前緣較後面陡。當波形超出安定界限時，波峰前傾捲入空氣，波浪形態破碎稱為碎波 (wave breaking)。此時約有 60 % 之波浪能量逸出，對於沿岸流、近岸漂沙、及海域地形變化有極大之影響。

2.1 碎波與底床輸砂推算

波浪於近岸開始碎波處稱為碎波點 (breaking point)，此時之水深稱為碎波水深 (breaking depth)，波高為碎波波高 (breaking wave height)，由起始碎波點至岸或灘線間區域稱為碎波帶 (surf zone)，是沿岸流與近岸漂沙之主要活動區域。

表示波浪碎波之極限稱為碎波指標 (breaking criteria)，一般可由水深、波高、波長或動力安定等相關參數求出。如波峰水平流速大於波速，即 $u_m > C$ 時，則發生碎波；或是波浪尖銳度，即波高與水深之比值，超出某一極限值時會發生碎波，此一極限值稱為碎波指標。

$$\gamma = \frac{H}{d} \quad (2-1)$$

McCowan (1984) 與 Miche (1944) 不考慮底床坡度，提出碎波指標公式分別為

$$\gamma_b = 0.78 \quad (2-2)$$

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} = 0.142 \frac{L_b}{d_b} \tanh \frac{2\pi d_b}{L_b} \quad (2-3)$$

其中 d_b 與 L_b 分別為碎波點之水深與波長。但是一般近岸海灘有

海底波降，入射波之波高與週期極不規則，由理論求碎波臨界非常困難。合田氏 (Goda, 1970) 整理實驗室與現場觀測結果，迴歸出經驗公式

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} = A \left\{ 1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi d_b}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{4/3} \beta \right) \right\} \right\} \quad (2-4)$$

式中， A 值介於 0.12 ~ 0.18 之間。Sunamura (1983) 則提出較簡化之經驗公式

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} = 1.09 \tan^{0.19} \beta \left(\frac{d_b}{L_0} \right)^{-0.1} \quad (2-5)$$

Isobe (1987) 利用紊流觀念推導波峰處水平流速與波速比值，獲得碎波指標公式為

$$\gamma_b = 1.06 - 0.6 \exp \left\{ -3 \sqrt{\frac{d_b}{L_0}} + \tan^{3/2} \beta \exp \left[-45 \left(\sqrt{\frac{d_b}{L_0}} - 0.1 \right)^2 \right] \right\} \quad (2-6)$$

計算海域波場之碎波點位置時，須比較 γ 與 γ_b 值，若 $\gamma > \gamma_b$ 則最大水深位置即為起始碎波點，碎波點後必須考量因底床摩擦引起之波浪能量消散。若以深海波浪之相關物理量為參數，表示碎波波高與深海波高之比值，則碎波指標可由底床坡度和深海波浪尖銳度直接求出。Komar & Gaughan (1973) 以微小振幅波為基礎，由實驗數據迴歸出碎波指標之經驗公式

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.563 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.2} \quad (2-7)$$

如考慮底床斜坡時，Sunamura (1983) 及 Lé Méhauté & Koh (1967) 分別提出下列公式

$$\frac{H_b}{H_0} = \tan^{0.2} \beta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad (2-8)$$

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76 \tan^{1/7} \beta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad (2-9)$$

當波浪斜向入射斜坡底床時，Lé Méhauté & Wang (1980) 提出包含折射係數之碎波指標公式

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76 \cos^{1/7} \alpha_b \tan^{1/7} \beta K_R^{0.75} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad (2-10)$$

其中 α_b 為碎波點之波向角，結合式 (2-4) 與式 (2-9)，可得碎波水深為

$$\frac{d_b}{L_0} = - \frac{\ln \left[1 - 4.47 \tan^{1/7} \beta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.75} \right]}{1.5\pi \left[1 + 15 \tan^{4/3} \beta \right]} \quad (2-11)$$

碎波型式會因深海波浪尖銳度及底床坡度不同而不同，Galvin (1968) 提議將碎波型式區分為四個類型。

1. 溢波 (spilling breaker)：當外海波浪尖銳度較大之波浪入射於底床坡度較緩之海岸時，波型由波峰處開始崩潰，峰頂因空氣捲入形成白浪，此種碎波型式稱為溢波。
2. 捲波 (plunging breaker)：波形坡降較緩，即尖銳度較小之波浪入射於底床坡度較陡之海岸時，波頂速度較波谷為快，波峰前緣因此突出成捲舌狀，捲入大量空氣並以強烈碎波力衝擊底床或海岸結構物，產生之碎波回流 (return flow) 流速強，容易形成離岸潛沒沙洲 (sand bar)。
3. 湧波 (surging breaker)：尖銳度非常小之波浪進入底床坡度極陡之海岸時會發生。接近海岸時，波形前緣逐漸變陡，前後非對稱，碎波後向岸湧上形成衝擊波 (bore) 而溯昇至斜面。
4. 潰波 (collapsing breaker)：介於捲波與湧波之間，似乎只在海灘斜面

上生成碎波的一種臨限狀態碎波，此時灘面對入射波浪有較大反射率。

碎波型式與碎波帶內之物理現象關係密切，Battjes (1974) 提議以碎波相似參數 (surf similarity parameter) 來判別碎波型式。

$$\xi_o = \tan \beta \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{-0.5} \quad (2-12)$$

$$\xi_b = \tan \beta \left(\frac{H_b}{L_o} \right)^{-0.5} \quad (2-13)$$

溢波型碎波： $\xi_o < 0.5$ 或 $\xi_b < 0.4$

捲波型碎波： $0.5 < \xi_o < 3.3$ 或 $0.4 < \xi_b < 2.0$ (2-14)

湧波型碎波： $\xi_o > 3.3$ 或 $\xi_b > 2.0$

海岸漂沙之起因雖然來自波浪能量，但懸浮漂沙受近岸流系統攜帶輸送，如果局部進出砂量無法平衡則會形成侵淤現象。近岸流系統包括天文潮之潮流、風吹流、附近河川因淡水流出或含大量懸浮質形成之河口浮流 (river plume)、波浪碎波引起之沿岸流以及裂流 (rip current) 等。另外，海岸地區常見的內重力波 (infragravity waves) 及緣波 (edge waves) 之振盪流現象對於碎波帶漂沙與分佈也有部份影響 (Aagaard & Greenwood, 2008)。以上許多現象亦同樣出現在安平港海域之近岸流系統中，本文將於現場觀測分析一節再詳述說明。

沿岸輸砂主要是由沿岸流提供驅動泥沙的動力所造成，Longuet-Higgins (1964) 以輻射應力的觀念，藉由動量方程式解析沿岸流的分佈特性並推導出沿岸流分佈的理論解。

$$V = \begin{cases} \frac{1}{1 - \frac{5P}{2}} X + \frac{1}{1 - \frac{5P}{2}} \left[\frac{(P_2 - 1)}{(P_1 - P_2)} \right] X^{P_1} & 0 \leq X < 1 \\ \frac{1}{1 - \frac{5P}{2}} \left[\frac{(P_1 - 1)}{(P_1 - P_2)} \right] X^{P_2} & X > 1 \end{cases} \quad (2-15)$$

其中

$$P_1 = \frac{-3}{4} + \sqrt{\frac{9}{16} + \frac{1}{P}} \quad (2-16)$$

$$P_2 = \frac{-3}{4} - \sqrt{\frac{9}{16} + \frac{1}{P}} \quad (2-17)$$

$$P = \frac{\pi N \tan \beta}{2m f_w} \quad (2-18)$$

式中 $\tan \beta$ 為底床坡度， f_w 為摩擦因子， $X = \frac{x}{x_b}$ 為由岸向海之無因次座標。

海岸漂沙可分為向離岸及沿岸輸砂，向離岸輸砂一般只會造成海岸短期的地形及底床變化；而沿岸輸砂才是形成海岸長期侵淤的主要因素。最廣泛使用的沿岸輸砂公式為 CERC 公式 (USACE,1984)，其根據沿岸波能推算沿岸輸砂率如下：

$$Q_{lst} = \frac{\rho K \sqrt{g/\gamma_b}}{16(\rho_s - \rho)(1-a)} H_{s,b}^{2.5} \sin(2\theta_b) \quad (2-19)$$

Q_{lst} 為沿岸體積輸砂率， K 是經驗常數， ρ 與 ρ_s 分別為水與砂之密度， $a(\doteq 0.4)$ 為砂之孔隙率， $H_{s,b}$ 為碎波點示性波高， γ_b 是碎波指標， θ_b 則為碎波點波前與岸之夾角。 K 值隨地點或底質條件而改變。而碎波點波向也會因入射波浪之群波效應，出現碎波點移位及折射角度改變情形。

Inman and Bagnold (1963) 認為波能將砂粒懸浮後，任何單向流加

上水粒子之波動才是帶動輸砂的主要因素，根據其理論

$$Q_{lst} = \frac{K_b}{g(\rho_s - \rho)(1-a)} C_{gb} E_b \cos \theta_b \left(\frac{V_l}{u_o} \right) \quad (2-20)$$

E_b 是碎波波能， C_{gb} 是碎波點群波速度， V_l 是碎波帶內沿岸流流速， u_o 是碎波帶底床最大波動水粒子速度， K_b 為經驗常數。還有許多其他經驗公式，但一般都未能考慮風及潮流的影響，尤其是經常發生於平直海灘的淺灘動盪 (surf beat)、緣波或離岸流等對輸砂之影響。大部份漂沙現象發生在碎波帶內，實際沿岸輸砂率可由懸浮質濃度與沿岸流速的積分求得

$$Q_{lst} = \int_{x_o}^{x_b} \int_{-d(x)}^0 c(x, z) V(x, z) dz dx \quad (2-21)$$

x_o 與 x_b 分別為水深 0 點與碎波點位置， $d(x)$ 為 x 位置之水深。本研究首先探討現場觀測得之近岸流場以及碎波帶內之流場與懸浮質濃度分佈，最後以造成底質懸浮的剪速度求相關懸浮砂量，可作為沿岸輸砂推算之參考。

碎波帶內之輸砂狀態主要包括底床載、懸浮載以及薄層流輸砂，Shields 曲線通常用於決定發生底床載之臨界值，Li et al. (1997) 根據紊流速度之垂直向上分量約等於顆粒沉降速度時會發生懸浮輸砂，推算當砂粒粒徑為 0.34 mm 時，其懸浮載之臨界 Shields 數 $\Phi_{crs} = 0.23$ ，臨界剪速度 $u_{*crs} = (\tau_{crs} / \rho)^{0.5} = 3.49 \text{ cm/s}$ ，其中

$$\Phi_{crs} = \frac{\tau_{crs}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} = \frac{u_{*crs}^2}{(s-1)gD_{50}} \quad (2-22)$$

ρ_s 與 ρ 分別為砂粒與流體密度， g 為重力加速度， D_{50} 為顆粒平均粒徑。由於碎波帶流況複雜，上層有向岸方向之溯昇流，底層則有向海方向的底迴流 (undertow) 造成之分流現象，本文計算漂沙剪速度時以最接近底床之流速資料 ($h = 10 \text{ cm}$) 為主。假設底床附近之流速為對數分佈，根據 Yu and Tan (2006) 底床剪速度之單點計算方法，

$$u_* = \frac{\kappa u}{\ln(h) - \ln(K_s) + 3.408} \quad (2-23)$$

其中， u 為離底高 h 點之流速， $\kappa=0.405$ 為 von Karman's 常數，根據 Perlin and Kit (2002)，底床粗糙高 $K_s=0.25D_{50}$ 。

第三章 現場海域漂沙調查與分析

海岸地區因潮位變動、水流及波浪作用而移動的砂稱為漂沙 (sand drift)。發生漂沙現象時，若無河川持續供給砂源，岸邊則逐漸發生侵蝕現象，但在漂沙流動終止地區，則會出現堆砂淤積現象。漂沙活動在垂直灘線方向，稱為縱向漂沙，只要沒有異常強烈之氣候現象，如颱風、土石流、大水災等，縱向漂沙為重覆移動之漂沙，不會伴隨長期之海灘變化。海灘會發生顯著變化主要是平行海岸線之沿岸漂沙所造成，此種海灘之侵蝕或堆積現象，可能隨著季節性氣候變化而改變。

本研究選擇安平測站及淡水測站進行觀測分析，即考量兩者分別位於臺灣南、北地區。除了地理位置不同外，季節性氣候以及沙灘特性也大不相同，以下分別敘述及比較兩測站進行之觀測分析結果。

3.1 安平測站現場觀測與分析

安平臺灣西南部海岸在地殼運動上是屬於上升地形，於十七世紀初葉，臺南、岡山一帶曾有優良港灣，可泊大型帆船，近海貿易興盛。後來因河川輸砂量豐富，沿岸漂沙淤積，產生許多沙洲，沙洲群不斷成長逐漸與岸連接形成感潮湖，經移民開墾後變成海埔新生地。至二十世紀，因工商業發展及人口成長，河川上游興建水庫或攔砂壩，大量減少由河口出海之沙源，加上沿岸諸多工商、漁港，大型突堤阻斷沿岸漂沙的平衡傳遞，造成海岸侵蝕或淤積現象。安平港南側海岸即為其中之一典型案例，該海岸早期有廣大沙灘，近年來因二仁溪口出海沙源減少，河口以南海岸都已設置離岸堤發揮定砂作用，而安平港南側海岸北方有安平商港防波堤阻斷沿岸漂沙的北移或南下。依海岸地理位置看，本區海岸屬為一半封閉型海岸，然而在全年吹風能量以西南風為優勢的季風作用下 (林等，2006)，以及北邊防波堤對東北季風的遮蔽效應使沿岸漂沙優勢方向為向北。長期下來，二仁溪河口北側海岸遂逐漸遭受侵蝕，而北邊安平商港防波堤南側則形成淤積。

根據港研中心 (2003) 在安平港海域之觀測樁測量及蘇等 (2002) 的分析，當地平均潮差約 0.50 m，平均最大潮差約 1.01 m。冬季之平均 H1/3 波高為 0.45 m，春季為 0.39 m，夏季最大，達到 0.91 m，秋季則為 0.58 m；週期約 3~6 秒。波向則以冬季的 NNE、NE 方向及夏季的 SW 方向為主。另外，由岸沿垂直海岸線至水深 20 m，離岸約 7 km 底質取樣分析結果，如表 3.1 所示，碎波帶內 D_{50} 為 0.251 mm (林等，2002)。而由林等 (2006) 在安平港南側海岸同一試驗場地進行的長期灘面測量，顯示灘面會隨季節發生侵淤現象，碎波帶附近底床坡度約為 $\frac{3}{40}$ ，灘面坡度較陡約為 $\frac{2}{15}$ 。計算其碎波相似參數 (surf similarity parameter) $\xi_o = 0.615$ ，根據 Battjes (1974) 之提議，當地之碎波型態為捲波型碎波。

表 3.1 底質取樣之粒徑分析

水深 (m)	0	-5	-10	-15	-20
距離 (km)	0	0.76	1.36	3.79	6.97
D_{50} (mm)	0.251	0.192	0.017	0.017	0.092

3.1.1 灘線侵淤變化

圖 3.1 為自 2005 年 11 月至 2008 年 8 月台南安平港南側海岸灘面垂直海岸基線上 0 m 高程位置的變化， $X=-60$ m 為海岸堤腳位置，灘面基線上 0 m 高程位置隨時間季節變遷，其高程測量由附近灣裡濱海陸橋之測地水準點 G090 引入。每年夏季此海岸線嚴重後退，雖然冬季時灘線會再向海方向延伸，但長期趨勢仍為侵蝕狀態，平均每年後退約 10 m。安平港南側海岸屬平直沙灘，故根據每月對灘面基線之剖面高程量測結果，計算灘面基線上 -50 m 至 +40 m 間之侵淤量 (沿岸每公尺) 之變化如圖 3.2 所示，亦即因沿岸輸砂不平衡造成

此海岸沿岸每公尺每年約 40 m^3 的侵蝕。影響海岸穩定的因子包括地形、風場、近岸流、入射波、底質特性及底床坡度等，因此有必要對其近岸流系統及波浪進入碎波帶後之流場分佈與懸浮輸砂特性作進一步探討。

3.1.2 近岸流觀測

由 2008/06/09 18:20 至 06/10 08:40 碎波帶外測站 $x = 100 \text{ m}$ ，水深約 3.5 m 處之水位時序列變化如圖 3.3。分別截取低平潮、漲潮及高平潮等 A、B、C 三個時段，圖 3.4 為該測站由 Aquadopp 在各個時段測得之東西向剖面流時序列變化，圖 3.5 則為各個時段之南北向剖面流時序列變化。由圖顯示，近岸地區在轉潮時，向北的漲潮流由表層流開始向下層發展；而向南的退潮流則由底層流開始向上層發展，向離岸流之速度分量約 $5\sim 10 \text{ cm/s}$ 明顯小於沿岸流速度分量。觀測時現場吹西南風，風速約 10 m/s ，受西南風之表層風吹流影響，向北最大流速位於表層，流速約 55 cm/s ；而向南最大流速則位於表層下約 1 m 多位置，流速約 30 cm/s 。顯示近岸淺水地區流速分層現象仍然相當明顯，而且風吹流影響深度至少有 1 m 。

由近岸 100 m (水深 3.5 m) 與離岸 4.2 km (水深約 17 m) 之觀測樁記錄比較，發現兩者潮位變化時間相近但近岸點潮流的變化則比觀測樁者提早約 $2\sim 3$ 小時。另外，近岸流系統還包括由岸將水帶至外海的離岸流 (rip current)，因其起源自碎波帶內，會將部份懸浮砂帶至碎波帶外。日野 (1974) 認為入射波浪之輻射應力導致水位上升為離岸流產生之主因，由於流場之不穩定性，沿岸每隔一段距離即會發生離岸流。Turner (2007) 由長期影像資料分析，認為離岸流發生的時間、地點及間隔不定，其位置主要是受海底地形影響。圖 3.6 為 2008/04/15 在基線上觀測得之離岸流，又稱裂流，東西向與南北向剖面流場分佈，正 X 軸指向外海方向。觀測樁示性波高約 51 cm ，週期 3.71 秒，由於外海 150 m 處有一沙洲隆起，沙洲前方因流場束縮，出現較大流速值約 42 cm/s ，而在 100 m 及 170 m 位置出現流場不連續，可能就是

近岸環流系統的邊界，或是離岸流彎延現象所造成。現場吹東北風，4 至 5 陣風 7 級，該離岸流場由岸向海直至離岸 200 m 外仍然存在。

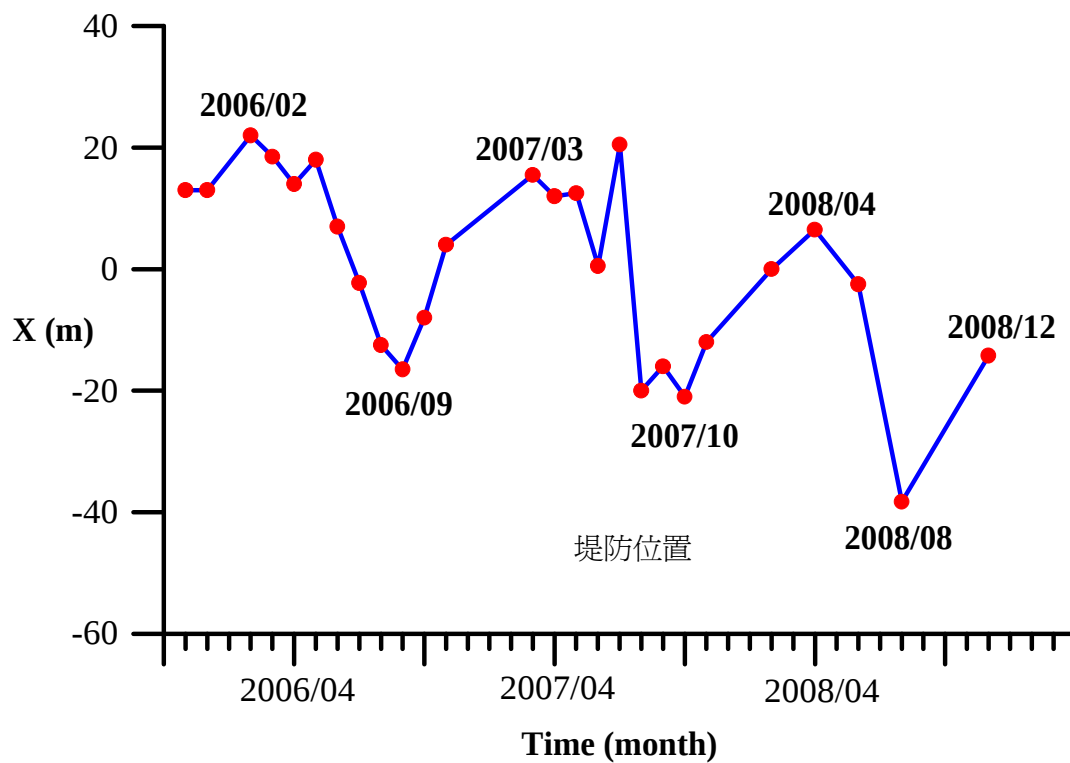


圖 3.1 基線上 0 m 高程點位置變遷圖

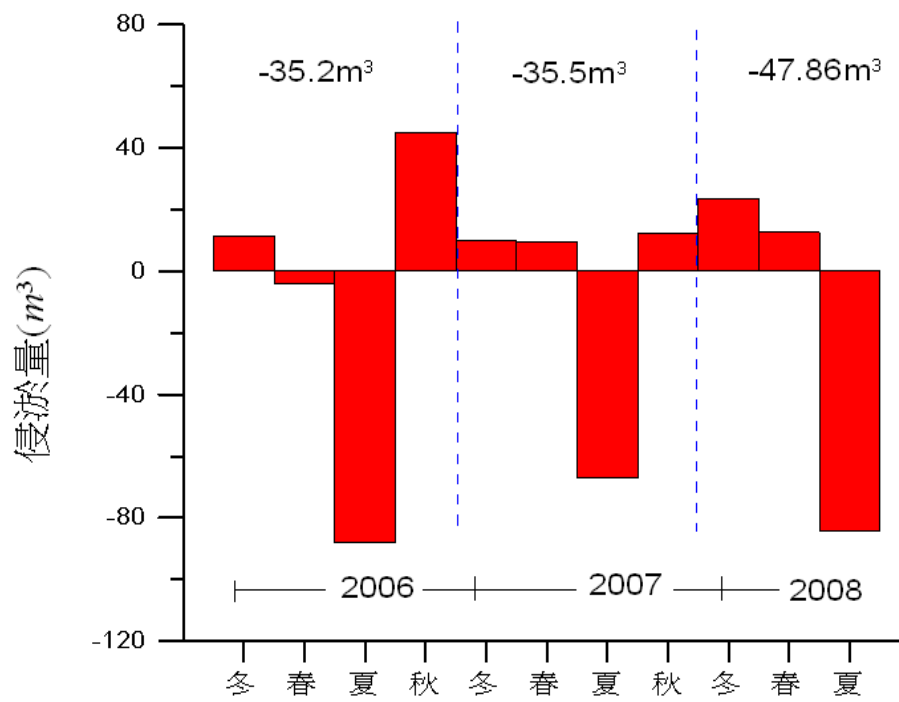


圖 3.2 安平港南側海岸沿岸單位寬侵淤量變化

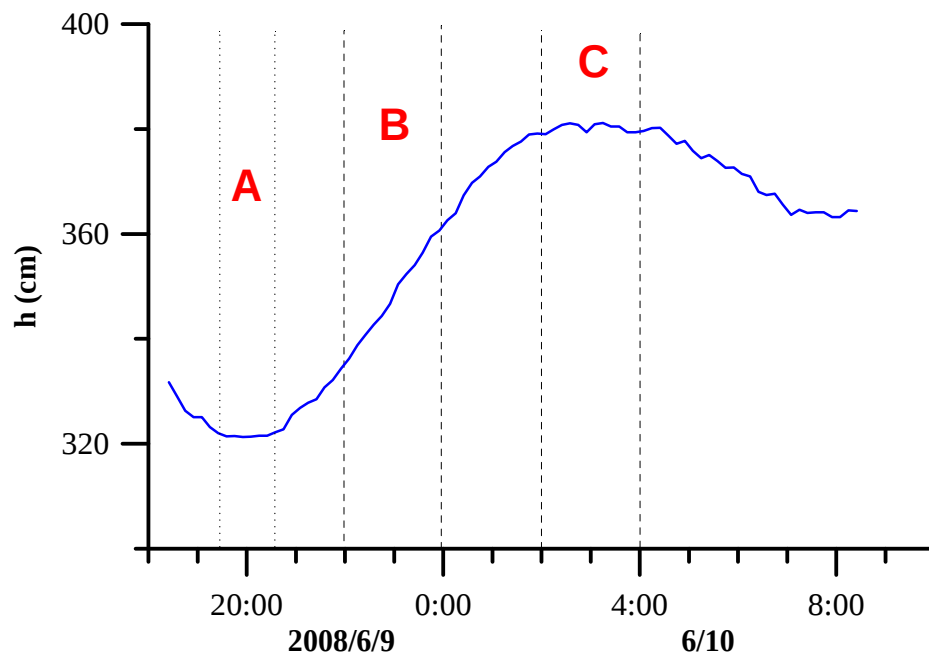


圖 3.3 安平港南側海岸近岸 $x=100$ m 測站之水位變化

東西向 [向離岸方向，岸在東方]

時段 A: 06/09/18:24 ~ 06/09/20:24

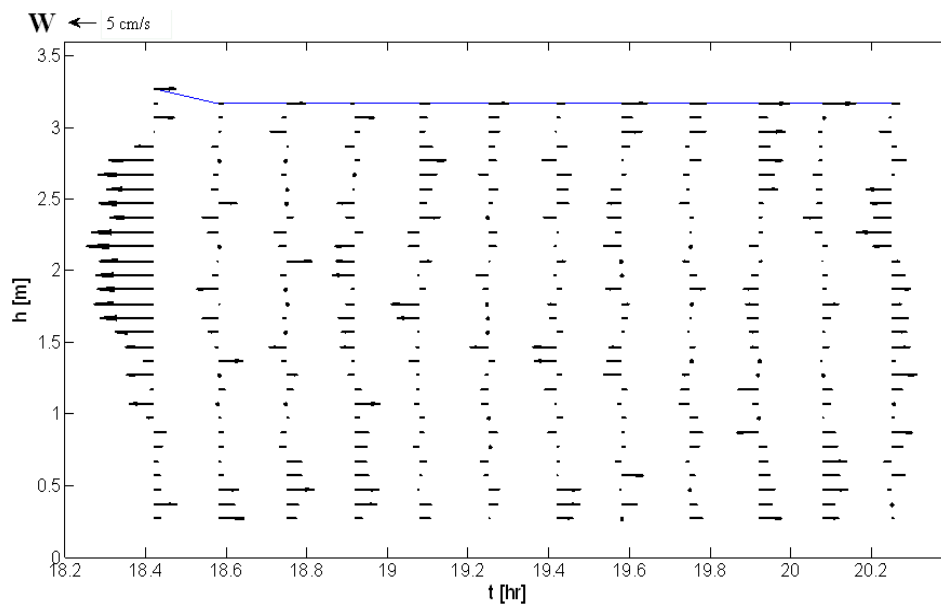


圖 3.4(a) 時段 A 東西向之剖面流時序列變化

時段 B: 06/09/22:00 ~ 06/09/24:00

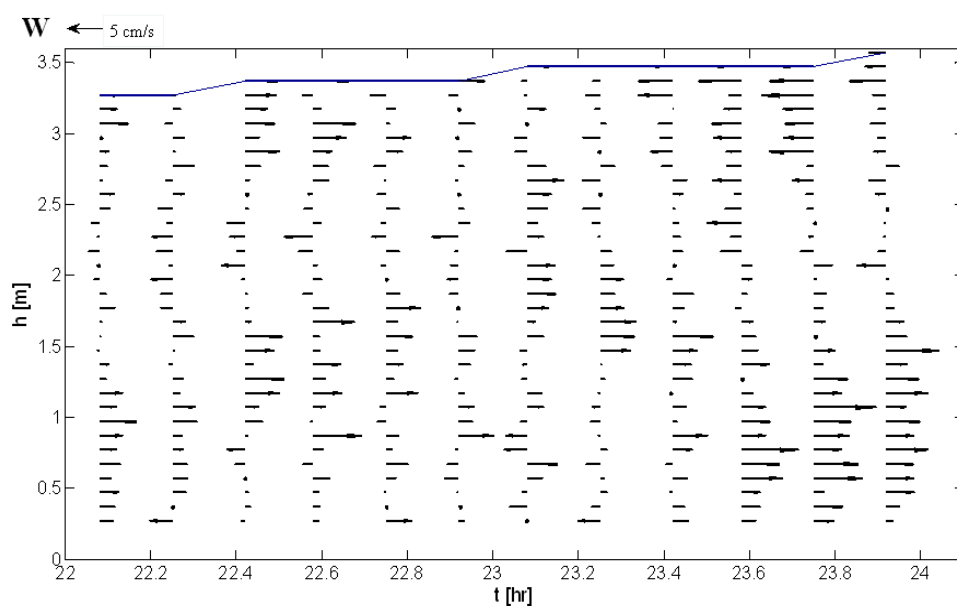


圖 3.4(b) 時段 B 東西向之剖面流時序列變化

時段 C: 06/10/02:00 ~ 06/10/04:00

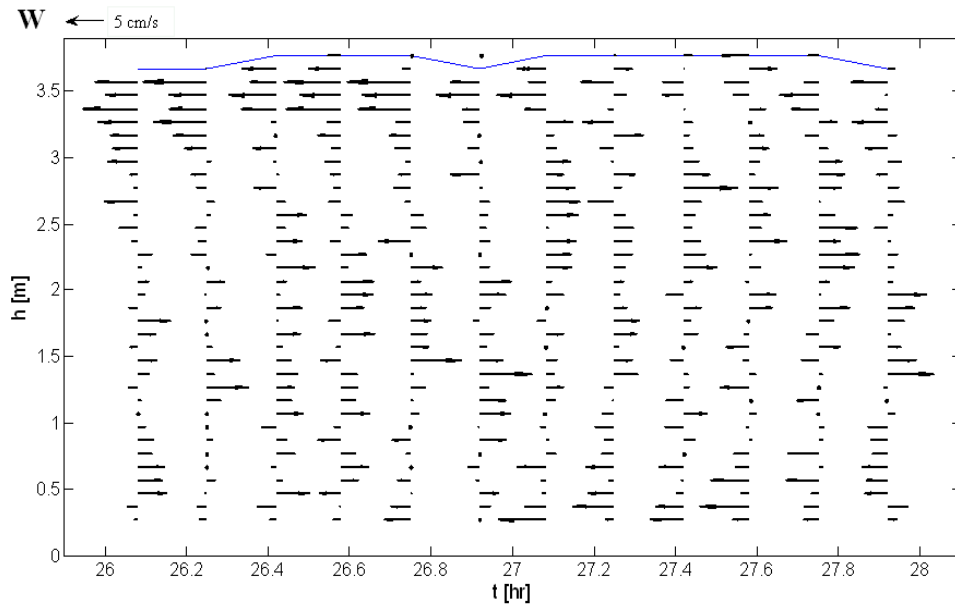


圖 3.4(c) 時段 C 東西向之剖面流時序列變化

南北向 [沿岸方向，流速 (cm/s)，正值往北]

時段 A: 06/09/18:24 ~ 06/09/20:24

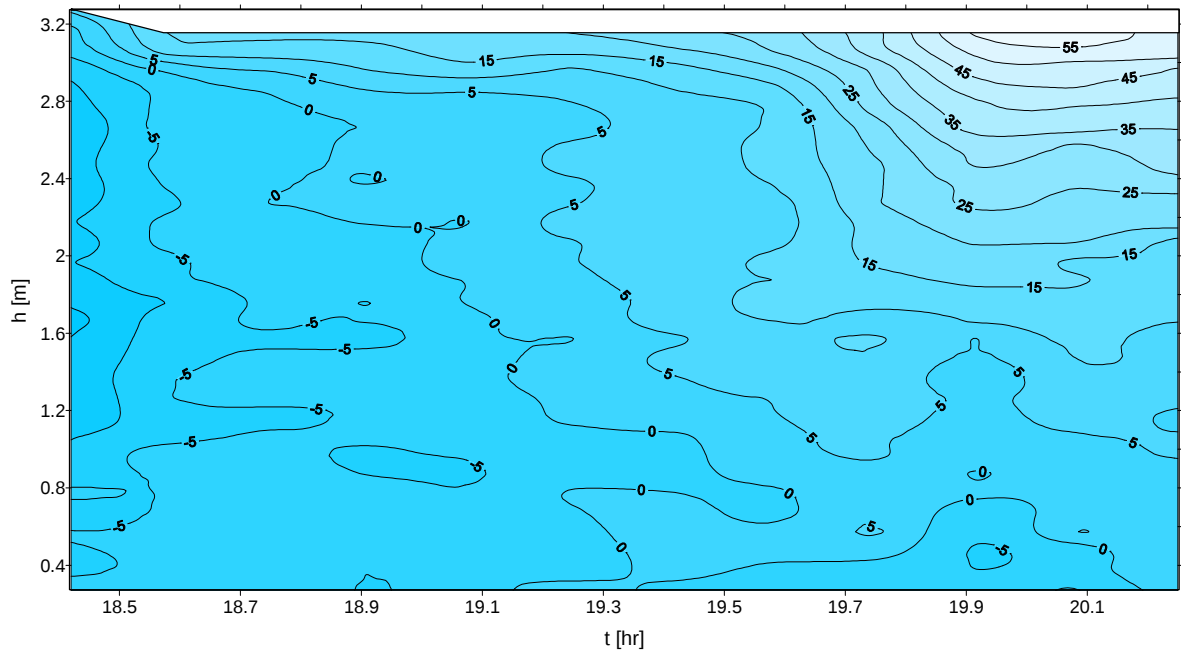


圖 3.5(a) 時段 A 南北向之剖面流時序列變化

時段 B: 06/09/22:00 ~ 06/09/24:00

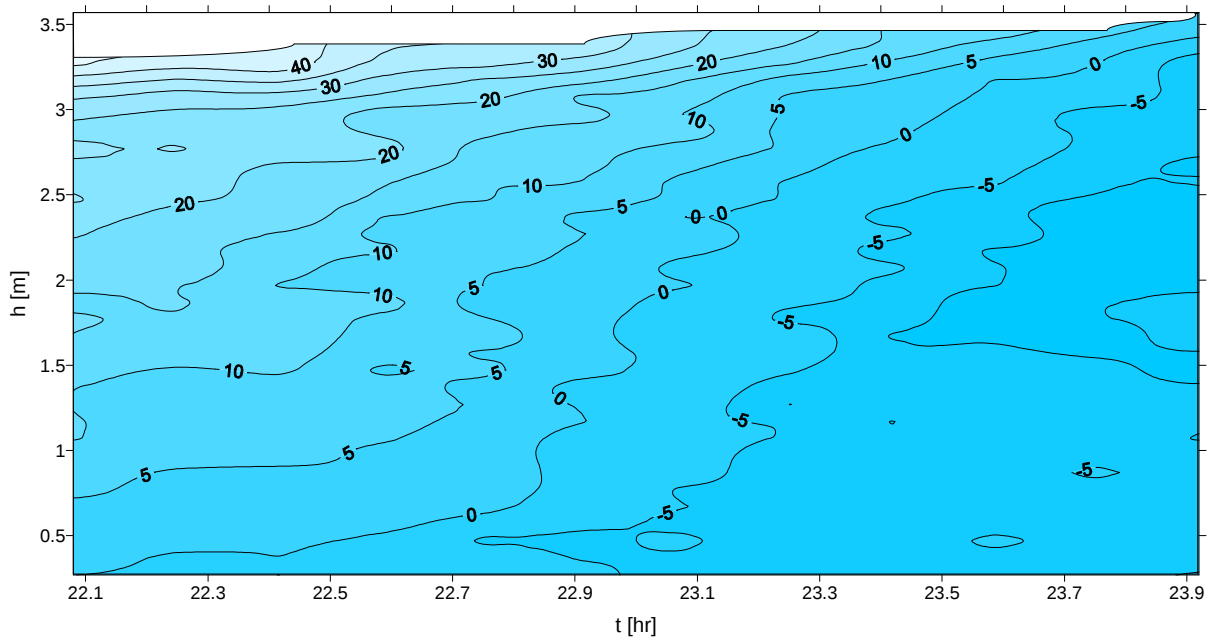


圖 3.5(b) 時段 B 南北向之剖面流時序列變化

時段 C: 06/10/02:00 ~ 06/10/04:00

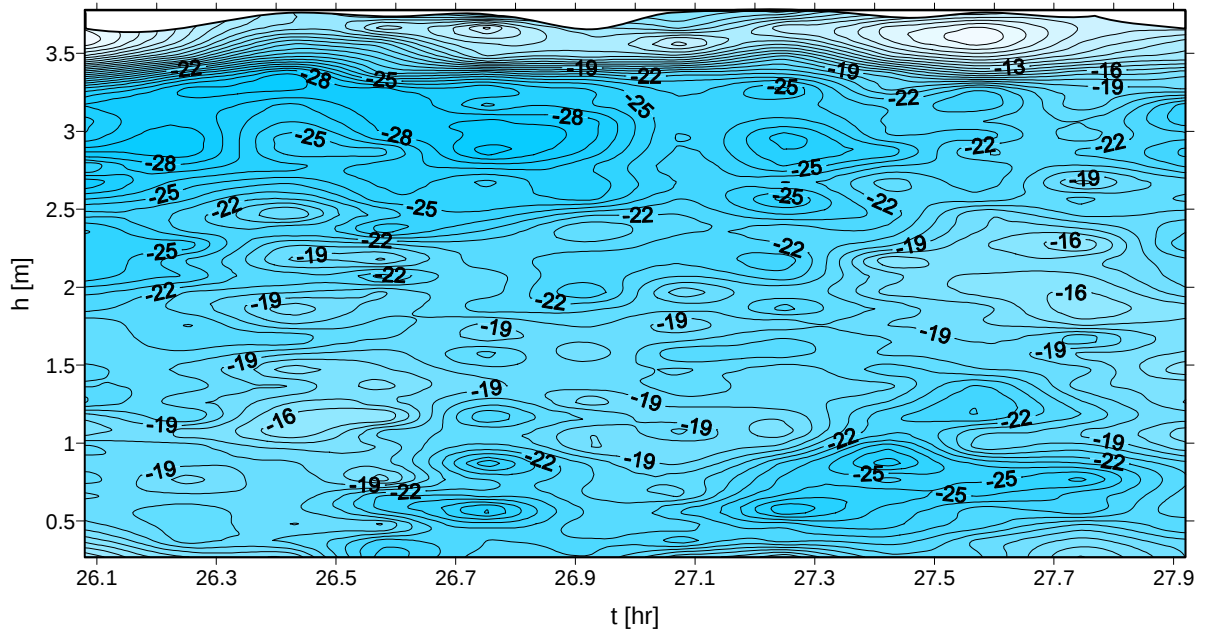


圖 3.5(c) 時段 C 南北向之剖面流時序列變化

東西向 [向離岸方向，岸在東方]

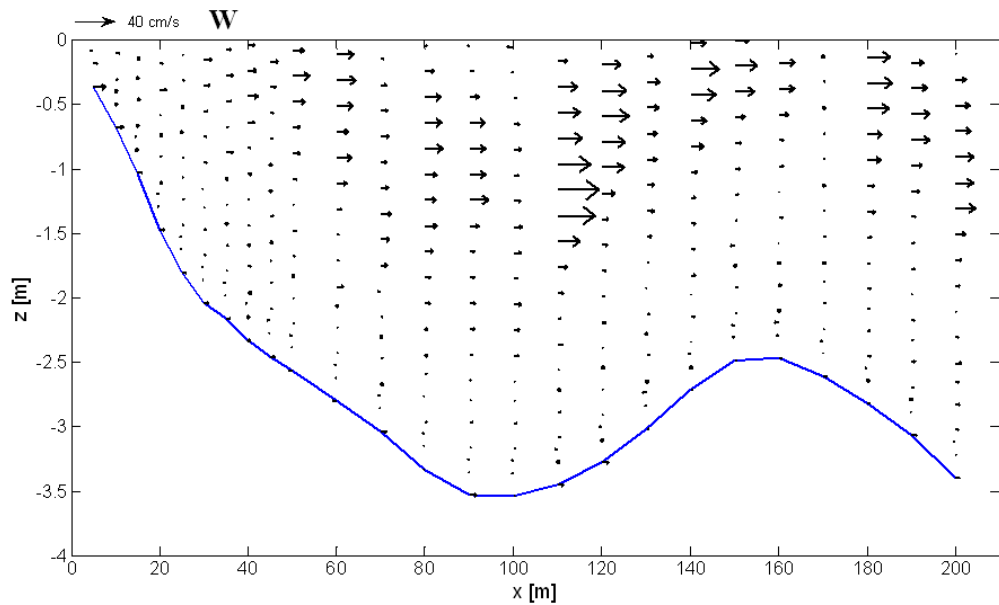


圖 3.6(a) 近岸裂流之東西向剖面流場分佈

南北向 [沿岸方向，流速 (cm/s)，正值往北]

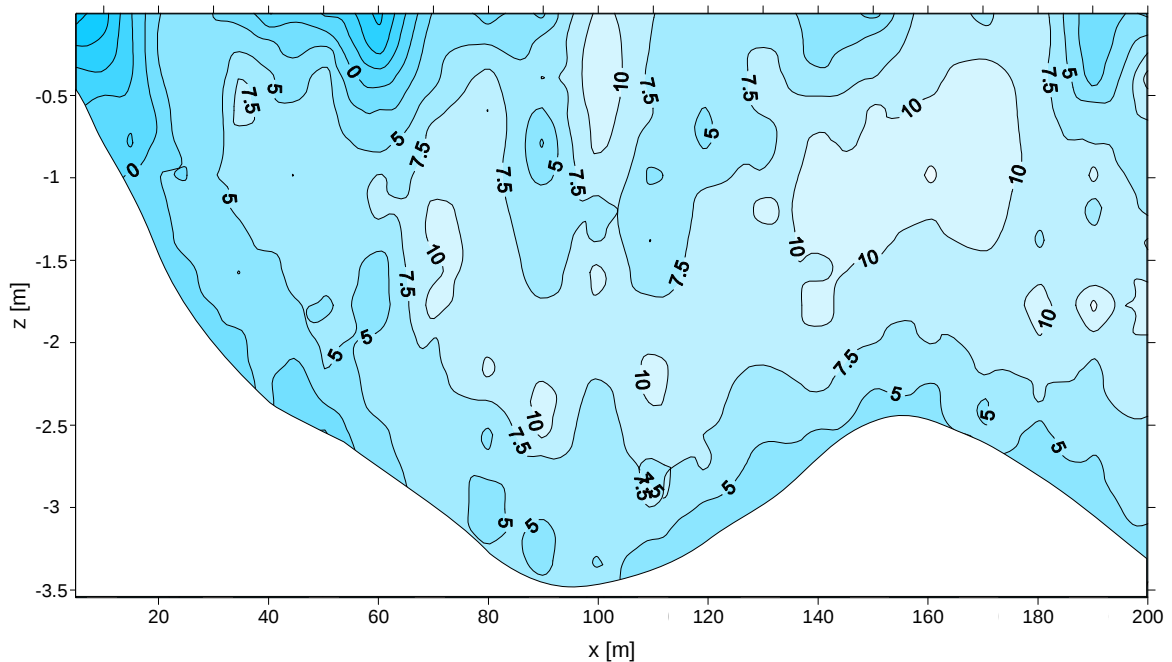


圖 3.6(b) 近岸裂流之南北向剖面流場分佈

3.1.3 碎波帶觀測與分析

造成海岸地形變遷最主要的漂沙現象發生在碎波帶，安平港南側海岸地區之碎波形態主要為崩波 (spilling breaker) 及捲波 (plunging breaker) 二種，前者多發生於冬季而後者多發生於夏季，且波浪較大、灘面較陡。入射波浪之輻射應力在碎波帶內產生複雜的流場型態，包括向離岸流、沿岸流、底迴流 (undertow) 以及因緣波 (edge wave) 造成之振盪流。碎波帶內水流以斜向進入又斜向流出，形成三維的流場運動。圖 3.7 所示為 2008/4/14 15:00~16:00 於碎波帶內觀測得斷面流場分解為向離岸及沿岸方向，清楚顯示向岸之平均流局限在表層附近，而向海之底迴流則沿底床流出直至碎波帶附近。

緣波為受限於海岸地區，而沿著海岸方向不斷反射或折射之較長週期波，該類長週期波會影響海岸沙洲的形成 (Aagaard, 2008)。因其

沿海岸方向前進，可從沿岸流資料中解析出其振盪現象。圖 3.8 比較 2008/4/15 在 110 m 測點沿岸與向離岸方向之流速分量，顯示僅在沿岸方向有長波運動，符合緣波沿海岸前進之特性。圖 3.9 則為垂直海岸基線上離岸 10、50、100 及 200 m 測點量得沿岸方向流速分量之 FFT 頻譜分析結果，顯示都存在有週期約 18 秒之振盪流運動，相當於風浪之群波週期，符合前人研究認為緣波來自風浪群波之輻射應力效應。計算各測點沿岸流速分量之長週期平均振幅，如圖 3.10，顯示其振幅由岸向海大致呈指數衰減，以上各點與 Lamb (1932)、Middleton et al. (1987) 及 Gallagher (1971) 等人對於緣波之觀察與理論推導吻合。現場由內碎波帶至離岸 200 m 皆存在相同之長週期振盪與振幅，該頻率範圍在水面造成之水位振幅極小，隱藏在風浪振幅中，不易察覺。但因波速及波長會隨水深增加而增加，因此使緣波不斷向岸折射及反射並拘限在海岸地區。

東西向 [向離岸方向，岸在東方]

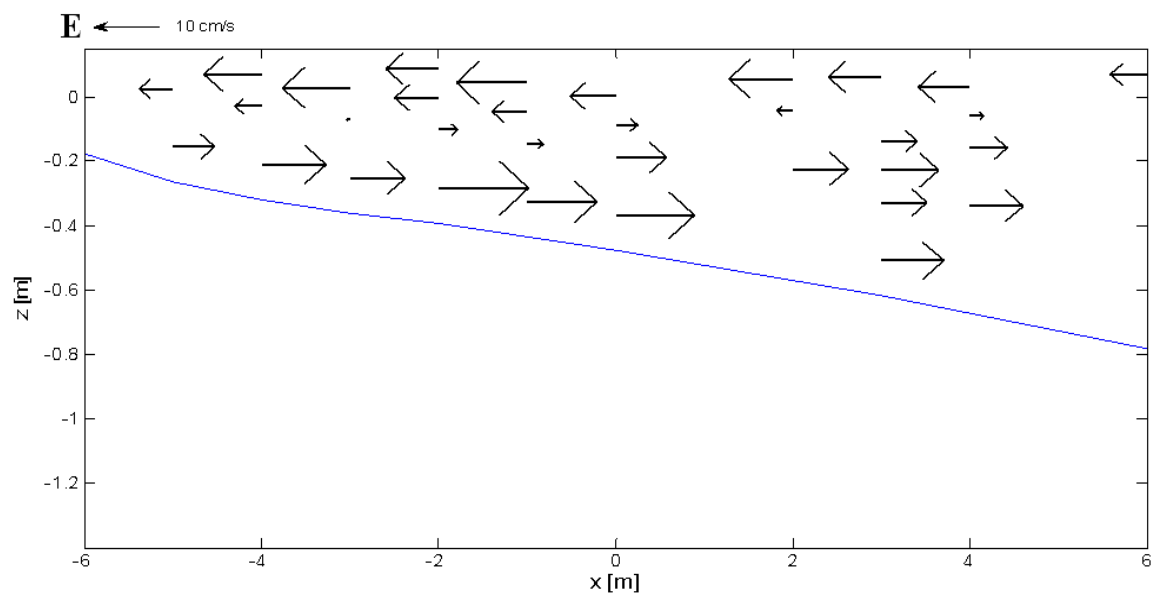


圖 3.7(a) 近岸碎波帶內沿岸方向之流場分量分佈圖

南北向 [沿岸方向，流速 (cm/s)，正值往北]

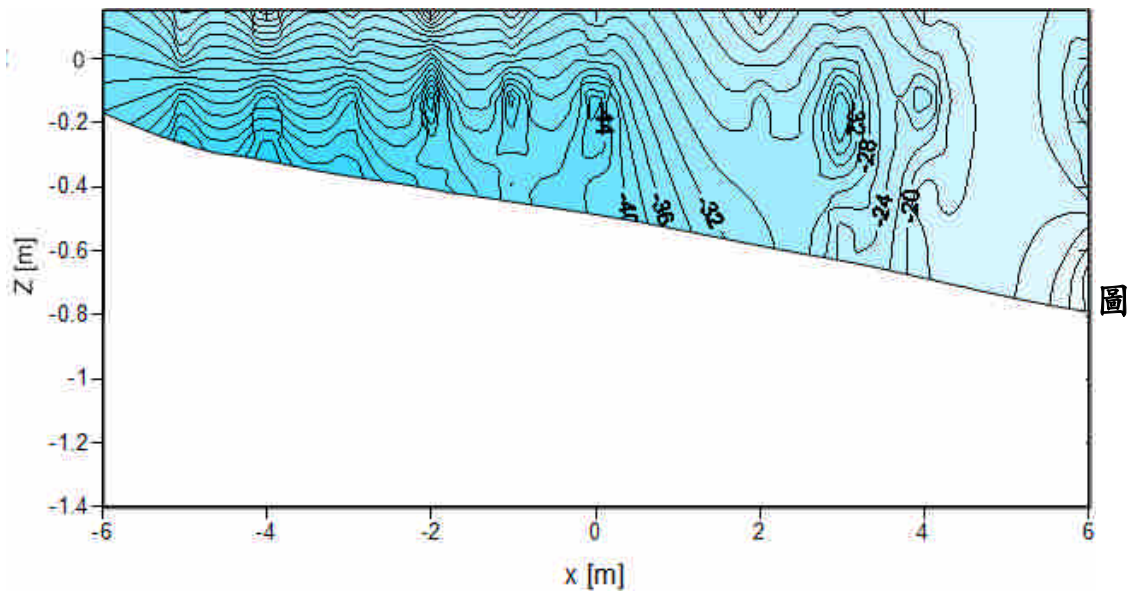


圖 3.7(b) 近岸碎波帶內向離岸方向之流場分量分佈圖

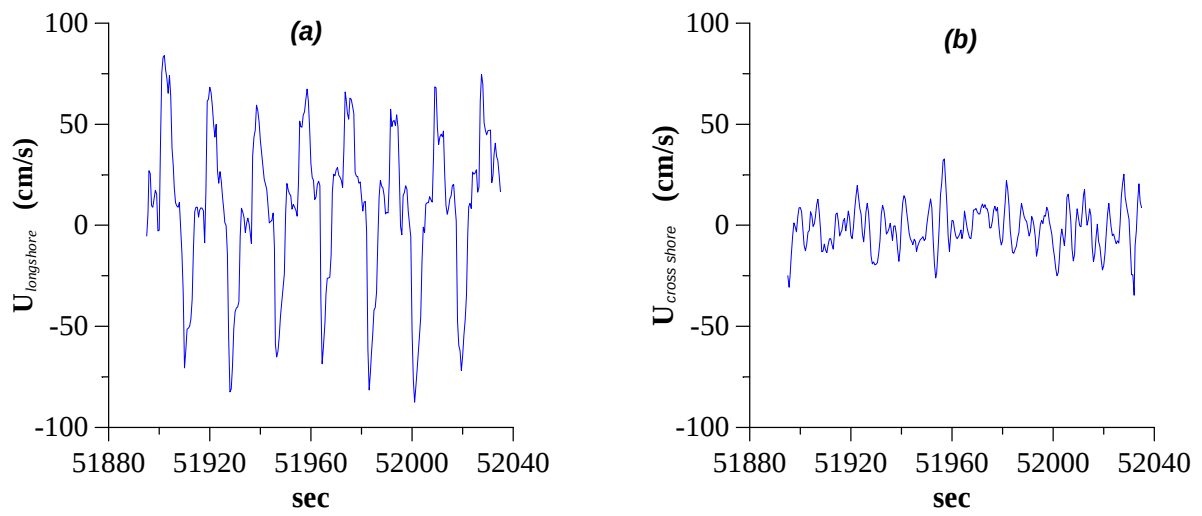


圖 3.8 在 $x = 110$ m 測點之 (a) 沿岸方向 (正值向北) 與 (b) 向離岸方向 (正值向岸) 之流速時序列變化

2008/4/15 13:30~15:00

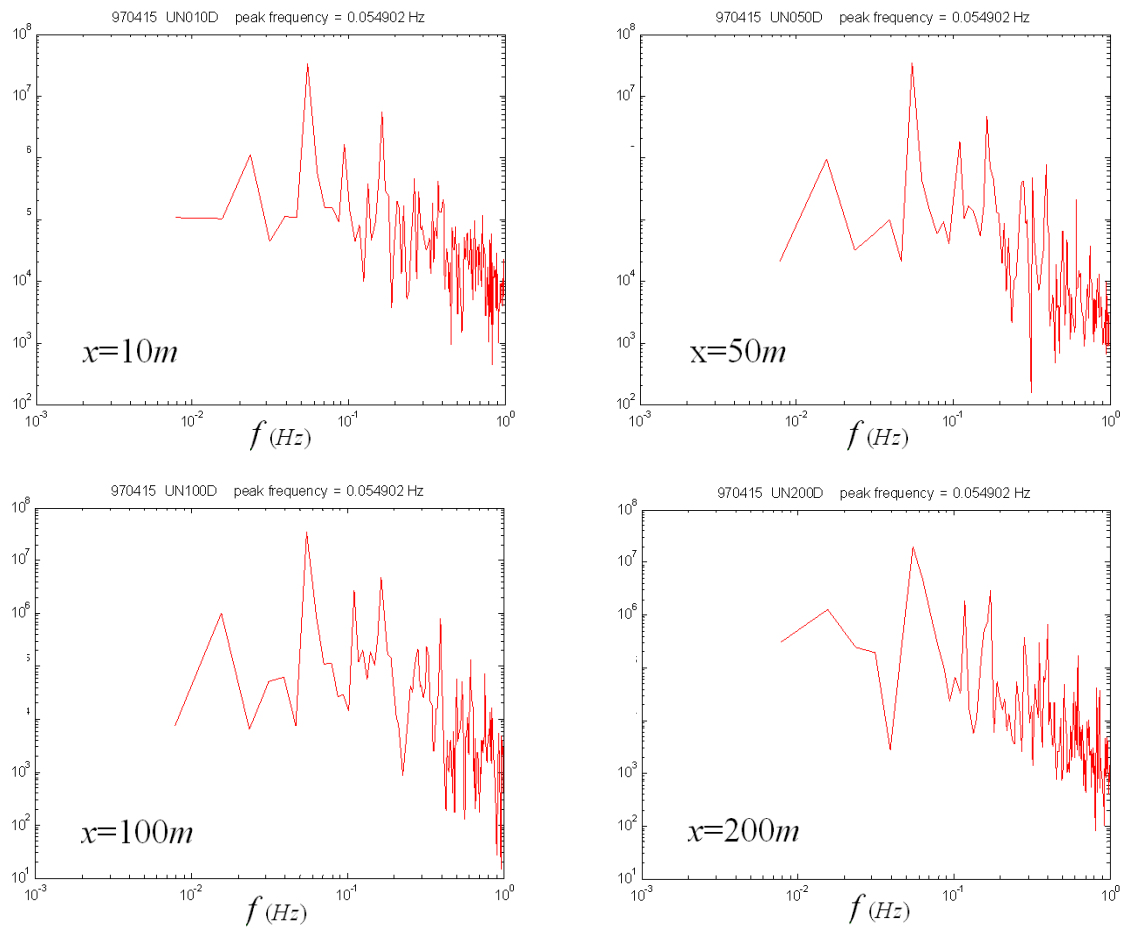


圖 3.9 離岸不同距離測點沿岸方向流速分量之 FFT 分析結果

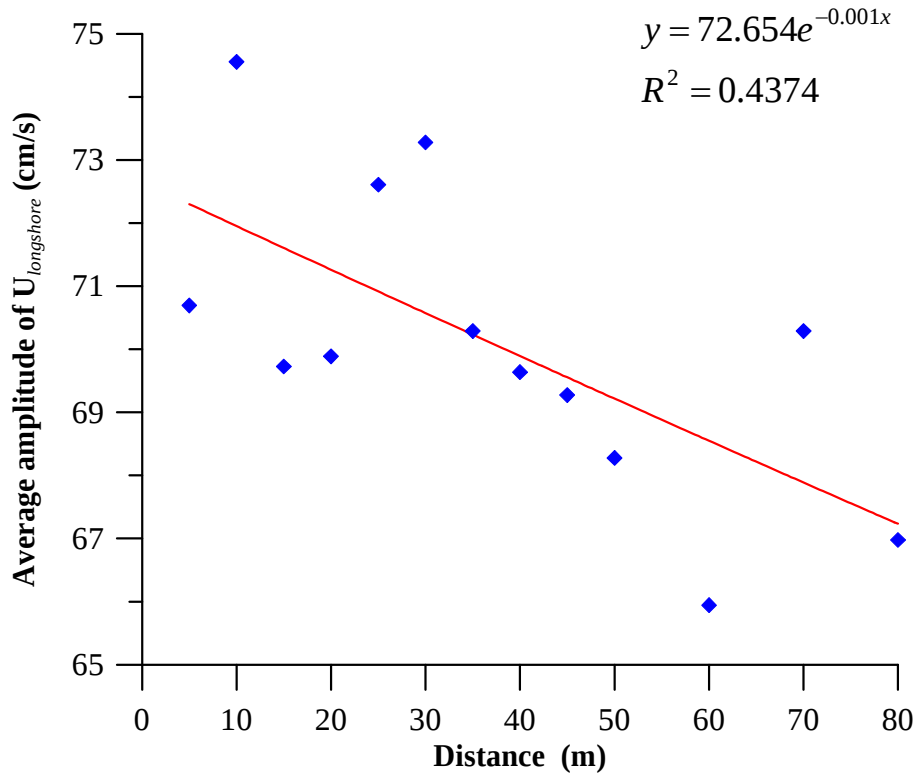


圖 3.10 基線上各測點沿岸流速分量之長週期振幅分佈

圖 3.11 為 2008 年 3 月 19 日以多層儀器組合方式沿著基線由岸向海方向移動觀測至 $x = 60$ m 位置之量測結果，圖中 X 軸向海方向為正，由上至下分別為底床水深 d 、示性波高 H_s 、波浪尖銳度 S 、離底 10 cm 處之平均流速 $\bar{U}_b$ 及懸浮質濃度剖面分佈 C 。波高在 60 m 外約只有 30 cm，抵達碎波點附近波高增加為 50 cm，主要碎波點在約 $x = 12$ m 附近，會隨入射波之群波現象移位。近底床最大平均流速及較大懸浮質濃度都發生在碎波帶內，亦即在碎波帶內有最大的漂沙活動量。

由於濁度計分別安裝於離底高 3、8、13、18、23、28、33 cm 位置，計算單位面積之總懸浮砂量時只能以各測點之觀測值作為各個測層之濃度代表值，而各測層之分界則以兩濁度計之中間高度作為分界，依此計算至離底 35.5 cm 高之總懸浮砂量。如此假設會忽略 35.5 cm 以上之懸浮砂，另外，在發生薄層流 (sheet-flow) 時也會低估底床附近的高濃度輸砂量。Lin et al. (2002) 以水下攝影機觀察黃金海岸碎

波帶底床漂沙活動，發現薄層流輸砂現象非常活躍，根據 Komar and Miller (1975)，當粒徑為 0.25 mm 時，發生薄層流的臨界 Shields 數為 0.715，換算其剪速度為 5.377 cm/s。又據 Dohmen-Janssen (1999) 之研究，薄層流體積濃度可達 52 %，但其分佈僅侷限在底床附近一薄層區域，也許只有 10 mm 範圍，因此位於 3 cm 高的濁度計根本無法掌握薄層流之真正輸砂量。本研究於 2008/4/14 進行現場觀測時，外海示性波高約只有 20 cm，在碎波帶內 35.5 cm 高度以上之懸浮砂量比例極小，計算上應可以忽略。而薄層流現象只發生在極近岸的 3 處測點，其剪速度及懸浮砂量之關係並不在本文研究範圍內。

一般砂岸底質粒徑由岸向海漸小且因水深增加，底床砂粒受底流剪力作用而懸浮後，其沉降時間會隨粒徑減小及懸浮顆粒高度增加而增加，因此底床上之總懸浮砂量峰值與剪速度峰值之間有時間延遲現象，延遲時間由岸向碎波點增加，但在碎波點外其延遲現象則消失不見。圖 3.12 為 2008/4/14 基線上不同位置剪速度與總懸浮砂量之相關性分析，觀測時碎波點約位於 15 m 至 30 m 之間，圖中 x 為離固定基準點距離， d 為測點平均水深， lag 為懸浮量峰值相對於剪速度峰值之延遲時間，碎波帶外延遲現象不明顯是因底砂懸浮量少。

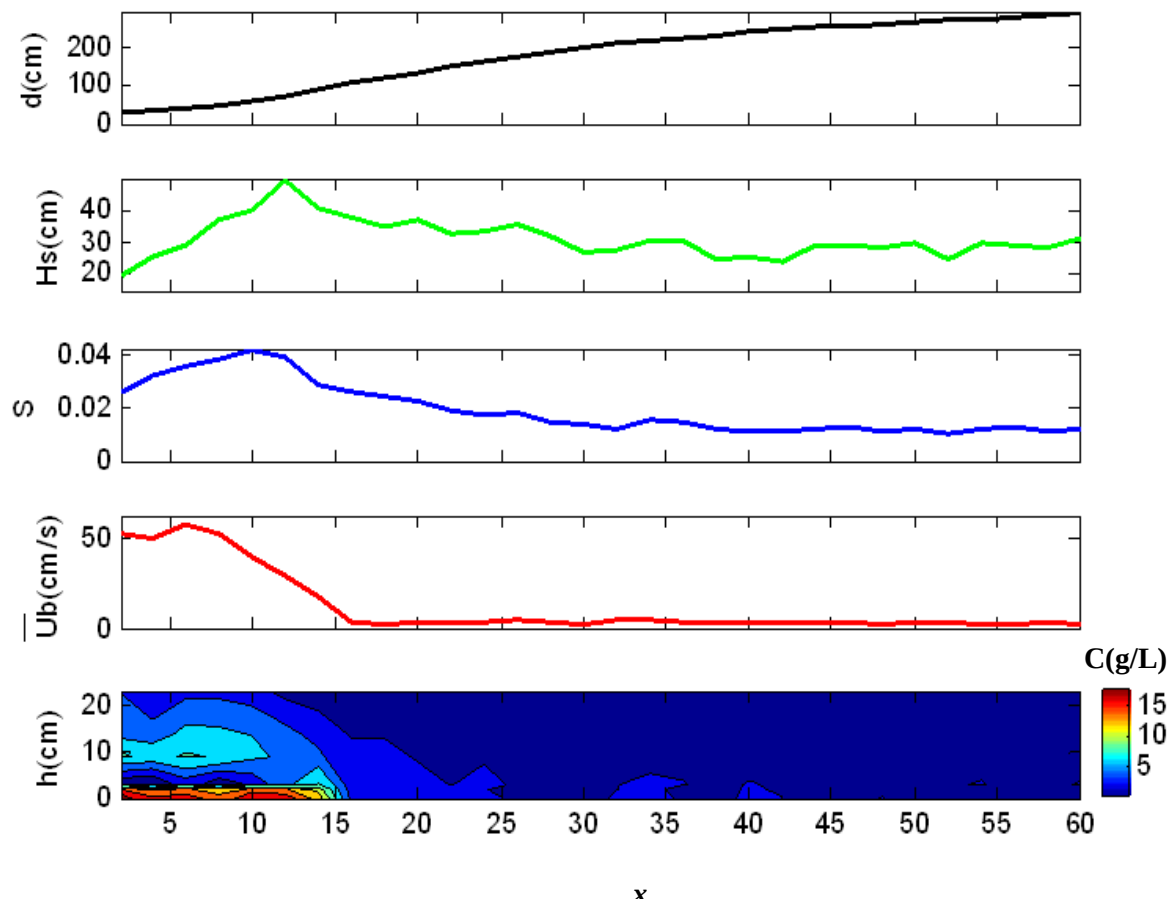


圖 3.11 2008/3/19 沿觀測基線之觀測結果

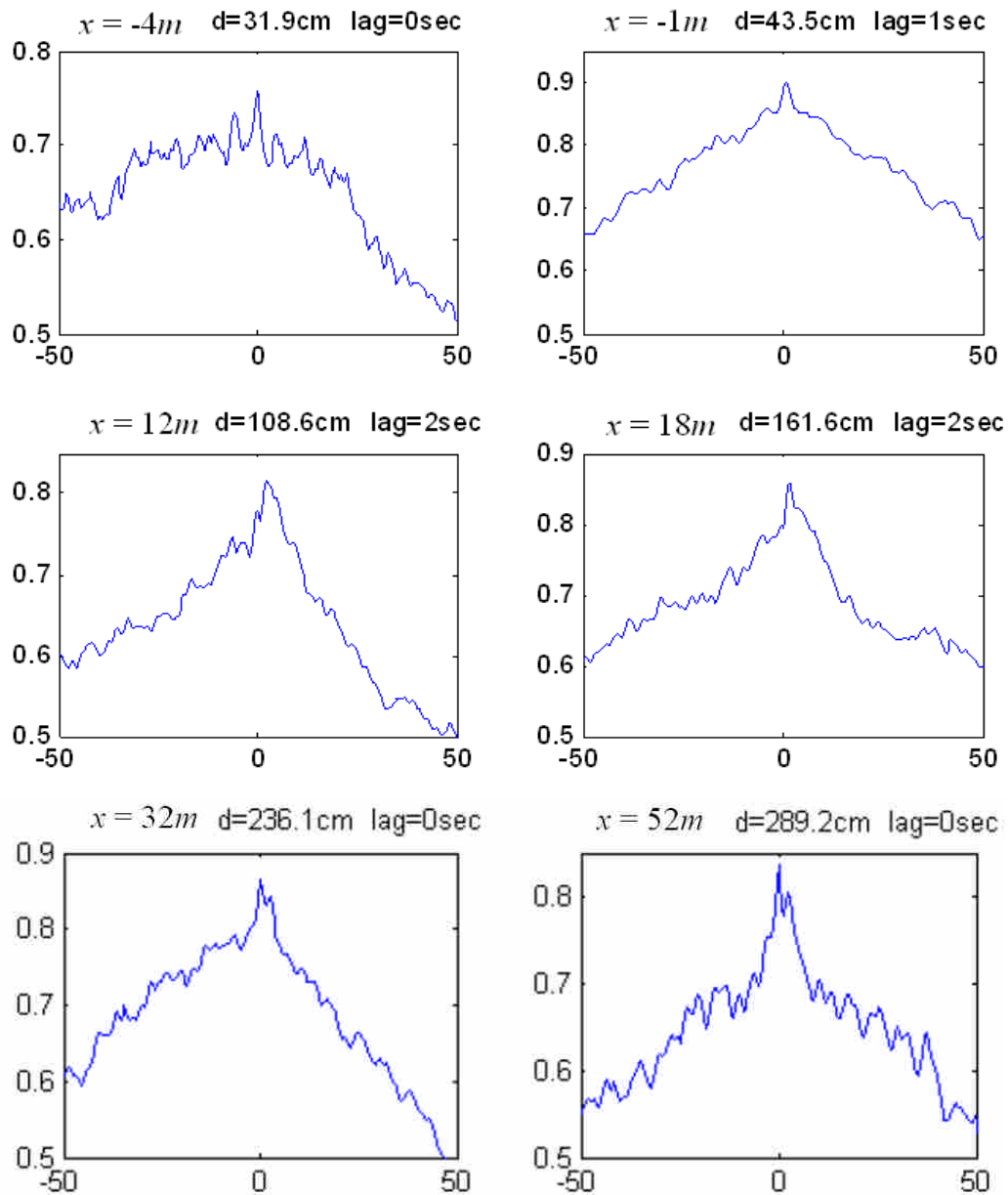


圖 3.12 剪速度與總懸浮砂量之相關性分析 (x 軸單位為秒，y 軸為其相關性 R 值)

圖 3.13 為 $x=10$ m 測點之剪速度與懸浮砂濃度垂直剖面分佈之時序列變化，顯示懸浮砂會在某些狀況下發生暴量突增 (bursting) 現象，與 Lin et al. (2002) 在碎波帶現場觀測時指出懸浮砂會因波浪群波現象發生暴量突增不謀而合，此表示群波造成底床剪速度之間歇性變化，並使懸浮砂時而發生暴量增加情形。圖 3.14 為基線上不同測點之

剪速度 U_* 與底床上單位面積懸浮砂量 Q 之時序列變化，測點分別為 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m 及 16 m，觀測時間 15:00~16:00，正逢高平潮時段，沙灘上 0 m 水位約在 X 軸 -8 m 處。由於底床上第 2 支流速計高 29 cm，為避免碎波帶內因底迴流與溯昇流流向不同造成之分流現象影響剪速度計算之正確性，本文根據 Yu and Tan (2006) 底床剪速度之單點計算法，如式 (2-23)，計算時以 10 cm 高處之單點流速資料為主。

圖中細線為剪速度 U_* (cm/s)，粗線為單位面積總懸浮砂量 Q (kg/m²)，分別選取發生暴量突增 (bursting) 的懸浮砂量峰值及與其相對應之剪速度峰值繪於圖 3.15，選取方法以明確相繼發生剪速度與懸浮砂量峰值之狀況為一個別事件，例如圖 3.14 中標示之部份 B 點，相對應兩峰值之間會有時間差，就算是同一地點與時段，其時間差可能隨著底質粒徑分佈、波浪狀況及當時顆粒之懸浮高度而不同。其中測點 2 m 至 6 m 有許多剪速度大於 5.3 cm/s，亦即發生薄層流之臨界剪速度必須予以排除，例如圖 3.15 中標示之部份 A 點，圖中並未標示出所有的 A 點與 B 點，因其相對應之懸浮砂量會被目前的觀測方法及計算方式所低估。

Li et al. (1997) 以沉降速度推算發生懸浮輸砂之臨界 Shields 數，以現場中值粒徑 $D_{50}=0.25$ mm 為例，根據 Rubey (1933) 對於天然砂礫沉降速度之經驗公式，

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gD} \cdot \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgD^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgD^3}}\right) \quad (3-1)$$

得 $\omega_0 = 3.334$ cm/s，其中 ν 為動黏滯係數，推算臨界 Shields 數 $\Phi_{crs} = 0.175$ 。如將單位面積總懸浮砂量 Q (kg/m²) 轉換為無因次化之懸浮砂體積濃度 C_v (m³/m³)， $C_v = \frac{Q}{\rho_s h_c}$ ，其中 ρ_s 為海灘石英砂之密度 ($\rho_s = 2650$ kg/m³)， h_c 為懸浮砂捲增高度 (本文量測懸浮砂捲增高度約為 35.5 cm)，並將剪速度以沉降速度為尺度加以無因次化 $\frac{U_*}{\omega_0}$ ，可分別得

出圖 3.15 中 I、II 兩區之無因次剪速度與懸浮砂濃度經驗公式如式 (3-2)、(3-3) 所示:

$$C_v = 0.00092 \frac{U_*}{\omega_0} - 5.79 \times 10^{-5} \quad 0.1 \leq \frac{U_*}{\omega_0} < 0.78 \quad [I] \quad (3-2)$$

$$C_v = 0.0047 \frac{U_*}{\omega_0} - 0.00296 \quad 0.78 \leq \frac{U_*}{\omega_0} < 1.6 \quad [II] \quad (3-3)$$

圖中轉折點 $\frac{U_*}{\omega_0} = 0.78$ 為底床在剪速度作用下發生懸浮砂量突增 (bursting) 現象之臨界點，顯示剪速度約大於 2.6 cm/s 時，其懸浮砂量之變化斜率大增。如以此值作為發生明顯懸浮輸砂之臨界值，計算其臨界 Shields 數得到 $\Phi_{crs} = 0.166$ 。較 Li et al. (1997) 計算結果小，其可能原因為現場實際底質並非單一粒徑，較細砂粒可能在較低剪應力下先被帶離底床懸浮，而且碎波帶內底床上之 ripple 結構也會增加底流之剪應力。

根據林等 (2006) 在內碎波帶之觀察，因實際波浪之群波特性，底床上 Shields 數無法經常維持在 0.8 以上，因此薄層流與沙連底床會交互出現。根據現場觀測之底床剪速度與單位面積懸浮砂量之關係，可將無因次剪速度 $\frac{U_*}{\omega_0} = 0.78$ 作為計算碎波帶懸浮載 [II] 與推移載 [I] 之分界點。當 $\frac{U_*}{\omega_0} > 1.6$ 時，底床砂以薄層流狀態移動，主要砂濃度集中在底床附近，以本文在現場安裝之濁度計位置，無法量測高 3.5 cm 以下底床附近的砂濃度變化，因此計算得之懸浮砂量會反而下降，如圖 3.14 標示之 A 點，其剪速度與輸砂量關係則不在本文討論範圍內。

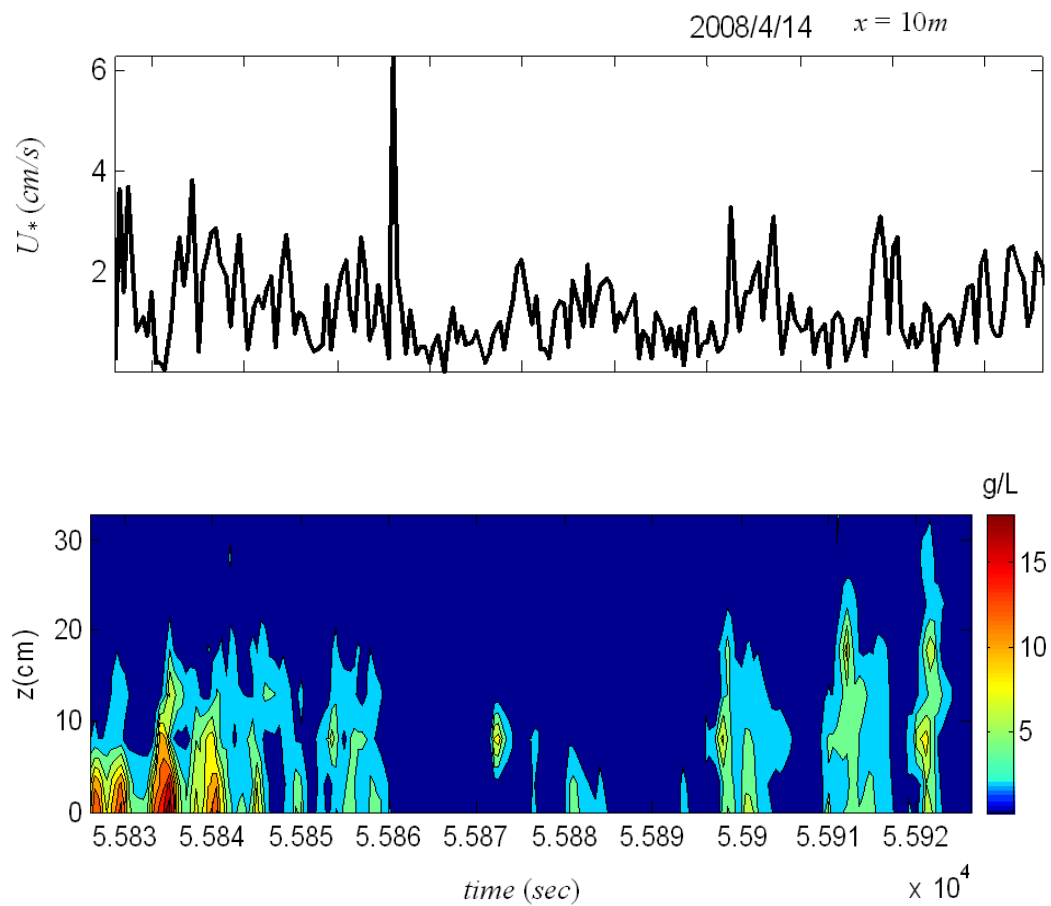
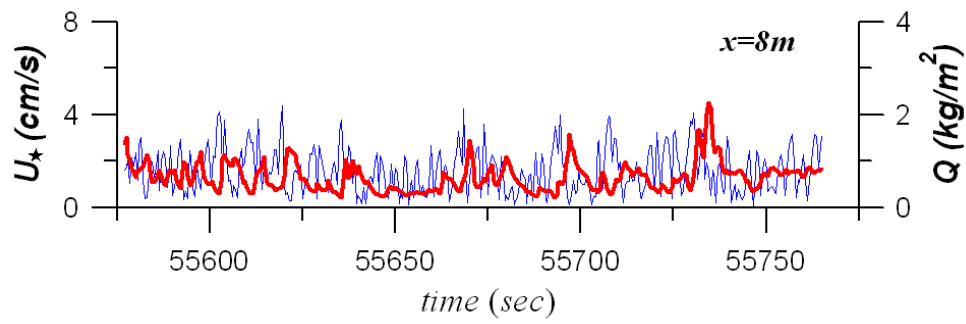
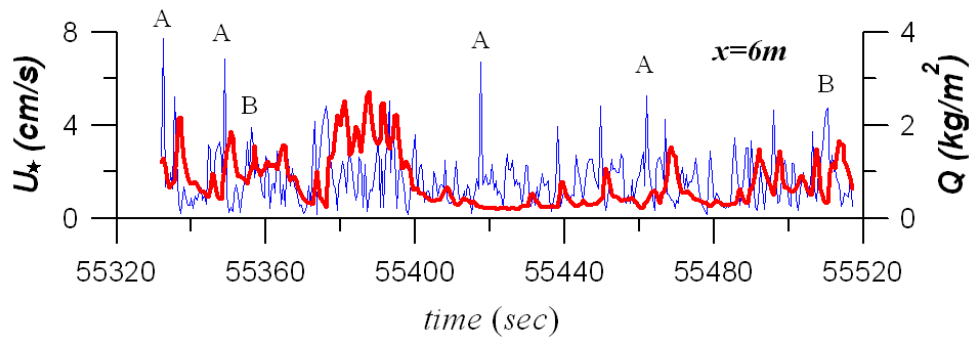
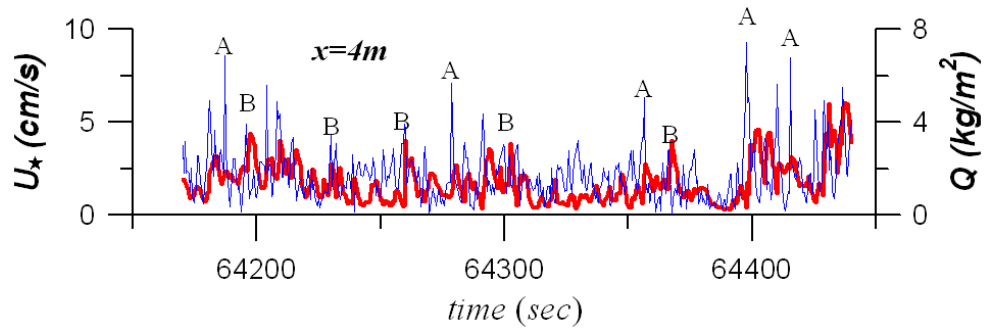
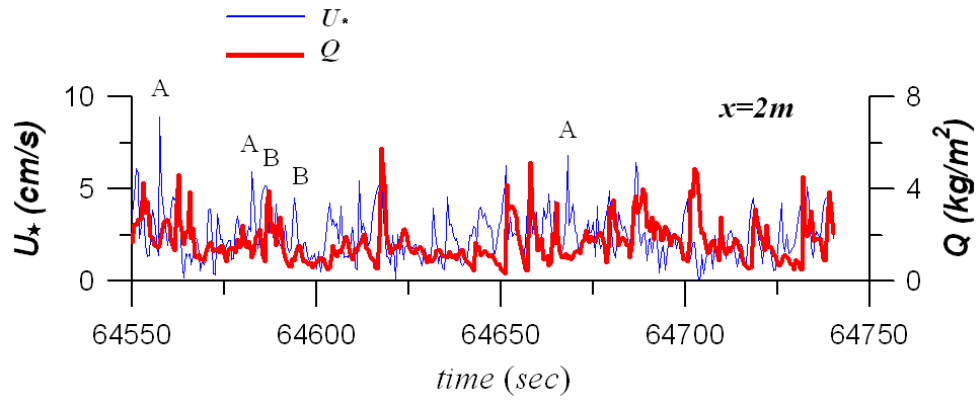


圖 3.13 剪速度與剖面懸浮質濃度分佈之時序列分佈 ($x = 10\text{ m}$)



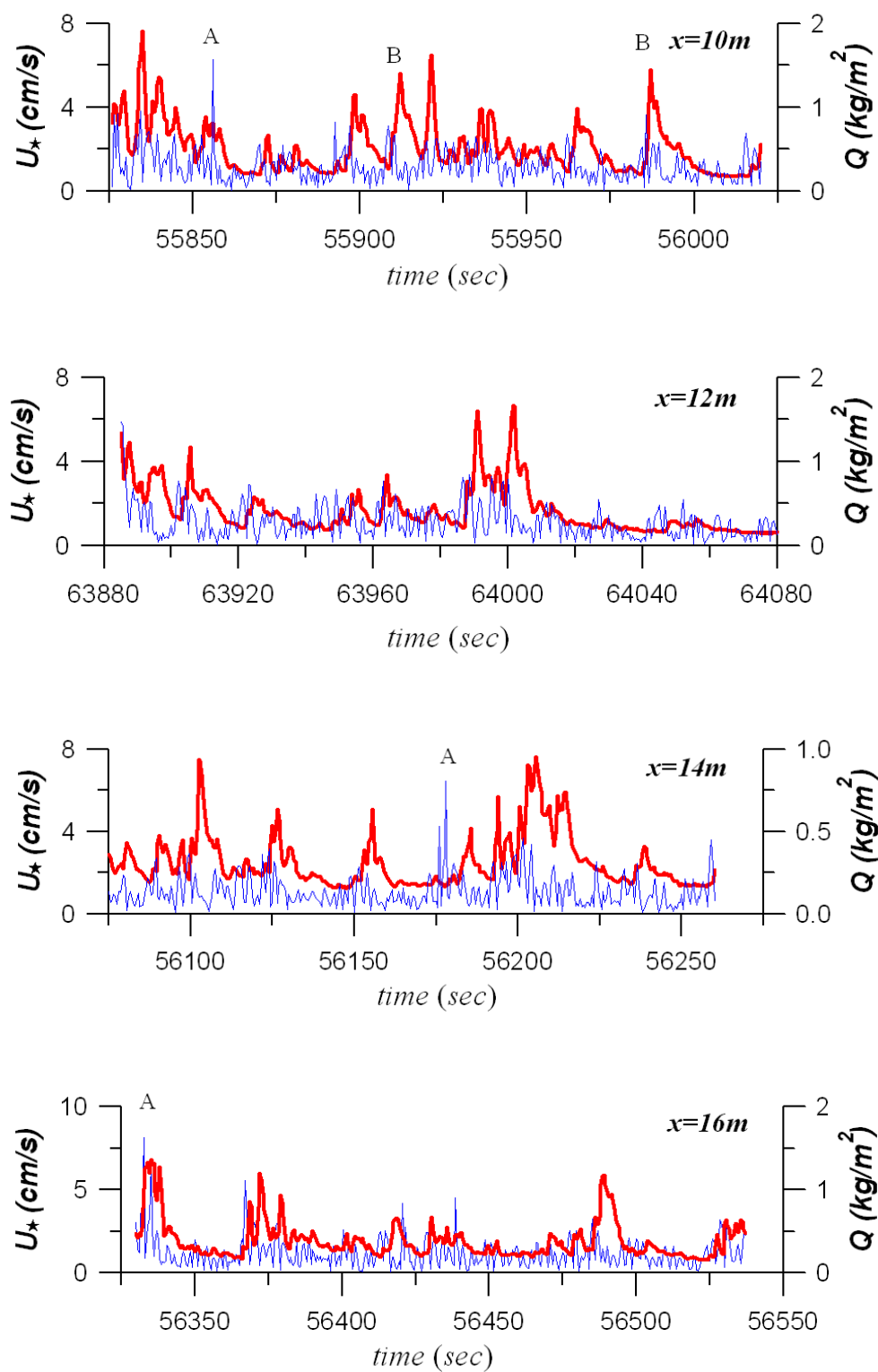


圖 3.14 剪速度 U^* 與底床上單位面積懸浮砂量 Q 之時序列變化

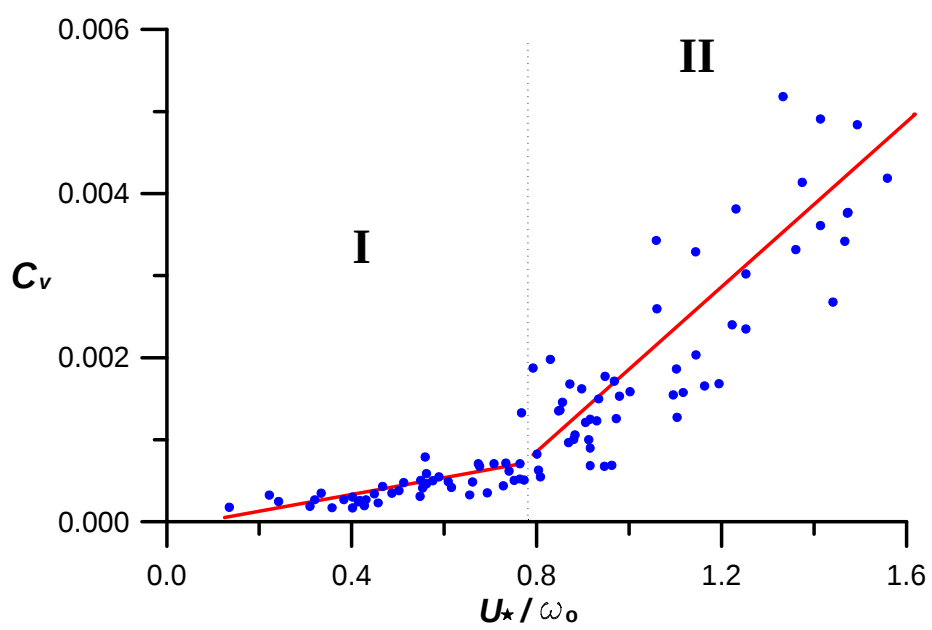


圖 3.15 無因次剪速度與懸浮砂體積濃度之相關性

3.2 淡水測站現場觀測與分析

3.2.1 現場觀測作業

臺北港位於淡水河口南側，本研究於淡水河口北側之沙崙海灘設置觀測站，如圖 3.16。河口為河川與海洋交匯之處，其流場主要受河川逕流、波浪、潮汐等影響。河流之輸砂常在該處堆積形成三角洲與沙洲。當泥砂淤積於河口，便受潮汐、洋流或沿岸流之搬運作用成為沿岸漂沙，對沿岸地形及港阜造成影響。

測站上由岸向海建立一觀測基線，圖 3.17 中粗紅線即為觀測基線位置，基線原點為測量基準點 A，座標北緯 $25^{\circ} 11' 19.4''$ ，西經 $121^{\circ} 24' 51.8''$ ，基線長 100 m，垂直海岸向外。現場進行近岸碎波帶內波浪、流及懸浮質濃度分佈量測以瞭解碎波作用與當地海岸漂沙之關係。淡水測站之觀測儀器組合，包含流速計陣列，由 5 支電磁式流速計、1 支三維超音波式流速計及剖面流速儀等組成，測點分別位於底床上 2 cm、5 cm、10 cm、20 cm、35 cm、50 cm 等處，取樣頻率有 2 Hz 及 8 Hz 兩種；濁度計陣列則包含 4 支光散射式濁度計，測點分別位於底床上 8 cm、18 cm、28 cm、38 cm 等處，取樣頻率 2 Hz，以及 2 支 OBS 濁度計，測點在底床上 1 cm 及 3 cm 位置，取樣頻率 8 Hz；以及 1 支壓力式水位計，取樣頻率 10 Hz。另外還安裝底床攝影裝置，觀察現場底床砂粒運動，所有儀器設備皆以同步方式獨立運作。

根據港研中心設置於臺北港外海水深 20 m 處觀測樁蒐集之海氣象資料：春、秋、冬三季主要風向為東北風，平均風速 7.5 m/s，平均示性波高 1.25 m，週期 6~8 秒；夏季以西 ~ 南風為主，平均風速 4.8 m/s，平均示性波高 0.51 m，週期約 6 秒左右。

98 年 9 月 7 日與 9 月 28 日分別對淡水測站之觀測基線進行兩次地形測量。根據外海觀測樁資料，兩次測量期間，平均風速 6.48 m/s，

主要風向為 ENE 風；平均示性波高 0.8 m，週期約 6 秒。測量結果如圖 3.18，圖中 x 軸原點為基準點 A，顯示前灘灘面與底床皆有淤積現象。



圖 3.16 臺北港北側之淡水觀測站位置



圖 3.17 淡水河口北側之沙崙海岸觀測基線

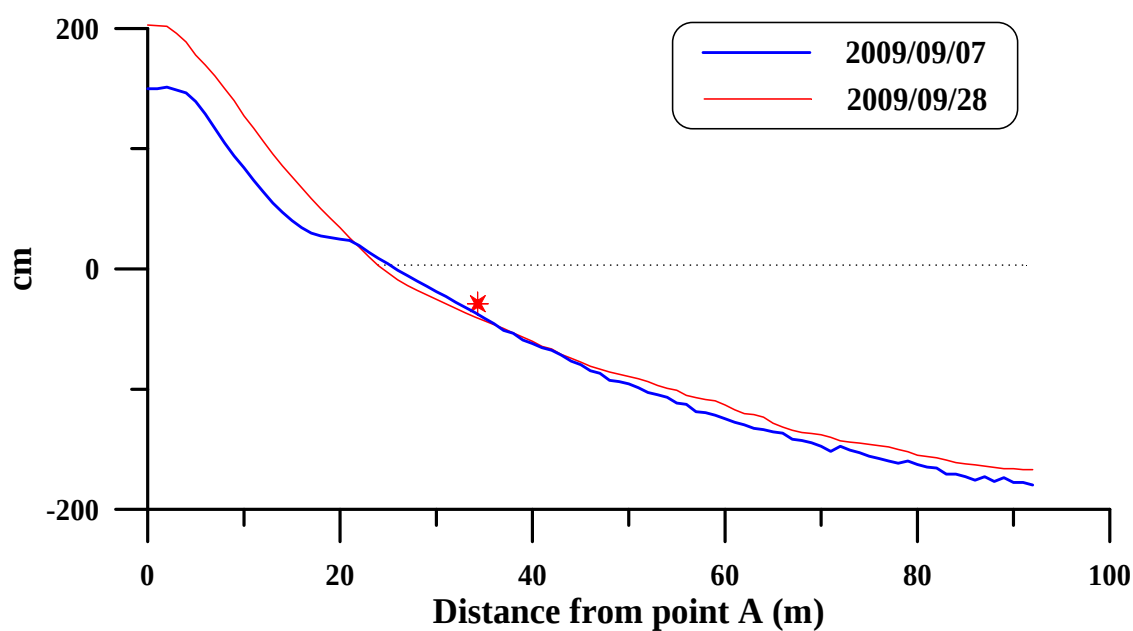


圖 3.18 淡水觀測站底床地形變化及測點位置

採取碎波帶內之底床砂進行粒徑分析，分析方法使用雷射粒徑分析儀 (Laser In – Situ Scattering and Transmissometry) LISST – 100，分析粒徑範圍 2.5 – 500 microns。試驗前必須先校正背景值，分析結果如圖 3.19，中值粒徑 $D_{50} = 0.271 \text{ mm}$ ，略大於安平港南側海岸之砂粒中值粒徑 ($D_{50} = 0.251 \text{ mm}$)。

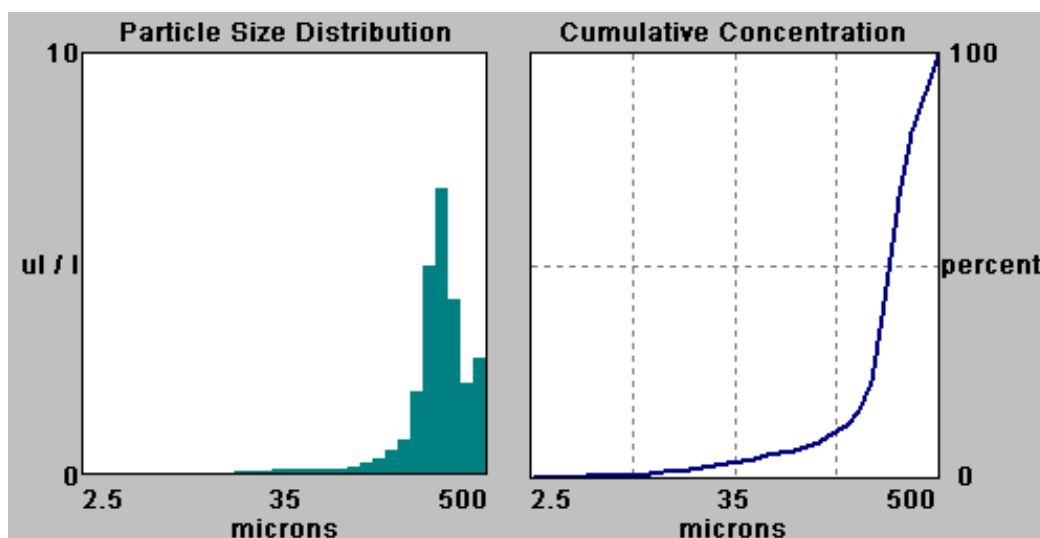


圖 3.19 淡水測站碎波帶內底質粒徑分析

碎波帶之現場觀測儀器包括一具三維督卜勒超音波式流速計 Vector Current Meter，安裝方式如圖 3.20，其測點 Measurement Volume 位於儀器探頭下方 15 cm，底床上 2 cm 位置，圖 3.21 為測點量測容積範圍示意圖。該儀器取樣頻率 8 Hz，量測三維之流速與流向，儀器還可外接 2 組 OBS 濁度計，測點分別位於底床上 1 cm 及 3 cm 位置，取樣頻率 8 Hz，與流速計同步。Vector 本身也有壓力式水位感應器，但因位置較高，不適於碎波帶內使用，因此另外安裝一組 ALEC 水位計，位於底床上 1.5 cm 位置，取樣頻率 10 Hz。底床上 10 cm 位置之二維電磁式流速計，只量測水平流速，取樣頻率 10 Hz。

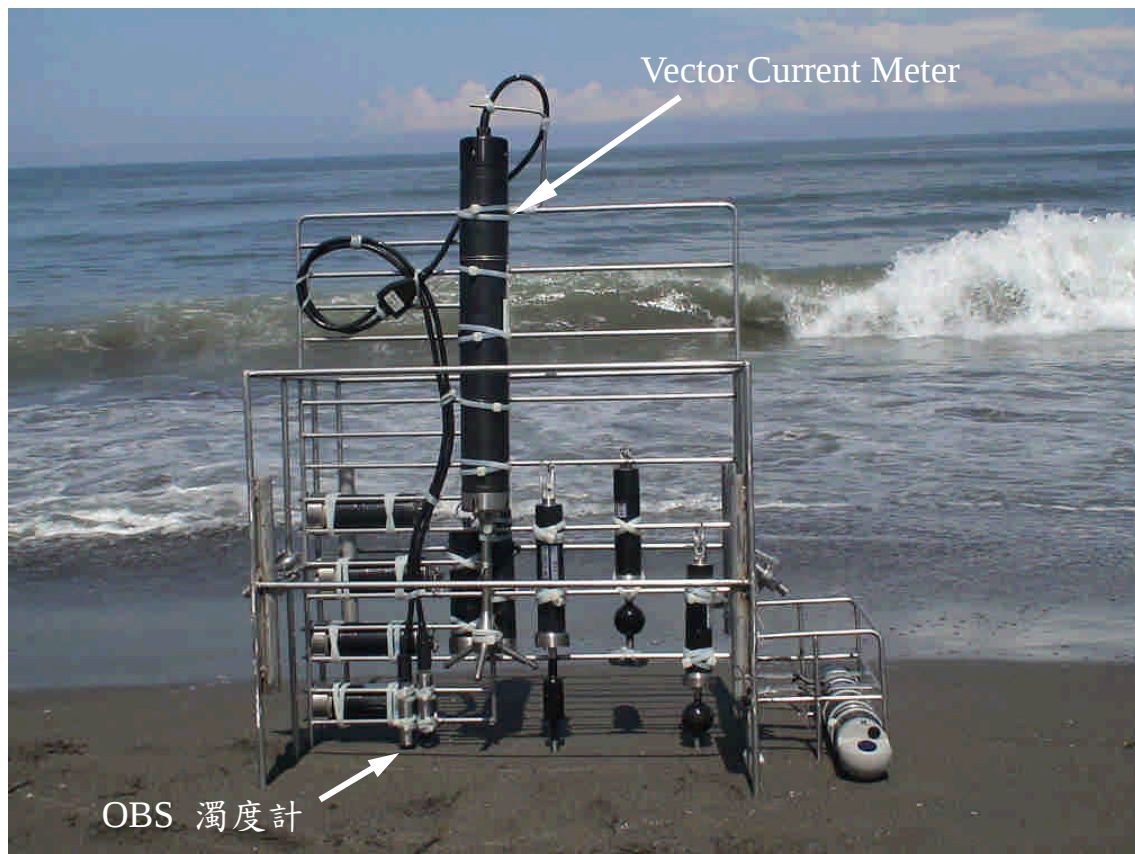


圖 3.20 淡水測站之 Vector 三維督卜勒超音波式流速計

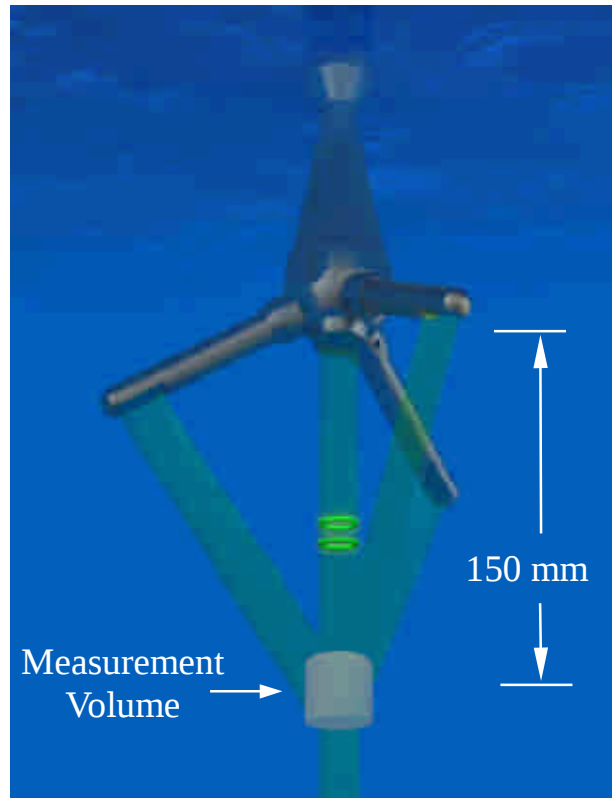


圖 3.21 Vector 流速計探頭測點示意圖

3.2.2 資料分析與討論

2009 年 9 月 28 日 16 時於淡水臺北港北側之沙崙海灘進行碎波帶觀測試驗時，20 m 水深處之外海觀測樁上測得波浪示性波高 1.04 m，示性週期 5.5 秒。碎波帶觀測儀器安裝於圖 3.18 中 $x = 25$ m 位置， $x = 0$ m 為地形測量之固定基準點 A。觀測當時正在漲潮，由於儀器組固定於一處，漲潮過程使現場觀測儀器經歷碎波帶內不同相對位置之各個階段。觀測期間約 2 個小時，外海波候條件變化不大，風速、風向穩定，前灘水線以上灘面較陡，坡度約 1/10，而水線以下之碎波帶底床坡度較緩約為 1/27。

計算其碎波相似參數 (surf similarity parameter) $\xi_o = 0.246$ ，根據 Battjes (1974) 之提議，當時之碎波型態為溢波型碎波，亦即外海波浪尖銳度較大之波浪入射於底床坡度較緩之海岸時，波型由波峰處開始崩潰，峰頂因空氣捲入形成白浪。碎波後，波浪繼續向岸接近，波形

前緣逐漸變陡，前後非對稱，向岸湧上形成衝擊波 (bore) 而溯昇至斜面。圖 3.22 為波浪進入碎波帶後之波浪狀態，遠處為起始碎波點之溢波型碎波，近岸處為向岸前進之衝擊波。



圖 3.22 碎波帶內波浪前進之狀態變化

溢波型碎波第一次碎波後，波形前方因捲入空氣形成白色沫狀衝擊波 (bore)，繼續向岸前進，碎波帶內因此常見到多條白沫狀波列，如圖 3.23。此白沫狀波列進入淺灘，因地形變淺，波浪有可能再度碎波，其中有些碎波夾雜一些似捲波型碎波，如圖 3.24。碎波點隨當時衝擊波之波高、波形及水深而定。現場觀測儀器固定於定點上，其水深及碎波帶內相對位置隨潮位變化而變，由於外海入射波為不規則波，經過儀器位置之波列有可能為單純衝擊波，如圖 3.25，或碎波型衝擊波，如圖 3.26 與圖 3.27，二次碎波點正好發生在儀器位置。



圖 3.23 碎波帶內白沫狀波列



圖 3.24 似捲波型二次碎波



圖 3.25 碎波帶內單純衝擊波通過儀器位置



圖 3.26 碎波帶內溢波型二次碎波通過儀器位置



圖 3.27 碎波帶內似捲波型二次碎波通過儀器位置

現場儀器觀測設定為連續記錄，切割不同時段並根據當時儀器與灘線相對位置分別代表波浪進入碎波帶後之不同歷程。海岸灘線走向約 75° ，垂直海岸之向岸法線方向約 165° 。圖 3.28 為距離灘線約 3.0 m，水深約 15 cm 之衝擊波波列，波形極不對稱，前陡後緩。圖中第 1 小圖為水位時序列變化，第 2 與第 3 小圖分別為底床上 10 cm 高處之水平流速與流向，第 4 小圖則為底床上 1 cm、3 cm、8 cm 高處之懸浮質濃度。圖中發生於 868 秒之第二個衝擊波，波高 20 cm 週期約 7 秒，波高水深比已大於碎波指標，所以該波必然發生碎波，波峰通過時有一半時間，大約 3.5 秒，10 cm 高處之水流為向岸方向，隨後波谷通過流向反轉為向海方向。波峰比波谷流速大，碎波時激起大量懸浮砂，比較波峰與波谷通過時之輸砂量，其淨輸砂量向岸，不過並非每一個衝擊波通過時都會造成大量砂粒懸浮現象。

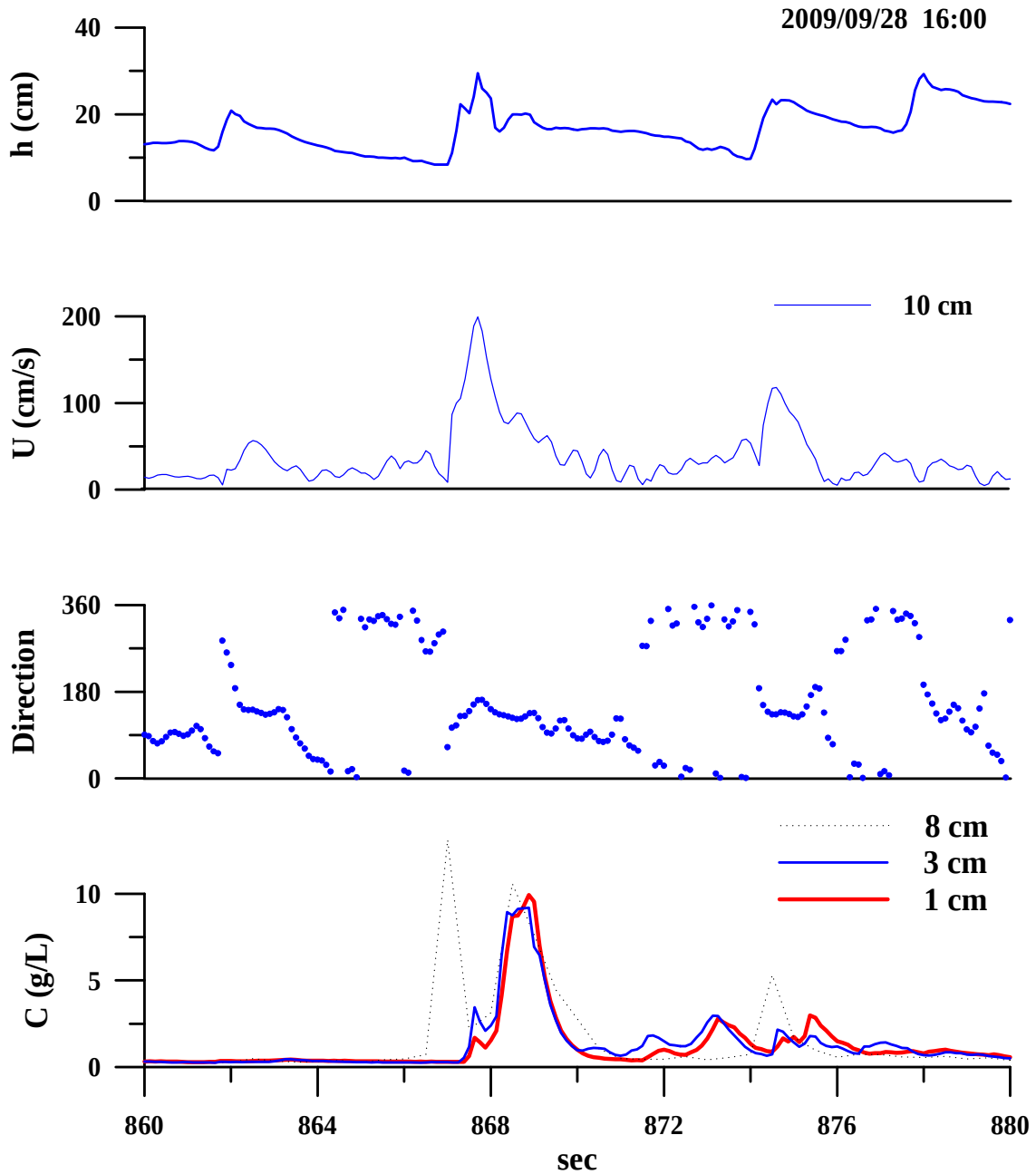


圖 3.28 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈

圖 3.29 為距離灘線約 7.1 m，水深約 30 cm 之衝擊波波浪，波峰處波形較尖銳，波高約 20 cm。圖中第 2 小圖除了 10 cm 高處之水平流速外，還有底床上 2 cm 高處之水平與垂直流速，第 3 小圖為 10 cm 高處之流向。對照第 2 小圖以及第 4 小圖之懸浮砂濃度變化，發現只有出現較強之向下流速時才會激起底床砂並大量懸浮。此強烈向下流速應是來自波峰發生碎波，水體墜落衝擊底床所造成，撞擊水體

同時在底床上產生強烈之水平流速。比較第 1 個波與第 3 個波，第 1 個波之波高水深比大於第 3 個波，應該也會發生碎波，但卻沒有底床砂大量懸浮現象，原因為第 1 個波屬於溢波型碎波，底床附近只有輕微垂直速度振盪，不過仍有較大之水平速度。而第 3 個波則為似捲波型碎波，底床附近有強烈向下垂直速度與水平速度。

圖 3.30 與圖 3.31 分別為碎波帶內不同位置之水位、流速與懸浮質濃度時序列分佈，兩者也都顯示出同樣現象，亦即只有在實際發生似捲波型碎波，水體墜落撞擊底床時才會產生大量懸浮砂。由於臺北港北側海岸之沙灘顆粒較粗，粒徑分佈較集中，懸浮砂容易沉降，因此碎波造成砂粒懸浮現象非常明顯。

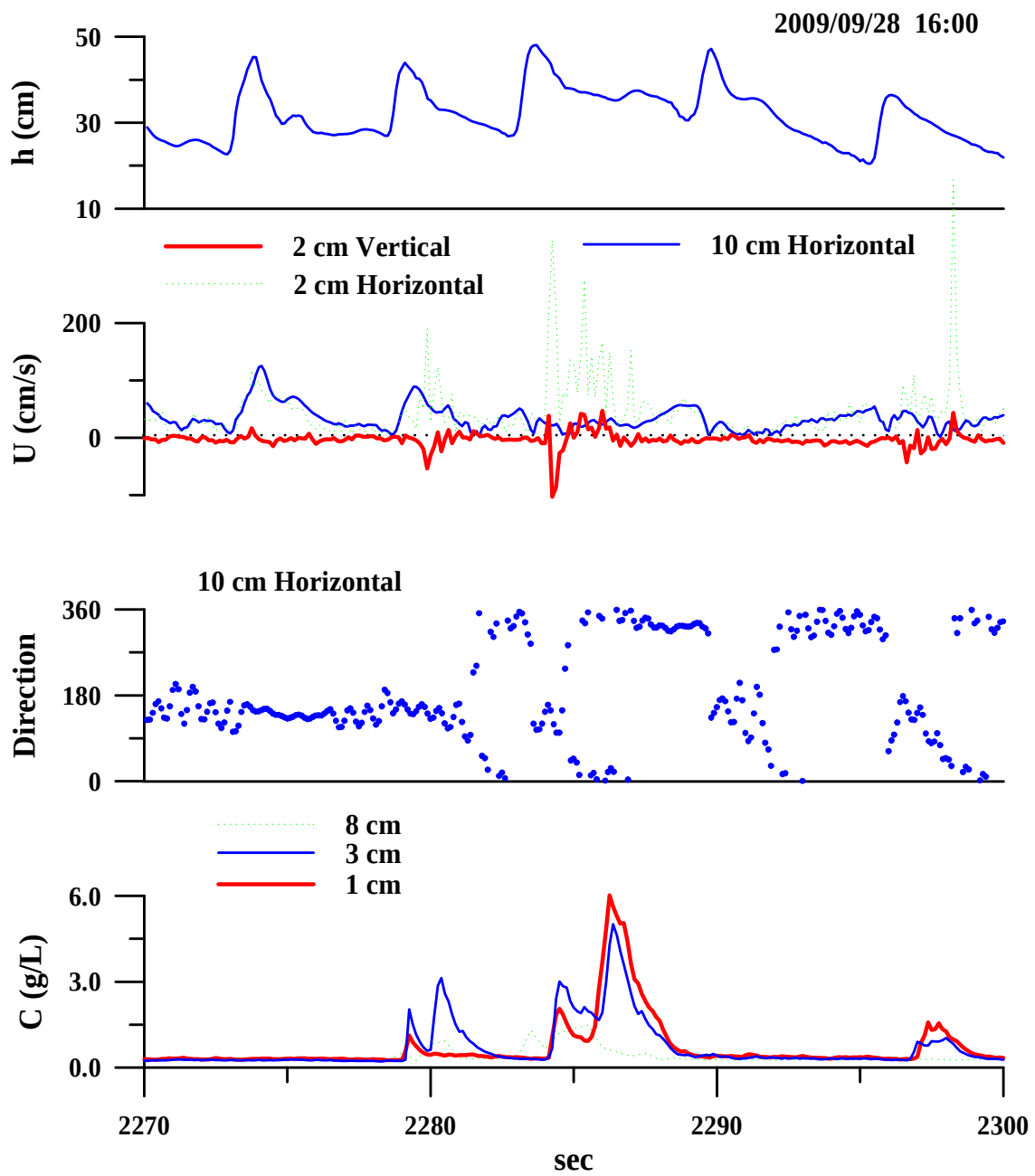


圖 3.29 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈

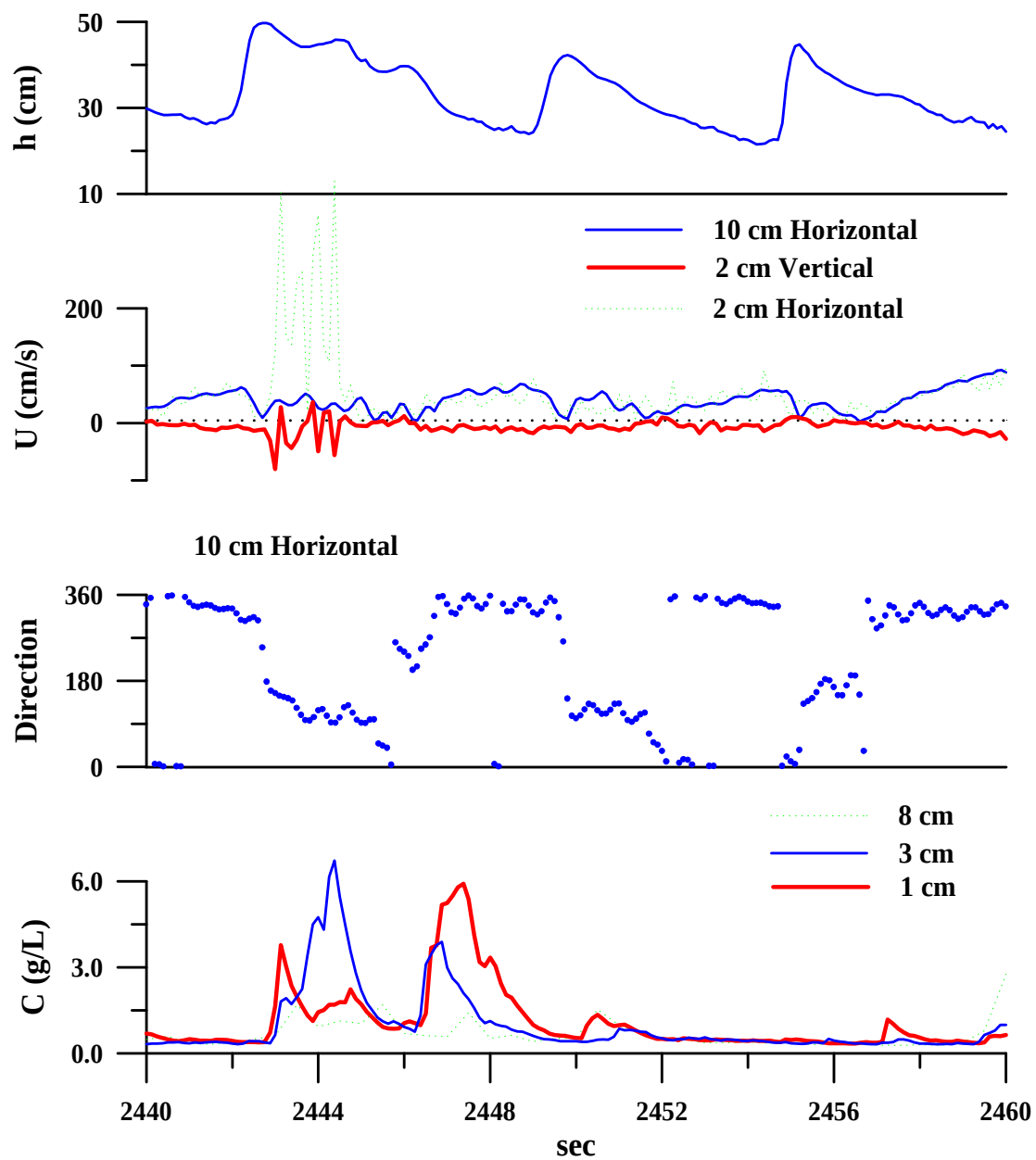


圖 3.30 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈

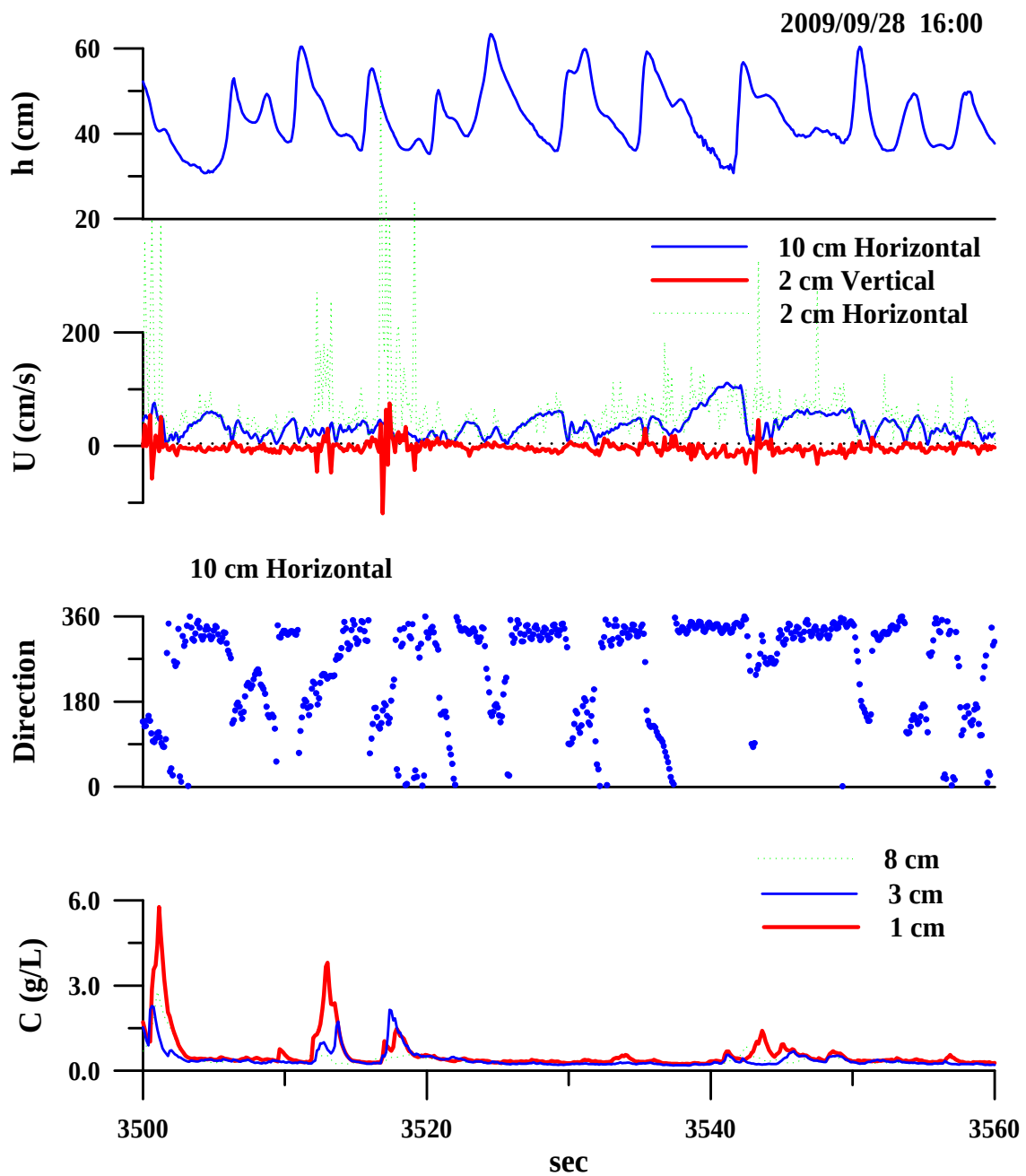


圖 3.31 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈

現場觀測期間正值漲潮，取 1830 秒至 1850 秒，水深較深，離岸較遠之一段波列資料。在衝擊波通過之波列中選取 10 個時間斷面，各斷面間斷 1 秒，如圖 3.32。分別繪出各個時間斷面在底床上 10 cm 處之水平流速，如圖 3.33，圖中虛線表示當時 0 m 水線的方向，顯示其中只有時間斷面 4 與 5 為向岸方向，而且流速不大，反而只有向海方向的流速較大，且時間較長。強烈的垂直底床碎波衝擊流發生在時間斷面 3 與 4 之間，激起之懸浮砂則集中在高度 1 cm 與 8 cm 之間，顯示該衝擊波造成之淨輸砂量可能為離岸方向。

選擇另一組波列之 10 個斷面分析其流速分佈，時間為 860 秒至 880 秒，水深較淺，離岸較近之一段波列資料。如圖 3.34 及圖 3.35，在向岸方向出現較大流速，因此其淨輸砂量可能為向岸方向。分別計算碎波帶內不同相對位置之輸砂率 W (g/sec/m) 及輸砂方向，繪如圖 3.36，圖中第 3 小圖之虛線表示垂直灘線向岸方向 165° ，發現近岸地區為向岸輸砂而遠岸地區則為離岸輸砂。

懸浮砂發生在底床附近，近岸地區水淺，水面下流速一致，向岸流速大於離岸流速，因此輸砂優勢方向向岸。遠岸地區水較深，受底迴流影響，底床附近離岸流大於向岸流，輸砂優勢方向向海。比較兩者之總輸砂率，淨輸砂率為向岸方向，由於臺北港海域之最大潮差高達 3.5 m，灘線位置移動將近百米，碎波帶內向岸與離岸輸砂之臨界點不斷移動，因此不會因臨界點前後反向輸砂而形成明顯溝渠。

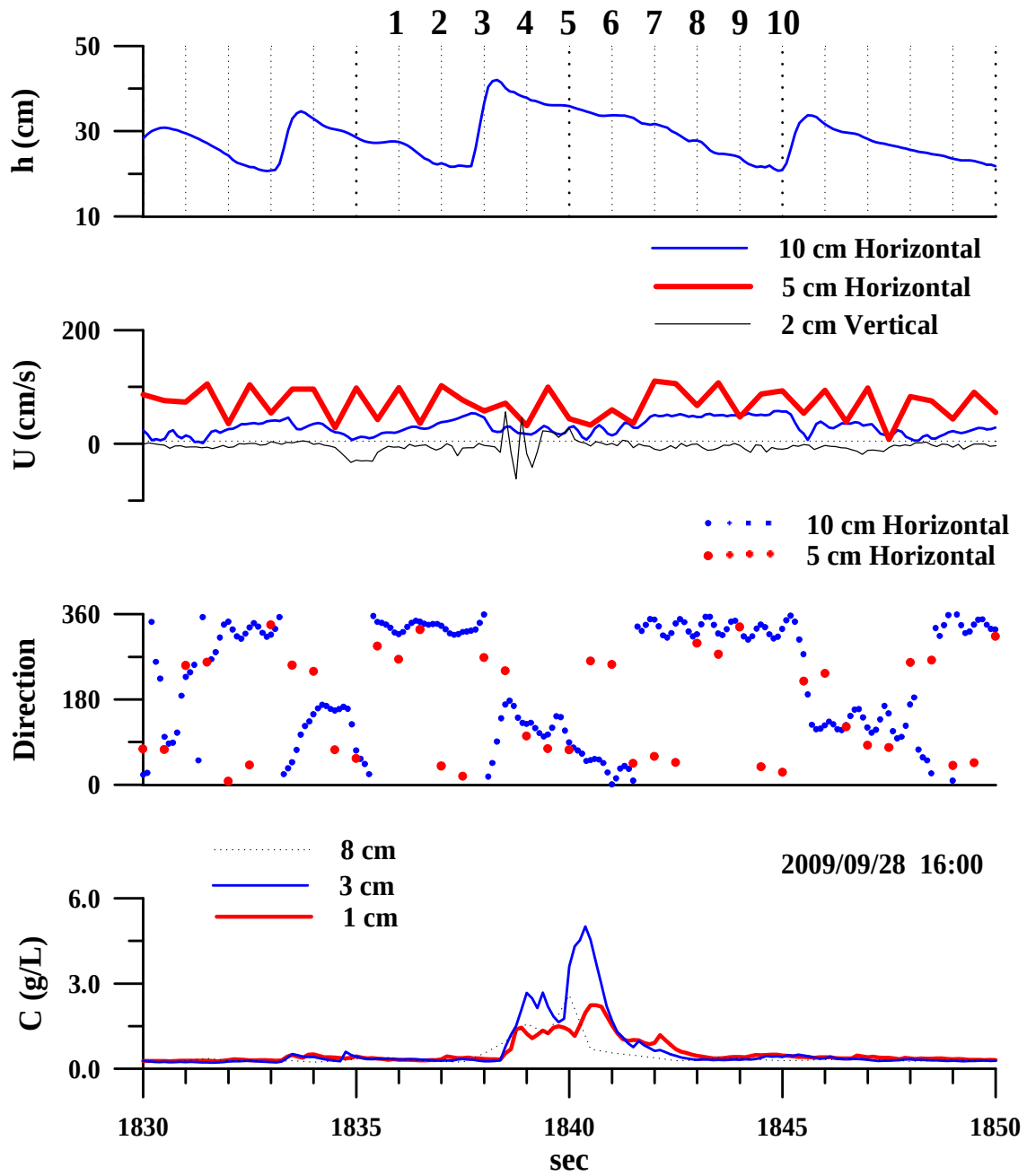


圖 3.32 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈

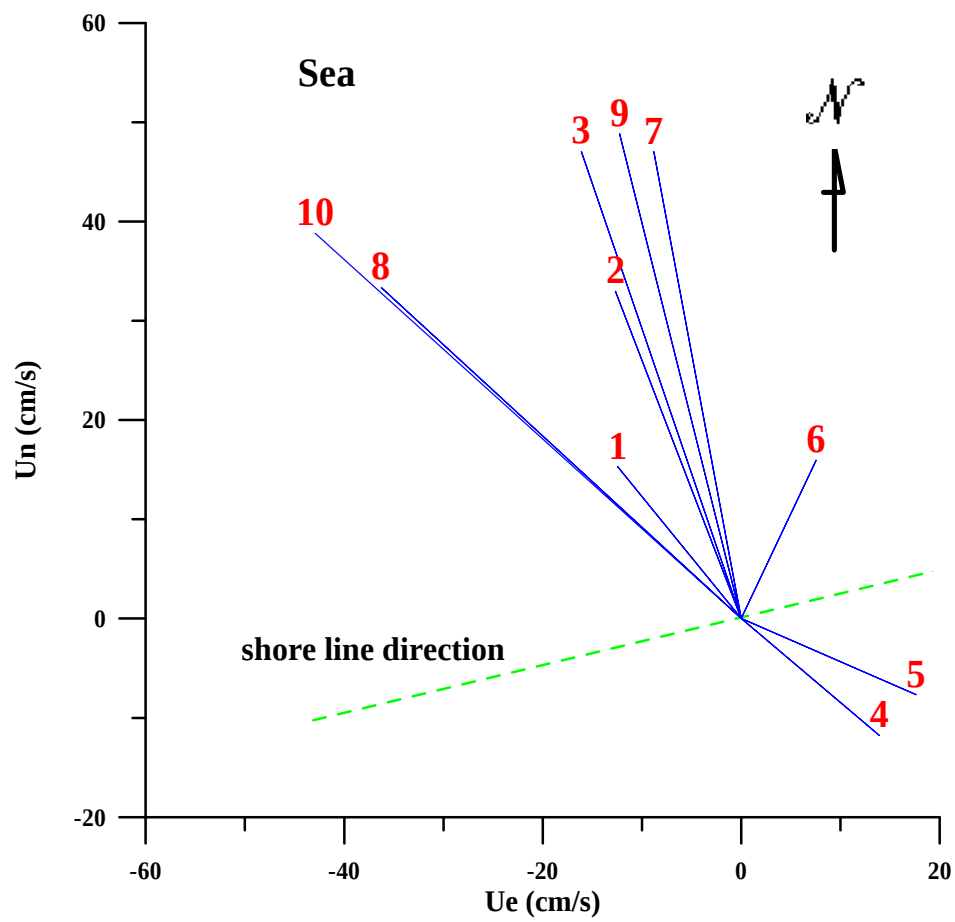


圖 3.33 底床上 10 cm 處之水平流速變化

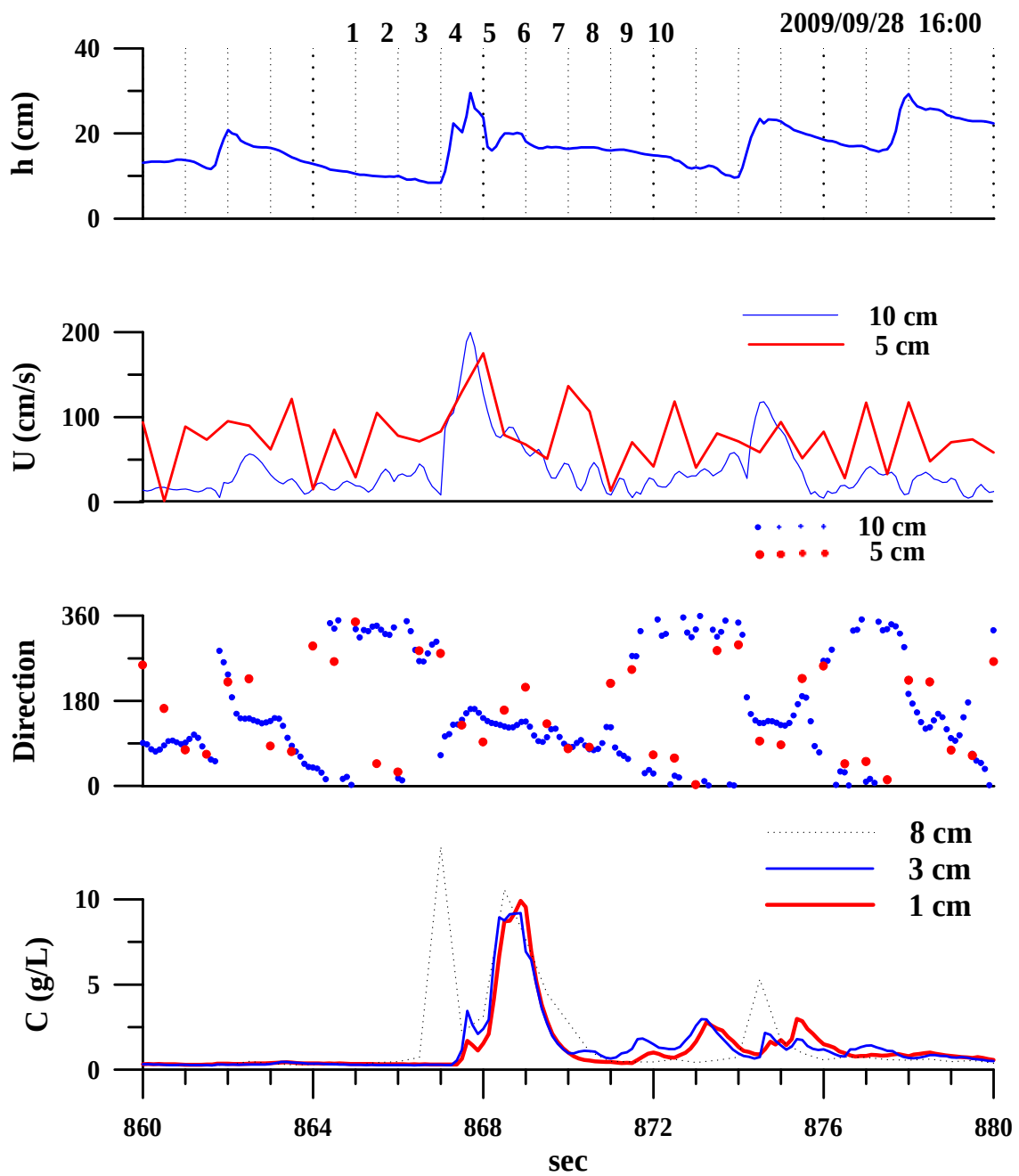


圖 3.34 水位、流速與懸浮質濃度之時序列分佈

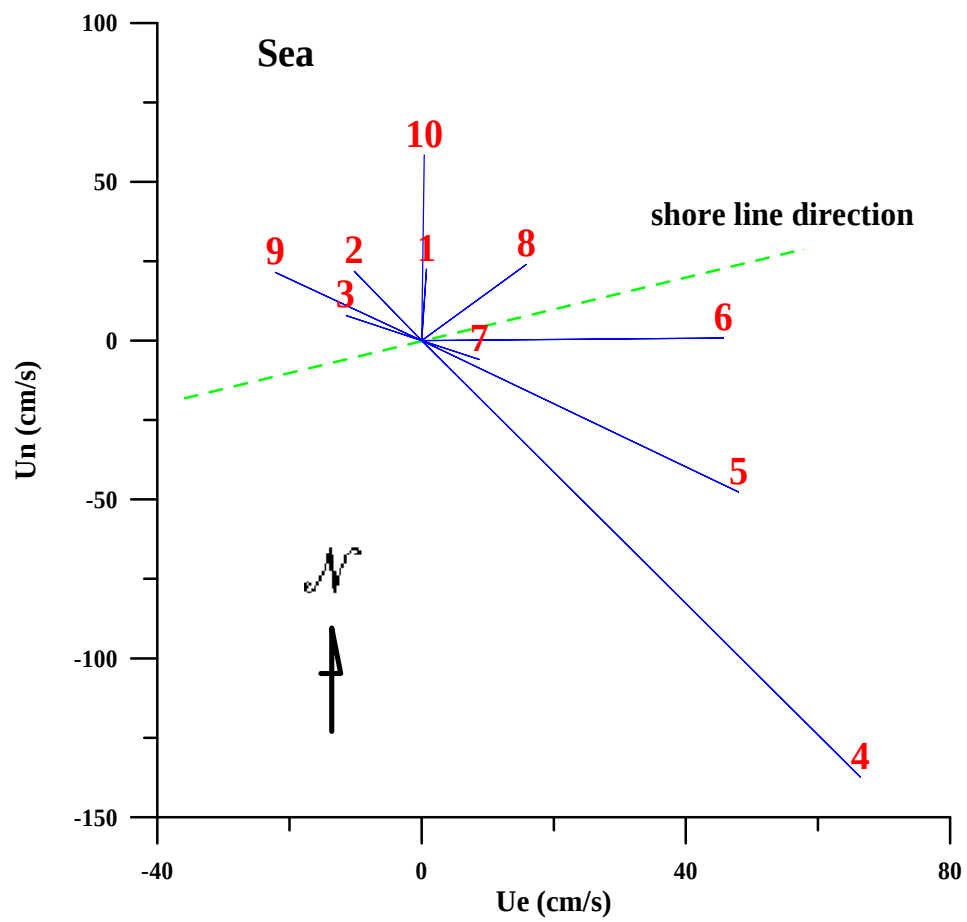


圖 3.35 底床上 10 cm 處之水平流速變化

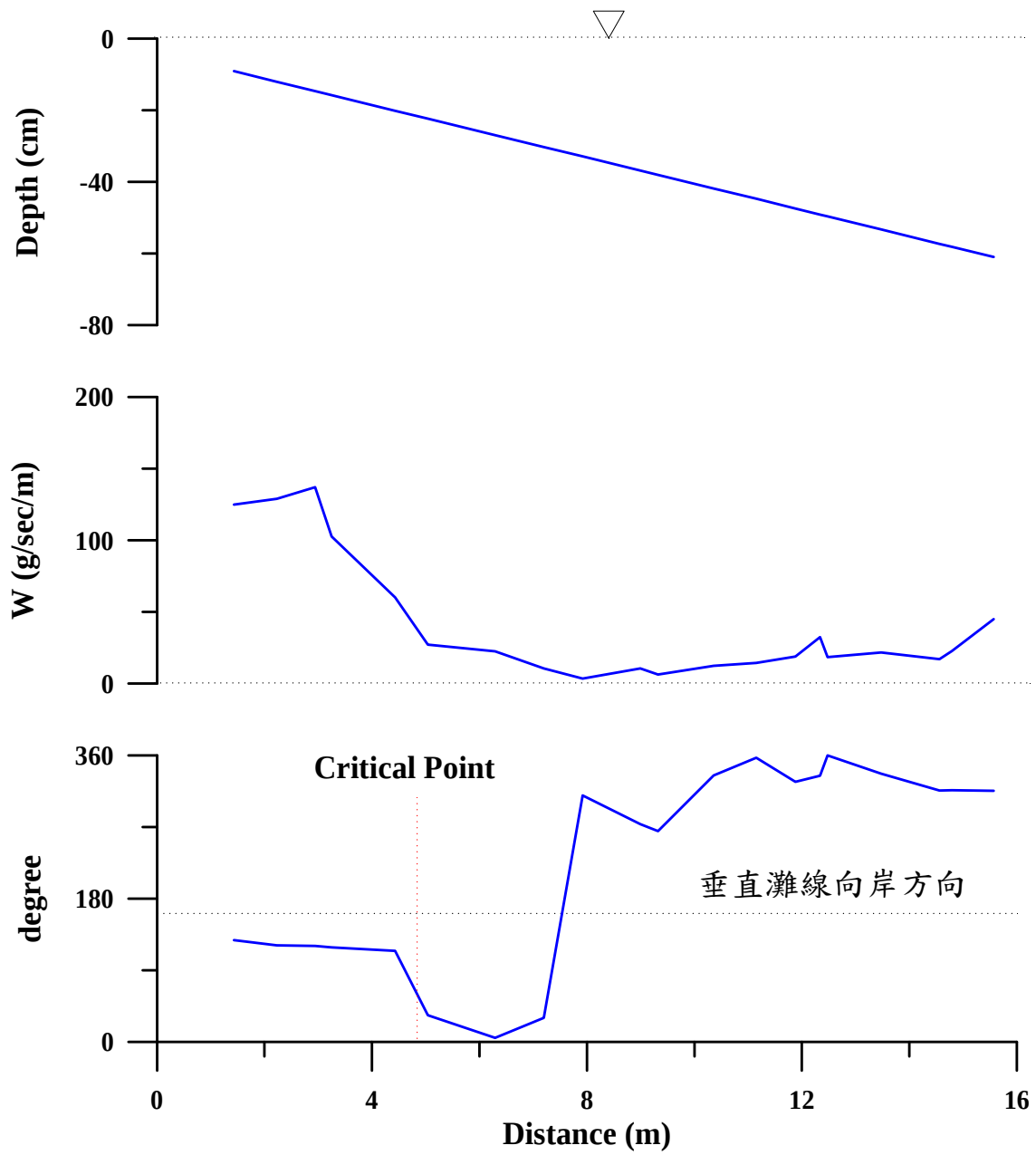


圖 3.36 碎波帶內垂直灘線上輸砂率與輸砂方向變化

第四章 結論與建議

4.1 結論

安平港南側海岸受季節風浪與潮流作用，漂沙活躍，但沿岸漂沙受到防波堤阻擋，加上二仁溪砂源減少，在北向優勢漂沙作用下，安平港南側海岸正逐漸被侵蝕，每年大約退縮十公尺。本研究自 95 年起，持續進行灘面底床測量、近岸流場、懸浮質濃度分佈及碎波帶觀測等，以瞭解該海域波浪與漂沙之關係。

本研究於安平港南側海岸及臺北港北側之沙崙海灘分別進行碎波帶漂沙觀測，安平港南側海岸之砂中值粒徑較小，粒徑分佈範圍較寬，細砂質多，沉降較慢，碎波帶坡降約為 3/40，碎波形式主要為捲波型碎波，漂沙營力主要來自底床剪應力；臺北港北側海岸之砂中值粒徑較大，粒徑分佈範圍較窄，細砂質少，沉降較快，碎波帶坡降約為 1/27，碎波形式主要為溢波型碎波，但二次碎波中夾雜著似捲波型碎波，漂沙營力主要來自似捲波型二次碎波之垂直底床衝擊力。

臺北港海域於九月份已是東北季節風型態，主要輸砂方向為向、離岸方向。不過，淨輸砂率仍為向岸方向，因此漂沙趨勢為淤積海岸，符合九月份兩次地形測量的結果。

分析安平港南側海岸碎波帶內瞬時底床剪應力與懸浮質濃度分佈之關係，顯示碎波帶內砂懸浮移動之臨界 Shields 數約為 0.166，較前人計算得 $\Phi_{crs} = 0.175$ 稍小，此由於碎波帶內底床上之沙連結構會增加底流之剪應力所致。另外底床上之懸浮砂量峰值與剪速度峰值之間有時間延遲現象，延遲時間由岸向碎波點增加，但在碎波點外此延遲現象則消失不見。

4.2 成果效益及後續應用情形

本研究在港區附近海岸安裝觀測儀器直接量測碎波帶內波動底床上之流速分佈、碎波波高變化及懸浮砂之濃度分佈，計算與分析底床剪應力及懸浮總砂量關係並得出其經驗式，作為決定碎波帶漂沙輸砂量估算之參數依據，已獲得良好之結果。應用上可提供各港務局或學術研究單位於探討近岸輸砂量推算與海岸漂沙數值模擬之參考。

參考文獻

1. Aagaard, T. and Greenwood, B. (2008) "Infragravity wave contribution to surf zone sediment transport --- The role of advection," *Journal of Marine Geology*, 251, pp. 1-14.
2. Bowen, A. J., (1969) "Rip current, 1: theoretical investigations," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, No. 23, pp. 5467-5478.
3. Dohmen-Janssen, C. M. (1999) *Grain size influence on sediment transport in oscillatory sheet flow: phase lags and mobile bed effects*, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology
4. Gallagher, B. (1981) "Generation of surf beat by non-linear wave interactions," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 49, pp. 1-20.
5. Hino, M., (1974) "Theory on formation of rip current and cuspidal coast," *Proceedings of the 14th Conference on Coastal Engineering*, pp. 29-34.
6. Horikawa, K. and Sasaki, T., (1975) "Numerical simulation of nearshore circulations," *Proceedings of the 29th Japanese Conference on Coastal Engineering*, Sendai, JSCE, pp. 333-337.
7. Hsu, J. R. C., Silvester, R., and Xia, Y. M., (1987) "New characteristics of equilibrium shaped bays," *Proc. 8th Aust. Conf. Coastal and Ocean Eng.*, pp. 140-144.
8. Inman, D.L., Bagnold, R.A. (1963) In: Hill, M.N. (Ed.), "Littoral Processes", in the Sea, vol. 3. Interscience, New York, pp. 529-533.
9. Komar, P. D. and Miller, M. C. (1975) "The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stresses under waves," *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 45, pp. 697-703.
10. Lamb, H. (1932) "Hydrodynamics," Cambridge: *Cambridge University Press*. pp. 446.
11. Li, M.Z., Amos, C.L., Heffler, D.E., (1997) "Boundary layer dynamics and sediment transport under storm and non-storm conditions on the Scotian Shelf," *Marine Geology*, Vol. 141, pp. 157-181.
12. Lin, P. C., Chou, H. T. and Juang, J. T. (2002) "The influence of energy grouping and undulating on sediment suspension in the surf zone," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 83-91.
13. Longuet-Higgins, M. S., (1953) "Mass transport in water waves," *Phil. Trans. Roy. Soc., London, Series A*. No. 903, Vol. 245.
14. Longuet-Higgins, M. S., Stewart, R. W. (1964) "Radiation stresses in water waves --- a physical discussion with applications," *Deep-Sea Res.*, 11, pp. 529-562.
15. Middleton, J. H., Cahill, M. L. and Hsieh, W. W. (1987) "Edge waves on the Sydney coast," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, pp. 9487-9493.
16. Perlin, A. and Kit, E. (2002) "Apparent roughness in wave-current flow: Implication for coastal studies," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 8, pp. 729-741.
17. Rubey, W. W. (1933) "Settling velocities of gravel, sand and silt particles," *American Journal of Science*, Vol. 25, pp. 325-338.
18. Turner, I.L., Whyte, D., Ruessink, B.G., Ranasinghe, R., (2007) "Observations of rip spacing, persistence and mobility at a long, straight coastline," *Marine Geology*, Vol. 236, pp. 209-221.
19. USACE, (1984). Shore Protection Manual. Department of the Army, U.S. Corps of Engineers, Washington, DC 20314.
20. Van Rijn, L. C. (1984) "Sediment transport. Part II: Suspended load transport," *J. Hydraul. Eng.*, 110(11), 1613-1641.

21. Yu, G. and Tan, S. K. (2006) "Errors in the bed shear stress as estimated from vertical velocity profile," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 5, pp. 490-497.
22. 日野幹雄 (1974) 「海浜流系之發生理論」，土木學會論文報告集，No. 225。
23. 林柏青、江金德、蔡金吉 (2002) 「安平海域底質採樣分析與沿岸流現場觀測」，第二十四屆海洋工程研討會論文集，第 595-601 頁。
24. 蘇青和、吳基、徐如娟、林受勳 (2002) 「安平港港口區域潮汐及海流特性研究」，第二十四屆海洋工程研討會論文集，第 525-532 頁。
25. 交通部運輸研究所 (2003) 「安平港海氣象觀測、防波堤水工模型試驗以及數值模擬研究 (4-2) — 海氣象觀測」，第四年期末報告。
26. 林柏青、莊甲子、江玟德 (2006) 「底床薄層流輸砂之現場調查研究」，第二十八屆海洋工程研討會論文集，第 615-620 頁。