97-47-7333
MOTC-IOT-96-H2DA001-4

臺灣地區港灣近岸海域漂沙調查研究 (3/4)

交 通 部 運 輸 研 究 所
中華民國 97 年 3 月

97 臺灣地區港灣近岸海域漂沙調查研究 (3/4)

交通部運輸研究所

GPN：1009700840
定價　100 元

97-47-7333
MOTC-IOT-96-H2DA001-4

臺灣地區港灣近岸海域漂沙調查研究 (3/4)

著 者：林柏青

交通部運輸研究所
中華民國 97 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目資料

臺灣地區港灣近岸海域漂沙調查研究.（3/4）/
林柏青著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運
研所, 民97.03
面 ; 公分
參考書目:面
ISBN 978-986-01-3899-3(平裝)

1. 海岸動力學 2. 海岸 3. 臺灣

351.982 97006637

臺灣地區港灣近岸海域漂沙調查研究(3/4)

著　　者：林柏青
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：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) 26587176
出版年月：中華民國 97 年 3 月
印 刷 者：德輝興業有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 110 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
五南文化廣場：臺中市中山路 6 號• 電話：(04)22260330

GPN：1009700840　　ISBN：978-986-01-3899-3 (平裝)
著作財產權：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：臺灣地區港灣近岸海域漂沙調查研究(3/4)

國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號
ISBN 978-986-01-3899-3（平裝）	1009700840	97-47-7333	96-H2DA001-4

主辦單位：港灣技術研究中心
主管：邱永芳
總計劃主持人：何良勝
計劃主持人：林柏青
研究人員：張惠華、李江澤
聯絡電話：(04)26587121
傳真號碼：(04)26560661

研究期間
自 96 年 01 月
至 96 年 12 月

關鍵詞：溯昇波帶、流速剖面、現場觀測、輸砂

摘要：

溯昇波帶之漂砂運動直接影響海岸線變化，多年來因觀測儀器及量測方法之限制，一直未能對此流層薄、流速大又具有高濃度輸砂特性的海岸溯昇區流場作詳盡的觀測與分析。該區域銜接內碎波帶，承受碎波能量帶動灘面輸砂，在近岸漂砂活動中佔重要一環。本研究利用超音波剖面流速儀以 10Hz 測頻及 0.7mm 之精密高距解析溯昇波帶之垂直斷面流場，同時結合高精度水位計及電導式濃度計，終能對現場溯昇流內部結構作詳細觀測。觀測作業中還有攝影機同步拍攝水面及水下底邊界層附近之溯昇流運動，對於觀測資料的解析有極大助益。溯昇流動量主要來自碎波波潮(bore)崩解之紊流，因此沿灘面斜坡向上溯昇時，同時攜帶高濃度之懸浮砂，淤積於灘面上；回溯流動量則來自重力加速度，因底床磨擦造成灘面侵蝕，兩者間形成互補作用。由拍攝影片及資料分析發現灘面不完全平坦的砂面漣漪，對於回溯流之底質捲增(entrainment)有加強效應。本研究還採用浮台載具，使剖面流速儀探頭能隨溯昇流流層厚度變化而上下移動，讓探頭維持浸入水中又不影響底邊界層流場。

出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
97 年 3 月	65	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 (3/4)

ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN978-986-01-3899-3 (pbk)	1009700840	97-47-7333	96-H2DA001-4

DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER
DIVISION DIRECTOR: Yung-fang Chiu
PROJECT ADVISOR: Liang-Sheng Ho
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Po-Ching Lin
PROJECT STAFF: Hui-Hua Chang, Chiang-Tse Li
PHONE: 04-26587121
FAX: 04-26560661

PROJECT PERIOD
FROM January 2007
TO December 2007

KEY WORDS: swash zone; velocity profile; field observation; sediment transport

ABSTRACT:

Shorelines are generally affected directly by the sediment transport in the swash zone. For years, the observation of flow velocity and sediment transport in this area has been seriously limited due to the difficulties of measuring this very thin layer. The power to move the sediment on the beach facade is mainly released from the bore collapsing in the inner surf zone. Observations were made using the ultrasonic velocity profiler which can measure 10 velocity profiles every second, with a spatial resolution of 0.7mm. High precision water level instruments and conductivity-type concentration meters are used simultaneously. A unique method was developed to install a video set on the beach, so the sediment movement in the sheet flow can be clearly observed and analyzed. It is very useful in understanding the swash motions in the swash zone. The suspended sediment induced by the turbulence from bore collapsing is transported and accumulated on the beach facade, and gradually eroded by the backwash current. The balance between them decides the final shape of the beach facade. Observations were made using a novel technique of floating a platform to measure the velocity profile without disturbing the bottom boundary layer.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
March 2008	65	100	☐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

1.1 計畫緣起與文獻回顧…… 1-1

1.2 工作項目與內容…… 1-3

第二章　理論說明…….. .. 2-1

2.1 溯昇帶的內部結構與輸砂特性..... 2-1

2.2 考慮滲流作用之溯昇帶輸砂公式..... 2-4

2.3 薄層流輸砂現象..... 2-5

第三章 現場觀測與資料分析..... 3-1

3.1 觀測地點說明…… 3-1

3.2 現場地形測量…… 3-6

3.3 儀器安裝與現場觀測作業說明..... 3-9

3.4 碎波帶與溯昇波帶之慮波效應..... .3-15

3.5 溯昇波帶之流速觀測..... .3-17

3.6 流速剖面分析..... .3-22

3.7 溯昇帶之懸浮質濃度剖面觀測..... .3-26

3.8 溯昇波之水位、流速與濃度關係..... .3-28

3.9 攝影觀察溯昇波帶水流與輸砂現象..... .3-31

第四章 結論與建議…….. 4-1

參考文獻…… 5-1

表目錄

表 3.1 使用不同頻率時 UVP 之可量測範圍、最大速率與解析度 .3-11

圖目錄

圖 2.1　溯昇帶範圍示意圖 2-1
圖 2.2　薄層流濃度分佈示意圖 2-6
圖 3.1　安平近岸海象及漂砂觀測站位置圖 3-2
圖 3.2　漁港防波堤阻擋砂源破壞沙灘的自然平衡機制 3-3
圖 3.3　受離岸堤保護的沙灘 3-4
圖 3.4　漂至沙灘上的廢棄蚵架 3-5
圖 3.5　測站前漂來之廢棄蚵架 3-5
圖 3.6　灘面地形測量作業 3-6
圖 3.7　96 年 3 月至 5 月的灘面地形變化 3-7
圖 3.8　96 年 6 月至 8 月的灘面地形變化 3-7
圖 3.9　96 年 9 月至 11 月的灘面地形變化 3-8
圖 3.10　整合 96 年 3 月至 11 月的灘面地形變化 3-8
圖 3.11　溯昇帶安裝 ALEC 海流儀、水位計及濁度計等進行觀測 3-10
圖 3.12　溯昇帶安裝 OBS-3 濁度計等進行觀測 3-10
圖 3.13　超音波式流速剖面儀探頭安裝示意圖 3-11
圖 3.14　測點分佈位置圖 3-12
圖 3.15　現場安裝 UVP 測點位置圖 3-12
圖 3.16　UVP 浮台隨溯昇流水位升降 3-13
圖 3.17　薄層流觀測之儀器配置 3-14
圖 3.18　CCM 在底床上下移動測得之砂濃度變化 3-14
圖 3.19　灘面地形與測點位置 3-15
圖 3.20　波浪經碎波帶 S50 測點到達 S30 之波形變化 3-16

圖 3.21　波浪經碎波帶 S50 測點到達 S24 之波形變化 3-17
圖 3.22　測點 P47 與 P49 同步觀測之平均流速變化 3-18
圖 3.23　測點 P49 回溯流之流速剖面 3-18
圖 3.24　測點 P49 溯昇流之流速剖面 3-19
圖 3.25　溯昇帶之(a)水位變化(b)向離岸流(c)沿岸流 3-20
圖 3.26　溯昇帶溯昇過程之連續照片 3-21
圖 3.27　安裝灘面底床下之超音波式剖面流速儀 UVP..... 3-23
圖 3.28　溯昇流通過 UVP 時之情形..... 3-23
圖 3.29　溯昇波通過時之水位變化..... 3-24
圖 3.30　溯昇波通過時之流速變化..... 3-24
圖 3.31　溯昇波通過時各斷面之流速剖面..... 3-25
圖 3.32　安裝於溯昇帶之 ALEC 濁度計、流速計及水位計 3-26
圖 3.33　溯昇帶流速與不同高程懸浮質濃度..... 3-27
圖 3.34　溯昇帶水位變化..... 3-29
圖 3.35　溯昇帶懸浮質濃度..... 3-29
圖 3.36　溯昇波之水位、流速與濃度關係..... 3-30
圖 3.37　攝影觀察沙崙溯昇波帶水流與輸砂現象..... 3-35
圖 3.38　攝影觀察安平溯昇波帶水流與輸砂現象..... 3-39

第一章　前 言

近岸漂砂是決定海岸侵淤現象的重要因素，波浪由外海經地形折射或繞射進入近岸海域後，因水深漸淺，波浪中水粒子與底床磨擦，帶動底床砂粒。波浪向岸前進過程中會因淺化變形而碎波，碎波能量釋出，在碎波帶內使砂粒懸浮或移動，懸浮砂被沿岸流或向-離岸流攜帶形成懸浮載漂砂，部份砂粒在底床上躍動推移以底床載方式移動，有時較強的底流會在底床上形成薄層流輸砂。溯昇帶位於碎波帶與陸地交界處，在波浪溯昇過程中時而露出水面、時而被水淹沒，水深變化大。流層薄、流速強、高紊流、懸浮質濃度大是其特性(Elfrink and Baldock, 2002)。溯昇帶提供陸地與海域砂粒交換的媒介，瞭解溯昇帶詳細的輸砂過程與水動力機制對於海岸侵淤模式的建立非常重要。本研究在安平港南側的黃金海岸設立近岸漂砂現場觀測站，於海岸內碎波帶至溯昇帶區域安裝儀器，觀測波浪溯昇、流場分佈與懸浮質濃度分佈等，同時以水下攝影機拍攝底床砂粒運動，觀察波浪溯昇過程中懸浮砂粒之運動與底床變化。

1.1 計畫緣起與文獻回顧

近岸漂砂主要發生於碎波帶(surf zone)與溯昇帶(swash zone)，過去研究近岸輸砂現象多著重在碎波帶之碎波過程、沿岸流、向-離岸流及懸浮質濃度分佈等的觀測，如 Ifuku (1988), Kawata et al. (1990), Conley and Inman (1992), Kawata et al. (1992), Nishi et al. (1992), Kos'yan et al. (1990)等。一直到 80 年代，學者對溯昇帶的關注仍多停留在與海岸結構物設計有關的波浪溯昇高預測的研究，例如 Guza and Thornton (1982); Roos and Battjes (1994)。直到 Nielsen (1989)及 Gourlay (1992)試圖探討溯昇帶波動現象與碎波帶水粒子運動的關係，才開始對溯昇帶的相關輸砂現象有初步的認識。不過，想進一步瞭解實際海岸溯昇帶的水粒子運動機制與輸砂行為，則受限於現場觀測困難以及實際輸砂作用的

複雜特性，例如溯昇帶的淨輸砂量往往取決於向、離岸兩不同方向可能各別為大量輸砂量的微小差距(Osborne and Rooker, 1999; Hughes et al., 1997)。雖然如此，溯昇帶之水動力機制與其輸砂現象仍有相當之重要性，因為溯昇帶是近岸輸砂重要的一環，溯昇帶底床附近之懸浮質濃度往往高於內碎波帶(Osborne and Rooker, 1999; Beach and Stemberg, 1991)，溯昇帶銜接海域與陸域，其輸砂作用直接影響到海岸淤積或侵蝕以及海岸線變化。

波浪碎波後在內碎波帶以波潮(bore)形態向岸推進，夾帶紊流與碎波能量在前灘(foreshore)完全崩解，並在灘面上形成溯昇運動。由於灘面溯昇運動流層薄而流速大，不管是溯昇(uprush) 或回溯(backwash)都會造成大量輸砂，其間微妙的平衡作用則左右海岸的侵淤。以往因實際觀測困難，對溯昇帶之研究論述較少，Butt and Russel (1999)認為溯昇帶向、離岸流流速之不對稱與輸砂量平衡有關。Hughes (1995)； Cox et al. (2000)； Puleo and Holland (2001)； Archetti and Brocchini (2002)； Raubenheimer et al (2004)等研究溯昇帶之底床剪應力，認為流溯昇時之底床磨擦係數應大於流回溯時之磨擦係數，可是卻無法提出合理適當的解釋。Puleo et al. (2000)； Petti and Longo (2001)； Cowen et al. (2003)等則認為溯昇輸砂主要來自碎波浪潮崩解引起之懸浮砂粒，而回溯輸砂則來自底床磨擦作用。

一個完整的近海砂岸漂砂模式必須包括海灘面之溯昇帶輸砂，Karambas and Koutitas (2002)採用 Watanabe 及 Dibajnia 的薄層流輸砂公式使得以較正確的描述溯昇帶輸砂現象以及灘面地形變化，但仍有許多可以改進的地方，主要是溯昇帶水粒子運動方式與碎波帶有相當大差異。其次，灘面底床剪應力、垂直灘面的滲流作用力以及波潮前方的水平壓應力變化都會影響溯昇帶之輸砂作用。

本研究目的在瞭解溯昇波帶懸浮砂與流況分佈以及底床薄層流輸砂現象，解析薄層流瞬間輸砂、輸砂量、流速剖面與摩擦係數等邊界層物理量，進而探討平均輸砂量與影響因素之關係，以提供近岸漂砂

預測模式之驗證與改進。

1.2 工作項目與內容

綜合以上說明，我們大致瞭解近岸漂砂現象複雜，觀測困難，目前採行之漂砂模式大抵以非常簡化的手法，應用經驗係數來略估輸砂量，在定性分析上也許尚可適用，但由於漂砂現象有強烈地區特性，因此任何環境因素的影響都有賴正確控制模式與參數才能因時因地獲得正確的定量評估，本計畫執行之主要工作內容如下:

1. 長期監測觀測地區之灘面與底床高程變化，以瞭解當地波況與漂砂現象對海岸侵淤之影響。
2. 蒐集外海入射波浪與流況資料，可獲得近岸海況之基本輸入條件。
3. 進行近岸海象之波浪、流與懸浮質濃度分佈等之觀測，可瞭解近岸地區之懸浮漂砂現象。
4. 以水下攝影系統進行現場同步觀測作業以瞭解溯昇帶底床之輸砂運動行為。
5. 建立現場溯昇帶薄層流輸砂之觀測作業模式並取得相關流速、濃度與厚度等資料，以分析獲得其對應之行為模式。
6. 結合溯昇波帶懸浮漂砂與底床薄層流輸砂以建立相關之輸砂模式。

由於相關研究工作將在極困難之情況下進行，唯有賴研究團隊不斷努力，逐一克服困難，希望能將多年研究成果提供各海域海岸侵淤之研判及輸砂量推估使用，以作為未來港灣工程建設之重要依據。

第二章　理論說明

灘面之溯昇波運動是提供底質砂粒在水線上下範圍進行交換以及改變灘線位置的主要機制，溯昇帶因環境及內部結構特殊其研究受限於儀器與觀測方法，無法有效掌握溯昇流之詳細內部流場結構。本研究首度在海岸現場以超音波剖面流速儀結合電導式濃度計及水下攝影觀測等對其分佈與變化作深入觀察與探討，希望對此近岸漂砂機制能有進一步之瞭解。以下分別就溯昇帶的內部結構與輸砂特性及普遍發生在溯昇帶的薄層流輸砂現象作簡單說明。

2.1 溯昇帶的內部結構與輸砂特性

溯昇帶位於海與陸地灘面交接處，波浪由外海向岸前進經過碎波帶，最後以波潮方式在灘面前方崩解，釋出能量帶動水體沿著灘面向上攀升，到達極限高後位能轉為動能，灘面上水體再以回溯流回歸海裏。如圖 2.1，由回溯最低點至溯昇極高點間之區域即為溯昇帶，溯昇流形成之舌狀水體稱為溯昇舌(swash lens)。

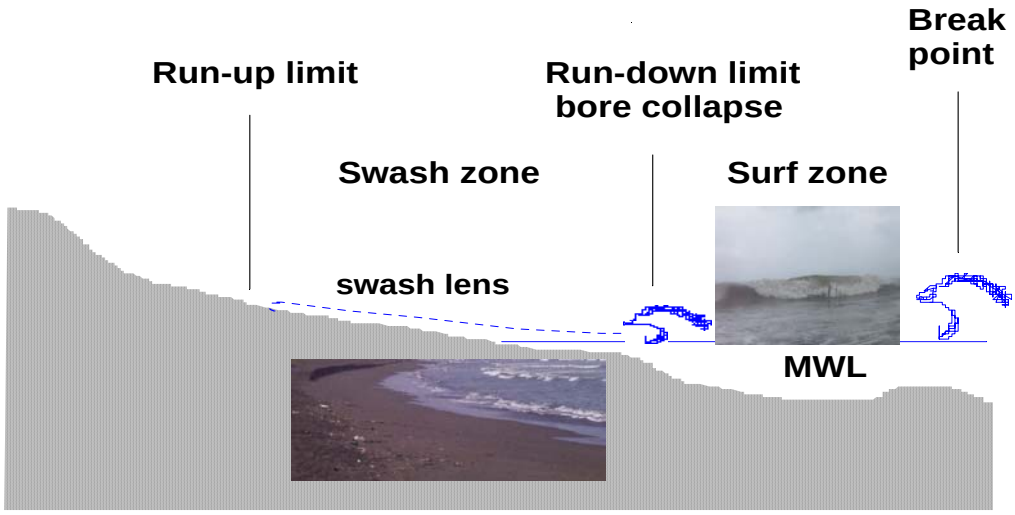


圖 2.1　溯昇帶範圍示意圖

波浪溯昇過程直接來自碎波帶的波潮作用力，其控制因子包括灘

面地形、底質特性及地下水水位等(Hughes and Turner, 1999)。溯昇帶連接碎波帶，波浪溯昇時其內部結構與輸砂特性卻有別於碎波帶： (1)波潮在前灘崩解溯昇過程中，流層變薄流速加快，最大流速有時超過2m/s (Hughes et al., 1997; Masselink and Hughes, 1998; Butt and Russell, 1999; Osborne and Rooker, 1999; Puleo et al., 2000, 2003)； (2)波潮崩解時，產生於水體表面的紊流結構衝擊底床，造成砂粒懸浮及傳輸運動(Puleo et al., 2000; Jackson et al., 2004)； (3)垂直進出灘面的滲流現象可能影響溯昇流及輸砂作用(Turner and Masselink, 1998; Butt et al., 2001; Masselink and Li, 2001; Conley and Griffin, 2004); (4)較大的回溯流時可能形成超臨界流(super-critical flow)及水力跳躍(hydraulic jumps)現象(Osborne and Rooker, 1999; Butt and Russell, 1999); (5)溯昇帶內懸浮質濃度可能大於碎波帶，如果形成薄層流其輸砂層底床附近可能達到100kg/m^3 (Beach and Sternberg, 1991; Osborne and Rooker, 1999; Butt and Russell, 1999; Puleo et al., 2000; Evans et al., 2003); (6)結合較大流速及較高的懸浮質濃度，使溯昇帶常有較大輸砂量形成(Masselink and Hughes, 1998; Puleo et al., 2000; Evans et al., 2003)，然而淨輸砂率卻可能只是溯昇流與回溯流兩大輸砂量之間的微小差值(Osborne and Rooker, 1999)。

溯昇帶輸砂作用直接影響到海岸的侵淤，過去在現場觀測中發現溯昇流與回溯流並不對稱，而溯昇流的懸浮質濃度往往大於回溯流(Puleo et al., 2000; Butt et al., 2002; Masselink et al., 2005)。根據Bagnold(1963)的能量模式，流體流經底床會在底床砂上產生剪應力，能量則藉由剪應力傳遞給底床砂。當剪應力增加，底質顆粒開始移動形成底移載輸砂，則浸水重底移載輸砂率 I_b 與流體傳輸給底質的流體功率 ω 成正比。

$$I_b = \frac{\varepsilon_b \omega}{\tan\phi - \tan\beta} \tag{2-1}$$

其中 ε_b 稱為效率係數，$\tan\varphi$ 為底質內摩擦角，$\tan\beta$ 為灘面坡度。流體功率通常以底床剪應力 τ_o 與流體速度 u 的乘積表示，底床剪應力則與速度的平方成正比。

$$\tau_o = \frac{1}{2}\rho c_f u|u| \tag{2-2}$$

ρ 為流體密度，c_f 為底床摩擦係數，則

$$I_b = \frac{0.5\varepsilon_b \rho c_f u^2|u|}{\tan\phi - \tan\beta} \tag{2-3}$$

因此 Bagnold (1966)認為底移載輸砂率 I_b 與流體速度 3 次方成正比。即 $I_b = ku^3$，其中 k 為包含摩擦項的修正係數，而對同一個沙灘應有相同的 k 值。但是根據現場觀測結果，溯昇流輸砂似乎比回溯流輸砂更有效率，亦即 $k_{up} > k_{back}$ (Masselink and Hughes, 1998; Puleo et al., 2000)。在實驗室中也發現類似結果(Cox et al., 2000; Conley and Griffin, 2004)，他們觀察到溯昇流比回溯流有較大的底床剪應力以及摩擦係數，也許 Bagnold (1963)的輸砂率模式中忽略了某些重要的物理項。有些人則嘗試解釋溯昇流時有較大的底床剪應力以及摩擦係數的原因：(1)向岸方向壓力梯度引起的加速度效應(Butt and Russell, 1999; Nielsen, 2002; Puleo et al., 2003)； (2)波潮帶來的紊流衝擊在底床上的結果(Puleo et al., 2000; Petti and Longo, 2001; Butt et al., 2004)； (3)波潮崩解造成的底質平移效應(Hughes et al., 1997; Pritchard and Hogg, 2005); (4)灘面滲流改變了流體的邊界層結構(Turner and Masselink, 1998; Butt et al., 2001)。

在近岸碎波帶，紊流是引起底質懸浮的一項重要因素，波浪碎波時產生的大型渦旋會穿入底床並引起大的垂直速度振盪(Nadaoka et al., 1989; Smyth et al., 2002)以及雷諾應力(Yu et al., 1993; Cox and Kobayashi, 2002)。同樣的，當波潮崩解時紊流會被引入溯昇帶，沿著溯昇舌表面移動並觸及底床。另外在回溯流過程最後發生的水力跳躍，或者波潮速度超越前溯昇流之溯昇舌時，以及底床摩擦等都會產

生紊流效應。過去對於溯昇帶之現場流速觀測上，大都只有單點的量測，本研究首度嘗試以 UVP 進行現場的流速剖面觀測，以瞭解溯昇流底床邊界層之流場結構，並據以計算溯昇流與回溯流之底床剪應力。

2.2 考慮滲流作用之溯昇帶輸砂公式

根據修正的 Meyer-Peter and Müller (1948)公式，以及 Ribberink (1998)、Larson et al. (2001)、Butt et al. (2001)及 Karambas (2003)等試驗結果，無因次底質輸砂率 Q_b 與 $\theta^{3/2}$ 成正比。

$$Q_b = \frac{q_b(1-\lambda)}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = \frac{C}{1+\tan\beta/\tan\phi}\theta^{3/2}\frac{U}{|U|} \tag{2-4}$$

其中，C 為乘積係數，ϕ 為內摩擦角(大約 30°)，d_{50} 為底質之中值粒徑，s 為底質比重，$\tan\beta$ 為當地底床坡度(溯昇流時取正值，回溯流時取負值)，θ 則為 Shields 參數：

$$\theta = \frac{\tau}{W} \tag{2-5}$$

τ 是底床剪應力，W 是底質每單位體積之浸水重，考慮滲流作用時可經由增重或減重來調整 W 值(Turner and Masselink, 1998)。

$$W = \rho g d_{50}(s-1) - 0.5\rho g d_{50}\frac{w}{K} \tag{2-6}$$

w 為灘面底床內之滲流速度(向上為正)。為因應滲流作用對底床剪應力之影響，Turner and Masselink (1998)修正剪應力公式為

$$\tau_w = \tau_0\left(\frac{\Phi}{e^{\Phi}-1}\right) \tag{2-7}$$

其中，$\tau_0 = 0.125\rho f U^2$，$\Phi = cw/\left(f|U|\right)$，$c$ 是常數，f 則為無滲流時之底床摩擦係數。根據 Butt et al. (2001)及 Karambas (2003)在穩定流時 f 可由下式求得，式中 K_N 為底床粗糙度。

$$f = 1.28\left(\log\frac{11.1h}{K_N}\right)^{-2} \tag{2-8}$$

至於水深平均之懸浮質輸砂率，根據 Kobayashi and Tega (2002)，

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(hCU_S)}{\partial x} = S - w_S C \tag{2-9}$$

其中，C 為水深平均之懸浮質體積濃度，U_s 為其水平速度，S 為底質之向上傳輸率，w_s 為其沉降速度。水平單位面積之底質懸浮率 S 與波能之關係則可表示如下：

$$S = S_B + S_f; \qquad S_B = \frac{e_B D_B}{\rho g(s-1)h}; \qquad S_f = \frac{e_f D_f}{\rho g(s-1)h} \tag{2-10}$$

D_B 為波浪碎波之能量消散率，D_f 則為因底床摩擦之能量消散率，

$$D_f = 0.5\rho f|U|^3 \tag{2-11}$$

e_B 與 e_f 分別為 D_B 與 D_f 之懸浮效率係數，Kobayashi and Tega (2002)建議 $e_f = 0.01, \quad e_B = 0.001\left(TD_B/\rho gH^2\right)$。溯昇帶之能量消散率 D_B 根據 Puleo et al. (2000)之混合長理論，

$$D_B = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_S Uh\frac{\partial U}{\partial x}\right) + \nu_S h\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 \tag{2-12}$$

2.3 薄層流輸砂現象

近岸漂砂主要發生於碎波帶與溯昇帶，砂質海灘砂粒在波浪及沿岸流作用下產生輸砂現象，即在動床面(movable bed)上當底床剪力較大時，常發生薄層流(sheet-flow)輸砂，此時流況呈掃流狀態，根據 Dohmen-Janssen (1999)之研究，其體積濃度可達 52%，且分佈拘限於一薄層區域。如圖 2.2，薄層流上方為懸浮層(suspension layer)，體積濃度約小於 8%，各別顆粒間距大於砂粒直徑，砂粒間碰撞效應減少。圖中 $C_\delta = 8\%$，δ 為薄層流厚度，ζ 為底床侵蝕深度。

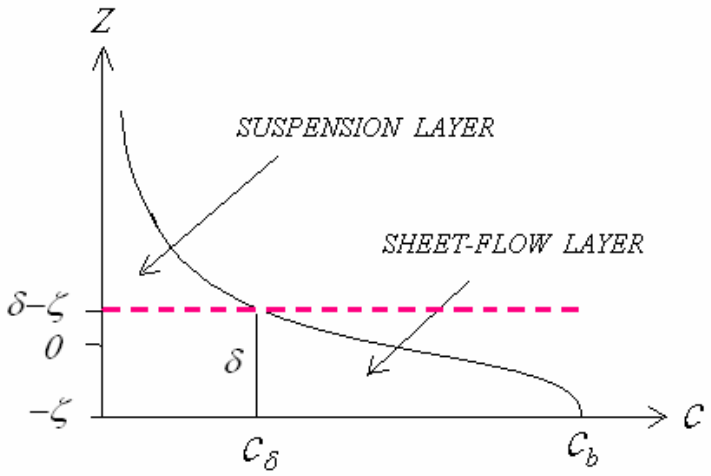


圖 2.2　薄層流濃度分佈示意圖

自然界中許多地方都可觀察到薄層流，例如河川中之單向流情況(Sumer et al., 1994)，在高底床剪應力時，砂波消失，底質以薄層流方式移動，其狀態有別於一般之底移輸砂。在海邊溯昇帶(swash zone)，由於坡度較陡，薄層流現象常發生於溯昇迴流時(Yu et al., 1990;Berry & Tom, 2002)。另外在碎波帶內，Lin et al.(2002)以水下攝影機觀察底床漂砂活動時，發現薄層流輸砂現象非常活躍，加上普遍存在之海灘動盪(surf beat)引起的長週期流場振盪，使得碎波帶與溯昇帶內漂砂現象錯綜複雜，不能單純以懸浮輸砂模式來推算海岸漂砂。

本研究為進一步瞭解溯昇帶輸砂現象，在底床上加裝一具水下攝影機，直接觀察現場底床薄層流之發生與變化過程，由於薄層流之高濃度與薄層特性，僅能以小型電阻式探針(CCM)進行量測，並估算薄層流發生時侵入底床之深度及其厚度。在實際海域中，薄層流多發生於碎波帶或溯昇帶附近，其水理現象對於海岸地形變化之預測相當重要。

薄層流輸砂為二相流(two-phase flow)之流體運動，流體與底質交互作用，現象極為複雜，其輸砂量的估算影響海岸地形變化數值計算結果之正確性。為便於解析，海岸地形變化之數值模式，如 Trowbridge and

Young (1989)，常引用 Madsen and Grant (1977) 及 Kobayashi and Seo (1985)之輸砂經驗公式進行計算。這些經驗公式大都由實驗室有限的試驗數據迴歸求出，其適用情形如何並未進一步考量。Horikawa et al. (1982) 在 U 形槽中以電阻式濃度計量測底部不同高度的濃度變化，試驗用底質為天然砂及塑膠屑，並由試驗結果界定薄層流發生的起始條件和輸砂濃度。Ahilan and Sleath (1987) 利用照相信號轉換為觀測底質之運動速度，並據此推算輸砂量。Staub et al. (1984) 則使用虹吸探測棒(siphon probe)於 U 形槽中測量瞬間輸砂濃度。

如前所述，試驗室內有限的環境條件僅能提供有限的試驗數據，以作定性上之判別。如擬正確估算近岸輸砂量，仍須由現場觀測直接取得相關參數，進行數值模式驗證與定量推算方能得到更準確的相關性。此外，碎波帶附近之底床砂因波浪作用而懸浮致形成懸浮漂砂，早期研究學者如 Fairchild (1959), Homma and Horikawa (1962)以及 Noda (1967)等皆曾以虹吸管抽取水中懸浮液分析，但此種取樣方法無法因應現場碎波帶的觀測需要，終被放棄。

隨著科技進步，學者開始改用濁度計直接量測水中懸浮質濃度，比如 Sleath(1982), Brennikmeyer(1975)以及 Wright et al.(1982)等。他們發現當波浪通過，在底床附近流向作 180° 反向運動時在沙漣上方會產生較大懸浮質濃度。隨後又有許多學者利用各式器材針對碎波帶進行研究，以進一步瞭解碎波帶內波動、流場及懸浮質分佈的關係，如 Ifuku(1988), Kawata et al.(1990), Conley and Inman(1992), Kawata et al. (1992), Nishi et al. (1992), Kos'yan et al. (1999)等等，皆以現場觀測方式解析碎波帶內各因子間之相關特性。其中 Kawata et al.(1990)在沙灘上建立 250 公尺長、100 公尺寬的 T 型棧橋橫跨碎波帶，來回拉動拖橇以測量底床地形的變化，Conley and Inman(1992)則在底床上加裝一具攝影機，以觀察波動下沙漣形成之初始過程，當然觀測位置位於碎波帶外相當距離才能取得清晰影像，碎波帶附近的攝影觀察在當時仍是一大挑戰。

Niemeyer and Bakker (1990) 在現場以電阻式探針直接量測薄層流之濃度，並估算薄層流發生時侵入底床之深度及其厚度。Lin et al. (2002)則以渠道式攝影裝置直接觀察現場薄層流運動及其侵入底床行為。碎波帶內波浪因觸底施予底床極大剪應力，發生薄層流時會伴隨底床侵蝕及上層懸浮。此為產生薄層流輸沙之主要因素，另外，碎波帶內底床沙漣結構發達，在不對稱波型作用下，底床輸砂行為極為複雜，需要全方位的觀測方法避免以偏概全。

本研究目的在瞭解碎波帶與溯昇帶懸浮砂與流況分佈以及底床薄層流輸砂之啟動機制，解析薄層流瞬間輸砂、輸砂量、流速剖面與摩擦係數等邊界層物理量，進而探討平均輸砂量與影響因素之關係，以提供近岸漂砂預測模式之驗證與改進。

第三章 現場觀測與資料分析

臺灣四面環海，源自內地的河川不斷將砂源帶往河口、海邊，外海風浪又不斷將海岸砂源作重新分配，數萬年來臺灣海岸處在一種動態的平衡狀態中。人為開發如建水庫、墾山林、建港築堤等一再破壞大自然的平衡，臺灣西海岸原本綿延不盡的美麗沙灘，被無數漁、商港突堤截成柔腸寸斷，大自然的自我調整作用使海岸出現侵蝕與淤積現象。唯有深入瞭解海岸漂砂機制才能達到保護海岸的目的，研究海岸漂砂作用可由多方面著手：(1)實驗室可將環境條件單純化，但限於規模與比例扭曲，只能作定性探討；(2)電腦模式研究可不斷變更環境條件，探討各種漂砂現象，不過正確的模式結果仍須要正確的參數及水動力模式輸入；(3)現場觀測可直接量測各項參數，但複雜的環境因素、儀器精密度、有限的人力、物力及作業危險性，使得現場觀測有極高的困難度。本研究擬以三年為期，第一年蒐集相關研究文獻，進行現場初步探測，大致瞭解溯昇帶之溯昇波特性並建立現場觀測技術；第二年則針對特定參數進行量測與分析；第三年將參數應用在相關水力漂砂模式並逐步深入探討各種漂砂現象。

近岸海域漂沙現象多發生在碎波帶(surf zone)與溯昇帶(swash zone)內，外海入射波浪在碎波帶外開始因觸底與底床磨擦，於接近碎波帶時，波浪逐漸變形、崩潰並重擊底床，最後以波潮(bore)形態穿過內碎波帶。在海水與灘面交界處波潮崩解，水體以溯昇流(up-rush)沿著灘面向上攀升，波潮崩解的紊流激起底床砂懸浮，同時被帶往前灘(foreshore)高處並在流速減弱時淤積在灘面上。高處水體受重力作用沿著灘面流回海面形成回溯流(backwash)，在較陡坡面上回溯流容易形成薄層流(sheet flow)，底床砂受較大底床剪應力(bed shear stress)作用，以高濃度薄層底移載(bed load)輸砂方式將灘面的砂帶回海裡。溯昇流與回溯流由內碎波帶波潮崩解水體形成，其溯昇舌(swash lens)在溯昇過程中因水體拉長，水深迅速變淺，甚至露出底床。溯昇帶此種流層薄、流速大、高濃度及斷續露出水面的特性對於現場觀測形成極大挑戰。

3.1 觀測地點說明

本年度研究將主要儀器集中安裝於內碎波帶及溯昇帶，觀測蒐集該區水動力機制及漂砂現象。研究地點仍然選擇臺灣西南海域的安平黃金海岸(圖 3.1)，主要原因為該地點已經有長期的碎波帶觀測經驗，外海水深 16 米處設有觀測樁可提供相關入射波浪及外海海流資料，海邊設有停車場方便工作人員及研究器材進出。觀測地點位於台南安平港以南約四公里，二仁溪口以北約二公里處，現場海岸線為南北走向，沙灘寬約 60 公尺，灘地寬闊適合提供民眾各種休閒活動。不過該沙灘面對臺灣海峽，一年中受冬季的東北季風，夏季的西南季風、颱風，以及潮流等影響，漂砂活躍，地形變化極大。

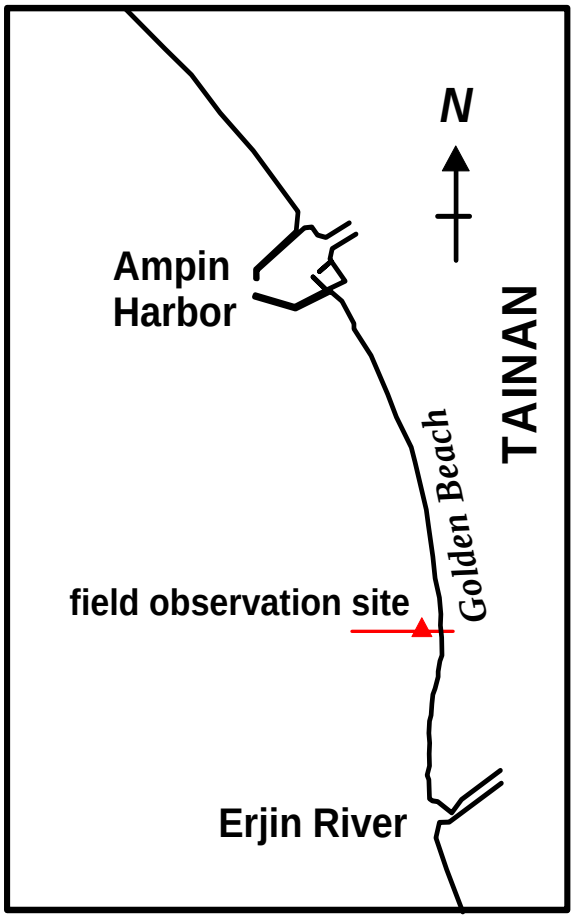


圖 3.1　安平近岸海象及漂砂觀測站位置圖

台南以南海岸開發較早，漁港密集人口眾多，住宅與海邊常常只以一道防波堤牆區隔，原本寬闊的沙灘因砂源被漁港突堤阻擋(圖3.2)，在波浪長期作用下，砂源進出無法平衡，海灘逐漸被侵蝕。為保護海岸及附近住民安全，政府興建大量離岸堤包圍沙灘，雖然防止沙灘被持續侵蝕，但不幸的破壞自然景觀，處處消波塊使美麗沙灘變成猙獰怪獸(圖 3.3)，另人望而卻步。近年來，先進國家多以養灘或自然工法保護珍貴的美麗海灘資產，屏棄昂貴、危險又破壞自然景觀的消波塊離岸堤工法。深入瞭解海灘的海岸水動力行為及其輸砂機制並順勢而為才是保護美麗海岸與國土家園的正確法則，因此進行現場碎波帶與溯昇帶輸砂觀測可以直接取得波浪、流與輸砂量間的相關參數。

圖 3.2　漁港防波堤阻擋砂源破壞沙灘的自然平衡機制

圖 3.3　受離岸堤保護的沙灘

臺灣海峽受季節風影響，冬季有東北季風，夏季有西南季風及颱風。觀測地點北側有安平港南防波堤阻擋了西南季風時的北向輸砂繼續向北漂移，而東北季風時因北方的陸地屏障，海上風浪較弱，向南輸砂量小，因此維持了黃金海岸的綿延沙灘，提供一個非常優良的海邊遊憩場所。但是安平海域同時也是一處大型的海上牡蠣養殖場所，每年颱風季節過後，安平港口兩側近岸即佈滿密密麻麻的大型蚵架，為漁民重要經濟來源之一。可惜在颱風季節來臨前牡蠣完成收成後，大型蚵架成了海上廢棄物，在風浪推動下，一個接一個往黃金海岸漂去，在沙灘前不斷隨海浪衝撞漂流(圖 3.4)，對海灘遊客造成致命的危險，也常常危及裝置在岸邊的觀測儀器(圖 3.5)。近岸測站因此無法設立長期的海象與漂砂監測站，辛苦裝設的所有儀器裝置必須在當天短暫觀測後立即撤走，現場作業除了須抗拒惡劣的海象天候外還須防範人為疏失造成的破壞，顯見近岸碎波帶與溯昇帶現場觀測資料的珍貴與取得困難。

圖 3.4　漂至沙灘上的廢棄蚵架

圖 3.5　測站前漂來之廢棄蚵架

3.2 現場地形測量

安平海岸漂砂活躍，海岸線受季節風浪與潮流作用，不斷改變，底床漂砂移動方向除沿岸方向外還有向、離岸方向，因此有必要持續進行灘面與底床測量，以瞭解該海域波浪與漂砂之關係。地形測量高程由附近灣裡濱海陸橋之 G090 水準點引入，並在近岸碎波帶觀測站附近堤防上選擇一固定地面參考點，以經緯儀、水準儀及量尺逐一定點量測灘面高程。灘面地形測量由堤防下一基準點垂直向海方向 90 公尺範圍內每公尺設一測點，約每月一次量取灘面高程之變化，水面下部份必須由潛水人員協助扶持標桿及量尺進行測量作業(圖 3.6)。

圖 3.6　灘面地形測量作業

圖 3.7 至圖 3.10 分別為 96 年 3 月至 5 月、6 月至 8 月、9 月至 11 月以及整合 3 月至 11 月的灘面地形變化。由圖顯示，夏季期間地形變化最大，主要是夏季盛行西南風加上 8 月初有帕布(PABUK)颱風通過臺灣南部進入臺灣海峽後，海灘被嚴重侵蝕，每米寬海岸線流失 67.49m^3 的砂，海岸線後退約 20m，前灘波度由 5 月時的 1/8 降為 1/20。冬季因地形遮蔽風浪小，灘面遂逐漸淤積恢復原來地貌。

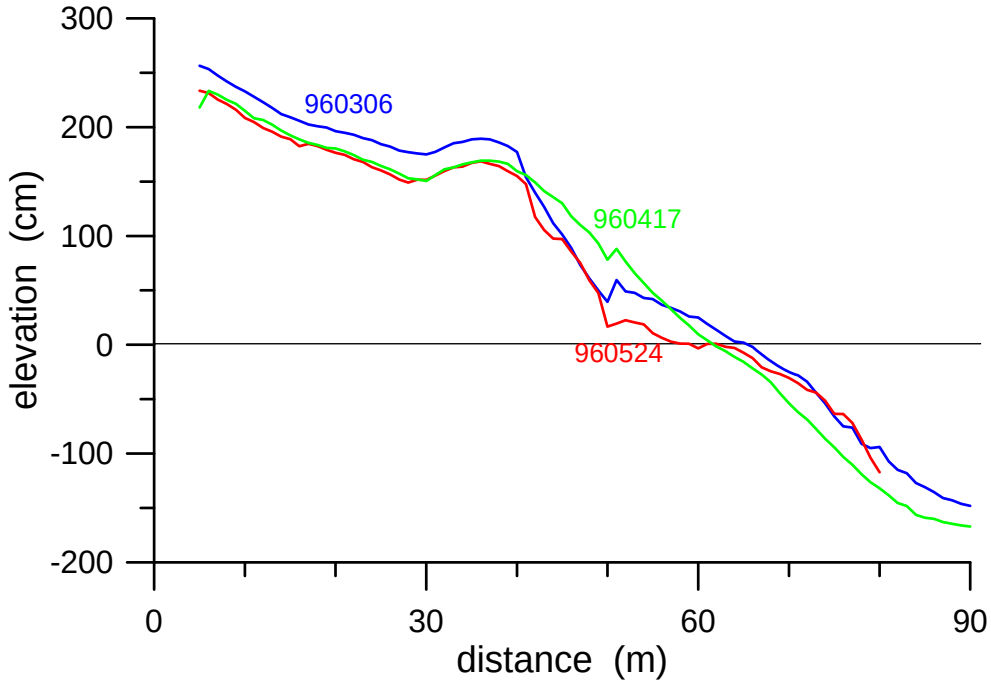


圖 3.7　96 年 3 月至 5 月的灘面地形變化

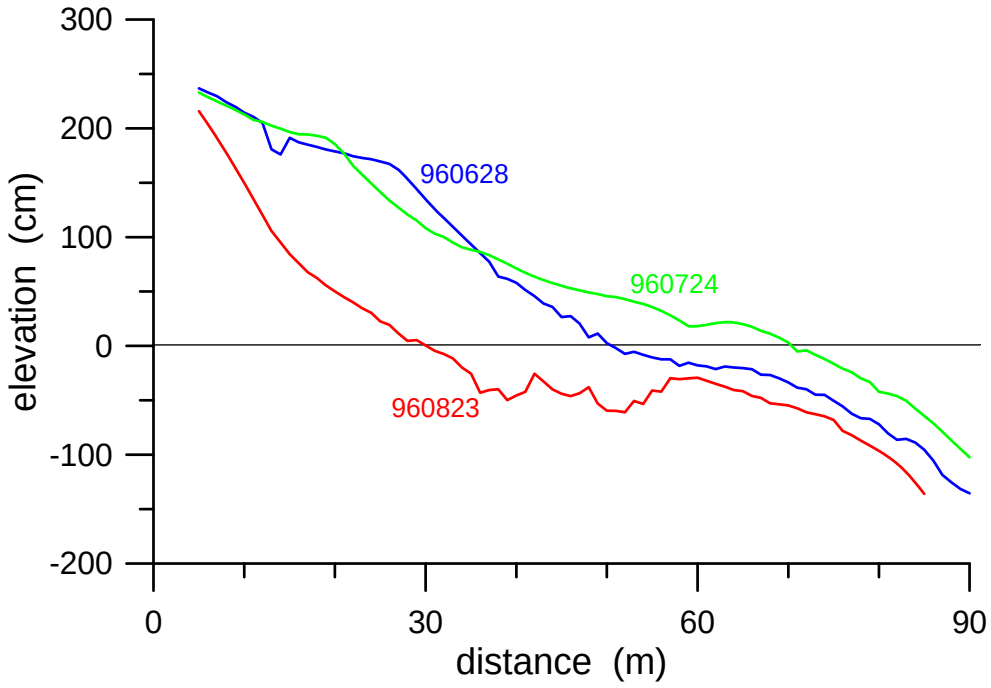


圖 3.8　96 年 6 月至 8 月的灘面地形變化

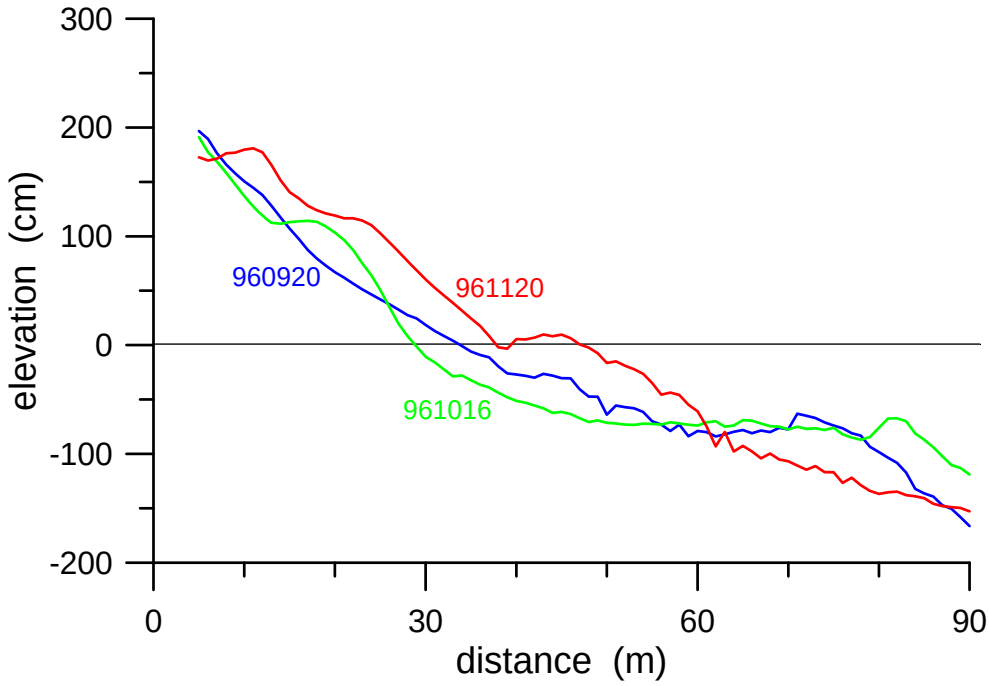


圖 3.9　96 年 9 月至 11 月的灘面地形變化

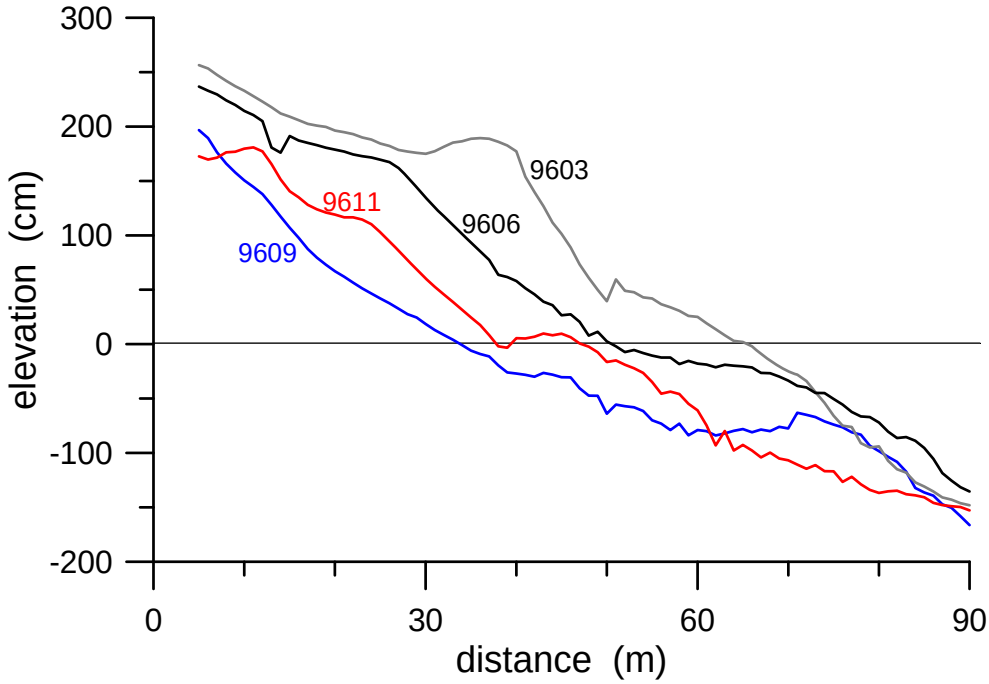


圖 3.10　整合 96 年 3 月至 11 月的灘面地形變化

3.3 儀器安裝與現場觀測作業說明

本研究由 2007 年 3 月起至 11 月止，每月前往安平黃金海岸進行沙灘斷面地形測量，並在內碎波帶及溯昇帶安裝海流儀、水位計及濁度計等進行觀測，蒐集相關波浪、流及懸浮質濃度變化等資料。7 月 24 日四具日製 ALEC 濁度計感應器分別位於離底 3.5cm、5.5cm、7.5cm 及 9.5cm，一具 ALEC 電磁式流速計感應頭中點位於底床上 6cm 位置，濁度計與電磁式流速計之取樣頻率皆為 2Hz，水位計取樣頻率 4Hz 其感應孔朝下與砂面齊，如圖 3.11。另有兩具 OBS-3 濁度計，可量測砂濃度至 50g/L，連接 VECTOR 訊號接收裝置，擷取頻率可達 8Hz，分別安裝於底床上 1cm 與 3cm 位置如圖 3.12，所有儀器於安裝前都必須經過嚴格的率定與時間校正程序。

溯昇帶主要輸砂層位於底床邊界層附近，本研究使用瑞典製超音波式剖面流速儀(UVP)，探頭直徑 13mm，發射音頻 2MHz，適合在高濃度懸浮質液體中進行觀測。超音波探頭以 θ 角斜向入射如圖 3.13，使用頻率與可量測範圍、最大速率及解析度關係如表 3.1。測點由內碎波帶延伸至溯昇波帶，5 月 24 日四個主要測點示如圖 3.14，碎波浪潮在 P50 與 P52 間崩解，P47 位於溯昇波區約中間位置。觀測作業時，P50 與 P52 探頭皆固定於底床上 10cm 位置，並以 45 度角由上向下方式偵測。P47 與 P49 探頭則分別固定於一具浮台上，使探頭能隨溯昇帶流層水位改變高度，只要流層厚度大於 2cm 探頭即能正常運作。圖 3.15 為現場四具 UVP 探頭安裝情形，圖 3.16 為固定 P47 與 P49 探頭的浮台隨溯昇流水位升降情形。UVP 超音波剖面流速儀是利用都卜勒原理以 0.1 秒間距依序量取四個垂直斷面上 183 層之流速剖面，各測點垂直高距為 0.7mm。觀測站附近海岸線為南北走向，測站溯昇波區之底質粒徑 D_{50} = 0.26 mm，前灘灘面坡度約 1/8。由於海灘溯昇帶水位來自碎波帶內波潮於灘腳崩解後向灘面溯昇之水體，水位由零至數十公分厚之薄層水體間不斷變化，由於使用儀器種類繁多，現場儀器的率定、時間校準、精確安裝及同步作業非常重要。

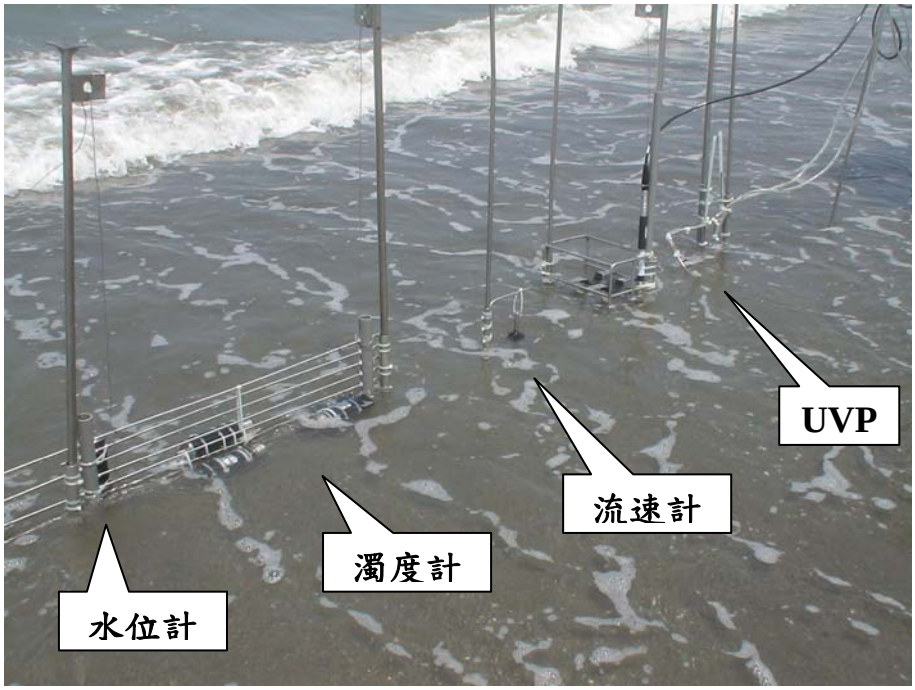


圖 3.11　溯昇帶安裝 ALEC 海流儀、水位計及濁度計等進行觀測

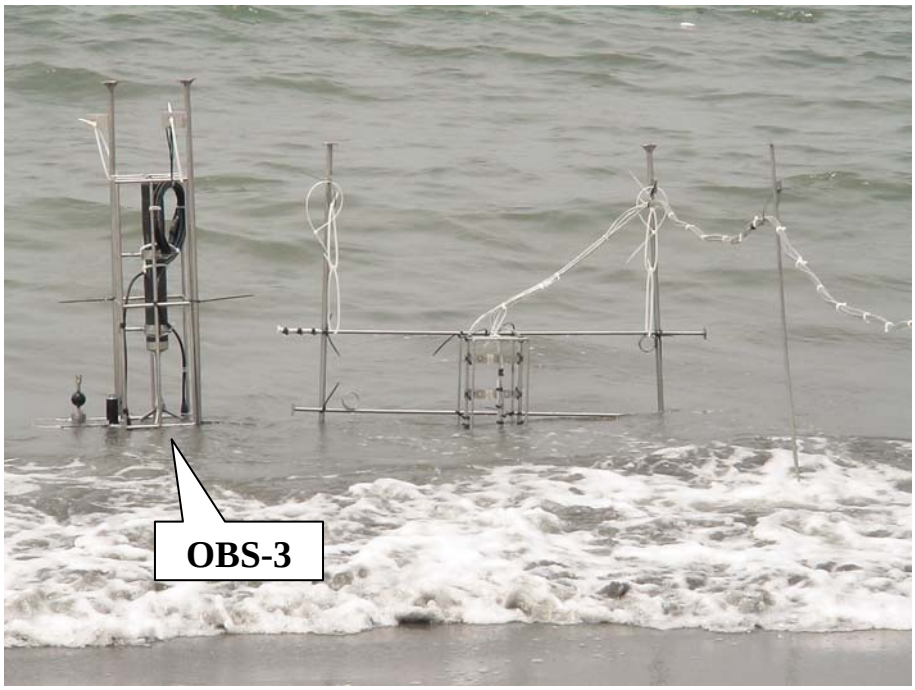


圖 3.12　溯昇帶安裝 OBS-3 濁度計等進行觀測

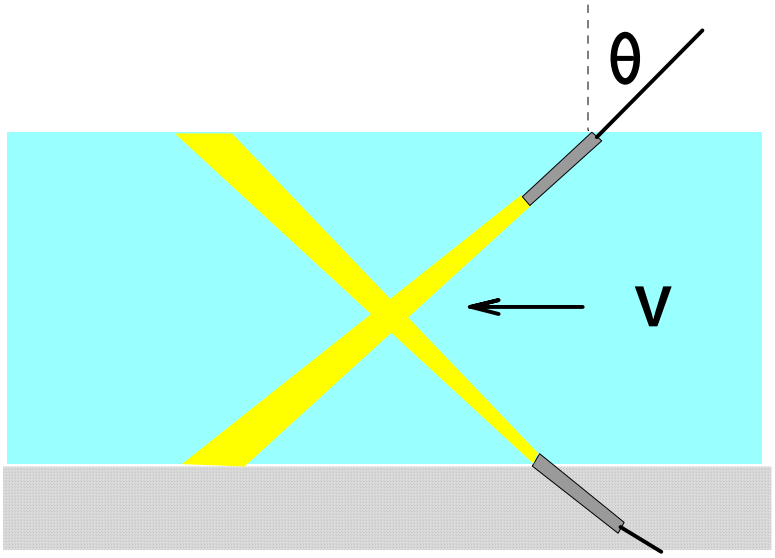


圖 3.13　超音波式流速剖面儀探頭安裝示意圖

表 3.1 使用不同頻率時 UVP 之可量測範圍、最大速率與解析度

f_o (MHz)	P_{max} (mm)	V_{range} (mm/s)	ΔV (mm/s)
0.5	100	10,952	42.78
	750	1,460	5.70
1	100	5,476	21.39
	750	730	2.85
2	100	2,738	10.70
	750	365	1.43
4	100	1,369	5.35
	750	183	0.71
8	100	685	2.68
	750	91	0.36

f_o：ultrasound basic frequency

P_{max}：maximum measurable depth

V_{range}：maximum measurable velocity component range

ΔV：velocity resolution

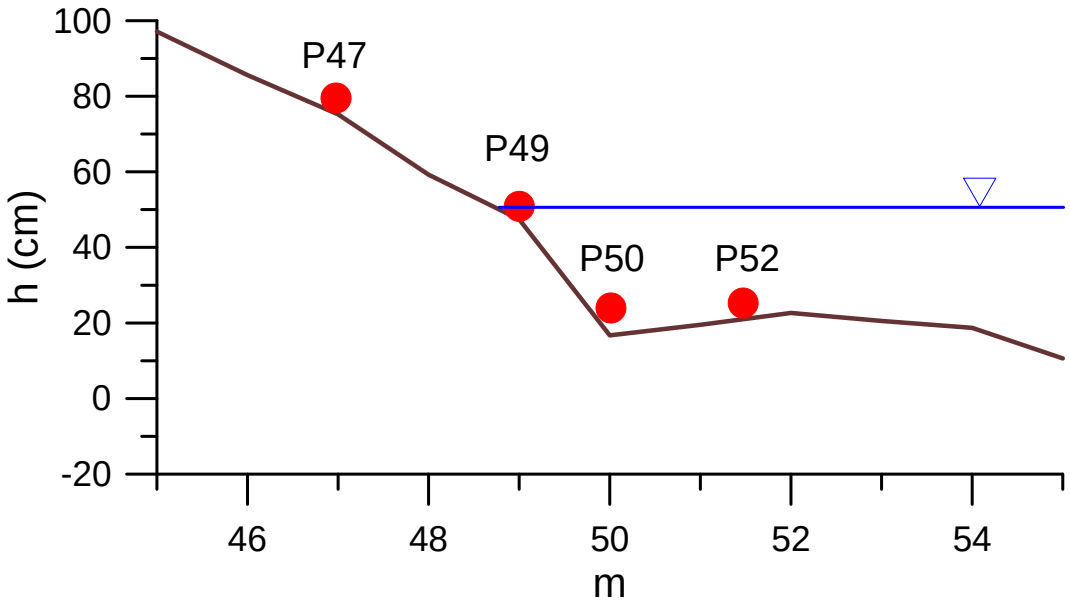


圖 3.14　測點分佈位置圖

圖 3.15　現場安裝 UVP 測點位置圖

圖 3.16　UVP 浮台隨溯昇流水位升降

薄層流輸砂為侵入底層並以極高濃度平移之輸砂現象，如僅量測並估算懸浮質在流場中的輸送量，在薄層流現象發達的溯昇波帶內可能會產生極大偏差。本研究在現場以水下攝影機拍攝溯昇帶底床薄層流輸砂，並以 1/30 秒之格點播放，檢視薄層流侵入底床深度，發現現場正確量測極為困難，因為在非線性波作用下，懸浮後不同沉降速度之懸浮砂使得底床零點不斷變動，其底床侵入深度與薄層流厚度則明

顯隨底流強度而增加。現場觀測使用電導式濁度計 CCM，如圖 3.17，並以高精度水位計進行高程定位，圖 3.18 為 CCM 在底床上下移動測得之砂濃度變化。根據現場觀察，當底流強度達 1m/s 以上時，薄層流之輸砂層厚度可達 10mm 以上，對溯昇帶輸砂有相當大影響。

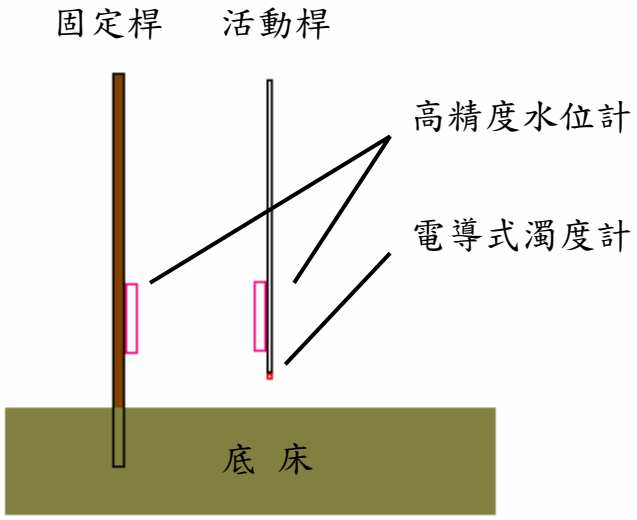


圖 3.17　薄層流觀測之儀器配置

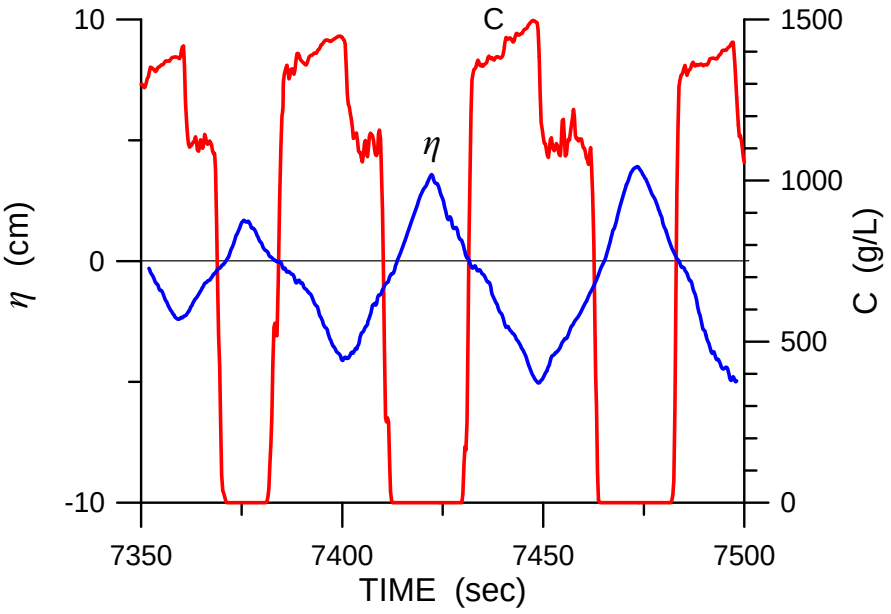


圖 3.18　CCM 在底床上下移動測得之砂濃度變化

3.4 碎波帶與溯昇波帶之處波效應

2007 年 8 月 24 日進行現場觀測時碎波帶寬約 200~300m，波浪進入碎波帶向岸前進中仍有持續碎波現象。圖 3.19 中測點 S30 與 S50 相距 20m，S24 位於溯昇波帶距離 S30 有 6m，S30 位於波潮崩解區，S50 則位於碎波帶內，三測點各安裝一具水位計作同步觀測，波浪在碎波帶內會因波速不同而合併或因淺化、變形、再碎波而消減，造成波浪重組、波頻變異現象。圖 3.20 即為波浪經碎波帶 S50 測點到達 S30 之波形變化，顯示碎波帶內波浪劇烈變化能量消散情形。圖 3.21 則為波浪經碎波帶 S50 測點到達溯昇波帶測點 S24 之波形變化，顯示溯昇波經過波潮崩解以及遭遇回溯波阻擋甚至水力跳躍(hydraulic jump)等能量消減過程後在溯昇波帶出現的水位變化情形，此即碎波帶與溯昇波帶之處波效應結果。

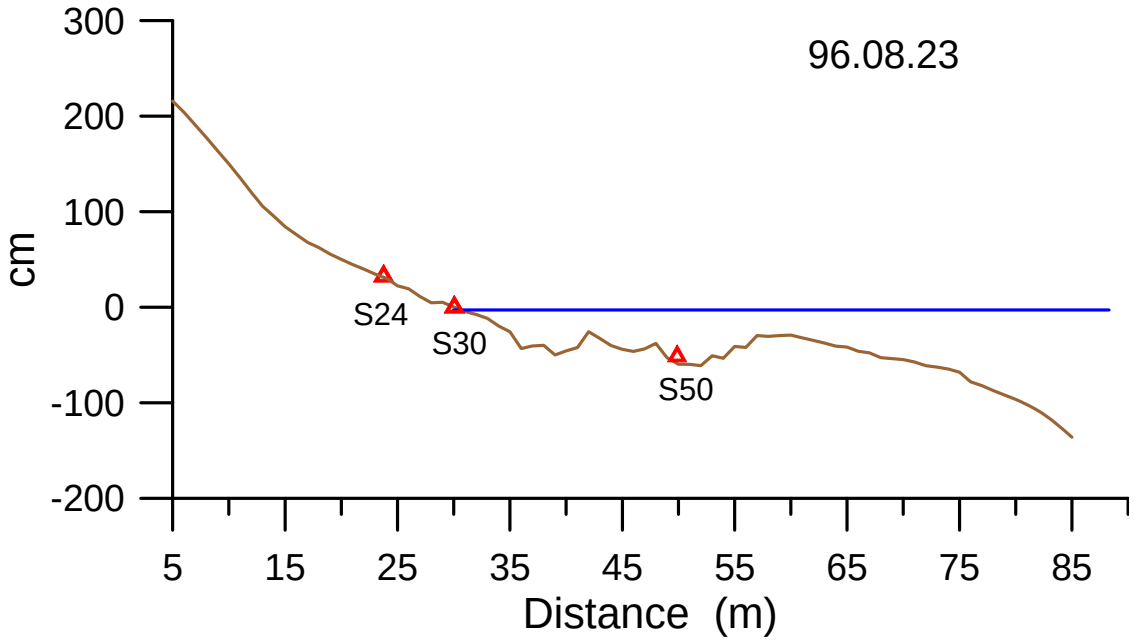


圖 3.19　灘面地形與測點位置

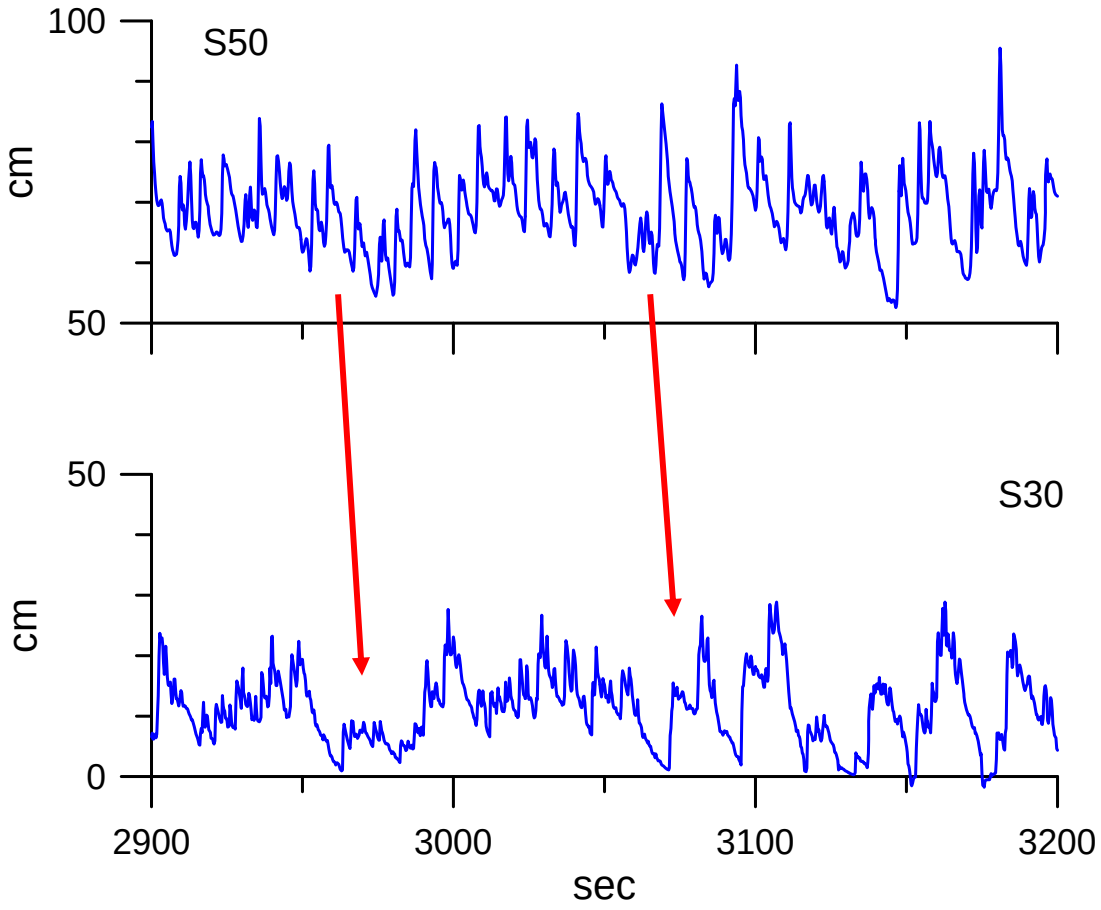


圖 3.20　波浪經碎波帶 S50 測點到達 S30 之波形變化

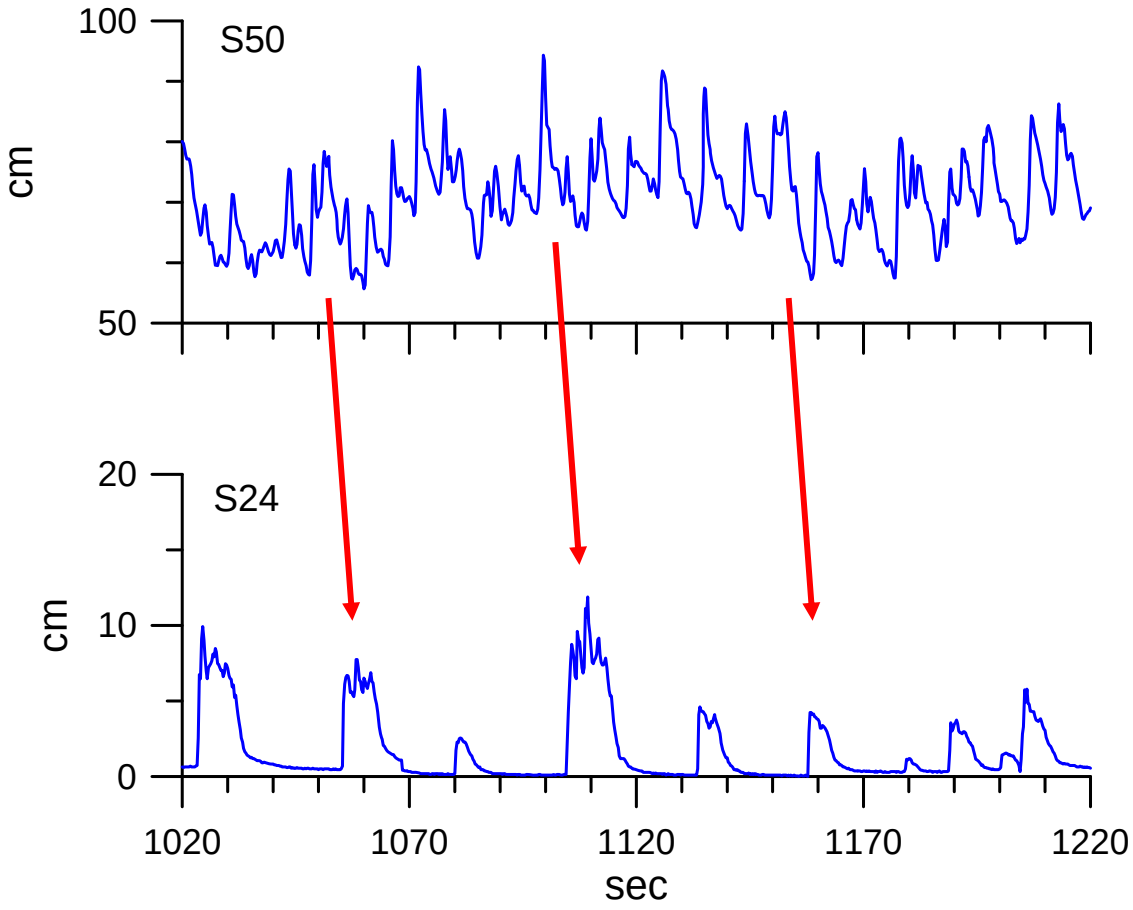


圖 3.21　波浪經碎波帶 S50 測點到達 S24 之波形變化

3.5 溯昇波帶之流速觀測

比較圖 3.14 中 UVP 測點 P47 與 P49 同步觀測之平均流速，兩測點相距 2m 灘面坡度 1/8，觀測時 P49 位於當時(接近高潮)水線附近，P47 則在水線上方的溯昇帶內。圖 3.22 顯示 525 至 527 秒間 P47 先發生灘面回溯流(負流速值)，約 1 秒後 P49 才發生回溯流且流速小於 P47，圖 3.23 為 P49 回溯流之流速剖面，較大流速位於底床附近，邊界層厚度約 2cm，再約 1 秒後 p47 的回溯流經 2m 長斜坡後到達 p49 並稍為加速，528.5 秒時 P47 回溯流減弱為 0，P49 在 529.2 秒時也減弱為 0，此時 P47 又產生部份回溯流，可能是灘面滲出流所形成。529.2 秒後下波波潮崩解造成之溯昇流(正流速值)首先發生於 P49，圖中 529.7 秒處 P49 應該有較大的瞬間最大流速發生於溯昇流上層，可惜 UVP 只取得底床

上 10cm 之下層流速剖面，如圖 3.24 較大流速位於水體上層，底床邊界層約只有 1cm，底床附近流速較小，上層最大流速值估計有 2000mm/s 以上，並在約 1 秒後到達 P47。測點 P47 的溯昇流平均值大於 P49，延續時間則約短於 P49。

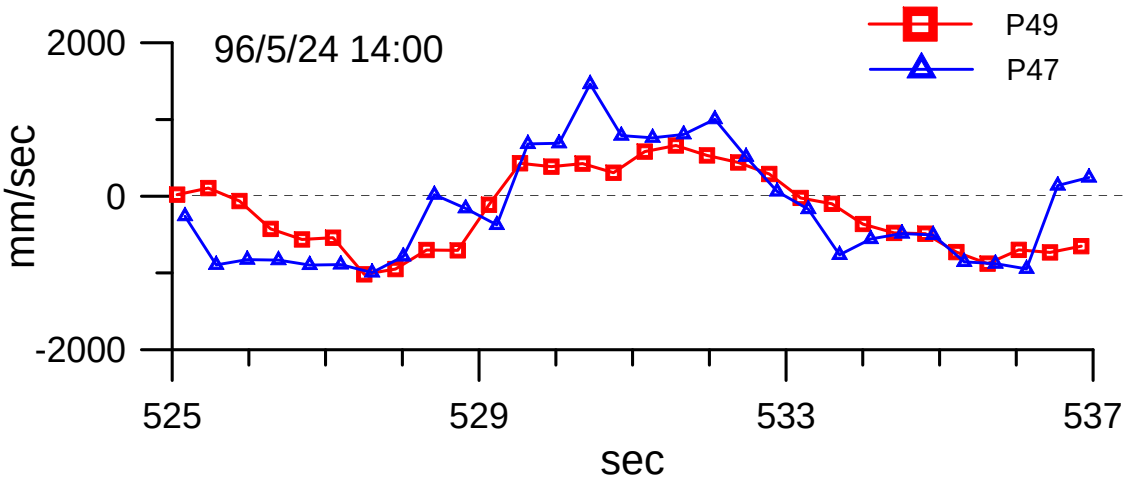


圖 3.22　測點 P47 與 P49 同步觀測之平均流速變化

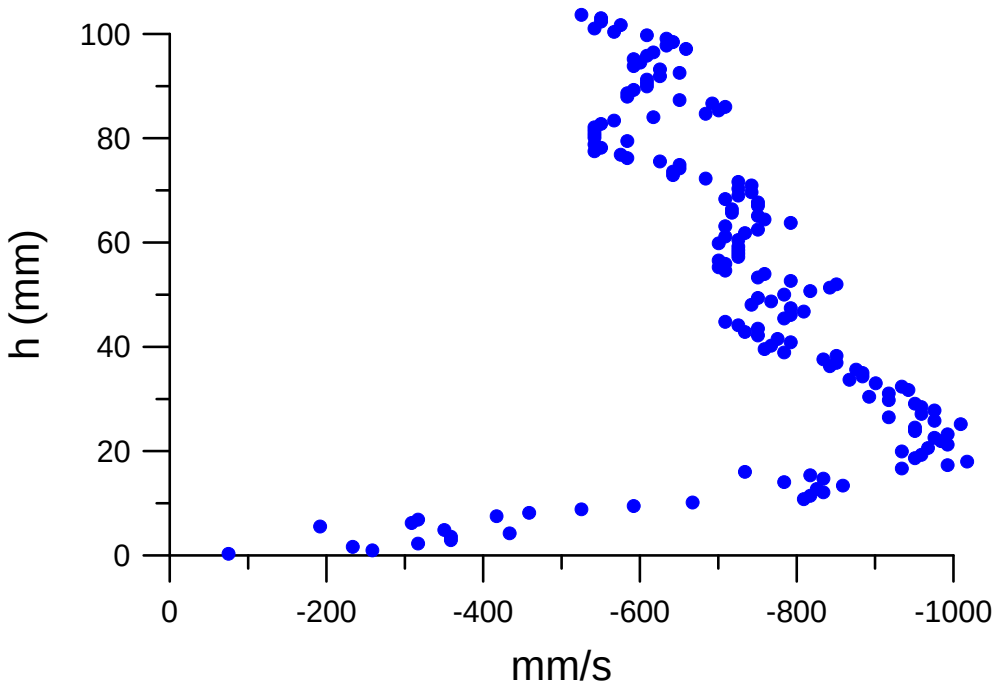


圖 3.23　測點 P49 回溯流之流速剖面

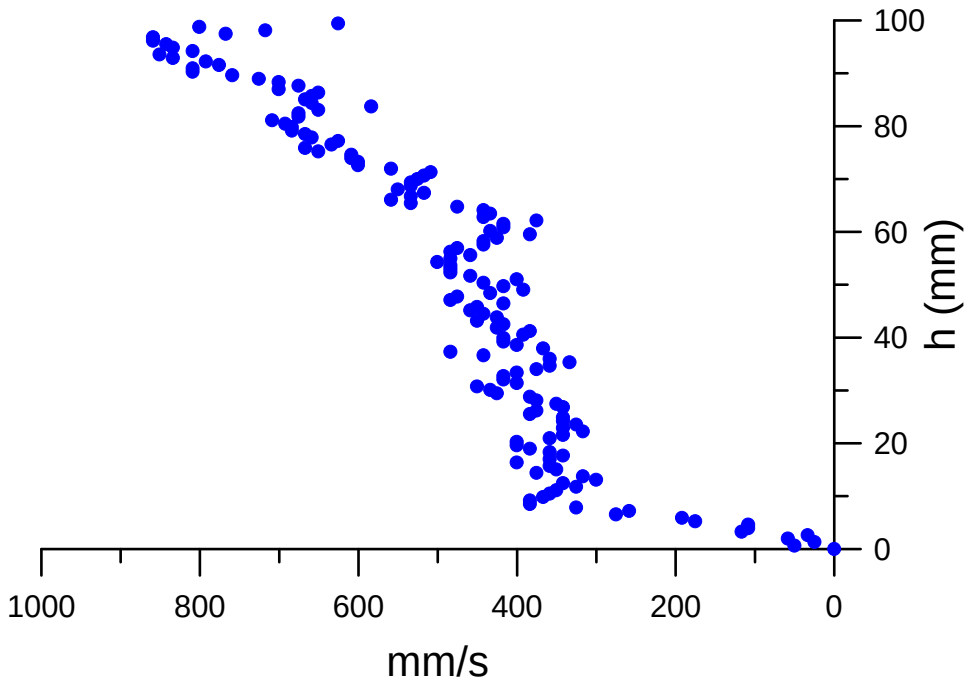


圖 3.24　測點 P49 溯昇流之流速剖面

2007 年 10 月 16 日以水位計及 2 維電磁式流速計安裝於溯昇波帶觀測水位、向離岸流及沿岸流流速如圖 3.25，圖(a)為水深變化，回溯流過後與下波溯昇流抵達前，底床露出，水深為零，其露出時間視測點位置而定，在灘面較上方者露出時間較長。圖(b)之正值流速為溯昇流方向，較大溯昇流發生在較長時間的回溯流後接踵而至的較大波潮崩解所造成。根據外海觀測樁資料，當時風向為北北西，示性波高約 0.6m，入射波浪折射後與海岸成一夾角，形成向南之沿岸流如圖(c)所示。圖 3.26 為溯昇帶溯昇過程之連續照片，(a)～(f)為灘面回溯流過程，回溯流向下時另一波向岸波潮也已抵達，兩者相遇造成波潮崩解如(c)～(e)，崩解的波潮產生溯昇流沿著灘面伴隨紊流、氣泡及捲起之懸浮砂等向上推移，示如(g)～(k)，(l)則是下一波回溯過程的開始。

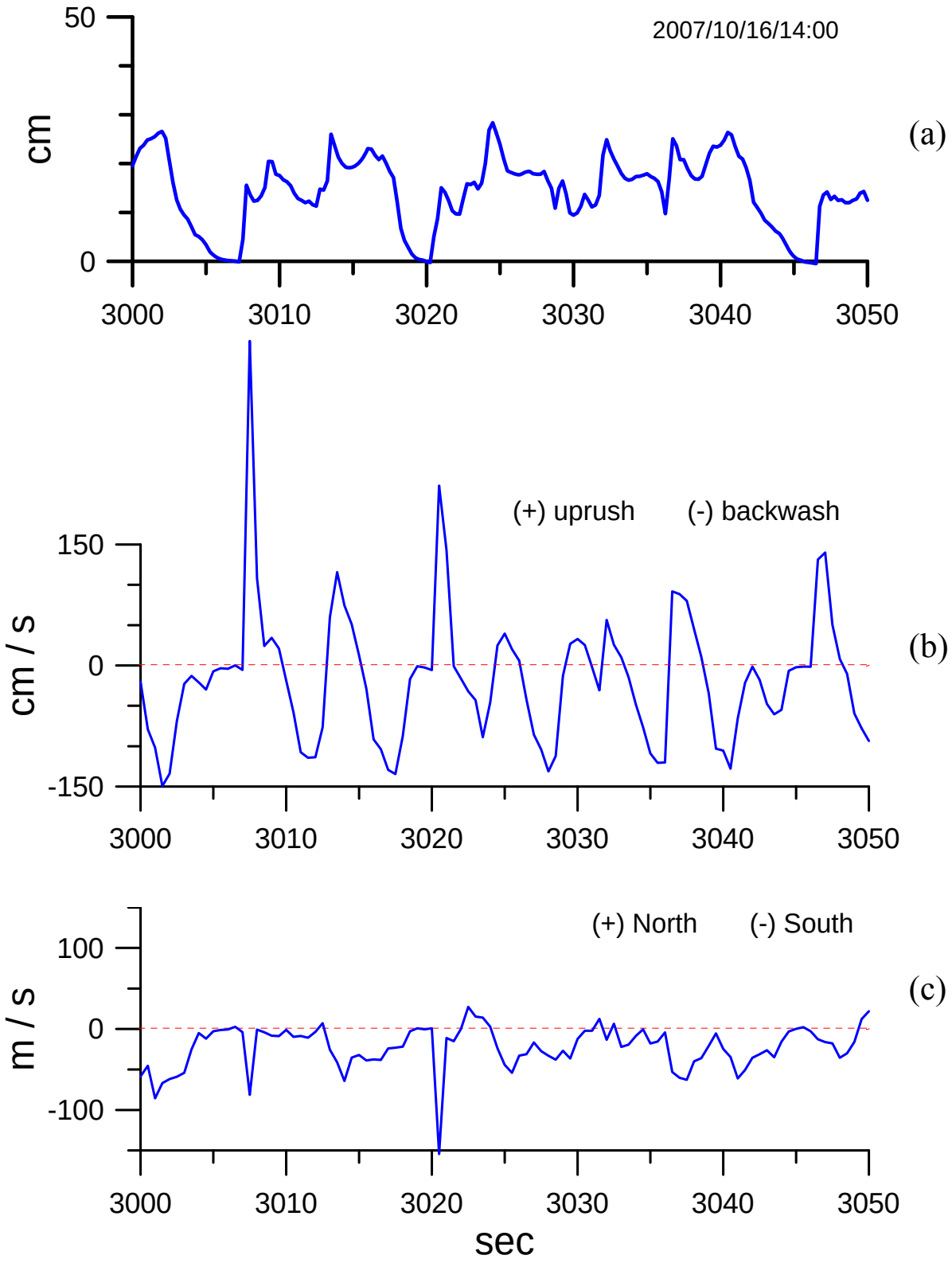


圖 3.25　溯昇帶之(a)水位變化(b)向離岸流(c)沿岸流

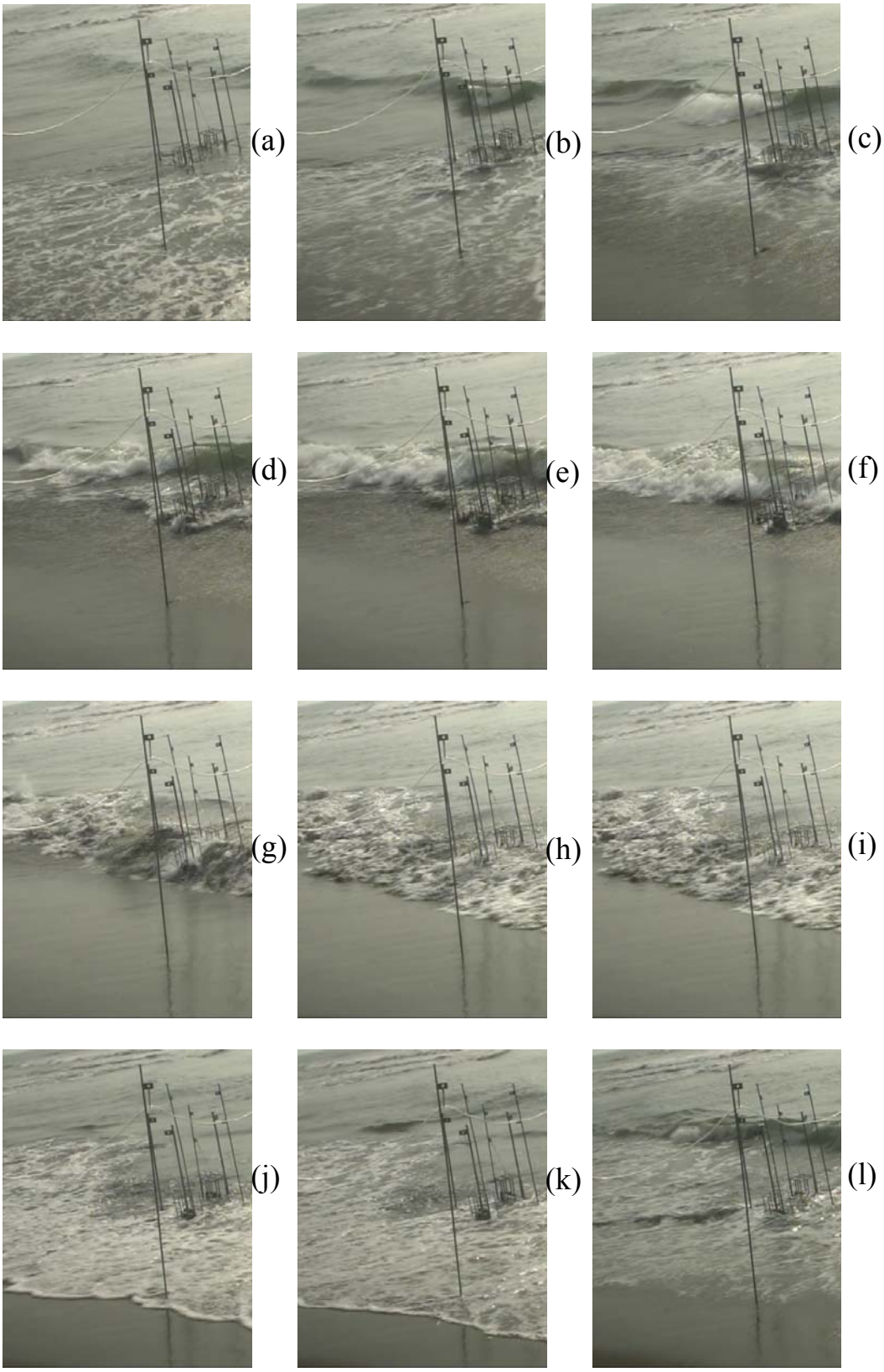


圖 3.26　溯昇帶溯昇過程之連續照片

3.6 流速剖面分析

2007 年 8 月 23 日將超音波式剖面流速儀 UVP 安裝於灘面底床下如圖 3.27，儀器探頭 (transducer)以 45 度角由下斜向上發射超音波波束，只有探頭前端露出並與砂面平齊，觀測時不受溯昇帶水位變化影響，可有效觀測到溯昇波通過時之垂直斷面流場變化，圖 3.28 為溯昇流通過時之情形。溯昇波通過灘面測點時取其中 20 秒示如圖 3.29，包括回溯流－波潮－溯昇流－回溯流等一個循環週期，圖中顯示第 1 個回溯流之後有連續 3 個波潮通過,最後則水位持續下降。圖 3.30 為 UVP 測得流速剖面之斷面平均值，正值流速為向岸之溯昇流，負值流速為向海之回溯流。為不影響底床附近較大流速的觀測，流速剖面只能設定量測至底床上約 13cm 高度,當波潮通過時波潮前端崩解造成的正值溯昇流大都位於流體上層，下層流部份可能還有負值的回溯流，以底床上計算至 13cm 高度的斷面流速平均，在圖 3.30 中分別在 3 個波潮前端因溯昇流與回溯流間的交互作用而顯示出稍微隆起的溯昇趨勢，如圖中之 a、b、c，較大回溯流則發生在回溯流末期，如 d 與 e。圖 3.31 中 A 至 J 為不同時間之垂直斷面流速分佈，y 軸高 10cm，x 軸長度為 100cm/s 流速，負值表示回溯流顯示在 y 軸右側，其中 A 至 C 為回溯流，流速逐漸增加；D 至 F 為波潮通過時段，只有 E 斷面顯示完全正值的溯昇流狀態；G 至 J 則為回溯流，水位逐漸下降，最大回溯流發生在 I 斷面時。

斷面 B、C、G 與 I 皆出現底床被侵蝕現象，因為部份邊界層顯然落入原與砂面平齊之探頭下方。不過在斷面 G 與 I 之間的 H 以及 I 之後的斷面 J 則有恢復原砂面的現象，顯示灘面在溯昇波過程中，不斷有侵蝕與淤積反覆出現，而侵蝕現象主要發生在回溯流過程中。溯昇流則將灘線附近由回溯流沖刷下來或波潮崩解紊流產生的懸浮砂以懸浮質狀態攜至灘面上方，回補回溯流造成的侵蝕，兩者間的平衡則左右海岸線的進退。

圖 3.27　安裝灘面底床下之超音波式剖面流速儀 UVP

圖 3.28　溯昇流通過 UVP 時之情形

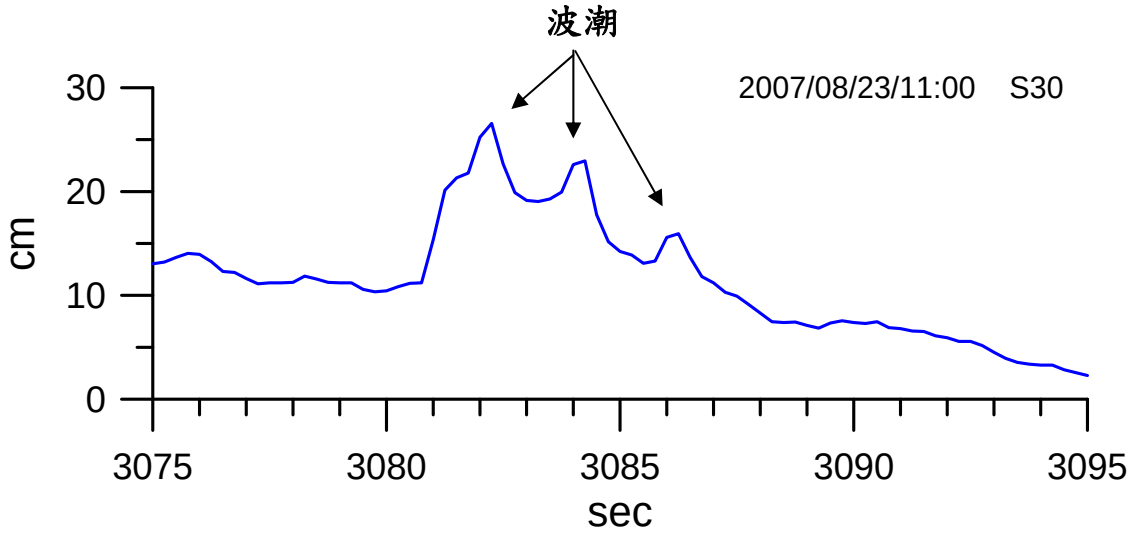


圖 3.29　溯昇波通過時之水位變化

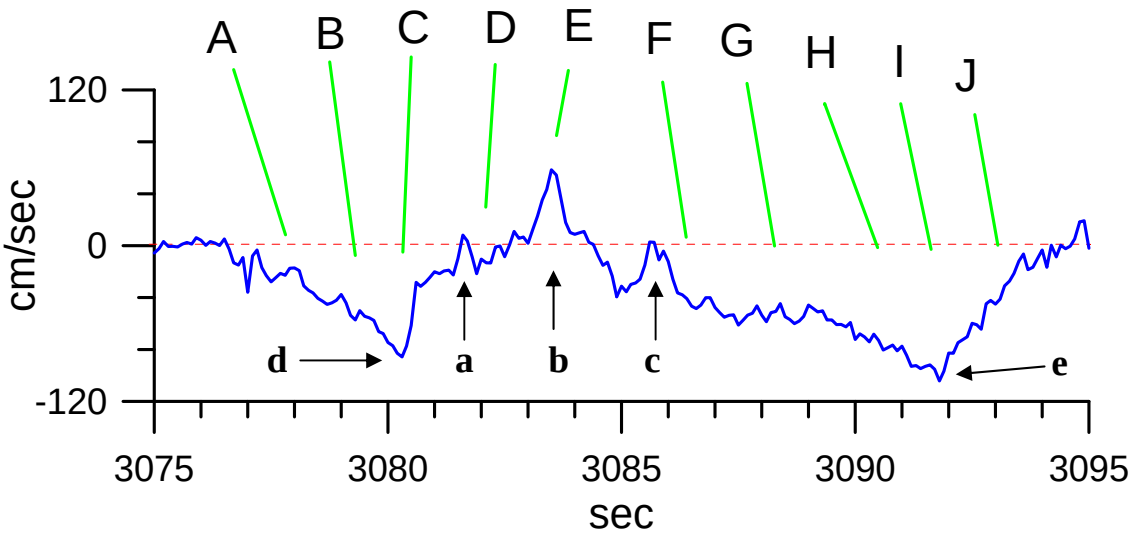


圖 3.30　溯昇波通過時之流速變化

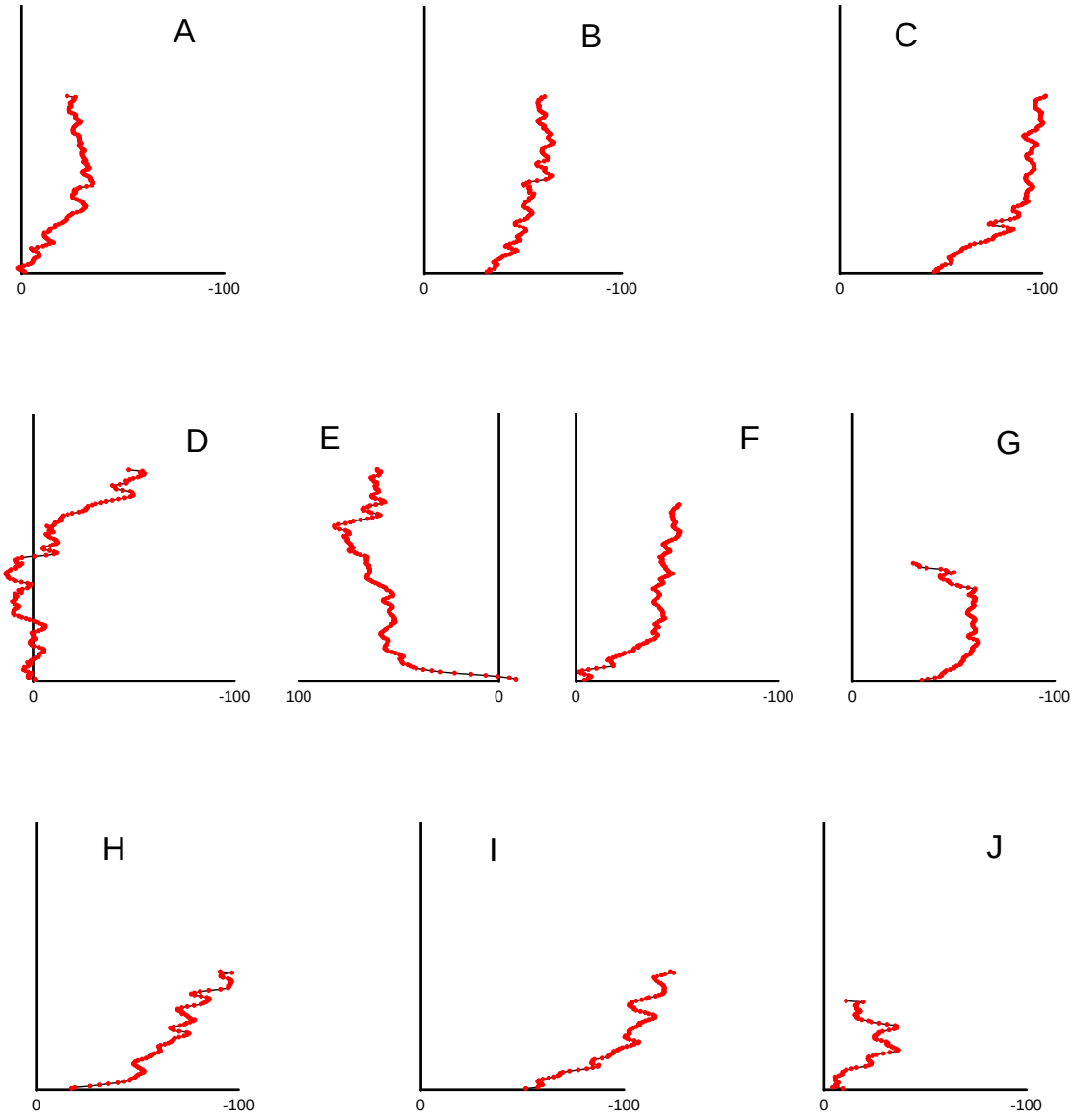


圖 3.31　溯昇波通過時各斷面之流速剖面

3.7 溯昇帶之懸浮質濃度剖面觀測

10 月 16 日四具 ALEC 濁度計安裝於溯昇帶，圖 3.32，濁度計光感應器分別位於底床上 15.5cm、9cm、5cm 及 2cm 位置，測得懸浮質濃度示如圖 3.33 之(b)、(c)、(d)、(e)。(a)為同步觀測之向離岸方向流速資料，測點高 5cm，正值為溯昇流，負值為回溯流。圖中顯示較大懸浮質濃度大都發生在回溯流尾至溯昇流初之間，也就是當回溯流與向岸前進的波潮相遇造成波潮崩解，其紊流作用使懸浮質濃度增加，而且較大懸浮質濃度停留在上層水體如(b)與(c)，並隨溯昇流沿灘面向岸輸送。回溯流產生的懸浮質濃度則以下層水體較大，原因為回溯流懸浮質主要來自水流與底床的摩擦，帶動底質懸浮並向海方向輸送。

圖 3.32　安裝於溯昇帶之 ALEC 濁度計、流速計及水位計

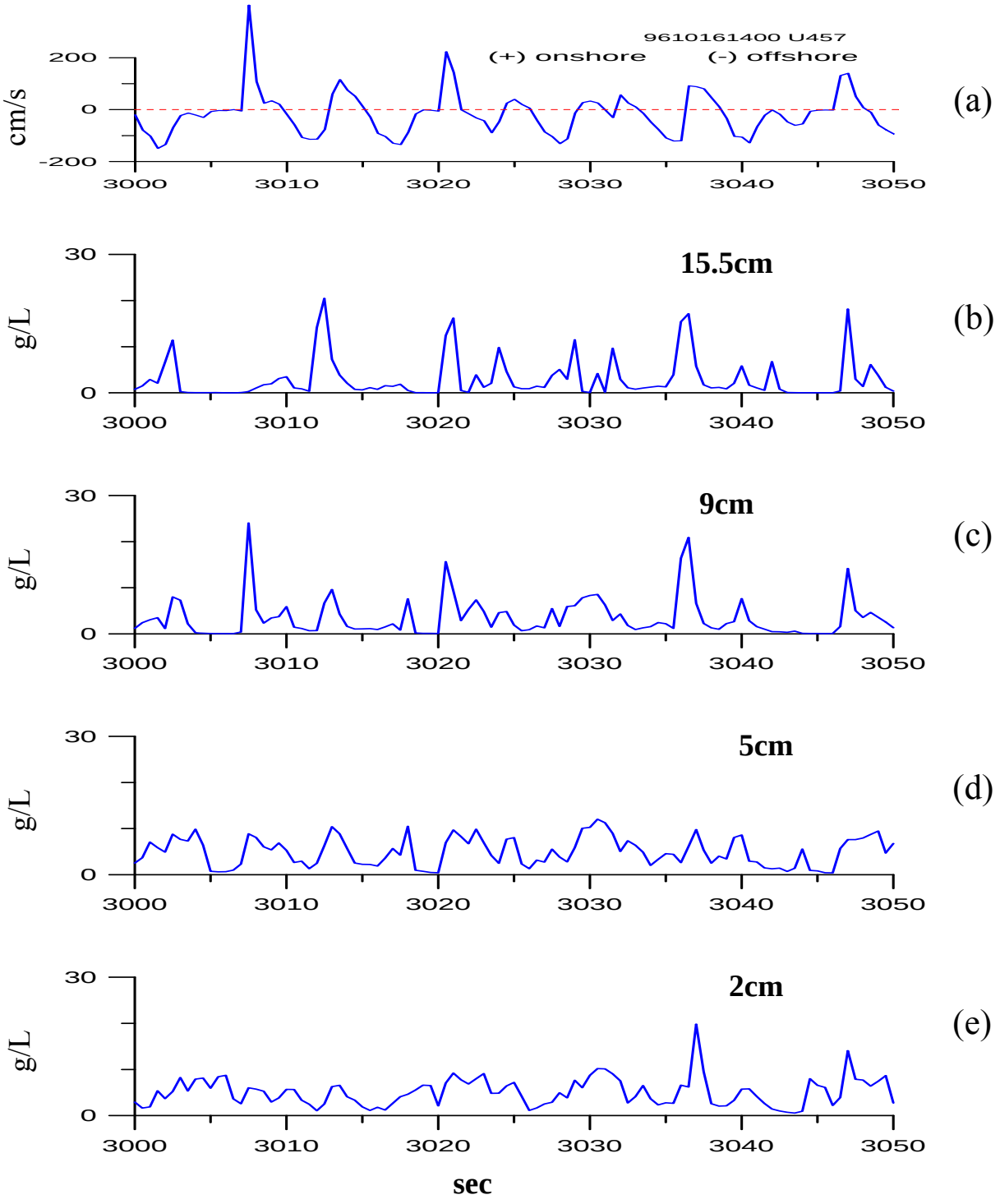


圖 3.33　溯昇帶流速與不同高程懸浮質濃度

3.8 溯昇波之水位、流速與濃度關係

在碎波帶與溯昇波帶交界處因波潮崩解之紊流作用使砂粒懸浮被溯昇流帶上灘面並沉積，而回溯流則因底床磨擦作用將灘面砂粒侵蝕並沖刷入海，兩者間之微妙平衡可左右海岸線之進退。溯昇波帶受波潮崩解與回溯流間交互作用之濾波效應，波浪週期由碎波帶內平均週期 5.8 秒之波潮轉變為平均週期約 24 秒之溯昇波。其濾波現象主要是碎波帶內較短週期的前進波潮在灘線附近被較長週期的溯昇波回溯流擋住，只有當回溯流減弱至某一程度，向岸波潮才有機會再度衝上灘面形成另一個溯昇波。圖 3.34 為灘面上測點 S24 溯昇波出現情形，圖 3.35 為其底床上 2cm 位置之懸浮質濃度變化，高懸浮質濃度出現在每一溯昇波之啟始與結束時刻。

觀察測點 S24 一獨立溯昇波之水位、斷面平均流與底床上 2cm 處懸浮質濃度之時序列變化，如圖 3.36，溯昇波在大約 1 秒的極短時間內達到最高峰後水位隨即略微下降，並維持約固定水深。向岸溯昇流在最高水位過後仍持續溯昇，最大溯昇流速發生在最高水位之前。當溯昇流轉為回溯流後水位仍維持約固定水深，隨後水位急速下降，最大回溯流發生在最大水位坡降處，回溯流時間比溯昇流時間長，現場觀察在 1299 秒之後仍持續有回溯流，但因水位太低，UVP 無法正確測得流速，圖中流速以 0 表示，最大回溯流流速小於最大溯昇流流速。每一溯昇波有兩次懸浮質濃度高峰期分別發生在溯昇流與回溯流期間，值得注意的是第二次懸浮質濃度高峰並非發生在最大回溯流時，而是在水位急速降低之末期出現；第一次懸浮質濃度高峰則是發生在波潮崩解時，一般位於最高溯昇水位到達之前。

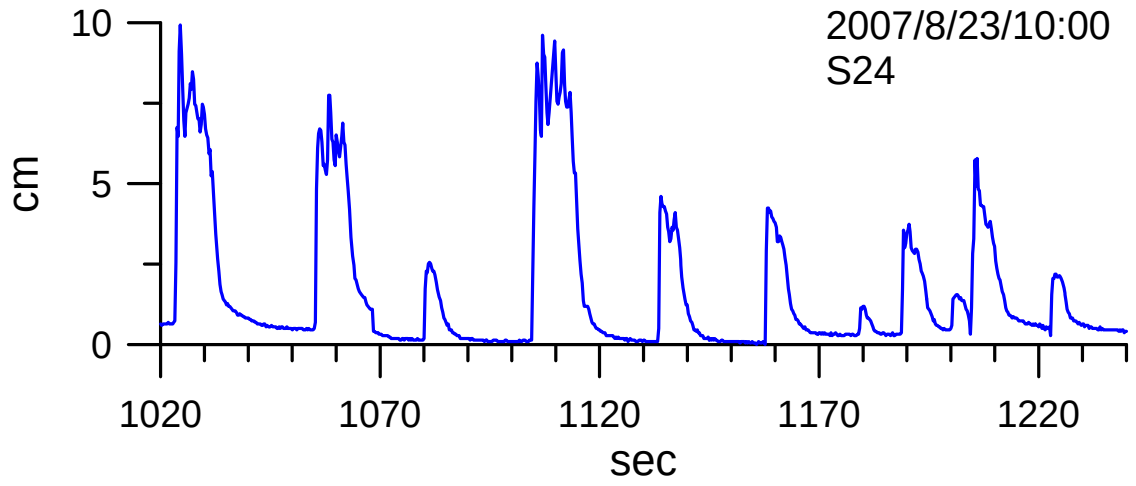


圖 3.34　溯昇帶水位變化

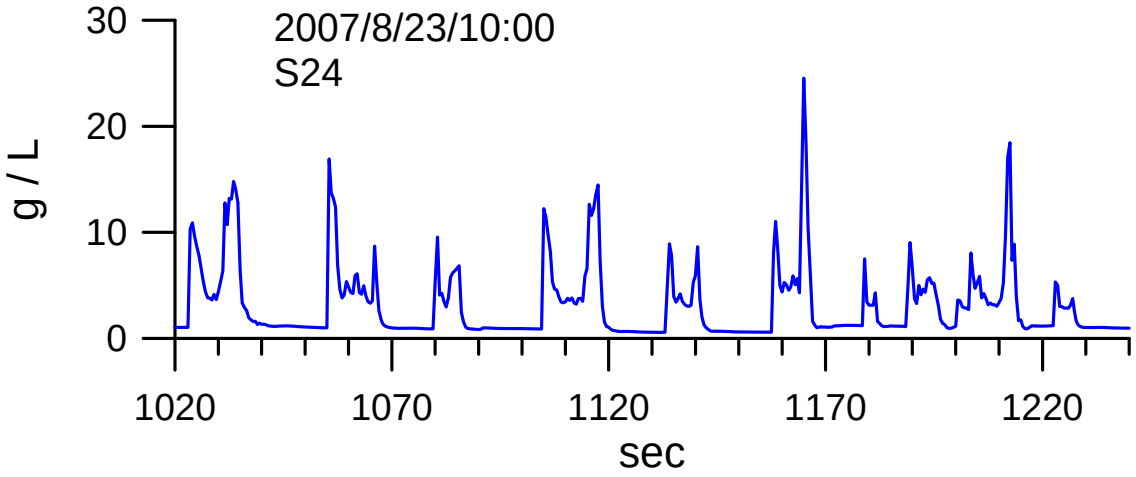


圖 3.35　溯昇帶懸浮質濃度

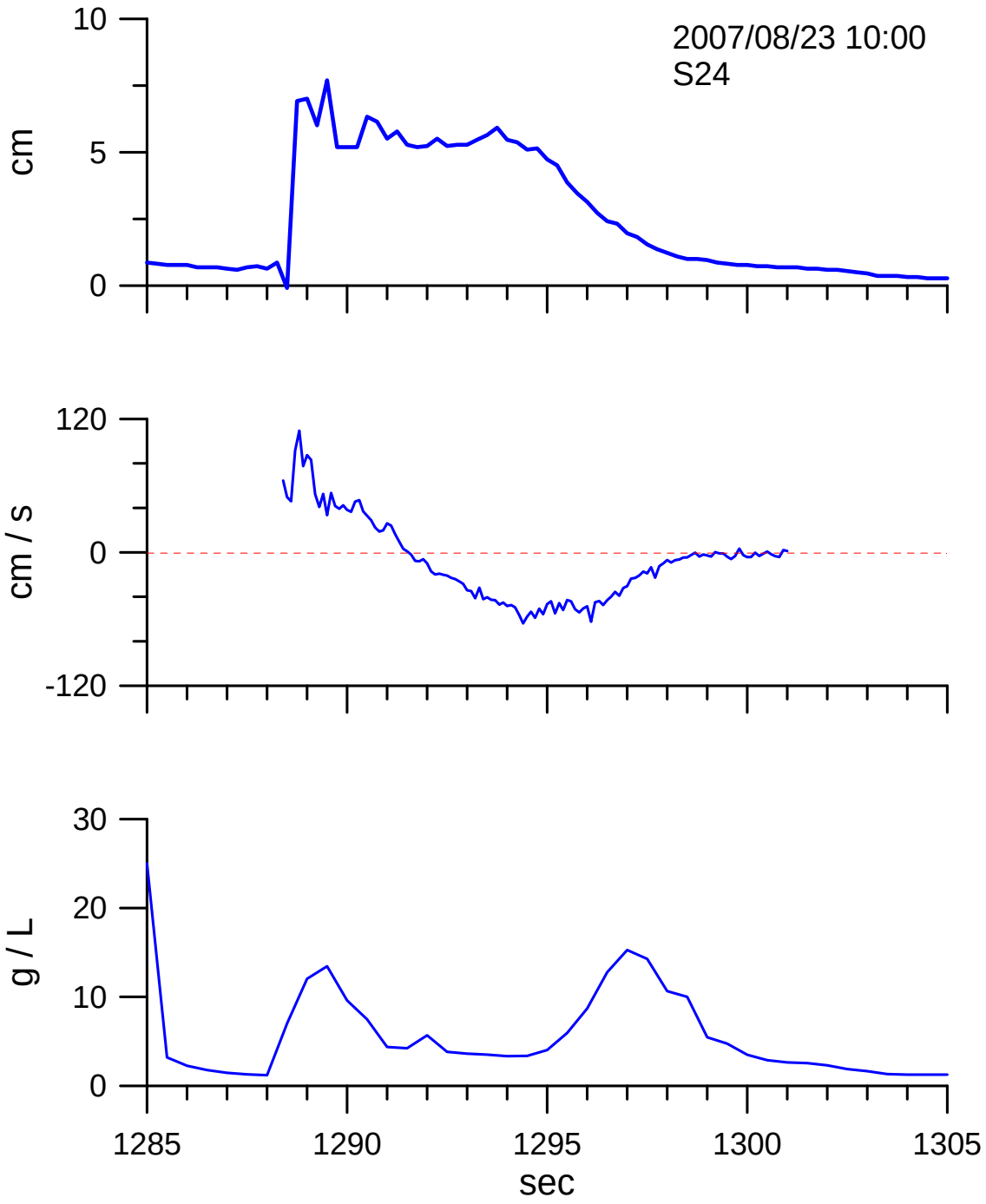


圖 3.36　溯昇波之水位、流速與濃度關係

3.9 攝影觀察溯昇波帶水流與輸砂現象

為實際瞭解溯昇波帶水流與輸砂現象有必要將現場灘面溯昇運動可視化以進一步解析其流況及底床附近之砂粒運動。10 月 3 日於臺灣北部的沙崙海岸將水下攝影機安裝於現場並記錄灘面溯昇流運動，分別擷取影像說明如圖 3.37，照片左邊是岸，右邊是海，攝影機位於溯昇帶灘面上，部份觀景窗埋入砂中，因此能同時取得底床變化情形，照片中橫線間隔為 1cm。

照片(a)是回溯流尾，水層厚度約 6 ~ 7cm 流向右方，底床面距照片下緣約 3cm，底床上有一層輸砂層厚約 4cm，照片右上方高起的陰影為向岸接近的波潮；照片(b)是波潮與回溯流遭遇崩解情形；波潮下方有強烈紊流，但左方尚未受影響的回溯流仍維持輸砂層狀態；照片(c)為受波潮崩解水體推擠，出現較大紊流，懸浮砂厚度增加同時流速轉向岸成為溯昇流；照片(d)為溯昇流尾，出現流體停滯、懸浮質沉降、水質清澈現象，由(b)至(d)整個溯昇過程不到 3 秒；照片(e)至(j)則為接續之回溯流過程，長約 8 秒，水深由(d)時的 11cm 以上逐漸變淺，至(j)則幾乎露出砂面，但回溯流輸砂層似乎沒超過 4cm 厚度，而底床砂面也沒有被明顯侵蝕；照片(j)與(k)是遭遇下一波波潮情形；照片(l)至(n)為溯昇流，可明顯看出懸浮質佈滿全部水層，此為溯昇流與回溯流輸砂狀態不同之處；照片(o)為流停滯點；照片(p)至(z)則是由回溯流經波潮遭遇再到溯昇流之另一次循環過程。

10 3 2007
5:31:42PM

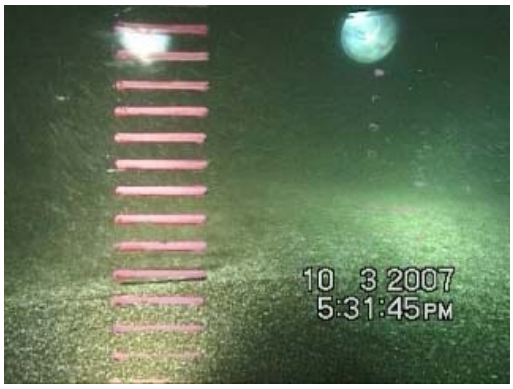
(a)

10 3 2007
5:31:42PM

(b)

10 3 2007
5:31:43PM

(c)


10 3 2007
5:31:45PM

(d)

10 3 2007
5:31:47PM

(e)

10 3 2007
5:31:48PM

(f)

10 3 2007
5:31:50PM

(g)

10 3 2007
5:31:51PM

(h)

10 3 2007
5:31:52PM

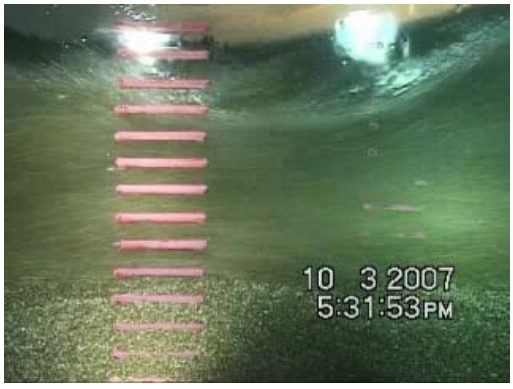
(i)

10 3 2007
5:31:53PM

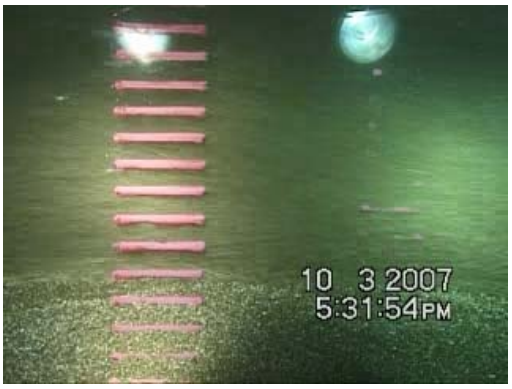
(j)

10 3 2007
5:31:53PM

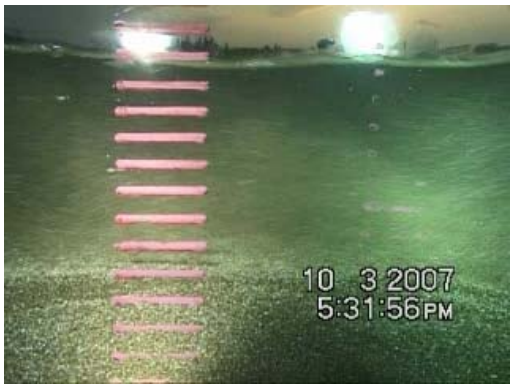
(k)


10 3 2007
5:31:53PM

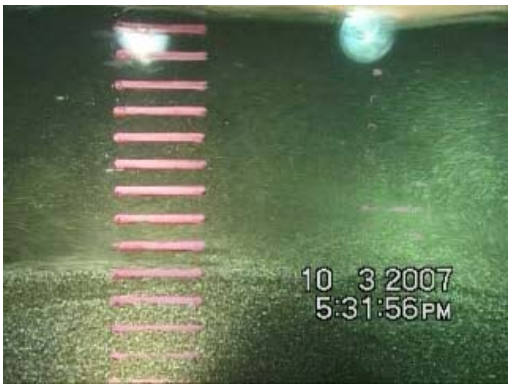
(l)


10 3 2007
5:31:54PM

(m)


10 3 2007
5:31:56PM

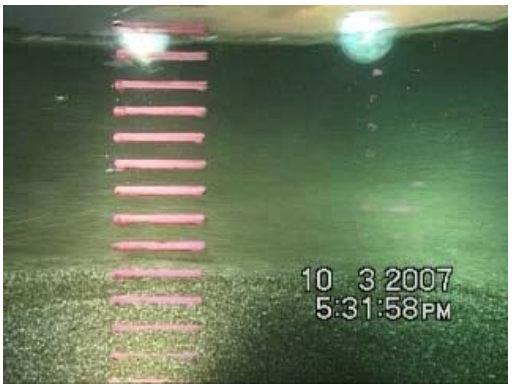
(n)


10 3 2007
5:31:56PM

(o)

10 3 2007
5:31:57PM

(p)


10 3 2007
5:31:58PM

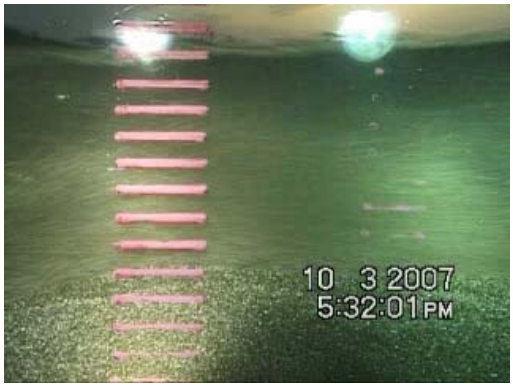
(q)

10 3 2007
5:31:59PM

(r)

10 3 2007
5:32:00PM

(s)


10 3 2007
5:32:01PM

(t)

10 3 2007
5:32:02PM

(u)

10 3 2007
5:32:03PM

(v)

10 3 2007
5:32:04PM

(w)

10 3 2007
5:32:04PM

(x)

(y) (z)

圖 3.37 攝影觀察沙崙溯昇波帶水流與輸砂現象

上圖攝影觀測時，現場天氣良好，波浪小並以近乎垂直向岸方向進行溯昇運動。為比較不同地形與海象條件下溯昇帶之輸砂運動情形，11 月 20 日另於台南安平海岸進行溯昇帶之底床攝影，擷取影像示如圖 3.38。因拍攝方向不同，照片右方為陸地，左方為海，波浪由左向右溯昇。拍攝時外海示性波高 0.7m，現場吹北風，波浪向岸斜向入射，沿岸流向南，灘面坡度 0.1，底質粒徑 0.26mm。現場因風浪大水質混濁，拍攝清晰度較差，照片(a)與(b)為向左回溯流，底床面距觀景窗下緣 4cm，照片中央之黑色雲狀物即為懸浮砂層，拍攝過程中可見強烈的漂砂活動，(b)左上角為露出之水面；照片(c)與(d)為波潮崩解產生之紊流與氣泡，此時水流短暫停滯，卻未見向岸之溯昇流出現；照片(e)至(r)全為向海之回溯流，時間長達 13 秒；照片(s)為遭遇小型波潮產生之短暫停滯，同樣沒有向岸之溯昇流出現；照片(t)至(w)又是向海之回溯流，時間只有 3 秒，隨即又遇到較大波潮引起較強紊流與大量氣泡，如照片(x)至(z)；照片(aa)至(ac)則為後續產生之較長停滯現象。

此次攝影觀測未見明顯的溯昇流可能是攝影機安裝位置位於灘面較下方位置，現場較大風浪使內碎波帶水位壅積(wave set-up)，水深較深，底部強烈的回溯流使得溯昇流只能沿著水體上層向岸溯昇，超出觀景窗上緣。由於底床持續受回溯流沖刷，圖中顯示灘面受嚴重侵蝕。

11 20 2007
11:07:18AM

(a)

11 20 2007
11:07:20AM

(b)

11 20 2007
11:07:22AM

(c)

11 20 2007
11:07:23AM

(d)

11 20 2007
11:07:24AM

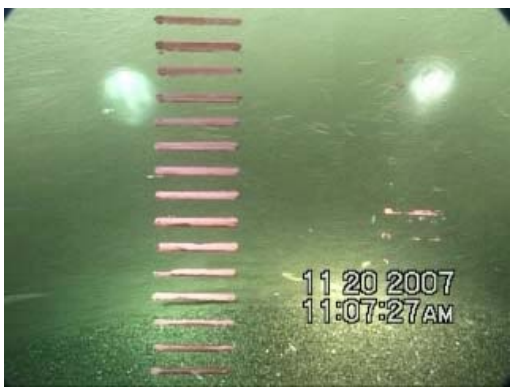
(e)

11 20 2007
11:07:25AM

(f)

11 20 2007
11:07:26AM

(g)


11 20 2007
11:07:27AM

(h)

11 20 2007
11:07:28AM

(i)

11 20 2007
11:07:29AM

(j)

11 20 2007
11:07:30AM

(k)

11 20 2007
11:07:31AM

(l)

11 20 2007
11:07:32AM

(m)

11 20 2007
11:07:33AM

(n)

11 20 2007
11:07:34AM

(o)

11 20 2007
11:07:35AM

(p)

11 20 2007
11:07:36AM

(q)

11 20 2007
11:07:37AM

(r)

11 20 2007
11:07:38AM

(s)

11 20 2007
11:07:39AM

(t)

11 20 2007
11:07:40AM

(u)

11 20 2007
11:07:41AM

(v)

11 20 2007
11:07:42AM

(w)

11 20 2007
11:07:43AM

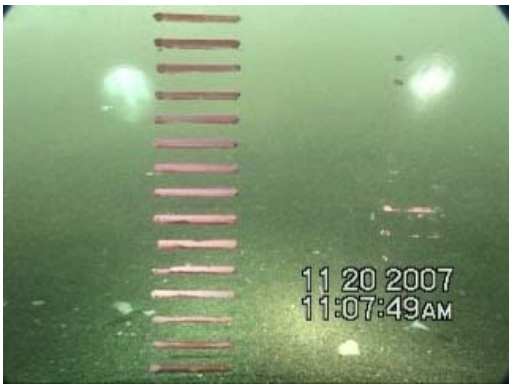
(x)

(y)

(z)

(aa)

(ab)



(ac)

圖 3.38　攝影觀察安平溯昇波帶水流與輸砂現象

第四章 結論與建議

本研究使用超音波剖面流速儀及底床攝影技術，深入觀測並探討溯昇帶內流場分佈與輸砂特性，就整體近岸碎波帶漂砂現象之瞭解能有進一步助益。灘面輸砂作用力來自底床剪應力，因此有必要對於溯昇流或回溯流的流場結構與邊界層流作深入觀察。本研究初步建立現場溯昇帶流場觀測方法，今後仍須持續進行各項觀測研究，才能完全瞭解溯昇帶輸砂特性與各種波浪條件、砂粒徑分佈、灘面坡度結構等其他外在條件之關係，以及溯昇帶與內碎波帶間的相互作用對於近岸漂砂的影響。累積長期觀測結果以瞭解近岸海域漂砂與地形變化關係，可據以建立相關模式提供各海域海岸侵淤之研判及輸砂量推估使用，作為未來港灣工程建設之重要依據。

1. 根據現場斷面測量，安平海岸在夏季期間受西南氣流及颱風影響，海岸嚴重侵蝕後退約 20m，前灘波度由 5 月時的 1/8 降為 8 月的 1/20。冬季因地形遮蔽風浪小，灘面遂逐漸淤積恢復原來地貌。

2. 近岸漂砂主要發生在碎波帶(surf zone)與溯昇帶(swash zone)，尤其是溯昇帶水深變化大、流層薄、流速強、濃度高，強烈的輸砂能力加上不對稱流分佈，對海灘侵淤有重大影響，使觀測研究更加困難。本研究率先在現場以 UVP 觀測溯昇帶邊界層流並以水下攝影機拍攝底床漂砂運動，將溯昇帶輸砂現象可視化，有助於於瞭解溯昇帶底床漂砂現象。

3. 根據現場觀測結果，灘面在溯昇波過程中，不斷有侵蝕與淤積反覆出現，而侵蝕現象主要發生在回溯流過程中。溯昇流則將灘線附近由回溯流沖刷下來或波潮崩解紊流產生的懸浮砂以懸浮質狀態攜至灘面上方，回補回溯流造成的侵蝕，兩者間的平衡則左右海岸線的進退。

4. 每一溯昇波有兩次懸浮質濃度高峰期分別發生在溯昇流與回溯流期間，第一次懸浮質濃度高峰發生在波潮崩解時，一般位於最高溯昇水位到達之前；值得注意的是第二次懸浮質濃度高峰並非發生在最大回溯流時，而是在水位急速降低之末期出現。

5. 為比較不同地形與海象條件下溯昇帶之輸砂運動情形，分別在淡水沙崙及台南安平海岸進行溯昇帶底床攝影，攝影結果顯示不同地形與海況條件確實會影響溯昇帶輸砂現象。

參考文獻

1. Ahilan, R.V. and Sleath, J.F.A., (1987) "Sediment transport in oscillatory flow over flat bed," *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 113(3), pp. 308-322.
2. Archetti, R. and Brocchini, M., (2002) "An integral swash zone model with friction: an experimental investigation," *Coastal Engineering*, 45, pp.89-110.
3. Bagnold, R.A., (1963) "Mechanics of marine sedimentation." *In: Hill, M.N. (ed.), The Sea, 3. New York: Wiley Interscience*, pp. 507-528.
4. Bagnold, R.A., (1966) "An approach to the sediment transport problem from general physics." *Washington, DC: US Geological Survey Professional Paper*, 422-1, 37p.
5. Beach, R.A. and Sternberg, R., (1991) "Infragravity-driven suspended sediment transport in the swash, inner and outer surf zone." *Proceeding of Coastal Sediments '91, ASCE*, pp. 1-11.
6. Brennikmeyer, B.M., (1975) "Mode and period of sand transport in the surf zone," *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.* Pp. 812-827.
7. Butt, T. and Russell, P., (1999) "Sediment transport mechanisms in high energy swash." *Marine Geology*, 161, pp. 361-375.
8. Butt, T., Russell, P. and Turner, I., (2001) "The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?" *Coast. Eng.* 42, pp.35-52.
9. Butt, T., Russell, P.E., Masselink, G., Miles, J.R., Huntley, D.A., Evans, D. and Ganderton, P., (2002) "An integrative approach to investigating the role of swash in shoreline change." *Proceedings 19th International Conference on Coast. Eng. ASCE*, pp. 917-928.
10. Butt, T., Russell, P., Puleo, J. and Masselink, G., (2004) "The influence of bore turbulence on sediment transport in the swash and inner surf zones." *Continental Shelf Research*, 24, pp. 757-771.
11. Conley, D.C. and D.L. Inman, (1992) "Field observation of the fluid-granular boundary layer under near-breaking waves," *J. Geophysical research*, Vol. 97, No. C6, pp. 9631-9643.
12. Conley, D.C. and Griffin, J.G., (2004) "Direct measurements of bed stress under swash in the field." *J. Geophys. Res*. 109, C03050.
13. Cowen, E.A., Sou, I.M., Liu, P.L.-F. and Raubenheimer, B., (2003) "Particle image velocimetry measurements within a laboratory-generated swash zone." *Journal of Engineering Mechanics* 129, pp. 1119-1129.
14. Cox, C.T., Hobensack, W. and Suumaran, A., (2000) "Bottom stress in the inner surf and swash zone," *Proceedings of 27th International Conference on Coastal Engineering, ASCE*. pp. 108-119.
15. Dohmen-Janssen, C.M., (1999) "Grain size influence on sediment transport in oscillatory sheet flow: phase lags and mobile bed effects," *PhD thesis, Delft University of Technology*.
16. Elfrink, B., and Baldock, T.E., (2002) "Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and future perspectives." *Coastal Engineering* 45, pp. 149-167.
17. Evans, D., Masselink, G., Russell, P., Butt, T., Miles, J.R. and Ganderton, P., (2003) "Application of Bagnold's model in the swash zone using field data." *Coastal sediments '03. ASCE*.
18. Fairchild, J.C., (1959) "Suspended sediment sampling in oscillatory wave action," *Beach Erosion Board, Tech. Memo* 115.
19. Gourlay, H.R., (1992) "Wave set-up, wave run-up and beach water-table. Interaction between surf zone hydraulics and groundwater hydraulics." *Coastal Eng*. 17, pp. 93-144.

20. Guza, R.T., and Thornton, E.B., (1982) “Swash oscillations on a natural beach.” *J. Geophys. Res*. 87, pp. 483-491.
21. Homma, M. and Horikawa, K., (1962) “Suspended sediment due to wave action,” *Proc. 8th Coastal Eng. Conf*., pp. 168-193.
22. Horikawa, K., Watanabe, A. and Katori, S., (1982) “Sediment transport under sheet flow condition,” *Proc. 18th Int. Conf. On Coastal Eng., Cape Town. ASCE, New York*, pp. 1335-1352.
23. Hughes, M.G., (1995) “Friction factors for wave uprush.” *Journal of Coastal Research* 13, pp. 1089-1098.
24. Hughes, M.G., Masselink, G. and Brander, R.W., (1997) ‘Flow velocity and sediment transport in the swash zone of a steep beach.” *Mar. Geol*., 138, pp.91-103.
25. Hughes, M.G. and Turner, I., (1999) “The beachface. In: Short, A.D. (Ed.), Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics.” *John Wiley and Sons*, pp. 119-144.
26. Ifuku, M., (1988) “Field observation and numerical calculation of suspended sediment concentration in the surf zone,” *Coastal Eng. In Japan*, Vol. 30, No. 2, pp. 75-88.
27. Jackson, N., Masselink, G. and Nordstrom, K.F., (2004) “The role of bore collapse and local shear stresses on the spatial distribution of sediment load in the uprush of an intermediate-state beach.” *Mar. Geol.* 203, pp. 109-118.
28. Kawata, Y., Yoshioka, H. and Tsuchiya, Y., (1990) “The in-situ measurements of sediment transport and bottom topography changes,” *Coastal Eng*., pp. 2332-2345.
29. Kawata, Y., Shirai, T. and Tsuchiya, Y., (1992) “Field observation on sand ripples under rough sea state,” *Coastal Eng*., pp. 2164-2175.
30. Kobayashi, N. and Seo, N.J., (1985) “Fluid and sediment interaction over a plan bed,” *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 111(6), pp. 903-921.
31. Kos’yan, R., Podymov I. and Pykhov, N., (1990) “Investigation of suspended sediment dynamics in the course of nearshore experiment in the Ob sea,” *MEDCOAST ‘99 – EMECS ‘99 Joint Conference*, pp. 1675-1691.
32. 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,” *J. Marine Science and Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 83-91.
33. Madsen, O.S. and Grant, W.D., (1977) “Quantitative description of sediment transport by waves,” *Proceedings of the 15th Conference on Coastal Engineering (New York, ASCE)*, pp. 1093-1112.
34. Masselink, G. and Hughes, M.G., (1998) “Field investigation of sediment transport in the swash zone.” *Cont. Shelf Res*. 18, pp. 1179-1199.
35. Masselink, G. and Li, L., (2001) “The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study.” *Mar. Geol*. 176, pp. 139-156.
36. Masselink, G., Evans, D., Hughes, M.G. and Russell, P., (2005) “Suspended sediment transport in the swash zone of a dissipative beach.” *Marine Geology* 216, pp. 169-189.
37. Nadaoka, K., Hino, M. and Koyano, Y., (1989) “Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone.” *J. Fluid Mech*. 204, pp. 359-387.
38. Nielsen, P., (1989) “Wave setup and runup: an integrated approach.” *Coastal Eng.* 13, pp.1-9.
39. Nielsen, P., (2002) “Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modeling.” *Coastal Engineering* 45, pp. 53-60.
40. Nishi, R., Sato, M. and Nakamura, K., (1992) “Grain-size distribution of suspended sediments,” *Coastal Eng*., pp. 2293-2306.
41. Noda, H., (1967) “Sediment suspension by waves,” *Proc. 14th Japanese Conf. On Coastal Eng*., pp. 306-314.
42. Osborne, P.D. and Rooker, G., (1999) “Sand re-suspension events in a high-energy infragravity swash zone.” *Journal of Coastal Research*, 15 pp. 74-86.

43. Petti, M. and Longo, S., (2001) “Turbulence experiments in the swash zone,” *Coastal Engineering*, 43, pp.1-24.
44. Pritchard, D. and Hogg, A.J., (2005) “On the transport of suspended sediment by a swash event on a plane beach.” *Coastal Engineering* 52, pp. 1-23.
45. Puleo, J.A., Beach, R.A., Holman, R.A. and Allen, J.S., (2000) “Swash zone sediment suspension and transport and the importance of bore-generated turbance,” *Journal of Geophysical Research* 105 (C7), pp. 17021-17044.
46. Puleo, J.A. and Holland, K.T., (2001) “Estimating swash zone friction coefficients on a sandy beach.” *Coastal Engineering* 43, pp. 25-40.
47. Puleo, J.A., Holland, K.T., Plant, N.G., Slinn, D.N. and Hanes, D.M., (2003) “Fluid acceleration effects on suspended sediment transport in the swash zone.” *J. Geophys. Res.* 108, pp. 3350.
48. Raubenheimer, B., Elgar, S. and Guza, R.T., (2004) “Observations of swash zone velocities: a note on friction coefficients,” *J. Geophys. Res*. C01027.
49. Roos, A., and Batties, J.A., (1994) “Characteristics of flow in run-up of periodic waves.” *Proc. 15th Intl. Conf. Coastal Eng. – ASCE* 1, pp. 781-795.
50. Sleath, J.F.A., (1982) “The suspension of sand by waves,” J. Hydr. *Res.*, Vol. 19, pp. 439-452.
51. Smyth, C. and Hay, A.E., (2002) “Wave friction factors in nearshore sands.” *Journal of Physical Oceanography* 32, pp. 3490-3498.
52. Staub, C., Jonsson, I.G. AND Svendsen, I.A., (1984) “variation of sediment suspension in oscillatory flow,” *Proceedings of 19th Conference on Coastal Engineering (Houston, ASCE)*, pp. 2310-2321.
53. Turner, I. And Masselink, G., (1998) “Swash infiltration-exfiltration and sediment transport.” *J. Geophys. Res.* 103, pp. 30813-30824.
54. Wright, L.D., Guza, R.T. and Short, A.D., (1982) “Dynamics of high energy dissipative surf zone,” *Marine Geology*, Vol. 45, pp. 41-61.
55. Yu, Z., Niemeyer, H.D. and Bakker, W.T., (1990) “Site investigation on sand concentration in the sheet flow layer,” *Coastal Eng.*, pp. 2360-2371.
56. Yu, Y., Sternberg, R.W. and Beach, R.A., (1993) “Kinematics of breaking waves and associated suspended sediment in the nearshore zone.” *Cont. Shelf Res*. 13, p. 1219-1242.