

花蓮七星潭礫灘的地形及沉積特性*

Geomorphologic and Sedimentary Features of the Chi-Shing-Tan Gravel Beach, Hualien, Eastern Taiwan

賴序衡^a

鄧屬予^b

Larry Syu-Heng Lai

Louis Suh-Yui Teng

Abstract

Chi-Shing-Tan, located at northwestern Hualien city of eastern Taiwan, is bordered with a well-developed gravel beach, which has been focused by geomorphologic researches. In an attempt to unravel the characteristics of this gravel beach, this study investigated the beach profiles, gravel texture and composition, and their spatial variations to infer the sources and transport mechanisms of beach sediment. The Chi-Shing-Tan beach is near 160 m wide in the north and about 30 m in the south. The beach has a gentle backshore and a steep foreshore separated with one to three steps of berm crest. The foreshore gravels are generally well-sorted, coarsen landward, and exhibit prominent landward-facing imbrication, which imply that sediment transport and deposition are dominated by strong uprush. In contrast, the backshore gravels are often poorly sorted, randomly imbricated, and featured with a debris line, which can be attributed to stormy waves under extreme storms. The composition of Chi-Shing-Tan beach pebbles are dominated by metamorphic rock clasts, which are mainly derived from the San-Jan River and Li-Wu River in the Central Range. These sediments were constantly longshore transported with increasing abrasion from north to south and then accreted onshore by wave uprush to form gravel beach. In addition, cliff erosion at the northern Milun Tableland also supplies a minor amount of sediment to beach.

Keywords: Chi-Shing-Tan, gravel beach, coastal sedimentology

* 本文初稿曾發表於 102 年中華民國地球物理學會與社團法人中華民國地質學會年會暨學術研討會

^a 國立臺灣大學地質科學研究所碩士班研究生，通訊作者 (e-mail: larry444444@gmail.com)

Graduate Student, Department of Geosciences, National Taiwan University.

^b 國立臺灣大學地質科學研究所教授

Professor, Department of Geosciences, National Taiwan University.

七星潭海岸位於三棧溪與米崙台地之間，有發育良好的礫灘，是以往海岸研究的重要地點。為了探索礫灘的地形和沉積性質，本研究詳細測繪該地的海灘剖面，分析灘礫的組織與岩性，並觀察海灘的側向變化，以探討沉積物來源及搬運機制。七星潭礫灘北寬南窄，最寬處約 160 公尺；灘面有平緩的後濱及陡峭的前濱，其上有一至三階灘臺脊。前濱灘礫淘選良好，粒徑由海向陸漸粗，並呈現明顯之疊瓦狀排列，朝內陸傾倒，顯示波浪上沖作用主導了灘礫的搬運和堆積。後濱灘礫淘選度較差，雖亦有疊瓦狀組構，但排列方向較繁亂，且常見漂木和雜物排列成的碎物線，展現出暴風波浪作用的特徵。七星潭海灘沉積物主要由變質岩的碎屑組成，大多來自北方三棧溪及立霧溪的河口堆積物，少部分來自南端米崙台地的海崖侵蝕。這些沉積物受波浪沖刷磨蝕與沿岸搬運，最後被沖積上陸堆成礫灘。

關鍵詞：七星潭、礫石海灘、海岸沉積學

前 言

台灣四周環海，海灘為沿岸沉積物搬運和堆積的重要環境單元，尤其是西岸綿延分布的沙灘（徐鐵良，1962；石再添，1981）。不過在台灣東部，海岸地形陡峭，沙灘通常發育不良，倒是出現許多礫灘（蔣正興、俞何興，2002；塗明寬、張徽正，2005；沈淑敏，2013）。這些礫灘過去曾有地形學研究探討濱線變遷（石再添等，1995；林雪美、張喬盛，2001）及海岸侵蝕機制與防護（許民陽、沈淑敏，1995；許民陽等，1998；許民陽，2005；Yang *et al.*, 2012），但海灘沉積物及灘面形態的研究並不多見。

七星潭位於花蓮市東北方海邊（圖 1），有發育良好的礫灘。由於交通方便且保存完善，是以往海灘研究的重點。石再添等（1994）及吳柏霖、顏君毅（2012）曾探索海灘的地形剖面及沉積物粒徑的分布，Wu and Yen（2013）且分析濱砂的岩象組成，提供了基礎調查資料。然而礫灘性質卻乏人問津，故沉積物來源和堆積機制尚無定論。

為了探索七星潭礫灘的性質和成因，本研究在 2010 年 11 月與 2012 年 2 月分別進行實地探勘，測繪海灘剖面，分析灘礫的組織與岩性，並觀察海灘的側向變化。結果發現灘礫多為來自中央山脈的變質岩，主要由北方的三棧溪和立霧溪供給，少部分來自南方的米崙台地。沉積物受波浪沿岸輸送到七星潭，再堆積上岸形成礫灘。在此本文先介紹七星潭的地質背景，展示礫灘的地形和沉積物特性，再探討沉積物來源及搬運機制。

區域背景

七星潭海岸位於花東縱谷北端，西臨縱谷平原及中央山脈，南接米崙台地及海岸山脈（圖 1）。礫灘位於三棧溪和米崙台地之間，沿北埔沙丘東緣延伸（石再添等，1994），全長約 10 km（圖 2）。

中央山脈地勢高聳陡峭，海拔最高超過 3000 m，基盤為大南澳變質雜岩。海岸山脈地勢較低緩，高度小於 1000 m，岩盤由未變質的火成岩與沉積岩組成（何春蓀，1986）。縱谷平原地勢平

坦，為全新統的沖積層覆蓋，沉積物分別來自中央山脈與海岸山脈（杜開正，2008）。

米崙台地位於米崙斷層東南側，北端最高海拔為 48 m，出露地層包含米崙山礫岩、米崙鼻礫岩、米崙層、花蓮層與海階堆積物（林啟文等，2009），其中米崙鼻礫岩及海階堆積物於七星潭南端的海崖出露（圖 3A）。米崙鼻礫岩亦稱米崙礫岩（徐鐵良，1956），為更新統海相地層，出露厚度約 300 m，多礫質沉積物，由中央山脈變質岩的碎屑組成，礫石徑長多小於 30 cm（謝孟龍、鄧屬予，1994）。海階堆積物則由全新統古礫灘及珊瑚礁構成（Yamaguchi and Ota, 2004）。

七星潭四周有五條主要的河系，北有立霧溪與三棧溪，南有美崙溪、吉安溪和花蓮溪（圖 1）。其中立霧溪、三棧溪、美崙溪與吉安溪皆發源自中央山脈，沉積物均由變質岩碎屑組成。花蓮溪流域廣闊，兼及中央山脈與海岸山脈，其沉積物除包含來自中央山脈的變質岩碎屑外，亦有海岸山脈的火成岩與沉積岩碎屑（杜開正，2008；Wu and Yen, 2013）。

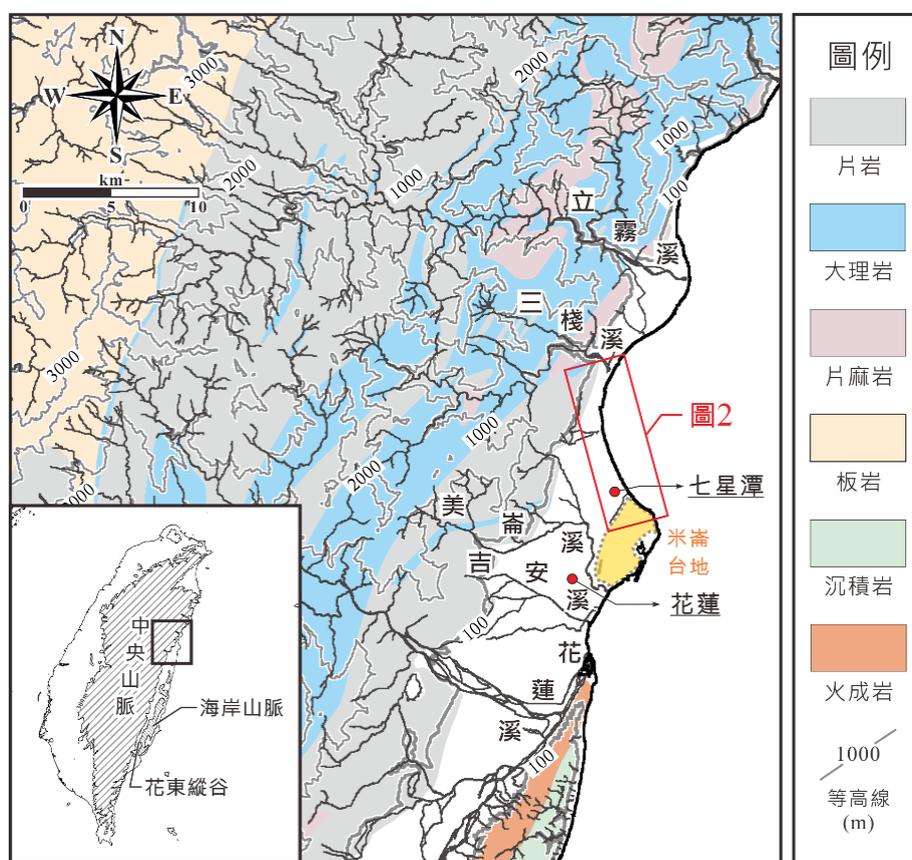


圖 1 區域地質圖

資料來源：修改自中央地質調查所二十五萬分之一地質圖

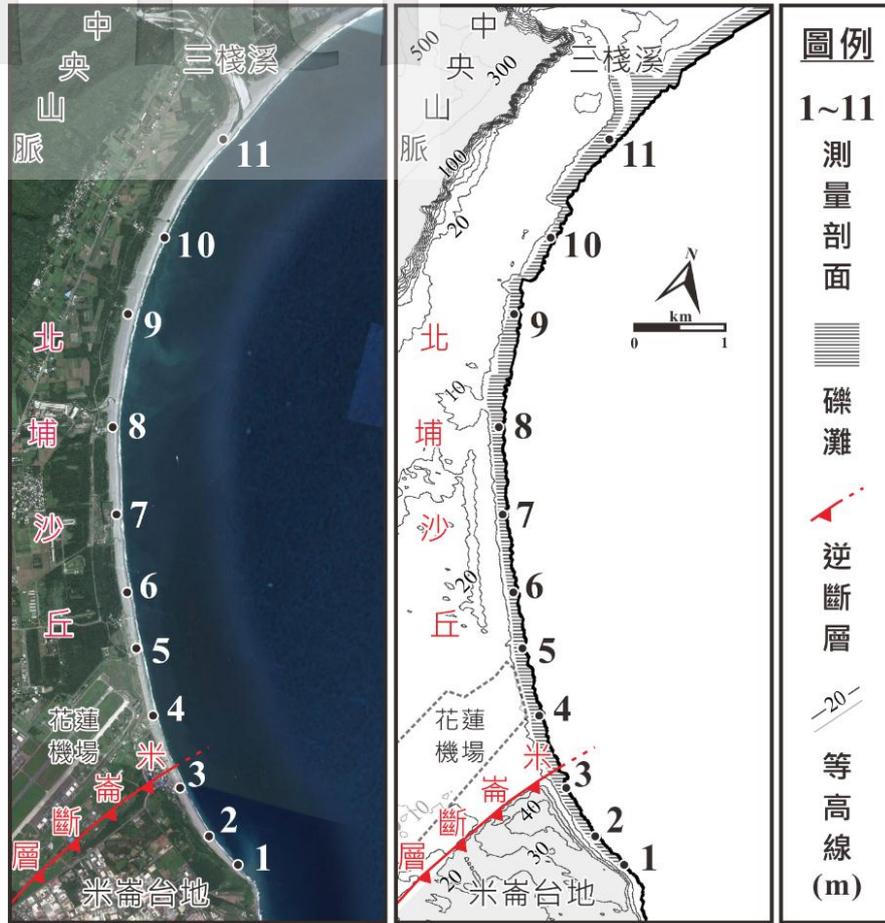


圖 2 研究區域之空照圖及地形圖

資料來源：空照圖擷自 Google map，等高線地形圖轉繪自林務局農林航空量測所 40 m 解析度 DEM

灘面特徵

七星潭礫灘的寬度南北不一，北端最寬處約 160 m，逐漸向南變窄，至南端米崙台地海崖邊緣處寬度不到 30 m。本研究沿海灘選取 11 個間距相近的剖面測繪地形（方法見附錄），結果發現各剖面雖寬度不同，但具有共同的灘面地形特徵，前濱（foreshore）、後濱（backshore）及其間的灘臺脊（berm crest）都明顯可見（圖 3B，圖 4）。根據 Pajak and Leatherman（2002）的定義，海灘內緣以植被最外緣（vegetation line）、人工堤及海崖崖底（bluff toe）等為界，海灘外緣則為海水面。七星潭礫灘內緣即北埔沙丘的外緣（石再添等，1994），常被人造物與植被所覆蓋（圖 3C），部分剖面（6 與 11）出現崖緣（scarp edge）地形。

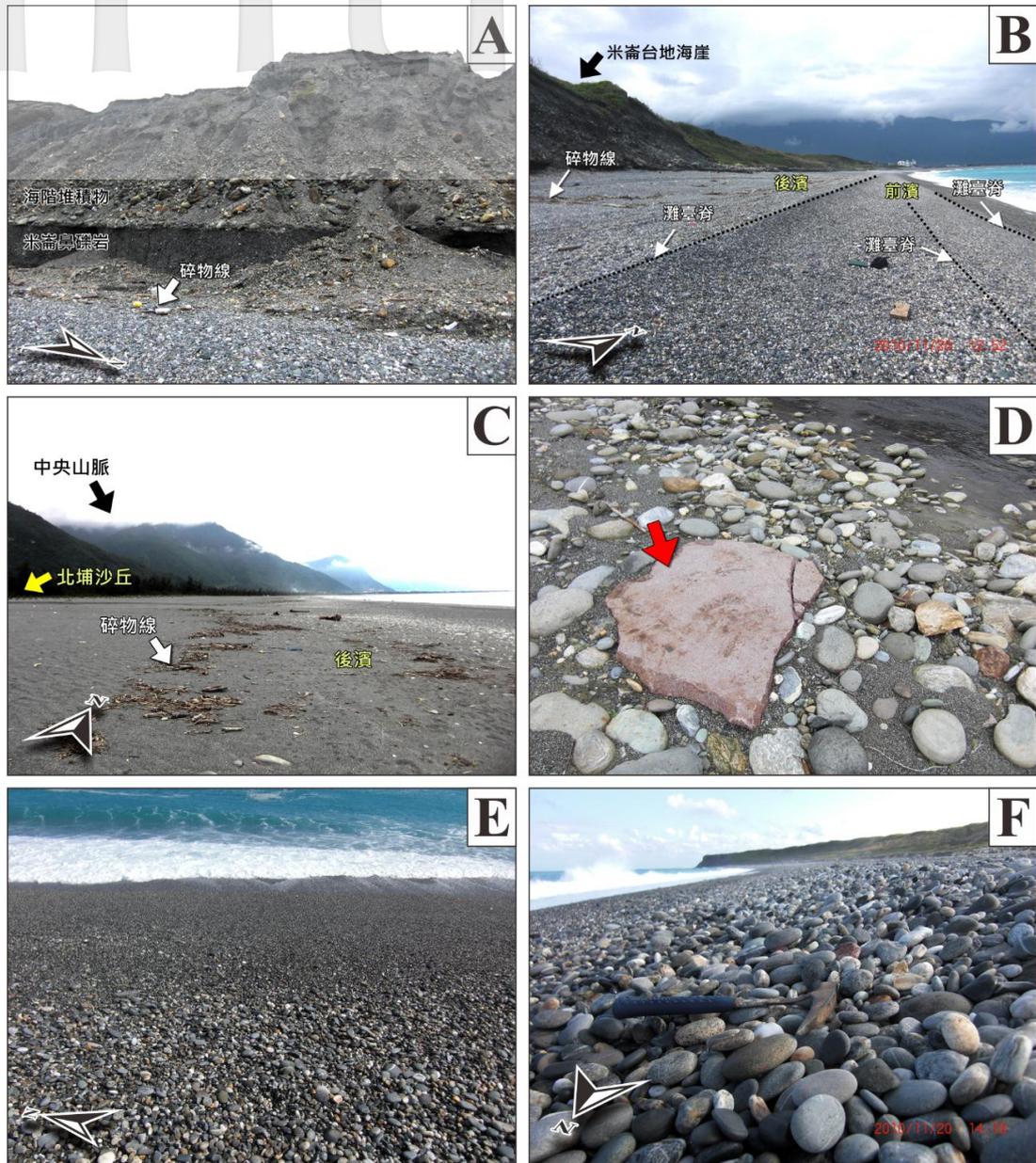


圖 3 野外照片

(A：米崙台地海崖露頭，攝於剖面 1 附近。B：灘面地形與礫石分布特徵，攝於剖面 2。C：後濱灘面特徵，攝於剖面 9。D：人為汙染外來石材，攝於剖面 8 附近的小溪溝。E：前濱灘礫粒徑變化，攝於剖面 6。F：灘臺脊附近的疊瓦狀構造，攝於剖面 4。)

一般礫灘剖面的前濱地形較為陡峭，後濱較平緩，兩者之間的坡度轉折點被訂為「灘臺脊」（洪佩鈺等，2006）。七星潭礫灘前濱坡度約 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，後濱 $1^{\circ} \sim 4^{\circ}$ ，灘臺脊發育良好。吳柏霖、顏君毅（2012）及石再添等（1994）曾量測部分的海灘地形剖面，結果與本文大致相同（附圖 2）。吳柏霖、顏君毅（2012）提及海灘中段與南端的灘臺脊有重複發育，本研究亦觀察到此現象，甚至在剖面 2 發現三階灘臺脊（圖 3B，圖 4）。

七星潭灘面沉積物由礫與砂組成，礫石岩性主要為變質岩，並參雜少量非產自台灣的外來岩塊（圖 3D）。根據石再添等（1994）的研究，灘面粒徑自前濱向後濱漸粗，再向北埔沙丘逐漸變細。本研究雖觀察到類似的粒徑變化，但發現前濱沉積物以礫為主，粒徑自濱線向灘臺脊變粗（圖 3E），且平行海岸呈帶狀分布（圖 4），可區分成粗砂至極細粒帶（coarse sand to very fine gravel zone, $0.5 \sim 4 \text{ mm}$ ）、細礫至中礫帶（fine to medium gravel zone, $4 \sim 16 \text{ mm}$ ）、粗礫帶（coarse gravel zone, $16 \sim 32 \text{ mm}$ ）與極粗礫帶（very coarse gravel zone, $32 \sim 64 \text{ mm}$ ）。後濱則以粗砂及細礫組成，粒徑由海向陸側漸細，雖亦具帶狀特徵，但側向延續性較差（圖 3C）。

前濱灘礫淘選度佳，堆疊緊密，孔隙間無填充物，並具方向一致的疊瓦狀構造（圖 3F）；後濱灘礫堆疊較鬆散，常見粗礫以覆甲狀（armoring）蓋於細礫之上，礫間多呈相切接觸（tangential contact），孔隙多被細粒填充，並常見獨立顆粒（floating grain），越往內陸表覆礫石越加稀疏；雖可見疊瓦狀構造，但排列方向較散亂。最內側常出現漂木及雜物堆積，形成明顯之碎物線（debris line）；碎物線以上則以淘選度良好的砂為主，沉積物性質類似北埔沙丘（圖 3C，圖 4）。

灘礫粒徑及外形

海岸前濱沉積物在海浪長期沖刷下，其粒徑與外形常和海浪營力近乎達到平衡，而其分布及沿岸變化可用來探討海浪作用及沉積物來源（Carr, 1969; 1971; Bird, 1996; Bluck, 1999）。本研究分別於剖面 1、3、6、8、10 的前濱，觀察濱線與灘臺脊灘礫的磨圓度，量測其粒徑三軸長（方法見附錄），並依國際通用的最短軸（S）來作比較依據（Carr *et al.*, 1970; Williams and Caldwell, 1988）。

七星潭灘礫多屬滾圓狀（very rounded）至次圓狀（sub-rounded），少部分沿劈理破裂成次角礫狀（sub-angular）。灘礫外形多屬扁平狀與等軸狀，外形的沿岸變化不大，但灘臺脊的礫石總體較濱線處扁平（圖 5）。灘礫以小礫至中礫為主，平均最短軸在濱線處為 $5 \sim 15 \text{ mm}$ （約 $-2 \sim -4 \phi$ ），灘臺脊上為約 $25 \sim 35 \text{ mm}$ （約 $-4.5 \sim -5 \phi$ ）。整體來看，灘礫粒徑由海向陸漸粗，但沿岸變化不顯著，只有在剖面 1 濱線粒徑較粗（圖 6）。

一般而言，灘礫在波浪長時間沖刷或長距離搬運作用下，磨圓度均甚高（Grogan, 1945），七星潭海灘亦復如此。灘礫由海向陸逐漸變粗，灘臺脊多扁平狀粗礫，皆為礫灘常見的特徵（Bluck, 1999; Buscombe and Masselink, 2006）。剖面 1 濱線處的高粒徑可能反映該處波浪作用較強（吳柏霖、顏君毅，2012），或因海底地形陡而不易累積細礫及砂（石再添等，1995；林雪美、張喬盛，2001）。

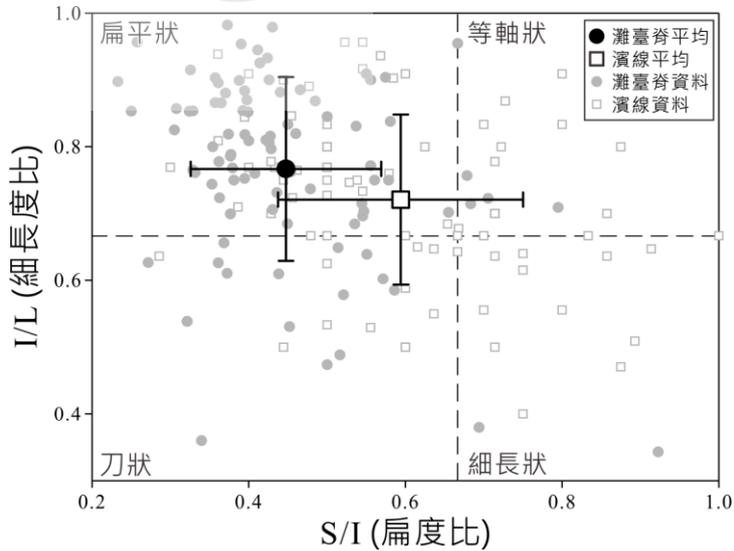


圖 5 前濱灘礫外形 Zingg Diagram

(L: 最長軸, I: 次長軸, S 最短軸, 誤差值為一個標準差, 量測位置見圖 4, 原始資料見附表 2-1 及 2-2。)

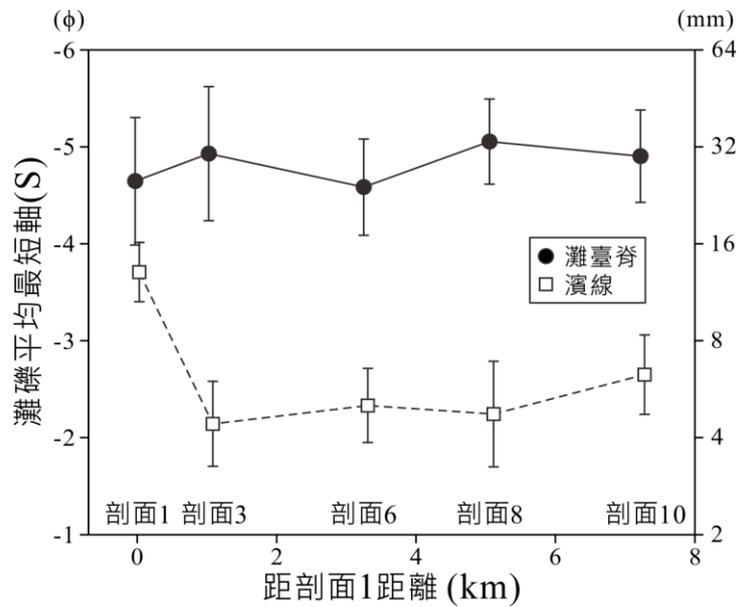


圖 6 前濱灘礫粒徑 (最短軸) 分佈圖

(誤差值為一個標準差, 量測位置見圖 4, 原始資料見附表 2-1 及 2-2。)

灘礫排列

通常灘礫在海浪及沿岸流作用下，會呈規律性排列 (Orford *et al.*, 1996; Hayes, 2010)。七星潭海灘也是如此，只是前濱與後濱灘礫的排列不同 (圖 4)。為了解灘礫排列的特性，本研究於各剖面的前濱與後濱，分別量測疊瓦狀結構的傾倒方向 (方法見附錄)，並繪成玫瑰圖，以推斷水流方向。部分剖面因鄰近海濱公園與海巡單位，可能曾受人為活動破壞而未量測。雖然未能覆蓋全區，量測結果已可顯示前濱灘礫倒向多朝西南西 (圖 7)，大致指向內陸並近乎垂直海岸線，僅於北端之剖面 9 至 11 與海岸線斜交，有 40 至 50 度的夾角，暗示有向南的沿岸漂移 (longshore drift) 作用 (Austin *et al.*, 2011)。而後濱灘礫的排列方向較多元，也與野外觀察吻合。

灘礫岩性

海灘沉積物的岩性組成常作為其來源地指標。由於七星潭灘礫的岩性易於野外辨認，且灘臺脊處的粒徑變化小 (圖 6)，適合探討組成的沿岸變化 (Howard, 1993)，故本研究在剖面 1、3、6、8、10、11 灘臺脊量測灘礫岩性組成。此外，因七星潭本身無大河從中穿過，其沉積物最可能來自鄰近的河川或海崖 (許民陽、沈淑敏, 1995; 許民陽等, 1998)，故本研究另在三棧溪河床、立霧溪河床及米崙台地海崖露頭 (含海階堆積物與米崙鼻礫岩) 量測礫石組成 (方法見附錄)，以作比較依據。

七星潭灘礫的岩性包含變質砂岩、變質礫岩、脈石英、變質燧石、板岩、黑色片岩、綠色片岩、大理岩、變質基性岩及花崗片麻岩，皆是來自中央山脈變質岩帶的碎屑，未發現來自海岸山脈的火成岩與沉積岩 (表 1)。而灘礫中外來岩塊 (如花崗岩、正長岩) 常見明顯的人工裁切面，應為附近切石場的廢棄石材；由於其數量不多，對岩性計數的影響有限，故未納入量測中 (圖 3D)。

不同岩性的岩塊有不同的物理性質，在水流搬運時，會產生不同程度的磨損 (Attal and Lavé, 2009)，因而影響灘礫組成的側向變化。有鑑於此，本文依物理性質分類岩性，將石英質為主的變質砂岩、變質礫岩、脈石英及變質燧石等合稱「變質石英岩 (metaquartzite)」，將葉理發達的板岩、黑色片岩與綠色片岩合為「變質泥質岩 (metapelite)」，將變質基性岩與花崗片麻岩併成「變質火成岩」，重新合算灘礫岩性組成 (附表 4-2)，並繪製成圓餅圖 (圖 8)。結果發現北端三棧溪與立霧溪河床具有高量的變質泥質岩及大理岩，南端米崙台地的海崖露頭 (米崙鼻礫岩及海階堆積物) 則有較多的變質石英岩。七星潭灘礫組成多落在兩者之間，以變質石英岩為主，其次為大理岩、變質泥質岩及變質火成岩。其中大理岩與變質泥質岩的含量大致由北向南遞減，變質石英岩則由南向北遞減。而變質火成岩含量較少，沿岸變化不顯著。

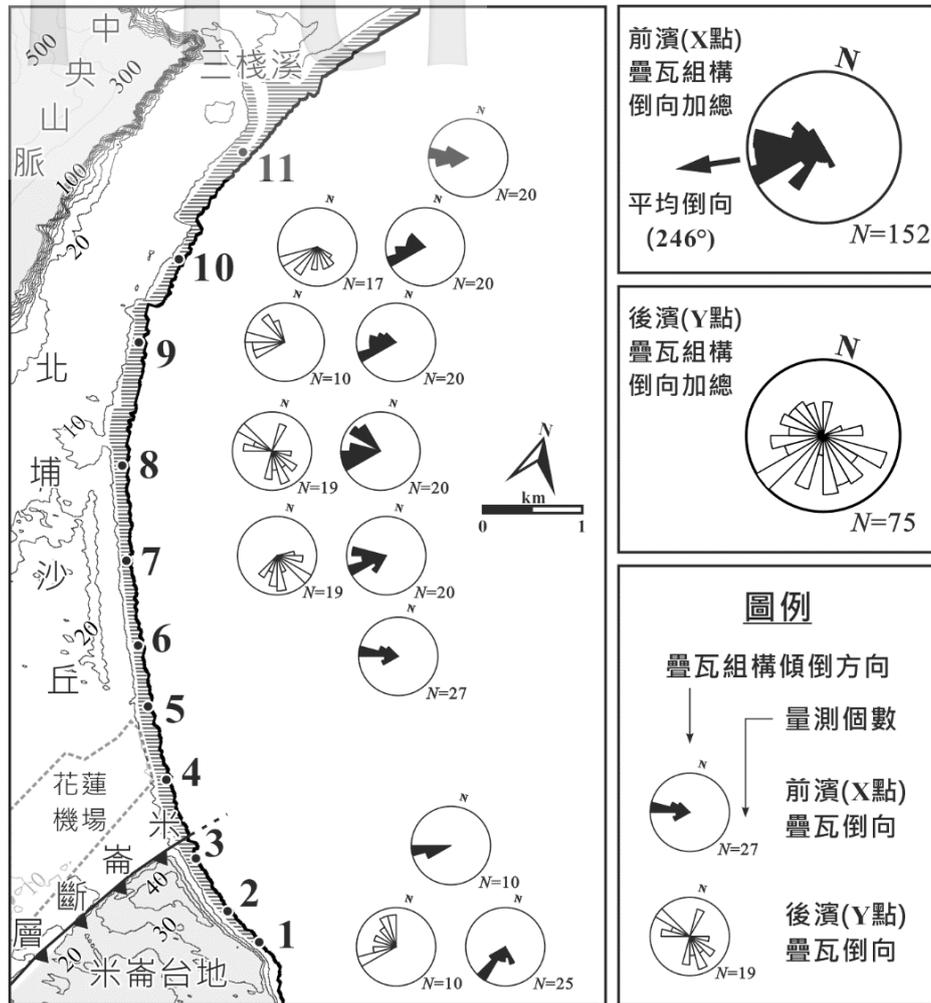


圖 7 灘礫疊瓦倒向玫瑰圖

(地形圖圖例見圖 2，量測位置見圖 4，原始資料見附附表 3-1 及 3-2。)

表 1 七星潭灘礫岩性特徵

灘礫岩性		代號	岩性特徵
變質 石英岩	變質砂岩	Ss	灰色或褐色，塊狀，石英質，常夾石英脈，偶見劈理。
	變質礫岩	Cgl	灰白色，塊狀，碎屑以石英質為主，顆粒順葉理排列。
	脈石英	Qtz	白色至透明的石英結晶，偶參雜赤鐵礦或其他雜質。
	變質燧石	Cht	白色至米白色為主的微晶質石英岩，塊狀，偶見片理。
變質 泥質岩	板岩	Slr	深灰色至黑褐色，具板劈理，脆弱易碎。
	黑色片岩	Bsc	灰色至黑色，具片理，常夾薄石英脈。
	綠色片岩	Gsc	綠色，具片理，常夾薄石英脈。
大理岩		Mar	白色致靛灰色，塊狀，結晶良好的變質石灰岩。
變質 火成岩	變質基性岩	Bas	綠色至灰綠色，塊狀，葉理不發達，常見原始基性火成岩的斑晶組織。
	花崗片麻岩	Gn	白色至黃褐色，花崗岩質組成，塊狀，葉理不發達。

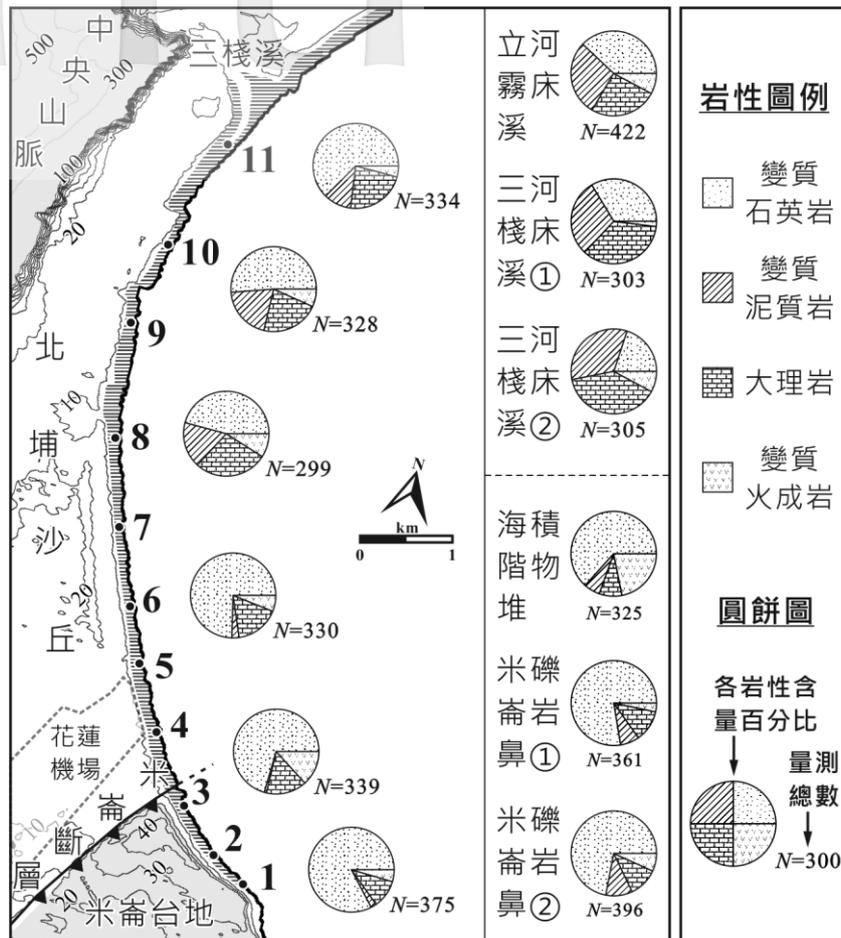


圖 8 礫石岩性組成圓餅圖

(地形圖圖例見圖 2，量測位置見圖 4，原始資料見附表 4-1 及 4-2。)

討 論

根據本研究的量測數據，我們可進一步探討七星潭的灘礫來源與海岸沉積作用。

(一) 灘礫來源

七星潭緊鄰北埔沙丘，其中並無礫質沉積物，因此灘礫應來自海岸南北兩側。米崙台地南方花蓮溪、吉安溪與美崙溪河口有礫質沉積物，近岸有洋流（黑潮）經年朝北流（Ichikawa and Beardsley, 2002），似乎可將沉積物向北運送。然而七星潭灘礫中並無花蓮溪輸出的海岸山脈岩屑（附表 4-1），因此南方河口沉積物不太可能被運送到七星潭，唯有米崙台地海崖下方的崖錐可提供有限的沉積物（圖 3A）。從礫石岩性組成來看，北方的三棧溪和立霧溪河口沉積物組成類似，皆具高量大理岩與變質泥質岩，且灘礫中此二岩類含量由北向南遞減（圖 8，圖 9），顯示礫質沉積物主要由此二溪供應，再透過沿岸流向南搬運（石再添等，1995），陸續散布在七星潭海灘（圖

10)。不過三棧溪河床礫石與鄰近灘礫（剖面 11）的岩性組成差異甚大，反倒是立霧溪河床礫成分較為接近灘礫，似乎暗示立霧溪輸砂的影響較高。

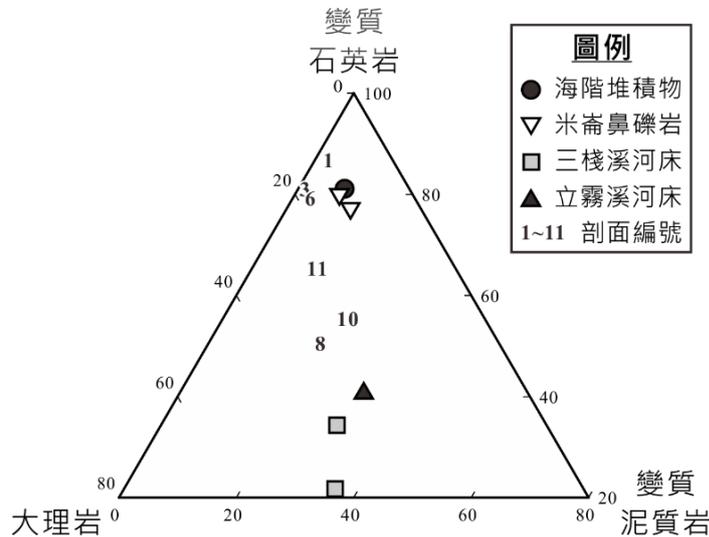


圖 9 灘礫變質石英岩-大理岩-變質泥質岩成分三角圖

(測量位置見圖 4，原始資料見附表 4-1 及 4-2。)

(二) 正常天候波浪作用

海灘通常同時受到波浪、潮汐和河流等作用共同影響，不過台灣東海岸平均潮差小於 1 公尺，且沒有出現潮坪，顯示潮汐影響甚微 (Yang *et al.*, 2012)；七星潭海岸本身並無大河穿過，河流影響亦不明顯；倒是花蓮海岸的平均波高為台灣之最，海岸沉積作用被波浪主導 (石再添等, 1995)，其作用的痕跡充分展現於七星潭灘灘的地形和沉積特徵。

一般而言，由於灘坡度陡峭，衝浪帶 (surf zone) 與破浪帶 (breaker zone) 狹窄發育不良，因此在正常天候下，前濱沖刷帶 (swash zone) 為沉積作用最活躍的區域 (Austin and Masselink, 2006; Karunaratna *et al.*, 2012)。在七星潭的前濱，灘臺脊的粒徑較濱線處高 (圖 3E，圖 6)，且礫石常有倒向內陸的最長軸疊瓦排列 (L-axis imbrication) (圖 3F，圖 7)，顯示波浪上沖作用 (uprush) 相當強勁，能將粗礫沖至灘臺脊上，同時淘選富集易受波浪掀飛的扁平礫 (Bluck, 1967; 1999) (圖 5)；此外，由於前濱礫間多孔隙，滲透率高，當海水上沖至灘面後便快速下滲，後洗作用 (backwash) 能量微弱，已無力將粗礫向海搬運，因此濱線附近僅能留下較細的顆粒 (Quick, 1991; Jennings and Shulmeister, 2002; Bluck, 2011)。此波浪不對稱沖刷作用 (swash asymmetry) 亦暗示沉積物會逐漸自外海朝岸上搬運，使海灘加積 (Buscombe and Masselink, 2006; Ivamy and Kench, 2006)。

波浪不對稱沖刷作用亦是前濱地形多變的主因 (Kulkarni *et al.*, 2004; Austin and Masselink, 2006)。強勁的上沖作用將粗礫不斷地斜上推送堆積成灘臺脊，並使前濱坡度逐漸增加 (Masselink and Li, 2001; Horn and Li, 2006)。七星潭可見灘臺脊重複發育，顯示潮位升降仍會造成前濱的地形改變 (Anthony, 2008; Bluck, 2011)。漲潮會加助波浪將沉積物朝陸搬運，並在高水位線 (high

water line) 堆成高潮灘臺脊 (Weir *et al.*, 2006)。而退潮時，少許沉積物可能被帶回前濱底部，形成低潮灘臺脊 (Ivamy and Kench, 2006)。至於剖面 2 觀察到三階灘臺脊出現 (圖 3B, 圖 4)，其最高的灘臺脊可能是過去暴潮或較大風浪作用所遺留。

沖刷帶亦是礫灘沉積物沿岸輸送的主要區域 (Van Wellen *et al.*, 2000; Austin and Masselink, 2006; Austin *et al.*, 2011)。在七星潭前濱，灘礫粒徑帶分布平行於海岸 (圖 4)，疊瓦結構則幾乎垂直倒向內陸 (圖 7)，暗示平時波浪的沉積物沿岸輸送能力並不強 (Orford *et al.*, 2002; Osborne, 2005)。不過從七星潭灘礫岩性的沿岸變化，仍能看出波浪將沉積物逐漸向南搬運的影響。由於石英岩質地堅硬較耐磨，其含量通常會隨磨損程度增加而提高 (Howard, 1993; Attal and Lavé, 2009)。本研究發現，七星潭灘礫變質石英岩比例由北向南增加 (圖 9)，海岸北端 (剖面 11) 灘礫的變質石英岩明顯比三棧溪與立霧溪河床富集，且海岸南端 (剖面 1) 灘礫的變質石英岩含量亦較米崙台地海崖露頭還高；這些都反映灘礫已受長期波浪沖刷，並隨向南搬運距離增加逐漸磨蝕 (Dornbusch *et al.*, 2002; Allan *et al.*, 2006; Dickson *et al.*, 2011) (圖 10)。

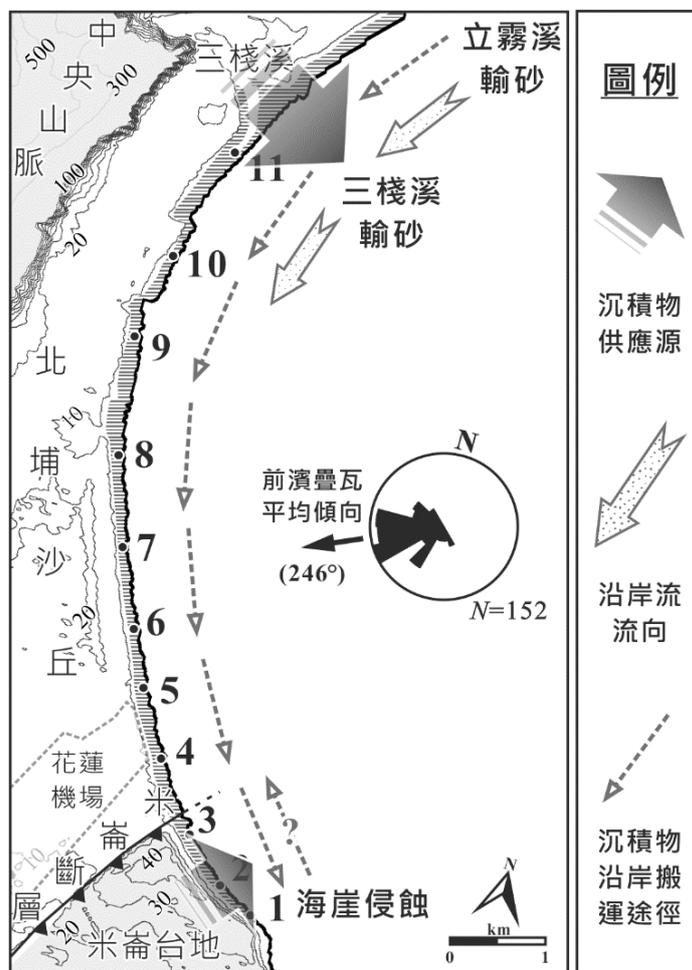


圖 10 七星潭礫灘成因

(地形圖圖例見圖 2，玫瑰圖圖例見圖 7)

(三) 暴風波浪作用

相對於前濱經時受一般波浪冲刷的灘礫特性，後濱具有不同的地形及沉積特徵。後濱地勢較高，正常天候下不易受到波浪作用，唯有暴風（如颱風時）來襲時，才會被波浪所影響。當暴風湧浪越過灘臺脊後，有機會將較粗沉積物推送至後濱（Orford, 1975; Hayes *et al.*, 2010），形成覆甲狀（*armoring*）的粗礫帶或極粗礫帶（圖 3C，圖 4）。此外，後濱灘礫的疊瓦倒向散亂（圖 7），反映暴風湧浪的海水因礫間孔隙多被細粒填充不易下滲，多沿灘面四散流動（Wilcock *et al.*, 2001; Kulkarni *et al.*, 2004; Ivamy and Kench, 2006）。至於後濱的碎物線及崖緣地形（圖 4），則可能指示了最近一次暴風波浪作用的上界（Kennedy and Woods, 2012）。

雖然暴風波浪能將部分礫石帶往內陸，但若風浪能量過大，反倒會將灘礫大規模向海外搬運（Orford *et al.*, 2002; Austin and Masselink, 2006），同時改變整個海灘形貌（Ruiz de Alegria-Arzaburu and Masselink, 2010）。本研究於杜鵑颱風侵襲（2015 年 09 月 27 至 29 日）前後觀察七星潭礫灘，即發現此次風暴事件侵蝕掉大部分的礫石，並使海灘寬度縮減，灘面坡度減緩，無灘臺脊遺留（圖 11）。吳柏霖、顏君毅（2012）另觀察到，七星潭海灘受暴風浪侵蝕後不久，礫石便逐漸被一般風浪運回灘上，此暴風後的礫灘回復現象在世界上並不鮮見（Bramato *et al.*, 2012）。此外，前濱灘礫疊瓦暗示正常天候時沉積物的沿岸輸送委靡（圖 7），代表暴風波浪可能主導了本區的礫石沿岸搬運，不過因每次風暴（颱風）事件的浪高與波浪入射角皆不同（許民陽，1998），導致各事件間沉積物的沿岸輸送方向與速率可能有顯著差異（Allan *et al.*, 2006; Ashton and Murray, 2006; Dickson *et al.*, 2011）。

本研究雖缺乏連續的海灘監測，無法完全釐清暴風波浪侵襲的過程，但從後濱的沉積特徵與暴風事件前後的海灘變化，仍可大致推測暴風時的沉積作用。

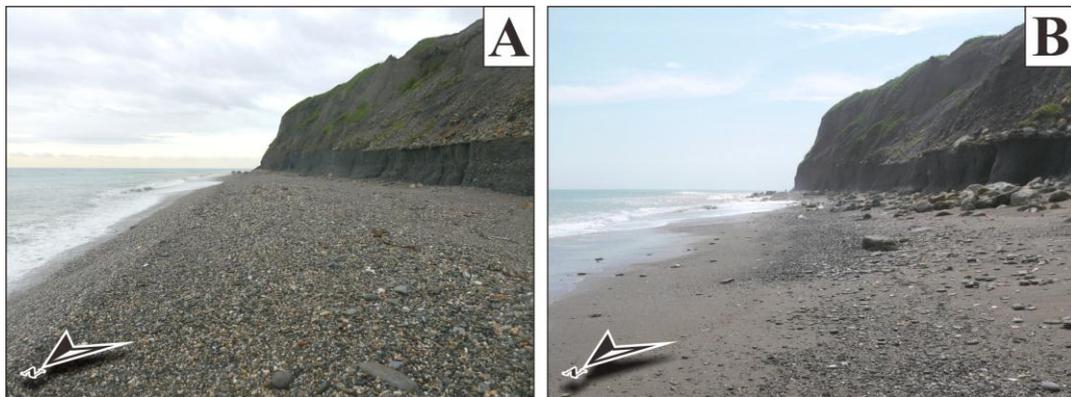


圖 11 暴風波浪的海灘侵蝕

（照片攝於剖面 2。A：2015 年 09 月 20 日拍攝，B：2015 年 09 月 30 日杜鵑颱風侵襲後拍攝。）

結 論

七星潭礫灘在地形和波浪作用影響下，寬度由北而南遞減，灘面沉積物平行海岸呈帶狀分布，並發育出一至三階的灘臺脊。前濱灘礫粒徑由海向陸漸粗，在灘臺脊淘選富集扁平狀礫石，並具

一致倒向西南西的疊瓦排列，反映一般天候時的波浪上沖方向。後濱處則是受暴風波浪影響，灘面沉積物淘選度低且組織散亂，留下排列方向不一的疊瓦狀構造。

從灘礫岩性組成及粒徑的研究成果可知，七星潭海灘沉積物多由海岸南北兩端供應，主要來自北方的三棧溪及立霧溪輸砂，部分來自南端米崙台地海崖的露頭侵蝕。這些礫質沉積物受波浪不斷的磨蝕與沿岸搬運，終向內陸堆積形成現今礫灘。

謝 辭

感謝鄭懷傑、羅立、莊智凱、黃致展與張頌平先生及蘇品如女士提供建議，協助本文的寫作；科技部提供經費支助研究，僅此衷心銘謝。

引用文獻

- 石再添 (1981) : 〈臺灣西岸的剖面地形與灘沙粒度〉, 《國立臺灣師範大學地理研究報告》, (7) : 1-36。
- 【Shih, T.T. (1981). The cross-sectional landforms and beach-sand grain size at the western coast of Taiwan. *Geographical Research*, (7):1-36.】
- 石再添、張瑞津、張政亮、連禎欽、林雪美 (1994) : 〈台灣南端與東部海岸沙丘之地形學研究〉, 《國立臺灣師範大學地理研究報告》, (21) : 1-42。
- 【Shih, T.T., Chang, J.C., Chang, C.L., Lien, C.C., and Lin, H.M. (1994). A geomorphological study of sand dunes in southern and eastern coast of Taiwan. *Geographical Research*, (21):1-42.】
- 石再添、張瑞津、林雪美、張政亮、劉明錡、陳政典 (1995) : 〈台灣東部河口地區之地形學研究〉, 《國立臺灣師範大學地理研究報告》, (24) : 1-38。
- 【Shih, T.T., Chang, J.C., Lin, H.M., Chang, C.L., Liu, M.C., and Chen, C.T. (1995). A geomorphological study on the estuaries in eastern Taiwan. *Geographical Research*, (24):1-38.】
- 何春蓀 (1986) : 《臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書》(增訂第二版)。新北市：經濟部中央地質調查所出版。
- 【Ho, C.S. (1986). *An introduction to the geology of Taiwan - explanatory text of the geologic map of Taiwan (second edition)*. New Taipei City: Central Geological Survey MOEA.】
- 吳柏霖、顏君毅 (2012) : 〈北埔海濱短時距地形變化及沉積物分布特性分析〉, 《社團法人中華民國地質學會與中華民國地球物理學會 101 年年會暨學術研討會論文集》: 460。
- 【Wu, B.L., and Yen, J.Y. (2012). Short-term morphological variation and characteristics of sediment distribution at Beipu shore in Hualien. *Poster abstract of 2012 Annual conference of Chinese Taipei Geophysical Society and Geological Society of Taiwan*, 2-2F-GM-47.】
- 沈淑敏 (2013) : 〈臺灣地區海岸地形的特徵與分類〉, 《地質》, 32 (4) : 14-19。
- 【Shen S.M. (2013). Characteristics and classification of coastal landform in Taiwan. *Ti-Chih*, 32(4):14-19.】

杜開正 (2008)：《海岸山脈泥岩區一萬三千年來的間歇性侵蝕事件—來自岩芯中移置超微化石的證據》，台北市：國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。

【Du K.Z. (2008). *Episodic erosion of the eastern Coastal Range since 13 ka: evidence from reworked nannofossils in the core sediments of the Hualien Plain*. Master Thesis, Department of Geosciences, National Taiwan University.】

林啟文、陳文山、劉彥球、陳柏村 (2009)：〈米崙斷層〉，《經濟部中央地質調查所特刊》，(23)：11-20。

【Lin, C.W., Chen, W.S., Liu, Y.C., and Chen, P.T. (2009). Milun Fault. *Special Publication of the Central Geological Survey*, (23):11-20.】

林雪美、張喬盛 (2001)：〈台灣東部河口地形的變動時距與循環〉，《國立臺灣師範大學地理研究報告》，(34)：145-179。

【Lin, H.M., and Chang, C.S. (2001). The time span and cycle of the change on the estuarine landforms of eastern coast Taiwan. *Geographical Research*, (34):145-179.】

洪佩鈺、沈淑敏、陳浦淮 (2006)：〈應用大比例尺正射影像地圖辨識沙礫質海灘的濱線—以臺東海岸為例〉，《地理研究》，(44)：89-105。

【Hung, P.Y, Shen, S.M., and Chen, P.H (2006). Interpreting shorelines on the large-scale orthogonals, a case study of the sand-gravel beaches, Taitung. *Journal of Geographical Research*, (44):89-105.】

徐鐵良 (1956)：〈台灣東部海岸山脈地質〉，《臺灣省地質調查所彙刊》，(8)：15-63。

【Hsu, T.L. (1956). Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. *Bulletin of the Geological Survey of Taiwan*, (8):15-63.】

徐鐵良 (1962)：〈台灣海岸地形之研究〉，《中國地質學會會刊》，(5)：29-45。

【Hsu, T.L. (1962). A study on the coastal geomorphology of Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, (5):29-45.】

許民陽、沈淑敏 (1995)：〈花東海岸海崖後退機制—成崖物質與風暴激浪特性的初步探討〉，《國立臺灣大學地理學系地理學報》，(19)：71-90。

【Hsu, M.Y., and Shen, S.M. (1995). Mechanism of the cliff retreat in Huatung coast, eastern Taiwan – preliminary discussions on cliff-forming materials and storm surges. *National Taiwan University Department of Geography Journal of Geographical Science*, 19:71-90.】

許民陽 (1998)：〈颱風對花東海岸地質環境的影響〉，《地質》，18 (1)：1-16。

【Hsu, M.Y. (1998). The impacts of typhoon on the geological environment of Huatung coast. *Ti-Chih*, 18(1):1-16.】

許民陽、高慶珍、高鵬飛、鄭紹龍 (1998)：〈花東海岸後退的研究—花蓮至長濱段〉，《中國地理學會會刊》，(26)：73-98。

【Hsu, M.Y., Kao, C.C., Kao, P.F., and Cheng, S.L. (1998). A study of coastal retreat along the Huatung coast, Changpin to Taitung section. *Bulletin of the Geographical Society of China*, (26):73-98.】

許民陽 (2005)：〈臺灣海岸侵蝕後退的現況—淡水河口、蘭陽平原、花東海岸篇〉，《地質》，24 (1)：64-75。

- 【Hsu, M.Y. (2005). The current situation of coast retreat in Taiwan – the Tamsui River mouth, the Langyang plain and the Huatung coast part. *Ti-Chih*, 24(1):64-75.】
- 塗明寬、張徽正 (2005) : 〈臺灣海岸地質環境—東部海岸篇〉, 《地質》, 24 (2) : 32-45。
- 【Tu, M.K., and Chang, H.C. (2005). The coast geological environment of Taiwan – the eastern coast part. *Ti-Chih*, 24(2):32-45.】
- 蔣正興、俞何興 (2002) : 〈台灣海岸帶類型、形貌特徵及其板塊構造之意義〉, 《台灣海洋學刊》, 40 (2) : 161-178。
- 【Chiang, C.S., and Yu, H.S. (2002). Types, geomorphic characteristics and tectonic significance of Taiwan coastal zone. *ACTA Oceanographica Taiwanica*, 40(2):161-178.】
- 謝孟龍、鄧屬予 (1994) : 〈米崙礫岩的岩相及沉積環境〉, 《地質》, 14 (1) : 201-217。
- 【Hsieh, M.L., and Teng, L.S. (1994). The facies and sedimentary environment of the Milun Conglomerate. *Ti-Chih*, 14(1):201-217.】
- Allan, J.C., Hart, R., and Tranquili, J.V. (2006). The use of Passive Integrated Transponder (PIT) tags to trace cobble transport in a mixed sand-and-gravel beach on the high-energy Oregon coast, USA. *Marine Geology*, 232(1-2):63-86.
- Anthony, E.J. (2008). Chapter six gravel beaches and barriers. *Developments in Marine Geology*, 4:289-324.
- Ashton, A.D., and Murray, A.B. (2006). High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F4):F04011. DOI: 10.1029/2005JF000422.
- Attal, M., and Lavé, J. (2009). Pebble abrasion during fluvial transport: experimental results and implications for the evolution of the sediment load along rivers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F4):F04023. DOI: 10.1029/2009JF001328.
- Austin, M.J., and Masselink, G. (2006). Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach. *Marine Geology*, 229(1-2):59-77.
- Austin, M.J., Masselink, G., Russell, P.E., Turner, I.L., and Blenkinsopp, C.E. (2011). Alongshore fluid motions in the swash zone of a sandy and gravel beach. *Coastal Engineering*, 58(8):690-705.
- Bird, E.C.F. (1996). Lateral grading of beach sediments: a commentary. *Journal of Coastal Research*, 12(3):774-785.
- Blott, S.J., and Pye, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55(1):31-63.
- Bluck, B.J. (1967). Sedimentation of beach gravels: examples from South Wales. *Journal of Sedimentary Research*, 37(1):128-156.
- Bluck, B.J. (1999). Clast assembling, bed-forms and structure in gravel beaches. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 89:291-323.
- Bluck, B.J. (2011). Structure of gravel beaches and their relationship to tidal range: *Sedimentology*, 58(4):994-1006.

- Bramato, S., Ortega-Sánchez, M., Mans, C., and Losada, M.A. (2012). Natural recovery of a mixed sand and gravel beach after a sequence of a short duration storm and moderate sea states. *Journal of Coastal Research*, 28(1):89-101.
- Buscombe, D., and Masselink G. (2006). Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2):33-52.
- Carr, A.P. (1969). Size grading along a pebble beach - Chesil Beach, England. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39(1):297-311.
- Carr, A.P. (1971). Experiments on longshore transport and sorting of pebbles: Chesil Beach, England. *Journal of Sedimentary Research*, 41(4):1084-1104.
- Carr, A.P., Gleason R., and King A. (1970). Significance of pebble size and shape in sorting by waves. *Sedimentary Geology*, 4(1-2):89-101.
- Dickson, M.E., Kench, P.S., and Kantor, M.S. (2011). Longshore transport of cobbles on a mixed sand and gravel beach, southern Hawke Bay, New Zealand. *Marine Geology*, 287(1-4):31-42.
- Dornbusch, U., Williams, R.B.G., Moses, C.A., and Robinson, D.A. (2002). Life expectancy of shingle beaches: measuring in situ abrasion. *Journal of Coastal Research*, SI36:249-255.
- Grogan, R.M. (1945). Shape variation of some Lake Superior [Minnesota] beach pebbles. *Journal of Sedimentary Research*, 15(1):3-10.
- Hayes, M.O., Michel, J., and Betenbaugh, D.V. (2010). The intermittently exposed, coarse-grained gravel beaches of Prince William Sound, Alaska: comparison with open-ocean gravel beaches. *Journal of Coastal Research*, 26(1):4-30.
- Horn, D.P., and Li, L. (2006). Measurement and modelling of gravel beach groundwater response to wave run-up: effects on beach profile changes. *Journal of Coastal Research*, 22(5):1241-1249.
- Howard, J.L. (1993). The statistics of counting clasts in rudites: a review, with examples from the upper Paleogene of Southern California, USA. *Sedimentology*, 40(2):157-174.
- Ichikawa, H., and Beardsley, R. (2002). The current system in the Yellow and East China Seas. *Journal of Oceanography*, 58(1):77-92.
- Ivamy, M.C., and Kench, P.S. (2006). Hydrodynamics and morphological adjustment of a mixed sand and gravel beach, Torere, Bay of Plenty, New Zealand. *Marine Geology*, 228(1-4):137-152.
- Jennings, R., and Shulmeister, J. (2002). A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186(3-4):211-228.
- Karunaratna, H., Horrillo-Caraballo, J.M., Ranasinghe, R., Short, A.D., and Reeve, D.E. (2012). An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach. *Marine Geology*, 299-302(0):33-42.
- Kennedy, D.M., and Woods, J.L.D. (2012). The influence of coarse woody debris on gravel beach geomorphology. *Geomorphology*, 159-160(0):106-115.
- Kulkarni, C.D., Levoy, F., Monfort, O., and Miles, J. (2004). Morphological variations of a mixed sediment beachface (Teignmouth, UK). *Continental Shelf Research*, 24(11):1203-1218.

- Masselink, G., and Li, L. (2001). The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Marine Geology*, 176(1-4):139-156.
- Orford, J.D. (1975). Discrimination of particle zonation on a pebble beach. *Sedimentology*, 22(3):441-463.
- Orford, J.D., Carter, R.W.G., and Jennings, S.C. (1996). Control domains and morphological phases in gravel-dominated coastal barriers of Nova Scotia. *Journal of Coastal Research*, 12(3):589-604.
- Orford, J.D., Forbes, D.L., and Jennings, S.C. (2002). Organisational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems. *Geomorphology*, 48(1-3):51-85.
- Osborne, P.D. (2005). Transport of gravel and cobble on a mixed-sediment inner bank shoreline of a large inlet, Grays Harbor, Washington. *Marine Geology*, 224(1-4):145-156.
- Pajak, M.J., and Leatherman, S. (2002). The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, 18(2):329-337.
- Quick, M.C. (1991). Onshore-offshore sediment transport on beaches. *Coastal Engineering*, 15(4):313-332.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., and Masselink, G. (2010). Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. *Marine Geology*, 278(1-4):77-99.
- Van Wellen, E., Chadwick, A.J., and Mason, T. (2000). A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering*, 40(3):243-275.
- Weir, F.M., Hughes, M.G., and Baldock, T.E. (2006). Beach face and berm morphodynamics fronting a coastal lagoon. *Geomorphology*, 82(3-4):331-346.
- Wilcock, P.R., Kenworthy, S.T., and Crowe, J.C. (2001). Experimental study of the transport of mixed sand and gravel. *Water Resources Research*, 37(12):3349-3358.
- Williams, A.T., and Caldwell N.E. (1988). Particle size and shape in pebble-beach sedimentation. *Marine Geology*, 82(3-4):199-215.
- Wu, B.L., and Yen, J.Y. (2013). Characteristics of sediment source and distribution at Beipu shore in Hualien. *Poster abstract of 2013 Taiwan Geosciences Assembly (TGA)*, U6-P-14.
- Yamaguchi, M., and Ota, Y. (2004). Tectonic interpretations of Holocene marine terraces, east coast of Coastal Range, Taiwan. *Quaternary International*, 115-116(0):71-81.
- Yang R., Wu Y., and Hwung, H. (2012). Beach erosion management with the application of soft countermeasure in Taiwan. In: Curkovic, S. (Ed.), *Sustainable Development - Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*, 349-370. Rijeka: InTech.

附錄：野外量測方法及數據

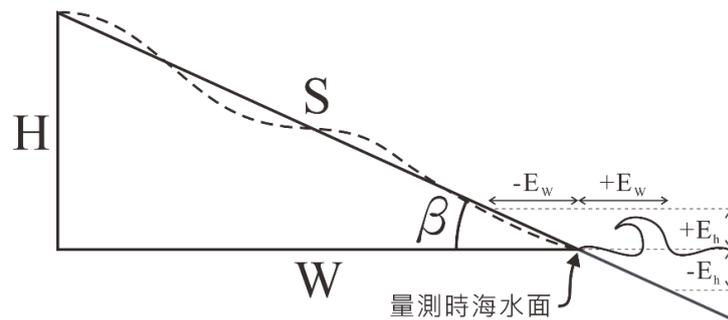
(一) 海灘地形測繪

本研究利用身高與水平儀，以視水平法 (eye level) 量測海灘高程 (H)，並以步測法 (步距約 0.75 m) 量測灘面距離 (S)，得以下列式-I 與式-II 計算海灘寬度 (W) 及平均灘面傾角 (β)，同理可計算前濱與後濱的灘面傾角 (β_f, β_b) 及寬度 (W_f, W_b) (附表 1)。由於前濱地形陡峭且起伏多變，本研究另利用傾斜儀量測灘面坡度的變化，並配合步測法描繪詳細的前濱灘面地形。量測剖面時並未考慮潮差的影響，不過根據石再添等 (1995) 統計，台灣東部沿岸全年平均潮差小於 1 公尺，因此相應的最大高程誤差 (E_h) 應為 1 公尺。至於潮差造成的最大寬度誤差 (E_w)，則可藉由下列式-III 計算得知 (附圖 1)。

$$\beta = \sin^{-1}(S/H) \quad (I)$$

$$W = S \times \cos \beta \quad (II)$$

$$E_w = E_h / \tan \beta_f \quad (III)$$

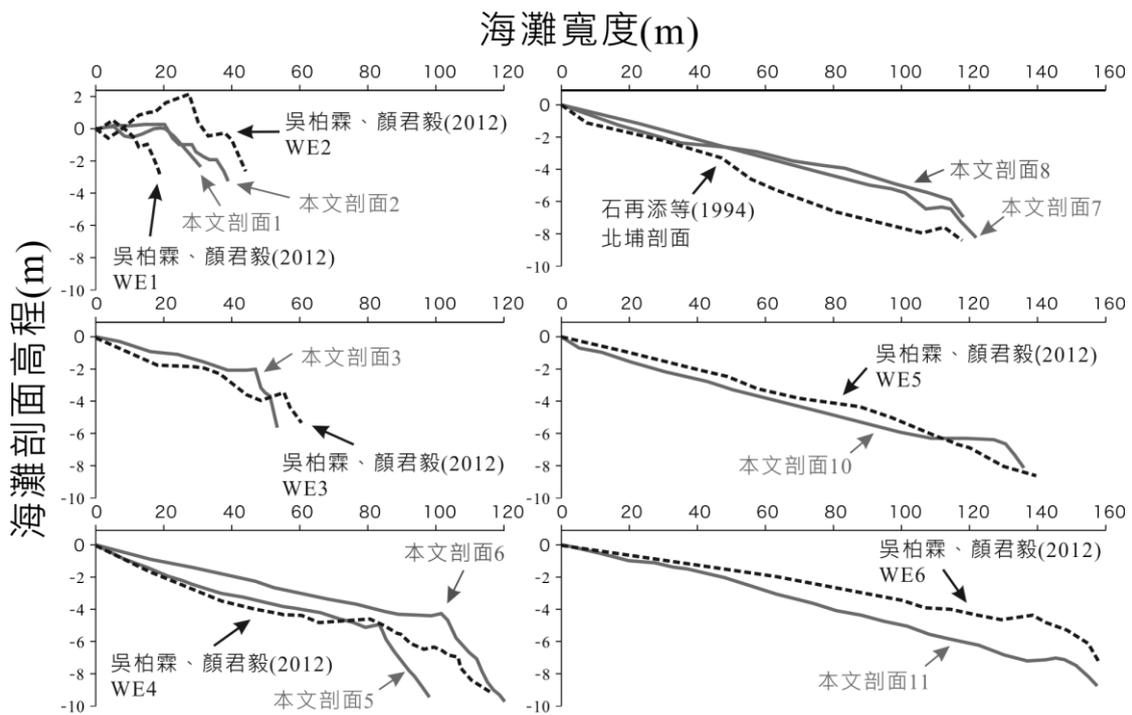


附圖 1 礫面地形測繪示意圖

附表 1 七星潭灘面地形數值 (剖面位置見圖 2)

剖面 編號	前濱		後濱		整體海灘			
	β_f	W_f	β_b	W_b	β	H	W	E_w
1	15.5°	22.4 m	1.0°	6.8 m	4.8°	2.5 m	29.2 m	±3.6 m
2	19.9°	18.4 m	1.2°	19.6 m	5.4°	3.6 m	38.0 m	±2.8 m
3	31.7°	8.0 m	2.1°	46.0 m	4.5°	4.2 m	54.0 m	±1.6 m
4	15.7°	12.3 m	0.9°	82.2 m	2.1°	3.4 m	94.5 m	±3.5 m
5	18.3°	16.7 m	2.8°	74.4 m	5.5°	8.7 m	91.1 m	±3.0 m
6	22.1°	20.5 m	1.9°	98.5 m	4.5°	9.3 m	119.0 m	±2.5 m
7	14.0°	22.3 m	4.3°	84.9 m	4.6°	8.7 m	107.2 m	±4.0 m
8	10.2°	15.8 m	2.1°	97.0 m	2.8°	5.6 m	112.8 m	±5.6 m
9	21.1°	7.8 m	2.2°	124.6 m	2.6°	6.0 m	132.4 m	±2.6 m
10	19.7°	9.3 m	2.7°	127.5 m	3.6°	8.5 m	136.8 m	±2.8 m
11	11.4°	10.8 m	3.1°	148.0 m	3.3°	9.1 m	158.8 m	±5.0 m

吳柏霖、顏君毅(2012)曾利用高精度 e-GPS 儀量測本區海灘地形，本研究挑出與他們量測位置相近的地形剖面進行比較(附圖 2)，發現兩者量測的地形起伏雷同，僅海灘前緣地形變化較大，係因為波浪作用最活躍的區域。石再添等(1994)亦曾發表一「北埔剖面」，該文中並未詳述量測位置及方法，不過其剖面寬高類似本研究的剖面 7 及剖面 8。



附圖 2 本研究與前人地形剖面比較

(剖面位置見圖 2)

(二) 灘礫粒徑三軸

本研究於剖面 1、3、6、8、10 的濱線及灘臺脊(位置見圖 4)，隨機取 10 個以上的灘礫，以測徑器量測粒徑的最長軸(L)、次長軸(I)、及最短軸(S)，單位為 mm(附表 2-1，附表 2-2)。所有數據皆為同一人完成量測，依照 Blott and Pye(2008)的研究，僅單人量測的誤差小於 2.8%，可忽略不計。

附表 2-1 濱線灘礫粒徑

剖面	L	I	S	剖面	L	I	S	剖面	L	I	S	剖面	L	I	S
1	39	30	13	3	10	5.5	3.5	6	17	9	5	8	15	10	5
1	40	27.1	18.1	3	12.5	8	6	6	12	11	6	8	11	7	2
1	48.5	35.1	16	3	22.5	19	7.5	6	15	12	6	8	11	7	6
1	34	22	20.1	3	14	7	5	6	11	10	8	8	12	10	7
1	23.5	22	12.5	3	12	9	4	6	11	10	6	8	10	7	5
1	44.5	36	13	3	6	4	4	6	15	10	7	8	20	10	6
1	36.5	32.5	15.5	3	10	4	3	6	13	11	5	8	11	7	5
1	31	22	8.5	3	8.5	6.5	3	6	15	10	6	8	13	10	3
1	23	22	11.5	3	19	13	8.5	6	10	7	5	8	13	10	5
1	32.5	30.5	11	3	8	6	3	6	10	8	4	8	14	9	6
1	27.5	14	12.5	3	13	10	4	6	10	8	5	10	20	10	6
1	36	24	11.5	3	10	7	5	6	11	8	4	10	24	20	10
1	26	19.5	10.5	3	15	8	4	6	13	8	6	10	17	8	7
1	19	16.5	12	3	16	10	5	6	9	6	5	10	15	11	6
1	25	19	11	3	9	5	4	6	10	7	3	10	17	11	7
1	35.5	26.5	14	3	17	13	6	6	10	8	7	10	18	10	7
1	32.5	25	12.5	3	6	5	4	6	10	8	4	10	17	10	6
1	36	32.5	19	3	10	7	6	6	9	7	5	10	18	9	4
1	23	22	12	3	10	7	3	6	10	9	4	10	20	13	8
1	22.5	18	13	3	9	6	4	6	9	7	3	10	11	10	4

附表 2-2 灘臺脊灘礫粒徑

剖面	L	I	S	剖面	L	I	S	剖面	L	I	S	剖面	L	I	S
1	170	132	47.9	3	108	95	37.5	6	37	28	19	8	109	98	38
1	160	119	42	3	56.4	43	19.5	6	68	51	29.5	8	76	62	26.5
1	78	70	16.3	3	53.5	49.5	20.5	6	76	67	29.5	8	76	66	32
1	90.8	71.6	27	3	83	48	25	6	74	65.5	30.5	8	143	118	36
1	73.5	43	25.2	3	78.9	54	28.9	6	95	93	40	8	127	118	50
1	67.2	47	17.7	3	115	108	44.5	6	30	24	8.5	8	47	43	14
1	154	101	37.2	3	116	99	39.5	6	37	31	18	8	156	84	27
1	170	145	47	3	177	86.2	44.5	6	85.5	74	27	8	156	84	27
1	42	30	20.5	3	111	72	37	6	95	70	33.5	8	88	66	37
1	79	27.1	25	3	79	55	30	6	98	52	23.5	8	86	82	32
1	74	28.1	19.5	3	141	102	37	6	91	78	24	8	160	117	51
1	49.5	40.5	16	3	93	56	32	6	98	77	29	8	44	40	22
1	57	40	26.2	3	101	90	32.5	6	56	55	20.5	8	146	89	39
1	160	131	49	3	146	127	50.5	6	65	54	29	10	122	100	46
1	102	72	31	3	45.5	32	17.5	6	104	99	25.5	10	97	84	30
1	141	108	35.5	3	65	58.5	32.5	6	22	21	14	10	82	70	23
1	121	75.5	20.5	3	27.5	19.5	15.5	8	79	64	27	10	84	63	24
1	36	30	13.5	3	26	23.5	13.5	8	134	108	46	10	155	140	50
1	73.6	26.5	9	3	30	27	11.5	8	130	89	40	10	92	81	30
1	56.8	48	24	6	113	86	28.5	8	190	90	45	10	70	54	30
3	230	144	52	6	92.5	79	31	8	100	76	31	10	75	64	16
3	155	112	79	6	75.5	58	22	8	108	69	38	10	154	94	35
3	111	79	43	6	61.5	49	21	8	102	82.5	33	10	101	76	30

(三) 疊瓦組構傾向

本研究於各剖面前濱 (X 點) 及後濱 (Y 點) (位置見圖 4), 記錄扁平狀礫石最長軸 (L) 及次長軸 (I) 所共構的切面走向與傾角, 量測 10 組以上資料, 並轉換成水流流向。各點量測資料皆以右手規則制 (RHR) 表示, 單位皆為度 (附表 3-1, 附表 3-2)。

附表 3-1 前濱 (X 點) 灘礫疊瓦位態與古水流方向

剖面	走向	傾角	流向												
1	300	30	210	6	325	50	235	8	20	50	290	10	320	20	230
1	290	40	200	6	0	50	270	8	40	45	310	10	320	20	230
1	310	30	220	6	0	55	270	8	20	20	290	10	340	30	250
1	300	25	210	6	330	45	240	8	40	30	310	10	340	30	250
1	290	30	200	6	10	40	280	8	40	38	310	10	320	30	230
1	310	28	220	6	0	20	270	8	20	30	290	10	325	50	235
1	290	35	200	6	10	50	280	8	320	45	230	10	320	30	230
1	310	26	220	6	20	40	290	8	330	40	240	10	320	20	230
1	300	25	210	6	0	42	270	8	350	45	260	10	320	20	230
1	290	32	200	6	350	15	260	8	320	40	230	10	20	50	290
1	280	30	190	6	10	40	280	8	340	40	250	10	340	40	250
1	290	50	200	6	20	58	290	8	340	20	250	10	340	50	250
1	240	45	150	6	0	30	270	8	320	45	230	10	10	40	280
1	280	28	190	6	350	40	260	8	320	55	230	10	0	40	270
1	250	20	160	6	350	40	260	8	350	50	260	10	20	32	290
1	230	40	140	6	0	40	270	8	340	50	250	10	330	35	240
1	290	30	200	6	0	40	270	8	20	30	290	10	10	40	280
1	295	20	205	6	0	35	270	8	0	50	270	10	0	40	270
1	240	25	150	6	350	40	260	8	340	50	250	10	340	40	250
1	300	45	210	6	340	60	250	8	345	25	255	11	340	40	250
1	270	40	180	6	10	30	280	9	330	35	240	11	340	38	250
1	260	48	170	7	320	45	230	9	325	35	235	11	330	25	240
1	300	40	210	7	320	40	230	9	350	30	260	11	350	55	260
1	300	40	210	7	330	30	240	9	340	30	250	11	340	50	250
1	300	38	210	7	340	25	250	9	0	20	270	11	340	60	250
3	330	50	240	7	315	35	225	9	330	30	240	11	330	20	240
3	340	50	250	7	330	20	240	9	330	20	240	11	350	25	260
3	340	30	250	7	0	40	270	9	345	20	255	11	340	32	250
3	340	55	250	7	320	40	230	9	330	30	240	11	340	30	250
3	340	40	250	7	290	50	200	9	350	25	260	11	0	30	270
3	340	40	250	7	300	50	210	9	320	40	230	11	0	20	270
3	330	50	240	7	350	30	260	9	20	40	290	11	350	30	260
3	340	35	250	7	320	40	230	9	0	30	270	11	10	30	280
3	330	50	240	7	330	30	240	9	330	40	240	11	0	30	270
3	340	45	250	7	350	60	260	9	335	30	245	11	0	35	270
6	0	50	270	7	0	50	270	9	340	35	250	11	350	55	260
6	350	30	260	7	0	30	270	9	15	40	285	11	10	40	280
6	0	30	270	7	340	40	250	9	5	30	275	11	0	20	270
6	0	40	270	7	330	40	240	9	330	40	240	11	10	25	280
6	330	50	240	7	345	55	255	9	330	40	240				
6	340	40	250	7	355	45	265	10	325	50	235				

附表 3-2 後濱 (Y 點) 灘礫疊瓦位態與古水流方向

剖面	走向	傾角	流向												
1	70	40	340	7	250	50	160	8	240	30	150	9	355	40	265
1	10	40	280	7	250	30	160	8	90	60	0	10	300	40	210
1	60	40	330	7	200	22	110	8	200	30	110	10	270	40	180
1	60	40	330	7	260	30	170	8	10	50	280	10	270	40	180
1	70	40	340	7	250	50	160	8	20	35	290	10	220	40	130
1	40	35	310	7	210	40	120	8	20	40	290	10	240	40	150
1	320	38	230	7	290	30	200	8	0	40	270	10	220	20	130
1	330	30	240	7	170	40	80	8	20	30	290	10	240	25	150
1	330	40	240	7	200	42	110	8	0	40	270	10	200	45	110
1	340	10	250	7	180	50	90	8	90	20	0	10	300	40	210
7	270	56	180	8	200	50	110	9	50	20	320	10	320	50	230
7	280	60	190	8	20	40	290	9	320	30	230	10	330	45	240
7	300	40	210	8	240	45	150	9	45	10	315	10	300	40	210
7	230	30	140	8	180	25	90	9	330	20	240	10	320	20	230
7	155	35	65	8	250	25	160	9	335	20	245	10	300	30	210
7	250	30	160	8	230	40	140	9	350	25	260	10	320	30	230
7	210	40	120	8	270	50	180	9	40	55	310	10	330	20	240
7	200	40	110	8	260	35	170	9	0	24	270	10	320	30	230
7	260	35	170	8	225	30	135	9	340	50	250				

(四) 灘礫岩性

本研究於各剖面灘臺脊附近、三棧溪河床與米崙台地海崖露頭(海階堆積物及米崙鼻礫岩)，量測礫石岩性組成。量測時皆於面積 1 x 1 公尺的範圍內，取約 300 顆粒徑 2 公分以上 (< - 4.3 φ) 的灘礫辨認岩性，以避免因粒徑過小造成岩性誤認 (Howard, 1993)。量測結果如附表 4-1，數值單位皆為個，N 為量測總數，岩性代號見表 1。

附表 4-1 礫石岩性計數資料表

位置 \ 岩性	Ss	Cgl	Qtz	Cht	Slt	Bsc	Gsc	Mar	Bas	Gn	N
海階堆積物	124	4	30	48	9	6	5	28	71	0	325
米崙鼻礫岩①	113	4	94	69	19	3	4	43	12	0	361
米崙鼻礫岩②	146	5	111	23	12	7	21	44	27	0	396
三棧溪河床①	12	2	34	54	1	38	50	106	5	1	303
三棧溪河床②	18	2	20	21	0	50	51	119	21	3	305
立霧溪河床	89	2	48	21	11	42	68	108	25	8	422
剖面 1	151	2	92	65	0	0	8	40	17	0	375
剖面 3	142	1	42	54	0	0	3	52	45	0	339
剖面 6	125	5	64	52	0	2	7	55	19	1	330
剖面 8	56	9	23	49	1	13	38	83	23	4	299
剖面 10	96	4	27	41	2	28	36	72	17	5	328
剖面 11	116	3	38	52	0	13	22	76	13	1	334

本文另將岩性依物理特性分類（見表 1）後，重新計算其含量與誤差呈現於附表 4-2。表中 X 為各岩性含量百分比，CE 為計數誤差（counting error），其圓餅圖見圖 8。計數誤差依下列 Howard（1993）所提出的式-IV 計算，其中 t 則是在自由度為 N-1 且取 95% 信賴區間（即 $\alpha = 0.05$ ）時，學生 t-分布（Student's t-distribution）的 t 表格值（tabulated value）。本文假設岩性辨認皆無誤、各取樣點岩性皆隨機分佈、且取樣點位置不會造成誤差，以計數誤差來近似全部誤差（total probable error）。

$$CE(\%) = \pm t \sqrt{X(1-X)/N} \quad (IV)$$

附表 4-2 礫石岩性分類合算表

位置 \ 岩性	變質石英岩		變質泥質岩		大理岩		變質火成岩	
	X	CE	X	CE	X	CE	X	CE
海階堆積物	63.4%	±5.3%	6.2%	±2.6%	8.6%	±3.1%	21.8%	±4.5%
米崙鼻礫岩①	77.6%	±4.3%	7.2%	±2.7%	11.9%	±3.4%	3.3%	±1.9%
米崙鼻礫岩②	72.0%	±4.4%	10.1%	±3.0%	11.1%	±3.1%	6.8%	±2.5%
三棧溪河床①	33.7%	±5.3%	29.4%	±5.1%	35.0%	±5.4%	2.0%	±1.6%
三棧溪河床②	20.0%	±4.5%	33.1%	±5.3%	39.0%	±5.5%	7.9%	±3.0%
立霧溪河床	37.9%	±4.6%	28.7%	±4.3%	25.6%	±4.2%	7.8%	±2.6%
剖面 1	82.7%	±3.8%	2.1%	±1.5%	10.7%	±3.1%	4.5%	±2.1%
剖面 3	70.5%	±4.9%	0.9%	±1.0%	15.3%	±3.8%	13.3%	±3.6%
剖面 6	74.5%	±4.7%	2.7%	±1.8%	16.7%	±4.0%	6.1%	±2.6%
剖面 8	45.8%	±5.7%	17.4%	±4.3%	27.8%	±5.1%	9.0%	±3.3%
剖面 10	51.2%	±5.4%	20.1%	±4.4%	22.0%	±4.5%	6.7%	±2.7%
剖面 11	62.6%	±5.2%	10.5%	±3.3%	22.8%	±4.5%	4.2%	±2.2%

投稿日期：104 年 10 月 21 日

修正日期：104 年 12 月 09 日

接受日期：104 年 12 月 16 日