

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：地球科學

作品名稱：東沙島海灘的變遷與復育：由龍擺尾停擺說起

得獎獎項：第一名

香港正選代表：香港第 41 屆連校科學展覽會

學校 / 作者：國立高雄師範大學附屬高級中學 蔣孟庭

作者簡介



我是土生土長的高雄人，對於海洋的熱愛，或許就是源自於港都的教化。從小，我就視科學展覽為邁向科學研究之路的第一步。能夠靠自己的力量創造知識，我覺得自己有一種使命感。製作科展，是本著對科學研究的熱愛。

至於個人特質，我自認是較理性的一方，對於科學充滿興趣，特別是針對生物及地科情有獨鍾，並且希望未來能夠繼續朝研究方面發展。

目 錄

壹、	研究動機	2
貳、	研究目的	2
參、	研究設備與器材	4
肆、	研究過程與結果討論	5
一、	瞭解東沙環礁的形成機制	5
二、	探討環境因素對東沙島海灘及龍擺尾的演化	7
三、	以模型實驗驗證東沙島龍擺尾的現況	15
四、	研擬東沙島海灘復育方案讓龍擺尾復活	26
五、	由東沙海灘看世界海岸復育的可行性	29
伍、	結論	30
陸、	未來展望與研究課題	31
柒、	參考資料	32

表 次

表 1 手起波與蛋殼淤積實驗圖形·····	13
表 2 單突堤四周淤沙的分佈情形·····	16
表 3 實驗 3-3 所得光束數據表·····	23

圖 次

圖 1 東沙島及其「龍擺尾」位置圖 (b 取自國家太空中心; c、d 取自 Google Earth)	2
圖 2 (a) 早期東沙島東南端的龍擺尾 (取自海巡屬)	3
圖 2 (b) 龜山島的龜擺尾 (取自 UrMap)	3
圖 3 研鉢周圍碎蛋殼之侵蝕與堆積分佈	5
圖 4 研鉢周圍碎蛋殼海灘之侵蝕與堆積	6
圖 5 東沙島古地圖 (修改自新活水月刊影像)	6
圖 6 1858 年的東沙環礁水深圖 (取自科博館電子報)	6
圖 7 東沙環礁現狀 (取自 Google Earth)	6
圖 8 夏季南海海流方向的分佈 (修改自東沙環礁國將公園管理處影像) ..	8
圖 9 不同斜度的油黏土小圓丘	8
圖 10: 自循環水流裝置	9
圖 11: 三層式虹吸水流裝置	9
圖 12 自循環斜坡水流裝置	10
圖 13 電動造波器	10
圖 14 不同風速與蛋殼淤積實驗裝置	11
圖 15 不同角度油黏土小圓丘背後之無波紋區	12
圖 16 平面水池內的流速及流向分佈 (上方正視圖)	12
圖 17 當波遇障礙物時背後波浪的繞射與交會 (a 修改自 Google Earth 影像; b 取自 UrMap)	14
圖 18 東沙島沿岸波浪波峰線的分佈 (修改自 Google Earth 影像)	15
圖 19 因人工構造物攔截而不再擺動的「龍擺尾」(取自 Google Earth)	15
圖 20 兩突堤間海岸線的模擬	17
圖 21 實驗 3-3 之實驗設備佈置示意圖	17
圖 22 東沙島波浪和突堤間之角度及堤長 (修改自 Google Earth 影	

像).....	18
圖 23 實驗 3-4 之實驗設備佈置示意圖.....	18
圖 24 兩突堤間的入射波和反射波.....	20
圖 25 沙源分析.....	20
圖 26 兩突堤之間凹凸的海岸線 (修改自 Google Earth 影像)	21
圖 27 澎湖隘門沙灘之突堤效應 (修改自 Google Earth 影像)	21
圖 28 東沙島上突堤對積沙的影響 (修改自 Google Earth 影像)	21
圖 29 碎蛋殼的直立與平躺.....	22
圖 30 兩突堤間各點波浪作用與波浪能量的分佈 (修改自 Google Earth 影 像).....	24
圖 31 模擬龍擺尾之擺動條件及圖形.....	25
圖 32 英國 Jaywick 地區的複合型海岸防護設施 (取自 Google Earth)	27
圖 33 低水位時的化仁海岸離岸潛堤.....	28
圖 34 珊瑚附著於化仁離岸潛堤.....	28
圖 35 日本海岸保護由「線的保護」轉型為「面的保護」.....	30

東沙島海灘的變遷與復育：由龍擺尾停擺說起

Beach Evolution and Restoration for Dongsha Island

摘要

政府最近公佈在東沙群島設立第一個國家海洋公園，顯示國人重視海洋資源的保育與復育；但是東沙島特殊的自然景觀「會擺動的沙嘴」—龍擺尾，卻因興建八座消波塊構築的突堤而消散停擺。本研究以一個高中生的觀點，設計及進行一系列的模型實驗，探討東沙島的形成機制、各種環境因素對海灘及龍擺尾的演化、驗證龍擺尾的現況及如何讓龍擺尾復活，再由東沙島海灘復育看世界的海岸問題。雖然設備很克難，但都能完成預定的目標，證實東沙島的海灘演化。希望此次對東沙島海灘的研究成果與初步探討，能應用於世界上遭受侵蝕而需復育的海岸。

ABSTRACT

In 2007, our government proclaimed Dongsha archipelago as the first national marine park, signifying her emphasis on the conservation and restoration of marine resources. However, the sand spit on Dongsha island, a unique natural wonder commonly referred to as the “swaying dragon tail”, has become motionless since the construction of a total of eight groins along its SE and NE coast during the period between 1993 and 1996. This study has conducted a series of model experiments to verify several fundamental issues, ranging from the formation and the factors affecting the stability and the status quo of Dongsha island and its spit. The experimental results find several favorably outcomes, giving the coast evolving evidences of Dongsha island. Furthermore, strategy to stabilize the coast and revitalize the spit are then considered, which could hopefully benefit the coast suffering erosion on the world’s coastline.

壹、研究動機

民國 96 年初內政部正式公告，政府決定在東沙群島設立第一個國家海洋公園—「東沙環礁國家公園」。同年 10 月，管理處在高雄市揭牌運作；這是一項振奮人心的消息，顯示政府重視海洋資源的保育與復育。但是在民國 82~85 年（西元 1993~1996）間，當時駐防在東沙島的軍事單位以防止海岸侵蝕為由，在島的東北及東南兩側，先後以混凝土消波塊構築八座突堤，導致島上特殊的自然景觀「會擺動的沙嘴」—龍擺尾—於五年內消散停擺（如圖 1）。

這種因不當的人為措施所造成的海岸侵蝕，不只是東沙島的問題，更是世界上 70% 的海岸共同面對的問題。若要使自然海岸受到保護、復育而免於被侵蝕的第一步，需要先瞭解海岸變遷的機制。成長於有「海洋之都」之稱的高雄市的我，在強烈的好奇心及求知慾的驅使下，便展開了對東沙島海岸侵蝕的探討。



圖 1 東沙島及其「龍擺尾」位置圖（b 取自國家太空中心；c、d 取自 Google Earth）

貳、研究目的

一、背景說明

東沙群島位於中國南海的北端，由北衛灘環礁、南衛灘環礁（皆為潛礁）及東沙環礁組成；其中東沙環礁之外圍直徑約 30 km，涵蓋海域面積達 300 km²，為世界上最圓的環礁之一。東沙群島的最西側有一島嶼——東沙島 (Dongshaa Island)，英文稱 Pratas Island，(中心位置約在 116°43' 20" E，20°42' 13" N)，古稱「月牙島」，是群島中唯一突出海面的島嶼；在平均海水位時之陸地面積約 1.74 km²。

東沙島位處國際航海重要的交通樞紐，目前隸屬於中華民國(台灣)高雄市旗津區。該島距高雄市西南 240 哩 (約 420 km)，島上有我國駐軍防守。東沙島地勢低平，最高點不超過海拔 6m，四周海域的波浪在 10 月～隔年 3 月受冬季東北季風影響遠大於夏季的季節風浪；每年 6～9 月為颱風季節。

東沙島的東南側原有一沙嘴 (spit)，俗稱「龍尾」或「龍擺尾」(如圖 2a)，是島上極為珍貴特殊的自然景觀。沙嘴是一種沙洲，由沿岸流及波浪搬運沿岸泥沙，在海岬尖端或海岸轉折處沉積，沙嘴一端與陸地相連，另一端伸向海中。在 150 年前東沙島就有沙嘴存在的紀錄。東沙島「龍擺尾」現象是未興建八座突堤群之前，受東北及西南季風影響，於冬季時期受波浪與海流影響而由北側逐漸漂移至南側；夏季時則相反，即沙嘴由南向北輕微的移動，這是東沙島特殊地形景觀，與宜蘭縣頭城外海龜山島的「龜擺尾」有相似之處(如圖 2b)；相較之下，澎湖縣吉貝島的沙嘴，擺動幅度不大。但是在民國 82～85 年間，我國海軍工程處以防止海岸侵蝕為由，在島上東北及東南兩側分築突堤群，及南岸之東側興建簡易碼頭工程而遭挖除破壞。

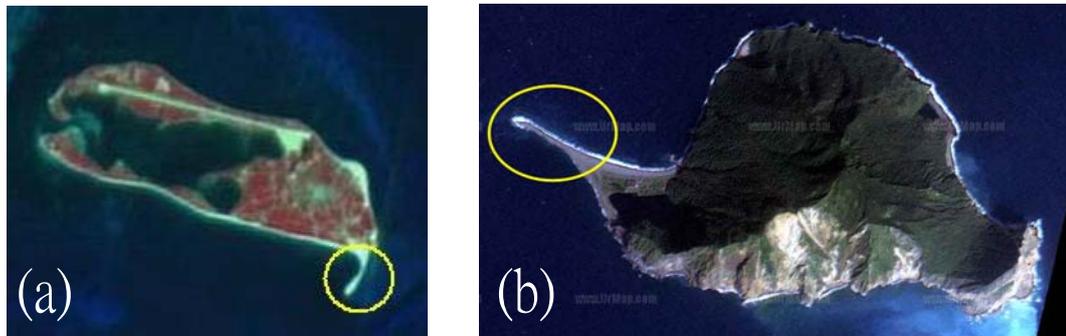


圖 2 (a) 早期東沙島東南端的龍擺尾 (取自海巡屬)

(b) 龜山島的龜擺尾 (取自 UrMap)

近年來政府非常重視海岸的永續發展，以自然海岸線的零損失為短期目標；海岸復育為長期目標。由於東沙島龍擺尾近年來受到島上的海岸人工構造物所產生的負面影響，造成海灘侵蝕、景觀被破壞，甚至是龍擺尾消散停擺，因此有必要考慮推動海岸復育規劃，以保育大自然的瑰寶。

二、研究目的

東沙環礁為我國海域唯一完整的珊瑚環礁，海洋生態環境獨特，生物多樣性很高，海洋資源與自然景觀——尤其是珍貴的貝殼海灘——的保育及復育極為重要。本研究擬由下列五大項目探討東沙島海灘變遷與復育的相關課題：

- (一) 瞭解東沙環礁的形成機制
- (二) 探討環境因素對東沙島海灘及龍擺尾的演化
- (三) 以模型實驗驗證東沙島龍擺尾的現況
- (四) 研擬東沙島海灘復育方案讓龍擺尾復活
- (五) 由東沙島海灘復育看世界的海灘

參、研究設備與器材

- 一、造波設備：平面水池（55×55×4.5 cm）一座、長型水槽（130×20×25 cm）一座、瓦楞紙板水槽（100×30×10 cm）一個、長方形塑膠水盆（45×35×12 cm）一個、直流電源裝置一台、直尺一枝及造波器一個
- 二、輸水設備：抽水馬達（RIO-600 沈水馬達）一部、水管一條及橡皮管數條
- 三、造風設備：National 家用電風扇（直立式）一台、吸管數十支、吹風機一台、吹風機扁平出風口一個
- 四、島礁試體：研鉢（四號：外口徑 12 cm；三號：外口徑 8 cm）、碗（外口徑 9.3 cm）及油黏土
- 五、模型沙：碎蛋殼數十個及手工串珠（日本珠；外徑 2 mm）適量
- 六、錄影設備：數位相機（Sony Cyber-shot DSC-T50）一台、數位相機（Sony Cyber-shot DSC-T100）一台、數位攝影機（Sony DCR-PC350）一台
- 七、隔離板：隔板（19×20 cm、19×19 cm、19×14 cm、19×5 cm）、瓦楞紙板（100×60 cm）及抽屜用塑膠間隔板
- 八、其他：海綿條（4×4×50 cm）、滴管、線鋸、砂紙、量杯（100c.c.）

及熱熔膠

肆、研究過程與結果討論

一、瞭解東沙環礁的形成機制：

(一) 研究過程：

- 1、從衛星影像圖及空照圖觀察並分析東沙島的地貌。
- 2、以平面水池、研鉢、碎蛋殼等模擬東沙島的形成。

(二) 實驗設計：

- 1、觀察：東沙島在東沙環礁西側，呈西北西~東南東走向，島形如鉗子，有一開口向西的潟湖。陸地分佈不均，聚集東南。東沙島底層為珊瑚礁石，表層覆蓋貝殼及珊瑚風化的白沙，沙灘地形發達，尤其是島的東北及東南側。
- 2、實驗設計

實驗 1-1：海底沙土之侵蝕與堆積

將一個研鉢倒蓋於平面水池中央，以模擬波浪在海中障礙物（東沙島）周圍的傳播；同時以大量碎蛋殼為海底沙土，均勻填滿平面水池。再以一枝 40 cm 直尺自平面水池之邊框規律且穩定地向中央（由圖 3 之下方往上）推動約 15 cm，在水池中造波而帶動碎蛋殼；持續造波直至碎蛋殼堆積且不再有明顯改變為止；約 5~10 分鐘。實驗結果如圖 3。

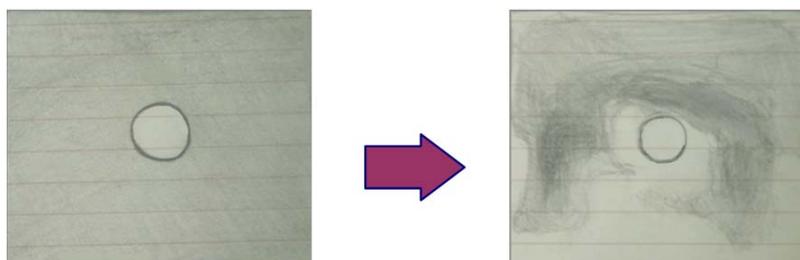


圖 3 研鉢周圍碎蛋殼之侵蝕與堆積分佈

實驗 1-2：海灘之侵蝕與堆積

同實驗 1-1 之步驟，布置碎蛋殼均勻環繞在研鉢四周，設為沙灘。重複實驗 1-1 步驟。實驗結果如圖 4。

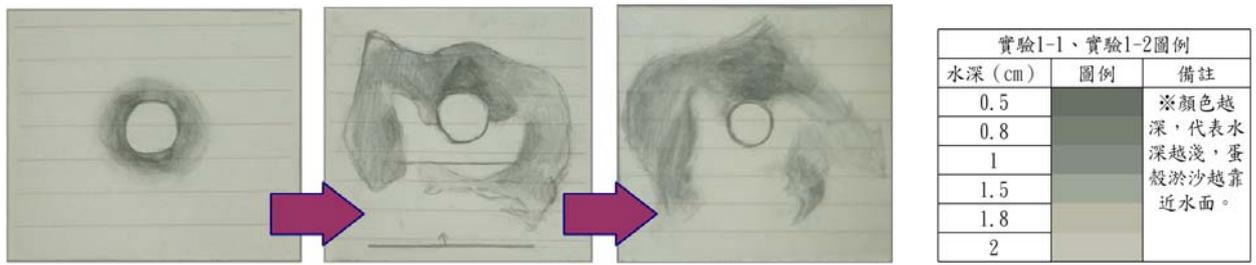


圖 4 研鉢周圍碎蛋殼海灘之侵蝕與堆積

(三) 實驗結果與分析：

東沙環礁為環狀珊瑚礁。由古地圖可知，東沙島早先為一突出水面的馬蹄形裸露珊瑚礁岩，無東南方的陸地，即現今潟湖的藍本(圖 5)。後因東沙環礁持續下沉，東南方的陸地也逐漸淤積形成(圖 6)；最後除東沙島外，東沙群島與部分環礁沒入海中，演變成現在的形狀(圖 7)。

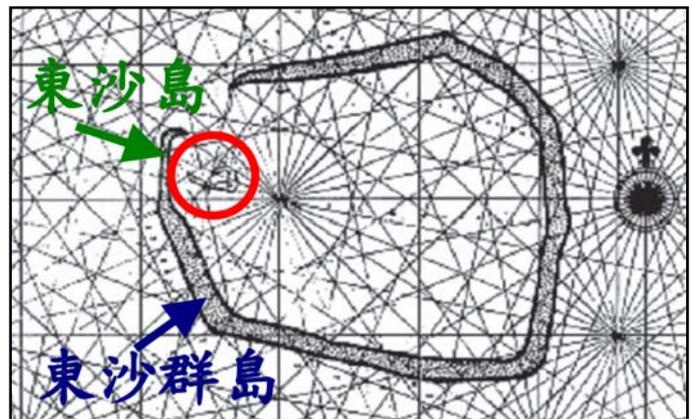


圖 5 東沙島古地圖
(修改自新活水月刊影像)

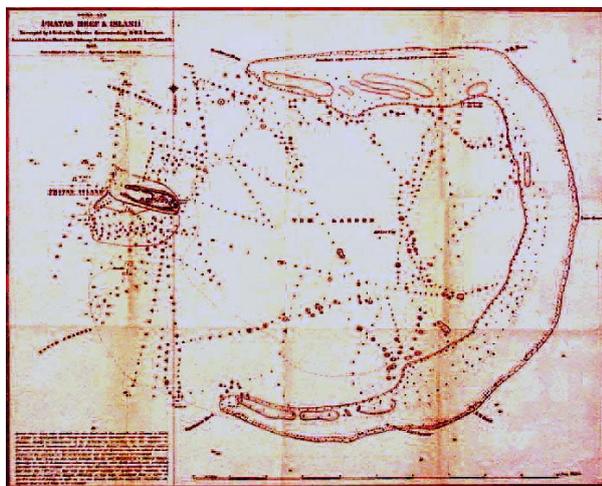


圖 6 1858 年的東沙環礁水深圖(取自科博館電子報) 圖 7 東沙環礁現狀(取自 Google Earth)

推論：東沙島東南陸地為淤積地形。由實驗 1-1 後半部淤沙無明顯改變，判斷東沙島並非擁有大量海底淤沙。所以東南方陸地，為珊瑚礁逐漸風化形成沙灘，再經波浪堆積形成。

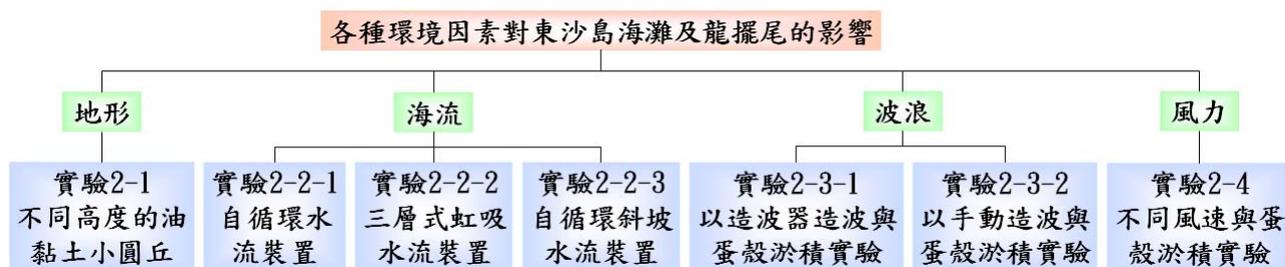
由實驗中發現，波浪破碎後的沿岸流首先侵蝕障礙物（研鉢）兩側，再逐漸淘空障礙物前半緣之淤沙並在障礙物後方淤積。淤積到水面以下 0.5 cm 停止，多次實驗情況皆同，且皆無淤沙高出水面，但皆形成類似經歷扁變形後的東沙島。由實驗結果發現，自平面水池邊框連續向前推 15 cm 所形成的波浪，造成的淤沙模擬，效果最佳。

二、探討環境因素對東沙島海灘及龍擺尾的演化

（一）研究過程：

- 1、辨別環境影響因素（變因）：針對地形、海流、波浪及風力等四大主要的環境影響因素，個別規劃多項實驗，以探討到底是何種變因造成東沙島奇特的地形。
- 2、利用文獻、衛星影像圖及空照圖等資料，協助分析在實驗過程中所觀察到的現象及對最後結果的討論。

（二）實驗流程：



（三）實驗設計：

- 1、觀察：東沙群島夏季有由西南向東北的南海海流及黑潮支流流經；冬季則有由東南向西北的黑潮支流（如圖 8）。自民國 85 年後，龍擺尾的根部已被一座 198 m 長、由消波塊堆置而成的突堤所攔截。

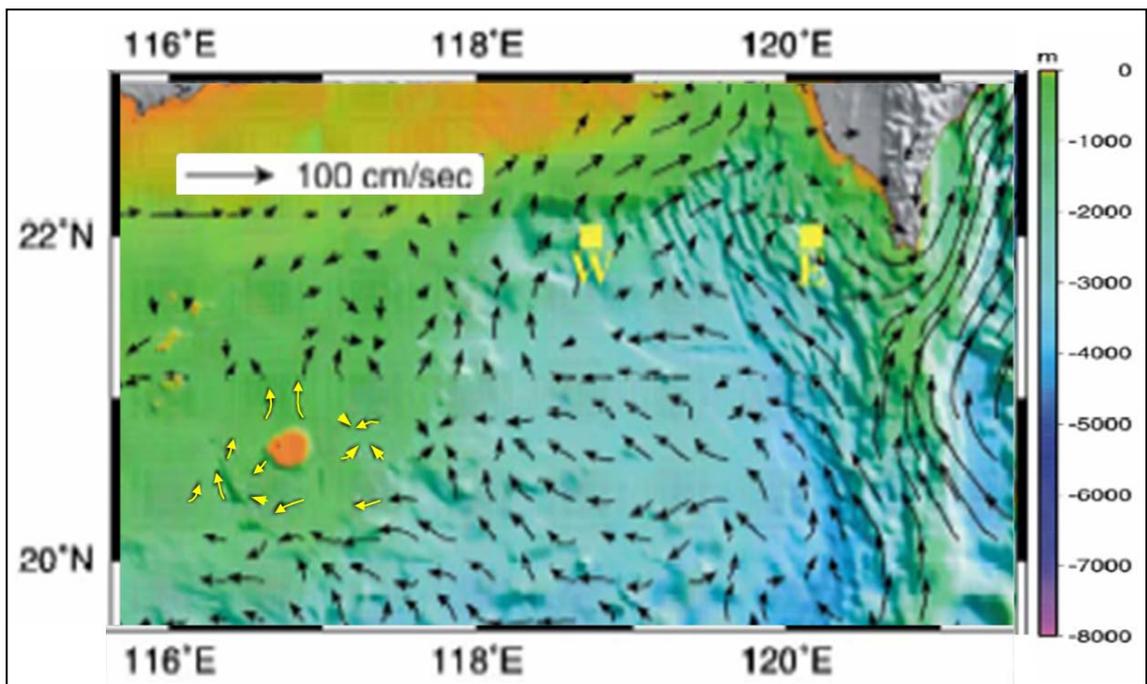


圖 8 夏季南海海流方向的分佈（修改自東沙環礁國家公園管理處影像）

2、實驗設計：

實驗 2-1 地形：不同斜度的油黏土小圓丘

以油黏土製作底面直徑八cm的小圓丘，邊坡斜度分別為 15°、30°、45°及 60°，做為地形變因的基本形狀（如圖 9），再搭配其他三種控制變因進行實驗。

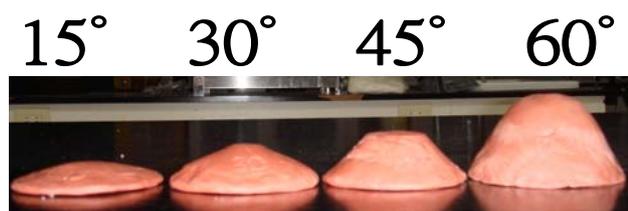


圖 9 不同斜度的油黏土小圓丘

實驗 2-2-1 海流：自循環水流裝置

(1) 於長型水槽之左右兩端內約 20 cm 處分別插入隔版，形成小隔間；在隔版與水槽底部保留約 1~2 cm 空隙，以利海流之流通。再將沈水式抽水馬達置於左右其中一個隔間，水管末端出水口置於另一個隔間。（如圖 10）

(2) 置油黏土小圓丘於水管末端之間隔前約 20 cm，並將碎蛋

殼沙均勻環繞在小丘四周，假想為沙灘。



圖 10：自循環水流裝置

實驗 2-2-2 海流：三層式虹吸水流裝置

- (1) 將平面水池置於高於長型水槽的椅子上，做為第一層；同實驗 2-2-1 之佈置，做為虹吸水流裝置之第二層；同時利用實驗桌的洗手台，以油黏土堵住排水孔之後，形成蓄水池，做為虹吸水流裝置之第三層。由實驗中發現，三層間的高低水位差最好相同。第三、第二層及第二、第一層之間以適量橡皮管連接（如圖 11），而第一層的水再以抽水馬達和水管送回第三層循環。
- (2) 置油黏土小丘於靠近第二層入水管之間隔前約 20 cm 處，並將碎蛋殼沙均勻環繞在小丘四周，假想為沙灘。
- (3) 利用虹吸現象使水流產生循環。



圖 11：三層式虹吸水流裝置

實驗 2-2-3 海流：自循環斜坡水流裝置

- (1) 將瓦楞紙板折成 $20 \times 20 \times 100$ cm 的 U 形，做為水道，並以抽屜用塑膠間隔板固定且做為間隔標示物（頭尾各一即每 20 cm 為一個間隔；如圖 12）。將長方形塑膠水盆的一寬邊

- 以線鋸由上而下切出 20×10 cm 的長方形缺口，並將口形瓦楞紙板與長方形缺口以熱熔膠及油黏土緊密接合，但兩者需形成一小於 5 度的角度，才易造成緩慢的水流。將自循環斜坡水流裝置墊高，使瓦楞紙板水道微微傾斜並置一容器於水道下接水，再以抽水馬達抽回塑膠水盆中循環之。
- (2) 將長方形塑膠水盆注滿水並溢出，形成海流。水流多在第二個間隔後平緩前進。置油黏土小圓丘於第二個間隔下方，並將碎蛋殼沙均勻環繞在小圓丘四周，假想為沙灘。

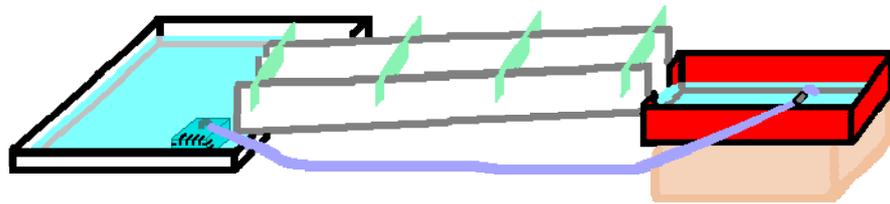


圖 12 自循環斜坡水流裝置

實驗 2-3-1 波浪：以造波器造波與蛋殼淤積實驗（見討論四）

- (1) 置油黏土小圓丘於瓦楞紙板水槽一端約 15 cm 處，並將碎蛋殼沙均勻環繞在小圓丘四周，假想為沙灘。以造波器(圖 13)穩定拍打水面造波，持續至淤沙不再有外觀上明顯的改變。
- (2) 改變油黏土小圓丘及水深，同上步驟，觀察並記錄結果。

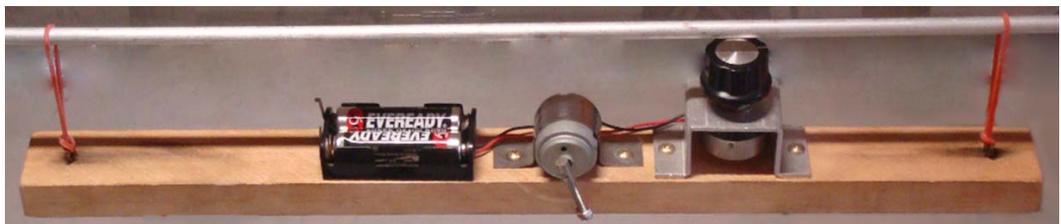


圖 13 電動造波器

實驗 2-3-2 波浪：以手動造波與蛋殼淤積實驗（如表 1）

- (1) 以研鉢倒蓋為障礙物置於平面水池中央，碎蛋殼為淤沙均勻環繞在研鉢四周，假想為沙灘。水槽上下放入海綿吸震，防止水波由邊界反射。以 40 cm 直尺自平面水池邊框

連續穩定地向前推 15 cm，持續大約五～十分鐘，至淤沙不再有外觀上明顯的改變。

- (2) 改變障礙物(研鉢)大小、蛋殼沙量及水深，重複以上實驗，觀察及記錄其變化。

實驗 2-4 風力：不同風速與蛋殼淤積實驗

- (1) 置油黏土小圓丘於瓦楞紙板水槽一端約 10 cm 處，並將碎蛋殼沙均勻環繞在小圓丘四周，假想為沙灘。水槽後端放入海綿吸收水面餘震，防止水波由邊界反射。以成束的吸管與加長型水波槽平行，用以導風。置電風扇於吸管束之前，持續送風至水槽以帶動碎蛋殼沙，至淤沙不再有外觀上明顯的改變（如圖 14）。
- (2) 改變油黏土小圓丘、水深及風力強度，重複以上實驗，觀察及記錄其變化。

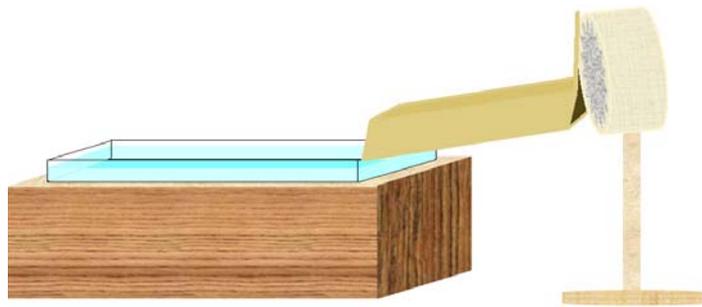


圖 14 不同風速與蛋殼淤積實驗裝置

(四) 實驗結果與分析：

- 1、**地形**：當水波遇到油黏土小丘時， 15° 、 30° 、 45° 及 60° 的小圓丘兩側，皆會出現半弧形的水波紋，於通過小圓丘後，在其後方繞射交會。但仔細觀察在 15° 的小圓丘後方，兩繞射波直接交會，沒有形成無波紋的區塊；而在其餘三個不同邊坡斜度的小圓丘後方，皆有無波紋的區塊，且角度越大，區塊越大、越長（如圖 15）。因 30° 小圓丘的無波區塊太小不易觀察； 60° 小圓丘者則太長，會超出平面水池的範圍，且東沙島為珊瑚礁島，不適合使用

斜度太大的小丘，故後續實驗皆採用 45° 的小圓丘。

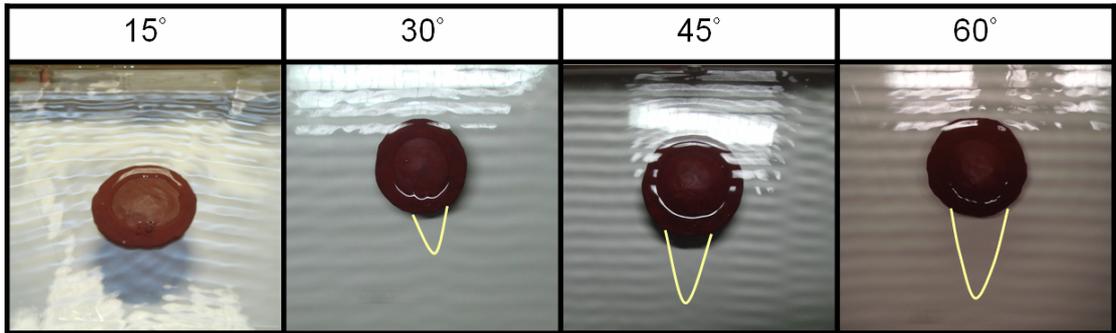


圖 15 不同角度油黏土小圓丘背後之無波紋區塊

- 2、**海流**：本研究實驗假設海流是上下均勻的；但在水槽中所製造上下層均勻平穩的海流，因設備裝置的不同，有些設備在本質上，即有其先天的限制；譬如自循環水流裝置及三層式虹吸水流裝置的水流太弱，且有上、下層流速及流向不同的情形（如圖 16），因此不予採用。

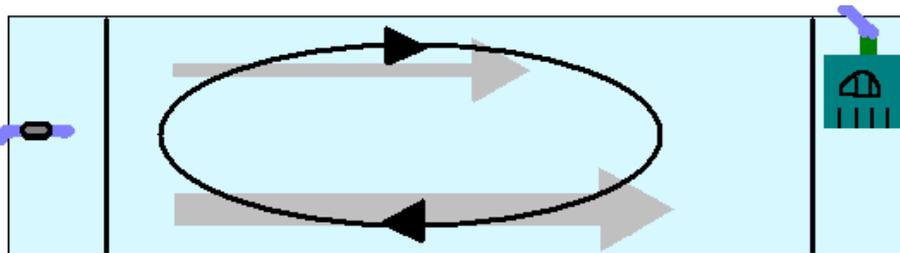


圖 16 平面水池內的流速及流向分佈（上方正視圖）

※ 圖片說明：灰色箭頭為下層水流之流向，左右流速不均；黑色箭頭為上層水流之流向，有迴轉的狀況。

自循環斜坡水流裝置無法在水一溢出時就產生平穩的水流，而且水流太薄、流速過快。若瓦楞紙板與塑膠水盆的角度大於 5°，產生的水流沖刷力便變大，不易觀察且影響實驗結果。

實際上，洋流屬於大規模的表層海水移動，而沙灘變遷主要是由沿岸流所引起；因此龍擺尾應是受沿岸流的影響而擺動，而非上述提及的海流（洋流），這點尚有待下節以波浪為主的實驗加以驗證。

- 3、**波浪**：因造波器所製造的波浪能量太弱，故改以手動造波。波

浪傳地方向，由表 1 各小圖之下方往上。

由表 1 之實驗結果可發現障礙物後方出現一處明顯淤沙，且有類似沙嘴圖形的次數最多；其中淤沙特別顯著的是小研鉢的 A、C 兩組，其結果為最符合東沙地形的實驗，因東沙島東南側也有發達的沙地。

當障礙物較小時，水深 1.5 cm 以上易出現符合東沙地形的圖形；當障礙物較大時，沙量多寡皆可達到預期的效果。實驗時水深不超過 2 cm 是因平面水池過淺，水多易溢出，而改變控制變因。在障礙物較大的實驗中，水深不小於 2 cm，是因過淺易激起水花，也會改變控制變因。

表 1 手起波與蛋殼淤積實驗圖形

障礙物	組別	水深 (cm)	沙量 (cc)	照片	形狀	備註
小研鉢	A	1.2	140		障礙物後方有一處明顯淤沙	淤沙特別顯著
	B	1.5	140		障礙物後方有一處明顯淤沙	
	C	2	140		障礙物後方有一處明顯淤沙	淤沙特別顯著
	D	2	70		障礙物後方有一處明顯淤沙	減少沙量
大研鉢	E	2	70		障礙物後方有一處明顯淤沙	
	F	2	140		障礙物後方有一處明顯淤沙	增加沙量

推論：**海流與波浪**：由實驗結果推測，現今東沙島東南的陸地，為冬季季風波浪及沿岸流長年作用淤積後形成。

波浪在大海的表面形成之後，會向水淺的灘岸傳遞，因海底的深淺有別而發生折射現象；到達碎波帶附近之波峰線，最後大多會與海岸線呈一個小角度，因而產生沿岸流。

進一步觀察比較澎湖縣白沙鄉員貝嶼西南的小島四周的波浪傳遞情形（如圖 17）。可發現當波浪遇障礙物，會分成兩道；繞過障礙物後因波浪的繞射而交會，因部份繞射區波高較小（如圖 15），漂沙因而沈積。同理，當波浪由西向東傳播至東沙島時，受東沙島本身地形阻擋而分為上、下兩道，最後在東沙島東南方繞射交會，長久便形成沙嘴。

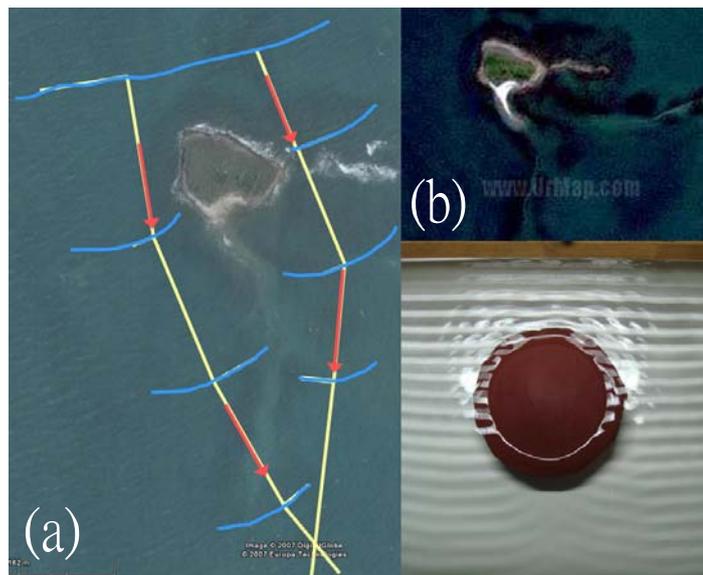


圖 17 當波遇障礙物時背後波浪的繞射與交會（a 修改自 Google Earth 影像；b 取自 UrMap）

圖 18 是利用 Google Earth 所提供的衛星影像圖放大至可清楚看見波浪的走向後拼貼，並繪製波向線（淺藍色線加黃箭頭）。將波峰線（橘紅色紋線）以快取圖案中的手繪多邊形描繪，並視波浪整體的走向做調整。再以其垂直線的一邊平行波，另一邊的端點延伸至下一個波峰，做為下一個直角位置，以此類推。



圖 18 東沙島沿岸波浪波峰線的分佈（修改自 Google Earth 影像）

- 4、**風力**：東沙島與季節風波浪：夏季東沙島受西南季風風浪影響；冬季受東北季風及東北信風雙重風浪的影響，但前者較後兩者弱，因此冬季沙嘴擺動由北至南，而夏季回擺之幅度較小。

推論：從衛星影像圖研判，沙嘴南邊海域的顏色較亮，故判斷為淤沙較多、水深較淺；沙嘴北邊的顏色較深，故判斷為淤沙較少、水深較深（如圖 19）。



圖 19 因人工構造物攔截而不再擺動的「龍擺尾」(取自 Google Earth)

三、以模型實驗驗證東沙島龍擺尾的現況

(一) 研究過程：

- 1、利用文獻、衛星影像圖及空照圖等資料，分析並繪圖觀察。
- 2、以平面水池、碎蛋殼及油黏土模擬海岸線的侵蝕與堆積。
- 3、模擬東沙島沙嘴及其北方的突堤之間，波浪和突堤的關係。

(二) 實驗結果：

- 1、觀察：目前龍擺尾已被截根消失，只見一座人工突堤；突堤北側淤沙沿堤線向東方海中推進，而突堤南側原有沙嘴的淤沙被沖散(圖 19)。再者，沙嘴北方的突堤南邊卻出現淤沙的情形，只有單邊積沙。
- 2、實驗設計：

實驗 3-1: 單突堤之沙的移動

以研鉢倒蓋為障礙物，置於平面水池中央，將碎蛋殼敷設環繞研鉢四周，研鉢後方的蛋殼向前尖起，其上放置一長方體油黏土土條(10×2×1 cm)，假想為沙嘴及突堤。注水約 1.5 cm，並在水池放入海綿吸收水波餘震。重複實驗 1-1 之步驟；所得實驗結果如表 2。

表 2 單突堤四周淤沙的分佈情形

障礙物	水深	沙量	圖片	
			原貌	侵蝕痕跡
小研鉢	1.5 公分	70 C.C.		
				
大研鉢	1.5 公分	140 C.C.		
				

實驗 3-2: 兩突堤間海岸線的模擬

以油黏土製成土堤(20×3×1 cm)，置於離平面水池距離上、下邊界分別為 18 及 7 cm 處，兩突堤之間約 25 cm，以 210 cc 的蛋殼沙鋪平成沙灘。於平面水池其他三邊放入海綿吸收水波餘

震，重複實驗 1-1 步驟；波前由前堤像後堤傳播；實驗結果如圖 20。



圖 20 兩突堤間海岸線的模擬

實驗 3-3：兩突堤間波浪的侵蝕力

造波器以交直流電源裝置代替電池並架於平面水池上，以油黏土製成 26.3×3×1、8.4×3×1 及 7.8×3×1 (cm) 的土堤(海岸、前堤及後堤)，置於平面水池中排列成傾斜的 C 字形，並放入海綿吸收水波餘震。置玻璃板於平面水池上並將雷射筆置於其上，觀察雷射光在各點的擺動幅度，以方格紙置於平面水池下記錄(如圖 21)。

以前堤北側近海的波峰線為始邊、前堤處之波峰線為終邊，兩者之間呈夾角 $\theta = 30^\circ$ 。因前堤與海岸線夾角 70° ，故海岸與後堤夾角為 110° (如圖 22)；實驗時，以這些角度值佈置突堤及海岸線的相對關係。



圖 21 實驗 3-3 之實驗設備佈置示意圖

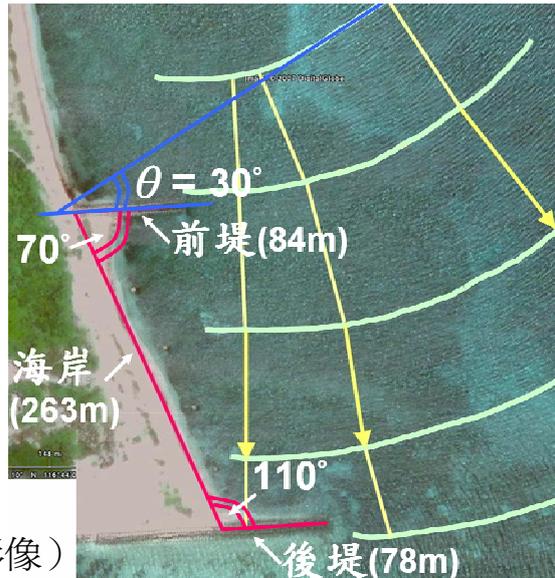


圖 22 東沙島波浪和突堤間之角度及堤長（修改自 Google Earth 影像）

實驗 3-4：龍擺尾擺動的模擬

以油黏土捏出一三角形並固定於塑膠碗上製成島體模型（如圖 23）。將島體模型置於水波槽中央，油黏土三角形之其中一邊，需平行波前進的方向。將串珠敷設環繞島體四周，島體後方的串珠向前尖起。注水約 1 cm。將吹風機套上扁平出風口集中風力，並和手動造波的波峰線夾 30° ；自水平面向下傾斜 15° ，以不濺起水花為原則，吹距離尖起之串珠 10 cm 的水面。同時以一枝 40 cm 直尺自平面水池之邊框規律且穩定地向中央（由圖 23 之下方往上）推動約 10 cm；持續造波直至串珠堆積且不再有明顯改變為止；約 2~3 分鐘。

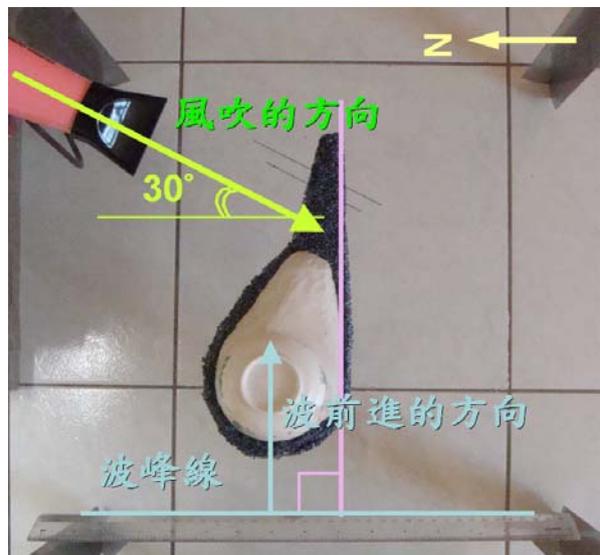


圖 23 實驗 3-4 之實驗設備佈置示意圖

(三) 實驗結果與分析：

- 1、從實驗中可以清楚發現，突堤的下方皆被侵蝕掏空，故油黏土條下陷。由水池取出油黏土土條，也可清楚看見被侵蝕的痕跡。

因本實驗設計是承襲實驗 2-3-2 的布置，因此蛋殼沙的分佈部分近似實驗 2-3-2，波浪作用也相似。兩者不同之處在實驗最後結果，如障礙物後方沙嘴的堆積。實驗 2-3-2 的積沙較多、較厚且較集中，而實驗 3-1 的積沙則較少、較薄且較分散。

若只觀沙嘴部分積沙的分佈變化，會發現蛋殼沙向後、向外擴散出去，且越靠近末端侵蝕越嚴重，因此才會使油黏土條傾斜。

推論：東沙島沙嘴原有的積沙，因突堤建造而向堤尖端擴散，沈積於環礁上或落入礁湖中，故從空照圖中無法清晰辨別。

- 2、**實驗 3-2** 結果分析：在兩突堤之間不平整的海岸線，是因波浪與人工構造物之間相對位置的不同而產生明顯的侵蝕(凹)與堆積(凸)，呈現先凸後凹、中間微凸及最後再後凹後凸的情形。

(1) 從實驗的觀點：兩突堤間海岸線的侵蝕與堆積，可分成兩種漂沙的移動方式：

A、漂沙的沿岸移動

由規模較大的反射波所造成。當入射波由北方傳播至後堤時，會產生反射波，由圖 24 可清楚看見入射波與反射波。因入射角的變化，有時部份反射波可能將後堤前的沙粒帶向前堤方向輸送。

當波浪傳遞至前堤時(如圖 22)，受前堤阻礙在背後產生繞射與近岸循環流所衍生的渦漩。近岸循環流在前堤下緣造成沿堤線的離岸裂流，若前堤太短，前凸的沙粒便易被離岸裂流帶走，使得前凸、前凹不明顯。而後堤前方也會產生離岸的裂流而將最後凸的淤沙帶往堤後。



圖 24 兩突堤間的入射波和反射波

B、漂沙的離岸移動

由小範圍的反射波所造成。會將沙灘上的沙粒往下帶(圖 25)。兩突堤之間的前凸及後凸灘線的原始沙源皆為自身上方沙灘，而中間凸的沙源則來自後半部沙灘(如圖 25)。前凹及後凹的灘線則是相對產生。

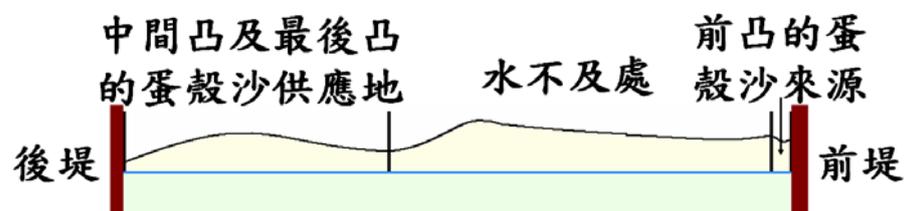


圖 25 沙源分析

因形成中央凸的反射波源自前堤方向，因此沙粒會向入射波的方向堆積，使得中間凸形成弧度先大後小的曲線。中央凸也因持續堆積而變得陡峭。

(2) 從近岸循環流的觀點：

龍擺尾根部突堤(圖 26 的堤 A)與它北方的突堤(圖 26 的堤 B)之間形成凹凸的海岸，因突堤 B 對東北季風波浪的遮蔽與繞射，而在其南側造成沿堤線「前凸」的淤沙情形；而在堤 A 之北則因沿岸流攜沙南下，沿突堤 A 邊界向海中堆積，出現圖 26 中「後凸」的情形。這種在兩突堤間的不平整的海岸線，因

波浪與人工構造物之間相對位置的不同而產生不同的反應機制，遂有明顯的侵蝕（凹）與堆積（凸）之區別，在兩堤之間呈現先凸後凹、中間微凸及最後再後凹後凸（如圖 26）。

在龍擺尾處突堤（堤 A）與突堤（堤 B）的北邊，還有一座突堤（堤 C）。堤 B 與堤 C 間的海岸（海岸 b）因原有海灘寬度較堤 B 與堤 A 間的海岸（海岸 a）狹窄，因此凹凸情形較不明顯。

圖 26 兩突堤之間凹凸的海岸線（修改自 Google Earth 影像）



- 3、突堤效應：由陸地建造突堤向外海延伸，因堤阻擋原先海岸漂沙之路徑，造成漂沙於堤上游堆積；因波浪受構造物遮蔽，在遮蔽區產生近岸循環流，造成堤下游侵蝕，而循環流將被侵蝕的漂沙帶往堤後遮蔽區堆積，最後在堤下游側的海岸則因漂沙供應減少或完全被攔截而侵蝕（如圖 27）；這種現象稱為突堤效應。澎湖縣隘門沙灘即為一例；此與建造或擴充商、漁港的防波堤而引起的突堤效應相似（如圖 28）。



圖 27 澎湖隘門沙灘之突堤效應
（修改自 Google Earth 影像）



圖 28 東沙島上突堤對積沙的影響
（修改自 Google Earth 影像）

推論：由突堤（圖 26 之突堤 B）上下游測淤積與侵蝕情況，推測目前東沙島的沿岸流可能不攜帶大量沿岸漂沙。

推論：將後堤（圖 26 之突堤 A）前的淤沙帶往後堤後的水流，可能是藉沿著突堤邊界的強制性裂流及通過後堤尖端的繞射波。此裂流將兩堤之間的淤沙帶往後堤尖端的外海，又受東北季風影響而轉向南淤積，形成在空照圖中，堤 A 南方的亮紋。

東沙島龍尾突堤之北方有一突堤（圖 26 堤 B 或圖 22 之前堤），因該突堤之建造而產生堤後側沙灘堆積，如圖 28 紅圈處。乍看之下，這種現象似非一般所稱的突堤效應；因沙灘淤積與侵蝕的地點與上小節的「突堤效應」定義相反。但仔細觀察，堤 B 之後側（下游）堆積，乃是波浪受突堤 B 遮蔽，而在遮蔽區的近岸循環流，將其下游（圖 26 前堤與後堤之間的中間偏北部分）被侵蝕的漂沙帶往堤後遮蔽區堆積；同時因堤 B 北側海灘之沙源有限，以致無法在前堤上游形成明顯的堆積。

- 4、實驗時發現當碎蛋殼沙粒的移動接近穩定時，可將海灘寬度沿海岸線平行方向切成三等分，由此發現左、右等分的表面碎蛋殼沙粒平躺，尚能受波浪影響；中間等分的表面沙粒表面則呈直立狀，似乎不再受波浪的影響（如圖 29）。

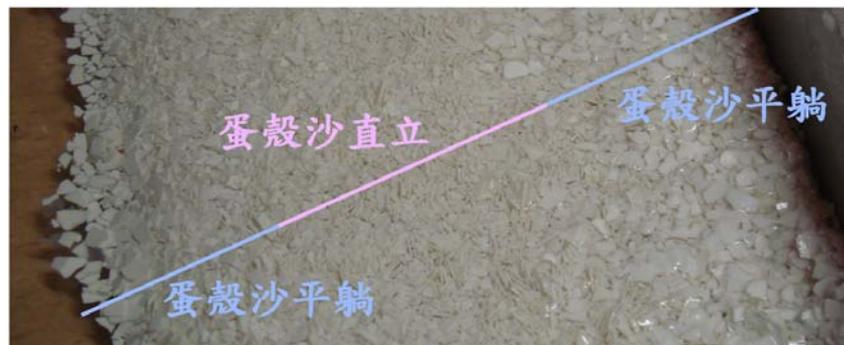


圖 29 碎蛋殼的直立與平躺

研判其原因可能是最上端的碎蛋殼沙為沙源，即最初排列散亂的沙粒。中間的蛋殼沙因處入、反射波必經之地，故可受波浪搬運的平躺蛋殼沙被帶走，留下波浪無法搬運的直立蛋殼

沙。末端的蛋殼沙灘，是由波可搬運的平躺蛋殼沙堆積形成的。

- 5、突堤 A (圖 26) 位於東沙島突堤群位置最東南端沙嘴根部，呈東西走向。因突堤 A 與東沙島南岸突堤的交互作用不明顯，故可設沙嘴南方的侵蝕為單堤侵蝕，即實驗 3-1 所得的結果；而突堤 A、B 間的交互作用明顯，故以雙堤侵蝕解釋其現象，即實驗 3-2 所得的結果。

進一步推論，龍擺尾四周的沿岸流以及沿突堤向外的裂流將原來沙嘴的沙粒打散，向東擴散；沙嘴北方雖有後凸上方沙源的補充，但同時也有規模較大的反射波侵蝕，總體看來還是侵蝕；最後，被打散的沙嘴沙粒分佈，如圖 19 所示。

- 6、在實驗 3-3 使用的雷射光筆 (圖 21)，其光束穿透水波，便如穿透透鏡，會因水波折射使光束擺動，因光束折射的角度是由振幅控制，所以擺動的幅度即可代表波浪的震幅。實驗中以光束最大晃動範圍為晃動幅度。光束擺動的方向即波浪的傳遞方向，若同時有方向不同的波浪通過，光束便會轉動。

實驗結果，如表 3 及圖 30 所示：表 3 中 X 值代表缺少數據，藍色代表數據差異大，有待再試驗驗證。各數據之平均值求得後以 K 點之數值為 100 為標準值，其餘則以等比例換算，再除以二繪製成圖 30。

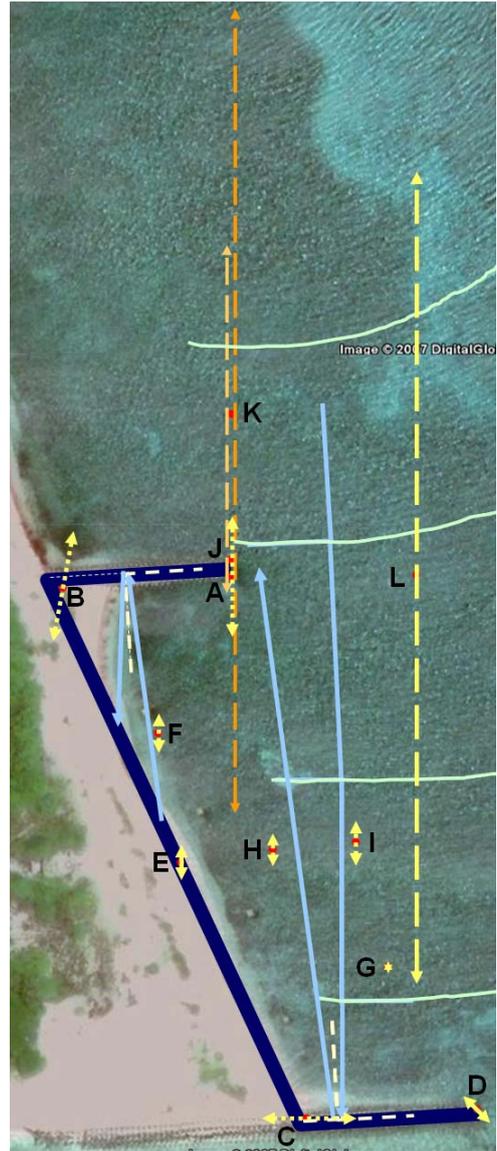
表 3 實驗 3-3 所得光束數據表

點	晃動幅度(cm)			平均值 (cm)	換算	長度	位置	方向	圖例 (雙箭頭)
	1	2	3						
A	1.5	1.2	X	1.35	15	7.5	前堤內側端點	繞圈	點虛線
B	0.9	1.6	X	1.25	13.9	6.95	前堤與海岸焦點	右上到左下加繞圈	點虛線
C	1.6	0.5	X	1.05	11.7	5.85	後堤與海岸焦點	右上到左下加繞圈	點虛線
D	0.45	0.45	0.4	0.43	4.7	2.35	後堤內側端點	左前到右後(前後)	實線
E	0.4	0.4	X	0.4	4.4	2.20	AB中點	前後	實線
F	0.65	0.3	0.4	0.45	5	2.5	正△ABF之F點	繞圈(前後加繞圈)	點虛線
G	0.35	0.3	0.3	0.14	1.5	0.75	正△CDG之G點	前後加繞圈	點虛線
H	0.4	0.4	0.3	0.37	4.1	2.05	FG中點	前後加繞圈	點虛線
I	0.5	0.6	0.4	0.5	5.6	2.80	AD中點	前後加繞圈	點虛線
J	3.9	X	X	3.9	43.3	2.17	前堤外側端點	不規則	虛線
K	9	X	X	9	100	50	A點垂直向上	不規則	虛線
L	9.1	X	X	9.1	101	50.5	A點平行向右	不規則	虛線

在實驗過程中發現多數光束有週期性的晃動，但 J、K 及 L 三點位於堤外，光束晃動如極光，並不規則。若數據中之晃動方向有不同，便以括弧註明。若光束有轉圈，則以點虛線表示；在堤內且不轉動者以實線表示；在堤外者以虛線表示。

從圖 30 可見，在堤外的 J、K 及 L 三點晃動幅度遠大於堤內之點，表示突堤削弱了大部分的波浪能量。而雙堤間的波浪較弱，但堤邊的光束較強，尤其 B、C 點，即前凸、最後凸。

圖 30 兩突堤間各點波浪作用與波浪能量的分佈（修改自 Google Earth 影像）

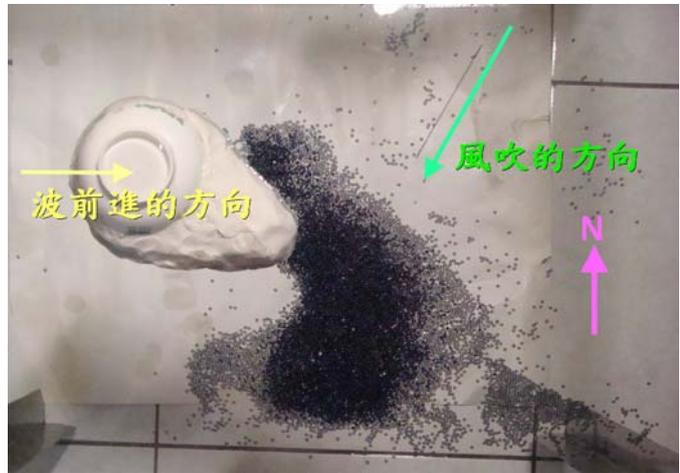


※ 圖片說明：A 點表黃色點虛線；J 點表橘色虛線；K 點表橘紅色虛線。

若配合圖 24，便可發現入射波因繞射現象使 A 點光束轉動。波浪繼續前進，使 G、H、I 點光束前後晃動，且隨距離增加而減弱。波浪遭遇後堤時產生反射波，使 D 點光束斜向晃動。C 點光束同時受入、反射波影響而轉圈。在 E、F 點入、反射波方向相似，故光束前後晃動。反射波於 B 點遇前堤再反射，故光束轉動。C 點光束轉動，代表有兩不同方向的波浪經過，會侵蝕沙灘並帶走沙粒，沿著反射波向北移動，到 B 點再反射，但能量已無法搬動沙粒，導致沙粒淤積，形成最後凸。

- 7、**實驗 3-4** 結果分析：以手動造波模擬東沙島的沿岸流，配合吹風機套上扁平出風口吹風模擬東北季風和東北信風，可模擬出龍擺尾擺動的路徑與擺動圖形（如圖 31）。

圖 31 模擬龍擺尾之擺動條件及圖形



當水流遇障礙物

（島體）時，被切割的水流於越過障礙物後繞射交會，若是平形的兩道水流交會，加上模擬的季風吹拂，龍擺尾便會以沙嘴基部為圓心旋轉，仍維持直線形，而非彎曲的。改以油黏土塑造類似雨滴形的島體，更接近東沙島真實的島形，而受島體阻擋後分成的水流彼此不平行，交會時繞射區相互重疊的區域就越大，再加上季風吹拂而形成的水流，就能使龍擺尾向南彎曲，模擬出來的龍擺尾移動路線也越接近真實情況。

布置串珠時，需設置環繞島體的沙灘，是為了使被島體切割的南方水流可以攜帶漂沙，減少對龍擺尾的侵蝕；同時藉由水流侵蝕龍擺尾基部部分淤沙，並受季風影響而帶至南方，使龍擺尾更加彎曲。

以串珠取代蛋殼沙，是取串珠並非如蛋殼沙一般平坦且可以滾動之優點，經吹風機吹拂之後也確實可以移動。但串珠的移動能力並不穩定：平躺時並不容易移動，尤其是當一整遍的串珠皆平躺時，更難移動；但當串珠直立時，便十分容易滾動，再加上水減少了串珠與水池底部的摩擦力，滾動的距離也就增長。因此以串珠為模型沙的實驗，所需時間會比以蛋殼沙者短。

四、研擬東沙島海灘復育方案讓龍擺尾復活

(一) 研究過程：

- 1、利用文獻、衛星影像圖及國外成功保護、保育海灘之經驗，分析改良東沙島突堤之方案。
- 2、以學術理論及其他有剛體構造物海灘的實際狀況，分析東沙島龍擺尾之復活情形。

(二) 研究分析：

- 1、觀察：政府向來以建造立即性防潮禦浪的剛體構造物（如海堤、護岸、消波工、突堤及離岸堤），以阻擋波浪，防止國土流失與保護沿岸居民的生命財產及安全；但每次遇到颱風的侵襲，各地的海岸災害仍舊頻繁發生。同時由於近年來的海堤大多採用陡坡堤，堤的高度因而阻擋視線；另因在堤前常拋置許多消波塊，使堤前的基礎免遭受波流的沖刷與波浪對堤的坡面的直接衝擊、破壞，反而阻礙民眾親水，破壞視野景觀；所以常遭環保人士批評。
- 2、以東沙島上的突堤群而言，突堤是一種由海灘往海中延伸，以攔截沿岸漂砂，保護海岸的構造物；依其堤的中心線之平面形狀可分為單線型（單堤垂直、斜向或成弧形於海岸）與複合型（*T*型、錨狀、*Y*型、*L*型及魚尾型等）。

(1) 單直線型突堤

在民國 82~85 年間，當時的駐軍以防止海岸侵蝕為由，在東沙島的東北及東南兩側，先後以混凝土消波塊共構築八座突堤；這些突堤大都垂直於海岸線。對斜向入射的波浪而言，單直線型突堤能攔阻沿岸漂砂，使漂沙其上游淤積，同時在下游造成海岸侵蝕後退。

以往有些專家學者認為垂直於海岸的單線突堤能使漂沙在兩突堤間保持平衡，對保護被侵蝕的海岸頗有成效，所以直線突堤常以堤群的形式被利用於長距離海灘的保護。但事

實上，在兩座直突堤之間，若當地冬夏兩季的波向不同或因夏秋颱風侵襲，往往會導致在兩堤之間的積沙離岸流失，故直線突堤目前較少被使用。

(2) 複合型突堤

取代直突堤的是複合型突堤，因 T 型、L 型及魚尾型等造型的突堤對於垂直入射及斜射之波浪，皆會在其背後產生波浪遮蔽區，以防止近岸循環流及離岸裂流攜沙入海，使兩堤之間的積砂不易流失；因此近年來逐漸在海岸先進國家被採用（兩相鄰構造物間採大間距；如圖 32），但我國尚未普遍採用。

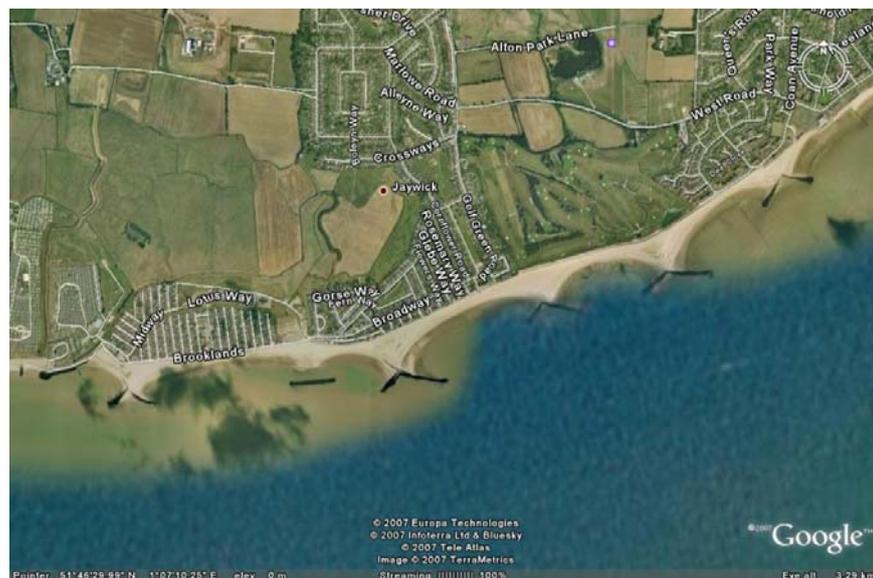


圖 32 英國 Jaywick 地區的複合型海岸防護設施（取自 Google Earth 影像）

(3) 離岸潛堤

然而不論是單直線突堤、複合型突堤或離岸堤，因配合混凝土消波塊，仍然有破壞景觀之缺點。補救的方法，是改採用離岸潛堤、配合人工養灘。離岸潛堤是一種由傳統離岸堤所衍生的改良性構造物；通常在某一設定水深時，潛沒於海水面下（如平均高潮位、平均海水位或平均低潮位），其頂寬由數公尺至二、三十公尺。潛堤之應用主要是效法天然

海底沙洲（bar）對入射波能量的消滅。雖然潛堤在消滅波浪能量的效果不如離岸堤，但其隔絕水流之程度較傳統離岸堤小，對海水循環妨礙也較少，加上構造物可以不露出水面，更無損於視覺景觀，或僅露出一點點（如花蓮化仁海岸的離岸潛堤在低水位時會露出水面；如圖 33）。故在日益重視海岸景觀與生態環境的需求下，潛堤已在國外逐漸成為海岸保護新工法的主軸。

若以離岸潛堤取代東沙島上現有的七座突堤，同時配合適量的人工養灘，以及拆除在龍尾處的突堤，則冬季季節風浪造成的沿岸流可望恢復昔日的作用，流過東沙島東南端，讓現在失散在島上東南端海域的龍尾灘沙，漸漸匯集成沙嘴。到了夏季，夏季季節風浪也不會在島的東南端遭遇龍尾處既有突堤，沒有堤前反射波去沖散日漸復原的龍尾沙嘴，如此反而可以整體推動沙嘴，讓它向東移動或搖晃，讓龍尾復活，並再度隨季節擺動。離岸潛堤的另一附帶優點為讓東沙島四周海域的珊瑚有附著的機會，增加海洋生態多樣性；而最近在花蓮市近郊南濱及化仁海岸的離岸潛堤發現有珊瑚附著（如圖 34），即是最佳證明。



圖 33 低水位時的化仁海岸離岸潛堤



圖 34 珊瑚附著於化仁離岸潛堤

五、由東沙海灘看世界海岸復育的可行性

(一) 研究過程：

- 1、利用文獻及參考國外成功保護、復育海灘之經驗，分析及探討東沙島海灘和世界其他海岸保育之方法。

(二) 研究分析：

海岸侵蝕是一個世界性的問題，並非台灣所獨有。在過去的百年內，世界各地有百分之七十以上的海岸，因受自然與人為因素的影響而侵蝕後退，堆積前進者僅見於在有攔截沿岸漂沙的構造物上游側，而能數十年相安無事的地方，則寥寥無幾（許、蔡；民 96）。因海岸沿岸輸沙量減少，而被侵蝕的海岸，通常不能自我修復，只有依賴外力（如人工養灘或再配合各種海岸保護設施），才能恢復原有的海灘。

以前的工程師為保護海岸免於被侵蝕，雖然明明知到天然的沙灘能夠有效地削減波浪能量，也曾觀察到天然安定灣岸的特性，但卻未加以模仿利用，反而一味採用海堤或其他剛性構造物；造成在異常海氣象的作用下，使堤前波浪反射增強，加速堤前沙灘流失。近年來，日本及歐美各先進國家的海岸在遭遇無數的痛苦經驗與科學化的比較後，大都逐漸由海岸保護轉型為保育，以軟硬體兼施的方法（以最少的人工構造物配合養灘；如圖 29），由被動的保護轉變為積極的規劃親水海灘。

以日本二十世紀的海岸保全工法轉型為例，大致上已

- (1) 捨棄傳統的直突堤而改用 T 型及船錨型突堤
- (2) 捨棄傳統的離岸堤而改用離岸潛堤或人工礁磐
- (3) 由「線的保護」轉型為「面的保護」（如圖 35）
- (4) 整合離岸潛堤、養灘及緩坡海堤為三合一的海岸保護系統。

（許、蔡；民 96）

在東沙島我們不需要任何型式的海堤，以離岸潛堤配合養

灘，就可達成海岸防護的任務。

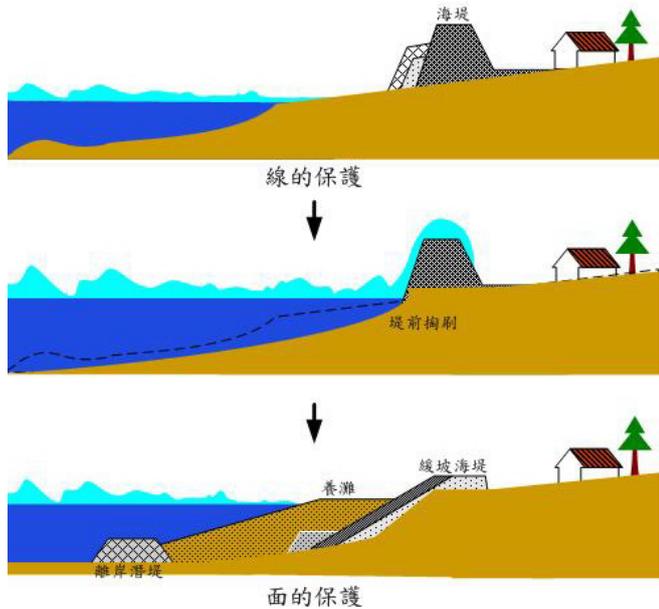


圖 35 日本海岸保護由「線的保護」轉型為「面的保護」

伍、結論

- 1、東沙島早先為一突出水面的馬蹄形裸露珊瑚礁。珊瑚礁岩經千百年逐漸風化成沙，形成沙灘，再經波浪作用向下游輸送而堆積，造成島上東南方的陸地。
- 2、因海面大氣壓力分佈不同，形成風場，造成海上表面波浪向海岸傳遞，再因海底水深的深淺有別，而有波浪淺化及折射現象，最後在近岸碎波，碎波後之波峰線與海岸呈一小角度，引起沿岸流。當季節風浪在東沙島四周傳遞時，波浪由西向東傳遞，受東沙島（障礙物）本身地形阻擋而分為上、下兩道，最後在島的東南端交會（即沙嘴位置）。因波浪在此處受遮蔽而繞射，減弱波浪能量，助長淤沙，長久便形成沙嘴。
- 3、東沙島全年受季節風浪影響，所造成的波浪，折射後皆由西向東傳遞。因冬季季節風浪強度大於夏季季節風浪，故東沙島沙嘴由島的東南端（沙嘴根部）向南伸長；夏季季風的風浪較弱，雖未能使沙嘴尖端大幅度由南向北轉向，但也能推動沙嘴，造成小幅度的擺動，遂有「龍擺尾」之美稱。
- 4、民國 82~85 年間，當時軍方以防止海岸侵蝕為由，在東沙島上以混凝土消波塊建造突堤，導致沙嘴由其根部被截斷，冬季季節

風浪因受沙嘴處突堤的攔阻，不能再影響沙嘴本體。在突堤建造後，龍擺尾突堤南方的侵蝕為單堤的侵蝕，即積沙向外擴散，再沈積於環礁上或落入礁湖中，因此判斷突堤南方淤沙較多、水深較淺，故顏色較亮。在另一方面，在龍擺尾突堤與其北方突堤間的交互作用，因可以雙突堤的侵蝕解釋之，即沙粒的沿岸移動（入射波傳播至後堤時會產生反射波，將後堤前的沙粒向前堤方向輸送）與離岸移動（由小範圍的反射波所造成，將沙灘上的沙往較深處輸送；如前凸及最後凸的沙源皆為自身上方的沙灘），因此研判龍擺尾突堤北方淤沙較少、水深較深，故顏色較深。

- 5、經本研究之相關實驗結果，研判影響龍擺尾擺動的主要原因，為季風波浪造成的沿岸流。但因在沙嘴根部興建突堤，截斷該處沿岸流及漂沙運動，導致沙嘴被該突堤南側的反射波沖散而散佈於廣大的海域，沙嘴完全消失。
- 6、為規劃復育東沙島美麗的沙灘，除滿足基本的防災需求外，應同時兼顧生態及景觀的層面。在策略上，可將既有突堤所使用的混凝土消波塊吊移到近海適當的地點，作為離岸潛堤的主體，並維持沿岸漂沙活動的連續性。在沙嘴根部的突堤拆除之後，冬季與夏季季節風浪可望匯集目前被沖散的沙嘴灘沙，重造沙嘴整體，恢復昔日龍擺尾的風華。
- 7、在不影響沿岸漂沙的情況下，以人工潛堤保護背後海灘，可同時滿足防災、減災、生態及景觀的多層面的需求，這種復育東沙島沙灘的經驗，相信可對世界上飽受侵蝕的海岸提供一個可行的替代方案。

陸、未來展望與研究課題

- 1、東沙島上突堤的興建與沙嘴的消失已是不可改變的事實；但為何原本的淤積地形反而變成了侵蝕地形？在政府大力提倡復育海岸環境之際，為復育東沙珊瑚礁的風華，建議能拆除東沙島上的突堤群，改建為離岸潛堤，尤其是其東南端的突堤，使失散的沙

嘴沙灘重新匯集，恢復昔日龍擺尾的風華。

- 2、雙突堤間沙粒的移動所造成海岸線的凹凸，在有些海岸段比其他海岸段明顯。有必要進一步探討造成這種結果的原因為何，是否與入射波的角度、入射波和前堤的角度及前堤及後堤間的長度有關？若能找出彼此的關連，便能瞭解何者對海岸侵蝕的影響最大，而對症下藥改進突堤的佈置。
- 3、由實驗結果中發現（本報告肆、三、(三)4、小節），碎蛋殼沙有平躺及直立的現象；前者尚能受波浪影響，而後者則似乎不再受波浪的作用。這是當前研究機關使用海沙做模型實驗不會遇到的情形；建議將來能進一步以物理的觀點，證實這兩種碎蛋殼沙不同排列情形與其穩定性的關係。（註：這將是一個非常有趣的題目）
- 4、目前實驗中所使用的蛋殼沙，與真實沙粒的形狀差異大，因此在未來的實驗中將以串珠取代。進一步，希望能利用串珠設計實驗模擬出龍擺尾擺動的情形，或者是現在東沙島突堤群若拆除後可能呈現的樣貌；甚至是建設離岸潛堤對龍擺尾的影響，如此便能對復育東沙島海岸有更深入的瞭解。

柒、參考資料

學術論文：

1. 邱文彥（民94年7月）。海中的文化探險 東沙水下考古的起步與啟示。新活水月刊，第7卷，56~64頁。
2. 許榮中、蔡清標（民96年10月）。海岸開發與保育。財團法人中興工程顧問科技研究發展基金會，工程小叢書「鑽石海岸」系列。

書籍：

1. 郭金棟（民91）。海岸工程。中國土木水利工程學會。
2. 永田 豐（民93）。湯麟武 譯。波浪傳奇 不可思議的海洋波浪。財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會。

電子報：

宮守業 (民 95)。一張 150 年前的東沙環礁水深圖。國立自然科學博物館
電子報第六版。

網站：

- 1、東沙國家公園官方網站
(<http://dongsha.cpami.gov.tw>)
- 2、內政部營建署 東沙・台灣第一座海洋國家公園
(<http://np.cpami.gov.tw/park/2006111501.asp>)
- 3、Google Earth-Home
(<http://earth.google.com/>)
- 4、國家測論壇 邱文彥 東沙保育之課題與未來
(<http://www.npf.org.tw/monthly/00205/theme-164.htm>)
- 5、UrMap 你的地圖網
(<http://www.urmap.com.tw/>)
- 6、國家太空中心
(<http://www.nspo.org.tw/>)
- 7、高雄市政府海洋局 海洋事務
(<http://kcmb.kbj.com.tw/main.php>)

評語

本作品探討東沙島沙灘的變遷與復育，收集不同時代之航照與衛星照片研討”龍擺尾”之變遷，由於東沙島西岸突堤之興建使得砂源受阻影響到”龍擺尾”之存在。作者能利用實驗設備模擬東沙島龍擺尾之形成與消滅，具有應用價值。作者表達能力甚佳，作者亦保有實驗紀錄為一具完整性之作品，未來的模擬實驗所用材質希望能採用粒度不同之”串珠”行之，如此與自然界之情況較為符合。