地工沙管應用於海岸保護

曾以帆[1] 鄭恆志[2] 李忠潘[3] 林義復[4] 李芳承[5] 王育崇[6] 翁瑞成[6]

[1] 國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授
[2] 盟鑫工業股份有限公司副總經理
[3] 國立中山大學海洋環境及工程學系教授
[4] 國立中山大學海洋環境及工程學系博士候選人
[5] 中央研究院應用科學研究中心博士後研究
[6] 國立中山大學海洋科技研究中心研究助理

摘要

台灣傳統海岸保護工法都由大量之混凝土構築而成，因工程成本相對昂貴且對海岸景觀與親水性之觀感普遍不佳，近年來已趨向研發近自然之海岸保護工法，地工沙管(腸)即為其中之一。然而，地工沙管佈置在海中之穩定性，特別是在颱風頻繁的台灣海域，目前仍極少相關研究進行探討。本研究主要以水工模型試驗的方式，在颱風波浪作用下探討：(a) 離岸潛堤安定性，如改變地工沙管的規模，觀測其所對應之移動距離、外海臨界波高與週期等；(b) 離岸潛堤之消浪效果，評估以地工沙管取代傳統離岸潛堤之適用性。

關鍵詞：水工模型試驗、離岸堤、離岸潛堤

The Application of Geotextile Tube for Coastal Protection

I-Fan Tseng* Heng-Chih Cheng Chung-Pan Lee I-Fu Lin Fang-Cheng Lee
Yu-Chong Wang Jui-Cheng Weng

* Assistant Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

ABSTRACT

Building concrete constructions to withstand the strongest storm wave and to prevent overtopping are the most way in Taiwan. Because of the requirement of rock material and large-size machine, the engineering cost is relatively high, and the impression of coastal landscape is generally poor. The application of geotextile tube for coastal protection is the new strategy in recently. However, the stability of the geotextile tube install on the seafloor, especially in high frequently typhoon hit around the sea area of Taiwan. There is still few related research to discuss. The assessment analysis of applicability of this geotextile tube protection, is used hydraulic model test, to compare the submerged breakwater and to replace them by geotechnical sand tube protective benefit difference between coastal protection method, under the effect of typhoon waves to explore: (a) construction stability, such as changing the size of the geotechnical tube, estimate the corresponding moving distance, critical water depth, the critical wave height and period, etc. (b) the effect of wave dissipation by submerged breakwater.

Keywords: Hydraulic model test; Detached breakwater; Offshore submerged breakwater

一、前言

海岸防護措施乃在降低海岸災害對海岸地區自然及人文環境之衝擊，避免不當海岸工程設計影響

自然環境平衡，以回復海岸自然風貌為目標，確保海岸永續發展。檢討既有防護設施的功能性，視其保護標的重要性及沿岸土地利用情況，進行必要之改善。原則上，海堤以防潮 (暴潮) 為主，而禦浪的部分可視實際需要於外海設置離岸消波設施，以消減外海入射的波浪能量，抑制侵蝕沙灘的外力。

台灣傳統的海岸防護設施都由大量混凝土構築而成，因塊石取得不易以及需要大型機具施工，造成工程成本相對昂貴，且對海岸景觀與親水性之觀感普遍不佳，因而近年已趨向研發較省錢又能為環境所接受之海岸保護工法，地工沙管 (袋) 即為海岸保護工法研擬之新方向。但此地工沙管佈置在海中之穩定性，特別是在颱風頻繁的台灣海域，目前仍極少相關研究進行探討。主管機關對於應用地工沙管在海岸保護的規劃上，仍多持著保留的態度。

有關地工沙管 (袋) 在工程上的使用歷程，1950 年代英國、荷蘭首先以大型布袋填充河川疏浚淤泥做為防洪河堤，此為地工沙管之先驅。此後，法國、美國、日本等國家陸續採用於河道或濕地之防洪及疏浚工程中。1970 年美國陸軍工兵團在德州利用尼龍袋裝填沙土，作為減衰波浪之用，爾後，跟隨著地工織物技術的發展，地工沙管逐漸應用於替代混凝土、瀝青等傳統材料。荷蘭公共工程部與 Nicolon BV 公司於 1987 年發展以高拉力抗紫外線之地工織布織成一長管狀物，將河、海砂以水力填裝方式灌入管中。經裝填之沙腸，長度達 50~400m，高度達 1~2m，寬度達 2~4m 之管狀體。將此沙管作為：(1)配合抽砂造地之圍堤或護岸、(2)取代海堤之傳統堤心料、(3)取代突堤或導流堤堤心料、(4)河、海岸堤趾之淘刷保護、(5)海底管線之淘刷保護。荷蘭地工織物及河海工程專家 Pilarczyk (1998) 倡導“Geosystem”之新地工系統，以地工沙管 (袋) 應用在海岸工程方面，包括：海埔新生地之圍堰堤防、疏浚污泥之圍堰堤防、離岸堤、養灘低檻堤、防波堤及人工沙丘之堤心材等。

台灣地工沙管 (袋) 之工程應用，較早期之工程案例應為 1990 年國家建設六年計畫，榮工處彰濱工業區利用沙腸管裝填海沙築堤；1993 年台塑六輕麥寮工業區，利用沙腸管裝泥填海造地；中華工程鹿港工業區的海埔新生地，為了防止填沙之流失而進行之沙腸管圍堤工程；1996 年雲林離島工業區的開發，也採用沙腸管海岸築堤。高雄港務局於 1997 年港灣浚渫工程，數量約 13925m^3 淤泥利用沙腸管裝填污泥存放築堤。第七河川局於 2002 年在屏東東港鎮海海岸，以地工沙袋施作四座離岸堤與養灘工程，完工初期聚沙成效良好，但 2006 年珍珠與碧利斯颱風過後，發現沙腸袋破裂導致整體結構毀壞。

目前國內、外雖已廣泛應用地工沙管 (袋) 於海岸保護工程上，但主要還是應用於海岸灘崖 (cliff) 坡腳保護、沙丘 (dune) 保護、海堤堤趾防淘保護、人工養灘邊界圍檻等環境，亦即設置區域屬於海、陸岸交界之近岸處或高灘地，如圖 1 所示。然而，在颱風侵襲期間，此近岸區域的波浪多已經發生碎波，波浪作用能量遠小於外海區域。至於，台灣海岸所常見的離岸堤保護工，則多是設置在近岸水深約-5 米以淺處 (如屏東海岸之離岸堤群)。若以地工沙管取代傳統之消波塊 (或塊石) 離岸堤佈置於外海處，則此地工沙管在颱風作用下的安定性，目前仍極少相關研究進行探討分析。

本研究主要以水工模型試驗方法，針對台灣常見的離岸潛堤設施，以地工沙管取代評估分析其在颱風設計波浪的作用下，堤體之安定性 (如不同的地工沙管規模所對應之移動水深、臨界波高與週期等) 與減浪效果。

圖 1 地工沙管應用於海岸保護 (照片：盟鑫公司)

二、研究方法

以地工沙管取代消波塊離岸潛堤佈置，選取屏東海域 10~50 年重現期颱風波浪為外海入射條件，評估颱風浪作用下地工沙管潛堤之安定性。

2.1 試驗規劃

水工模型試驗於中山大學海洋環境及工程學系之水工模型試驗場斷面水槽進行，水槽長度 42 公尺、寬度 1.5 公尺、深度 1.5 公尺，側邊裝設長度 18 米之玻璃觀測區段，水槽前端設置一平推式造波機。水工模型試驗之佈置照片，如圖 2 所示。

主要觀測項目與儀器架設整理如下：(1) 波高與溯升過程：於特定位置設置電容式波高計量測潛堤前後之波高，另由波高計改裝為溯升計量測海堤上波浪之溯升情形，並配合數位攝影設備觀測近岸波浪變形的過程。(2) 離岸潛堤位移觀測：利用數位攝影設備觀測離岸潛堤是否產生晃動或移動現象，記錄其堤體規模、設置水深、波浪條件。由觀測數據可分析出各重現期颱風波浪作用在沙腸袋之安定性，可做為防護工程規劃上之參考。

圖 2 斷面水工模型試驗之佈置照片

2.2 試驗設計

本斷面試驗模型比尺選定，同時考量現場海岸地形、波浪條件及試驗設備容許範圍內，模型比尺採用等比縮尺 1/40。

颱風波浪推算採用湯麟武 (1970) 之移動風域數值推算法，計算本研究區海域之颱風波浪。以中央氣象局發佈之侵台颱風資料 (1940～2013 年)，篩選通過林邊溪口外海 (水深約-75m)、且颱風中心氣壓小於 970 mb 者，共 129 個對本區影響較大之颱風推算最大示性波高。再以推算所得結果為樣本，利用迴歸分析的方式分別求得 10 年、20 年、25 年及 50 年重現期之颱風波浪。本研究區位於屏東林邊溪口附近海岸，影響本研究區之主要颱風波向為 SW，後續颱風設計波浪即選定此波向之颱風波高與週期。試驗波浪條件對照表，如表 1 所示。

表 1 試驗波浪條件對照表 (縮尺 1/40)

颱風規模	水深 (m)		波高 (m)		週期 (sec)	
(重現期)	現場	試驗	現場	試驗	現場	試驗
10 年	32	0.80	5.7	0.14	10.12	1.6
20 年	32	0.80	6.9	0.17	10.75	1.7
25 年	32	0.80	7.2	0.18	11.38	1.8
50 年	32	0.80	8.4	0.21	12.02	1.9

2.3 模型鋪設

參考現場近岸底床坡度，以角鋼與壓克力板製作不透水斜坡底床模型，坡度各為 1/66 (緩坡段) 與 1/13 (漸變段)，底床佈置情形如圖 3 所示。依據本研究合作企業盟鑫公司所提供之兩種沙腸袋原型設計尺寸 (如表 2)，配合本試驗所擬定之模型縮尺 1/40，請盟鑫公司製作沙腸袋模型。依據 1/40 等比縮尺之模型率，換算沙腸袋各物理量之模型縮尺值，如表 3 所示。模型底床鋪設完成後，先於沙腸袋潛堤位址處 (光滑壓克力) 黏貼砂紙以增加底床粗糙度，再分別測試單條與雙條 (並排) 沙腸袋。沙腸袋設置水深共有三種，分別為水下 2m (試驗水深 5cm)、3m (試驗水深 7.5cm)、4m (試驗水深 10cm)，沙腸袋設置水深示意圖，如圖 4 所示。

試驗過程中量測各種方案之波高，波高計架設位置示意圖，如圖 3 所示。試驗過程中同時進行四個角度的攝影，包括上視 (可估算沙腸袋位移，照片紅色處為砂紙)、側視、碎波位置與全景拍攝。

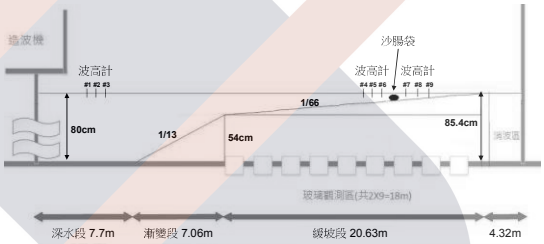

圖 3 斷面水工模型試驗之佈置示意圖

表 2 沙腸袋原型設計尺寸

規格數據	"2m"高沙腸袋	"1.5m"高沙腸袋
每米長重量	約 13.7 ton/m	6.5 ton/m
每米長體積	約 9.13 m^3/m	4.36 m^3/m
沙填充率	約 70%	約 75%
單位重	1450~1650kg/m^3	1450~1650kg/m^3

表 3 沙腸袋模型設計尺寸 (縮尺 1/40)

規格數據	"2m"高沙腸袋	"1.5m"高沙腸袋
外徑(C)	33 cm	22 cm
長度(L)	約 150cm	約 150cm
填沙高度(D)	約 5 cm	約 4 cm
沙填充率	約 70%	約 75%
重量	約 14.0 kg	約 6.5 kg
單位重	約 1550kg/m^3	約 1550kg/m^3
換算現場重量	約 15.0 ton/m	約 7.0 ton/m

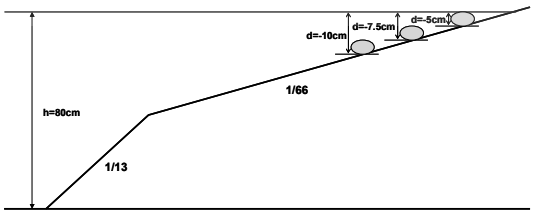

圖 4 沙腸袋三種設置水深示意圖 (縮尺 1/40)

三、結果與討論

本模型試驗主要分析颱風浪作用下地工沙管潛堤之安定性，以 10 年、20 年、25 年與 50 年重現期颱風作為設計波浪進行造波，觀察空水槽 (無沙腸袋) 與設置兩種規格 (現場高度 2m 與 1.5m 高、60m 長) 之沙腸袋，分別放置在三種水深 (現場 2m、3m 與 4m) 時，其所對應之沙腸袋移動距離、位置水深、外海波高與週期等情形。

依序進行六個階段試驗，共 112 個試次。第一、二階段試驗屬於前期測試試驗，以調整適當的造波水深、沙腸袋位置、沙腸袋長度、波高計架設位置與攝影機拍攝位置等。第三~六階段試驗為安定試驗，分別進行空水槽、“現場 2m 高” 與 “現場 1.5m 高” 沙腸袋、“現場 1.5m 高” 沙腸袋外覆塊石等四種試驗，觀測其在颱風波浪作用下之潛堤安定性。以下詳述第三~六階段安定試驗結果。

3.1 第三階段試驗 (24 個試次)

第三階段模型試驗佈置示意圖，如圖 3 所示。於深水段架設三支波高計 (#1～#3)，沙腸袋前後各架設三支波高計 (#4～#6、#7～#9)。以四種重現期 (10 年、20 年、25 年與 50 年) 颱風波浪進行造波，量測碎波位置、碎波水深、斜坡上反射率等數據。

將 “現場 2m 高” 沙腸袋雙條 (case1～case3) 與單條 (case4～case6) 分別放置在三種水深，以四種颱風波浪進行造波。結果顯示，24 個試次在四種颱風波浪作用下沙腸袋都不會產生移動。單條與雙條沙腸袋在四種重現期颱風波浪作用下之波高分佈情形，各如圖 5、6 所示。由圖 5、6 之波高分佈情形配合碎波觀測與波高計架設位置可知，波高計#1～#3 之觀測值大致與設計波高吻合，各試次之碎波位置位於距造波板 15~21m，即波高計#3 與波高計#4 之間。單條或雙條沙腸袋之設置，具有減衰近岸波浪之功效。

3.2 第四階段試驗 (24 個試次)

將第三階段所採用的 “現場 2m 高” 沙腸袋更換為 “現場 1.5m 高” 進行第四階段模型試驗，第四階段佈置與第三階佈置相同。將 “現場 1.5m 高” 沙腸袋雙條 (case1～case3) 與單條 (case4～case6) 分別放置在三種水深，以四種颱風波浪進行造波，24 個試次之試驗結果如表 4 所示。

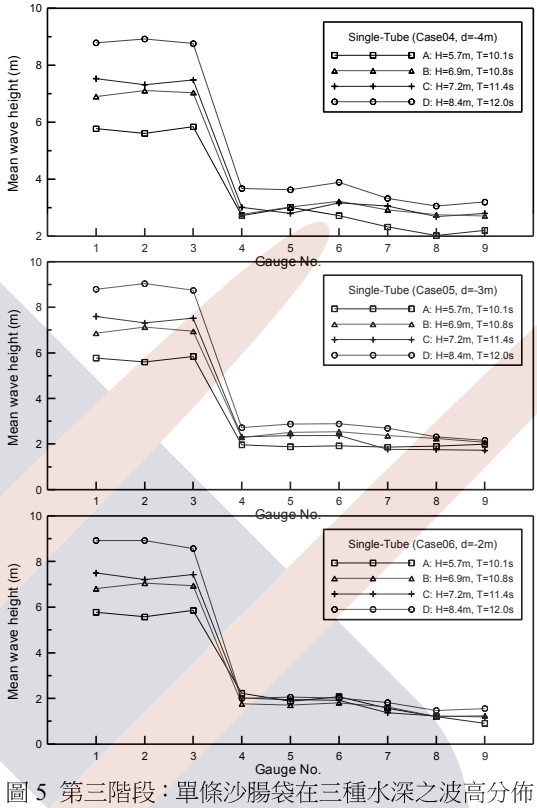

圖 5 第三階段：單條沙腸袋在三種水深之波高分佈

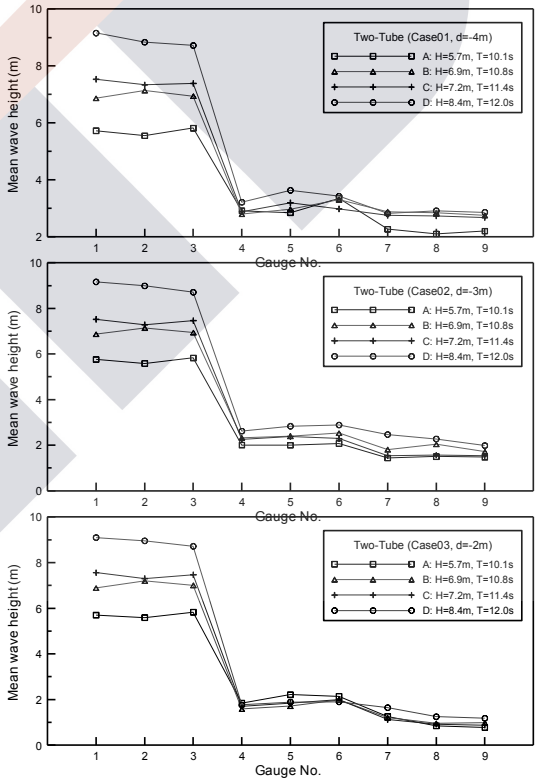

圖 6 第三階段：雙條沙腸袋在三種水深之波高分佈

由表 4 case1～case3 試驗結果顯示，除了 case2 第 4 試次 (H=8.4m、T=12.02s) 產生移動外 (如圖 7 所示)，其他 11 個試次在四種颱風波浪作用下都不會產生移動。由圖 7 照片可看出，“現場 1.5m 高” 沙腸袋雙條並未緊密靠攏下，在 50 年重現期颱風波浪作用下，在沙腸袋中間連接處產生 3cm 位移，換算成現場位移距離為 1.20 m。此結果說明 “現場 1.5m 高” 沙腸袋雙條並排的規模重量，可抵擋 50 年重現期颱風波浪，但佈置時需緊密並排。

由表 4 case4～case6 試驗結果顯示，12 個試次在四種颱風波浪作用下都產生移動 (如圖 8 所示)，換算成現場位移距離介於為 0.26~15.6 m。此結果說明 “現場 1.5m 高”沙腸袋單條的規模重量，並無法抵擋 50 年重現期颱風波浪作用而產生移動。

表 4 第四階段試驗結果 (現場 1.5m 高沙腸袋)

第四階段試驗	水深 (m)		波高 (m)		位移距離 (現場, m)
	現場	試驗	現場	試驗	
雙條 case1 (d=-10cm)	4	0.1	5.7	0.14	無
			6.9	0.17	無
			7.2	0.18	無
			8.4	0.21	無
雙條 case2 (d=-7.5cm)	3	0.075	5.7	0.14	無
			6.9	0.17	無
			7.2	0.18	無
			8.4	0.21	0.12
雙條 case3 (d=-5cm)	2	0.05	5.7	0.14	無
			6.9	0.17	無
			7.2	0.18	無
			8.4	0.21	無
單條 case4 (d=-10cm)	4	0.1	5.7	0.14	0.84
			6.9	0.17	2.44
			7.2	0.18	1.88
			8.4	0.21	15.60
單條 Case5 (d=-7.5cm)	3	0.075	5.7	0.14	0.26
			6.9	0.17	1.04
			7.2	0.18	0.52
			8.4	0.21	2.00
單條 case6 (d=-5cm)	2	0.05	5.7	0.14	0.60
			6.9	0.17	0.84
			7.2	0.18	0.40
			8.4	0.21	0.72

3.3 第五階段試驗 (12 個試次)

為改善第四階段採用 “現場 1.5m 高” 沙腸袋重量不足的現象，再將 “現場 1.5m 高” 沙腸袋單條覆蓋重量分佈在 2.5~20g (換算成現場 160~1280kg) 的塊石層，進行第五階段模型試驗。其中，0~2.5g、2.5~5.0g、5.0~7.5g、7.5~10g、10~20g 塊石重量所佔比率 (%) 各為 4.7、46.4、24.3、16.0、8.6。

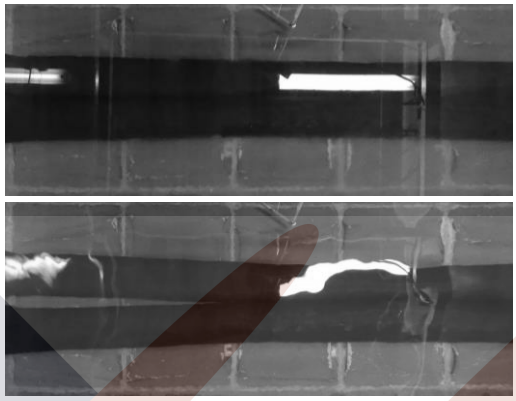

圖 7 第四階段試驗 case2 有產生位移之試次比較 (上圖造波前，下圖造波後)

圖 8 第四階段試驗 case4 有產生位移之試次比較 (上圖造波前，下圖造波後)

表 5 第五階段試驗結果 (現場 1.5m 高沙腸袋覆蓋塊石層)

第四階段試驗	水深 (m)		波高 (m)		位移距離 (現場, m)
	現場	試驗	現場	試驗	
雙條 case1 (d=-10cm)	4	0.1	5.7	0.14	無
			6.9	0.17	無
			7.2	0.18	無
			8.4	0.21	無
雙條 case2 (d=-7.5cm)	3	0.075	5.7	0.14	無
			6.9	0.17	無
			7.2	0.18	無
			8.4	0.21	無
雙條 case3 (d=-5cm)	2	0.05	5.7	0.14	無
			6.9	0.17	無
			7.2	0.18	無
			8.4	0.21	無

由表 5 case1～case3 試驗結果顯示，12 個試次在四種颱風波浪作用下沙腸袋都不會產生移動。但由圖 9 case3 在造波前後之位移比較照片可看出，“現場 1.5m 高” 沙腸袋所覆蓋的塊石層，在 50 年重現期颱風波浪作用下，4 個試次之表層塊石都有部分移動而露出沙腸袋的現象，經觀察移動塊石的重量分佈多在 6~10g (換算成現場 384~640kg)。此結果說明 “現場 1.5m 高” 沙腸袋若要覆蓋塊石層，其表層塊石重量至少要大於 10g (換算成現場 640kg)，才可能抵擋 50 年重現期颱風波浪作用而不移動。

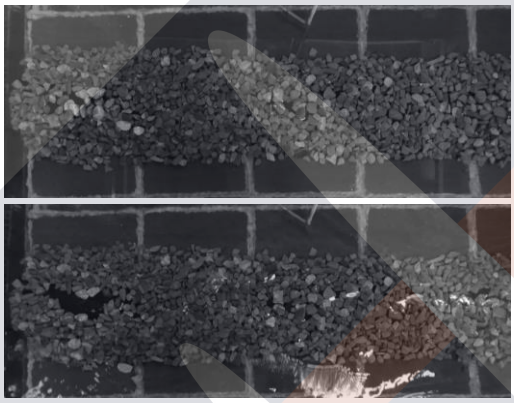

圖 9 第五階段試驗 case3 有產生位移之試次比較 (上圖造波前，下圖造波後)

圖 10 第六階段試驗 case4 有產生位移之試次比較 (上圖造波前，下圖造波後)

3.4 第六階段試驗 (24 個試次)

將第三階段所採用的 “現場 2.0m 高、60m 長” 沙腸袋更換為 “現場 2.0m 高、50m 長” 進行第六階段模型試驗，即將原沙腸袋試驗長度 1.5m (現場長度 60m) 改為 1.25m (現場長度 50m)，擺放至水槽中間未與邊界接觸。試驗結果顯示，24 個試次在四種颱風波浪作用下都產生移動 (如圖 10 所示)，換算成現場位移距離介於 0.84~12.7 m。此結果與第三階段試驗比較，若將沙腸袋現場長度由 60m 改為 50m，可能因總重量不足使得沙腸袋產生移動。

四、結論

將 “現場 1.5m 高、60m 長” 沙腸袋放置在三種水深、以四種颱風波浪作用：單條沙腸袋都會產生移動，移動距離與外海波浪尖銳度 (H_0/L_0) 呈現正相關的關係；雙條沙腸袋 (並排靠攏) 並不會產生移動。單條沙腸袋覆蓋塊石層，也不會產生移動。但表層塊石重量至少要大於 640kg，才可能抵擋 50 年重現期颱風波浪作用而不移動掉落。若改為 “現場 2m 高、60m 長” 沙腸袋放置在三種水深、以四種颱風波浪作用，則沙腸袋都不會產生移動。

佈置多條沙腸袋潛堤時，最好將沙腸袋並排靠攏，避免移動破壞整體功能。若將沙腸袋現場長度由 60m 改為 50m，可能因總重量不足使得沙腸袋產生移動。

謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「地工沙管應用於海岸保護」(編號 MOST 103－2622－E－110－013－CC3) 之研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. 湯麟武(1970)「淺灘海岸上波浪推算方法之研究」，*成功大學土木水利學術彙刊*，第 1 期，第 105-164 頁。
2. Pilarczyk, K.W. (editor) (1998) *Dikes and Revetments*, A.A. Balkema, Rotterdam.