

三維雷射掃描儀應用於臺中港漂沙試驗地形之量測分析技術

洪維屏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

摘要

本研究為探討臺中港區鄰近海域之漂沙影響，利用現場海氣象觀測及歷年水深地形資料分析以進行水工模型漂沙試驗，模擬未來 1 年、3 年臺中港外水深地形變化。以往本所試驗地形測量皆採水準測量，測量過程耗時且耗人力，且僅能就測量點位高程內插計算其他點位之高程，無法精確計算區域之土方量，此次嘗試以水準測量及三維雷射掃描儀應用於試驗地形量測，並將兩者測量數據進行比對，以確認三維雷射掃描儀可取代水準測量應用於後續之漂沙試驗，其相關技術及試驗成果將提供未來規劃港型試驗及防治對策試驗應用。

本研究三維雷射掃描儀量測成果平均測點間距約為 1.8cm，其和試驗模型固定物進行高程比對，測量精度皆優於 $\pm 5\text{mm}$ ；另和試驗地形水準測量之比對結果，其高程平均差值皆小於 $\pm 5\text{mm}$ 之精度差異值，可證明三維雷射掃描儀可取代水準測量施測方式，並可獲得高密度及高精度三維空間資訊，使傳統平面圖立體化，達到多功能使用之目的。

一、計畫緣起及目的

距離離岸風電最近的臺中港為一個國際商港，十大建設的重要項目之一，距離北部基隆港和南部高雄港各約 110 海里。港區總面積為 4,438 公頃，水域面積 958 公頃，陸地面積 3,480 公頃，也因其距離風場最近，定位為提供風機組裝碼頭及工作船靠泊母港，因此需模

擬臺中港未來近岸地形侵淤變化趨勢，以因應未來之所需。本計畫 107 年度進行臺中港漂沙預備試驗，以尋求模型與現場地形變化的重現時間，決定漂沙變化的時間比尺，提供本年度模擬臺中港未來近岸地形侵淤變化之參考依據，另以往漂沙試驗地形測量，皆以水準儀進行量測，耗時且耗人力，測量之點位不夠密集無法精確計算試驗區域之土方量，本年度也嘗試使用三維雷射掃描儀取代傳統水準儀應用於試驗地形量測。

二、水工模型試驗

本計畫之漂沙水工模型試驗於本所港研中心之第二試驗場棚進行，試驗項目為模擬未來臺中港區外地形侵淤變化，試驗設備、試驗條件及過程，詳述如下，試驗範圍如圖 1 所示。



圖 1 臺中港試驗範圍配置圖

2.1 試驗設備

本試驗於港灣技術研究中心第二試驗廠棚進行，相關設備與量測儀器說明如下：

1. 試驗水池：長 62m、寬 57m、深 1m，池內有潮汐控制系統。
2. 不規則造波機：本造波機係英國 HR Wallingford 公司出品之機械推移式不規則造波機及加拿大 DAVIS 公司出品之油壓推移式不規則造波機，各由四個獨立造波模組組成。利用電腦傳送數位訊號至控制器，再傳送至各造波機模組，可模擬規則波及多種波譜型態之不規則波。
3. 容量型波高計及資料擷取處理系統：波高計用於量測水位變化。透過資料擷取處理系統，波高計感應之波浪條件，經電腦分析後，選擇及修正需要的試驗波浪。
4. 水準儀：用以量測模型底床高程變化。

2.2 試驗條件

依據本所港研中心之現場觀測資料，擷取試驗所需部分進行分析，相關試驗條件包含試驗水位與試驗波浪等說明如下。

1. 試驗水位

臺中港附近海域之潮位統計資料如下：

最高潮位(H.H.W.L.) +6.00m

平均高潮位(M.H.W.L.) +4.61m

平均潮位(M.W.L.) +2.76m

平均低潮位(M.L.W.L.) +0.89m

考慮現場地形之長時間性變化，及季節風波浪與颱風波浪之不同情況，因此，試驗時，以 M.H.W.L.~M.L.W.L. (即+4.61m~+0.89m)作為季節風波浪作用時之變化水位；而以 H.H.W.L.~

M.W.L.(+6.00m~+2.76m)作為颱風波浪作用之變化水位。

2. 一般漂沙試驗佈置過程分為預備試驗與預定規劃港型探討其對未來港外地形變化影響之後續試驗等兩大部份，預備試驗為比較往昔已有之現場與模型試驗之地形變遷趨勢，用以尋求最佳的試驗重現時間，因此，試驗波浪即須配合現場地形資料的選取時間；而後續試驗則為預訂未來發生之情況，其試驗波浪則須以較長期之統計值作為參考資料。

後續試驗工作項目包含模擬未來臺中港區外之地形侵淤變化等，屬於未來可能發生之事項，因此試驗波浪條件採用本所長期統計資料(參考本所港灣海氣象觀測資料統計年報)，擬定為(1)冬季季風波浪，波高 2.15m，週期 7.5 秒，波向為 NNE 向。(2)夏季季風波浪，波高 0.87m，週期 6.5 秒，波向為 W 向。(3)颱風波浪，依表 1，考量模型試驗之累積誤差，僅選 5 年重現期之颱風波浪資料(依兩種計算方式之平均值)，波向選取 NNE 向，波高為 4.19m，週期 8.54 秒。

表 1 臺中港外海颱風波浪迴歸分析統計表

迴歸期	5 年		10 年		25 年	
	波高 (m)	週期 (sec)	波高 (m)	週期 (sec)	波高 (m)	週期 (sec)
NNE	4.19	8.54	4.75	9.09	5.46	9.59
N	4.85	9.19	5.50	9.78	6.32	11.16
NNW	5.15	9.46	5.84	10.08	6.70	11.50
NW	4.85	9.19	5.50	9.78	6.32	11.16
WNW	4.48	8.83	5.09	9.41	5.84	10.73
W	4.26	8.61	4.84	9.17	5.55	10.47
WSW	4.63	8.97	5.25	9.56	6.03	10.91
SW	5.07	9.39	5.75	10.00	6.61	11.41

2.3 試驗比尺

漂沙動床試驗中，試驗波浪比例尺的選擇適當與否，影響試驗結果的正確性甚巨。由於現場漂沙運移機制影響因素甚多，因此，往昔學者專家的研究成果亦莫衷一是，此情況如下表 2 所示。

表 2 漂沙動床模型相似律(摘自歐、許
港灣技術第一期, 1985)

作者	推導法則	N_T	N_H
Goddet 等人 (1960)	浪與流交互作用下底質運動條件相似	$\mu^{1/2}$	μ
Valembos (1960)	懸浮質運動條件相似	$\mu^{1/2}$	$\mu^{4/5}$
Yalin(1963)	因次分析	$\mu^{1/2}$	μ
Fan 等人 (1969)	底質運動條件相似	$\mu^{1/2}$	μ
Noda(1972)	底質運動條件相似	$\mu^{1/2}$	μ
Kamphuis (1972)	底質運動條件相似	$\mu^{1/2}$	μ
Dalrymple and Thompson (1976)	考慮參數 $H_0/\omega_0 T$ 之相似性	$\mu^{1/2}$	μ
樁木(1982)	考慮參數 u_w/ω_0 之相似性	$\mu^{1/2}$	μ
許泰文等人 (1985)	碎波帶內漂沙現象及地形變化性質相似	$N_r^{1/2} \cdot N_{D50}^{1/6} \cdot \mu^{1/5} \cdot \lambda^{2/15}$	N_T^2

參考上述學者之結果及本所港研中心往昔從事漂沙試驗之經驗，當從事臺

灣西部海岸地形變遷之水工模型試驗者，應用許泰文等人(1985)之模式可獲致較佳之試驗結果；若屬於臺灣東部地形者，則引用其他人之結果較為妥適。因此，本試驗之波浪比尺係採用許等人之模式比尺為：

$$\text{波高比尺, } N_H = \mu^{2/5} \lambda^{4/15} N_r N_{D50}^{1/3}$$

$$\text{週期比尺, } N_T = \mu^{1/5} \lambda^{2/15} N_r^{1/2} N_{D50}^{1/6}$$

$$= N_H^{1/2}$$

$$\text{潮汐比尺, } N_t = \lambda / (\mu)^{1/2}$$

式中 N_T ：波浪週期比尺， N_H ：波高比尺， μ ：垂直比尺， λ ：水平比尺， r ：底質比重， D_{50} ：底沙之中值粒徑。

從模型相似性觀之，應儘可能採用等比模型試驗，然而面臨包含廣大海域之海岸動床漂沙模型試驗，其水平方向與垂直方向無法採用同一比尺，否則在垂直比尺方面將因比尺太小，導致模型水深太淺與波高太小，因此必需採用平面方向與垂直方向比尺不同之歪比模型，一般動床試驗之水平方向與垂直方向比尺之比例不超過 1：6，且以 1：4 為佳。另外，為考量預定應用之現場範圍、試驗水池大小，及考慮應用上列公式與造波機造波能力，本試驗之水平與垂直比尺採用如下：

$$\text{水平比尺：} \quad \lambda = 1/300$$

$$\text{垂直比尺：} \quad \mu = 1/75$$

2.4 試驗步驟

有關預備試驗及模擬未來臺中港區外地形侵淤變化試驗皆依循下列之步驟進行：

1. 於預備試驗之模型鋪設前，先行檢驗試驗波高、週期。由於各項試驗配置之造波時間長，波浪經地形反射結果，入射波高可能受影響而改變，因此於試驗中每隔 30 分鐘取其 2 分鐘造波資料分析，調整修正入射波高(H)與週期(T)。

2. 鋪設各種試驗配置相對應之現場地形，作為模型試驗之初期地形。
3. 於模型鋪設完畢後，先行造波 5 分鐘讓地形勻稱，再量測地形變化視為造波前之初期地形，爾後再依試驗條件造波，並於各時段中量測地形變化情況，量測時則將試驗水池水放掉，避免標桿之沉陷以減低量測之誤差。
4. 依各種試驗配置需求，於適當時間量測一次地形變化，予與現場地形作一比較。

三、三維雷射掃描儀進行試驗地形量測

以往試驗地形測量皆採水準測量，測量過程耗時且耗人力，本研究嘗試以三維雷射掃描儀應用於試驗地形量測，並將測量資料和水準測量結果進行比對，相關作業方法、精度分述如下。

3.1 作業方法及步驟

1. 地面三維雷射掃描儀又稱地面光達(terrestrial lidar)，或稱三維影像掃描儀(3D image scanner)由於可藉由細緻掃描將現場實體物精密紀錄三維數據，依獲取之高密度數據數據便可還原現場實景可稱為逆向工程儀，掃描儀是由伺服馬達驅儀器本體作水平與垂直旋轉，設定參數控制雷射光掃描方向，由儀器本體或透過 Wi-Fi 技術同步傳輸至電腦記錄水平及垂直掃描數據，相當是一部自動高密度觀測之全測站式電子經緯儀。
2. 3D 雷射掃描儀，可迅速測得現地即時的 3D 環場資料，宛若一部立體的彩色影印機一樣，可以快速而完整地將建築物現場以雷射點雲的方式數位保存在電腦中，保留所有物件的尺寸、位置、坐標、方向等幾何關係，並可產生 CAD 圖檔或進行物件模型化。
3. 作業方式為使用地面 3D 雷射掃描儀進行結構物掃描作業，取得結構物三維點雲資料，經過內業處理套疊、清除雜訊後，可以獲得相關之三維點雲數位模型，並由模型上量得精確之相關尺寸，以製作三維建物模型。
4. 本研究採用 RIEGL VZ-1000 多波段三維雷射掃描儀(如表 3)，本機水平轉動角度為 360 度，垂直轉動角度為 100 度，三維雷射掃描儀可將整個測區進行高密度掃描；並在測站與測站之間自動計算形成共軛面，將不同測站所收集到的點雲資料加以套合、分析，並將不同角度之掃描結果連接，以便獲得更詳盡之地貌狀況。
5. 在掃描工作完成後，配合專用的後續處理軟體，利用中值(Median)法來濾除雜訊以達到平滑化，過濾植被並清除地上物後，參考控制點的坐標進行坐標轉換，即可得到地物的絕對坐標值。
6. 雷射掃描儀的掃描原理為計算飛行時間法(Time-of-flight)，即利用計算雷射撞擊待測點反射回感應器之往返飛行時間求得掃描頭至待測點之距離觀測量，據此計算待測點之坐標位置，此法與傳統的測量儀器之測距儀有相同之原理。
7. 掃描成果提供真實色彩、灰階及反射訊號強度三種點雲資料成果。
8. 3D 雷射掃描作業步驟說明如下：
 - (1) 規劃掃描測站位置，以達到最大通視及最大掃描範圍為主，減少設站數目，並方便後續測量之擺站位置。若於車輛可到達之處，則以行動掃描測量車以油壓桿將掃描儀升高，以獲得最佳視角及通視情況。
 - (2) 各站之間放置三個以上的共軛掃描 Target(覘標)，擺設以前後

左右上下均勻分布，且須前後站均能看到為原則。掃瞄 Target 擺設位置須至少一次。

(3) 儀器架設需定心、定平，掃瞄完場景及 Target 後，轉站並重複上述步驟至掃瞄完畢。

(4) 三維掃瞄獲得點雲資料後，經過內業處理套疊、清除雜訊後，可以獲得相關之三維點雲數位模型、相關尺寸的獲取及數位模型資料。

9. 點雲掃瞄坐標系統與地面坐標轉換精度分析:以本工程所使用之掃瞄設備，需將後視之三個共軌掃瞄 Target 賦予指定之坐標系統坐標值，便可藉由坐標轉換模式進行掃瞄之假設坐標系統與圖根點之坐標系統進行轉換，並進行轉換精度分析，檢核方式可利用結構中明顯特徵物體於系統中量測其長寬是否達到作業要求。3D 雷射掃瞄作業流程及資料處理流程如圖 2 及圖 3 所示。

表 3 RIEGL VZ-1000 3D 瞄儀器規格表

項 目	規 格	儀器照片
測距範圍	有效掃瞄距離 2.5m ~ 1400m (80% 反射率) 使用一級雷射 Laser Class 1	
測距精度	5mm	
測量速率	125,000 點/秒	
掃瞄視角 (FOV)	360°(水平) x 100°(垂直)	
相機	內建 1,200 萬畫素可自動率定重疊影像之同軸全彩 (True Color) 數位相機，將點雲上彩，提高掃瞄成果逼真度	
操作方式	可自由選取掃瞄的範圍以及掃瞄密度	

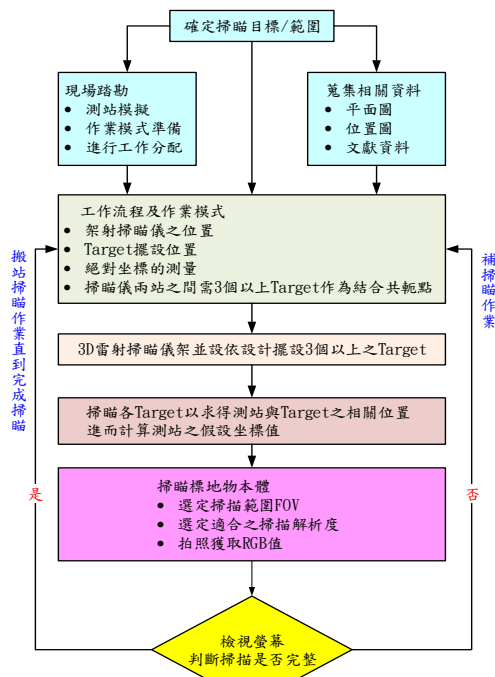


圖 2 地面 3D 雷射掃瞄外業工作流程圖

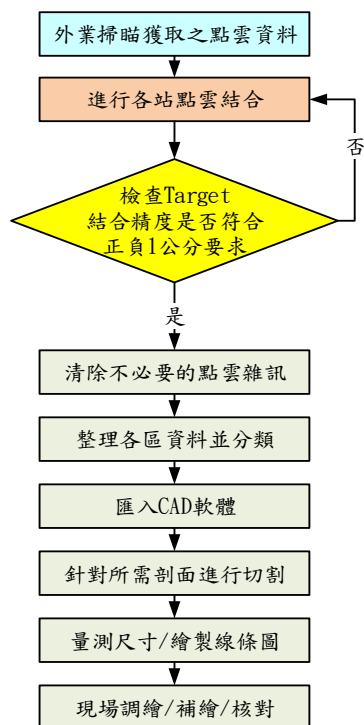


圖 3 3D 雷射掃瞄資料處理流程圖

3.2 試驗地形現況量測作業程序

地面三維雷射掃描儀進行地形量測作業必須經由下依程序獲取掃描成果：

1. 控制測量：控制測量(如圖 4)的目的是提供測區高精度之地理坐標資料，供地面雷射掃描儀測量反射覘標轉換空間坐標。

- (1) 傳統平面控制法(本案使用方法)：本法適用於建築群或隧道等處，通常是於對空良好空曠處，先以 GPS 靜態測量測定二組可通視之點對共四點，作為控制基準，再以全測站式電子經緯儀以導線法進行由起始點對開始測量，閉合於終點點對，控制測量成果供地面雷射掃描儀架設反射覘標用以轉換空間座標。
- (2) 掃描儀軸心定位法：本法適用於野外空曠處，是於掃描儀頂端安裝菱鏡或衛星定位儀，再利用經緯儀或衛星定位儀以 RTK(即時定位系統)定位方式求取掃描站坐標，作為多站結合後轉換依據。
- (3) 全測站經緯儀臨時控制點(如圖 5)及 UAV(空拍機)輔助標測量計算：本案控制點座標成果是以全測站經緯儀配合光線法計算座標搭配電子水準儀獲取高程成果如表 4 所示。



圖 4 水工模型控制點測量情形

表 4 水工模型控制點坐標成果表

點名	縱坐標	橫坐標	高程
A	9999.645	4983.346	0.441
B	10000.000	5000.000	0.084
C	10045.197	5024.275	0.486
A1	9982.351	4966.551	1.281
A2	9993.324	5004.331	2.947
A3	10026.832	5017.533	2.933
A4	10058.461	5001.418	1.290
B01	9999.202	4998.817	0.079
B02	10001.791	5000.274	0.078
B03	9998.272	5001.090	0.087
B04	10002.010	5002.495	0.084
B05	10002.474	5003.825	0.084
B06	10004.463	5004.488	0.081
B07	10009.690	5004.303	0.089
B08	10006.618	5006.109	-0.196
B09	10009.143	5006.263	0.081
B10	10009.725	5007.547	0.077
B11	10012.530	5008.606	0.079
B12	10013.642	5007.614	0.075
B13	10014.045	5010.257	0.075
B14	10017.790	5011.677	0.079
B15	10021.879	5009.083	0.084
B16	10025.219	5004.380	0.087
B17	10024.838	5010.775	0.073
B18	10023.461	5013.686	0.083
B19	10030.606	5014.735	0.094
B20	10027.637	4996.063	0.303
B21	10004.784	4986.462	0.294



圖 5 現場水工模型控制點

2. 地面掃描與多站結合：於測區架設三維雷射掃描儀將整個測區進行高密度掃描(如圖 6)，掃描站之架設以能盡量目視測區無阻礙遮蔽之地理位置為佳，並採多站掃描方式避免同向方位陰影過多，掃描站各站結合方式採規標結合法與地物特徵(共軛三角)結合法。

- (1) 規標結合法(如圖 7):掃描同時於相鄰兩站架設 4 組以上控制規標，並於相鄰站對此規標進行細緻掃描，利用相鄰控制規標之幾何對應關係進行結合如圖 8 所示。
- (2) 地物特徵結合法：掃描完成後將各測站所收集到的點雲資料加以計算求出可利用之共軛三角中心，再將相鄰站資料加以比對向量關係進行匹配完成多站結合。



圖 6 3D 雷射掃描作業情況

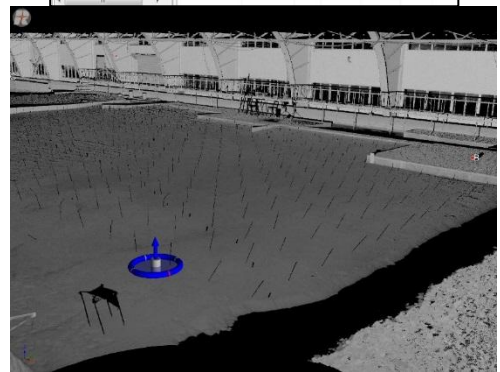
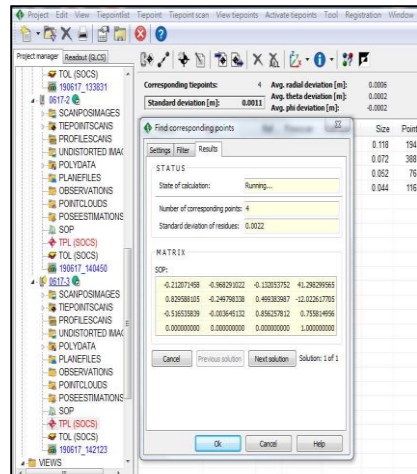


圖 7 利用規標結合法控制結合精度優於 5mm

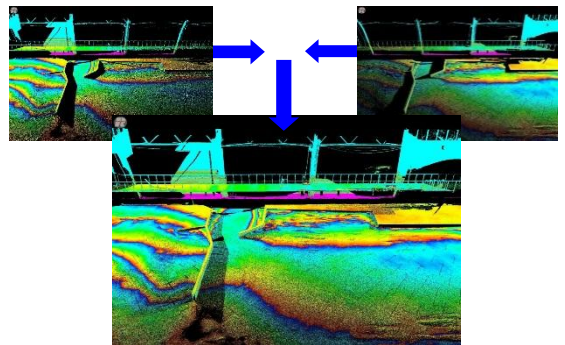


圖 8 掃描站結合影像

3. 點雲資料過濾分析：掃描外業完成後將不同測站所收集到的點雲資料結合完成後，利用多重回波(Full Wave form)的特性，過濾地表植被及隆起

物體求取原地面高程點，以便獲得更詳盡之地貌狀況(如圖 9)，特別是野外陡峭山壁利用此項技術省去砍伐林木及除草作業，兼具環保安全及便利性。

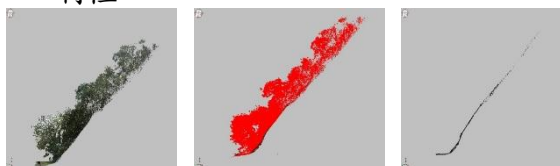


圖 9 點雲資料過濾分析

4. 轉出 DEM(數值地形模型資料)成果：當過濾地表程序完成求取原地面點成果後，輸入各規標之地理坐標值藉由此坐標值轉換矩陣，完成坐標對位與轉換工作轉出 DEM 成果繪製地形圖。
 - (1) 系統轉換：輸入現場水工模型控制點座標，將成果資料附合並藉由已知固定座標轉換成果。
 - (2) 座標輸出：將轉換完成之點雲資料輸出成原始光達點雲資料、2cm 間距之 DEM 成果。
 - (3) 地形圖轉換：將測量成果轉換成圖面 AutoCAD 並繪製 2cm 等高線間距之地形圖。
 - (4) 完成數值地形圖：結合上述高程點、等高線、結構物及控制點後，即可產製本次測量成果地形圖。
5. 傳統地形測量僅以單調的線繪製平面地形圖，測量成果利用者對其施工區域土地與結構物之空間位置關係較難連結。藉由 3D 雷射掃描技術測量可獲得高密度及高精度三維空間資訊，使傳統平面圖立體化，達到多功能使用之目的。

3.3 地面光達掃描精度檢核

各次地面光達成果平均測點間距約為 1.8cm，皆優於平均測點間距需小於 2 cm 之規範。利用不同測次之地面光達成

果資料，於岸上不受實驗影響之固定物附近進行高程比對，其結果如表 5 所示，各次測量精度皆優於 $\pm 5\text{mm}$ 。

表 5 地面光達和固定物高程精度檢核

檢測日期	檢測點號	已知高程(m)	點雲成果(m)	差值(m)
2019/05/21	B02	0.078	0.081	0.003
2019/05/21	B04	0.084	0.087	0.003
2019/05/21	B09	0.081	0.084	0.003
2019/05/30	B02	0.078	0.078	0.000
2019/05/30	B04	0.084	0.084	0.000
2019/05/30	B09	0.081	0.081	0.000
2019/06/05	B02	0.078	0.082	0.004
2019/06/05	B04	0.084	0.088	0.004
2019/06/05	B09	0.081	0.084	0.003

3.4 地面光達掃描與水準儀施測精度檢核

本案水工模型試驗地形測量採用地面光達掃描方式施測共計 8 次，將其成果與水準儀施測方式進行比對(如表 6)，其高程平均差值皆小於 5mm 之精度差異值，可證明地面光達方式可取代水準儀施測方式，且可取得更高解析度及整體完整資訊之地形資料。

表 6 地面光達精度檢核

地面光達施測日期	水準儀施測日期	比較點數	平均差值(mm)
05/22	05/21	303	0.9
05/30	05/30	219	1.3
06/05	06/04	229	1.3
06/13	06/12	230	1.4
06/17	06/18	228	3.2
08/29	08/28	222	0.9
09/05	09/04	226	1.9
09/20	09/23	227	3.7

四、未來臺中港近岸水深地形模擬

依據 107 年度預備試驗求出冬季季風波浪作用下，累積試驗時間 8 小時可重現冬季期間之現場地形變化；夏季季風波浪作用 3 小時，再施以颱風波浪作用 30 分鐘，最後再進行 3 小時之夏季季風波浪作用，其整個試驗累積時間可重現夏季期間之現場地形變化，以下進行未來 1 年、3 年臺中港港外水深地形模擬，相關試驗條件、試驗原則與試驗過程，分述如下。

4.1 試驗條件與佈置

本次試驗目的為預定未來發生之情況，故試驗地形參照 108 年 5 月臺中港港外水深地形測量資料進行鋪設；試驗波浪則須以較長期之統計值作為參考資料，其中水位和預備試驗相同，冬季及夏季季風波浪為參考本所出版之港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)，另颱風波浪資料則參考臺中港外海颱風波浪 5 年迴歸分析統計表，取最常發生之波向 NNE 之值，有關本次試驗之現場與試驗模型之各項物理量換算，如表 7 所示。

4.2 未來 1 年及 3 年試驗模擬結果

應用預備試驗所獲得冬、夏季期間之地形重現時間的試驗結果，再依上述試驗條件，進行模擬未來 1 年及 3 年之地形變化比較。由於現場初期地形資料為 108 年 5 月，因此，試驗波浪即以夏季波浪作為開始，後再以冬季波浪作用後，量測試驗地形的變化情況，作為試驗 1 年的比較資料。為避免試驗地形之累積誤差，本項試驗僅進行相當現場地形變化 3 年之試驗時間。本次試驗後之地形嘗試以三維雷射掃描方式施測，並

將測量結果進行地形侵淤分析。本文繪製模擬 1 年後之地形變化侵淤比較圖、模擬 1 年及 3 年後之地形變化侵淤比較圖、模擬 3 年後之地形變化侵淤比較圖，如圖 10~12 所示。

表 7 臺中港近岸水深地形模擬試驗條件

物理量	比尺	類別		現場	試驗
水平比尺	1/300				
垂直比尺	1/75	潮位	季風	+4.61 ~ +0.89 m	+6.15 ~ +1.19 cm
			颱風	+6.00 ~ +2.76 m	+8.00 ~ +3.68 cm
波高	1/25.74	冬季波浪		2.15 m	8.35 cm
		夏季波浪		0.87 m	3.38 cm
		颱風波浪		4.19 m	16.28 cm
週期	1/5.07	冬季波浪		7.5 秒	1.48 秒
		夏季波浪		6.5 秒	1.28 秒
		颱風波浪		8.5 秒	1.68 秒
潮汐比尺	1/34.6	半日潮		12hr	20.8min

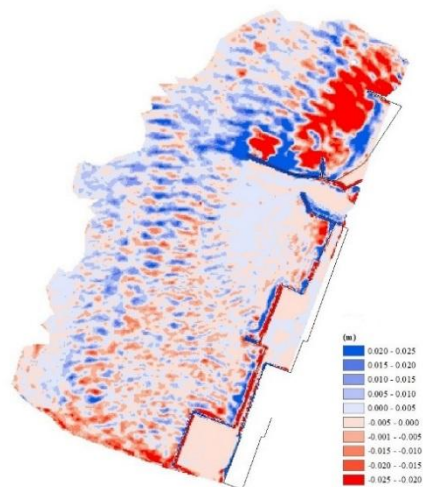


圖 10 模擬 1 年地形變化侵淤比較圖

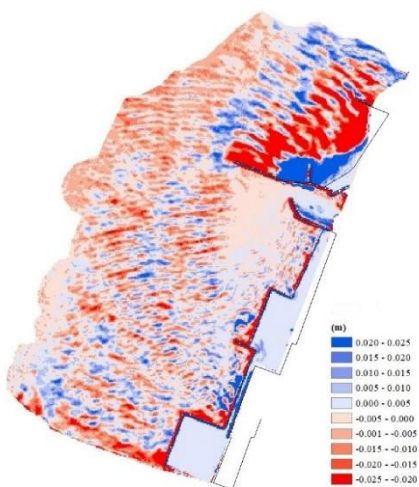


圖 11 模擬 1 年及 3 年之地形變化侵淤比較圖

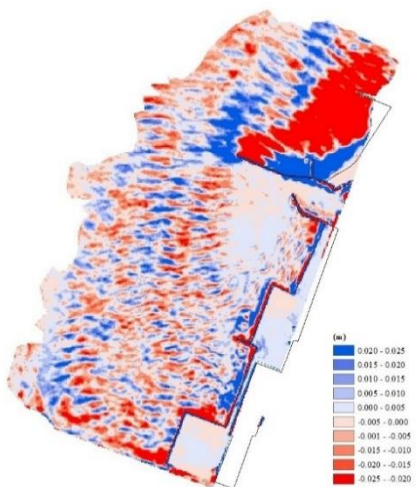


圖 12 模擬 3 年地形變化侵淤比較圖

圖中數值網格大小採用 0.1m 進行繪製，其中藍色為淤積(正值)，紅色為侵蝕(負值)。由圖 10~圖 12 可知模擬結果整區皆呈現侵淤互現，於臺中港北防波堤以北至北防沙堤北側，高程-0.23m 以淺的近岸地形變化皆較大，而北防波堤以南至石化專區北側，高程-0.24m 以淺的近岸地形變化皆較小。

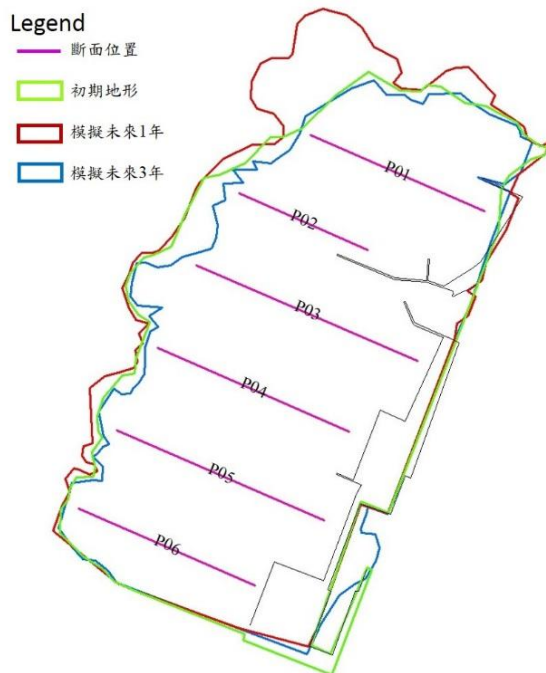


圖 13 斷面位置圖

為避免地形侵淤圖因內插造成之誤判，及瞭解實際侵淤變化，接著進行水深地形斷面之繪製與分析，將測量成果網格化處理後再擷取相關斷面水深資料進行比對，以每隔約 6 公尺繪製一條斷面，共繪製 6 條斷面，斷面位置及坐標如圖 13 及表 8 所示。

表 8 斷面位置坐標

編號	斷面起點		斷面終點	
	X	Y	X	Y
P01	5014.750	10028.348	5002.376	10033.768
P02	5006.447	10025.616	4997.326	10029.622
P03	5010.017	10017.737	4994.258	10024.548
P04	5005.151	10012.740	4991.511	10018.653
P05	5003.364	10006.407	4988.608	10012.809
P06	4998.441	10001.799	4985.877	10007.241

斷面一（圖 14）：起點位於北防沙堤以南約 2.00 公尺；距斷面起點 0.000 至 5.860 公尺，高程由-0.001m 降至-0.278m，坡度約 4.73/100，距斷面起點 5.860 至 13.509 公尺地形較為平緩高程由-0.278m 降至-0.356m，坡度約 1.02/100。

初始地形與模擬未來 1 年相比較，距斷面起點 0.298 至 4.668 公尺高程-1.192m 處呈現約 0.068m 的侵蝕，距斷面起點 4.867 至 6.854 公尺高程-0.242 ~ -0.299m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.016m。

模擬未來 1 年與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.000 至 2.384 公尺高程 0m 處呈現約 0.068m 的侵蝕，距斷面起點 3.178 至 4.172 公尺高程-0.164 ~ -0.201m 處呈現約 0.021m 的侵蝕，距斷面起點 4.370 至 5.860 公尺高程-0.214 ~ -0.278m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.022m。

初始地形與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.000 至 4.470 公尺高程-1.192m 處呈現約 0.072m 的侵蝕，距斷面起點 4.569 至 6.059 公尺高程-0.217 ~ -0.286m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.037m。

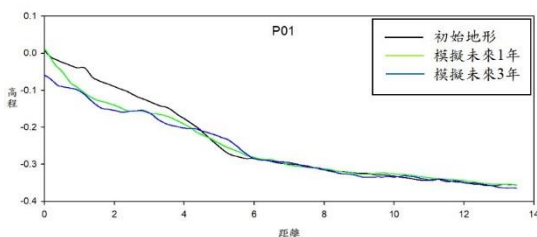


圖 14 斷面 P01 地形變化圖

斷面二（圖 15）：起點位於北防波堤以北約 1.12 公尺；距斷面起點 0.000 至 5.878 公尺，高程由-0.167m 降至-0.341m，坡度約 2.96/100，距斷面起點 5.878 至 9.962 公尺地形平緩，高程由-0.341m 降至-0.347m，坡度約 0.15/100。

初始地形與模擬未來 1 年相比較，距斷面起點 0.000 至 2.092 公尺高程-0.498m 處呈現約 0.060m 的侵蝕，距斷面起點 2.291 至 4.483 公尺高程-0.266~-0.321m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.029m。

模擬未來 1 年與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.000 至 2.789 公尺高程-0.167~-0.260 m 處呈現約 0.027m 的侵蝕，距斷面起點 2.989 至 4.383 公尺高程-0.272~-0.318 m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.011m。

初始地形與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.000 至 2.391 公尺高程-0.398m 處呈現約 0.070m 的侵蝕，距斷面起點 2.590 至 4.383 公尺高程-0.281~-0.319 m 處呈現淤積，淤積幅度最大不超過 0.031m。

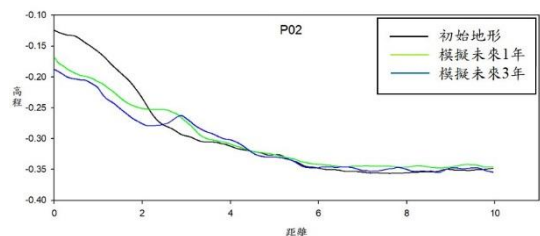


圖 15 斷面 P02 地形變化圖

斷面三（圖 16）：起點位於南防波堤以南約 2.25 公尺；距斷面起點 0.000 至 1.996 公尺，高程由-0.074m 降至-0.122m，坡度約 2.4/100，距斷面起點 1.996 至 3.194 公尺地形較陡，高程由-0.122m 降至-0.181m，坡度約 4.92/100，距斷面起點 3.194 至 17.168 公尺又變平緩，高程由-0.181m 降至-0.356m，坡度約 1.25/100。

初始地形與模擬未來 1 年相比較，距斷面起點 8.883 至 10.081 公尺高程-0.251~-0.270m 處呈現約 0.011m 的侵蝕，距斷面起點 12.976 至 15.171 公尺高程-0.327~-0.344m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.015m。

模擬未來 1 年與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.200 至 0.599 公尺高程-0.082~-0.083m 處呈現約 0.012m 的淤積，距斷面起點 7.686 至 16.070 公尺高程-0.243~-0.343 m 處大致上呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.014m。

初始地形與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.299 至 0.998 公尺高程-0.080~-0.092m 處呈現約 0.011m 的淤積，距斷面起點 9.083 至 12.377 公尺高程-0.254~-0.315m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.018m，距斷面起點 13.275 至 14.074 公尺高程-0.330~-0.335 m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.017m。

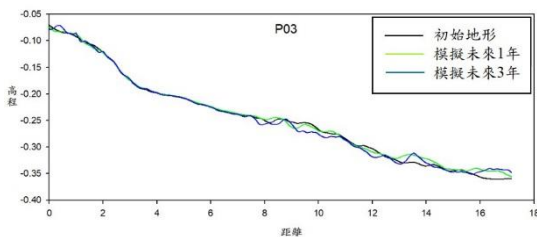


圖 16 斷面 P03 地形變化圖

斷面四（圖 17）：起點位於臺中港石化專區外；距斷面起點 0 至 6.585 公尺地形平緩，高程由-0.178m 降至-0.236 m，坡降約 0.88/100，距斷面起點 6.585 至 14.866 公尺，高程由-0.236m 降至-0.335m，坡降約 1.2/100。

初始地形與模擬未來 1 年相比較，距斷面起點 2.394 至 3.592 公尺高程-0.202~-0.205m 處呈現約 0.013m 的淤積，距斷面起點 6.086 至 10.276 公尺高程-0.226~-0.286m 處大致上呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.015m，距斷面起點 12.172 至 13.369 公尺高程-0.292~-0.306 m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.012m。

模擬未來 1 年與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 2.195 至 2.494 公尺高程-0.205~-0.192 m 處呈現約 0.015m 的侵蝕，距斷面起點 3.392 至 3.991 公尺高程-0.205~-0.208 m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.017m，距斷面起點 8.979 至 10.376 公尺高程-0.278~-0.283 m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.015m，距斷面起點 11.274 至 13.269 公尺高程-0.283~-0.299 m 處大致上呈現侵蝕，侵蝕幅度不超過 0.011m。

初始地形與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 1.896 至 2.394 公尺高程-0.199~-0.202m 處呈現約 0.018m 的侵蝕，距斷面起點 2.494 至 3.292 公尺高程-0.205~-0.206m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.017m，距斷面起點 4.789 至 8.081 公尺高程-0.215~-0.269m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.023m。

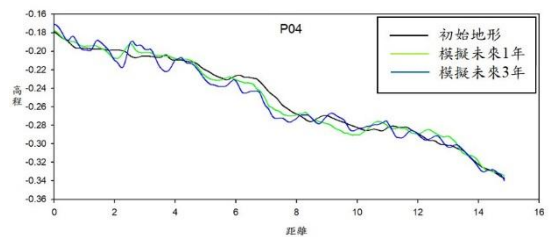


圖 17 斷面 P04 地形變化圖

斷面五（圖 18）：起點位於臺中港石化專區以南約 3.33 公尺；距斷面起點 0 至 13.088 公尺地形平緩，高程由-0.154m 降至-0.259m，坡降約 0.8/100，距斷面起點 13.088 至 16.085 公尺地形較陡，高程由-0.259m 降至-0.337m，坡降約 2.6/100。

初始地形與模擬未來 1 年相比較，距斷面起點 1.798 至 3.297 公尺高程-0.196~-0.206m 呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.010m，距斷面起點 10.690 至 11.589 公尺高程-0.270~-0.268m 處呈現約 0.012m 的淤積，距斷面起點 11.989 至 13.188 公尺高程-0.272~-0.264m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.016m。

模擬未來 1 年與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 4.696 至 5.595 公尺高程-0.227~-0.231m 處呈現約 0.015m 的侵蝕，距斷面起點 6.094 至 7.593 公尺高程-0.227~-0.248m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.016m，距斷面起點 10.390 至 12.289 公尺高程-0.272~-0.263m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.014m。

初始地形與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 4.596 至 5.595 公尺高程-0.2

21~-0.226m 處呈現約 0.020m 的侵蝕，距斷面起點 6.094 至 7.093 公尺高程-0.227~-0.242m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.016m，距斷面起點 10.490 至 13.288 公尺高程-0.267~-0.262m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.024m。

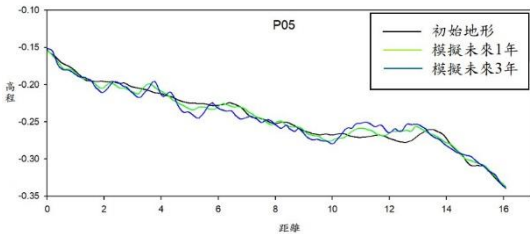


圖 18 斷面 P05 地形變化圖

斷面六（圖 19）：起點位於臺中港南填方區外海；距斷面起點 0 至 9.794 公尺地形平緩，高程由-0.194m 降至-0.260m，坡降約 0.67/100，距斷面起點 9.794 至 13.692 公尺地形較陡，高程由-0.260m 降至-0.361m，坡降約 2.59/100。

初始地形與模擬未來 1 年相比較，距斷面起點 6.996 至 8.195 公尺高程-0.278~-0.256m 處呈現約 0.022m 的淤積，距斷面起點 8.295 至 8.495 公尺高程-0.255~-0.255m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.011m。

模擬未來 1 年與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.000 至 0.999 公尺高程-0.194~-0.199m 處呈現約 0.021m 的淤積，距斷面起點 1.299 至 6.396 公尺高程-0.201~-0.260m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大 0.023m，距斷面起點 6.596 至 7.096 公尺高程-0.271~-0.257m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.017m，距斷面起點 9.994 至 11.194 公尺高程-0.268~-0.281m 處呈現淤積，淤積幅度不超過 0.017m。

初始地形與模擬未來 3 年相比較，距斷面起點 0.000 至 0.999 公尺高程-0.190~-0.201m 處呈現約 0.016m 的淤積，距斷面起點 1.999 至 6.496 公尺高程-0.207~-0.261m 處呈現侵蝕，侵蝕幅度最大

0.025m，距斷面起點 6.696 至 7.696 公尺高程-0.270~-0.259m 處呈現淤積，淤積幅度最大 0.022m，距斷面起點 9.894 至 12.293 公尺高程-0.269~-0.316m 處呈現淤積，淤積幅度最大不超過 0.017m。

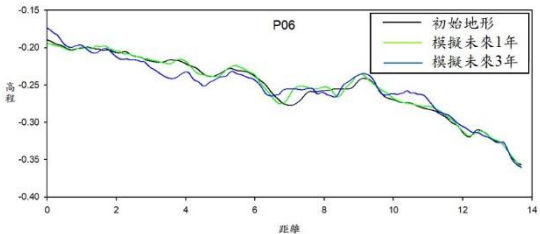


圖 19 斷面 P06 地形變化圖

各斷面侵淤變化最大值彙整於表 9，斷面 P01 及 P02 的變化較大，侵淤變化範圍約高程 0.037 ~ -0.072m，斷面 P03 的侵淤變化範圍約高程 0.017~ -0.018m，斷面 P04 至 P06 的侵淤變化範圍約高程 0.024~ -0.025m。

表 9 各斷面侵淤變化最大值

斷面	模擬 1 年後地形&初始地形		模擬 1 年後地形&模擬 3 年後地形		模擬 3 年後地形&初始地形	
	淤積最大 值(m)	侵蝕最大 值(m)	淤積最大 值(m)	侵蝕最大 值(m)	淤積最大 值(m)	侵蝕最大 值(m)
P01	0.016	0.068	0.022	0.068	0.037	0.072
P02	0.029	0.06	0.011	0.027	0.031	0.07
P03	0.015	0.011	0.012	0.014	0.017	0.018
P04	0.013	0.015	0.015	0.017	0.017	0.023
P05	0.016	0.01	0.014	0.016	0.024	0.02
P06	0.022	0.011	0.022	0.025	0.021	0.023

五、結論

依據 108 年 5 月初始地形模擬 1 年後之地形變化顯示，臺中港北淤沙區近岸部分呈現淤積情形，向外海的部分則變為侵蝕掏刷情形，北防波堤堤基區域則整體呈現淤積現象，並於堤頭部分出現掏刷情形，而在北防波堤及南防波堤間之地形則無明顯之變化；南防波堤至

南填方區間於近岸部分皆為淤積之情形，外海部分則呈現侵淤互現之沙連情形；模擬 3 年後之地形變化顯示，北淤沙區至北防波堤三角區域呈現明顯淤積情形，而後向外海側則變呈現明顯侵蝕之變化，但在更外海處則又呈現淤積之情形，而臺中港南側防波堤整體呈現淤積情形，而在臺中港南側靠近大肚溪處所呈現之掏刷侵蝕情形，推估是因為模型試驗區域邊緣所造成之現象，另將 3 年與 1 年之試驗結果相比，北淤沙區淤積區域擴大，向外海側則變為侵蝕掏刷，臺中港南側防波堤淤積情形更為明顯。

本年度水工模型試驗地形測量嘗試採用地面光達掃描方式施測，其成果與水準儀施測方式進行比對，並利用不同測次之地面光達成果資料，於岸上不受試驗影響之固定物附近進行高程比對，其高程平均差值皆小於 5mm 之精度差異值，由此可證明地面光達方式可取代試驗地形以水準儀施測方式，日後漂沙試驗地形以光達施測可節省時間及人力。

6. 吳孟姍、陳國威、黃振全(2013)，地面式三維雷射掃描於野溪地形監測之應用，財團法人中華水土保持學會 102 年度年會。

六、參考文獻

1. 歐善惠、許泰文(1985)，傾斜海灘上之海岸動床模型相似律，港灣技術第一期。
2. 張富東、廖慶堂(1995)，布袋港客貨碼頭擴建水工模型試驗研究報告，專刊 102 號，交通部運輸研究所。
3. 成功大學水工試驗所(2000)，台灣西南部海岸海灘斷面調查與沉積物特性研究，成功大學水工試驗所。
4. 許泰文等(2005)，海岸開發後對地形變遷影響機制分析研究，經濟部水利署水利規劃試驗所。
5. 何良勝、蔡金吉、林受勳、江玟德等(2009)，布袋港港型規劃與漂沙互制現象研究，交通部運輸研究所。