

澎湖港設計水位之探討

林達遠¹ 柯拓宇²

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心 副研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心 研究助理

摘要

本研究以澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭為研究區域，探討該港設計水位(離島高程系統)，首先針對湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭之 2020 年 1 月至 2024 年 11 月逐時潮位資料進行調和分析，並引用陳(2024)研究成果，將暴潮偏差代入計算設計水位，及利用歷年觀測最高水位進行機率分布分析所得結果進行比較，期獲得一可做為港埠整建規劃參考之結果。

一、前言

為提供臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、臺中港、澎湖港、馬祖港及金門港船舶停靠、船舶進出、碼頭作業、港區工程、港區結構物設計、防災預警等所需相關資料，交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)已於各港附近海域設置長期性潮位觀測系統，並提供即時潮位觀測資訊及年度特性分析報告予相關單位應用。

運研所自民國 75 年起陸續於臺灣各港建置長期性潮位觀測站，以 24 小時不間斷運作，持續自動化蒐集並提供即時觀測資訊，惟設備因長期處於潮濕、溫差大及高鹽度環境，需定期辦理設備汰換更新，各港觀測設備於建置完成後每 3~4 個月執行設備維護保養，以維持觀測系統效能及觀測資料品質。

本研究係配合臺灣港務股份有限公司委託代管觀測站之相關計畫，持續更新及維運各主要商港潮位觀測系統，並強化資料品管機制，以及利用所蒐集資料進行加值應用統計分析供外界參考應用。選擇澎湖港(含馬公碼頭及龍門尖山碼頭)為主要研究區域，進行碼頭設計水位(以離島高程系統)之探討，做為未來船舶航行管理、港區營運管理及港灣規劃建設等應用。

二、現場觀測系統

2.1 觀測儀器

本研究潮位資料係採用類比壓力式水位計觀測潮位，量測頻率為 1Hz，觀測頻率則以 6 分鐘紀錄 1 筆水位資料(每 6 分鐘量測水位之平均值，共計 360 筆量測水位之平均值)，透過無線傳輸系統，將水位資料即時回傳至運研所海氣象資料庫，圖 1 為類比壓力式水位計示意圖、圖 2

為現場潮位觀測系統架構示意圖，圖 3 為澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位觀測系統現場照片。



圖 1 類比壓力式水位計示意圖

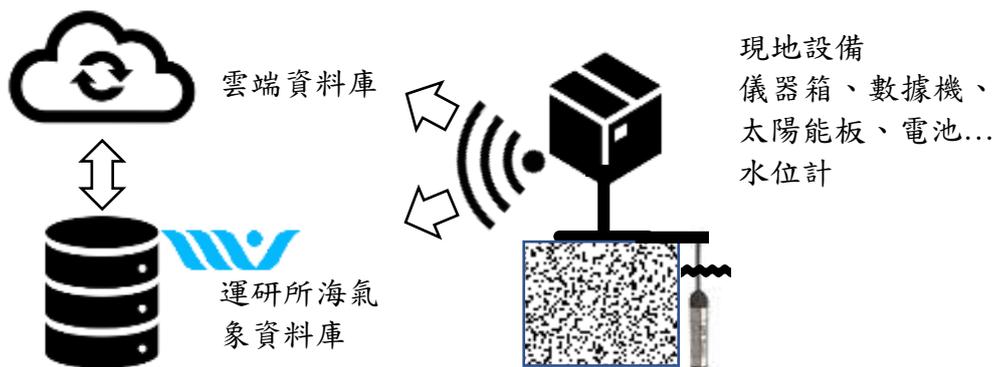


圖 2 現場潮位觀測系統架構示意圖

		
馬公碼頭潮位站 PHTD03 及 PHTD04	龍門尖山碼頭潮位站 PHTD02	龍門尖山碼頭潮位站 PHTD05

圖 3 澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位觀測系統現場照片

2.2 離島高程系統

民國 109 年運研所引測內政部所公告之離島一等水準點至澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位觀測系統之控制點，得知該控制點高程 (TGB)，再向上量測出控制點與靜水管頂部之高程差 KP ，接著向下量測出靜水管頂部與壓力式水位計之高程差 (RP)，計算出壓力式水位計量測感應器(SENSOR)之高程值 (RL)，最後利用壓力式水位計所量測水深值 (h)，即可換算得到離島

系統之潮位值 (η)，其表示式如式(1)所示，圖 4 為離島高程系統觀測基準轉換示意圖，表 1 為澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位觀測系統高程轉換一覽表。

$$\eta = TGB + KP - RP + h = RL + h \quad (1)$$

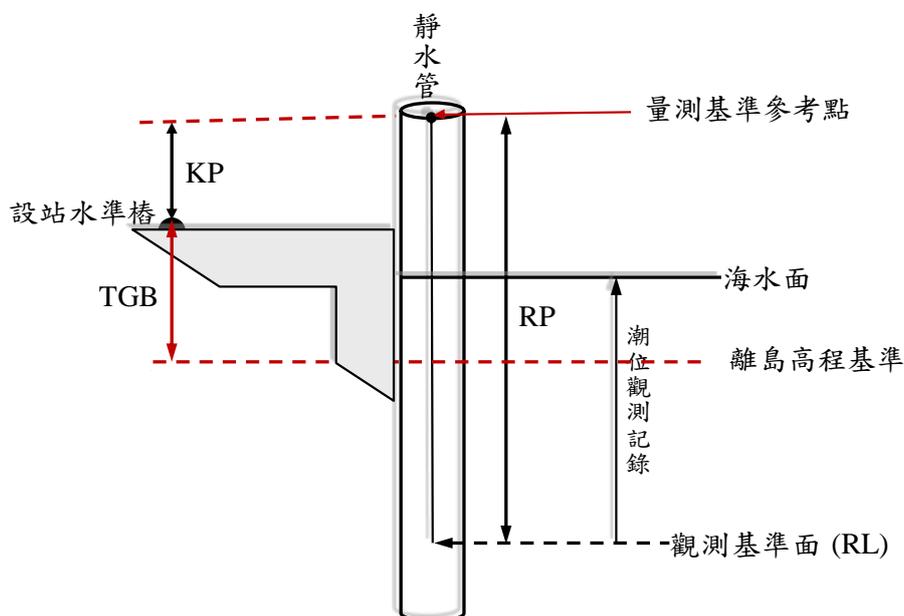


圖 4 離島高程系統觀測基準轉換示意圖

表 1 澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位觀測系統高程轉換一覽表

碼頭	測站編號	控制點編號	TGB(m)	KP(m)	RP(m)	RL(m)
馬公碼頭	PHTD03	NO.08	2.112	0.198	4.70	-2.390
	PHTD04	NO.08	2.112	0.222	6.77	-4.436
龍門尖山碼頭	PHTD02	TIDE-16	2.052	0.157	6.68	-4.471
	PHTD05	NO.07	2.141	0.218	5.89	-3.531

三、研究方法

3.1 資料品管

本研究潮位觀測資料品管係參考 IOOS 水位觀測即時品管控制手冊，根據合理性、連續性與關聯性三個原則辦理，其中合理性主要依據壓力式水位計量測範圍與物理上的限制而訂定；連續性則是依據相鄰資料應呈平緩變化為原則，並依據機率理論訂定通過(或異常)門檻；近年，因氣候變遷而有短時間之極端事件發生；因此，須藉由比對及參考鄰近測站建立相關式，再依信賴區間訂定通過(或異常)之門檻，避免前述極端資料誤刪，並可作為相互補遺之依據。據此，本計畫擬訂的潮位資料自動品管作業程序，如圖 5 所示。最終，再輔以人工檢視方式做進一步之確認。相關品管程序說明如下：

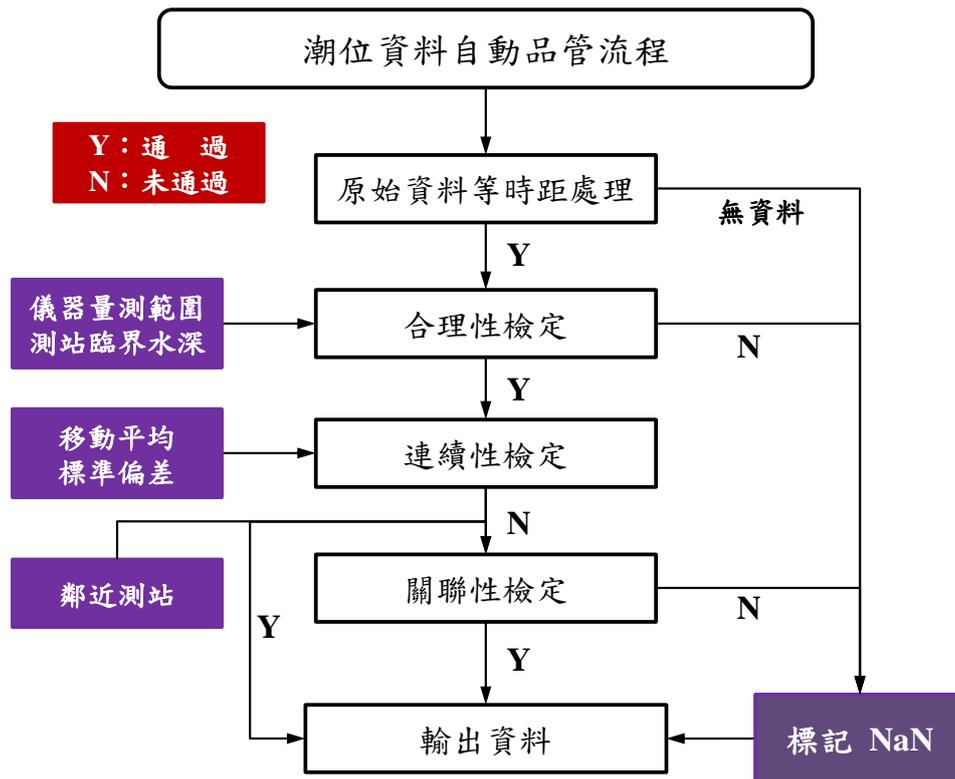


圖 5 潮位觀測資料自動品管流程圖

3.2 設計水位

本研究依據「港灣構造物設計基準草案」，設計潮(水)位係做為港灣設施之結構設計與穩定分析計算的基礎，其根據含有天文潮(Astronomical tides)及暴潮(Storm surge)等異常水位之實測值或推算值予以決定。其中，天文潮位統計分析至少須有適當期間(1年以上)之實測記錄，經由調和分析後，可求得各分潮之振幅，並預測 19 年之潮位變化值進行統計，以獲得最高高潮位、大潮平均高潮位、平均高潮位、平均潮位、平均低潮位、大潮平均低潮位及最低低潮位等。相關天文潮位之統計定義如下：

(1) 最高高潮位 (Highest Astronomical Tides, H.A.T.)：選取至少 1 年之實測記錄，經由調和分析預測 19 年之潮位變化，其推算之最高水位為天文潮最高高潮位。

(2) 大潮平均高潮位 (High Water of Ordinary Spring Tides, H.W.O.S.T.)：每次大潮(朔望日前 2 日至後 4 日內)發生最高高潮位之平均值。

(3) 平均高潮位 (Mean High Water Level, M.H.W.L.)：所有高水位之平均值。

(4) 平均潮位 (Mean Water Level, M.W.L.)：實測潮位之平均值。

(5) 平均低潮位 (Mean Low Water Level, M.L.W.L.)：所有低水位之平均值。

(6) 大潮平均低潮位 (Low Water of Ordinary Spring Tides, L.W.O.S.T.)：每次大潮(朔望日前 2 日至後 4 日內)發生最低潮位之平均值。

(7) 最低低潮位 (Lowest Astronomical Tides, L.A.T.): 選取至少 1 年之實測記錄, 經由調和分析後, 預測 19 年之潮位變化, 其推算之最低水位為天文潮最低低潮位。

在暴潮水位方面, 為推算颱風而造成之暴潮水位, 潮位觀測期間, 愈久愈具代表性, 但實際上具長期驗潮記錄之港口非常罕有, 故一般採用電腦數值模式推算, 或併用其他方法加以檢討, 如查閱以往異常高潮災害報告、報紙、文獻資料或藉訪談了解以往災害情況等。決定含暴潮位之設計水位可採用下列四種方法:

- (1) 使用過去觀測之最高水位, 或此水位再加餘裕。
- (2) 大潮平均高潮位加上過去觀測最高或以模型颱風預測之暴潮偏差。
- (3) 分析長期 (30 年以上) 之潮位紀錄, 算出各迴歸期之潮位, 就設施目的及特性, 選取適當迴歸期設計水位。
- (4) 根據經濟因素、各種暴潮位發生機率、各種潮位在背側造成之破壞及工程費等條件決定設計潮位。

四、結果與討論

4.1 調和分析

本研究使用澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位系統之 2020 年 1 月至 2024 年 11 月逐時潮位資料進行調和分析, 並利用調和分析結果, 預測澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭 2025 年 2~3 月之逐時水(潮)位與實際觀測值進行比較驗證。

表 2 及表 3 分別為澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮汐主要分潮參數表。由表 2 可知, 馬公碼頭潮位觀測系統 PHTD03 及 PHTD04 所得結果相近, 皆以 M2、S2、K1、O1 及 N2 等五種分潮為主要構成, 其中 M2 分潮佔比最大, 主要決定潮汐變化趨勢, 其振幅約為 0.95 公尺, 若以 Defant (1961) 所提出潮型指標 F 計算可得, 馬公碼頭潮汐屬以半日潮為主之混合潮型。在龍門尖山碼頭方面, 潮位觀測系統 PHTD02 及 PHTD05 所得結果亦相近, 皆以 M2、K1、S2、O1 及 N2 等五種分潮為主要構成, 同樣以 M2 分潮佔比最大, 其振幅約為 0.80 公尺, 惟 K1 分潮振幅略大於 S2 分潮振幅, 該碼頭潮汐亦屬以半日潮為主之混合潮型。

圖 6~圖 9 分別為各潮位觀測系統調和分析預測值與實際觀測值之比較歷線圖, 其中實線為實際觀測值, 圓點為調和分析預測值。由圖中可看出, 調和分析預測值與實際觀測值在大潮期間滿潮與乾潮時, 其誤差量較大, 在中小潮期間, 其準確度較佳, 各潮位觀測系統調和分析預測值與實際觀測值之相關係數 R 及均方根誤差 $RMSE$ 分別為 PHTD03: $R=0.9904$ 及 $RMSE=0.1081m$; PHTD04: $R=0.9916$ 及 $RMSE=0.1057m$; PHTD02: $R=0.9895$ 及 $RMSE=0.0939m$; PHTD05: $R=0.9894$ 及 $RMSE=0.0974m$;

表 2 澎湖港馬公碼頭潮汐主要分潮參數表(2020/1~2024/11)

測站編號	PHTD03			PHTD04		
	分潮	振幅(cm)	遲角(deg)	分潮	振幅(cm)	遲角(deg)
1	M2	95.2215	322.8679	M2	95.3172	322.7459
2	S2	25.4633	12.9005	S2	25.5383	12.83798
3	K1	24.5523	279.6244	K1	24.6089	279.784
4	O1	21.1511	237.8838	O1	21.1913	237.9136
5	N2	17.6589	299.0768	N2	17.6639	298.3999
6	Sa	8.3865	172.4974	Sa	9.9859	176.3041
7	P1	7.8987	274.8815	P1	7.9056	275.6522
8	K2	7.5329	11.2334	K2	7.4186	10.38778
9	M4	7.2697	297.8667	M4	7.2661	297.4364
10	nu2	5.1506	300.1423	nu2	5.1286	299.1901

表 3 澎湖港龍門尖山碼頭潮汐主要分潮參數表(2020/1~2024/11)

測站編號	PHTD02			PHTD05		
	分潮	振幅(cm)	遲角(deg)	分潮	振幅(cm)	遲角(deg)
1	M2	80.2909	316.0299	M2	80.3749	316.5801
2	K1	22.5814	277.0764	K1	22.6023	276.8253
3	S2	20.8216	4.440319	S2	20.9120	4.626506
4	O1	19.5061	234.9041	O1	19.6891	234.7253
5	N2	14.9871	290.2663	N2	14.9846	290.4642
6	Sa	9.0820	167.4935	Sa	10.1113	163.0312
7	P1	7.0598	273.449	P1	7.1613	273.2797
8	K2	5.9803	2.074895	K2	6.0845	2.416692
9	L2	4.3554	350.8578	M4	4.3422	304.3706
10	M4	4.3290	302.1287	nu2	4.3121	292.7246

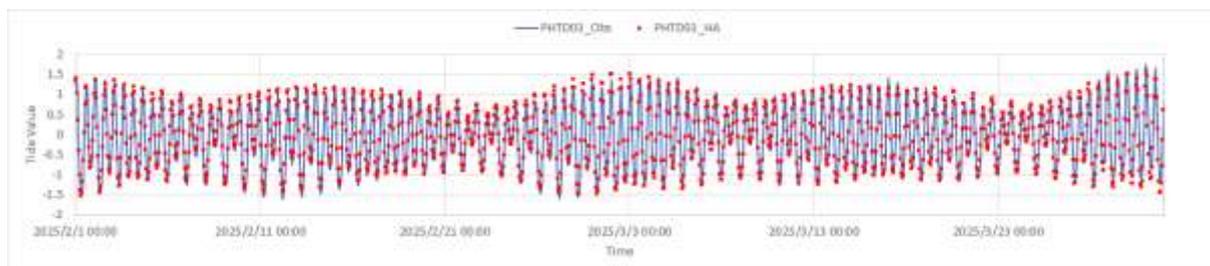


圖 6 馬公碼頭潮位觀測系統 PHTD03 調和分析預測值與實際觀測值之比較歷線圖

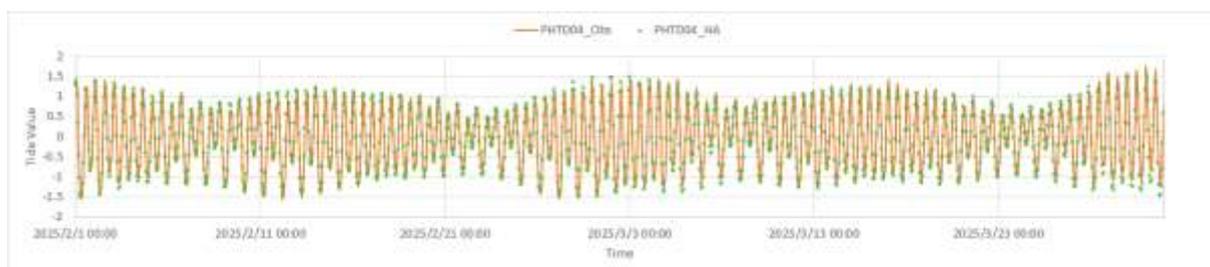


圖 7 馬公碼頭潮位觀測系統 PHTD04 調和分析預測值與實際觀測值之比較歷線圖

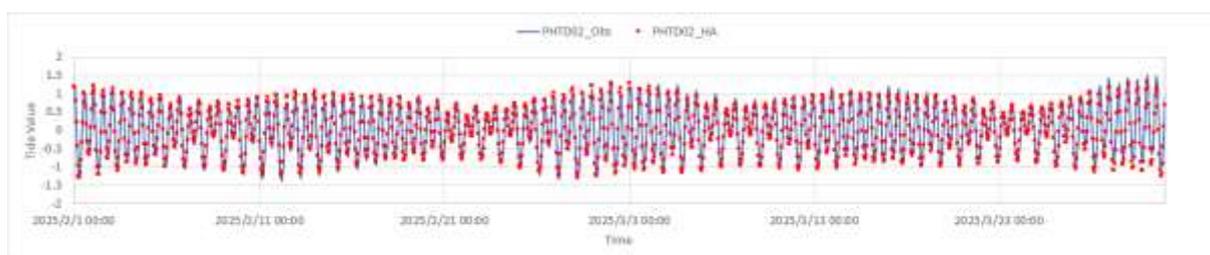


圖 8 龍門尖山碼頭潮位觀測系統 PHTD02 調和分析預測值與實際觀測值之比較歷線圖

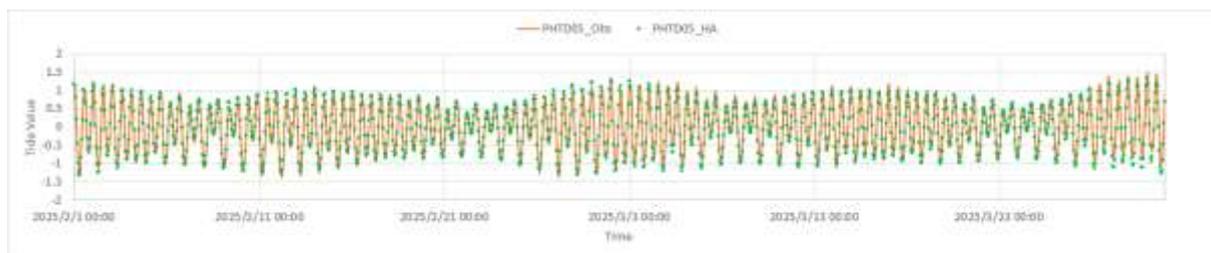


圖 9 龍門尖山碼頭潮位觀測系統 PHTD05 調和分析預測值與實際觀測值之比較歷線圖

4.2 天文潮位

利用上述各潮位觀測系統觀測資料調和分析結果，進行 19 年天文潮位變化之預測，並將預測結果進行統計分析，以獲得最高高潮位、大潮平均高潮位、平均高潮位、平均潮位、平均低潮位、大潮平均低潮位及最低低潮位等，表 4~表 5 為澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭天文潮位統計表。馬公碼頭平均潮差約為 1.98 公尺，平均潮位為 0.03 公尺，平均高潮位為 1.11 公尺，平均低潮位為-0.87 公尺，大潮平均高潮位 1.38 公尺，大潮平均低潮位為-1.37 公尺，最高高潮位為 1.79 公尺，最低低潮位為-1.72 公尺，最大潮差約為 3.15 公尺。龍門尖山碼頭平均潮差約為 1.67 公尺，平均潮位為 0.07 公尺，平均高潮位為 0.96 公尺，平均低潮位為-0.71 公尺，大潮平均高潮位 1.18 公尺，大潮平均低潮位為-1.17 公尺，最高高潮位為 1.55 公尺，最低低潮位為-1.51 公尺，最大潮差約為 2.70 公尺。

表 4 澎湖港馬公碼頭天文潮位統計表

潮位名稱	潮位統計值(cm)	
	PHTD03	PHTD04
最高高潮位(H.A.T.)	178.21	179.67
大潮平均高潮位(H.W.O.S.T.)	137.71	137.61
平均高潮位(M.H.W.L.)	111.35	110.86
平均潮位(M.W.L.)	3.52	2.88
平均低潮位(M.L.W.L.)	-87.36	-88.08
大潮平均低潮位(L.W.O.S.T.)	-136.91	-137.66
最低低潮位(L.A.T.)	-172.15	-172.82
平均潮差(M.R.)	198.71	198.94
最大潮差(M.T.R.)	314.51	314.69

表 5 澎湖港龍門尖山碼頭天文潮位統計表

潮位名稱	潮位統計值(cm)	
	PHTD02	PHTD05
最高高潮位(H.A.T.)	153.04	155.23
大潮平均高潮位(H.W.O.S.T.)	118.39	118.48
平均高潮位(M.H.W.L.)	96.47	95.83
平均潮位(M.W.L.)	7.87	7.19
平均低潮位(M.L.W.L.)	-71.01	-71.84
大潮平均低潮位(L.W.O.S.T.)	-116.66	-117.49
最低低潮位(L.A.T.)	-149.14	-151.29
平均潮差(M.R.)	167.47	167.67
最大潮差(M.T.R.)	267.00	269.87

4.3 設計水位

首先使用「港灣構造物設計基準草案」所提出方法(2)「大潮平均高潮位加上過去觀測之最高暴潮或以模型颱風預測之暴潮」，該方法所述之「暴潮」，應是指「暴潮偏差」，即受氣象因素影響之異常水位與當時之天文潮位之高差。本研究引用陳 (2024)之研究成果，利用中央氣象署及水利署潮位站之觀測資料，扣除調和分析所計算天文潮位，求得各測站歷史颱風之暴潮偏差，進而計算獲得各地區不同重現期之暴潮偏差，其中馬公碼頭各重現期之最大暴潮偏差，如表 6 所示。最終，各重現期之最大暴潮偏差加上前節統計分析所得之大潮平均高潮位，可得馬公碼頭之設計水位，如表 7 所示。

本研究亦使用「港灣構造物設計基準草案」所提出方法(3)「分析長期 (30 年以上)之潮位紀錄，算出各迴歸期之潮位，就設施目的及特性，選取適當迴歸期設計水位。」，進行設計水位推算，表 8 係整理中央氣象署及運研所馬公潮位站歷年(1991~2024 年)最高水位一覽表，經計算偏態函數為 0.199，資料分佈屬右偏態，選擇對數皮爾森三型分佈 (Log Pearson Type III distribution)，進行不同重現期之最高水位分析，表 9 為馬公碼頭各重現期最高水位一覽表。

目前我國一般港灣構造物大多以 50 年為設計重現期，本研究以「港灣構造物設計基準草案」所提出方法(2)，推算結果為 2.271 公尺，以方法(3)推算結果為 2.025 公尺，兩者差距為 0.246 公尺，造成此差異原因尚待進一步釐清。

表 6 馬公碼頭各重現期最大暴潮偏差一覽表

重現期(年)	5	10	20	25	50	100
最大暴潮偏差(m)	0.704	0.768	0.825	0.845	0.894	0.933

表 7 馬公碼頭各重現期設計水位一覽表

測站編號	各重現期之設計水(潮)位(m)					
	5 年	10 年	20 年	25 年	50 年	100 年
PHTD03	2.081	2.145	2.202	2.222	2.271	2.310
PHTD04	2.080	2.144	2.201	2.221	2.270	2.309

表 8 馬公潮位站歷年最高水位一覽表(1991~2024 年)

年度	最高水位(m)	年度	最高水位(m)	年度	最高水位(m)
1991	1.49	2003	1.66	2015	2.05
1992	1.87	2004	1.57	2016	1.56
1993	1.45	2005	1.53	2017	1.77
1994	1.65	2006	1.7	2018	1.68
1995	1.4	2007	1.63	2019	1.79
1996	1.86	2008	1.61	2020	1.83
1997	1.7	2009	1.71	2021	1.88
1998	1.61	2010	1.61	2022	1.61
1999	1.69	2011	1.78	2023	1.99
2000	1.7	2012	1.92	2024	1.74
2001	1.7	2013	1.83		
2002	1.65	2014	1.42		

*資料來源：中央氣象署馬公潮位站及運研所(離島高程系統)。

表 9 馬公碼頭各重現期最高水位一覽表

重現期(年)	5	10	20	25	50	100
最大水位(m)	1.822	1.894	1.955	1.973	2.025	2.072

五、結論與建議

本研究利用「港灣構造物設計基準草案」所提方法進行澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭設計水位之估算工作，首先利用天文潮位調和分析加上暴潮偏差進行統計分析，再者利用歷年觀測最高水位進行機率分布分析，歸納結論與建議如下：

1. 本研究使用澎湖港馬公碼頭及龍門尖山碼頭潮位系統之 2020 年 1 月至 2024 年 11 月逐時潮位資料進行調和分析，馬公碼頭潮位以 M2、S2、K1、O1 及 N2 等 5 種分潮為主要構成，其中 M2 分潮佔比最大，龍門尖山碼頭潮位亦以 M2、K1、S2、O1 及 N2 等五種分潮為主要構成，同樣以 M2 分潮佔比最大，其振幅約為 0.80 公尺，惟 K1 分潮振幅略大於 S2 分潮振幅，兩處潮汐皆為以半日潮為主之混合潮型。
2. 利用調和分析結果，進行 19 年天文潮位變化之預測，並將預測結果進行統計分析，馬公碼頭平均潮差約為 1.98 公尺，平均潮位為 0.03 公尺，平均高潮位為 1.11 公尺，平均低潮位為-0.87 公尺，大潮平均高潮位 1.38 公尺，大潮平均低潮位為-1.37 公尺，最高高潮位為 1.79 公尺，最低低潮位為-1.72 公尺，最大潮差約為 3.15 公尺。龍門尖山碼頭平均潮差約為 1.67 公尺，平均潮位為 0.07 公尺，平均高潮位為 0.96 公尺，平均低潮位為-0.71 公尺，大潮平均高潮位 1.18 公尺，大潮平均低潮位為-1.17 公尺，最高高潮位為 1.55 公尺，最低低潮位為-1.51 公尺，最大潮差約為 2.70 公尺。
3. 引用陳 (2024)之研究成果，將暴潮偏差代入計算設計水位，並與利用歷年觀測最高水位進行機率分布分析所得結果比較，設計重現期為 50 年，天文潮位調和分析加上暴潮偏差推算結果為 2.271 公尺，利用歷年觀測最高水位進行機率分布分析推算結果為 2.025 公尺，兩者差距為 0.246 公尺，造成此差異原因尚待進一步釐清，本研究之統計分析結果目前僅供港埠整建規劃參考使用，建議後續仍須持續進行潮位觀測，以獲得長期之潮位資料，期能進一步得到一可信度更佳之結果。

參考文獻

1. Defant, A. (1961). Physical oceanography, Vol. 2, Pergamon, New York.
2. 郭一羽、湯麟武、陳陽益、張憲國、蔡清標、許泰文等人 (2001)，海岸工程學，文山書局。
3. 胡啟文、賴瑞應、張欽森、陳建中、張徐錫、張文奐、林俊達、李礎栢、劉晉庭、陳亞嵐、莊家碩 (2019)，港灣構造物設計基準相關條文修訂，交通部運輸研究所。
4. 陳筱婕 (2024)，臺灣颱風暴潮統計特性分析，國立臺灣海洋大學。