

花蓮海岸公路人定勝天路段之海岸防護探討

陳冠宇¹ 劉俊志² 蔡立宏³ 林雅雯⁴
陳鈞彥⁵ 陳人玉⁶

¹ 國立中山大學海洋科學系教授
² 國立中山大學海洋科學系助理研究員
³ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
⁴ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
⁵ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
⁶ 國立中山大學海洋科學系研究助理

摘要

颱風引起的暴潮和長浪易對臺灣東部海岸公路的通行安全造成威脅，有必要加強海岸防護設施。而保護工法除了防災之外，尚須兼具海岸資源永續發展的概念以及對自然環境的保護。本文探討以離岸潛堤作為海岸防護的措施，使用 COBRAS 垂直 2 維模式來模擬長浪經過離岸潛堤後衝擊海岸公路的情境，並分析長浪溯上對台 11 線人定勝天路段 7 處斷面造成的地表最大壓力。藉由探討潛堤設置在 5 種地形水深條件的情境，比較道路附近的地表最大壓力與無潛堤情況下的差異，提供海岸防護的初步評估。另外利用 XBeach 模式模擬 7 處斷面外海各建立 1 座潛堤時的浪襲情境，比較不同潛堤配置方式在道路附近區域承受的最大波壓差異。

一、前言

2015 年蘇迪勒颱風和 2018 年潭美颱風所引起的長浪造成台 11 線花蓮海岸公路路基流失；2016 年梅姬颱風期間，台 11 線人定勝天路段出現浪花夾帶碎石波及道路路面的情形。由於人定勝天路段(里程約 61K 至 63K)離海岸近，較易於颱風期間受長浪的影響，為公路總局公布之浪襲路段，故此路段道路邊坡的堤趾保護有其必要性。

過去臺灣沿岸已有眾多離岸堤的設置案例，例如屏東縣林邊鄉崎峰村、東港鎮鎮海公園以及車城鄉福安宮北側等海岸區域因沙灘逐年受到侵蝕，故以離岸潛堤的工法進行沙灘保護，透過消弱波浪能量來降低沙灘受到波浪的直接衝擊，同時讓海灘兼具海岸景觀、生態保育及親水性等功能性。在高雄市旗津海岸線監測計畫中，根據近 10 年資料顯示流失沙灘縱深約 50 至 150 公尺之間，為改善沙灘流失的情況，高雄市政府於旗津海水浴場到風車公園之間的海岸區域，配置 2 座人工灣澳潛堤、8 座離岸潛堤及 1 座離岸堤，而花蓮海岸在南濱、北濱和化仁等區域建立多座離岸潛堤，因潛堤處於適當的水深，除了削減波浪能量，亦兼具人工魚礁的效果。上述案例所蒐集的潛堤設計相關參數如表 1。

表 1 潛堤設計相關參數(EL 為平均海水面)

地點	離岸距離(m)	堤頂高程(m)	堤頂寬度(m)	側邊坡度	海床高程(m)	堤長(m)	間距(m)
東港溪與林邊溪 出海口間	140-180	EL-0.1 至-0.5	5.1	無資料	-3 至-3.5	60	60
東港鎮鎮海公園附近	150-170	EL-0.5	10	無資料	-2.9 至 3.6	104.2	20
花蓮化仁	135	EL-0.5	10	1:1.5	-5.3 至-7	80	30
花蓮南濱	135	EL-0.5	10	1:1.5	-6.3 至-6.7	80	無資料
旗津南離岸潛堤	約 30 至 400	EL-4	25	1:2	-7 至-9	300	150
屏東縣福安宮海岸	150	EL-0.5	11.43	1:2	-4	180	11

二、人定勝天路段情境模擬

2.1 模式介紹

COBRAS (COrnell BReaking wave And Structure)流體模式主要求解 Raynolds Averaged Navier Stokes (RANS)方程式，並結合非線性 k-ε 紊流模式計算紊流動能 k 及紊流消散率 ε。模式特徵包括以流體體積法(Volume of Fluid, VOF)來描述流體在自由表面的變化。另外可按研究的需求在不同區域設定可變的網格解析。根據模式的輸出結果可得知模擬過程中的壓力、渦度、紊流黏滯力、動能、紊流消散、流速、自由表面變化、質量守恆或和水漫(overtopping)的體積。

2.1.1 RANS 控制方程式

在二維不可壓縮且黏性流動之牛頓流體假設條件下，其 RANS 控制方程式如下：

連續方程式：

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中 i 和 j =1 或 2，分別代表水平與垂直方向。u_i 代表第 i 個方向分量的流速。ρ 和 p 各為密度和壓力。g_i表示第 i 個方向分量的重力加速度。τ_{ij}為黏滯應力。⟨⟩ 符號代表時間平均。另外：

$$\langle \tau_{ij} \rangle = 2\mu S_{ij} + \rho \langle u'_i u'_j \rangle \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

其中 μ = νρ 為動力黏滯係數，而 ν 為動能黏滯係數，S_{ij} 為剪應變率張量，u'_i 和 u'_j 各代表流速在 i 和 j 方向分量的瞬時擾動量，⟨ u'_i u'_j ⟩ 為雷諾應力(Reynolds stress)。

2.1.2 k-ε 紊流模式

k-ε 紊流閉合模式的控制方程如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u'_i \rangle}{\partial x_j} - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + 2C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S_{ij} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

其中 $k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle$ 為紊流動能 (turbulence kinetic energy)， $\epsilon = \nu \langle \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)^2 \rangle$ 為紊流消散率 (turbulence dissipation rate)， $\nu_t = C_d \frac{k^2}{\epsilon}$ 為渦流黏度 (eddy viscosity)。而 $C_d = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{7.4 + S_{\max}} \right)$ ， $S_{\max} = \frac{\epsilon}{k} \max \left(\left| \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right| \right)$ 。

根據 Rodi (1980) 的建議值，在此將 σ_k 、 σ_ϵ 、 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 四個經驗參數設定為 1.0、1.3、1.44 以及 1.92。紊流模式選擇非等向性的渦流黏度表示，雷諾應力如下式：

$$\langle u'_i u'_j \rangle = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - C_d \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{k^3}{\epsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) + C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) + C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (7)$$

其中 δ_{ij} 為 Kronecker delta 函數，且 $C_1 = \frac{1}{185.2 + D_{\max}^2}$ ， $C_2 = \frac{1}{58.5 + D_{\max}^2}$ ， $C_3 = \frac{1}{370.4 + D_{\max}^2}$ ， $D_{\max} = \frac{k}{\epsilon} \max \left(\left| \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right| \right)$

2.2 模式數值地形

本文選取台 11 線人定勝天 61K+300、61K+380、61K+500、61K+580、61K+700、61K+830、62K+220 等 7 個里程的道路斷面做為浪襲情境模擬地點(圖 1)。模式使用的地形為交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)提供的人定勝天路段附近高解析度光達陸地地形和船測海底地形，其數值化地形如圖 2。另以 XBeach 水平 2 維模式模擬波浪從正東入射後的第 136 秒水位空間分佈，大致沿著波向線選取 7 處斷面的地形切線，如圖 2 及圖 3 的綠線位置。

以台 11 線 61K+300 為例，切線地形剖面如圖 4。在此將海域的切線地形取到最大水深 32m 處，再從深度 32m 處往離岸方向延伸 6 個波浪週期所能傳播的水平距離做為模式的等水深入射波區。圖 4 左右翻轉後加入入射波區的 61K+300 模式地形如圖 5，並將 X 座標 0m 重新定義在高程 0m 的海陸交界處。



圖 1 google earth 台 11 線人定勝天路段選取的 7 個情境里程位置

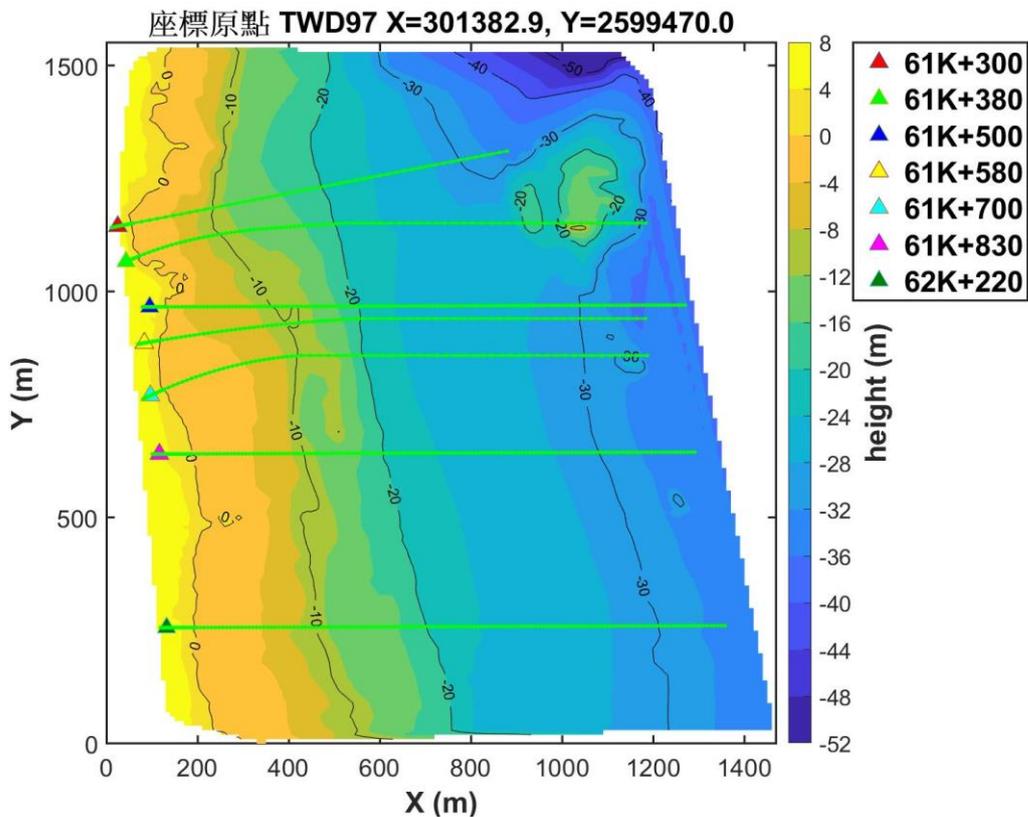


圖 2 台 11 線人定勝天路段 7 個里程位置(三角)以及地形切線(綠線)

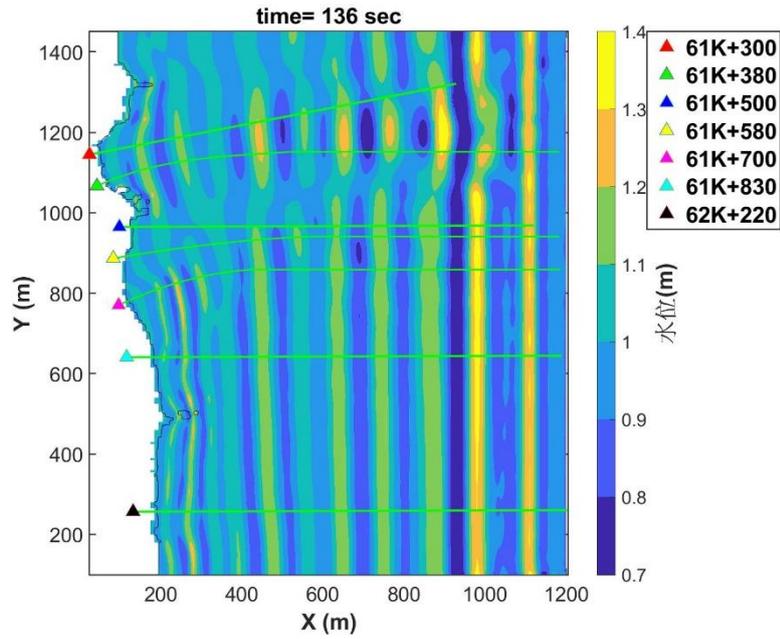


圖 3 台 11 線人定勝天路段 7 處斷面(三角)沿波向線選取地形切線(綠線)

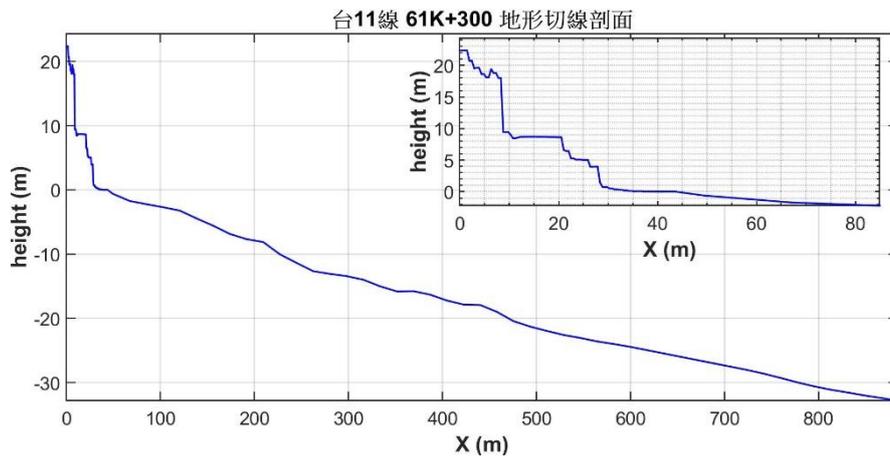


圖 4 台 11 線 61K+300 離岸方向地形剖面

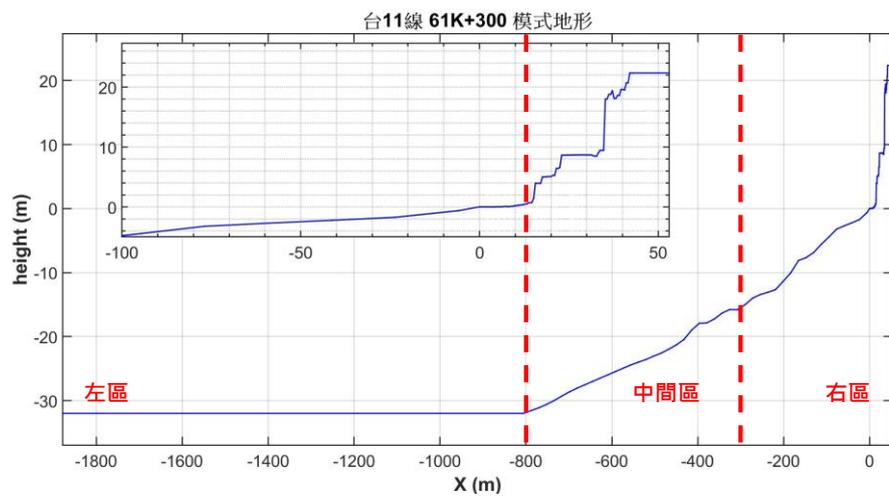


圖 5 台 11 線 61K+300 斷面模式地形

2.3 模式設定

模式在 X 方向的網格解析共分成 3 個區域，左區為均一水深 32m 的波浪入射區，如圖 5 的 X=-1870 至-800m 之間，解析度為 2m，右區為近岸水平距離近岸 300 公尺往右的區域，如圖 5 的 X=-300 至 52m，解析度為 0.5m，介於左、右兩區的中間區，如圖 5 的 X=-800 至-300m 範圍，解析度左至右從 2m 線性變化到 0.5m，在 Y(垂直)方向解析度固定為 0.5m。模式時間解析則使用調整式的時間步長。由於地形剖面由圖 3 波向線而來，即假設入射波沿此切線方向前進，所有模擬的初始條件為流速 0 且無擾動單一水位的水平面，模擬時間設定為波浪第一波抵達陸地後，再加上 8 個入射波週期。

邊界條件的設定在上邊界(頂部)、下邊界(底部)以及右邊界為牆，而左邊界使用連續 8 個正弦波入射。圖 6 為 2015 年 8 月蘇迪勒颱風和天鵝颱風，2016 年 9 月梅姬颱風以及 2018 年 9 月潭美颱風的警報期間，運研所在花蓮港外海 AWCP 觀測的示性波高和尖峰週期觀測值，參考圖 6 之尖峰週期統計圖，在此將入射波週期設定為較大的 16 秒。另外參考陳等人(2017)的花蓮港波高重現期，將邊界入射波高設定為 50 年重現期的 10m。

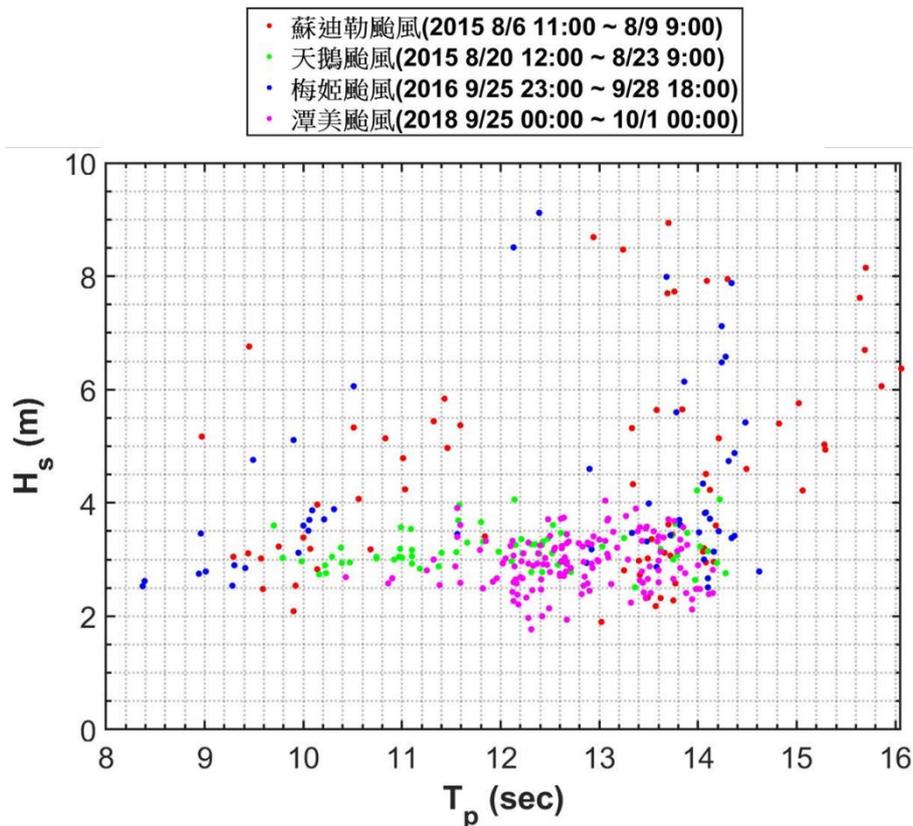


圖 6 四個颱風期間的花蓮港 AWAC 示性波高和週期

根據交通部中央氣象局 2020 年潮汐表，石梯漁港的天文潮在-1.1m 至 1.1m 之間，而豐濱鄉沿海的臺灣高程基準比當地平均海面高 0.24m，則可概估石梯漁港天文潮高程在-0.9 至 1.3m 之間。楊(2018)分析 2001 至 2017 年石梯漁港的觀測資料，得知最大的暴潮偏差為 1.3m，且發生在

2015 年蘇迪勒颱風期間。以臺灣高程基準來看，石梯漁港如以最大天文潮 1.3m 加上 1.3m 暴潮偏差，可出現 2.6m 的潮位，故本文使用 0、1 和 2.5m 等 3 種初始水位條件做為情境潮位。

在離岸潛堤設定方面，選擇將潛堤設置在 4 至 8m 共 5 種不同海床深度的位置進行模擬。以 61K+300 處為例，潛堤配置如圖 7，圖由上至下各為無潛堤以及潛堤深度 4m 至 8m。本文參考表 1 後選擇堤頂寬度為 10m，堤頂高度固定在平均水位高程-0.5m，潛堤兩側的坡度為 1:2。包含無潛堤的情境模擬，藉由 3 種潮位搭配 6 種海堤條件，人定勝天路段 7 處斷面情境模擬共有 126 種，如圖 8。

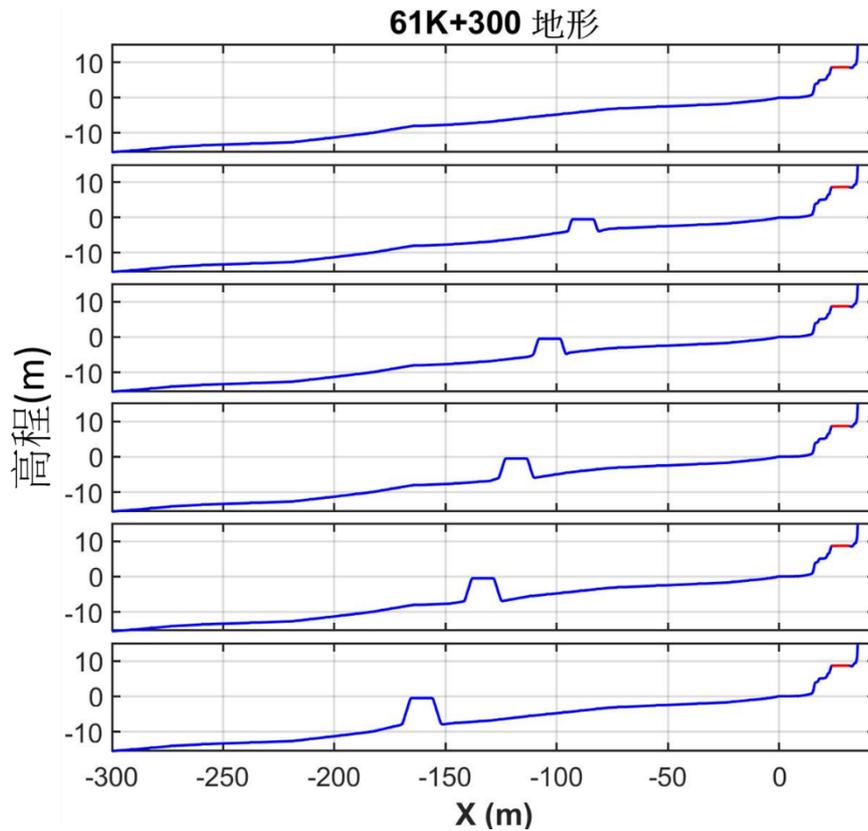


圖 7 台 11 線 61K+300 的離岸潛堤地形配置

人定勝天段模擬條件組合

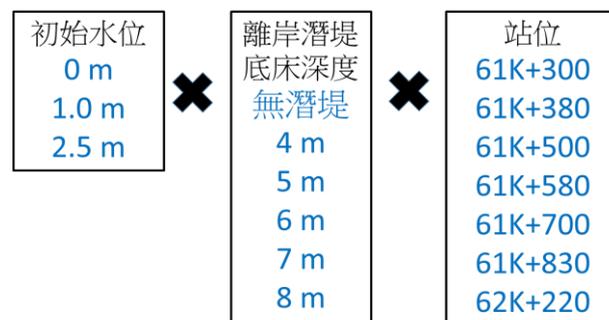


圖 8 不同模擬條件的組合

2.4 模擬流程

以台 11 線 61K+300 潮位 2.5m 且潛堤深度 6m 的情境為例，建立模式地形後開始模擬，模式以 Fortran 撰寫並於 Win10 作業系統架構進行模擬，模擬結束後可得到模擬期間的流速、壓力及水位等相關資料，圖 9 為模擬第 90 至第 270 秒的空間壓力分佈，而圖 10 為模擬期間的最大壓力(Pmax)空間分布。圖 11 為接近道路附近 15m 到道路之間的區域範圍內沿著 X 方向的地表最大壓力，其中 X=23.5 至 31.5m 為道路範圍(紅線)，而圖 12 為潛堤區在 X 方向的地表壓力最大值。

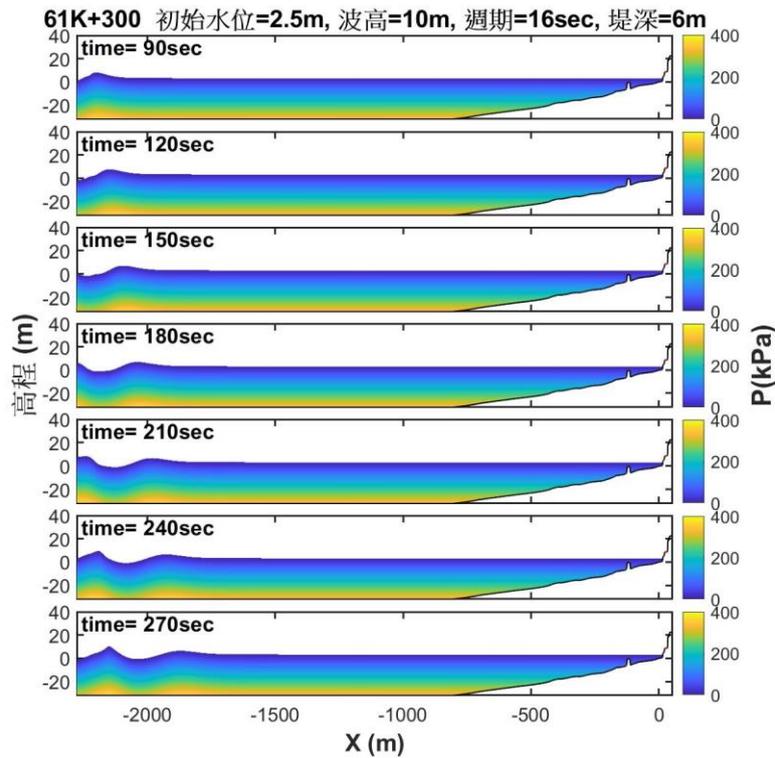


圖 9 台 11 線 61K+300 模擬的壓力空間分布

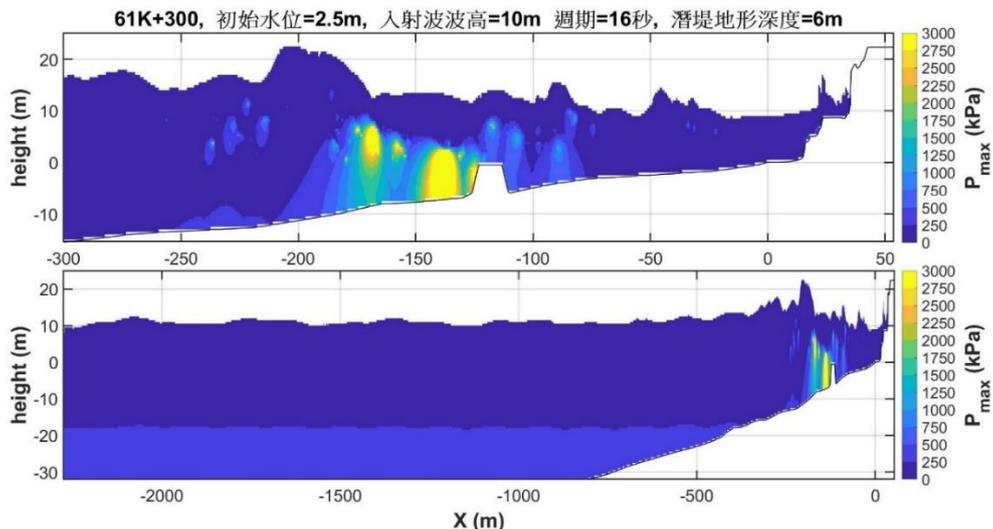


圖 10 台 11 線 61K+300 模擬期間的最大壓力空間分布

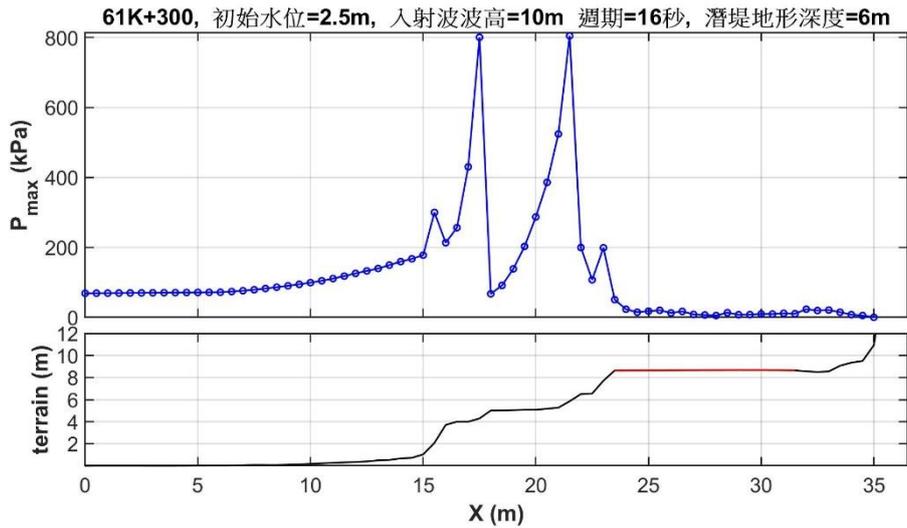


圖 11 台 11 線 61K+300 模擬期間的地表最大壓力分布

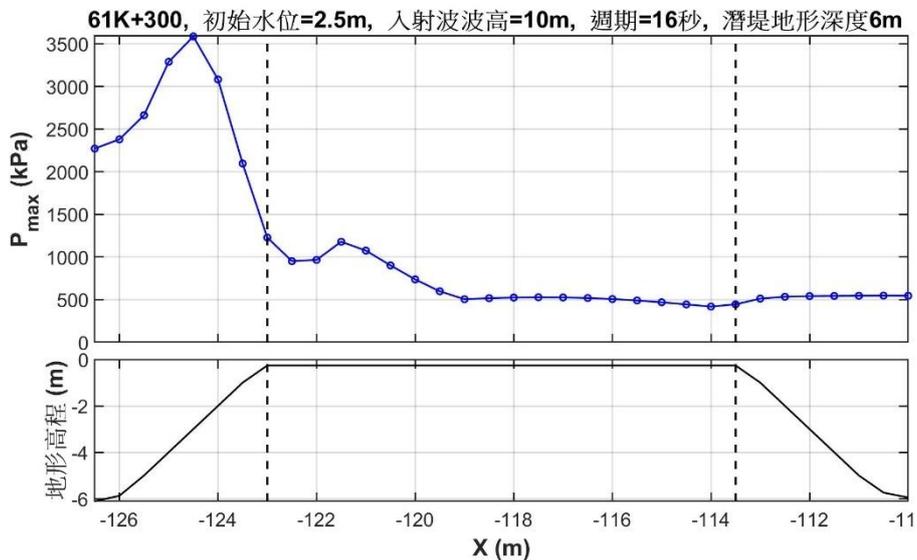


圖 12 台 11 線 61K+300 模擬期間的潛堤表面最大壓力分布

三、模擬結果

根據模擬期間的長浪溯上距離，以及對地形和人工建築物的表面所承受的最大壓力進行分析。將海陸交界處定義為陸地溢淹距離的起點($X=0$)，並將道路靠陸側的邊緣定義為溢淹距離的終點來計算溢淹距離，模擬期間在陸地上方有出現水體皆視為溢淹。對道路 8m 路寬另外再定義一個道路溢淹距離，藉以了解道路是否雙向車道皆出現溢淹，其起點和終點各為道路的靠海和靠陸邊緣，溢淹距離介於 0 至 8m。本文針對近道路區以及潛堤區進行地表最大壓力探討，將道路區依距離道路邊緣 15m 至 10m、10m 至 5m、5m 至 0m 的區間劃分為第 1、2 和 3 區，而道路部分為第 4 區，例如圖 13 為台 11 線 61K+300 在潮位 2.5m 下，6 種潛堤條件在近道路區的地表最大壓力，各區以黑虛線劃分。由於第 3 區為緊鄰道路的區域，而第 4 區為道路路面，故在評估潛堤的深度設置時會優先考量陸地溢淹距離的減少幅度以及近道路區的第 3 和第 4 區最大

壓力值的降幅。潛堤區則分為堤前、堤頂以及堤後等 3 區來進行最大壓力的討論，例如圖 14 為 61K+300 在潛堤深度 7m 時，3 種潮位條件在潛堤區的地表最大壓力，以黑虛線分 3 區。將各個里程位置的所有情境以上述分區取區間的最大值可得表 2 至 8。

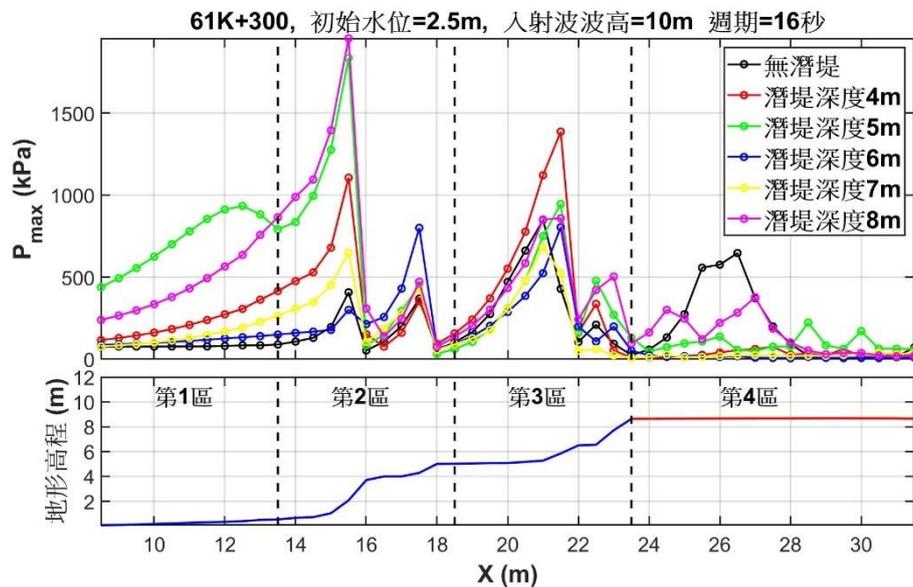


圖 13 潮位 2.5m 時，台 11 線 61K+300 近道路區的地形表面最大壓力

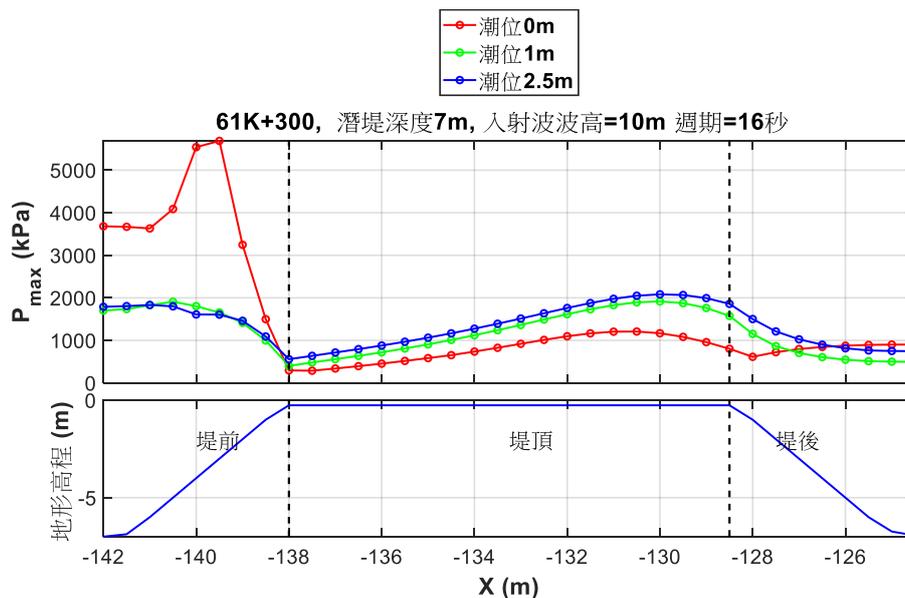


圖 14 台 11 線 61K+300 潛堤深度 7m 時，三種潮位的潛堤表面最大壓力

3.1 61K+300 至 61K+580 處

由表 2 可知在 3 種潮位條件下，當潛堤深度在 4m 時，相較於其他深度在潛堤區的堤前、堤頂和堤後區所受到最大壓力皆為最小，61K+300 近道路區的最大壓力相對於無潛堤情況來說，潮位 0m 時，將潛堤設在深度 4m 時，在第 2 和第 3 區有較大的壓力降幅，當潮位 1m 時，將潛堤設在深度 6 和 8m 時，在第 1 和 3 區皆有較大的最大壓力降幅，當潮位為 2.5m 時，將潛堤設在深度 6 和 7m 時，在道路本身的第 4 區皆有較大的最大壓力降幅。

由表 3 知 61K+380 處，潮位 0m 時，有潛堤的情境皆能使第 3 區的壓力降為 0，再考慮第 2 區最大壓力降幅，可將潛堤深度設置為 5 或 8m，當潮位 1m 時，深度 7 和 8m 的條件對第 3 區最大壓力有較佳的降幅，當潮位為 2.5m 則是深度 5m 對第 2 至第 4 區的最大壓力有較佳降幅。

由表 4 知 61K+500 處，潮位 0m 時，有設置潛堤的情況下皆能使第 2、第 3 區的最大壓力值下降，以深度 5m 最佳，且潛堤區最大壓力值亦較小，當潮位 1m 時，潛堤深度 6 和 7m 的條件對第 3、4 區最大壓力值有較佳的降幅，當潮位 2.5m 時，潛堤深度設置 5m 對第 1 至第 4 區最大壓力皆有較佳的降幅，且潛堤區壓力受力亦較小。

由表 5 知 61K+580 處，潮位 0m 時，以潛堤深度 4、5 和 6m 的情況下，皆能使第 2、3 區的最大壓力值下降較多，當潮位 1m 時，潛堤深度 5 和 6m 的條件對第 3 和第 4 區最大壓力值有較佳的降幅，當潮位 2.5m 時，潛堤深度設置 4m 對第 2 至第 4 區的最大壓力皆有較佳的降幅，且潛堤區的壓力受力亦較小。

表 2 台 11 線 61K+300 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		96	581	112	0			
	4	223	227	14	0	1058	330	256
	5	116	344	65	0	1145	651	171
	6	74	478	30	0	1131	714	136
	7	176	511	83	0	5687	1208	901
	8	154	658	117	0	4312	1020	757
1		330	1181	723	2			
	4	237	937	1749	1	1351	427	478
	5	126	445	1923	16	1666	981	1299
	6	276	984	205	5	1820	1104	604
	7	759	1957	428	17	1909	1916	1575
	8	254	772	306	19	4850	1397	1447
2.5		84	407	849	647			
	4	362	1107	1388	75	1186	1017	278
	5	935	1838	946	223	2789	1494	1317
	6	216	757	901	21	3693	1080	837
	7	228	649	683	39	1833	2082	1858
	8	758	1957	859	378	4701	3398	561

表 3 台 11 線 61K+380 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		250	266	297	0			
	4	938	737	0	0	4847	2594	1536
	5	730	68	0	0	735	1388	819
	6	805	412	0	0	567	931	204
	7	455	463	0	0	880	1077	457
	8	465	137	0	0	280	508	398
1		392	360	750	0			
	4	573	658	548	0	713	1479	1597
	5	565	1027	379	0	457	660	740
	6	1244	251	789	0	666	283	255
	7	689	400	348	0	1149	179	406
	8	997	279	245	0	1437	921	704
2.5		2493	576	948	82			
	4	1025	660	829	13	345	1394	2141
	5	1543	373	337	16	253	263	442
	6	489	690	497	12	289	229	185
	7	269	357	540	10	162	215	219
	8	565	379	562	28	426	82	154

表 4 台 11 線 61K+500 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		531	246	288	0			
	4	253	30	73	0	197	91	74
	5	305	3	0	0	273	130	155
	6	143	156	2	0	782	225	97
	7	386	61	0	0	1198	515	321
	8	491	39	12	0	3244	971	465
1		277	88	609	7			
	4	130	2246	1099	413	179	300	89
	5	1314	1883	947	0	147	348	306
	6	87	592	27	0	301	364	307
	7	552	524	42	0	2663	894	361
	8	708	443	355	2	1178	913	498
2.5		1300	1327	1899	115			
	4	658	428	1713	723	134	162	146
	5	207	435	396	22	156	251	178
	6	1809	413	437	100	233	343	250
	7	1326	919	633	92	2663	2485	436
	8	1352	617	2070	216	1814	622	537

表 5 台 11 線 61K+580 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		22	194	246	0			
	4	118	6	0	0	193	384	138
	5	30	6	0	0	657	538	235
	6	50	37	0	0	405	489	401
	7	325	199	3	0	1285	740	363
	8	232	196	6	0	3224	666	534
1		164	338	77	11			
	4	226	225	42	7	167	494	126
	5	258	367	33	1	360	736	782
	6	207	971	27	4	692	288	258
	7	360	158	62	21	2808	761	1005
	8	227	499	132	14	1893	1422	1346
2.5		243	628	423	41			
	4	439	352	161	30	171	313	293
	5	305	1262	1988	51	334	373	309
	6	653	1344	611	38	204	225	147
	7	602	1237	424	396	1225	1202	1905
	8	1100	583	632	297	2406	2188	1794

3.2 61K+700 至 62K+220 處

由表 6 知 61K+700 處近道路區最大壓力相對於無潛堤的情況，當潮位 0m 時以潛堤深度 4、5m 的情況下，皆使第 3 區的最大壓力值下降較多，潮位 1m 時潛堤深度 4 和 6m 的條件對第 2 和 3 區最大壓力值有較佳降幅，潮位 2.5m 時，潛堤深度 4m 對第 3 和第 4 區的最大壓力皆有較佳的降幅。

由表 7 可知 61K+830 處，當潮位 0m 時，6 種潛堤條件對近岸道路壓力最大值而言，並無明顯差異。當潮位 1m 時，潛堤深度 6、7 和 8m 第 2 區最大壓力值有較佳的降幅，但在其他區無明顯差異。當潮位 2.5m 時，潛堤深度 4 和 7m 對第 1 和第 2 區的最大壓力皆有較佳的降幅，但在第 3 和第 4 區與其他條件相差不多。

由表 8 知 61K+220 處，當潮位 0m 時，除了潛堤 8m 在第 1 和第 2 區稍大之外，6 種潛堤條件的最大壓力值在各區並無明顯差異。當潮位 1m 時，潛堤深度 5、6m 在第 2、第 3 區有較佳的最大壓力值降幅。當潮位 2.5m 時，各潛堤深度在第 4 區皆能使最大壓力大幅下降，而在第 3 區則是深度 7m 有最大降幅、而深度 8m 次之。

表 6 台 11 線 61K+700 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		152	414	74	0			
	4	142	72	19	0	477	389	231
	5	41	205	19	0	1499	966	528
	6	61	483	37	0	1414	857	379
	7	31	172	44	0	2836	991	722
	8	34	110	121	0	4916	1026	358
1		90	361	145	1			
	4	48	83	48	1	708	581	184
	5	92	153	395	1	2062	606	377
	6	205	119	39	1	3548	983	591
	7	45	155	113	2	2779	1211	1018
	8	46	230	99	4	3661	849	717
2.5		67	206	165	103			
	4	65	251	87	26	519	463	365
	5	64	541	233	17	1059	662	1696
	6	63	216	344	33	1362	841	1119
	7	62	260	161	70	1899	514	753
	8	62	252	151	43	2829	1766	1124

表 7 台 11 線 61K+830 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		19	16	8	0			
	4	13	10	0	0	1338	637	268
	5	11	8	0	0	2094	947	633
	6	24	9	0	0	1220	988	509
	7	161	4	0	0	1717	887	422
	8	12	6	0	0	5863	909	1675
1		33	204	19	2			
	4	31	52	15	1	891	637	1081
	5	51	129	14	0	671	521	105
	6	26	22	13	0	1858	778	194
	7	80	18	9	0	3950	524	495
	8	110	17	8	0	3385	1293	1746
2.5		330	298	27	11			
	4	109	44	33	9	398	353	218
	5	369	45	256	14	971	880	255
	6	187	67	33	8	1000	305	742
	7	54	36	26	8	2169	2187	2246
	8	301	74	33	6	2886	551	297

表 8 台 11 線 61K+220 近道路區與潛堤區的最大壓力

潮位(m)	潛堤深度(m)	區域最大壓力 (kPa)						
		近道路 第 1 區	近道路 第 2 區	近道路 第 3 區	近道路 第 4 區	潛堤前側	潛堤頂部	潛堤後側
0		41	34	23	1			
	4	30	23	12	0	364	738	514
	5	55	22	12	0	1372	757	280
	6	50	20	7	0	546	1309	211
	7	24	18	6	0	3001	464	470
	8	177	105	5	0	3468	748	682
1		229	139	31	4			
	4	206	230	107	3	1882	779	757
	5	155	38	29	2	742	1281	735
	6	125	70	25	1	1042	837	326
	7	220	158	82	2	2744	590	554
	8	255	271	20	0	1717	670	671
2.5		501	636	211	414			
	4	268	582	120	22	437	726	682
	5	342	493	103	15	256	468	359
	6	67	373	268	21	276	505	500
	7	196	290	51	27	627	549	995
	8	135	384	91	20	1421	914	322

四、不同潛堤配置方案模擬

4.1 XBeach 模式設定

本文使用 XBeach 水平 2 維模式來模擬人定勝天路段 7 處斷面外海設置潛堤的浪襲情境。潛堤長、寬各設定 50m 和 10m，堤頂高程為平均潮位-0.5m，模擬 2 種潮位條件，並區分為 A、B 和無潛堤等 3 種配置方案，各情境條件如表 9，透過向西的最大壓力來探討不同潛堤配置對 7 處斷面的波壓降低效果。模式地形如圖 15，水平網格解析度 5m，模擬時間為 20 分鐘，東邊界入射波條件為示性波高 5m，尖峰週期 15 秒。圖 15 和 16 的黑色長條區域各為 7 個潛堤的 A 和 B 兩種配置位置，另外黑線等深線間隔 10m，而黃、青和紫紅色線各為 7、4 和 3m 等深線。綠三角由北至南各為台 11 線 61K+300、61K+380、61K+500、61K+580、61K+700、61K+830、62K+220 的里程位置。潛堤配置方案 A 和 B 的主要差別在於配置 B 將 61K+380 和 61K+580 的外海潛堤位置稍微南移，並將 61K+500、61K+700、61K+830、62K+220 的外海潛堤則往岸邊移動一段距離。

表 9 XBeach 潛堤配置模擬條件

情境編號	潮位	潛堤配置
1	0 m	無潛堤
2	0 m	A
3	0 m	B
4	1 m	無潛堤
5	1 m	A
6	1 m	B

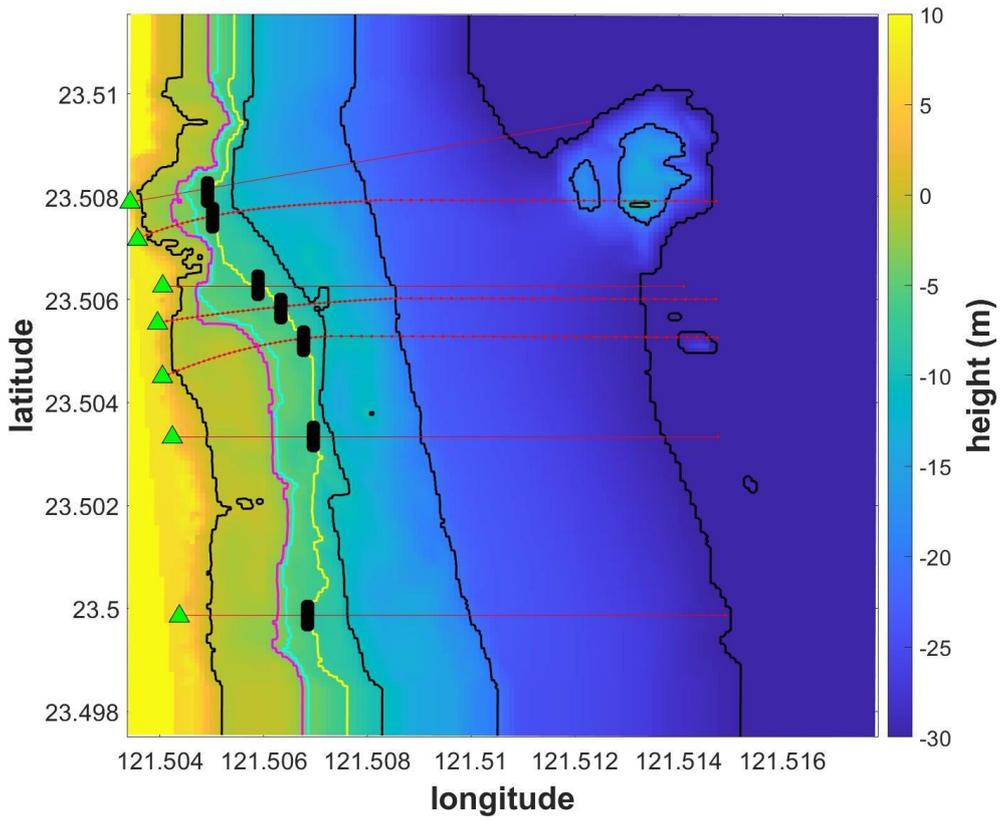


圖 15 潛堤配置方案 A

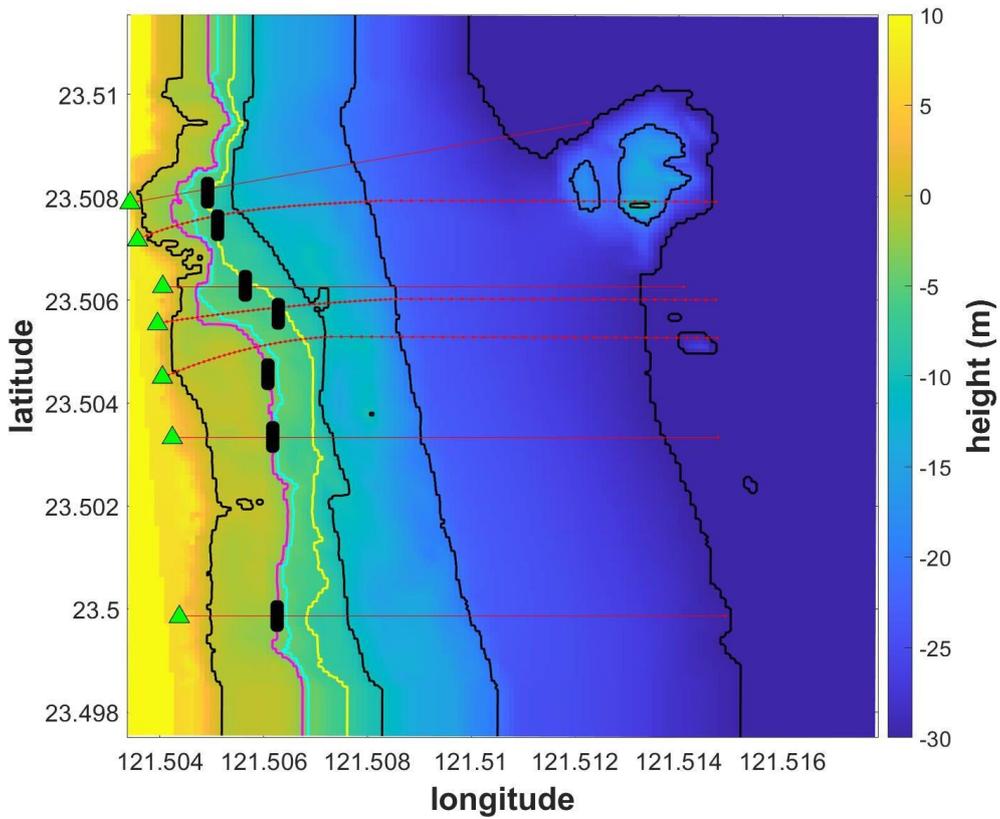


圖 16 潛堤配置方案 B

4.2 模擬結果

為了解表 9 的 6 種情境在道路附近承受的波壓，以模擬期間 7 處斷面的向西最大壓力值進行比較，例如圖 17 和圖 18 的上圖各為 61K+300 在潮位 0m 和 1m 條件下沿切線方向所得的向西最大壓力，下圖為切線方向的地形之對照，X=0 處代表道路所在位置，其結果顯示在潮位 0m 和 1m 時，方案 A 和方案 B 的波壓大小差異不大，相對於無潛堤的情況，在 X=15 至 80m 均可提供減壓的作用。X=10 和 15m 的海岸處在潮位 0m 時，約下降 400 至 800N/m²，而在潮位 1m 時，僅約下降 200N/m²，顯示潛堤設置對於 61K+300 岸邊降低壓力的效果可能會隨潮位的增加而降低，類似結果亦出現在 61K+380、61K+500 和 61K+580 3 處。

圖 19 和 20 的上圖各為 61K+700 在潮位 0m 和 1m 條件下沿切線方向的向西最大壓力。結果顯示潮位 0m 時，在 X>=25m 的區域以無潛堤的壓力值最大，方案 B 次之，方案 A 最小，但在 X=10m 至 20m 之間，無潛堤和方案 A 的壓力值相近，而方案 B 最小。3 種潛堤條件的最大壓力皆不超過 500 N/m²。當潮位為 1m 時，方案 A、B 的最大壓力值接近，相對於無潛堤的情況，僅在 X=0 和 15m 處有較大的降幅，而其他位置的 3 種潛堤條件壓力值相似。另外 X=0m 為 61K+700 所在處，該處出現壓力值代表道路附近出現溢淹。

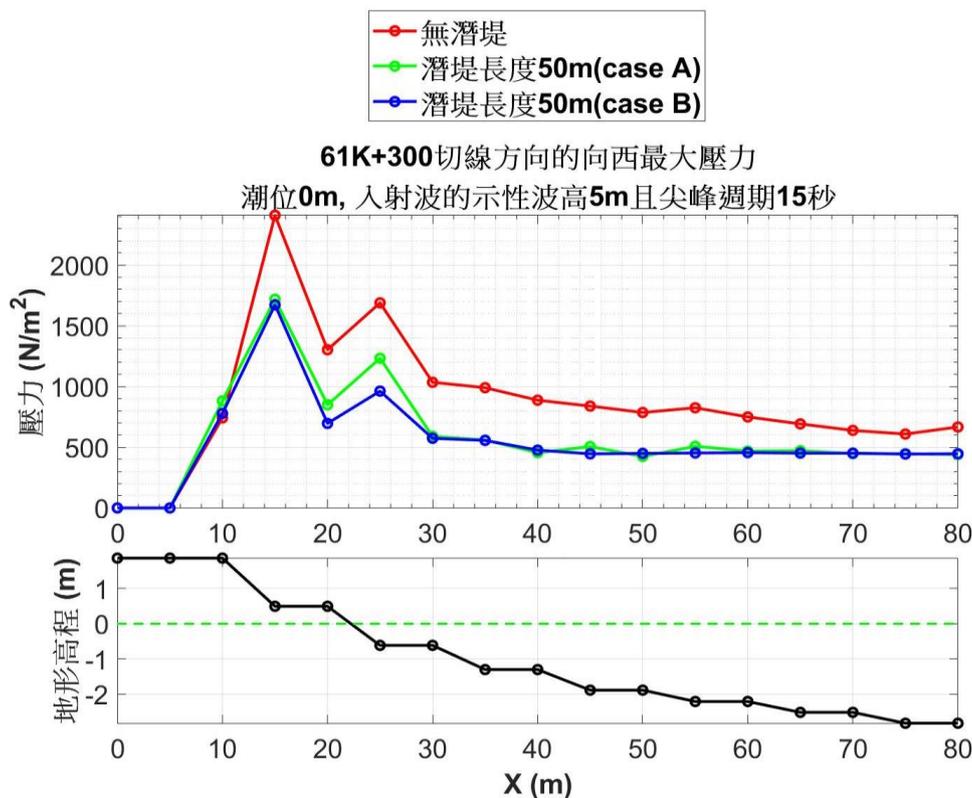


圖 17 潮位 0m 時，台 11 線 61K+300 切線方向的最大壓力

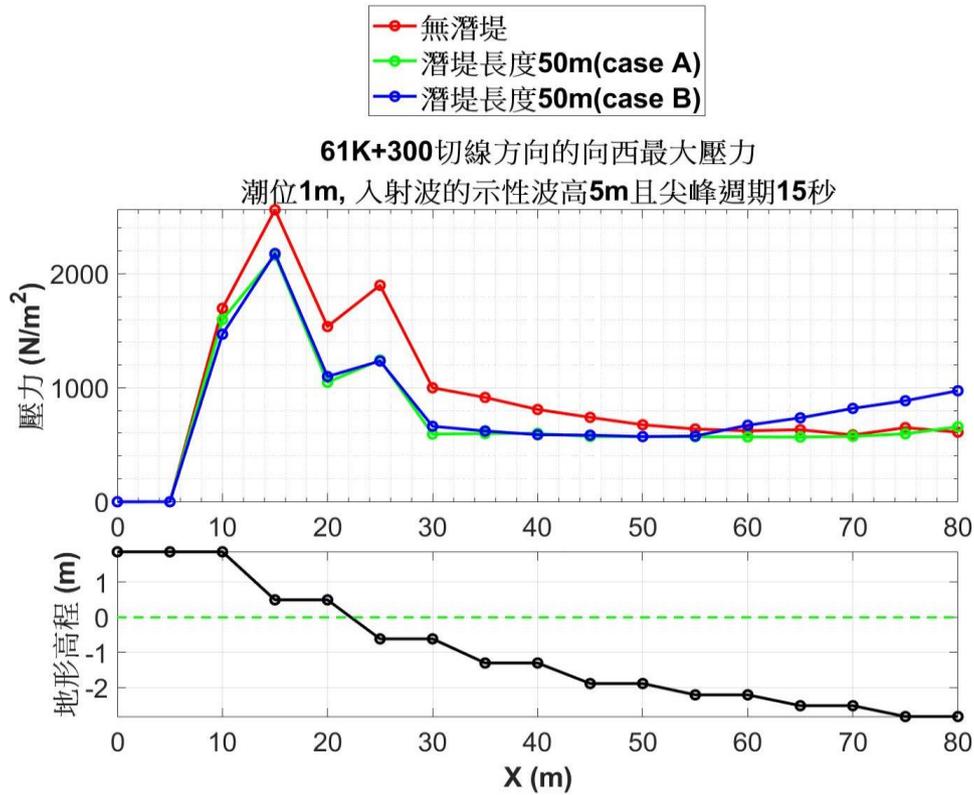


圖 18 潮位 1m 時，台 11 線 61K+300 切線方向的最大壓力

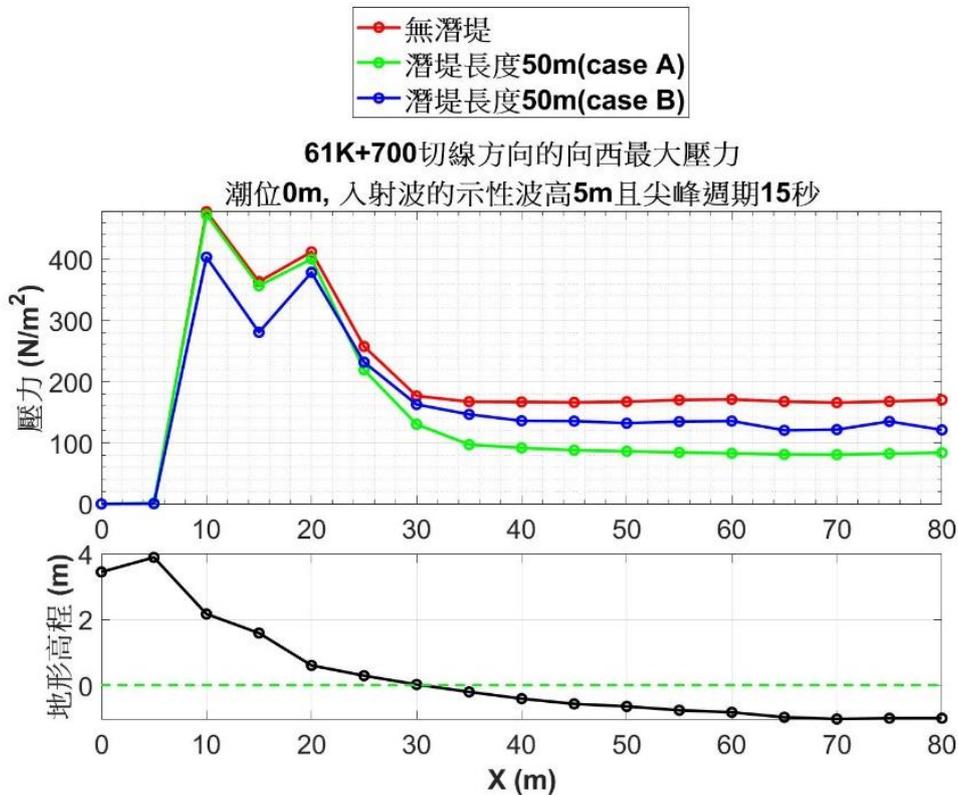


圖 19 潮位 0m 時，台 11 線 61K+700 切線方向的最大壓力

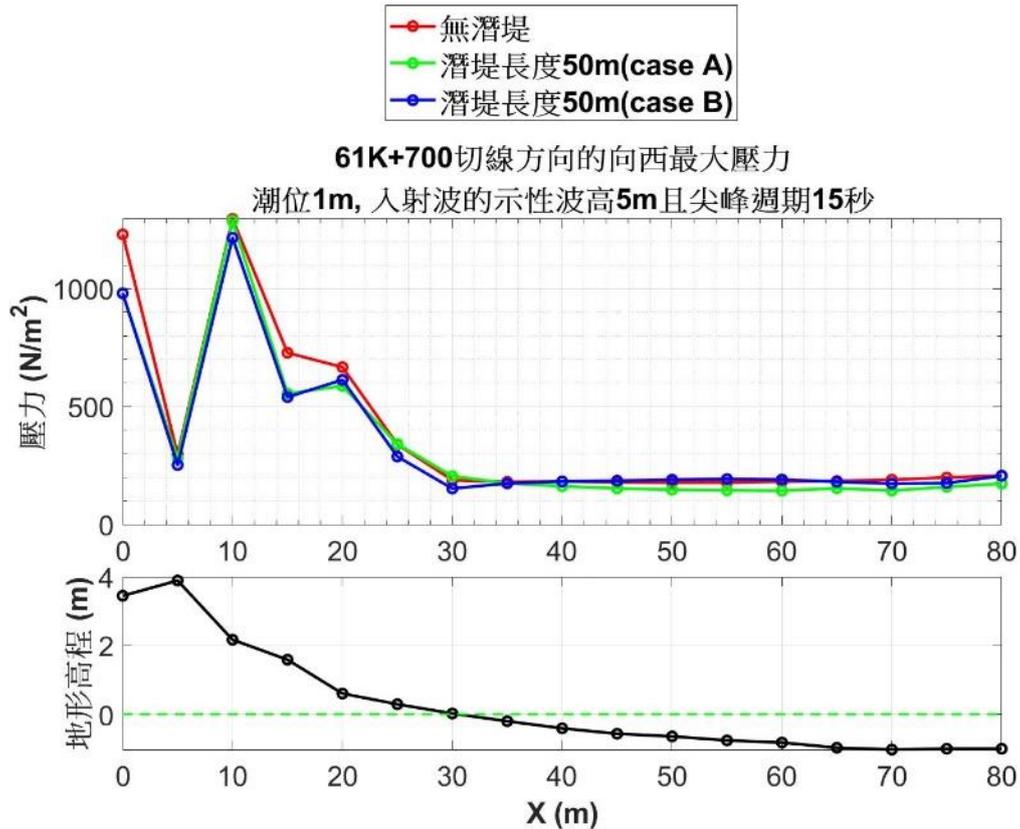


圖 20 潮位 1m 時，台 11 線 61K+700 切線方向的最大壓力

大致而言，模擬結果以方案 B 對於 7 處海岸斷面的最大壓力值有較大降幅。另外 61K+300、61K+380、61K+500 和 61K+580 等 4 處斷面，在相對於無潛堤的情況，使用方案 A 和 B 在潮位 1m 時的最大壓力降幅皆比潮位 0m 小，表示此 4 設置潛堤的減壓能力，可能隨潮位增加而降低。另外 61K+830 和 62K+220 由於道路位置離海岸超過 50m，模擬的波浪尚未衝擊道路鄰近區域。

五、結論

本文利用 COBRAS 及 XBeach 兩種模式在人定勝天路段外海不同的水深位置設置離岸潛堤，進行情境模擬分析長浪溯上距離以及長浪作用力的影響範圍，COBRAS 模擬結果顯示當潮位 0m 時，相對於無潛堤情況下，潛堤深度設置在水深 5 至 7m 對於水平距離海岸公路 0 至 5m 的區域能使最大波浪壓力值有較佳的降幅，而當潮位為 1m 時，潛堤深度則以水深 6 到 7m 有較佳的壓力降幅。Xbeach 行模擬結果顯示，大致上對各斷面靠近岸邊的陸地最大壓力值以無配置潛堤的情況值最大，方案 A 方案次之，方案 B 最小，方案 B 為較佳配置方案。另 61K+300、61K+380、61K+500 和 61K+580 等 4 處於潛堤配置 A 或 B 的情況下，與無潛堤相較的最大壓力值在潮位 1m 會比潮位 0m 降幅小，表示潛堤的降壓能力可能隨潮位增加而降低。

5.1 離岸潛堤混凝土等級建議

根據表 2 至表 8 可知在人定勝天路段 7 處斷面所有 COBRAS 模擬最大壓力值在近道路區和潛堤區皆未大於 10000 kPa，亦即壓力未超過 102 kgf/cm²。由行政院農業委員會發布的水泥混凝土之一般要求將混凝土強度分為六級如表 10，一般要求提到(1)140kgf/cm² 級混凝土用於次要排水路、護岸、回填混凝土或基礎墊層混凝土。(2)175kgf/cm² 級混凝土用於河海堤、排水路、護岸、灌溉渠道、鋼筋混凝土構造物，混凝土砌卵石溝或用於無筋混凝土構造物。依模擬的最大壓力強度而言，使用抗壓強度 140kgf/cm² 等級的混凝土應足夠避免潛堤的結構被波壓破壞。

表 10 行政院農業委員會農第 03053 章混凝土分級表

分級項目 (kgf/cm ²)	水灰比	參考使用水泥量 (kg/m ³)
fc'=140	0.708	215~235
fc'=175	0.620	250~275
fc'=210	0.532	300~325
fc'=245	0.440	375~400(水中 375~400)
fc'=280	0.400	360~400(水中 400~425)
fc'=350	0.384	440~470

註：1.參考使用水泥量得在 10%範圍內調整之。
2.剛性路面系依抗彎強度 R 值分級。

5.2 離岸潛堤的地形深度建議

由表 2 至表 8 在無潛堤條件下，考慮潮位 0 至 1m 的情況，可考慮優先對 61K+300 至 61K+500 外海設置潛堤來降低道路邊坡所承受的壓力，根據 3.1 及 3.2 節討論的溢淹距離以及道路鄰近區的壓力值減少較多的情境，將 3 種潮位的潛堤設置深度建議值整理如表 11。

表 11 潛堤設置的海床深度建議值(m)

台 11 線里程	潮位 0m	潮位 1m	潮位 2.5m
61K+300	4	6、8	6、7
61K+380	5 和 8	7 和 8	5
61K+500	5 至 7	6 至 7	5
61K+580	4 至 6	4 至 6	4
61K+700	4、5	4、6	4
61K+830	6 至 7	6 至 8	4、7
62K+220	4 至 8	5 至 6	7

5.3 離岸潛堤配置建議

5.2 節表 11 之深度建議值經 XBeach 的情境模擬後，由於 61K+300、61K+380、61K+500 和 61K+580 等 4 處道路位置離海岸較近，如選擇潛堤配置方案 B(圖 16)對於道路鄰近區域的最大波壓有較大的降幅，可做為台 11 線人定勝天路段海岸防護的潛堤配置參考。

參考文獻

1. 中央氣象局 2020 年潮汐表 (2019)。
2. 陳志弘、張憲國、劉勁成、陳蔚瑋、何良勝 (2017),「臺灣主要港口附近海域混合波浪統計特性及推算模式建置研究(4/4)」,交通部運輸研究所。
3. 楊博堯 (2018),「台灣環島實測暴潮分析」,成功大學水利及海洋工程學系學位論文,1-114 頁。
4. COBRAS user's manual version 1.01(2002).
5. XBeach User Manual revision 395c974a(2020).