109-011-7B58
MOTC-IOT-108-H3DB001d

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

交通部運輸研究所
中華民國 109 年 2 月

109-011-7B58
MOTC-IOT-108-H3DB001d

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

著 者：蕭士俊、蘇青和、李俊穎、陳鈞彥

交通部運輸研究所
中華民國 109 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究 / 蕭士俊等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民109.02
面 ; 公分
ISBN 978-986-531-077-6(平裝)

1.公路管理 2.防災工程

557 108023090

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

著　　者：蕭士俊、蘇青和、李俊穎、陳鈞彥
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.ihmt.gov.tw (中文版＞中心出版品)
電　　話：(04)26587132
出版年月：中華民國 109 年 2 月
印 刷 者：
版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定　　價：200 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話(04)22260330

GPN： 1010900112　　ISBN：978-986-531-077-6 (平裝)

109

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

交通部運輸研究所

GPN: 1010900112
定價 200 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN 978-986-531-077-6(平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1010900112</td><td>運輸研究所出版品編號
109-011-7B58</td><td>計畫編號
MOTC-IOT-
108-H3DB001d</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港研中心
主管：蔡立宏
計畫主持人：蘇青和
研究人員：李俊穎、陳鈞彥
聯絡電話：04-26587132
傳真號碼：04-26564415</td><td colspan="2">合作研究單位：國立成功大學
計畫主持人：蕭世俊
協同主持人：吳漢倫、吳昀達、陳彥龍
研究人員：吳漢倫、吳昀達、陳彥龍
地址：70101 臺南市東區大學路 1 號
聯絡電話：06- 2757575 轉 63262</td><td>研究期間
自 108 年 2 月
至 108 年 12 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：台 9 線、公路浪襲、地形變遷、改善對策</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：
本計畫執行目的主要在擬訂適合臺東海岸公路之海岸區域災害因應對策。透過工法資料蒐集與現階段改善對策研討，擬訂相關改善對策，並運用波流耦合水動力與地形變遷模式，進行改善對策評估，以瞭解各改善對策之可行性。在國內外改善對策資料蒐集方面，彙整資料包含工程對策及非工程對策資料，工程對策蒐集方向是以「公路浪襲」、「海岸侵蝕」及「海岸淤積」等三個災害面向進行改善對策蒐集；而非工程對策目前則彙整公路風險評估與越波警戒系統之相關資訊。改善對策可行性評估方面，分別以「南興路段」與「多良路段」兩案例來進行工程相關之改善對策評估，並研提「短期改善對策」與「長期改善對策」可行性方案。最後，綜整本計畫改善對策可行性評估成果與國內外對策資訊，研提適合台 9 線公路之改善對策建議。
研究成果可做為政策研擬之參考，據以提升台 9 線海岸公路易致災害之成效。在施政上，本計畫可做為交通部、公路總局、水利署及第八河川局等相關單位做為未來施政與後續計畫參考，俾利擬定台 9 線海岸公路相關改善對策。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>109 年 2 月</td><td>224</td><td>200</td><td>凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。</td></tr>
<tr><td colspan="4">機密等級：
□密□機密 □極機密 □絕對機密
（解密條件：□　年　月　日解密，□公布後解密，□附件抽存後解密，
□工作完成或會議終了時解密，□另行檢討後辦理解密）
■普通</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Study of the hazard countermeasures in response to the morphological changes near the coastal highway in Taitung

ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-531-077-6(pbk)	1010900112	109-011-7B58	MOTC-IOT-108-H3DB001d

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ching-Ho Su
PROJECT STAFF: Chun-Yen Chen
PHONE: (04) 26587132
FAX: (04) 26564415

PROJECT PERIOD
FROM February 2019
TO December 2019

RESEARCH AGENCY: National Cheng Kung University
PRINCIPAL INVESTIGATOR: S.C Hsiao
CO-PROJECT INVESTIGATOR: H.L Wu, Y.T Wu, Y.L. Chen
PROJECT STAFF: H.L Wu, Y.T Wu, Y.L. Chen
ADDRESS: NO.1, University Road, Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.
PHONE: (06) 2757575 ext: 63262

KEY WORDS: PROVINCIAL HIGHWAY NO. 9, HIGHWAY FLOODING, MORPHOLOGICAL CHANGE, AZARD COUNTERMEASURES

ABSTRACT:

The objective of this project is to propose hazard countermeasures in response to the coastal highway in Taitung. Knowledge improvements were made through extensive literature survey and investigating the effects due to the improvement engineering which is under construction at present. The methodology to analyze the hydrodynamic influence between before and after the improvement engineering is based on the well-validated wave-current-coupled model for hydrodynamics and the sediment transport model for nearshore morphology changes. Research outcome can be regarded as a reference from academic viewpoint for the assessment of hazard mitigation.

Literature reviews include the existing works from engineering and non-engineering prospective, where the former one is focused on engineering studies, accounting for coastal highway attacked by waves and coastal erosion as well as deposition, and the latter one is mostly paying attentions on the risk assessment of coastal highway and the warning system concerning wave overtopping. To understand the historical hazard events for this region, the PIs has been meeting with related institutes from the government side and consultant engineers to support and modify the hazard countermeasures in a compromise between ideal and reality. Two locations were selected at coastal highways near “Nanxien” and “Duoliang” to perform case studies in terms of hazard assessment and proposing “short-term” and “long-term” countermeasures.

Based on the assessment of hazard mitigation, the hazard countermeasures in both engineering and non-engineering prospective have been proposed for the Provincial Highway No. 9 in Taitung.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
Februbary 2020	224	200	□RESTRICTED □CONFIDENTIAL □SECRET □TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

目　錄

圖　目　錄

表　目　錄

第一章　緒論

1.1　計畫緣起

臺東海岸的沿岸漂砂問題存在已久，所造成的海岸地形變遷問題在歷年累積下，已對沿海公共工程(包括公路地基維護及海岸養灘工程)或漁業經濟層面(如大武漁港航道長期淤塞問題)造成不可忽視之影響。

台 9 線公路目前的道路拓寬工程，如香蘭至大鳥路段辦理公路車道拓寬，因颱風及強風季節大浪襲擊，產生沙灘流失及海岸線不斷地往內陸退縮，在颱風季節近岸大浪直接襲擊，公路浪襲的機會大增，碎波波浪更可能直接淘刷台 9 線公路之底部基座。整體而言，在大武漁港現存狀況下，瞭解臺東海岸沿岸流變化及其可能產生之中長期地形變遷特性，對於未來可能影響拓寬後公路之區域，是刻不容緩的議題。

基於上述，有必要針對台 9 線公路沿岸海岸環境進行近岸水動力分析與海域輸砂特性分析，並研提因應改善對策，以有效掌握未來改善政策方向。於前期計畫「臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究」中，已建立可自行維護及精進之適合臺東海岸公路沿岸區域的水動力及地形變遷模式，透過模擬瞭解目前近岸區域的波浪、潮汐及海流特性，並評估在海岸地形變遷的潛勢下，可能受到之公路浪襲溢淹、海岸侵蝕與淤塞等威脅之潛勢區段。本年度計畫則以因應對策之擬訂為主要目的，運用前期計畫建立之數值模式與評估結果，探討各擬訂因應策略之可行性與成效性，俾供相關資訊給相關公路單位作為施政參考。

1.2　研究範圍與對象

本研究擬以前期計畫之臺東海岸水動力特徵及中長期地形變遷特性評估結果為基礎，研擬公路浪襲與地形變遷(包含侵蝕災害與淤積災害)因應對策，俾供未來改善臺東海岸公路海岸區域策略之參酌。

圖 1.2.1 為兩期計畫整體研究範圍示意圖(研究區域詳細標示圖可參見附錄一)，資料蒐集與數值模擬均沿台 9 線拓寬路段進行分析，本計畫範圍為「香蘭-大鳥」路段，拓寬工程大致沿既有省道拓寬，道

路側與海岸相鄰，甚至陸側基座可直接受海浪衝擊。前期計畫利用「往昔資料蒐集分析」、「現場勘查成果」、「數值模擬評估」及「災害特性分析」等四大工作項目，研討該路段易致災潛勢區域。本計畫擬以前期計畫所評估三類型災害 (海岸溢淹、侵蝕災害及淤積災害) 潛勢區域，進一步分析其往昔改善情況，並研擬改善對策建議。最後，透過更細緻數值模擬，瞭解改善對策運用之可能效益。

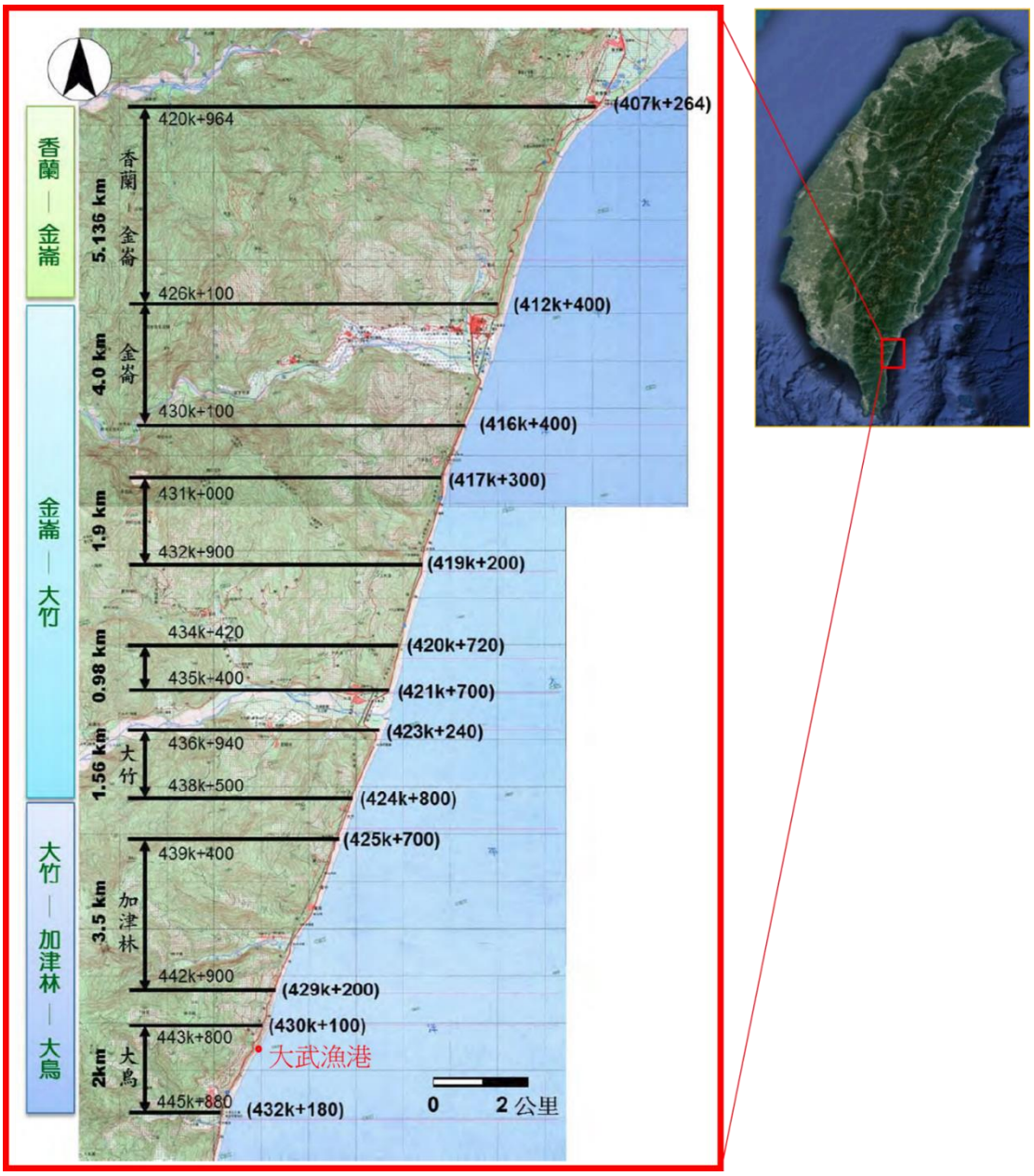


圖 1.2.1　計畫研究範圍圖(台 9 線拓寬工程靠海路段)

1.3 研究內容與工作項目

1.3.1 研究內容

依本計畫專業服務投標須知內容，本計畫工作內容說明如下：

1. 目的

為降低臺東海岸公路海岸區域受地形變遷影響致災之可能性，本研究擬以前期計畫「臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究」之臺東海岸水動力特徵及中長期地形變遷特性評估結果為基礎，研擬公路溢淹與地形變遷因應對策，俾供未來改善臺東海岸公路海岸區域策略之參酌。

2. 緣起

臺東海岸的沿岸浪襲與漂砂問題存在已久，所造成的公路溢淹與海岸地形變遷問題在歷年累積下，已對沿海居民與財產安全及公共工程(包括公路地基維護及海岸養灘工程)或漁業經濟層面(如大武漁港航道長期淤塞問題)造成不可忽視之影響。

3. 重要性

台 9 線公路目前的道路拓寬工程，如香蘭至大鳥路段辦理公路車道拓寬，因颱風及強風季節大浪襲擊，產生沙灘流失及海岸線不斷地往內陸退縮，在颱風季節近岸大浪直接襲擊公路導致溢淹的機會大增，碎波波浪更可能直接淘刷台 9 線公路之底部基座。整體而言，在大武漁港現存狀況下，瞭解臺東海岸沿岸流變化及其可能產生之中長期地形變遷特性，對於未來可能影響拓寬後公路之區域，是刻不容緩的議題。

4. 施政關聯性

本研究為配合本所 108 年科技綱要計畫「海洋及交通運輸防災技術研究(2/4)」之細部計畫「港灣環境資訊整合及防災應用研究」執行。

5. 施政配合性

本計畫研究成果可提供給交通部、公路總局、水利署及第八河川局等相關單位做為未來施政與後續計畫參考，俾利擬定相關防制對策。

6. 前後連貫的整體性

本計畫為 2 年期接續性研究，107 年之「臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究」，已建立可自行維護及精進之適合臺東海岸公路沿岸區域的水動力及地形變遷模式，透過模擬瞭解目前近岸區域的波浪、潮汐及海流特性，並評估在海岸地形變遷的潛勢下，可能受到之公路浪襲溢淹、海岸侵蝕與淤塞等威脅；本年度計畫則以因應對策之擬訂為主要目的與工作，運用前期計畫建立之數值模式與初步評估結果，探討評估各擬訂因應策略之可行性與成效，俾供相關公路單位施政參考。

1.3.2 工作項目

1. 蒐集海岸公路浪襲及溢淹防護、地形侵蝕防制與防淤之相關工法資料，及往昔臺東海岸及公路海岸地區改善策略相關文獻。

2. 針對前期計畫災害特性分析成果，進行現地勘查、並對海岸(公路)管理及相關工程設計單位進行訪談，以利瞭解致災區現況環境及各工法現階段之目的與適用性。

3. 運用前期計畫所建立波流耦合水動力及漂砂地形變遷模式，模擬評估說明各策略可行性。

4. 綜整分析模擬評估成果，優選最適合改善策略。

5. 每年度需參考科技部「科技計畫績效管考平台(http：//stprogram.stpi.narl.org.tw)」之「績效指標(實際成果)資料格式(word 檔案)」及「佐證資料格式(word 檔案)」，就本計畫成果之特性，選填合適績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究成果及重大突破。本計畫績效指標項目至少包括下列 3 項：

(1) 學術成就(科學基礎研究)-A 論文：論文發表；B 研究團隊養成：共同組織臺東海岸地形變遷合作團隊；D 研究報告：報告乙份。

(2) 技術創新(科技整合創新)-I 技術活動：發表於國內或國外研討會。

(3) 其它效益(科技政策管理及其它)-AA 決策依據：提供地形變遷特性分析訊息。

1.4 工作流程與架構

依據上述計畫委辦工作需求，擬訂「改善對策資料蒐集」、「計畫區現況分析」、「易致災潛勢區因應對策分析」、「對策可行性評估」，已及「適合改善對策建議」等五項工作項目，且主要架構可分為三部分，第一部分為「基礎資料蒐集作業」階段，第二部分為「對策分析作業」階段，第三部分為「對策可行性評估與建議作業」階段。整體計畫工作項目及步驟流程如圖 1.4.1 所示，各作業階段工作項目概述如後。

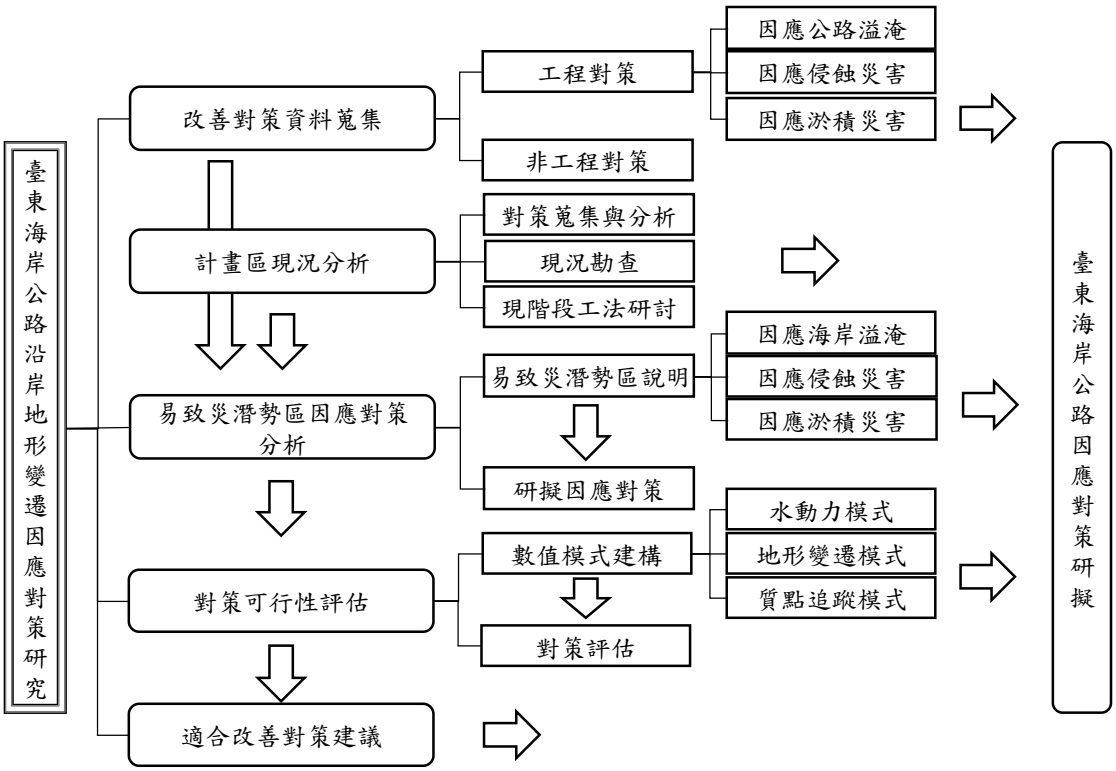


圖 1.4.1 計畫工作流程與執行架構

1. 基礎資料蒐集作業階段：此階段工作項目包含「改善對策資料蒐集」與「計畫區現況分析」。改善對策資料蒐集方面概分為「工程對策」與「非工程對策」兩部分，以蒐集海岸與公路災害防制對策資料為主要目的。於工程對策方面，參酌前期計畫災害特性類型進行國內外因應工法資料蒐集，包含「海岸浪襲/溢淹」、「侵蝕災害」及「淤積災害」等，並進行分析探討，以做為後續計畫區改善對策之參考，俾利研擬相關建議；於非工程對策方面，則針對國內外海岸或公路災害防制對策(例如：警戒方式、防護計畫及管理程序等)，進行相關資料蒐集。計畫區現況分析方面，主要為蒐集計畫區域往昔曾執行的改善對策資料，並進行現況勘查與現階段工法研討(包含海岸(公路)管理及相關工程設計單位進行訪談)，以瞭解目前對策之效用性，俾供後續改善對策評估與建議評估之參酌。

2. 對策分析作業階段：此階段工作項目主要為「易致災潛勢區因應對策分析」。透過「基礎資料蒐集作業階段」可獲致改善對策之方法與現階段計畫區域改善對策之效益，進一步配合前期計畫易致災區潛勢區域分析成果，研提可能因應對策，俾供後續對策可行性評估分析所用。

3. 對策可行性評估與建議作業階段：此階段工作項目主要為「對策可行性評估」與「適合改善對策建議」。透過數值模式方式，進行相關對策情境模擬，瞭解各對策之效益性與可行性，並以相關分析成果為基礎，研擬適合改善對策與建議。

1.5 計畫執行進度

本計畫執行進度如表 1.5.1。

表 1.5.1 預定進度甘梯表

工作項目	月次	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	備註
	年別	107												
	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
(一)改善對策資料蒐集			■	■	■									
(二)計畫區現況分析			■	■	■									
(三)易致災區潛勢區因應對策分析					■	■								
(四)對策可行性評估						■	■	■	■	■				
(五)適合改善對策建議											■	■		
(六)報告撰寫							■				■		■	
查核點			※				※				※		※	
工作進度估計百分比(累積數)		-	5	15	25	35	45	55	65	75	85	90	100	

預定查核點	
	第 1 季：政府部門研究計畫基本資料表登錄
	第 2 季：期中報告初稿
	第 3 季：期末報告初稿
	第 4 季：成果報告修正及經費支出報告表

說明：

(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。

(2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：①工作天數、②經費之分配、③工作量之比重、④擬達成目標之具體數字。

(3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。

備註：■ 已完成之工作進度；▒ 未完成之工作進度

第二章　相關文獻蒐集

2.1　工程對策蒐集

2.1.1　因應公路浪襲災害相關工法

台 9 線南迴公路段，長期以來因海岸侵蝕、颱風長浪侵襲，以及強降雨等，導致路基沖刷與流失，尤其鄰近多良、大武等濱海道路，與太平洋僅剩數公尺之遙(如圖 2.1.1)。當大潮時或颱風期間引致之風暴潮，造成海水位上升，使得海浪可輕易地越上台 9 線公路，造成行車安全的疑慮且降低其使用年限。減緩海岸公路浪襲，係將海浪阻擋於海岸道路外，主要可分為柔性(soft solution)及硬性(hard solution)兩種策略，前者係延長沙灘，如人工養灘(beach nourishment)，使沖刷帶/碎波帶遠離海岸公路，降低波浪上岸的機率；後者係構築不同類型的海岸結構物，用以保護海岸公路。

圖 2.1.1　海岸線岌岌可危的台 9 線大武路段 (2016 年 7 月拍攝)

1. 人工養灘

人工養灘係指以人為方式，將砂石堆置於受侵蝕或擬保護的海岸，堆置方式依搶救海岸的緊急程度，可將人工砂源堆置於沖刷帶，使其地形自然演化，達成平衡海灘斷面，或直接將人工砂源鋪設於面海側，直接延長砂灘長度 (Marine Board, 1995)，圖 2.1.2 為養灘保護海岸道路之示意圖。完整的人工養灘計畫可以人工沙丘搭配其他剛性結構物，如海堤、離岸堤等，屬於混合式工法；完全未建構剛性結構物的人工養灘計畫，可視為柔性工法。

一般而言，人工養灘計畫首先必須考慮砂源的來源及相關

成本，且人工補注砂源之粒徑應較原有自然海灘為粗，並評估養灘過程中砂源流失後續的補充，通常流失率在 20% ~ 30%之間。人工養灘的主要優點為對自然海灘演變過程之干擾較小，且對輸砂下游地區產生積極保護作用；同時，亦能保持海灘原有之景觀及休閒娛樂功能。目前人工養灘所產生的爭議為其對於防蝕功效的認定缺乏客觀的標準，由於海岸侵蝕區海灘砂源會自然流失，人工沙灘區如未持續補注，沙灘將逐漸縮小，防蝕功能亦將逐漸喪失。故，人工養灘需長期維護，後續的監測為其成敗的關鍵。以砂石養灘之技術已逐漸成熟，台灣亦有數起人工養灘的計畫案，如西子灣(郭等人，2009)、鹽寮沙灘養灘(蕭等人，2010)，以及旗津養灘工程(郭等人，2017)等實際工程案例。臺東海岸屬礫石海岸，現今文獻較少著墨以較大粒徑之礫石甚至鵝卵石作為養灘之砂源。

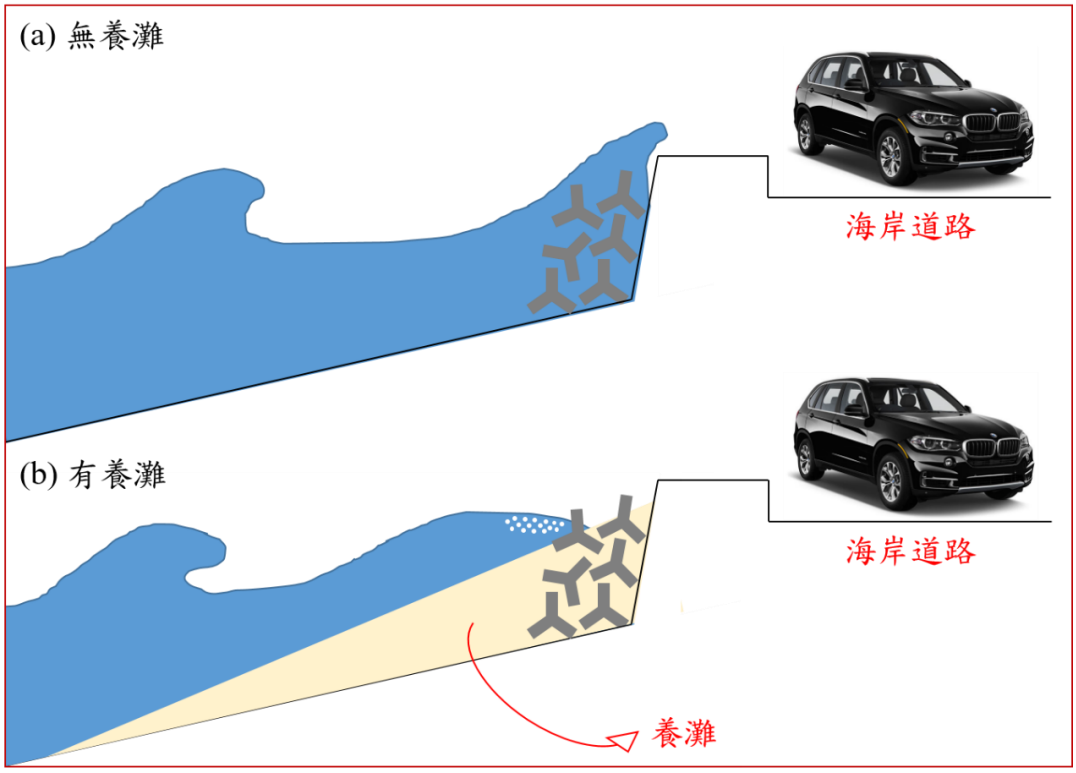


圖 2.2.2　以養灘保護海岸道路之示意圖

為縮短臺東往返高屏車程，「台 9 線南迴公路拓寬改善後續計畫」於 2011 年起開始執行，公路總局在台 9 線南迴公路新建 4.6 公里長的草埔隧道，開挖隧道產生之大量砂石全數運往海岸淘刷情形嚴重的大武漁港南岸，做為養灘用途，並於大武

漁港以南海岸興建多座離岸突堤，迄今已堆置累計達 70 萬立方公尺土石，人工養灘全長約為 1.2 公里，經歷 2016 年強烈颱風尼伯特等颱風考驗後，養灘土方淘刷現象不甚明顯，似乎有達到保護公路效果，建議可透過長期監測，以期能提供後續類似礫石養灘工程計畫案之參考。

2. 海岸結構物

硬性的保護海岸公路之工法主要係建構不同類型的結構物，目的為防止或減少波浪越波量，使海岸道路免受波浪侵襲。台灣大部分的海岸結構物多屬垂直或陡坡面的堤防，堤趾處施以消波塊等保護工法，以減少堤趾沖刷。圖 2.1.1 為不同於垂直或陡坡面海堤之示意圖，以下概述其優缺點及相關論文介紹。

(1) 拋石海堤 (rubble-mound seawall)：

以不透水心層外圍逐層包覆不同粒徑大小之石塊。根據不同的出水高度(free-board)及透水性，可減少波浪越波的發生機率，惟最外層的拋石可能受波浪襲擊而破壞為其潛在疑慮 (e.g., Bruce et al., 2009)，尤其是在颱風長浪作用下所造成的破壞 (e.g., van Gent and Wolters, 2018)。

(2) 蛇籠海堤 (gabion seawall)：

常見於河道保護工程之蛇(石)籠亦可以透過堆砌的方式構成海堤。其組成主要係以鐵線構成箱狀，再就地取材卵石或石塊裝於其內，優點為透水性佳，而內部由石塊堆疊而成可提供額外的水流阻力，消散水流能量，且其多孔特性可做為野生動物藏身之所，增加生物多樣性；然，鐵線長期經海水浸泡，將導致其生鏽、破壞，進而造成籠中卵石可能趨於潰散，喪失保護海岸公路的能力。因此，外箱可考慮經得起海水浸泡的材料施作，以保其特性。此外，涂與吳 (1996) 發現，蛇籠對防止海堤堤趾沖刷可發揮效用；至於拋放消波塊，則較無防止海堤堤趾沖刷之功能，甚至在緩坡海岸，可能加劇沖刷現象。

(3) 階梯式海堤及返波牆 (stepped and recurved seawall)：

相較於平面海堤，即海堤向海側僅設計單一或複合式坡度，階梯式海堤顧名思義為使海堤向海側具階梯狀，增加波浪溯上的難度。其減少波浪溯升高或越波量之主要參數為階梯的尺寸，若階梯太小，相對於波長而言，僅可謂表面粗糙度言之；反之，若階梯太大，則可視為大型結構物，建造成本亦提高。Kerpen et al. (2018)透過水工模型實驗，在其設計之實驗條件中發現，較小之階梯形狀可有較大之波浪能量消散。階梯式海堤/護岸在台灣算是常見的工法，如高雄旗津、澎湖等地都可見到類似的工程實例。此外，返波牆之作用為防止越波，使嘗試越堤的波浪返回海側，其優點為可加設於任何類型的海堤之上，然返波牆的尺寸、位置設計甚為重要，若設計錯誤，則將使得返波牆產生破壞。

(4) 曲面海堤 (curved seawall)：

將海堤設計成曲面，可使得入射波浪沿海堤的曲面爬升，最終回到海側，降低越波發生的機率 (e.g., 楊等人，2011)。若曲面海堤設計得當，波壓最大值位置可控制於接近靜水位。惟全曲面海堤建造成本較直立堤或具返波牆海堤來的高，故全曲面海堤的實際工程案例並不常見，臺東的成功漁港為實際案例之一。

(5) 直立海堤及返波牆 (vertical seawall with a recurved parapet)：

具返波牆海堤算是曲面海堤的折衷方案，僅於堤頂位置設置曲面的返波牆，使波浪返回海側。然此工法為暴力地抑制越波，故其所受到的波壓極大，容易破壞，如圖 2.1.2 (Castellino et al., 2018)。

(6) 直立海堤及水平式懸臂板 (vertical seawall with a horizontal cantilever slab)：

更加簡易的返波牆為設計一水平式懸臂板，極力抑制波浪越波 (Kisacik et al., 2012)。然而，同樣地，波壓將大部分

集中於水平懸臂板，若入射波浪太大，則容易使其翻覆、破壞。

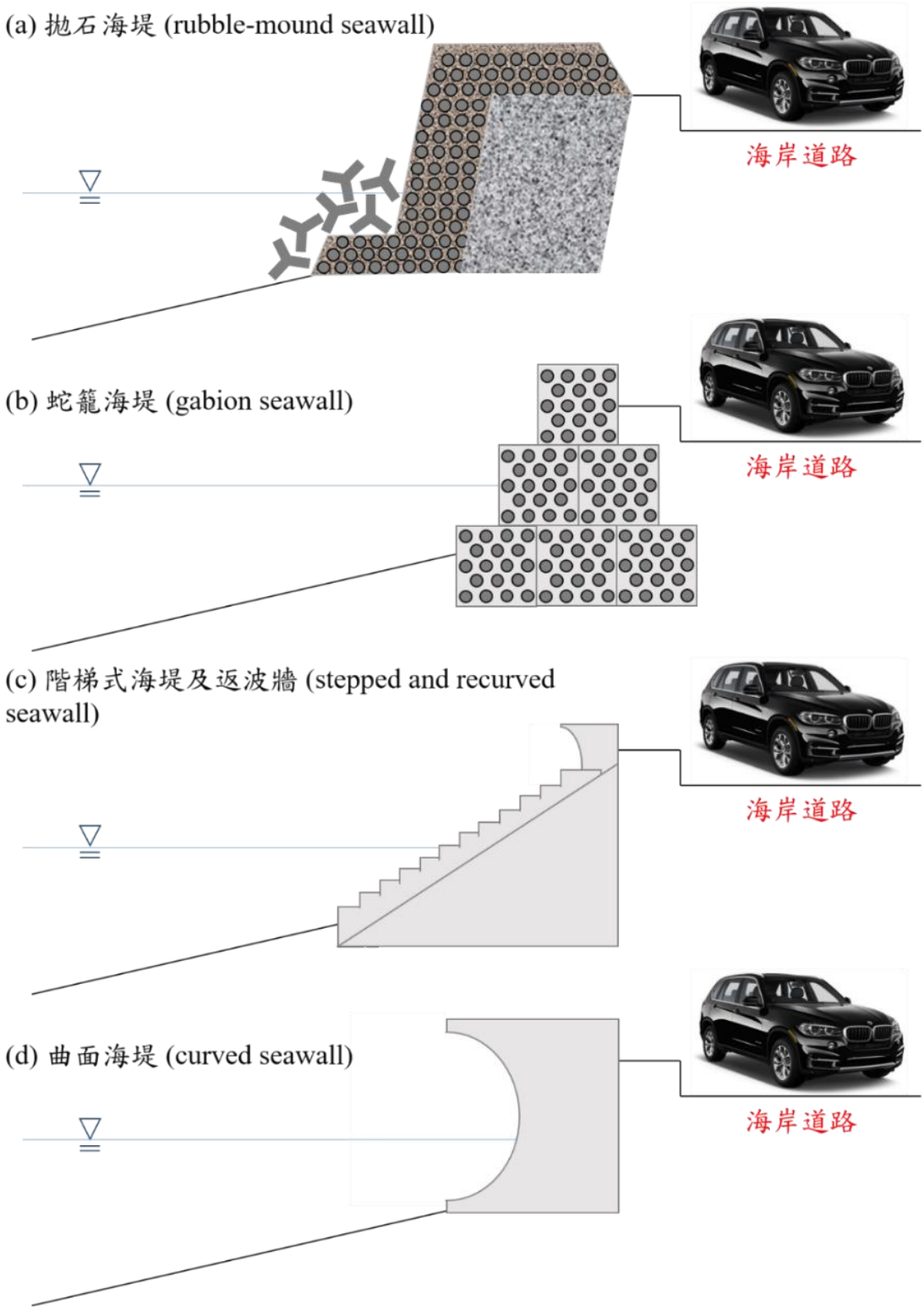


圖 2.1.1　不同類型海堤用以保護海岸道路之示意圖

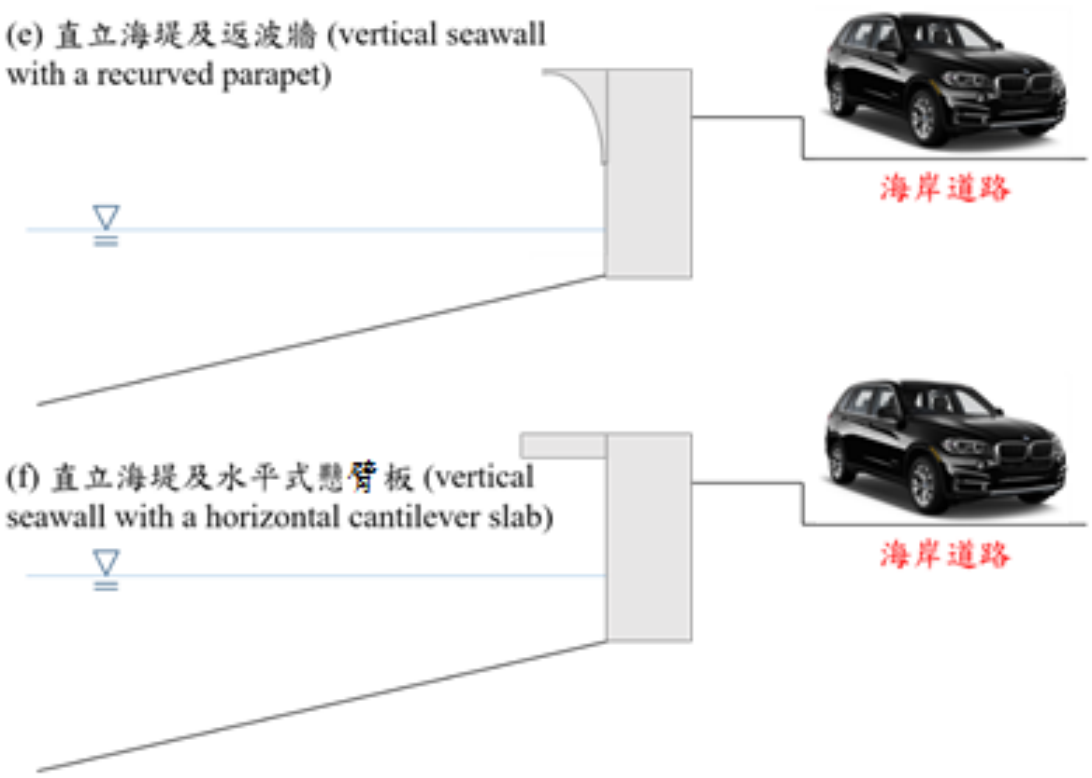


圖 2.1.1　(續)不同類型海堤用以保護海岸道路之示意圖

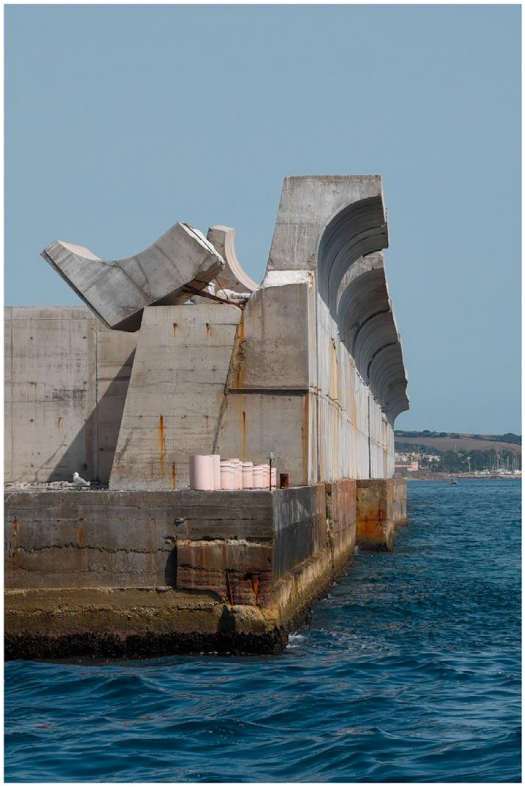


圖 2.1.2　具返波牆的直立海堤之破壞 (來源：Castellino, et al., 2018)

此外，為兼顧「浪襲防制」與「景觀良好」之效果，日本「理研興業株式会社」研發「透光防波柵」(參見圖 2.1.3)，該技術可做為海岸公路防制浪襲災害之工法。此工法是採用聚碳酸酯板與 H 型鋼架組成防波柵本體，且採單元式製造，因此於運輸至現場架設上較為便利，並能縮短整體施工期程。透過單元化組裝的特性，可因應現場環境條件進行彈性安裝，且可直接由陸側實施安裝程序。聚碳酸酯板本體為半透明，結構具彈性可有效分散波浪衝擊力，且材質具有強抗腐蝕能力，安裝於海岸公路側可形成半透明防波防護網，不僅能夠抵禦波浪侵襲公路，亦能兼顧景觀視野良好之效益。此工法於日本尚處於推廣階段，至 2014 年底時，於北海道，福井縣，和歌山縣，鹿兒島縣等 27 個日本地區，已於防災項目中相繼編列採用，並有相當多的實際案例(參見圖 2.1.4)。

來源：日本理研興業株式会社網站

圖 2.1.3　透光防波柵

地點：日本國道 36 號白老町海岸公路設置狀況

圖 2.1.4　透光防波柵實際運用案例

2.1.2 因應海岸侵蝕災害相關工法

海岸侵蝕可細分為天然或人為，天然因素諸如波浪破碎作用於海灘、颱風引起之暴潮與長浪、氣候變遷引起之海平面變化及洋流影響等；人為因素諸如建造不當的海岸結構物、建造水壩導致砂源減少等。然，意欲判斷海岸侵蝕之成因，需仰賴長期海岸過程資料觀測及蒐集，包含海流及波浪資料蒐集分析，方能擬定對策，因應海岸侵蝕災害，進而達成減緩甚至防範之目標。以軟性工法來看，砂石養灘或許仍有改善空間，以下就使用混合鵝卵石、礫石與砂石之養灘，以及使用砂袋/砂管等相關工法進行概述。

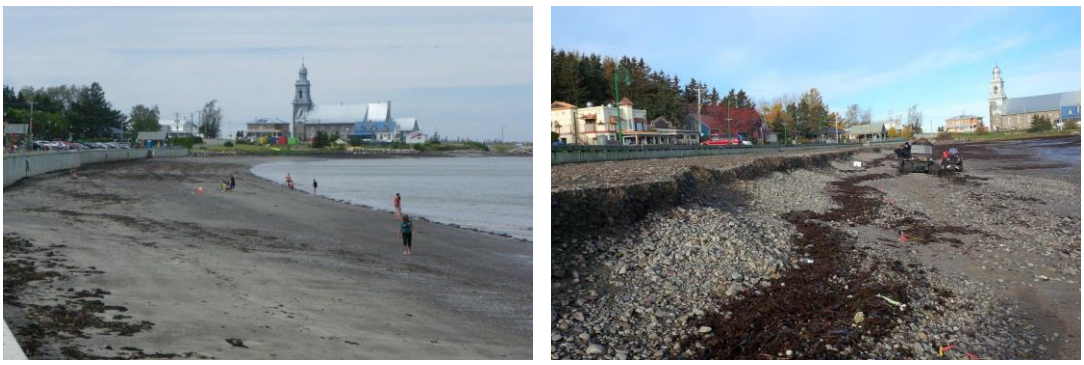
1. 混合鵝卵石、礫石與砂石之養灘

粒徑較大的天然鵝卵石或礫石海岸，常被海岸工程學者專家視為”動態的護岸”，可保護海岸避免侵蝕，主因係混合鵝卵石及礫石之海灘具高度多孔性，將提供額外的水流阻力以削減波浪能量，而鵝卵石與礫石之混合式海灘可在波浪作用下自然地調整其海灘地形，進而適應當地波浪條件。根據 Frandsen et al. (2015)，加拿大魁北克省的 Ste Luce beach 於 2014 年進行混合式養灘之現地實驗，所使用之混合鵝卵石及礫石的粒徑約為 0.6 mm 至 100 mm，中質粒徑約 10 mm，其養灘前、後之比照可見於圖 2.1.7，迄今仍持續觀測其對海岸侵蝕防護之成效。

於前節所述，開挖草埔隧道所產生之大量砂石，全數運到海岸淘刷情形嚴重的大武漁港南岸，做為養灘用途。本研究團隊曾於 2016 年 7 月至大武漁港觀察該養灘工法，如圖 2.1.6，拍攝視角為由北往南，照片左邊為太平洋、右邊為台 9 線。由照片可見現場粒徑分布甚廣，圖 2.1.7 為使用一長約 15 cm 的標的物，概略地了解養灘之粒徑分布，粒徑較大者約 20 cm、粒徑小者約小於 1.0 mm。然，此養灘於 2015 年 7 月 7 日竣工，迄今僅三年餘，仍需透過長期監測，瞭解其灘面變化，方能探討其可能之減緩海岸侵蝕效果，以期未來將此工法應用於長期受海岸侵蝕所擾之海岸。

2. 使用砂袋/砂管減緩海岸侵蝕

於前節所述，人工養灘及建造海岸結構物亦屬減緩海岸侵蝕災害的工法，可單獨進行，亦可通盤考量後，擬定結合養灘及建造適合當地海岸結構物之海岸保護策略。然人工養灘之風險為砂源流失，PRIF (2017)提出使用砂袋工法，如圖 2.1.8，用以固定砂源，亦即將砂源裝入耐風吹雨打的地工織袋內，將之整齊排列成海堤形狀，以類似護岸的概念，防止海岸侵蝕。而砂袋的形狀可依實際需求而定，如圖 2.1.9，則以砂管的型態用以減緩海岸侵蝕。



來源：Frandsen et al., 2015

圖 2.1.5　加拿大魁北克一處海灘利用混合鵝卵石、礫石與砂石之養灘前(左圖)後(右圖)對照圖

註：2016 年 7 月拍攝

圖 2.1.6　臺東大武漁港南側利用草埔隧道開挖之砂石進行養灘

註：綠色參考標的物長約 15cm；2016 年 7 月拍攝

圖 2.1.7　臺東大武漁港南側養灘粒徑分布

來源：PRIF, 2017

圖 2.1.8　以砂袋作為減緩海岸侵蝕之工法

來源：ODT, 2016

圖 2.1.9　以砂管作為減緩海岸侵蝕之工法

除養灘工法外，亦有透過建構海岸/海域結構物，以達累積漂砂減緩海岸侵蝕之工法，例如：突堤、離岸堤、離岸潛堤及人工岬灣等工法，其中突堤工法大都僅能用於阻擋沿岸漂砂，較無法有效控制向離岸漂砂，對於波浪垂直近岸入射時，較無法有效保護海岸。以下則針對離岸堤、離岸潛堤及人工岬灣等三個工法進行概述：

1. 離岸堤

離岸堤為不與陸地相連，平行於海域中的結構物，可用於削減波能，並使堤後淤砂之工法。離岸堤通常設置於颱風波碎波線以內為宜，堤後淤積可形成砂舌或繫陸砂洲，具有安定海岸之作用。傳統離岸堤概以消波塊與堆石做為堤身材料(參見圖

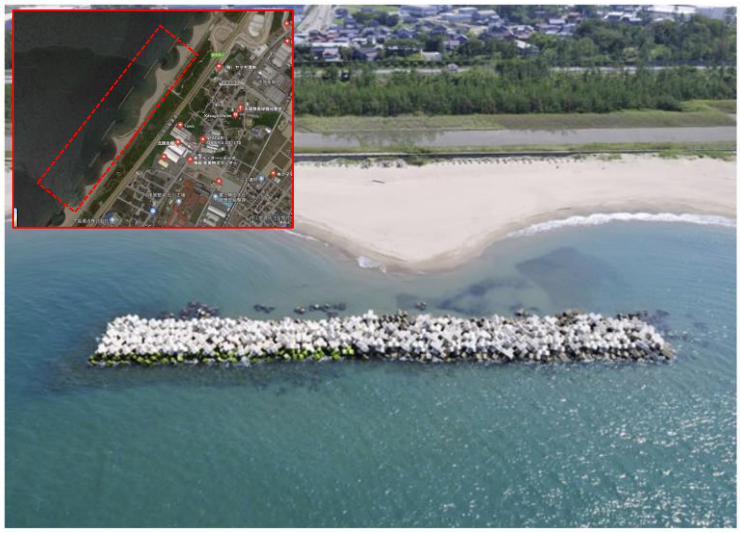
2.1.10)；新型離岸堤考量景觀條件，會以鋼筋混凝土、鋼，或橡皮等材料製成。國內亦有離岸堤工法之相關案例，例如：嘉義好美寮、高雄茄萣、臺東縣佳冬鄉海岸等處均有離岸堤工法實施。

2. 離岸潛堤

離岸潛堤為潛沒水面下之海域結構物，藉其結構使波浪產生碎波、反射或折射等現象，達到波浪能量衰減之目的。透過堤後消能現象，可減緩海岸災害發生(例如：浪襲、海岸侵蝕)。潛堤因阻擋範圍較離岸堤小，使其消能效果較不如離岸堤，惟其對海域水循環影響較小，可降低工法對生態環境之影響，而潛沒水面特性，亦可減少景觀遮蔽之情形。雖此工法實施難度和經費較高，但可兼顧抑減海岸災害、海岸景觀與生態環境，因此概為國內廣泛使用之工法(參見圖 2.1.11)。此外，近年來因各國生態環境保護意識提升，防災工程已從「降低生態環境衝擊」思維，轉變為追求「兼具創造適合生態環境」，因此相繼使用較親近生態的材料來建造潛堤(例如：人工魚礁)，圖 2.1.12 為多明尼加共和國西部海灘度假勝地(Gran Dominicus)，透過設置魚礁球(Reef Ball)方式建構離岸潛堤，以達到防災、景觀與生態各面向兼顧之目的。

3. 人工岬灣

透過布置適當的岬頭與靜態平衡的海岸線，使入射波浪均能正向傳遞至灣岸各處，藉以降低沿岸漂砂之現象。此工法是應用人工岬灣經驗式來布置岬頭(Headland Control)，以達到平衡灣岸之功效。若能成功建構平衡灣岸，即便無上游漂砂補注量輸入，灣岸能仍保持平衡，減緩海岸侵蝕災害。國內已有各種人工岬灣工法的相關案例(參見圖 2.1.13)，均有成功養灘減緩海岸侵蝕之成效。



來源：橫山建設株式會社網站

圖 2.1.10　日本能美市吉原釜屋町地內海岸離岸堤

高雄旗津

來源：旗津區海岸線保護工程網站

南濱及化仁潛堤加強改善工程

來源：經濟部水利署第九河川局網站

圖 2.1.11　國內離岸潛堤

來源：Harris, 2001

圖 2.1.12　人工魚礁離岸潛堤

西子灣沙灘改善前後意象圖

高雄西子灣人工岬灣

來源：https://pwbgis.kcg.gov.tw/shitzwan/beach_idea.aspx)

臺南安平人工岬灣

來源：google earth

圖 2.1.13　國內人工岬灣案例

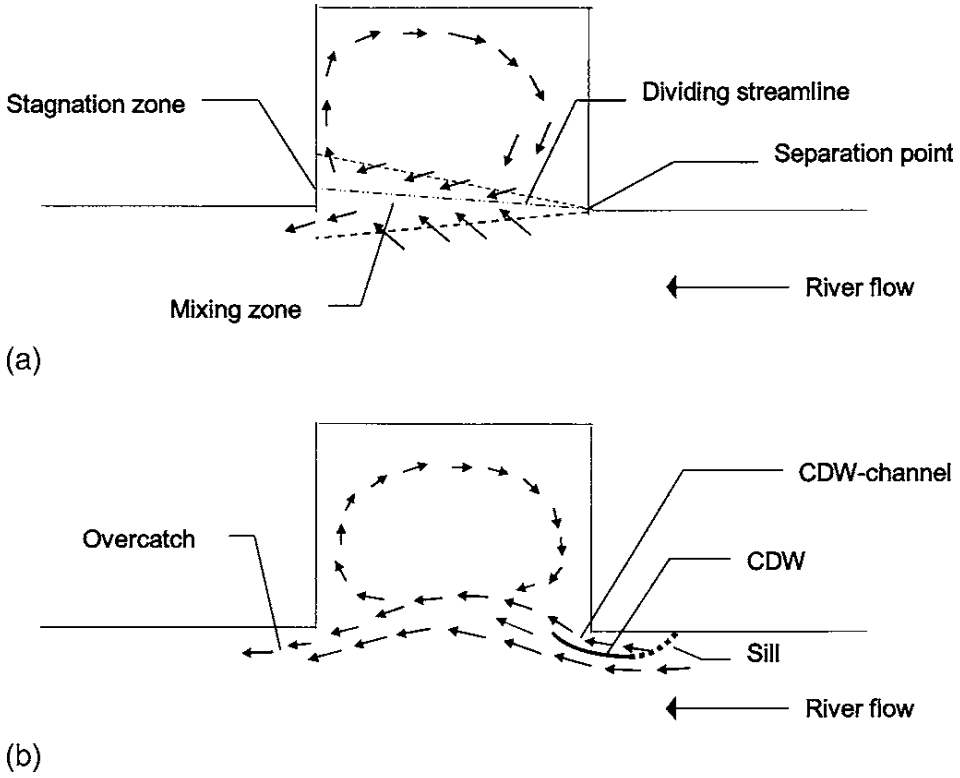
2.1.3　因應海岸淤積災害相關工法

臺東大武漁港淤積嚴重，長年聘僱業者挖掘淤積砂石，如圖 2.1.14。淤積主因是北邊大武溪和朝庸溪的輸砂，加上東北季風以及沿岸流的作用，全年漂砂量估計超過百萬立方公尺。為了攔阻漂砂，過去二十年，大武漁港北邊的防波堤，在數個計畫案中陸續加長。然而，防波堤的加長，只是使得攔住的漂砂換了位置，更嚴重的是，造成砂源供需失衡，導致大武漁港南岸的南迴公路，產生嚴重的海岸侵蝕。

註：2019 年 6 月拍攝

圖 2.1.14　臺東大武漁港航道淤積嚴重，長年需挖掘淤積砂石

漁港淤積現象並非台灣獨有，歐洲第一大的荷蘭鹿特丹港也面臨嚴重的淤積問題，每年約需疏濬一千萬立方公尺 (e.g., Winterwerp, 2005)。雖淤積成因可能有所不同，但仍可參考相關工程案例，進行水理分析。淤砂始為沉滓被帶動，而沉滓之啟動主要為垂直的紊流擾動分量，所造成之混合效應。而港口之淤砂，可將問題視為港口處水流交換率過於旺盛，而港口之水流交換機制有：(1)水流混合效應、(2)潮汐造成之水流流進與流出港口、(3)淡海水密度引起之異重流、(4)水流溫度引起之異重流，以及(5)沉滓引起之異重流 (Winterwerp, 2005)。在港口入口處，由於防波堤的興建，當水流通過，將於堤處產生流場分離，驅使水平的混合效應發生，產生數個渦流，而渦流的數量取決於防坡堤及港口的地形。因此，減少港口淤砂可嘗試由規則化港口水流交換率或改變混合效應旺盛之區域等方向進行分析。Kuijper et al. (2005)針對德國漢堡的 Parkhafen 港進行案例探討，於該港口防坡堤外圍設置一導流牆(current deflecting wall, CDW)，使沉滓活動旺盛之混合層區域改變位置，減少港口淤砂，示意圖如圖 2.1.15。



來源：Kuijper et al., 2005

圖 2.1.15　興建導流牆(CDW)用以改善港口淤砂之示意圖
((a)無導流牆、(b)有導流牆)

2.1.4 其它防災工法

除上述工法外，為因應不同區域災害特性，則有一些因地制宜的工法研發，藉以解決各區域複合性災害的問題。舉例來說，海岸因人為開發關係(例如：港灣或突堤等)，沿岸上游漂砂被攔截，導致下游海岸遭受海岸侵蝕危害，而透過「迂迴供砂」工法 (Sand Bypassing)，則能將上游淤砂引導至下游，除可減緩下游海岸侵蝕災害外，亦可降低上游沿岸或河口淤積之可能性，例如：澳洲特威德河(Tweed River)，參見圖 2.1.16。國內亦常有類似的災害情況發生，例如：大武漁港、新竹漁港等，其中新竹漁港已有實施迂迴供砂工法進行改善，透過人為迂迴供砂方式，補注至漁港南側灘岸，以維持潮間帶灘岸穩定。

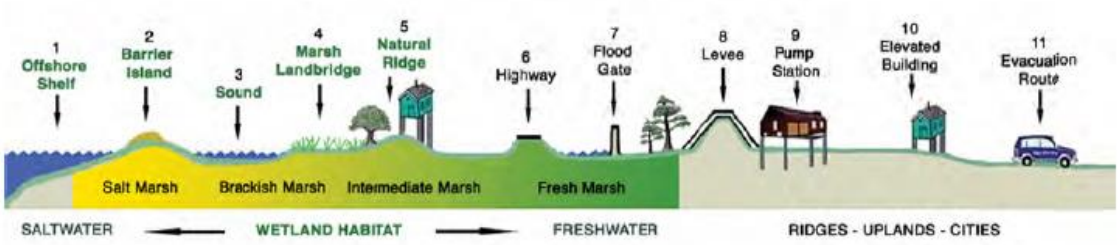
國外為確保自然海岸線不再損失，達到海岸永續發展之目的，海岸友善工法為近年海岸治理優先考慮工法。海岸友善工法其精神在於保存、恢復與建立，自然界中一般海岸均有自然屏障，這些足以保護海岸的自然屏障包含海灘、海岸沙丘、海岸濕地植被、珊瑚礁與蚵殼礁、離岸沙洲以及海岸防風林等。美國陸軍工兵團(US Army Corps of Engineers)，於海岸風險減降措施中，將上述自然屏障之保護機制及優點歸類如表 2.1.1(Bridges 等人, 2013)。

Bridges 等人(2015)利用學術發表及內部文獻，並回顧颶風珊迪(Hurricane Sandy)過後海岸評估及勘察成果，訂定降低風險的方法(表 2.1.2)。應用颶風過後復原的成果作為未來工程上的參考，此表需因應未來的工程規劃進行更新以確保其可行性。

此外，為因應氣候變遷降低暴潮和波浪對於海岸地區帶來的威脅，美國路易斯安那州(CPRA LA, 2012)及美國密西西比州(USACE, 2009)的研究計畫都推薦採用複合式的海岸防禦，藉由混和硬性工法和柔性工法能最大限度的降低暴潮帶來的風險。離岸沙洲做為第一道屏障抵擋波浪直接的侵襲，濕地區域內的柔性工法能衰減暴潮和波浪的能量，最後一道硬性工法則能更直接的降低暴潮高和波浪波高，如圖 2.1.17 所示。

來源：Pedro Loza, 2008

圖 2.1.16　迂迴供砂法案例



來源: Board, 2014

圖 2.1.17　美國路易斯安那的複合式海岸防禦策略

表 2.1.1　自然海岸侵蝕因應對策（Bridges 等人, 2013)

自然屏障型態					
	海灘以及沙丘	海岸濕地	珊瑚與蚵殼礁	離岸沙洲	海岸防風林
機制/優點	● 造成碎波 ● 衰減波能 ● 減緩水流傳向陸地	● 造成碎波 ● 衰減波能 ● 減緩水流傳向陸地 ● 增加入滲	● 造成碎波 ● 衰減波能 ● 減緩水流傳向陸地	● 減緩或消散波浪作用 ● 穩定漂沙	● 減緩或消散波浪作用 ● 穩定海岸線 ● 水土保持
防護因素	● 沙灘的高度與寬度 ● 海岸坡度 ● 漂沙補充與粒徑 ● 沙丘高度、寬度及形狀 ● 存在植披	● 植物種類及密度 ● 沼澤及濕地的海拔及幅員	● 礁石的寬度、高度及糙度	● 離岸沙洲的高度、長度及寬度 ● 陸地覆蓋度 ● 與海岸距離	● 植生高度及密度 ● 防風林尺寸 ● 平台高度 ● 土壤粒徑組成

表 2.1.2　降低風險的方法 (Bridges 等人, 2015)

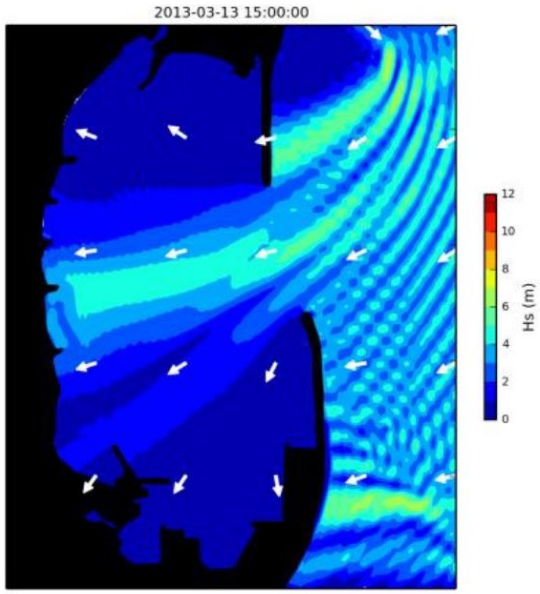
自然及以自然為本的功能	
1.沙灘 (沙, 礫石, 鵝卵石)	11.水下植物(如海草或其他淡水或鹹水中的植物)
2.泥灘/沙洲	12.河岸緩衝
3.斷崖 (任何材質; 如果是沙子則假設為侵蝕沙丘)	13.草本的挺水性水生植物之沼澤/濕地(淡水)
4.沙丘/窪地複合	14.灌木叢濕地 (淡水)
5.鹽沼 (草本的挺水性水生植物)	15.沼澤森林 (淡水)
6.灌木叢濕地 (鹹水)	16.池塘
7.沼澤森林 (鹹水)	17.草原(陸地)
8.海岸草原	18.灌木叢(陸地)
9.海岸灌木叢	19.森林(陸地)
10.海岸林	
複合功能	
20.礁石、潮間帶、潛沒的	
21.防波堤：陸上或挺水構造 (如近岸護堤、海檻、珊瑚礁、牡蠣、岩石、貝殼、貽貝, 水下植物、挺水或草本植物)	
22.防波堤：潛沒構造(如近岸護堤、海檻、人造礁石)	
23.島 (可包含一個或多個海灘、沙丘、防波堤、斷崖、沼澤、海岸林及其他植被)	
24.離岸沙洲島 (可包含一個或多個海灘、沙丘、防波堤、斷崖、沼澤、海岸林及其他植被)	
25.現存的海岸線 (例如：植被、海檻、平台、防波堤)	

2.2 非工程對策蒐集

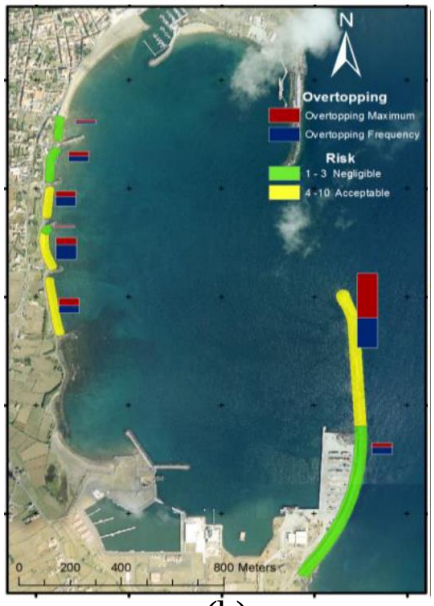
2.2.1 國外非工程對策

若考慮以非工程手段保護海岸公路，首要目標為準確瞭解海岸情況，進而評估災害來源及結果、評斷風險(risk)、脆弱度(vulnerability)與調適性(adaptation)，並考量極端災害及氣候變遷之影響。如 EurOtop (2016)根據大量的現場調查及實驗數據，並利用類人工智慧之類神經網路分析法，提供不同地形及結構物類型之溯升高及越波量估算公式，然其現場觀測資料均以歐洲為主，若欲用於台灣，需進一步考量因地點不同所造成之差異。FHWA (2014)指出海岸過程的了解，應包含暴潮(storm surge)、波浪(waves)、海岸地形(coastal morphology)造成之影響，進行風險評估，劃分不同程度之影響區域，進而規劃不同程度之管理措施，以人民安全為主之規劃手段，甚至做為進一步工程手段之先行評估。

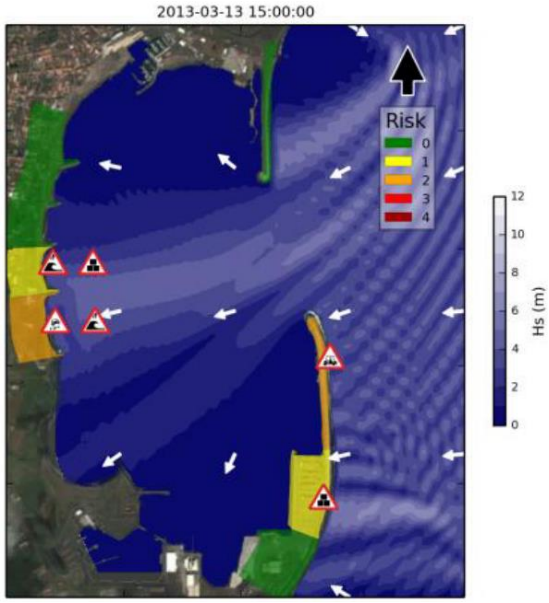
以整合式預警系統言之，Sabino et al. (2014)分享葡萄牙海岸越波災害管理經驗。該系統整合多套波浪模式，包含大範圍外海波高模擬，傳遞至近岸之計算，再透過類神經網路或經驗公式(Mase et al., 2013)等計算溯升與越波。最後透過預先設計之門檻值定義不同層面之災害警示，並以地理資訊系統(Geographic Information System，GIS)呈現災害地圖，透過不同顏色的圖層，展現災害之嚴重程度，如越紅色表可能災害越強烈。然為簡化系統及呈現較親民之數據予居民甚至遊客，呈現之數據僅包含波高、週期及波向，越波之平均越波量則以災害層級之色碼表示。該預警系統介面可參見圖 2.2.18 所示，系統介面中包含警戒圖示與相關災害門檻值之定義。另若以門檻值而言，美國海岸工程手冊(CEM)亦有訂定越波災害之門檻值，且其定義範圍較該系統廣泛，應較適合台 9 線公路預警所用(參考前期計畫公路浪襲之分析結果)。此外，可能之海岸災害除發布於相關政府單位網站及管理層級人員之電子郵箱外，亦整合至手機 APP，並於社群網絡發文(e.g., Twitter)，冀期有更多民眾能收到災害警示資訊。而預警系統之建立除了減災之核心層面外，也可用於未來國土開發規劃之參考、決策依據。



(a)



(b)



(c)

Sign	Pedestrians - Hazard type and reason	Mean discharge (l/s/m)
	Trained staff, well shod and protected, expecting to get wet, overtopping flows at lower levels only, no falling jet, low danger of fall from walkway	1-10
	Aware pedestrian, clear view of the sea, not easily upset or frightened, able to tolerate getting wet, wider walkway	0.1
	Unaware pedestrian, no clear view of the sea, easily upset or frightened, not dressed to get wet, narrow walkway or close proximity to edge	0.03
	Vehicles - Hazard type and reason	
	Driving at moderate or high speed, impulsive overtopping giving falling or high velocity jets	0.01-0.05
	Property - Hazard type and reason	
	Damage to equipment set back 5-10 m	0.4

(d)

註：(a)波高與波向資訊；(b)越波風險地圖；(c)越波預警圖；(d)越波警戒門檻值定義)

來源: Sabino et al., 2014

圖 2.2.18　葡萄牙海岸越波災害預警系統

日本地理條件與臺灣相似均為海島國家，海岸公路亦為重要交通幹道，因而也經常有波浪侵襲公路的問題。除於臺灣相似的工程防護手段外，於非工程手段上亦有完整防制浪襲系統。為觀測浪襲影響，於公路沿岸安裝越波計與監視裝置(參見圖 2.2.19)，藉以即時接收越波水位高度與現地浪襲情況(參見圖 2.2.20)，俾利公路警戒

與應變所用，當預報有浪襲災害時，該路段會透過警示告牌，提醒駕駛人員注意車速與行車安全。日本越波監測系統概分為三個部分(參見圖 2.2.21)：

1. 越波警戒

透過階梯式越波計，可觀測各高程越波情況，以為越波警戒做準備。另配合 ITV 監測影像，並透過影像處理方式，判釋越波覆蓋公路之情況。

2. 警告公路使用者

檢測發生越波的情況，並同時於海岸公路安裝的警戒信息顯示板上，顯示超車的危險警告，藉以提醒駕駛者注意浪襲危害。

3. 越波系統預警

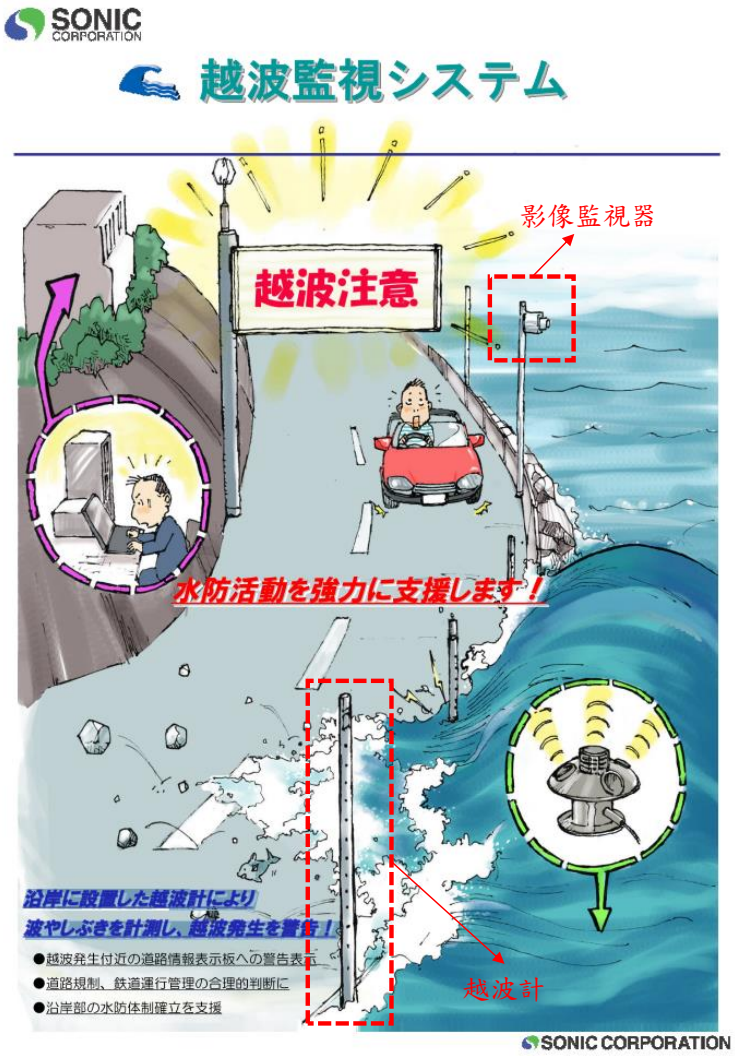
透過安裝於海域中的海象觀測儀，風向風速計，氣壓計等，以獲得海浪狀態資訊(例如：波高、波向及潮位等)與天氣資訊(例如：風向、風速及壓力等)，配合實際觀測的越波高度與發生越波次數，預測未來的越波情況。

除越波警戒系統外，日本亦有建立一套使用越波監測系統的公路維護管理原則(北海道開發局，安倍隆二，1998)。透過各項現地調查結果，才能夠因地制宜建置公路維護管理原則，其中各項概述如下：

1. 必須瞭解易發生公路浪襲災害的天氣模式。於日本有三種天氣情況易導致公路發生浪襲災害，其一為當太平洋東南風方產生強風時，若日本西部處於低壓狀態(主要是本州為低壓區)和東部高壓區的擴張時，則會產生正向入射日本之強風；其二為當季風或颱風由千島海域朝日本太平洋海岸或日本海傳播時，這東北方來的強風所引致的風和湧浪可能會造成公路浪襲災害；其三為當颱風位於日本南方時，會因颱風侵襲導致浪襲災害，該災害期間通常比其他方式更長，且當颱風到達千島海域時，

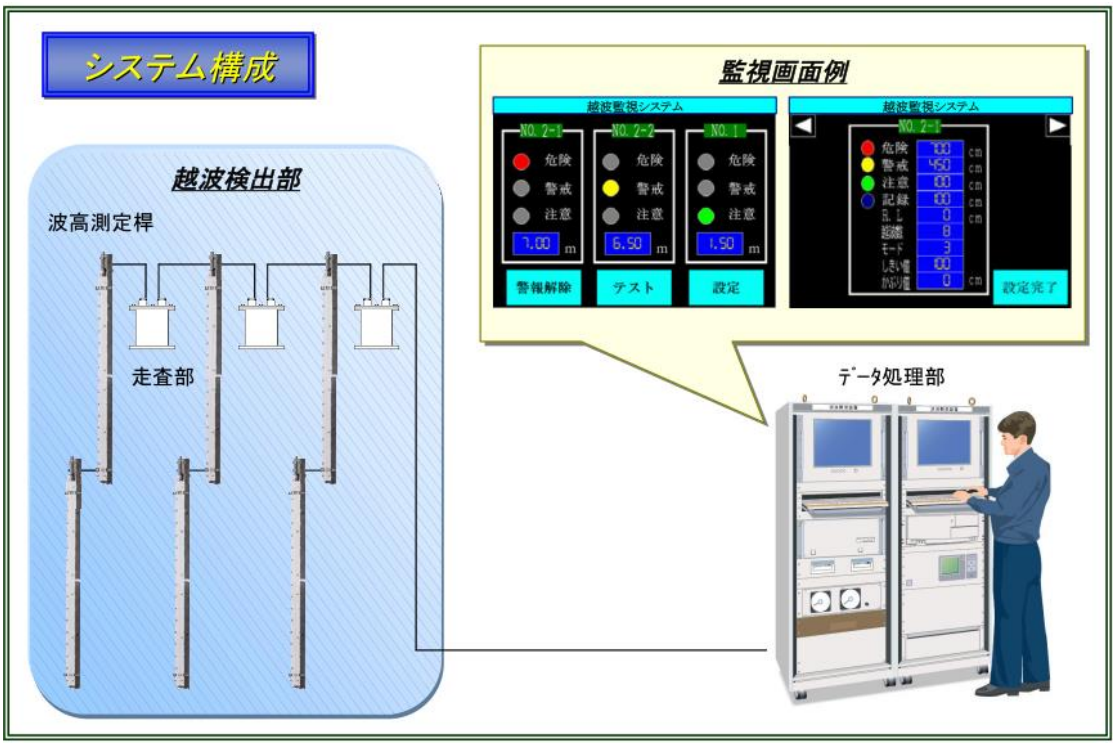
就轉換為第二種天氣模式，並持續有造成公路浪襲危害之可能性。

2. 當水位(潮位+波高)為 1.5 公尺以上且波浪週期為 6 秒以上時，該地浪襲發生機率較高。
3. 波浪週期越長，波浪動能越大，越波頻率越高。當週期超過 10 秒時，越波導致浪襲之頻率較高。
4. 越波頻率隨著潮位的升高而增加。若於漲潮時段發生越波，有越波頻率增加之危險。
5. 在波浪警告/警告通知時，不一定會發生越波，惟當時波浪方向(風向)處於向岸情況時，發生越波的可能性較高。



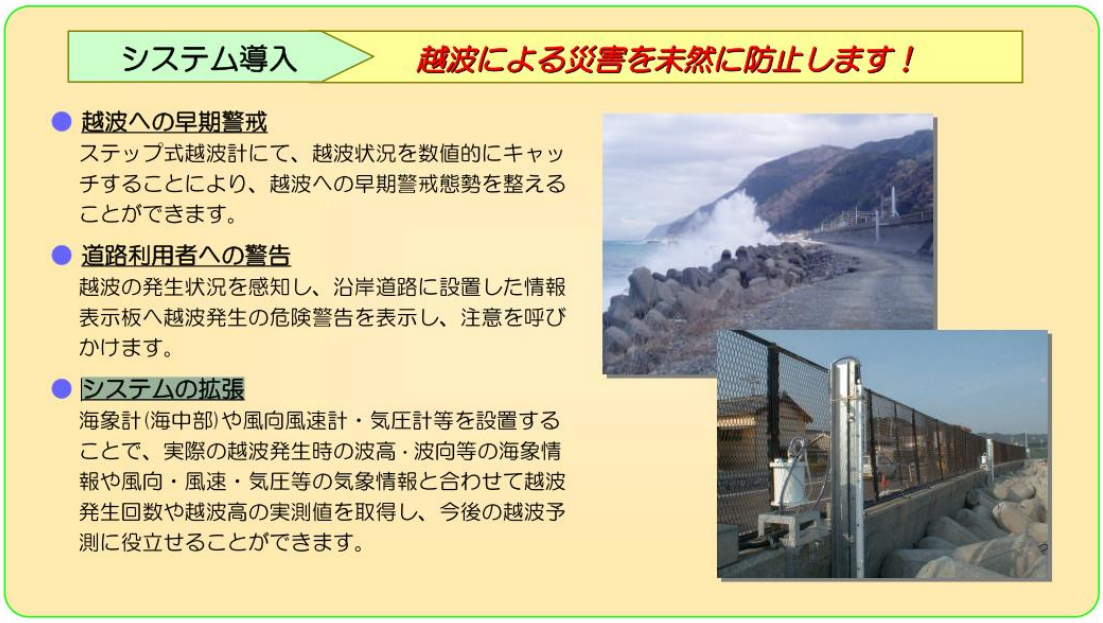
來源: Sonic Corporation

圖 2.2.19　日本海岸公路觀測系統



來源: Sonic Corporation

圖 2.2.20　日本越波計監測系統



來源: Sonic Corporation

圖 2.2.21　日本越波監測系統流程

2.2.2 國內非工程對策

國內因應海岸災害非工程對策主要為「整體海岸管理計畫」與「海岸防護計畫」，其中除針對海岸災害類型定義外，亦進行海岸防護區劃設，這些均可做為國家海岸防護及改善施政之參考依據。相關內容概述如後。

依據海岸法之定義，海岸災害乃「指在海岸地區因地震、海嘯、暴潮、波浪、地盤變動或其他自然及人為因素所造成之災害」。為防制海岸災害，預防海水倒灌、國土流失，保護民眾生命財產安全，依據致災因子之不同，擬將屬國土復育促進地區，且具有海岸侵蝕、洪氾溢淹、暴潮溢淹、地層下陷或其他潛在災害之海岸，劃設為一級海岸防護區；國土復育促進地區以外範圍，具上述災害情形之一者，得劃設一級或二級海岸防護區。就本計畫而言，計畫區海岸並非屬上述國土復育促進地區範圍，但從近年歷史災害特性可知，計畫區海岸所面臨的災害威脅，以極值事件所引致之暴潮溢淹為主，而受海氣象、水文及河川輸砂條件影響，亦有短期近岸地形侵淤變遷災害發生；另曾發生颱洪事件造成洪氾溢淹災害((e.g.,民國 98 年莫拉克颱風)。

因此，計畫區海岸乃屬於複合型海岸災害潛勢區域，仍可依據防護需求性劃設為一級或二級海岸防護區。而參考整體海岸管理計畫成果及相關定義如圖 2.2.24，乃將本計畫區海岸依據潛勢災害特性，劃設為二級海岸防護區，未來則由各目的事業主管機關配合海岸防護，採取必要之治理與管理措施。

依據「臺東縣二級海岸防護整合規劃」(民國 108 年)中，於 50 年重現期的標準檢核下，臺東海岸除部分河口自然灘地有溢淹潛勢外，其餘地區均無溢淹潛勢。而溢淹範圍內並無任何公共設施或私人財產，因此，可得知臺東海岸並無暴潮溢淹潛勢災害。其主要是因為臺東海岸地區緊臨海岸山脈，地勢較高且坡度陡，溢淹潛勢範圍僅達海岸防護設施前灘地或是高灘，並無溢淹至內陸情形。然因海岸淺灘地形較短，導致外海入射波浪能量消散機制不明顯，故海岸常因夏季入侵或過境颱風引致之巨浪，而發生不等程度之海岸防

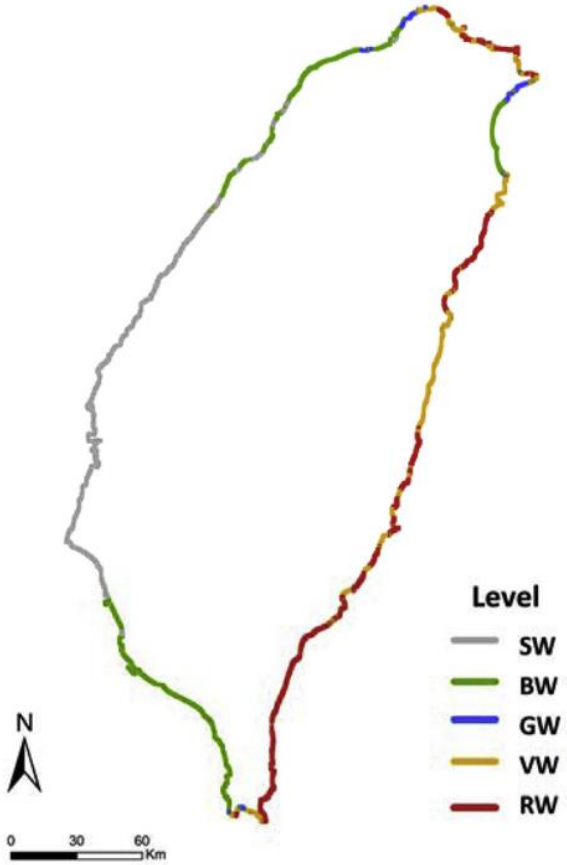
護設施損害及海水倒灌之災情。該歷史災害肇因於颱風期間海洋營力過大，而造成海岸防護設施損害，進而颱風波浪的越波造成短期性的積水，並非屬於潮害。由此可知，雖本計畫區域並無暴潮溢淹災害，惟海岸公路仍有受波浪越波侵襲之可能性。於海岸侵蝕災害方面，該計畫評估成果顯示臺東海岸地區較無顯著海岸侵蝕現象。本計畫前期計畫於海岸侵蝕災害分析成果顯示，整體而言，台 9 線海岸亦較無顯著海岸侵蝕狀態，惟於大竹溪以北、加津林以南與三和海岸處仍有中潛勢海岸侵蝕之現象，而對應該計畫分析結果，於此幾處災害潛勢區域亦呈現海岸侵蝕之趨勢。然而，由本計畫調查研究顯示，由於計畫區海岸侵淤變遷情形，乃隨外在營力條件而呈現季節性消長，多屬自然現象，且近期亦無明顯侵退情形。有鑑於此，未來計畫區海岸災害防護目標，仍以防公路浪襲為災害防護主軸，至於海岸侵蝕部分，建議仍須持續監測，若環境條件許可情形下，亦可配合採取積極性造灘措施及工法，以增加灘岸緩衝帶，提高海岸之防護能力。

海岸災害風險評估亦為海岸管理層面之對策，國內仍持續透過精進的數值模式來進行海岸危害程度之分析與劃設，Shih et al. (2018) 運用 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) 數值模式模擬往昔 129 個颱風引致臺灣沿岸的波高和暴潮水位，並進一步透過統計分析，繪製臺灣颱風波浪潛勢風險地圖(如圖 2.2.25)，由此結果可知，計畫區域均屬於浪襲嚴重之潛勢區域。

此外，交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱運研所)為提升台 9 線浪襲防災應變時間，研發推算海岸公路波浪溯上技術，並提供颱風期間浪襲路段通行安全所需之防災預警資訊。「臺東海岸公路浪襲預警系統」於民國 106 年完成(如圖 2.2.26 所示)，以簡易網頁方式，提供台 9 線浪襲易致災路段(多良段、南興段)於颱風期間預警資訊。

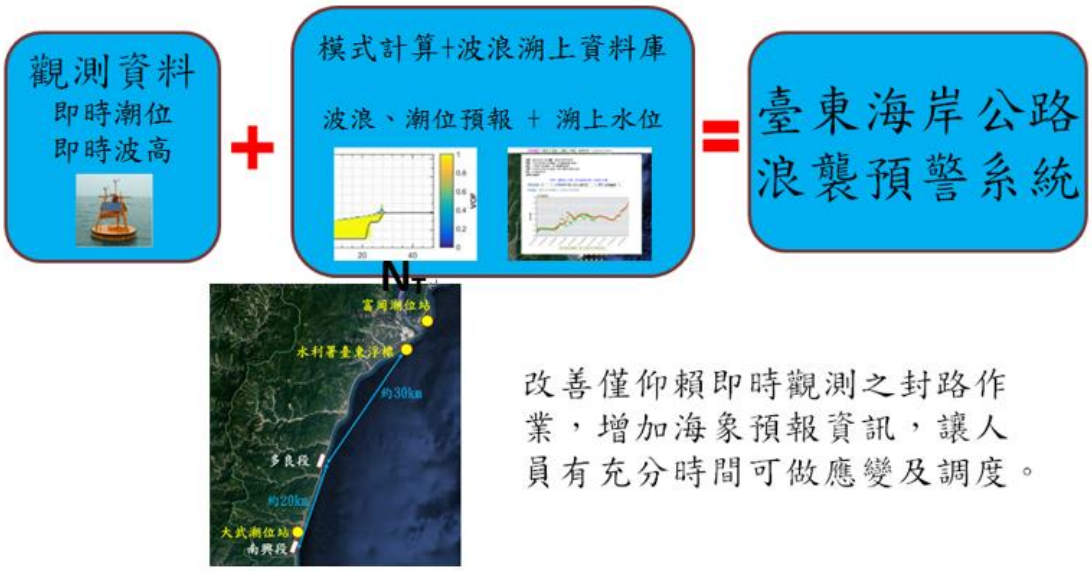
資料來源：經濟部水利署

圖 2.2.24　一級、二級海岸防護區位示意圖



資料來源：Generating potential risk maps for typhoon-induced waves along the coast of Taiwan

圖 2.2.25　颱風波浪風險地圖



資料來源：海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究

圖 2.2.26　「臺東海岸公路浪襲預警系統」架構圖

第三章　計畫區現況分析

為研提計畫區域適合之改善對策，應先針對計畫區目前已有的改善對策進行相關資料蒐集與分析，藉以瞭解先前提出改善對策之目的與相關背景條件。本章節擬分為「往昔改善策略蒐集與分析」與「現況勘查及現階段工法研討」來說明，往昔改善策略蒐集與分析主要針對往昔技術報告或研究進行蒐集，並說明相關對策擬訂之因素與背景條件；現況勘查及現階段工法研討則是針對前期計畫分析之易致災潛勢區域及相關改善對策目標區域進行現勘作業，以瞭解計畫區域現況條件與現階段工法施行情況，並與海岸(公路)管理及相關工程設計單位進行訪談，進一步研討工法建構與現況。

3.1　往昔改善對策蒐集與分析

3.1.1　海岸防護對策

為提高沿岸土地對颱風巨浪之防護能力，水利單位自民國 77 年起，陸續於沿岸沙丘前緣佈設保護工，經歷年擴建及維修補強而至今日規模，歷年海岸工程統計如表 3.1.1 及表 3.1.2，分別為香蘭與大武海岸分述，至今台 9 線海岸段大致維持「砂灘－保護工－沙丘」之防護型態。計畫區域中，三和、香蘭以及大武段，除台 9 線公路等保護標的，其後方還有社區等，故此段海岸防護設施較為完整；整體現況海岸仍以自然海岸型態為主，而加津林-多良路段公路後方較少聚落型態，因而較少防護計畫資料，惟於現場堪查可發現海岸概以消波塊進行消波防護為主，直至今年(民國 108 年 7 月)始有防制浪襲相關規劃設計發包。此外，南興路段亦為台 9 線浪襲易致災路段，目前三工處已有進行相關防護工程，其工程斷面設計如圖 3.1.1 所示。

3.1.2　港口減淤對策

茲蒐集近十餘年間，大武漁港鄰近海岸地形變遷與各防護設施興建，對大武漁港及大武漁港北攔砂堤鄰近海岸淤砂影響，供臺東尚武段海岸積砂、漂砂及輸砂平衡關係作參考，茲將大武漁港海岸各防護設施興建年份相關資料彙整於圖 3.1.2。其中大武漁港北防波

堤於 1996 年完工，長度約 117 公尺；北攔砂堤於 2000 年 3 月動工興建，長度約為 150 公尺，於 2000 年 9 月完工。另於 2001 年 3 月延伸北攔砂堤約 100 公尺，該工程於 2002 年 1 月至 2 月間完工，目前攔砂堤總長度約 250 公尺。

1. 大武漁港北攔砂堤興建前

1995 年 5 月至 1998 年 10 月間，大武漁港北攔砂堤興建前，漁港北側海域海岸線大致呈現向海前進趨勢，惟變遷幅度不大，平均每年約以 2.5~15 公尺之速度向海側成長；而漁港南側海域海岸線變動幅度甚小，顯示其在北攔砂堤興建前之海岸線侵淤情形不大。

2. 大武漁港北攔砂堤興建後

1998 年 10 月至 2008 年 6 月間，大武漁港北側海域海岸線往海側前進約 50~170 公尺，平均每年約以 4.5~16 公尺之速度向外海延伸，其中 2004 年 10 月至 2005 年 6 月間，大武漁港北側海域海岸線大幅往外海前進約 6~30 公尺，向海側延伸速度較快，平均約為每年 9~45 公尺，依 2008 年 6 月水深地形監測資料顯示，其海岸線已淤出漁港北攔砂堤外圍約 15 公尺；2008 年 6 月至 10 月間，受夏季颱風波浪衝擊影響，海岸線略往陸側侵退約 8 公尺；2008 年 10 月至 2009 年 11 月間，大武漁港北側灘線變化較無明顯變動。

大武漁港南側海域，在 1998 年 10 月至 2008 年 6 月間，海岸線侵退約 17.6~22 公尺，平均每年以 1.7~2 公尺之速度向陸側侵蝕，其中 2004 年 10 月至 2005 年 6 月間，大武漁港南側海域海岸線往陸側侵退約 1~4 公尺，侵退速度平均約每年 1.5~6 公尺，但 2008 年 6 月至 10 月間，其海岸線有往海側成長趨勢。另由 2008 年 10 月至 2009 年 11 月之灘線資料顯示，漁港南側海岸線略往陸側侵退約 7~13 公尺。

由以往資料顯示，大武漁港減淤策略，對於漁港淤積成效有限，卻造成下游南興段海岸侵蝕。現今大武漁港南側已由草

埔隧道開挖之塊石進行養灘，侵蝕情況已有改善，本計畫將針對草埔隧道塊石養灘之區域進行評估，研提中長期地形變遷之影響。

表 3.1.1　臺東海岸香蘭段海岸歷年海岸防護工程施作概要

年度(民國)	工程名稱	工程內容	位置樁號(海岸里程)
77 年	臺東縣香蘭海堤工程(新建)	海堤消波工 295 公尺 六角塊兩層排列	0+000~0+295 (2K+325~2K+030)
81 年	臺東縣香蘭海堤工程(加強)	原部分消波工損壞修復，並延長加強 90 公尺 六角塊兩層排列	0+000~0+385 (2K+325~1K+940)
81 年	臺東縣香蘭海堤工程(延長)	修復並加強擴大保護範圍 215 公尺 基礎 15 噸元鼎塊排列 上層六角塊兩層排列	0+385~0+600 (1K+940~1K+725)
84 年	香蘭海岸保護工工程(延建)	海岸保護工 356 公尺 基礎 10 噸三腳鼎塊排列 上層以天允塊兩層排列	0+620~0+976 (1K+705~1K+349) (現存 0+620~0+855)
93 年	太麻里段海岸復育及環境營造工程	香蘭海岸保護工重新吊放二處(以 10 噸混凝土蜂巢塊五層吊排)	0+70~0+84 與 0+295~0+399 (2K+255~2K+241 與 2K+030~1K+926)
98 年	香蘭海岸環境營造工程	原 15 噸混凝土六角塊往前吊放作為短突堤，每 75 公尺一座，共七座	0-075(No.4),0+000(No.1), 0+075(No.2),0+150(No.3), 0+300(No.5),0+450(No.7) 0+525(No.6)
		原位置新設 10 噸級蜂巢塊五層排列	0+000~0+165 與 0+172~0+300 (2K+325~2K+160 與 2K+153~2K+025)
99 年	太麻里海岸環境改善工程	修補香蘭海岸突堤 2 座 拋放 15 噸林克塊	0+450(No.7),0+525(No.6)

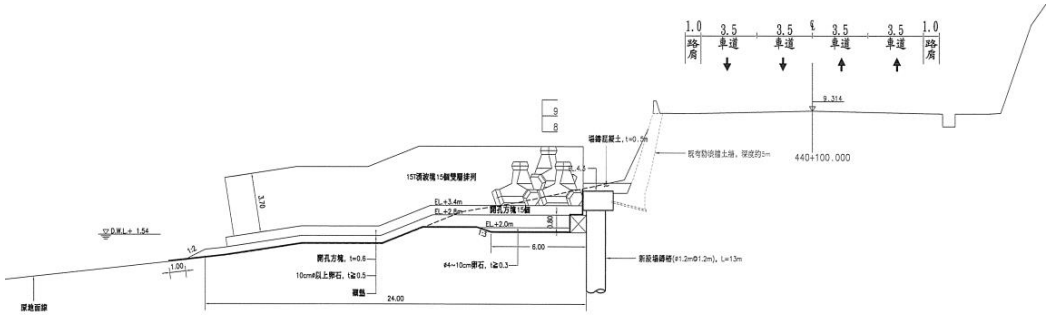
資料來源：經濟部水利署第八河川局年度經辦各項工程統計表、防洪記載表。

表 3.1.2　臺東海岸大武段海岸環境與防護措施概述表

地理區段	地理位置	海岸防護構造物類型	
大武溪以北	大武溪北側	崖腳消波防護工	消波塊沿岸約 0.5 公里長度，崖腳處鋪設 10 噸天允消波塊
大武溪至朝庸溪	大武溪南側	崖腳消波防護工	消波塊沿岸約 1 公里長度，崖腳處鋪設 4 排 10 噸林克消波塊
		無	---
	朝庸溪北側	崖腳消波防護工	沿岸約 1 公里長度，崖腳處鋪設 4 排 10 噸林克消波塊
	朝庸溪出海口	導流堤	朝庸溪出海口導流堤 2 座，其長度約為 60 公尺
大武漁港	大武漁港北防波堤處	攔砂堤	漁港北防波堤海側乙座攔砂堤，其長度約為 250 公尺
	大武漁港南側	短突堤	漁港南側 1 座短突堤，其長度約為 80 公尺
大武漁港至南興溪	大武漁港南側	崖腳消波防護工	沿岸約 1.2 公里長度，崖腳處鋪設亂拋 10 噸消波塊
南興溪至安朔溪	南興溪北側	無	---
	安朔溪北側	無	---

資料來源：臺東海岸（尚武段）監測調查計畫，經濟部水利署第八河川局。

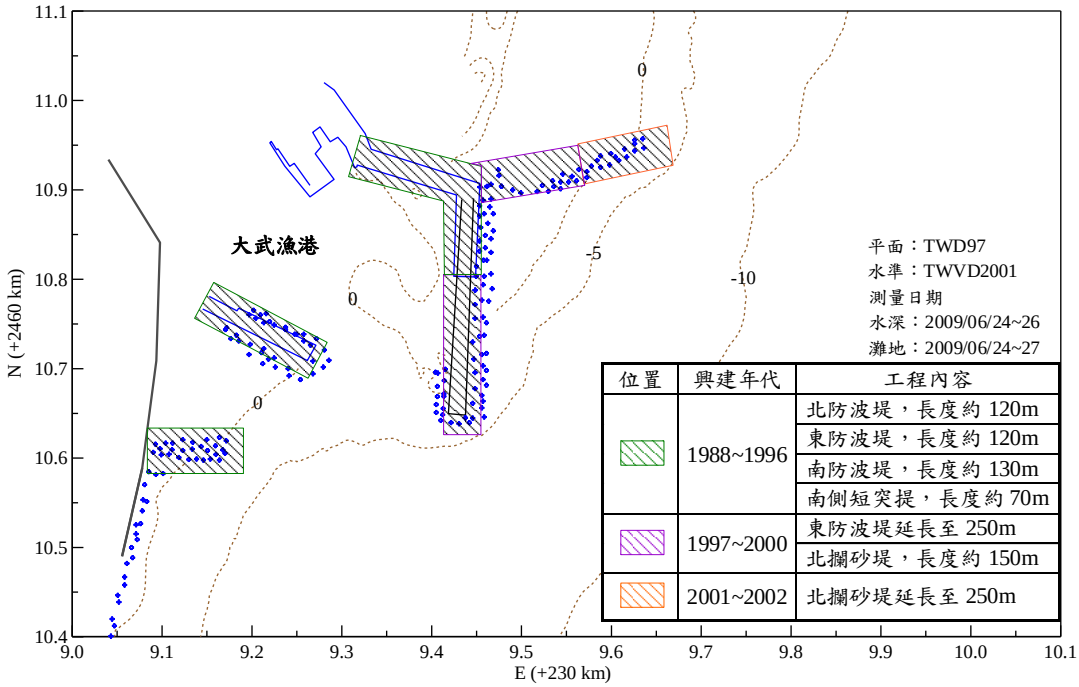
工法實施路段平面圖



工法斷面圖

資料來源：世曦工程提供。

圖 3.1.1　南興路段抑制浪襲工程圖



資料來源：臺東海岸（尚武段）監測調查計畫，經濟部水利署第八河川局。

圖 3.1.2　大武漁港各防護設施興建年份示意圖

3.2　現況勘查及現階段工法研討

進行計畫區往昔改善對策蒐集與分析後，需針對相關改善工程實6施區域與工程設計相關單位進行現勘與訪談作業，藉以瞭解施工區域海岸現況與相關防護設施資訊，並加強對現階段改善工法之瞭解，俾利後續與本計畫所蒐集的國內外改善工法資料綜合分析，以利研提適合改善對策。圖 3.2.1 為計畫區現階段改善工法研討流程圖。

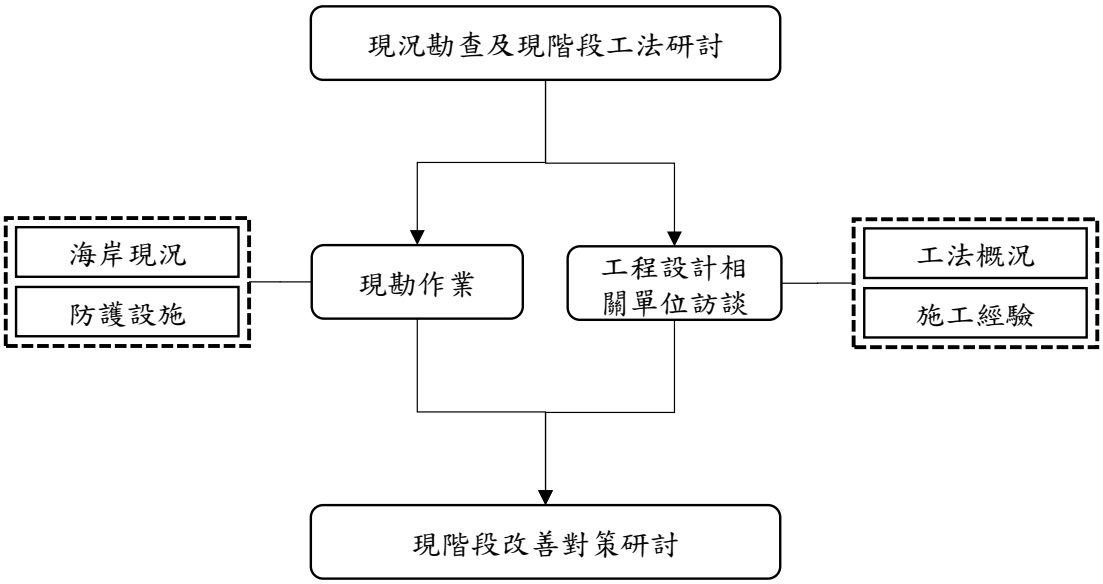


圖 3.2.1　計畫區現階段改善工法研討流程圖

3.2.1 工程設計相關單位訪談

於改善策略評估前，需先針對計畫區域現況進行深入瞭解，包含目前評估潛勢區域是否符合在地性，以及已改善區域及即將改善區域之策略概況等相關資訊。而本計畫於本年度(民國 108 年)6 月以前已拜訪三家工程設計相關單位，分別為第三區養護工程處(以下簡稱三工處)、世曦工程顧問大武段工程處(以下簡稱世曦大武段工程處)及世曦工程顧問港灣工程部(以下簡稱世曦港灣部)，訪談時間分別為 4 月 12 日、5 月 2 日及 5 月 23 日。其中，三工處主要提供往昔台 9 線海岸公路浪襲及海岸侵蝕之在地經驗資訊；世曦大武段工程處則針對拓寬工程進行概述；世曦港灣部則為現階段台 9 線海岸防護工程設計部門，因此本計畫概以三工處與世曦港灣部訪談成果來做為台 9 線現況與工法設計概念之說明，相關說明如後。

1. 三工處訪談

此次訪談主要討論浪襲致災路段，依據前期計畫潛勢區域評估結果進行研討，並釐清各潛勢路段之實際情況，訪談會議紀錄概述如表 3.2.1 所示。其中，透過三工處提供之在地經驗，可知有部分潛勢路段與往昔經驗有所差異，惟潛勢災害路段大都符合現地情況。茲彙整三工處提供往昔災害位置與前期計畫評估之潛勢區域資料，並進行比較分析，其結果如圖 3.2.2 至圖 3.2.4 所示。於南興-大武路段比較結果可知，往昔資料與潛勢資料於 439K+000 ~ 441K+000 路段均顯示為公路浪襲災害路段，且該路段已逐段建置海岸防護工程預計於本年度(民國 108 年)完工，而 435K+500 與 434K+000 僅於潛勢結果中顯示為公路浪襲災害路段；於加津林-多良路段結果顯示，往昔資料與潛勢分析結果均將大竹溪以南(424K+000 ~ 425K+000)劃設為公路浪襲災害潛勢區域，且已規劃進行海岸防護工程，惟於 422K+000、421K+500 及 417K+000 ~ 419K+000 各路段中，往昔資料與潛勢分析結果有所差異；於香蘭-三和路段中，往昔資料顯示太麻里溪以南路段曾有發生海水倒灌，因排水不良導致溢淹情況，惟此種現象並無法於本計畫中進行考量，因此潛勢分析並無將此路段納入公路浪襲潛勢區域。

依據訪談結果，本計畫檢視前期潛勢分析成果，彙整相關要點如下：

(1)於大武漁港以北與加津林-多良路段，前期計畫所使用之水深地形與實際水深情況恐因差異較大，使其部分路段分析結果與往昔資料有所差異，此部分已於後續取得世曦港灣部提供實測資料重新模擬後，有所改善。

(2)三工處所提往昔災害點位，概以曾發生公路浪襲災害為主，較少海岸侵蝕之相關資訊，僅 418K+000 曾有海岸侵蝕情況發生，而且路段於潛勢分析中亦有評估為中潛勢侵蝕路段，此路段於本年度(民國 108 年)7 月會發包防護工程設計規劃，未來應可抑減海岸侵蝕與浪襲之情況。

(3)香蘭-三和路段因公路高程普遍較高，往昔較少發生公路浪襲情況，惟太麻里溪以南溢淹情況，屬於排水不良所致，本計畫無法分析此種情況。而潛勢分析中，於三和海濱公園有公路浪襲潛勢情況，此處於民國 107 年 9 月山竹颱風時，亦曾發生暴潮溢淹之情況。

表 3.2.1　三工處訪談會議紀錄

(一) 439K~441K(大武-南興路段)往昔有浪襲與海岸侵蝕的情況(與成大團隊分析之潛勢區域重疊)，近年來已有分段建置防護工程，並預計於本年度(民國 108 年 7 月)防護工程完工。
(二) 424K~425K(加津林-多良路段)為海岸防護重點路段，此與成大團隊潛勢分析成果相符，亦為可能遭受浪襲之路段，且此路段(靠大溪明遂道路段)於本年度(民國 108 年 4 月)，會委外進行防護工程設計規劃。
(三) 417K+150~417K+850、418K~419+200 及 423K~425K(加津林-多良路段)此三段為海岸防護之重點路段，並於本年度(民國 108 年 7 月)會發包防護工程設計規劃，抑減海岸侵蝕與浪襲之情況。然，成大團隊潛勢區域並未含括 417K 路段區域，建請團隊再進行確認，以評估是否納為本計畫改善區域。

表 3.2.1　(續)三工處訪談會議紀錄

(四) 407K+200~408K(香蘭-三和路段)往昔曾有海水倒灌，導致溢淹災害發生。另，406K+500 路段亦曾因海水倒灌導致排水管溢流，造成陸地溢淹之災害。然，成大團隊潛勢區域並未包含此區域，建請團隊再進行資料確認與現地堪查，以考量是否納為本計畫改善區域。
(五) 針對以建置防護工程路段，建請三工處提供相關工程規劃報告資料，俾利成大團隊進行分析。
(六) 「事先防護」之海岸災害防護思維相當重要，期本計畫報告完成後，亦能提供三工處瞭解台 9 線存在災害潛勢之路段，以利事先防範，減少災害發生時，人民財產的損傷，並可減少事後重建所需耗費之資源。

2. 世曦港灣部訪談

此次訪談主要討論台 9 線現行工法之經驗與觀點，借鏡其工法經驗做為本計畫改善工法研擬之參酌。此外，亦有針對致災路段潛勢資料進行討論，以利比較潛勢路段之差異。訪談會議紀錄概述如表 3.2.2 所示。

表 3.2.2　世曦港灣部訪談會議紀錄

(一) 依據世曦工程顧問往昔的分析資料，可知 422K 路段(大溪)亦為浪襲潛勢區域，此結果與成大團隊分析之潛勢區域吻合，建請成大團隊彙整各訪談單位之論述與經驗，並於報告中呈現。
(二) 世曦工程顧問於海岸防護工程設計概念方面(台 9 線)，是以保留既有的公路擋土牆，並於牆前設置平台與消波塊，使入射波浪達到消能效果避免波浪襲擊公路。其中，於設計中加入「濾層」設計，以降低波浪衝擊所造成的淘刷現象，藉以提升消波塊防護作用。請成大團隊整理相關設計概念，並彙於報告內容。
(三) 世曦工程顧問已提供往昔於台 9 線自行量測的海底地形資料，建請成大團隊將之併入模式中，以建構較完整之數位地形，並重新評估計算結果之合理性。
(四) 請成大團隊針對台 9 線可能海岸侵蝕路段進行整體評估，並於後續改善工法上研提改善建議。

表 3.2.2　(續)世曦港灣部訪談會議紀錄

(五) 依據世曦工程建議擋土牆型式對於公路浪襲亦有減緩之功用，惟其效果仍須評估。建請成大團隊於後續改善工法中，將此納為工法評估項目之一。
(六) 建請成大團隊評估目前大武漁港南岸目前的養灘工程(採用草埔隧道開挖之砂石)，於長期水動力作用下，是否會造成海岸災害。

世曦工程針對台 9 線海岸防護設計概念，概以不改變現有擋土牆為主，透過消波塊鋪設使波浪達到消能效果，降低波浪襲擊公路之目的。然過往於台 9 線海岸亦曾運用消波塊來進行消能之效果，惟消波塊於長時間波浪衝擊下，底部易受淘刷影響，使消波塊基底不穩固，甚至沉埋於灘岸，使其降低抑減浪襲公路與海岸侵蝕之效果。為改善消波塊基底淘刷問題，世曦工程於現行工法中，加入濾層概念，於消波塊下方設置開孔塊石與堤心石，並在下方放入濾布，藉以減少基底淘刷之強度，提升消波工程使用之時間，相關工法設計圖與現地施工圖參見圖 3.2.5。

另，世曦工程亦有針對台 9 線海岸公路進行相關潛勢分析，因此本計畫亦將前期計畫潛勢分析成果與其作比較。表 3.2.3 為其前計畫潛勢分析、三工處往昔資料及世曦工程潛勢評估之比較分析表。此外，世曦工程關注路段為台 9 線 407k+264 ~ 432k+180 路段，其主要為加津林-多良路段範圍，因此於此範圍有進行近岸水深地形量測，以提升路段浪襲位置之合理性。鑑此，本計畫參酌世曦工程之水深地形資料，重新進行加津林-多良路段水動力模擬，並重新分析潛勢區域。圖 3.2.6 為世曦工程水深地形等高線分布資料，再依據前期數值模式設定參數重新進行模擬及分析。圖 3.2.7 為加津林-多良路段重新模擬分析公路浪襲災害潛勢區之結果，其顯示 417K+000 ~ 419K+000 亦納為公路浪襲潛勢路段。有此可知，水深地形的缺乏會造成台 9 線海岸水動力模擬之準確度，此應納為後續改善對策評估區域之考量重點。

表 3.2.3　災害潛勢分析比較表

南興-大武路段
(一) 439K+850~441K+000 於前期計畫潛勢分析、三工處往昔資料及世曦工程中均為公路浪襲災害路段。 (二) 435K+500 與 434K+000 兩路段僅為前期計畫潛勢分析中，納為公路浪襲潛勢區域。
加津林-大武路段
(一) 424K+000~425K+000 於前期計畫潛勢分析、三工處往昔資料及世曦工程中均為公路浪襲災害路段。 (二) 421K+500~422K+000 於前期計畫潛勢分析及世曦工程中均為公路浪襲災害路段。 (三) 417K+000~419K+000 於三工處及世曦工程中均為公路浪襲災害路段。
香蘭-三和路段
非世曦工程主要關注路段

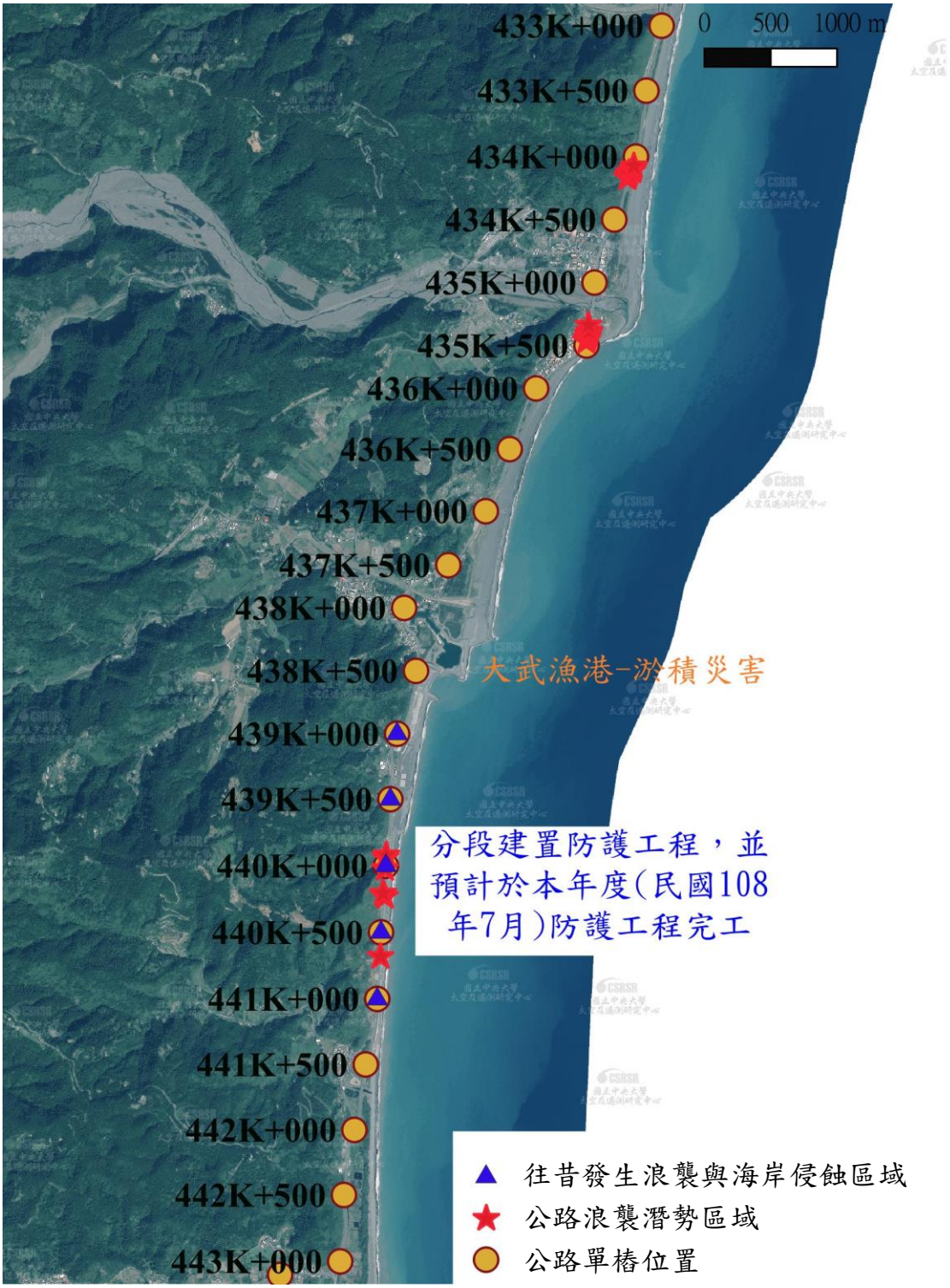


圖 3.2.2　潛勢分析與往昔發生災害地點之比較圖(南興-大武路段)

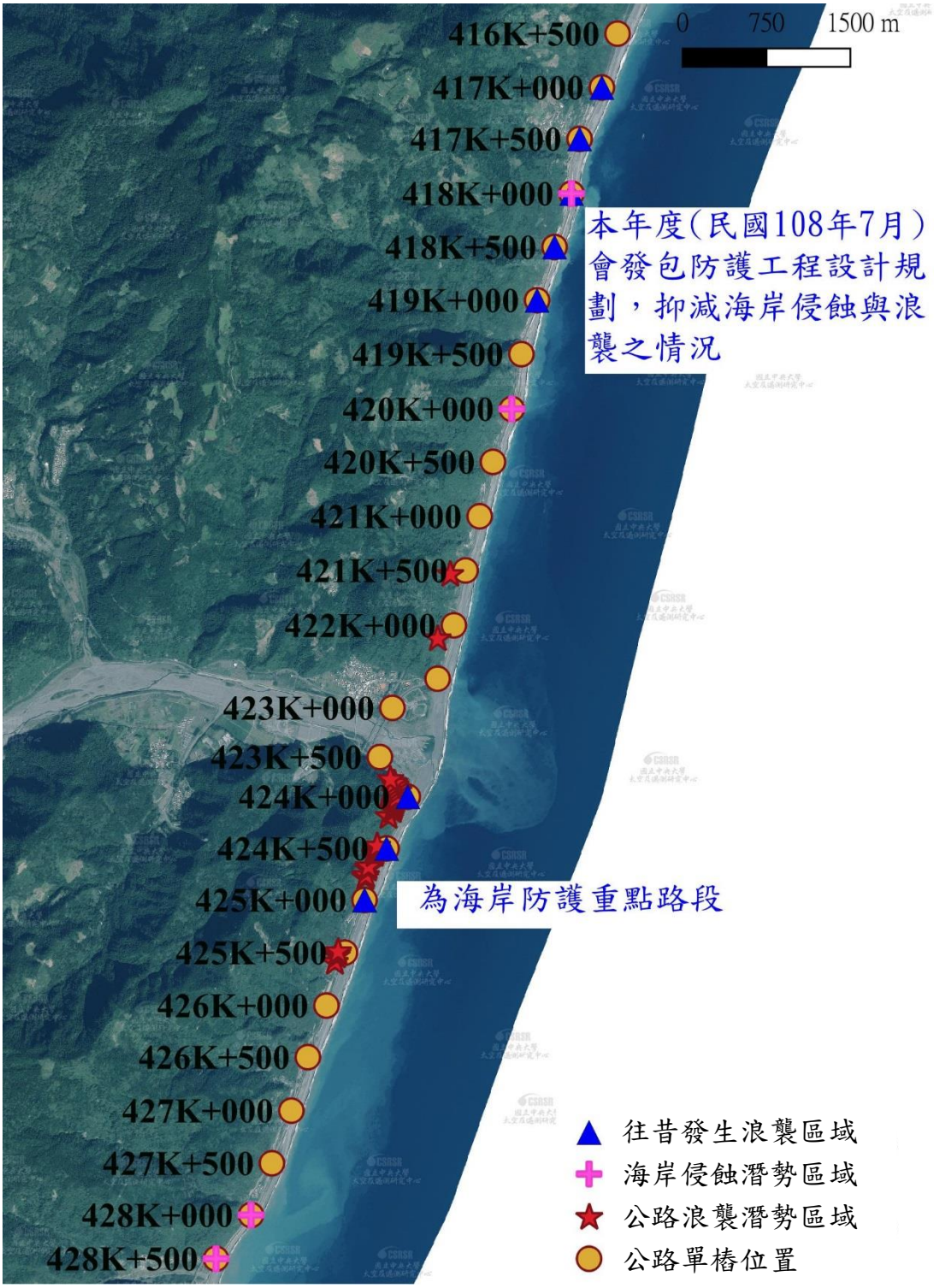


圖 3.2.3　潛勢分析與往昔發生災害地點之比較圖(加津林-多良路段)

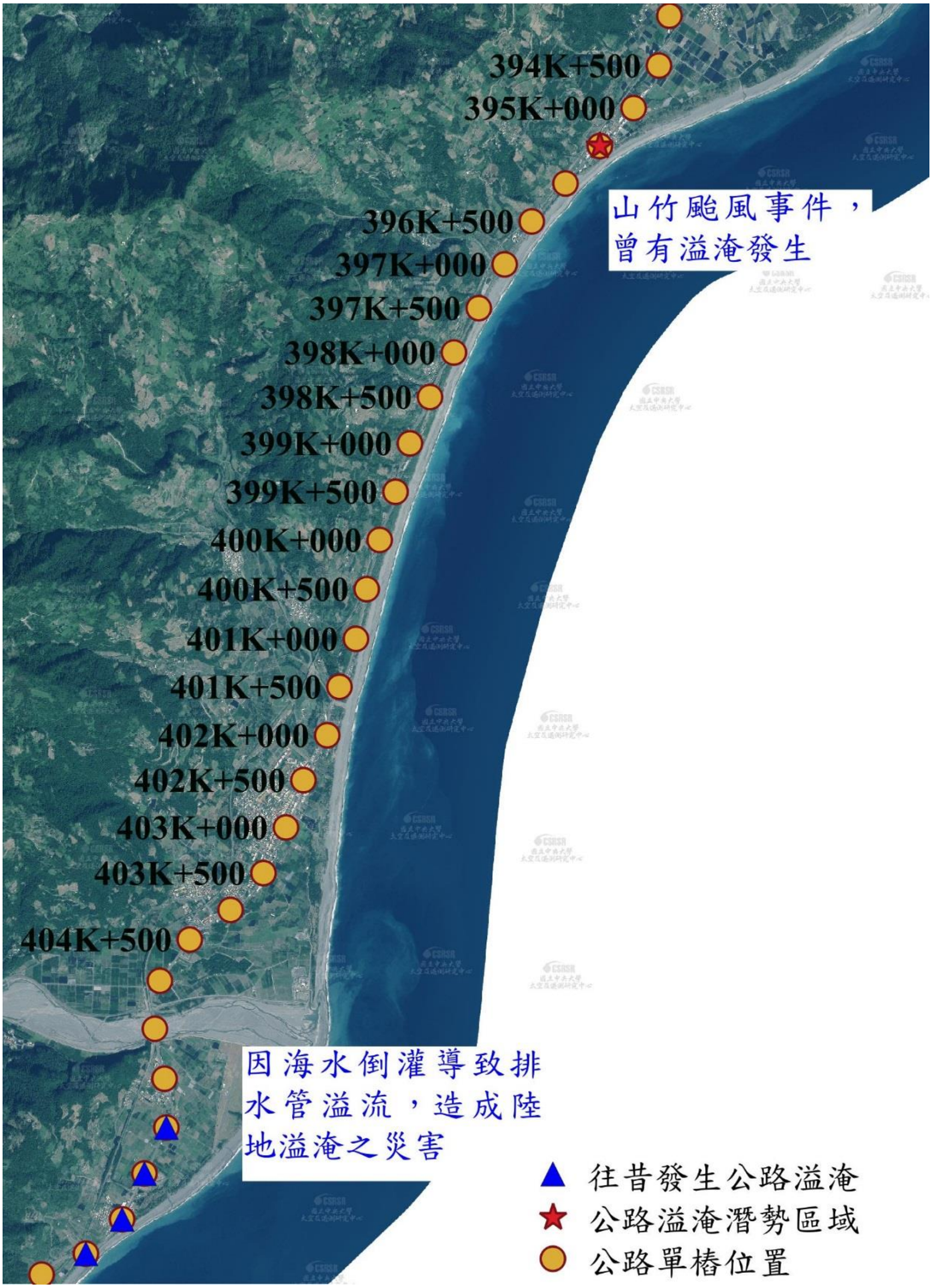
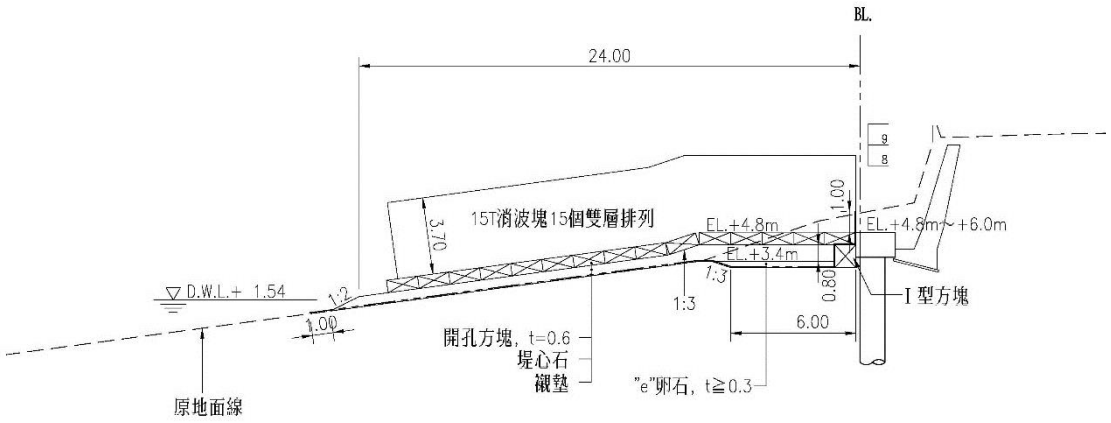


圖 3.2.4　潛勢分析與往昔發生災害地點之比較圖(香蘭-三和路段)

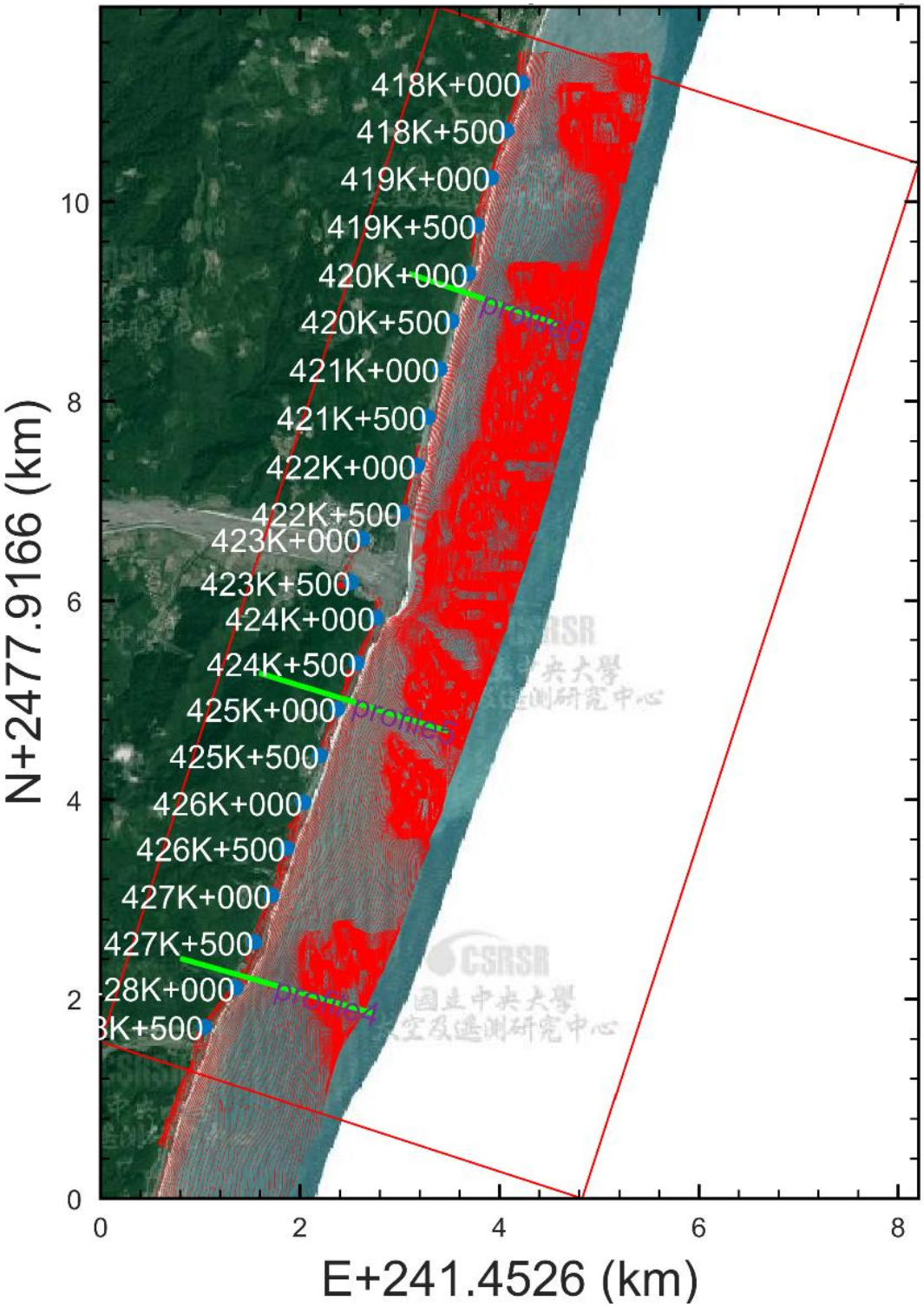


南興路段防制浪襲工法斷面圖(世曦工程顧問公司提供)

設置開孔塊石與堤心石
(運研所李俊穎科長提供)

消波塊舖設
(運研所李俊穎科長提供)

圖 3.2.5　台 9 線現階段海岸防護工程設計圖與現地施工圖



資料來源：世曦工程水深資料，本計畫重新繪製

圖 3.2.6　加津林至多良路段近岸水深地形等高線圖

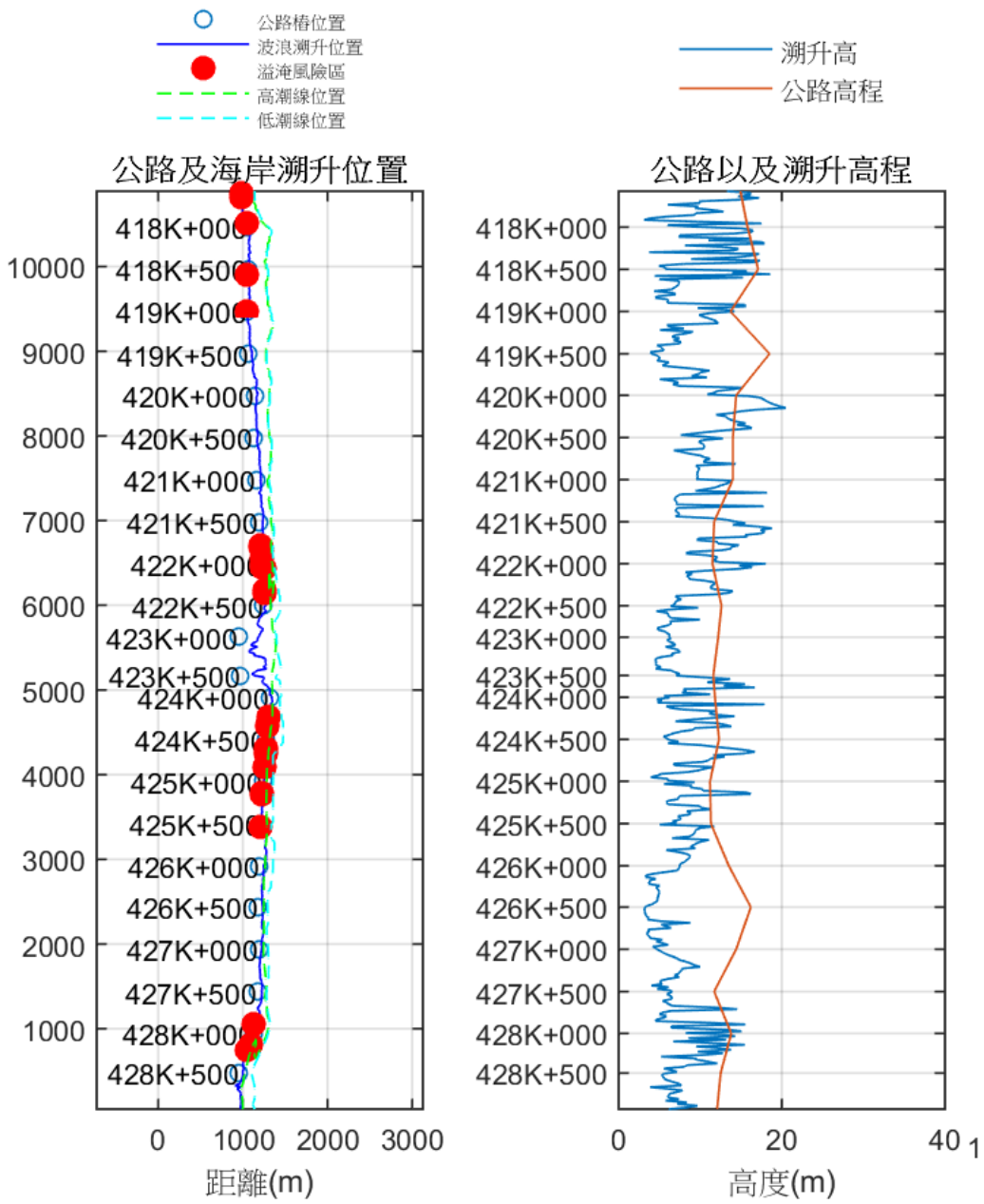


圖 3.2.7　加津林至多良路段「公路浪襲」災害分布圖

3.2.2　現勘作業

依據上述訪談資料可知，目前訪談單位概以「南興-大武」與「加津林-多良」為主要關注區域。而由前期計畫潛勢分析結果顯示，此兩路段概為可能災害潛勢較頻繁之區域，「香蘭-三和」路段概以三和海濱公園區域為可能發生公路浪襲災害路段。為瞭解各潛勢路段之現況，本計畫於 6 月 20 及 21 日進行現勘作業，並採集特定區域之粒徑樣本，透過粒徑分析後獲得其粒徑特性，以利數值模擬參數

設定所用。依據前述訪談資料規劃現勘區域，由南至北分別為大武漁港以南路段(439K+000～441K+000)、大武漁港、大竹溪以南路段(424K+000 ~ 425K+500)、大竹溪以北路段(417K+000 ~ 419K+000)及三和海濱公園海岸等 5 處點位。現勘概況如表 3.2.4 所示。

表 3.2.4　現勘概況分析表

大武漁港以南路段(439K+000～441K+000)	
	此為大武漁港南側突堤至草埔隧道養灘中間區域，已推積成顯著的灘岸，其粒石大都為圓弧狀居多，概為海中撈起或海浪攜帶至岸邊之粒石。
	為大武漁港南側突堤至大武漁港中間區域，已推積顯著灘岸，其粒石亦大都為圓弧狀居多，概為海中撈起或海浪攜帶至岸邊之粒石。
	使用草埔隧道開挖所產生的塊石養灘區域，其粒石大都呈現不規則形狀，且稜角型態較為顯著。
	此為大武漁港南側突堤至大武漁港中間區、南側突堤至草埔隧道養灘中間區域，粒石分布之情況。

表 3.2.4　(續 1)現勘概況分析表

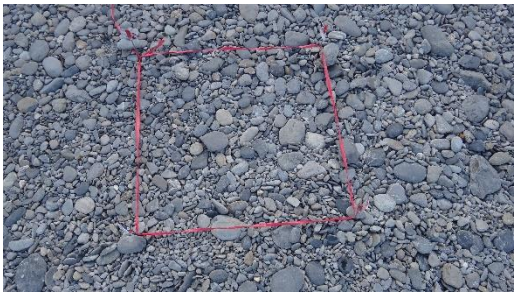
大武漁港以南路段(439K+000 ~ 441K+000)	
	此為草埔隧道養灘區域，粒石分布之情況。
大武漁港	
	此為大武漁港現況，長期處於清淤情況，目前港口已被漂砂淤積，船隻無法順利通行。
	由清淤於岸上的土方可知，其粒石亦屬於圓弧型式居多。
	大武漁港北側突堤長期攔截上游漂砂，已累積成顯著灘岸。

表 3.2.4　(續 2)現勘概況分析表

大竹溪以南路段(424K+000 ~ 425K+500)	
	灘岸較短，且公路高程較低，為公路浪襲潛勢區域。目前已有部分消波塊沉埋於海岸，擋土牆類似反波牆型式。
大竹溪以北路段(417K+000 ~ 419K+000)	
	公路高程較低，為公路浪襲潛勢區域。目前已有部分消波塊沉埋於海岸。
三和海濱公園	
	三和海濱公園海岸有放置消波塊，應為波浪溢淹之潛勢區域。
	

本次現勘除瞭解計畫區現況外，亦有進行現地粒徑採樣，以利進行粒徑分析，以瞭解現地粒徑分布情況。由於台 9 線海岸粒徑分布較廣，因此本計畫針對不同粒石分布情況分別採用「體積法」與「網格法」來進行採樣。粒徑大於 8mm 的粒石分布採用網格法採樣;粒徑小於 8mm 則採用體積法來處理,採樣現況如圖 3.2.8 所示。

體積法(採至少 3 公斤樣本)



網格法採樣

圖 3.2.8　本計畫採樣現況圖

第四章　易致災潛勢區因應對策分析

本工作項目主要是彙整「前期計畫災害特性評估區域」、「本計畫現地勘查」及「現階段工程研討」等成果，再透過工作討論會決定本計畫因應對策分析區域，以做為後續對策可行性評估之背景資料。因此，於改善因應對策研擬之前需先瞭解欲規劃改善區域之相關背景資料，而此部分資訊則需由前期計畫評估成果與本計畫前項工作項目成果(第三章)彙整分析獲得。明確瞭解本計畫區域欲改善之易致災潛勢區域後，再導入本計畫各改善工法蒐集分析成果，進一步針對各改善區域研擬相關因應對策。圖 4.0.1 為本工作項目構思流程圖。

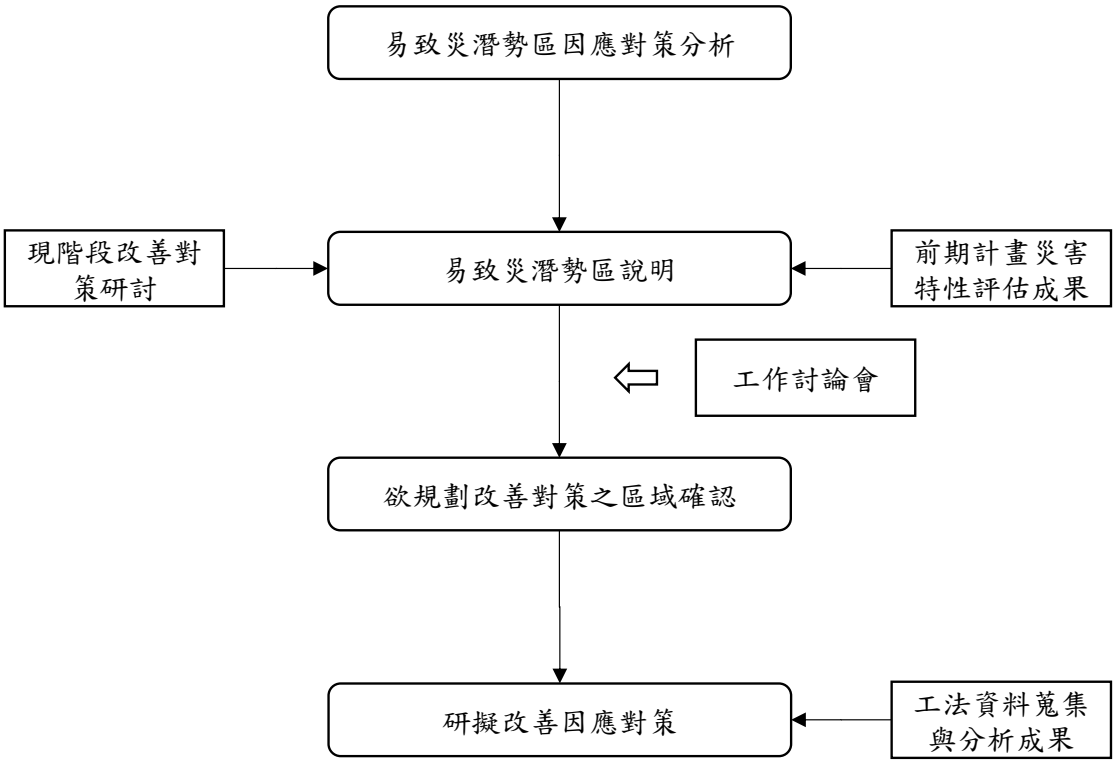


圖 4.0.1　易致災潛勢區因應對策分析流程圖

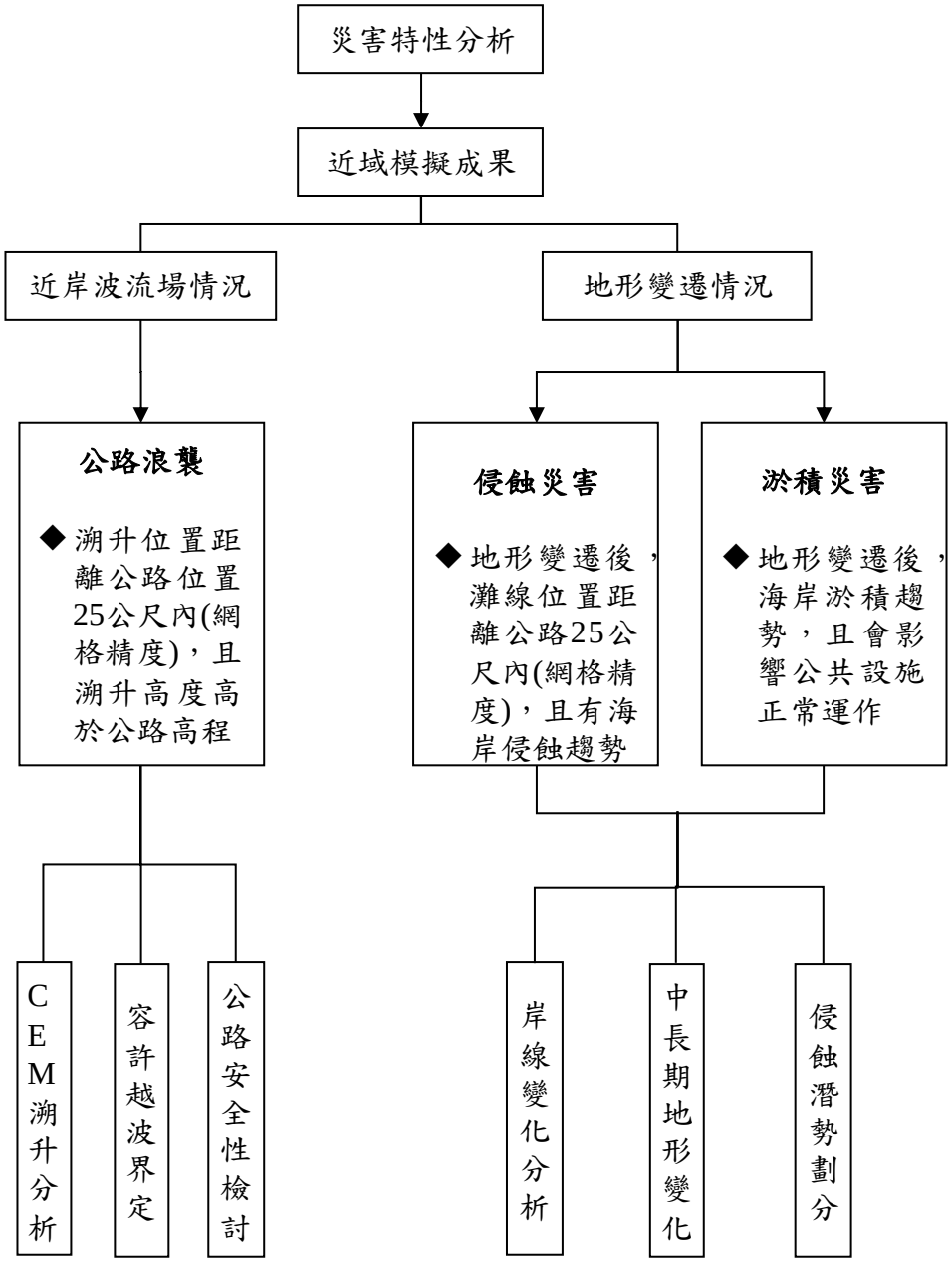
4.1　易致災潛勢區說明

於前期計畫中，已針對計畫區域之災害特性進行完整的分析。其中，災害特性類型分為「公路浪襲」、「侵蝕災害」與「淤積災害」等三類，圖 4.1.1 為前期計畫各災害類型之相關定義與災害特性分析之流程。其中，海岸侵蝕災害為「海岸防護整合規劃及海岸防護計畫擬訂作業」(水利署，2017 年)訂定的四大海岸災害之一，因此，於侵

蝕災害分析中，亦會引用海岸侵蝕災害潛勢分級原則，進行海岸侵蝕潛勢等級給定。海岸侵蝕災害潛勢分級原則如下：

1.高潛勢：海岸侵蝕地區且近 5 年平均高潮線每年後退達 5 公尺以上(或經中央主管機關調查評估為海岸言侵蝕地區)。

2.中潛勢：海岸侵蝕地區且近 5 年平均高潮線每年後退未達 5 公尺，但達 2 公尺以上(或經中央主管機關調查評估為海岸言侵蝕地區)。



資料來源：臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

圖 4.1.1　前期計畫災害特性分類、定義與分析內容

前期計畫針對各區段進行災害特性分析後，已有劃定各災害類型之易致災潛勢區域。本計畫以此成果為基礎，做為欲規劃改善對策區域之依據，前期計畫易致災潛勢區域成果分述如後。

4.1.1 公路浪襲

前期計畫主要是依據設計條件波高分布分析成果，進行水動力計算模擬，並配合溯升公式計算出公路側海岸波浪溯上高度，再藉由公路單樁高程資料比對，及災害類型定義方法檢定(參考圖 4.1.1)，劃設出各具有「公路浪襲」災害潛勢之路段，其成果以三個路段範圍分別進行說明。

1. 南興至大武段

圖 4.1.2 為南興至大武段「公路浪襲」災害分布圖，其顯示大武漁港以北 435K+000 ~ 435K+500 路段之間及 434K+000 ~ 434K+500 路段間均屬於災害潛勢區段，該兩區段溯升高度均約達 16m，而公路高程分別約為 8m 與 10m，因而有導致公路浪襲災害之可能性；大武漁港以南至南興路段，於 439K+500 ~ 441K+000 之間路段具災害潛勢特性，然該路段區域溯升高度較上述兩處偏低約 10m，惟因該區域公路高程均低於 10m，導致仍有公路浪襲災害之危機。

圖 4.1.2 越波分析結果可知，各「公路浪襲」災害潛勢路段中，435K+500 周圍區域越波量有大於 10^{-3} (cms/m) 現象發生，其餘潛勢路段均介於 10^{-4} ~ 10^{-3} (cms/m)之間。由此顯示，各潛勢區段均滿足護岸之容許越波量 (5×10^{-2} (cms/m))以下，除了南興路段接近臨界值外，其餘路段均未滿足交通安全之越波量(至少需低於 5×10^{-4} (cms/m))。

此路段公路浪襲災害較為顯著，主因該路段公路高程較低，且灘岸距離較短所致。南興路段長年因大武漁港突堤效應影響，使其漂砂補注較少，導致海岸侵蝕、灘岸縮減之情況。因此，當颱風波浪發生時，因東部水深地形較陡，長波消能效果較差，

使波浪在能量削減較少的情況下侵襲海岸，亦造成公路浪襲之災害。

2. 加津林至多良段

圖 4.1.3 為加津林至多良段「公路浪襲」災害分布圖，該區域「公路浪襲」災害較顯著，其顯示 417K+500 ~ 419K+000 路段之間、421K+000 ~ 422K+500 路段間、423K+500 ~ 425K+500 路段間及 427K+500 ~ 428K+500 路段間，均有多處災害潛勢區段。其中，422K+000 路段間溯升高度較高 (最高約達 18m)，且亦位於公路高程相對低處 (最低高程約為 14m)，此處為易導致公路浪襲災害之區塊，必須謹慎關注。

圖 4.1.3 越波分析結果可知，各「公路浪襲」災害潛勢路段中，422K+000 周圍區域越波量約有 6×10^{-3} (cms/m)，其餘潛勢路段均介於 10^{-3} ~ 10^{-2} (cms/m)之間。由此顯示，各區段均滿足護岸之容許越波量 (5×10^{-2} (cms/m))以下，而各潛勢路段均未滿足交通安全之越波量(至少需低於 5×10^{-4} (cms/m))。

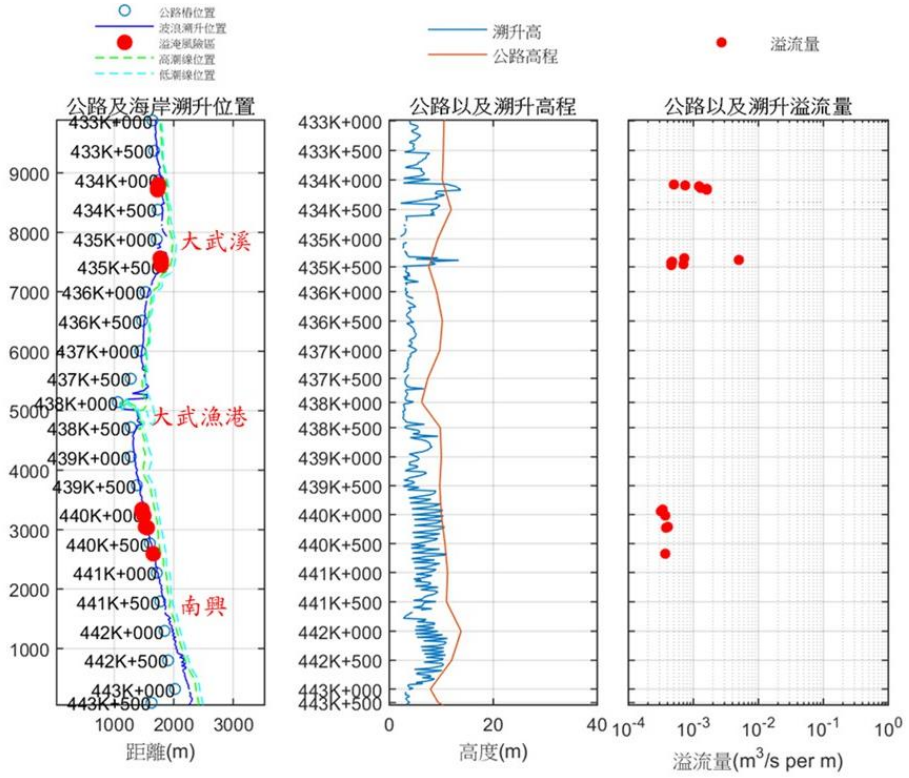
此路段公路浪襲災害較為顯著，主因與南興路段大致相同，公路高程較低，且灘岸距離較短所致。然其公路高程雖整體較南興路段高，但因水深地形又較南興陡峭，因而波浪能量至近岸亦無法有效衰減，易造成公路浪襲之災害。

3. 香蘭至三和段

圖 4.1.4 為香蘭至三和段「公路浪襲」災害分布圖，該區域為三區域中「公路浪襲」災害潛勢區最少之路段，其顯示僅 395K+500 路段周圍為災害潛勢區段。主要原因為該區域公路高程大多較高，使之溯升高度影響公路較小，395K+500 路段於此區域中為公路高程較低路段，且離岸距離較近，使其納為「公路浪襲」災害潛勢區域，其中溯升高度最高約達 10 m，且公路高程則略低於 10m。此外，407K+000 路段雖亦有相對高之溯升高度，惟其公路段離灘岸較遠，因而並未納入「公路浪襲」災害潛勢區域之中。

圖 4.1.4 越波分析結果可知，各「公路浪襲」災害潛勢路段中，395K+500 路段越波量約為 2×10^{-3} (cms/m)，其滿足護岸之容許越波量 (5×10^{-2} (cms/m))以下，惟未滿足交通安全之越波量(至少需低於 5×10^{-4} (cms/m))。因此，於颱風事件發生時，該處仍有車輛仍須注意通行安全，避免浪襲越波導致生命安全受到威脅。

此路段公路高程較高，因而浪襲災害潛勢較少，僅有三和海岸有浪襲之機率，而由現勘結果可知，該路段灘岸較長，發生浪襲機會不大，惟暴潮水位應有到達公路之可能性(該路段高程較低)，因此其災害類型較屬於暴潮溢淹範疇，與本計畫所提公路浪襲有所差異。



資料來源：臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

圖 4.1.2　南興至大武路段「公路浪襲」災害分布圖

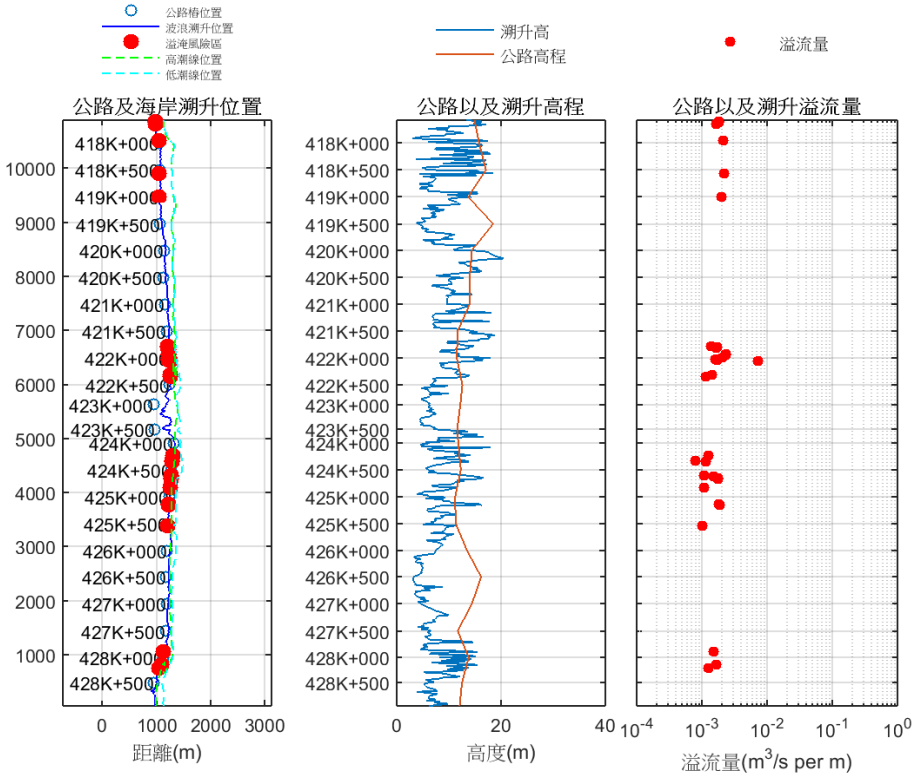
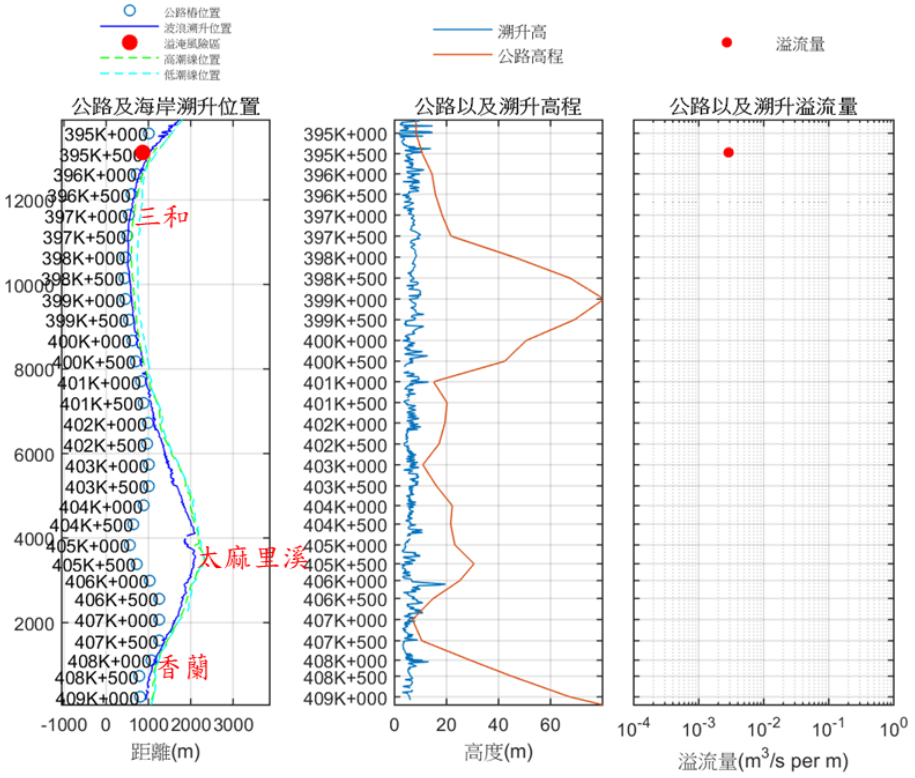


圖 4.1.3　加津林至多良路段「公路浪襲」災害分布圖



資料來源：臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

圖 4.1.4　香蘭至三和路段「公路溢淹」災害分布圖

4.1.2 侵蝕與淤積災害

前期計畫地形變遷模擬是以代表性波浪條件分析成果做為計畫條件，海岸漂砂模擬利用 Van Rijn 漂砂理論，並配合地形變遷加速因子計算中長期地形變遷情況。再進一步將夏季、冬季以及全年度條件之地形變遷計算結果，擷取海岸零米線之變化分析「侵蝕災害」與「淤積災害」之潛勢路段，分別以「南興至大武段」、「加津林至多良段」及「香蘭至三和段」分述如後。

1. 南興至大武段(圖 4.1.5)

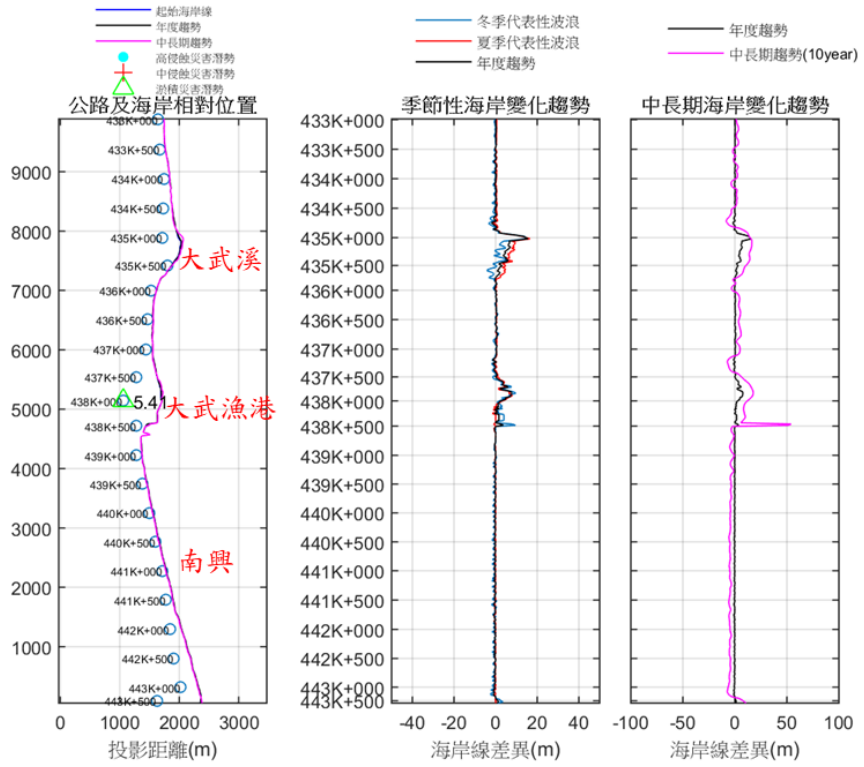
計算結果顯示，大武漁港以北 435K+000 ~ 438K+000 處，由於此區有河川之關係，這段海岸有明顯之淤積現象，大武漁港南側至南興段長期結果屬於侵蝕趨勢，但皆未達災害潛勢的標準，此區較明顯之災害為淤積災害，位在 438K+000 大武漁港位置，由最左側海岸線顯示，此區剛好位於一個凹槽海岸地形，由前章節研究結果顯示，於大波浪時南北兩側流場皆會往此地帶聚集，這可能是造成此區域長期容易淤積之主因。

2. 加津林至多良段(圖 4.1.6)

此區域普遍而言屬於略為侵蝕之趨勢，河口除外，由於海岸線屬於直線型，故其季節性變化差異不大，長期地形變遷分析結果顯示於 418k+000、420K+000 及 428K+000 ~ 428K+500 此三處位置，略為呈現中侵蝕潛勢，侵蝕情況尚不嚴重，建議定期注意其變化。

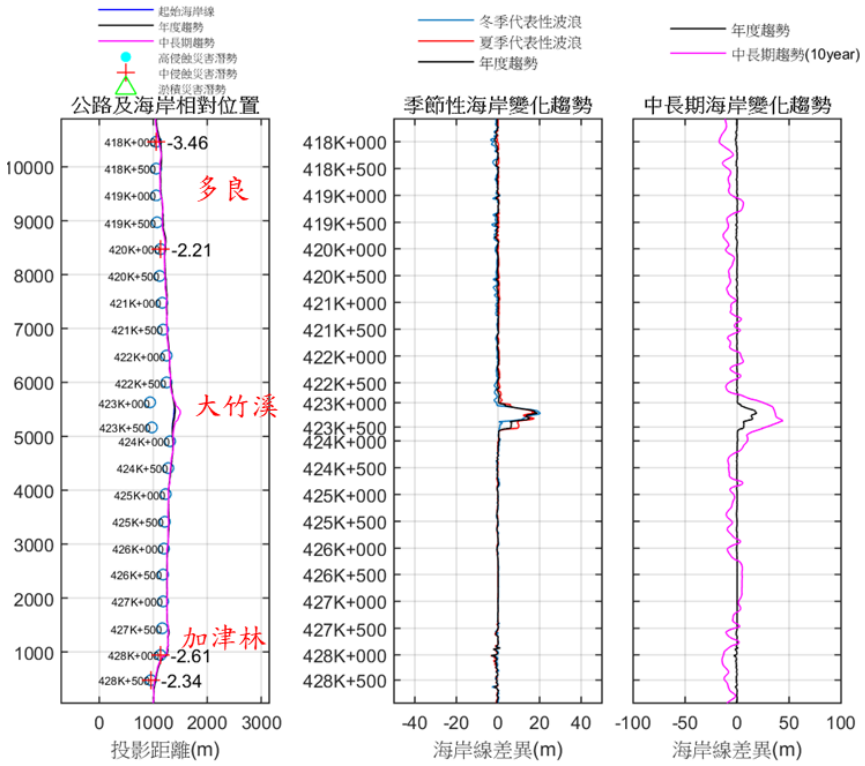
3. 香蘭至三和段(圖 4.1.7)

此段海岸多數屬於侵蝕趨勢，僅太麻里溪河口南側位置 404K+000 ~ 407K+000 為淤積，河口處季節性侵淤差異較大，其中，三和海岸 397K+500 位置處已達中潛勢侵蝕標準，且其距離公路較近，應密切注意其地形變化。



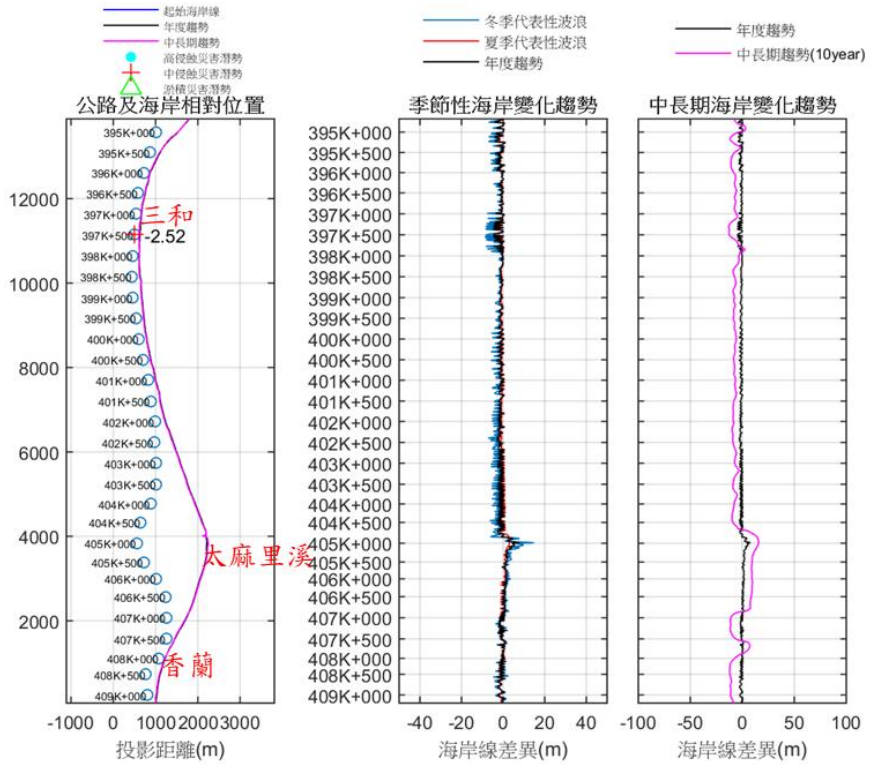
資料來源：臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

圖 4.1.5　南興至大武段段海岸線侵淤趨勢變化成果



資料來源：臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

圖 4.1.6　加津林至多良段侵淤趨勢變化成果



資料來源：臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

圖 4.1.7　香蘭至三和段侵淤趨勢變化成果

4.1.3　災害潛勢分析與歷史災害比較

1. 公路浪襲

針對前期計畫與本計畫重新分析路段之災害特性成果與歷史災害進行分析，以利瞭解本計畫數值模擬與災害特性分析之可靠度。於「公路浪襲」災害特性分析結果方面，潛勢分析與三工處取得往昔大武段曾經公路溢淹致災路段資料進行比對，其結果參見表 4.1.1。其中，由本計畫災害分析結果與往昔資料比對可知，南興至大武路段中，大武漁港以南為公路浪襲熱點，其中 440K+000～441K+000 為較顯著之路段；加津林至多良段中，以大竹溪以南 424K+500 周圍區域為致災熱區；香蘭至三和段中，以三和海濱公園周圍區域(396K+000～396K+500)為公路浪襲致災熱區。

表 4.1.1　公路浪襲災害特性分析比對表

路段	往昔致災資料	說明
南興至大武路段	 440K+080~440K+800	此為三工處提供資料。 此路段為往昔易公路浪襲致災路段，而於本計畫災害分析結果中，440K+000～441K+000 亦有公路浪襲潛勢路段存在。
	 440K+900 ~ 441K+360	此為三工處提供資料。 此路段為往昔易公路浪襲致災路段，而於本計畫災害分析結果中，440K+500～441K+000 亦有公路浪襲潛勢路段存在。
加津林至多良路段	 參考「台 9 線海岸公路防浪保護工程之探討」報告資料，其中加津林 428.9K ~ 429.0K；大竹 424.0K ~ 424.4K；大溪 421.5K ~ 422.0K；多良 418.8K ~ 419.0K 均為易受浪襲路段。	本計畫災害分析結果中，424K+000 ~ 424K+500（大竹）、421K+500 ~ 422k+000 亦有公路浪襲潛勢路段存在。 另比較目前海岸防護改善工程施行地點(參見圖 3.2.2) 可知，424K+000～425K+000 及 417K+000 ~ 419K+000 為海岸防護重點區域，而於本計畫分析結果中，亦為公路浪襲之潛勢路段。

表 4.1.1　(續)公路浪襲災害特性分析比對表

路段	往昔致災資料	說明
香蘭至三和路段	 參考新聞報導資料，於今年度(107 年 9 月)山竹颱風事件，三和海岸有遭受長浪侵襲致災之情況發生(該致災點位於 396K+000 ~ 396K+500 之間)。	本計畫災害分析結果中，396K+000 ~ 396K+500 之間亦為公路浪襲潛勢路段。

2. 海岸侵蝕與淤積災害

「侵淤災害」災害特性方面，其分析結果與往昔資料進行比對，探討前期計畫與本計畫重新評估「侵淤災害」潛勢區域之合理性。蒐集往昔相關調查成果報告與本計畫災害特性分析結果進行比對，其結果參見表 4.1.2。由本計畫災害分析結果與往昔資料比對可知，南興至大武路段中於高程+3 m ~ 水深-3 m 間之沿岸土方，呈現侵蝕趨勢，大武漁港周圍呈現淤積趨勢。其中，大武漁港冬季淤積量為夏季之六倍，於大武漁港南側南興路段海域長期呈現侵蝕趨勢；加津林至多良段以往較缺乏調查資料；而太麻里區大致呈現夏淤冬侵之型態，且夏季常因颱風來襲，溪口外測之地形容易受到太麻里溪河川大量輸砂的影響，而產生大範圍淤積的分布情形，至於香蘭段長期呈現侵蝕趨勢，其結論與本研究模擬之中長期趨勢一致。由侵淤災害分析結果與往昔資料比對可知，南興至大武路段中，大武漁港為淤積災害熱點；加津林至多良段中，以 418K+000 周圍區域為侵蝕災害較顯著之熱區，惟較缺乏現場調查資料與之對應，仍為需注意之區域；香蘭至三和段中，以 397K+500 為海岸侵蝕致災熱區。

表 4.1.2　海岸侵淤災害特性分析比對表

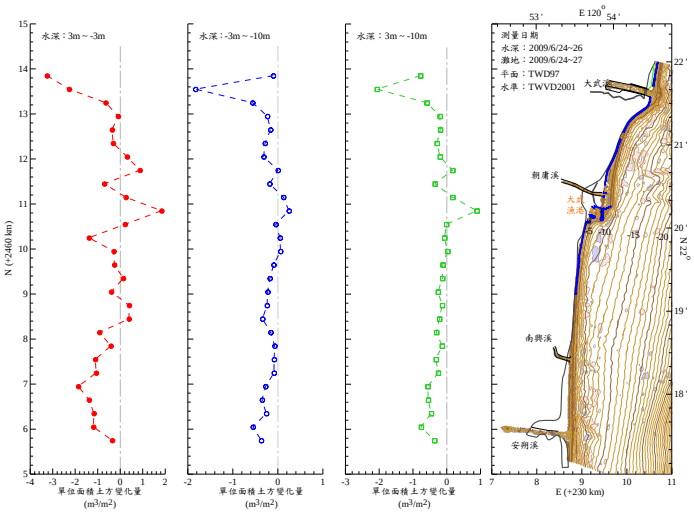
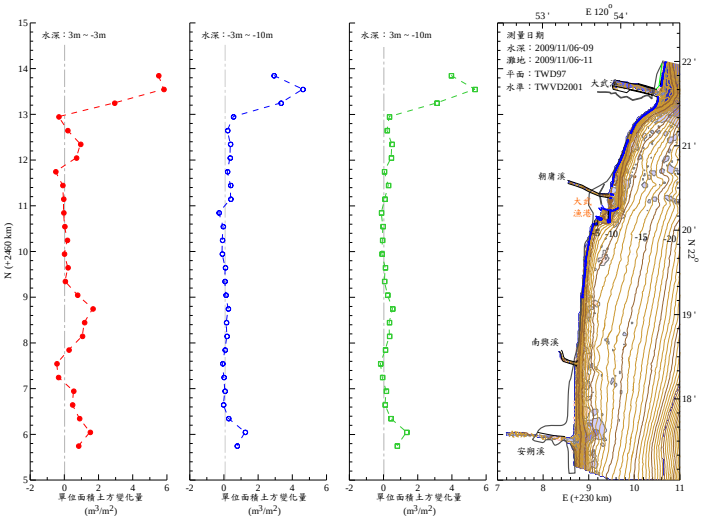
路段	往昔致災資料	說明
南興至大武路段	 2008 年 10 月~2009 年 6 月沿岸單位面積土方變化圖	臺東海岸(尚武段)監測調查計畫資料。 本段海岸於冬季波浪作用期間，漂砂方向由北往南，夏季則由南往北，冬季時段南興路段於高程 +3m~ 水深 -3m 間之沿岸土方，呈現侵蝕趨勢，大武漁港周圍呈現淤積趨勢。 於大武漁港南側海域，在 1998 年 10 月~2008 年 6 月期間，海岸線侵退共約 17.6~22 公尺，另由 2008 年 10 月~2009 年 11 月之灘線資料顯示，漁港南側海岸線略往陸側侵退約 7~13 公尺。
南興至大武路段(續)	 2009 年 6~11 月沿岸單位面積土方變化圖	由本計畫特性分析結果可知，南興路段(439K+500~433K+000)地形中長期趨勢呈現侵蝕情況；大武漁港則呈現持續淤積之情況，其均與往昔資料描述相符。

表 4.1.2　(續)海岸侵淤災害特性分析比對表

路段	往昔致災資料	說明
大武漁港淤積情形		臺東海岸(尚武段)監測調查計畫資料。 大武漁港往年淤積情形，顯示大武漁港港池與港口區主要淤砂期間係在冬季波浪作用期間，且冬季之淤砂量約為夏季的 6 倍。 本計畫特性分析結果可知，大武漁港周圍亦呈現冬季淤積大於夏季之情況。

3. 颱風事件比較

透過颱風事件進行模擬，並探討災害特性分析之合理性。依據近年來新聞資訊可知，「梅姬颱風」事件時，曾造成台 9 線南興路段發生浪襲災害，相關報導來源如表 4.1.3 所示。圖 4.1.8 為「梅姬颱風」事件公路浪襲災害特性分析結果，可知公路浪襲潛勢路段與報導路段相似，藉以瞭解目前數值模式模擬颱風事件之可靠度。

表 4.1.3　新聞蒐集梅姬颱風相關浪襲公路事件

日期	地點 0	事件	新聞來源	颱風
2016/09/25	臺東南迴海域推起陣陣巨浪，台 9 線南興斷掀起超標 4 公尺浪濤	封閉台 9 線 439.8K 至 441K 南興浪襲路段	自由時報	梅姬颱風
2016/09/27	台 9 線南迴公路多良至南興	預警性封閉或浪襲路段管制通行	聯合新聞	梅姬颱風

註：參考「海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究」重新整理

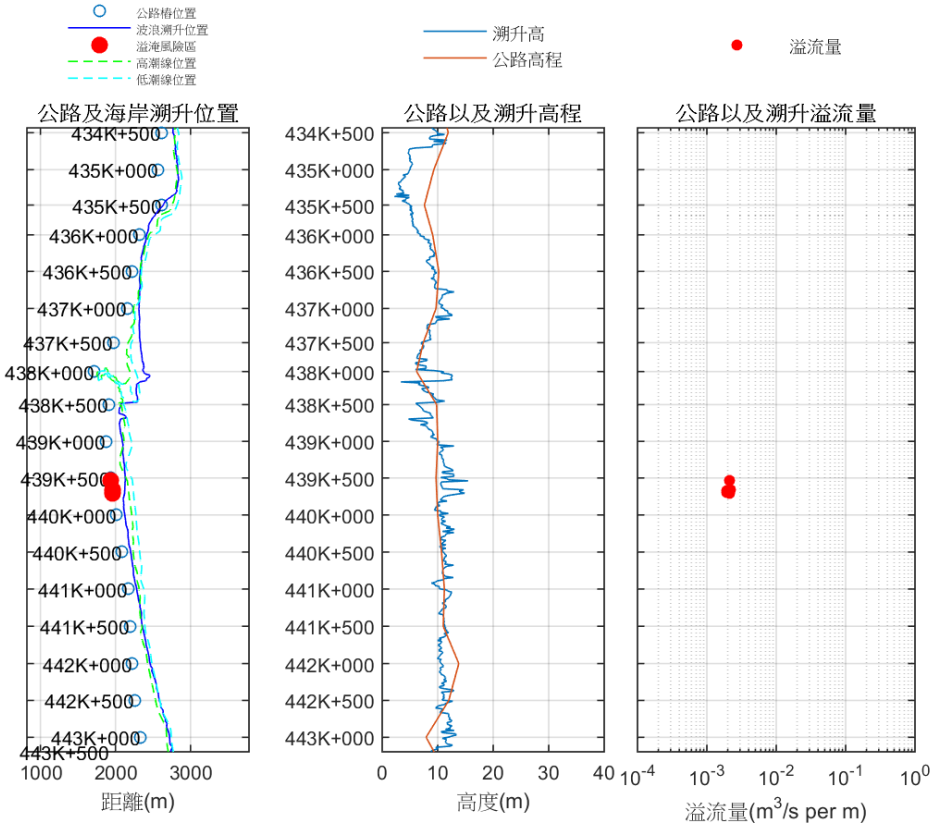


圖 4.1.8　梅姬颱風事件公路浪襲災害特性分析

4.2　研擬改善因應對策

本計畫改善因應對策主要依據圖 4.0.1 流程進行研擬，其成果將提供對策可行性評估進行分析，以利研提各災害潛勢區域適合改善對策建議。依據前述拜會相關單位與現勘作業內容(參見第三章)可知，目前公路浪襲災害潛勢路段大多分布於加津林-多良及南興-大武路段兩路段；海岸侵蝕災害亦以多良北側路段為主要潛勢區域；淤積災害則以大武漁港為主。另，目前所能取得較完整的近岸水深地形概為南興-大武路段與加津林-多良路段(由運研所與世曦工程顧問提供)，此運用於細緻模擬上較能提升計算之合理性與可靠性。因此，基於潛勢資料、相關單位建議及水深地形之完整性等考量，本計畫擇選「南興-大武路段」及「加津林-多良路段」來進行改善因應對策評估對象，各改善對策範圍與內容分述如後。

4.2.1　南興-大武路段

圖 4.2.1 為南興-大武路段改善對策評估範圍圖，圖中紅虛框(內圈較小虛框)範圍為目前海岸防護重點區域，亦為公路浪襲災害潛

勢區域，因而擇選此區域來進行公路浪襲災害改善對測研擬。依據世曦工程過往改善工法可知，其改善對策是以波浪消能為主，藉以減緩公路浪襲之可能性。而就三工處經驗而言，目前的工法對於公路浪襲防制已有顯著的改善。因此，本計畫於 108 年 8 月 27 日工作討論會中決議，「台 9 線海岸公路為降低浪襲衝擊，已有規劃相關改善對策且部分路段已完工或正於施工階段。本計畫於公路浪襲災害改善對策探討方面，應可針對目前改善對策效益進行探討，俾利瞭解目前改善對策實施與未實施之差異性，並構思可使既有改善對策防災效益更為提升之方法」。據此，將以前期計畫設計條件模擬結果輸出平面水位資訊，並分析該路段中浪襲潛勢較嚴重之斷面(440K+500 附近)，並運用計算流體力學數值模式進行二維斷面模擬，以利評估「實施改善工法」與「未實施改善工法」之差異性，以利探討目前改善工法之成效。此外，因南興路段往昔有海岸侵蝕潛勢現象，目前雖已透過草埔隧道工程所得粒石進行養灘(位於南興路段，大武漁港以南)，惟未針對養灘區域進行地形變遷評估，因此本改善對策亦會依據南興路段現況，來進行地形變遷災害影響評估，以瞭解養灘工程區域經中長期地形變遷後對台 9 線公路之影響性(例如：持續海岸侵蝕，導致影響公路邊坡穩定之現象)，並研提大武漁港清淤之土方較適合的放置處，並可利用於加強公路浪襲防制之可能性。於圖 4.2.1 中，黃虛框(外圈較大虛框)為改善因應對策之模擬範圍，概以三種情境條件來進行評估：

1. 評估草埔隧道粒石養灘區域(大武漁港南側)於中長期變化之情況。透過現勘分析可知，該養灘區域粒徑分布範圍較廣，因此於水動力長期影響下，應有部分粒石會被水流或波浪帶動。鑑此，可依本計畫粒徑分析結果，設定該養灘區域初始條件，並模擬養灘現況於極端條件及季節性條件影響之變化情況，藉以瞭解該區域未來是否會因持續海岸侵蝕現象，造成台 9 線公路邊坡穩定之影響。

2. 目前是大武漁港清淤是將漁港內漂砂運輸至漁港與南側突堤之間，以及漁港與北側突堤之間的區域，本計畫運用「迂迴供砂」法，針對漂砂放置區域進行分析，評估較適合放置土方之

點位，以其放置土方能夠對減緩海岸侵蝕與防制浪襲之成效有所提升。

3. 評估清淤之土方透過「迂迴供砂」方式，是否能夠再利用於目前公路浪襲防制區域，透過堆放土方於前方海域，期能再減緩浪襲之強度，或會否影響改善工法之效能。

為使報告撰寫簡潔後續章節將以「南興路段」做為此改善對策代表名稱。

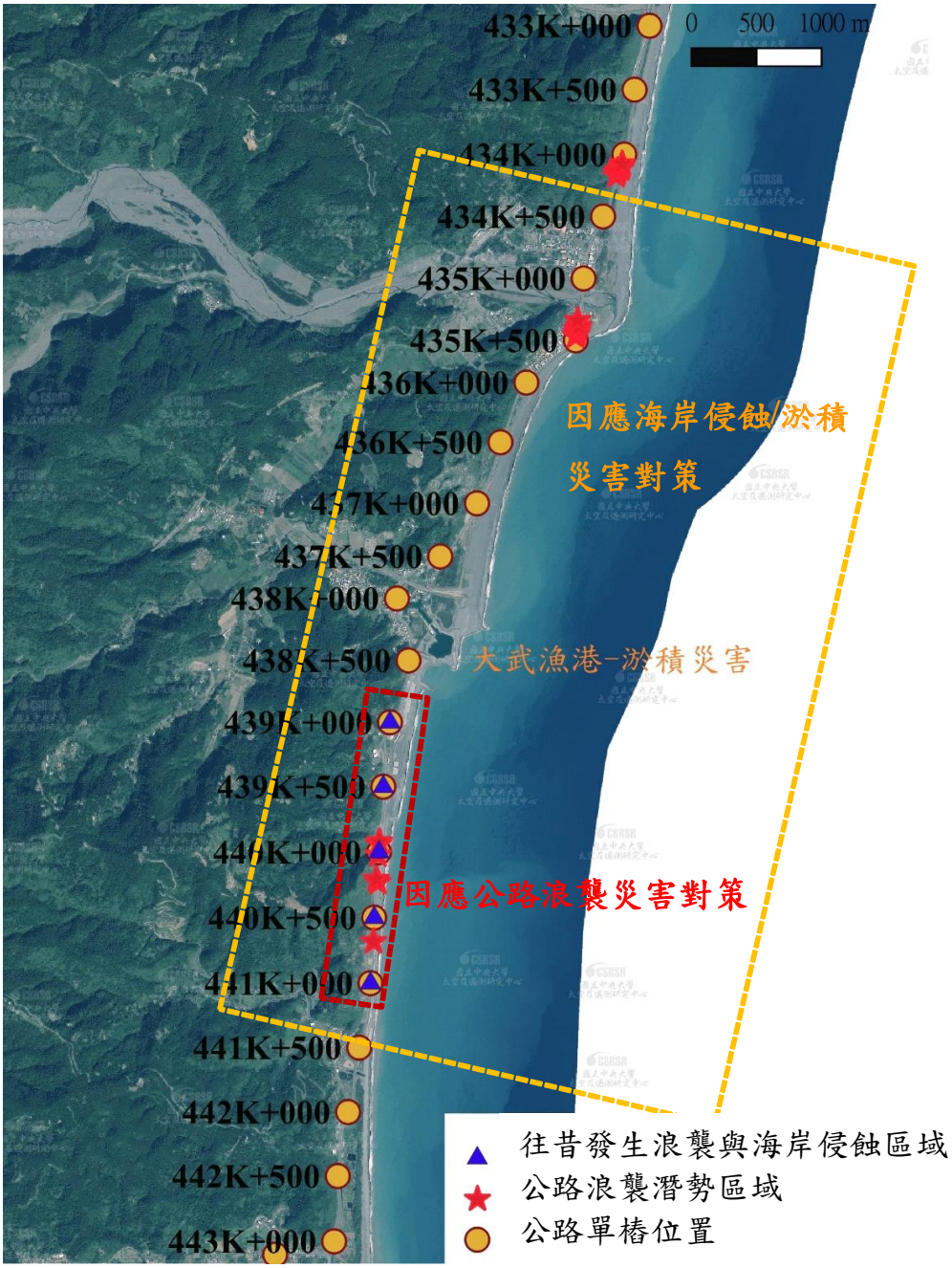


圖 4.2.1　南興-大武段改善對策範圍示意圖

4.2.2 加津林-多良路段

圖 4.2.2 為加津林-多良路段改善對策評估範圍圖，圖中紅虛框(內圈較小虛框)範圍為目前海岸防護重點區域，亦為公路浪襲災害潛勢區域，因而擇選此區域來進行公路浪襲災害改善對測研擬，此部分與大武段評估方法相同。而黃虛框(外圈較大虛框)範圍為海岸侵蝕災害潛勢區域，為避免中長期海岸侵蝕影響公路邊坡穩定，需進行海岸侵蝕災害因應對策研擬，透過潛堤或突堤等工法之建構，以評估改善對策之效益，其評估重點概述如後。

1. 因臺東海岸具備觀光遊憩價值，所以於改善海岸侵蝕工法篩選上需考量兼顧減緩海岸侵蝕及較不影響景觀之對策。

2. 改善對策需整體海岸考量，避免因解決特定路段海岸侵蝕問題，而導致其它路段發生海岸侵蝕情況，其波浪情境條件亦需考量極端條件及季節性條件影響之變化情況。

3. 擇選 417K+500 路段進行浪襲評估，該路段於民國 108 年 7 月發包工法設計規劃，因此於該路段本計畫僅能評估「現況」浪襲影響，而無法評估「實施改善工法」與「未實施改善工法」之差異性，惟其浪襲評估數據仍可做為相關對策參酌。

為使報告撰寫簡潔後續章節將以「多良路段」做為此改善對策代表名稱。

4.2.3 香蘭-三和路段

該路段於前期計畫分析成果可知，其路段高程較高，故僅有三和區域有暴潮溢淹之潛勢，而其於民國 107 年「山竹颱風事件」亦有海水入侵現象發生，惟其不屬於公路浪襲關注之重點區域，且該區域水深地形資料較不充足，於細緻模擬上較難兼顧其合理性，因此該路段則不納為本計畫改善對策評估之對象。

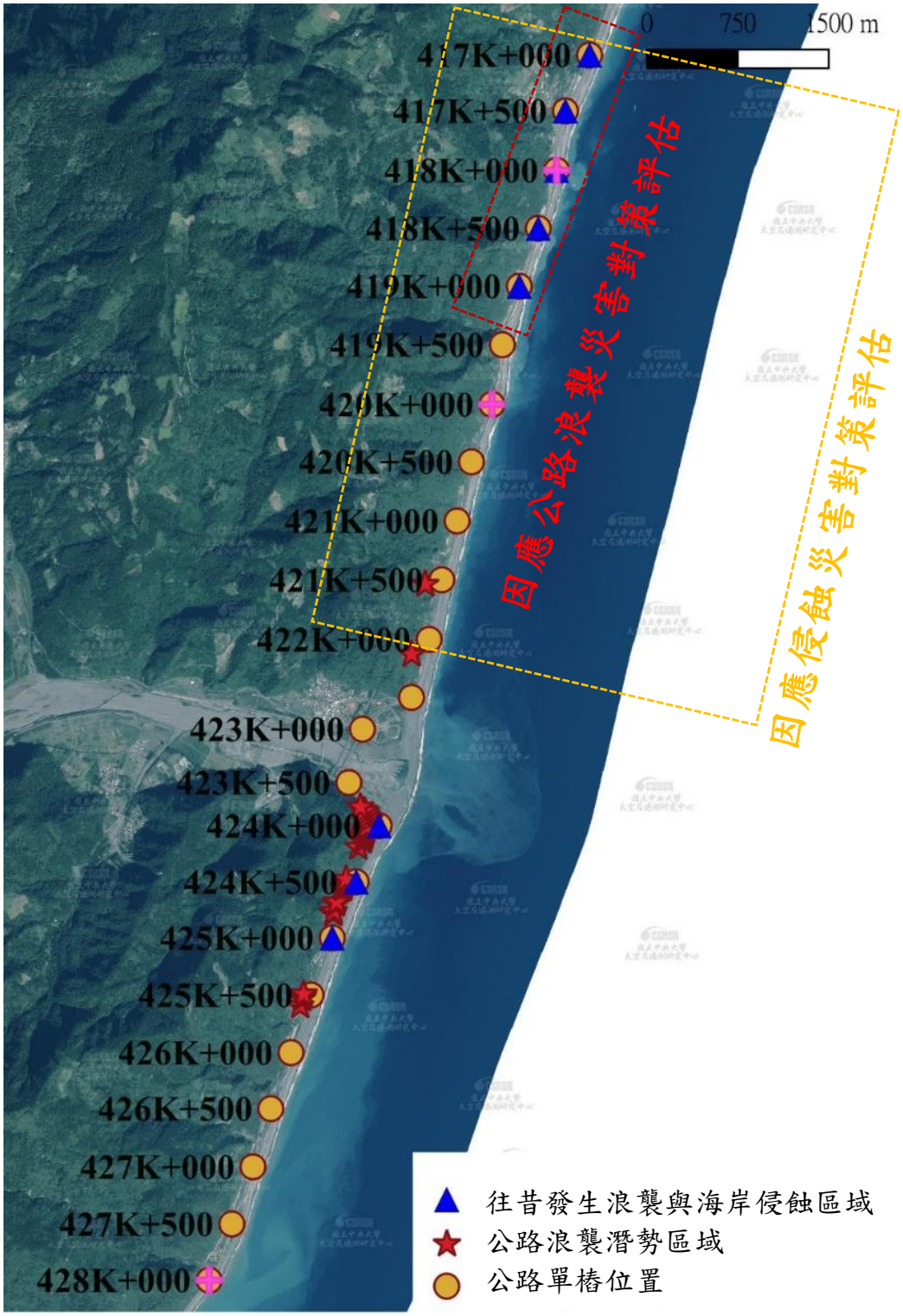


圖 4.2.2　加津林-多良路段改善對策範圍示意圖

彙整前述改善對策範圍與內容，依據公路浪襲與地形 6 變遷災害，概分為「短期改善對策」與「長期改善對策」，相關概述如表 4.2.1 所示。

表 4.2.1　本計畫改善對策概述表(工程手段)

區域	改善對策	評估內容
南興路段 (439K+000 ~ 441K+000)	短期改善對策：評估現有改善工法之成效。	波浪溯升高度和越波高度影響公路之可能性。
	長期改善對策：利用「迂迴供砂」法，利用大武漁港清淤土方，放置適合點位，評估可否利用於強化公路浪襲防制之可能性，同時減緩海岸侵蝕對台 9 線海岸公路邊坡穩定之影響。	漂砂傳輸變化、沿岸侵蝕與淤積變化。養灘前、後波浪越波之情況。
多良路段 (417K+000 ~ 419K+000)	短期改善對策：評估現有改善工法之成效。 長期改善對策：透過防侵蝕工法改善海岸侵蝕情況，以減緩對公路邊坡穩定之衝擊。	波浪溯升高度、越波高度、漂砂傳輸變化、沿岸侵蝕與淤積變化。

第五章　對策可行性評估

改善對策可行性評估除需針對各對策方式進行分析外，還需以數值模式進一步瞭解各改善對策之可行性。透過數值模擬方式，可針對所研擬的改善對策應用於易災害潛勢區時，其可能改善效益進行評估，以做為後續研提適合改善對策之參考依據。本章節相關數值模式與對策評估方法分述如後。

5.1　數值模式說明

數值模式方面，除採用前期計畫所用之近岸水動力模式、地形變遷模式與粒子軌跡法等來進行「面狀」整體評估外，亦運用計算流體力學模式來針對「斷面」工法效益評估。而用於面狀評估的三個數值模式均已於前期計畫中，與觀測資料進行完整的驗證與調校作業，因而運用於對策可行性評估上，應具有合理性。然，因本計畫主要針對局部易致災潛勢區進行對策可行性評估，因此計算區域會考量各改善區域範圍執行較前期計畫更細緻網格尺度的數值模擬，以獲得各區域更完整的水動力與地形變遷資訊，俾利做為改善對策可行性評估之依據。各數值模式相關簡述如後。

5.1.1　近岸水動力模式

研究所採用數值模由美國陸軍工兵團研發中心海岸與水利實驗室之 CIRP(Coastal Inlets Research Progrram)計畫支持下所研發完成 CMS(Coastal Modeling System)，該模式說明如下：

1. 近岸波浪模擬

近岸波場模擬採美國陸軍兵工團研發之 CMS-WAVE 對研究區的波場進行數值模擬。CMS-WAVE 近岸波場模式是一個波譜模式，利用含近岸繞射項之改良型波浪作用力守恆方程式(Mase, 2001)，推算外海波浪傳遞至近海之折、繞射情形，同時將波浪淺化、碎波和底床摩擦等效應代入考量，可分析單頻線性波浪經折、繞射作用後的波高、相位、碎波及輻射應力分布，基本方程式如下：

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta}= \frac{\kappa}{2\sigma}\left[\left(CC_g\cos^2\theta\, N_y\right)_y-\frac{CC_g}{2}\cos^2\theta\, N_{yy}\right]-\varepsilon_b N-S \tag{5.1}$$

$$N=\frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma} \tag{5.2}$$

N為波浪作用密度函數，此函數為一個頻率σ及方向θ的函數。$E(\sigma,\theta)$是波譜密度函數，代表每單位水表面積頻率間隔的波浪能量。在實際海流環境存在的情況下，波浪作用密度為守恆，而波譜波密度則非守恆(Bretherton and Garrett 1968; Whitham 1974)，控制方程式亦包含波繞射和能量耗散項 (Mase et al. 2005a)。C和C_g分別為波速及群波速度，x和y是水平面坐標，C_x、C_y和C_θ分別為x、y及θ的特徵速度，N_y和N_{yy}表示關於N對y的第一和第二階導數，κ為一個代表繞射強度之經驗參數，ε_b是代表能量耗散的波浪破碎參數，S為外加項（例如，風作用力，底床摩擦損失等）及非線性波波交互作用項。

於小尺度計算時，採用定常邊界條件進行模擬，本計畫則採用前期計畫計算之設計波高與水位條件，進行計畫區海域波場特性分析，而地形變遷則採用前期計畫分析之代表性條件來進行相關分析。

2. 近岸流場模擬

流場模擬擬採用擬採美國陸軍兵工團研發之 CMS-FLOW 對研究區的波場進行數值模擬水理模式計算，探討包括本區海流水動力流場分佈。海域流況模擬之水動力學模式係由淺水波方程式為控制方程式，利用有限體積方法解其連續方程式、動量方程式，計算海域潮汐、海流作用之對流、擴散流場分佈情形，模式邊界條件以水位驅動，並且引入前期計畫分析的設計波浪條件與暴潮水位。流場計算耦合前述波場定常模擬結果的波浪輻射應力做為流場的趨動力進行模擬，並反饋水位與波浪模式做交互作用，以瞭解海域近岸流場特性，理論介紹如後。

水動力模式控制方程式如下：

$$\frac{\partial(h+\eta)}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0 \tag{5.3}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial u q_x}{\partial x}+\frac{\partial v q_y}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x}= \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial q_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial q_x}{\partial y}\right)+fq_y-\tau_{bx}+\tau_{wx}+\tau_{sx} \tag{5.4}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial u q_y}{\partial x}+\frac{\partial v q_y}{\partial y}+\frac{1}{2}g\frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial y}= \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial q_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)-fq_y-\tau_{by}+\tau_{wy}+\tau_{sy} \tag{5.5}$$

水深平均流速與流量之間關係如下：

$$u=\frac{q_x}{h+\eta} \tag{5.6}$$

$$v=\frac{q_y}{h+\eta} \tag{3.7}$$

不考慮波浪的情況，床底剪應力表示如下：

$$\tau_{bx}=C_b u|U| \tag{5.8}$$

$$\tau_{by}=C_b v|U| \tag{5.9}$$

$$|U|=\sqrt{u^2+v^2} \tag{5.10}$$

底床摩擦係數計算如下：

$$C_b=\frac{g}{C^2} \tag{5.11}$$

$$C=\frac{R^{1/6}}{n} \tag{5.12}$$

其中，R為水力半徑，n為 Manning's coefficient。

當需考慮波浪作用力時，底床剪應力可表示為 (Nishimura, 1988)：

$$\tau_{bx} = C_b \left\{ \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} cos^2 \alpha \right) u + \left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}} cos\, \alpha\, sin\, \alpha \right) v \right\} \tag{5.13}$$

$$\tau_{by} = C_b \left\{ \left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}} cos\, \alpha\, sin\, \alpha \right) u + \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} sin^2 \alpha \right) v \right\} \tag{5.14}$$

其中，α 是波浪行進方向與 x 軸的交角。

$$U_{wc} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left| u^2 + v^2 + \omega_b^2 + 2(u\, cos\, \alpha + v\, sin\, \alpha)\omega_b \right|} + \sqrt{\left| u^2 + v^2 + \omega_b^2 - 2(u\, cos\, \alpha + v\, sin\, \alpha)\omega_b \right|} \right\} \tag{5.15}$$

$$\omega_b = \frac{\sigma H}{\pi\, sinh[k(h+\eta)]} \tag{5.16}$$

其中，σ是波浪角頻率，H是波高，k是波數。

表面風應力計算如下：

$$\tau_{wx} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 sin\, \theta \tag{5.17}$$

$$\tau_{wy} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 sin\, \theta \tag{5.18}$$

其中，C_d為風的拖曳係數(wind drag coefficient)，ρ_a為空氣密度，ρ_w為水體密度，W為風速，θ為風向(風向角度為卡式坐標角度，0 度為東方)。

風場引致之輻射應力可表示為：

$$\tau_{sx} = -\frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \tag{5.19}$$

$$\tau_{sy} = -\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) \tag{5.20}$$

其中，波浪輻射應力的引入是透過與 CMS-WAVE 模組之結合，並根據線性理論計算所得。當坐標系統中的x軸垂直於岸線時，輻射應力表示如下(Smith 等人, 2001)

$$S_{xx} = \iint E(\omega,\alpha)\left[0.5\left(1 + \frac{2k(h+\eta)}{sinh\, 2k(h+\eta)}\right)(cos^2\alpha + 1) - 0.5\right] d\omega d\alpha \tag{5.21}$$

$$S_{xy} = \iint \frac{E(\omega,\alpha)}{2}\left[0.5\left(1 + \frac{2k(h+\eta)}{\sinh 2k(h+\eta)}\right)\sin 2\alpha\right] d\omega d\alpha \tag{5.22}$$

$$S_{yy} = \iint E(\omega,\alpha)\left[0.5\left(1 + \frac{2k(h+\eta)}{sinh\, 2k(h+\eta)}\right)(sin^2\alpha + 1) - 0.5\right] d\omega d\alpha \tag{5.23}$$

其中S_{xx}為正向岸邊的動量，S_{xy}為平行海岸的動量，S_{yy}為沿岸流的動量。

科氏力(Coriolis)如下：

$$f = 2\Omega\, sin(\varphi) \tag{5.24}$$

其中Ω為地球旋轉角頻率，φ為緯度。

渦動黏滯係數為與水體中混擾強度相關的係數，於遠離碎波帶的區域，波浪引起的水體擾動微弱，故可忽略。此情況下渦動黏滯係數可表示為：

$$D_0 = \frac{1}{2}\left[1.156g(h+\eta)\frac{|U|}{C^2}\right] \tag{5.25}$$

相對的，碎波帶附近因碎波引起的水體擾動影響顯著，此時渦動黏滯係數可表示如下：

$$D_w = \varepsilon_L \tag{5.26}$$

$$\varepsilon_L = \Lambda u_m H \tag{5.27}$$

$$u_m = \frac{gHT}{\left[2\lambda\, cosh\left(\frac{2\pi(h+\eta)}{\lambda}\right)\right]} \tag{5.28}$$

實際上，碎波附近水體的混擾為三維現象，其物理機制無法反應於水深積分二維模式。前述渦動黏滯係數的引入乃為權宜的處理方式，藉以在二維模式中考慮三維紊流的影響。

由前述說明可知碎波帶附近與遠離碎波帶區域的渦動黏滯係數是不同的，為使模式計算時能連結兩區域，故引入一權重係數(θ_m)如下：

$$D = (1-\theta_m)D_0 + \theta_m D_w \tag{5.29}$$

$$\theta_m = \left(\frac{H}{h+\eta}\right)^3 \tag{5.30}$$

風吹造成的水體流動在淺水區較為明顯，因此必須考慮。風速與摩擦力是影響空氣與表面水體間動能交換的主要因素，兩者可表示為(Hsn, 1988)：

$$W_z = \frac{W_*}{\kappa} 1n \frac{Z}{Z_0} \tag{5.31}$$

$$\tau_0 = \rho_a W_*^2 = \rho_a K_m \frac{\partial W}{\partial z} \tag{5.32}$$

基於自然穩定之大氣條件的假設，水面摩擦係數如下：

$$C_{10} = \left(\frac{\kappa}{14.56 - 2\, ln\, W_{10}}\right)^2 \tag{5.33}$$

其中W_{10}為平均水面上方 10 m 處的風速，可表示如下：

$$W_{10} = W_z \left(\frac{10}{Z}\right)^{1/7} \tag{5.34}$$

5.1.2 地形變遷模式與粒子軌跡法

1. 輸砂控制方程式及地形變遷機制理論方法

CMS-FLOW 計算輸砂率及隨水深變化的輸砂率梯度，主要有三種輸砂方程式可選擇：

(1) Watanabe(1987)總輸砂量公式。

(2) Lund-CIRP (Camenen and Larson 2005, 2006)總輸砂量公式(結合懸浮載及底床載)。

(3) 懸浮載的對流擴散方程式與 van Rijn (1998)或 Lund-CIRP 底床載方程式耦合。對流擴散方程式應用 van Rijn (1998)或 Lund-CIRP 方程式中的參考濃度及砂的擴散率。

輸砂公式可適用於有/無波浪作用下。底部高程變化由砂的連續方程式計算，其中輸砂率由特定的方程式計算後輸入。Lund-CIRP 公式有平滑過渡的特性，例如碎波與非碎波間的過渡區及純流的輸送及波流輸送的過渡區。

CMS-FLOW 考慮兩種形態限制：(a)堅硬底床(不可侵蝕底床)及(b)底床坡度超過特定值的崩塌。如果存在沉積條件，堅硬底床可允許砂堆積覆蓋在底床上。當兩單元間的底床坡度超過特定的臨界坡度時，則產生崩塌。崩塌的算法是應用疊代方法將物質向下移動，直到不再超過臨界坡度，同時保留沉積物體積。

輸砂率是基於剪應力的概念，意味著底床粗糙度及產生的摩擦係數是計算輸砂率的關鍵參數。輸砂公式通常是基於底床粗糙度及相關剪應力的特定方程式發展而來(即校準數據)。因此，當在 CMS-FLOW 中使用三個方程式計算輸砂率，採用稍微不同的方法確定剪應力。以下部份中，討論了於不同輸砂公

式獲得的剪應力。此外，值得注意的是粗糙度及相關剪應力在輸砂計算中與 CMS-FLOW 水動力計算不同。

由另外的模式計算的流場及波浪特性，會影響底床粗糙度及剪應力，其會導致輸砂計算結果有所差異，惟輸砂計算的粗糙度及剪應力並不會反饋水動力或波之計算。CMS-FLOW 在二維水平坐標上計算的流速為(u, v)，如果波對輸砂的貢獻可以忽略不計(例如，正弦波)，則淨輸砂方向為流的向量方向，流速大小為$U_c = \sqrt{u^2 + v^2}$。因此，波將有助於沉積物的移動及攪動，但是需要平均的流來產生淨輸砂。

本文使用懸浮載的對流擴散方程式與 van Rijn (1998)或 Lund-CIRP 底床載方程式耦合，其理論作法如下：

(4) 基本方程式

輸砂分成兩個部份，懸浮載及底床載。懸浮載及底床載的輸砂方程式是基於局部剪應力。然而，在一些地方，懸浮載濃度在時間及空間上的變化劇烈，例如：河口、入流口、航道及結構物附近。在這種情況下，懸浮載濃度由對流擴散方程式控制。

CMS-FLOW 中，對流擴散方程式由水深平均的懸浮載輸砂獲得(如圖 5.1.1)：

$$\frac{\partial(Cd)}{\partial t} + \frac{\partial(Cq_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Cq_y)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x d \frac{\partial C}{\partial x}\right) \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y d \frac{\partial C}{\partial y}\right) + P - D \tag{5.35}$$

其中，

$C =$ 水深平均下砂的濃度度

$d =$ 總水深$(= h + \eta)$

$h =$ 靜水面水深

$\eta =$ 靜水面的水位變化

$t =$ 時間

$q_x =$ 平行x軸之單寬流量$(= ud)$

$q_y =$ 平行y軸之單寬流量$(= vd)$

$u =$ 平行x軸之水深平均流速

$v =$ 平行y軸之水深平均流速

$K_x =$ 砂在x方向的擴散係數

$K_y =$ 砂在y方向的擴散係數

$P =$ 砂的再懸浮(向上砂通量)

$D =$ 砂的沉積率(向下砂通量)

輸砂時間步之懸浮砂的濃度由式(5.35)求解得。

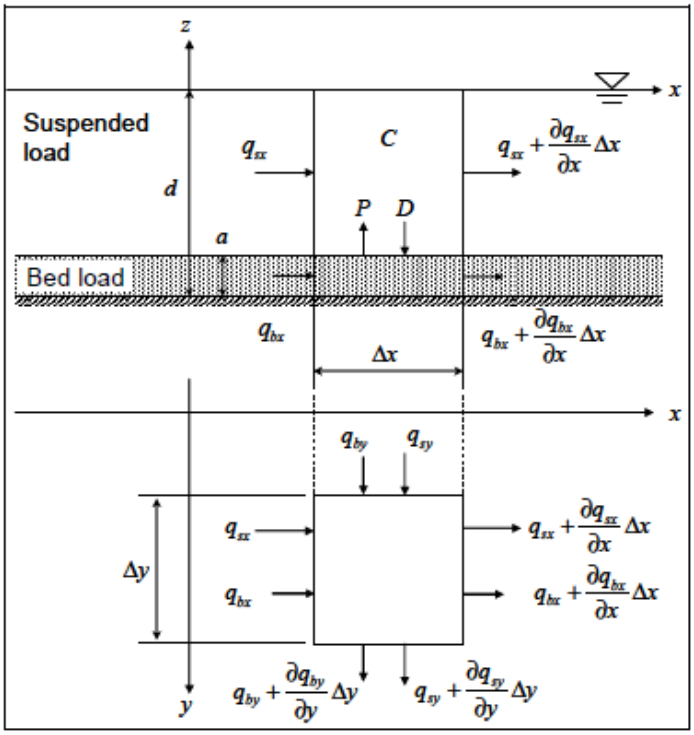


圖 5.1.1　輸砂連續性定義(體積守恆)

由砂的連續方程式獲得底床高程改變：

$$\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{1}{1-p}\left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x}+\frac{\partial q_{by}}{\partial y}+P-D\right) \tag{5.36}$$

上式中，q_{bx}為平行x軸之底床載輸砂率，q_{by}為平行y軸之底床載輸砂率，p為砂的孔隙率。

在式(5.36)中，$\frac{\partial q_{bx}}{\partial x}+\frac{\partial q_{by}}{\partial y}$項包含底床載部分，$P-D$項則符合懸浮載的部分。圖 5.1.1 為在一水柱定義砂的連續性，其中q_{sx}及q_{sy}分別為x,y方向的懸浮輸砂率，a為底床載層的高度。輸砂率q_{sx}及q_{sy}由式(5.35)定義為：

$$q_{sx}=Cq_x-K_x d\frac{\partial C}{\partial x} \tag{5.37}$$

$$q_{sy}=Cq_y-K_y d\frac{\partial C}{\partial y} \tag{5.38}$$

初始模擬砂的濃度、底床載及懸浮載設置為零，接著隨時間更新。

(5) 再懸浮率及沉積率

對流擴散模式由式(5.36)之再懸浮及沉積率之間的差異計算懸浮載導致的底床高程變化。再懸浮及沉積率也應用在式(5.35)的底床邊界條件。底床邊界條件指定在平均底床高程以上的任意高度a：

$$P=-\varepsilon\frac{\partial c}{\partial z}\bigg|_{z=a}=c_a w_f \tag{5.39}$$

$$D = c_0 w_f \tag{5.40}$$

其中c為在給定高度下的懸浮平衡濃度，z為垂直坐標。c_a及c_0皆為$z = a$處定義之參考濃度。因為砂向上之通量取決於底床剪應力，c_a由局部水動力條件計算的底床剪應力得到。CMS-FLOW 中c_a的計算方式取決於選擇 van Rijn 或 Lund-CIRP 模式。砂向下的通量則取決於上部水柱的濃度，因此c_0由式(5.35)的解指定。

假設懸浮濃度在平衡的情況下($\frac{\partial c}{\partial t} = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial y} = 0$)，則懸浮濃度的基本方程式可寫成：

$$c w_f + \varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \tag{5.41}$$

透過適當的混和係數ε可解析求解此方程式，並以下列形式獲得懸浮濃度之垂直分布。

$$c(z) = c_0 F(z) \tag{5.42}$$

其中$F(z)$為垂直濃度分布函數。參考濃度c_0與水深平均濃度C的關係為：

$$C = \frac{1}{d-a} \int_a^d c_0 F(z) dz \tag{5.43}$$

其中通過引入轉換參數β_d，c_0可寫成以下形式：

$$c_0 = \frac{C}{\frac{1}{d-a} \int_a^d F(z) dz} = \frac{C}{\beta_d} \tag{5.44}$$

懸浮載造成之底床高程變化基於兩種類型的參考濃度差異：

$$P - D = (c_u - c_0)w_f \tag{5.45}$$

該等式表示當$c_a > c_0$則侵蝕，當$c_a < c_0$則堆積。

在對流擴散模式中，有三種指定c_a及c_0 (即β_d)的方法。其中兩種基於 van Rijn 方程式(van Rijn, 1985)，另一種基於 Lund-CIRP 方程式(Camenen and Larson, 2006)。表 5.1.1 統整這些方法的一般特性。

參考濃度c_a在 van Rijn 方程式中表示為：

$$c_a = 0.015\frac{d_{50}}{a}\left(\frac{\tau_{b,max} - \tau_{cr}}{\tau_{cr}}\right)^{1.5} d_*^{-0.3} \tag{5.46}$$

$$\tau_{b,max} = \sqrt{[\tau_m + \tau_w\, cos(\phi)]^2 + [\tau_w\, sin(\phi)]^2} \tag{5.47}$$

其中a為參考高度，$\tau_{s,max}$為最大底床剪應力，τ_m為一個波浪週期下的波流平均剪應力，τ_w為波浪底床剪應力，ϕ為波流夾角。

表 5.1.1　再懸浮及沉積率的計算特性

方法	參考濃度	說明
指數分布	式(5.46)	快速計算。 傾向高估輸砂率。 可用於一些測試。
van Rijn 分布	式(5.46)	需要大量的計算時間。 提供與 van Rijn(1985)相同的結果。
Lund-CIRP 分布	式(5.46)	快速計算。 新發展的輸砂方程式。

與流相關之剪應力計算：

$$\tau_c = \frac{\rho_w k^2}{[1 + ln(k_s'/30d)]^2} U_c^2 \tag{5.48}$$

與波相關之剪應力計算：

$$\tau_w = \rho_w \frac{f_w}{2} U_w^2 \tag{5.49}$$

$$f_w = exp[5.5(A_w/k_s')^{-0.2} - 6.3] \tag{5.50}$$

在此k_s'為粗糙度高度，定義為：

$$k_s' = k_{sd} + k_{ss} \tag{5.51}$$

其中d為整體水深，定義為$d = h + \eta$，k_{sd}為尼古拉斯等值糙度高度：

$$k_{sd} = 2.5d_{50} \tag{5.52}$$

$$k_{ss} = 5d_{50}\theta_i \tag{5.53}$$

其中θ_i為希爾茲數(下標$i = c, w$分別表示為流及波浪)。流及波浪的希爾茲數表示式為：

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{\rho(s-1)gd_{50}} \tag{5.54}$$

$$\theta_w = \frac{\tau_w}{\rho(s-1)} gd_{50} \tag{5.55}$$

式(5.53)必須與剪應力同時求解，因為粗糙度取決於應力。利用近似多項式發展顯式預測方程式得到精確解，以避免計算剪應力時迭代的耗時。

在 van Rijn 模式中底床濃度定義在高度a的位置：

$$a = max(0.5H_r, 0.01d) \tag{5.56}$$

其中H_r為漣漪高度。如果漣漪出現，則總粗糙度高度修改為：

$$k_s = k_s' + k_{sf} \tag{5.57}$$

van Rijn 方程式指定為$k_{sf} = 20(H_r^2/L_r)$，Lund-CIRP 方程式指定為$k_{sf} = 7.5(H_r^2/L_r)$。

從垂直混和係數獲得轉換參數β_d以決定c_0。van Rijn(1985)提出在只考慮流或波的情況下混和係數分布(如圖 5.1.2)，與流相關的混和係數表示為：

$$\begin{aligned} &\varepsilon_c = \varepsilon_{c,max} - \left(1 - \frac{2z}{h}\right)^{\vartheta} \text{，z} < 0.5h \\ &\varepsilon_c = \varepsilon_{c,max} = 0.25ku_{*_c}h \text{，z} > 0.5h \end{aligned} \tag{5.58}$$

其中，u_{*c}為與流相關之底床剪力速度，表示為：

$$u_{*c} = \frac{k}{-1 + ln\left(\frac{30d}{k_s}\right)} U_c \tag{5.59}$$

係數ϑ由下式獲得：

$$\begin{aligned} &\vartheta = -0.25\frac{U_w}{|U|} + 2 \quad \text{，} 0 \le \frac{U_w}{|U|} \le 4 \\ &\vartheta = 1 \quad \text{，} \frac{U_w}{|U|} > 4 \end{aligned} \tag{5.60}$$

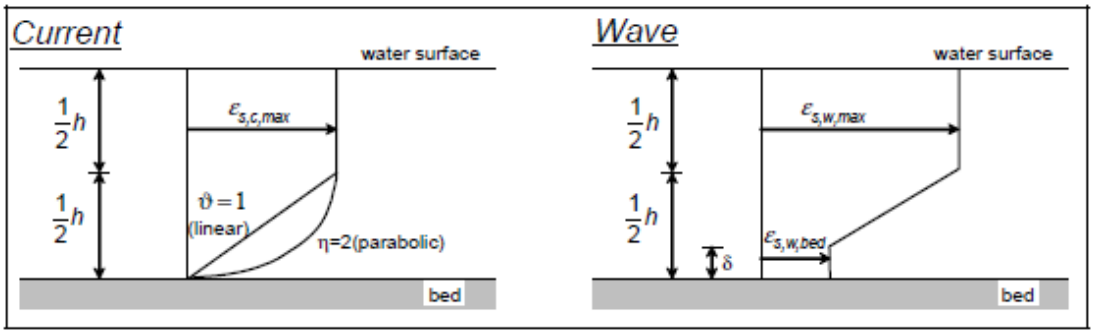


圖 5.1.2　流和波造成的混和係數垂直分布

與波相關的混和係數表示為：

$$\varepsilon_w = \begin{cases} \varepsilon_{w,bed} & ，z < \delta \\ \varepsilon_{w,bed} + \left(\varepsilon_{w,max} - \varepsilon_{w,bed}\right)\left(\dfrac{z-\delta}{0.5h-\delta}\right) & ，\delta < z \le 0.5h \\ \varepsilon_{w,max} & ，z > 0.5h \end{cases} \tag{5.61}$$

3oa✓其中，

$$\begin{aligned} \varepsilon_{w,bed} &= 0.00065 D_* \alpha_{br} \delta u_w \\ \varepsilon_{w,max} &= 0.035 \alpha_{br} \frac{hH}{T} \end{aligned} \tag{5.62}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{br} &= 5\left(\frac{H}{h}\right) - 2 \quad ，H/h \ge 0.6 \\ \alpha_{br} &= 1 \quad ，H/h < 0.6 \end{aligned} \tag{5.63}$$

參數δ為距底床高度給定為$\delta = 3H_r$，H為示性波高，T為示性週期。如果波流共存，混和係數為：

$$\varepsilon_{cw} = \sqrt{\varepsilon_c^2 + \varepsilon_w^2} \tag{5.64}$$

透過ε_{cw}表示式，可以導出式(5.42)之濃度分布及計算轉換參數β_d。在對流擴散模式中，實現了兩種基於 van Rijn 方

程式的方法計算β_d。一種是基於指數分布的平均水深混和係數$\overline{\varepsilon}_{cw}$，另一種為原始 van Rijn 分布，通過式(5.42)數值積分得到β_d。假設懸浮濃度為指數分布，解析得β_d為：

$$\beta_d = \frac{1}{d-a}\frac{\overline{\varepsilon}_{cw}}{w_f}\left\{1 - exp\left[-\frac{w_f}{\overline{\varepsilon}_{cw}}(d-a)\right]\right\} \tag{5.65}$$

其中，

$$\overline{\varepsilon}_{cw} = \frac{1}{d-a}\int_a^d \varepsilon_{cw} dz \tag{5.66}$$

Lund-CIRP 方程式計算參考濃度及砂的擴散也應用於對流擴散模式中。用於c_R及ε的方程式，在這部分會呈現來描述 Lund-CIRP 方程式。

(1) 水平擴散係數

對流擴散模式中水深平均濃度的水平擴散係數K_x及K_y由 Elder (1959)提出方程式計算：

$$\begin{aligned} K_{xo} &= 2.93 u_{*c} d \\ K_{yo} &= 5.93 u_{*c} d \end{aligned} \tag{5.67}$$

在碎波帶，波浪在橫向混和有顯著的貢獻，渦流黏滯係數預期是波浪特性的函數。對於對流擴散模式的水平擴散係數，應用 Kraus and Larson (1991)提出的碎波帶混和在水動力計算中。

$$K_w = \varepsilon_L \tag{5.68}$$

其中ε_L描述波谷水位下的橫向混和(Smith, Larson, and Kraus, 1993)，並表示為(Kraus and Larson 1991)：

$$\varepsilon_L = \Lambda u_w H \tag{5.69}$$

其中Λ為橫向混和長度之經驗係數。

通過加權混和係數在 CMS-FLOW 中，表示碎波帶的擴散及碎波點向外海的海洋擴散之間的過渡段，指定為：

$$\begin{aligned} K_x &= (1-\theta_m)K_{xo} + \theta_m K_w \\ K_y &= (1-\theta_m)K_{yo} + \theta_m K_w \end{aligned} \tag{5.70}$$

其中加權參數θ_m表示為：

$$\theta_m = \left(\frac{H}{h+\eta}\right)^3 \tag{5.71}$$

(2) 底床載輸砂率

底床載輸砂率可由 van Rijn (1998) 或 Lund-CIRP (Camenen and Larson 2005)方程式計算。在 van Rijn 方程式中，底床載由下式得到，不包含底床粗糙度：

$$q_b = 0.1 d_{50} u_{*_c} \left(\frac{\tau_{s,max} - \tau_{cr}}{\tau_{cr}}\right)^{1.5} d_*^{-0.3} \tag{5.72}$$

Lund-CIRP 方程式計算底床載在前面已提到不再贅述。

(3) 底床載及懸浮載輸砂率的縮放因子

分配 Lund-CIRP 總輸砂方程式及對流擴散方程式以調整底床載及懸浮載輸砂率。縮放因子直接應用於輸砂率的係數，不取決於底床載輸砂率及懸浮載輸砂率。因此，底床載輸砂率可以與懸浮載輸砂率分別縮放。縮放因子的建議值為 0.1~4。縮放因子為 1 時為預設值，將無調整輸砂率。當縮放因子小於 1 時，將減少輸砂率；大於 1 則為增加輸砂率。於不確定

的外力或初始條件時，縮放因子可調整模式預測輸砂率及率定地形變遷。

(4)砂的連續方程式

時間平均輸砂率型式的連續方程式，可計算總輸砂方程式及對流擴散方程式的底床載方程式的水深變化。這個方法需要定義兩個時間間隔，一個用於計算瞬時輸砂率dt_{sed}，另一個用於計算平均輸砂率及地形變遷dt_{morph}。在時間間隔為dt_{sed}時，計算定向瞬時輸砂率$q_{tot,x}$和$q_{tot,y}$；在時間間隔為dt_{morph}時，計算x和y方向上的時間平均輸砂率$\overline{q}_{tot,x}$和$\overline{q}_{tot,y}$。通過計算修改的時間平均傳輸率$\overline{q}'_{tot,x}$和$\overline{q}'_{tot,y}$，完成增加下坡輸砂率及減少上坡輸砂率(Watanabe, 1987)：

$$\overline{q}'_{tot,x} = \overline{q}_{tot,x} - D_s\left|\overline{q}_{tot}\right|\frac{\partial h}{\partial x} \tag{5.73}$$

$$\overline{q}'_{tot,y} = \overline{q}_{tot,y} - D_s\left|\overline{q}_{tot}\right|\frac{\partial h}{\partial y} \tag{5.74}$$

其中D_s為經驗坡度係數，一般介於 5~30，$\overline{q}_{tot}$為時間平均輸砂率。這些方程式為了底床變化，在連續方程式中加入有效的傳輸擴散。

砂的連續方程式求解以時間間隔為dt_{morph}之地形變化，總輸砂方程式為：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{1}{1-p}\right)\left(\frac{\partial \overline{q}'_{tot,x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{q}'_{tot,y}}{\partial y}\right) \tag{5.75}$$

在剛性邊界，輸砂率梯度通過邊界的單元設為零。

對流擴散方程式中，砂的連續方程式於式(5.36)提及。時間間隔計算瞬時輸砂率及平均輸砂率和地形變遷與總輸砂率

模式的時間間隔相同，即分別為dt_{sed}及dt_{morph}。此外，式(5.36)的底床載在坡度效應下，調整為：

$$\overline{q}'_{bx} = \overline{q}_{bx} - D_s\left|\overline{q}_b\right|\frac{\partial h}{\partial x} \tag{5.76}$$

$$\overline{q}'_{by} = \overline{q}_{by} - D_s\left|\overline{q}_b\right|\frac{\partial h}{\partial y} \tag{5.77}$$

其中，$\overline{q}_b = \sqrt{\overline{q}_{bx}^2 + \overline{q}_{by}^2}$。最後砂的連續方程式求解地形變遷，時間間隔為$dt_{morph}$時，改寫為：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-p}\left(\frac{\partial \overline{q}'_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{q}'_{by}}{\partial y} + \overline{P} - \overline{D}\right) \tag{5.78}$$

包含底床載及懸浮載。在剛性邊界，輸砂率通過邊界單元設為零。

水動力模式(CMS-FLOW)及波浪模式(CMS-WAVE)屬於雙向耦合模式，在水動力模式耦合計算過程中，波浪模式計算之輻射應力結果，作為水動力流場計算之外加作用力條件。而波浪模式計算過程中，其水位及流場條件則隨時由水動力模式計算結果更新。

2. 粒子軌跡法 (PTM，Particle Tracking Model)

PTM 為一個 Lagrangian 粒子軌跡運動傳輸模式，具有於流場結果中模擬漂砂運動行為之能力；包含漂砂移動、侵蝕、淤積、沉降、沉積以及再懸浮等現象。事實上 PTM 漂砂粒子在流場中之運動行為，不僅是受到流速影響，同時也與底床，以及漂砂本身特性之交互作用有關。模式依據釋放粒濃度、粒徑質量單位以及模擬時間，於模式計算時便決定有限數量之粒子，計算其在流場中運動之行為，PTM 詳細理論可參見附件一。PTM 模式於計算上可分成兩部分，第一部分為自然狀況下其地

形變遷趨勢，此部分可呈現在特定底質分部之海岸，其底床在水動力作用下之自然搬運趨勢；第二部分為粒子軌跡計算，此部分可計算自然河川以及人工放流漂砂，其於水動力條件下，與自然底床交互作用後之移動趨勢以及最後沉積位置，並根據沉積位置計算出沉積土方以及該位置之淤積趨勢，最後結合兩者計算結果可呈現最後可能之地形變遷之情形。

5.1.3 計算流體力學模式(二維斷面模式)

為更準確地評估波浪對海岸道路之影響，本研究至此將使用水深方向求解之二維斷面模式評估之。模式主要架構為 COBRAS (COrnell BReaking wave And Structure) model (Lin and Liu, 1998a, b)，其主要特點為可準確地描述波浪於近岸區(Hsiao and Lin, 2010)且與不透水 (Wu et al., 2012)或透水結構物(Wu and Hsiao, 2013)互制之水動力特性。以下概述模式之統御方程式、紊流模式、自由水面追蹤方法及邊界條件等。

1. 統御方程式：

假設具黏性(viscosity)之流體為不可壓縮(incompressible)但可為旋流(rotational)，並將瞬時物理量分解成平均物理量與瞬時擾動量之和，後再帶入 Navier-Stokes equations，可得具時間平均特性之 Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)，以二維 Euler 座標描述如下：

$$\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{5.79}$$

$$\frac{\partial\rho\langle u_i\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\rho\langle u_i\rangle\langle u_j\rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial\langle p\rangle}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial\langle\tau_{ij}\rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\langle u_i' u_j'\rangle\right) \tag{5.80}$$

其中，u 表示速度、t 為時間、p 為壓力、ρ 為密度、下標 i 和 j 表二維座標系統、τ_{ij} 為牛頓流體假設下之剪應力張量、<>表示平均物理量。式(5.80)中，等號右邊最後一項為雷諾應力

(Reynolds Stresses)，其物理意義為受對流作用而產生的動量交換，用以代表紊流的影響，但此項造成方程式無法閉合，須以額外模式求解。

2. 紊流模式：

COBRAS 模式使用 k-ε 模式模擬雷諾應力，其中 k ($=\langle u_i' u_i' \rangle/2$)為紊流動能、$\varepsilon$ [$=\nu\langle(\partial u_i'/\partial x_j)^2\rangle$]為紊流消散率，並使用 Shih et al. (1996)提出之雷諾應力表示式，再以 k-及 ε-euqations 求解之：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_k} + \upsilon\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] - \langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \varepsilon \tag{5.81}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_\varepsilon} + \upsilon\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\upsilon_t\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5.82}$$

其中，k-ε紊流模式所使用之經驗參數詳見 Lin and Liu (1998a)。

3. 流體體積法(volume of fluid, VOF)：

為追蹤複雜之自由液面波動過程，本研究使用流體體積法[VOF, Hirt and Nichols (1981)]追蹤受地形或結構物影響造成波浪碎波前後之水位線變化，其原理為判斷水體於網格所佔之比例，如 VOF 值為 1 代表網格充滿水體、0 代表網格充滿孔隙且無任何水體、介於 0-1 之間代表該網格佔有部分水體。VOF 法滿足質量守恆，可以連續方程式表示之，此外亦須滿足運動邊界條件(kinematic free surface boundary condition)，意指於自由水面上之水質點及紊流無法脫離自由水面線且不考慮水與空氣之互制過程。

4. 初始、邊界條件：

初始條件假設流體靜止流況，即流場壓力為靜水壓分布且流體於各方向速度均為零，以此原理理論上應亦為零，然此將

造成 ε-equation 無法計算，故需於初始條件中給定 k 一微小量方能使 k-ε閉合模式成立 (Lin and Liu, 1998a)。

於水深二維模擬中，上游邊界為造波邊界，須給定自由液面、水平及垂直方向速度之時序列，並使用主動式消波以消除波浪反射作用於造波邊界之影響(Torres-Freyermuth et al., 2010)。下游及底部邊界將使用實際近岸地形及結構物等，以期更加貼切地模擬波浪對海岸道路之影響。此將使用部分網格法(partial cell method)描述不規則地形，並滿足無滑移邊界條件(no-slip boundary condition)。

5.1.4 對策評估方法

相關對策評估流程如圖 5.1.3 所示，而相關評估方式概如表 5.1.2 所示，本計畫透過數值模式分別針對擬訂之改善對策進行相關評估作業。另，依據 4.2 節「研擬改善因應對策」可知，本計畫目前評估對策以「南興路段」與「多良路段」為對象，分別針對草埔隧道粒石養灘路段、南興防制浪行工法路段及多良路段(大竹溪以北)等區域進行改善對策評估。

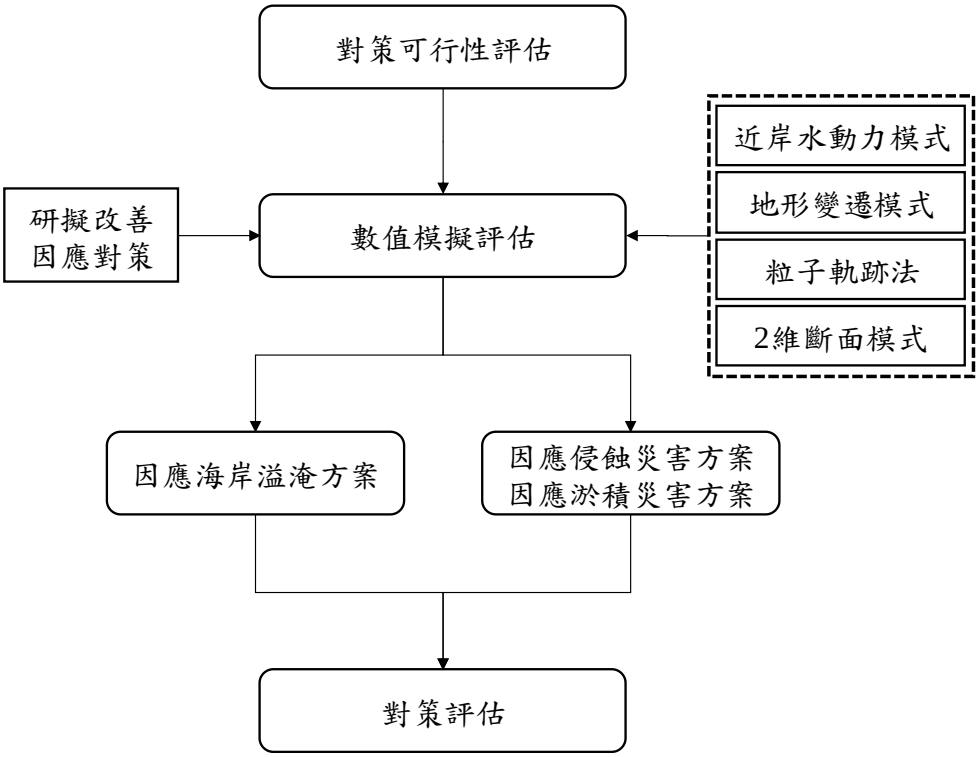


圖 5.1.3 對策評估方法與流程圖

表 5.1.2　對策可行性評估

評估方法	說明
近岸水動力數值模式	1. 透過模式模擬近岸水動力分布情況，以利評估改善對策之效益。 2. 地形變遷引致的災害類型如「侵蝕災害」與「淤積災害」，與流場變化有密切關係，因此可透過水動力模擬成果，來瞭解改善對策對流場變化情況，是否能夠提升改善效益。
計算流體力學模式 (二維斷面計算)	如 4.2 節「研擬改善因應對策」可知，於「公路浪襲」改善對策中，必須針對現況已實施之工法與過往情境，進行工效評估。透過近岸水動力模式的模擬成果，可將其做為二維斷面模式之入射邊界與水位條件，以利模擬波浪越波與溢淹之情況，並評估工法成成效。
地形變遷模式	地形變遷模式可運用於「侵蝕災害」與「淤積災害」改善評估，例如： 大武漁港南側草埔隧道塊石養灘區域，於中長期地形變遷影響下，是否對台 9 線公路造成影響。而於可能侵蝕之潛勢區域(多良路段)，能夠透過模式釐清改善對策抑制災害之程度。
粒子軌跡法	粒子軌跡法能夠透過漂砂粒徑分布參數的給定，瞭解大武漁港實施「迂迴供砂」時，適合之拋砂點位與量體，以減緩清淤產生之砂石，再造成港內淤積之可能性。

5.2　南興路段區域

由前述改善對策研擬(參閱 4.2 節)可知，該路段所需評估對策分別為短期改善對策與長期改善對策兩種，其中短期對策主要探討現階段為防制「公路浪襲」災害所執行的改善對策與往昔未實施對策之差異性；長期改善對策則先評估大武漁港南側養灘於中長期地形變遷情況，並以導入「迂迴供砂」工法，探討漁港清淤土方適合放置點與再利用養灘方式強化公路浪襲防制之可能性。

依據 Pedro Loza (2008)迂迴供砂系統說明報告中，針對工法特性、工法運作模式、挖砂方式及運輸方式等內容均有進行詳細彙整。港灣常用突堤或防波堤穩定航道，以致攔截海岸線沿岸流與漂砂，造成下游側海岸侵蝕災害。「迂迴供砂法」則是以人為方式將累積於港口、灘岸或航道的淤砂傳輸至下游側海岸，以減少下游側海岸侵蝕，及上游側海岸長期淤積影響港灣運行之災害。迂迴供砂系統具彈性與機動性，可配合現地環境來進行不同系統設置，可概分為水域移動式系統

(例如：浮動式挖泥船)、陸域移動式系統(例如：陸上移動式挖泥機、噴射泵)及固定式系統(例如：架設平台或防波堤搭配抽泥泵)等三種。運作模式則為攔截運作系統與貯藏運作系統兩類，分別對應攔截漂砂端與輸砂端。挖泥方式可分為機械動力(用於硬質材料、碎石及塊石等)、水利動力(未固結淤泥、沙子與礫石)及其它型式(因應特定目的所開發) 等三種；運輸方式則可分為大型挖泥船運輸、固定或連續輸送系統(固定管線進行輸送，可採陸上管線或水下管線設計)及陸上車具法等三種。因應地點之區域特性、土石分布及改善目的等，可擇選合適系統與方式來進行迂迴供砂改善，例如：澳洲特威德河口(Tweed River)海岸漂砂大都屬於細質砂土，且迂迴供砂目的是為下游需保持充足灘岸以供遊憩所需。因此，該案例則採用固定式迂迴供砂系統，透過架設平台方式，並於平台上裝設抽泥設備，配合固定管線進行漂砂輸送，藉以穩定將上游過剩漂砂繞道傳遞至下游灘岸。

根據上述說明，透過不同需求面向分析大武漁港淤積問題，擬訂較可行之迂迴供砂系統內容。相關內容概述如下。

1.系統種類：

大武漁港周圍漂砂粒徑較大，抽泥泵機具較不適用，較難以固定式抽砂系統進行設置。因此，以水域移動式系統或陸域移動式系統較為合適。

2.迂迴供砂目的：

目前針對南興路段的改善策略，主要是期望透過迂迴供砂方式將漁港內的淤砂再利用於南側的養灘工程，以強化公路浪襲防制之強度。此外，同時評估新放置點是否能減緩清淤土方因水動力條件作用又傳遞回漁港導致淤積之可能性。

3.挖砂方式：

目前大武漁港清淤均採用機械動力方式進行，主因為現地淤砂屬質地較硬且粒徑較大之粗砂。因此，挖砂方式建議仍採用機械動力方式進行。

4.運輸方式：

目前漁港清淤之土方，概拋放於漁港南側與養灘區域中間及北側突堤灘岸。若往後採迂迴供砂方式，則需將土方運至其它區域進行利用，運輸方式建議採車具方式進行。

5.運輸容量：

參考往昔報告，瞭解大武漁港每年清淤之土方量，以利可行性評估參考。

6.貯藏端評估：

主要評估清淤土方放置點位合適性，除瞭解土方再利用是否能強化南側公路浪襲防制強度外，亦需確認放置土方是否再因環境影響回淤港內。

上述為目前此改善對策所需評估與建議工法內容，為達成這些評估內容，則需針對大武漁港周圍粒徑進行調查，以利建立較可靠之現況粒徑分布情況。再進一步透過數值模型，計算模擬迂迴供砂的相關作為，俾利完整評估此改善對策之可行性，相關評估內容如下。

5.2.1 南興路段漂砂調查與模式設定

南興路段海岸變遷現象中，大武漁港周圍漂砂運動為重要因素，因此需針對大武漁港周邊底質粒徑進行初步評估，而為更了解大武漁港清淤粒石之特性，本計畫分別對大武漁港周邊進行海岸底質調查，以做為模式底質條件之參考，調查位置如圖 5.2.1 所示，其中，P1 以及 P2 位漁港南側，P3 位於北側，P4 則位於港口淤積位置。

於大武漁港現場取得之底質樣本經篩分析後，得到其粒徑組成成分如圖 5.2.2 至圖 5.2.5，底質粒徑分析結果整理如表 5.2.1，由樣本組成可見其主要以細粒料之礫石為主夾雜部份砂石，均勻系數一般大於 1，愈接近於 1，表明土壤愈均勻，底質粒徑越單一，曲率系數一般大於 1 小於 3 表示土粒相的粒徑齊全，呈現連續分布；當曲率系數過大，表示d_{10}~d_{30}範圍內有斷層，在這一範圍內缺少某些土壤粒徑土粒分布；曲率係數過小，表示d_{30}~d_{60}範圍內有斷層。故就

調查結果其均勻係數以及曲率係數而言，大武漁港周邊底質粒徑分布算是集中分布，整體而言大武漁港周邊海岸，以礫石以及粗砂為主，底質中值粒徑介於 2.79mm~13.04mm 不等，由底質粒徑大小可見，其海岸漂砂活動主要驅動力來自於波浪活動。

圖 5.2.1　大武漁港周邊採樣位置

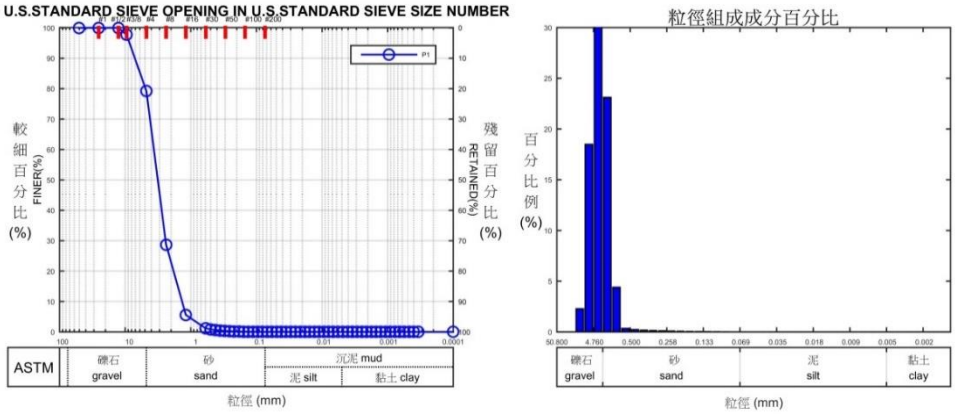


圖 5.2.2　大武漁港周邊海岸(p1)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

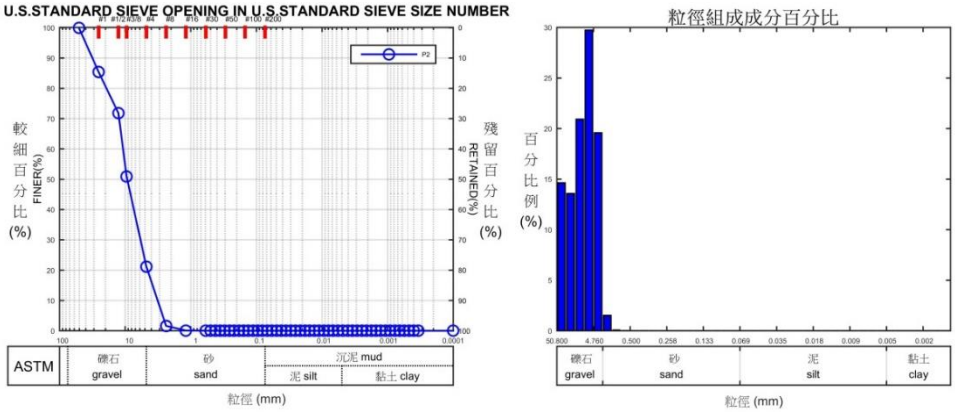


圖 5.2.3　大武漁港周邊海岸(p2)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

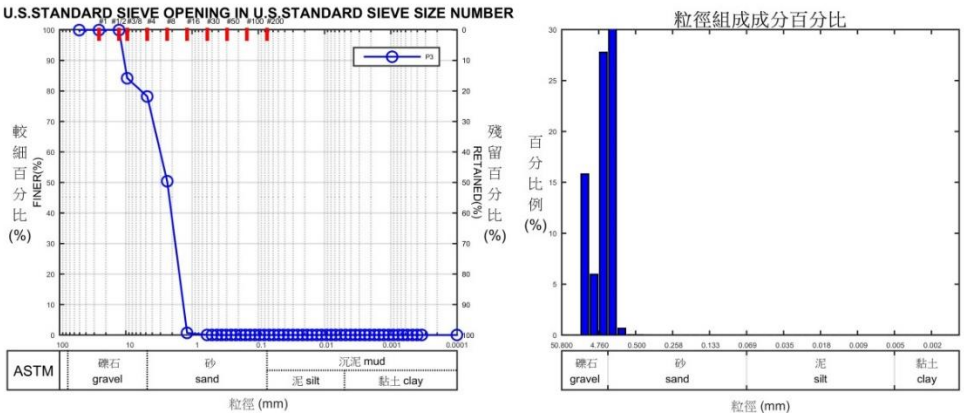


圖 5.2.4　大武漁港周邊海岸(p3)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

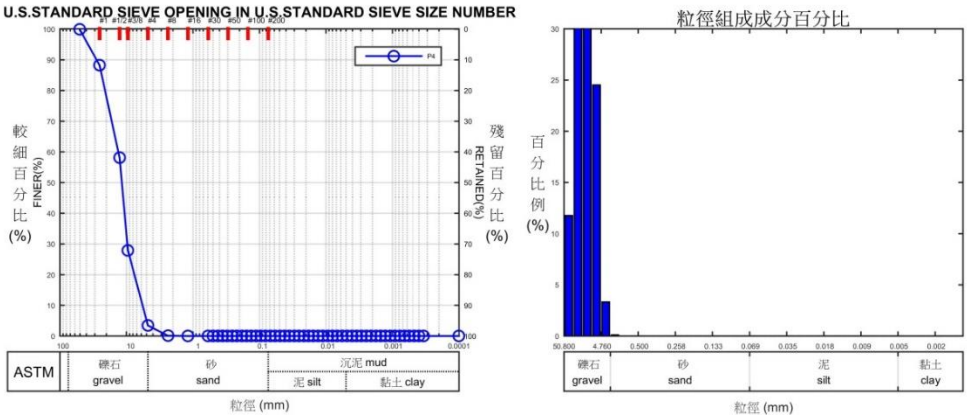


圖 5.2.5　大武漁港周邊海岸(p4)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

表 5.2.1　大武漁港周邊漂砂粒徑特性分析(篩分析)

點位	坐標		D10(mm)	D30(mm)	D50(mm)	D60(mm)	D90(mm)	Dm(mm)	Cu	Cc	gravel(%)	sand(%)	silt(%)
P1	120.8939	22.33064	1.51	2.44	3.18	3.55	6.50	3.83	2.35	1.11	20.75	79.25	0.00
P2	120.8946	22.33389	3.77	6.08	9.38	10.64	31.88	13.33	2.83	0.92	78.82	21.18	0.00
P3	120.8981	22.33697	1.66	2.00	2.36	2.79	11.31	4.07	1.68	0.86	21.77	78.23	0.00
P4	120.897	22.33598	6.68	9.79	11.62	13.04	27.34	15.44	1.95	1.10	96.57	3.43	0.00

於大武漁港南側海岸，目前已利用草埔隧道開築工程之土石進行養灘工作，目視大多土砂之粒徑大於 8cm，根據一般河川粒徑採樣分析規範多採用網格法拍照分析，分析結果如圖 5.2.6~圖 5.2.9，底質粒徑分析結果整理如表 5.2.2，由分析結果顯示，隧道所浚挖之

土石中值粒徑 D50 多在 8~20 公分之間，以礫石為主，現場採樣點位以及底質型態如圖 5.2.10。

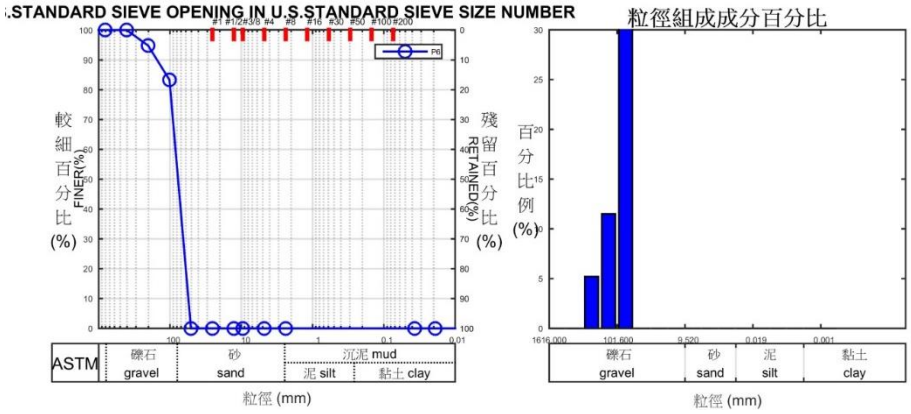


圖 5.2.6　大武漁港周邊海岸(p6)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

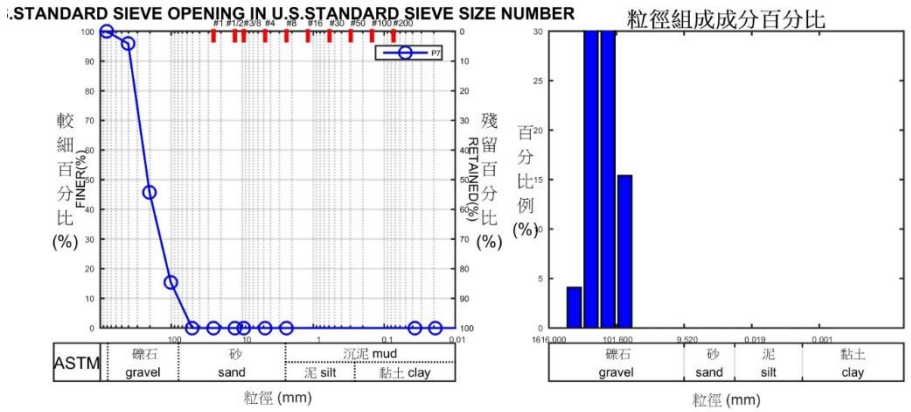


圖 5.2.7　大武漁港周邊海岸(p7)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

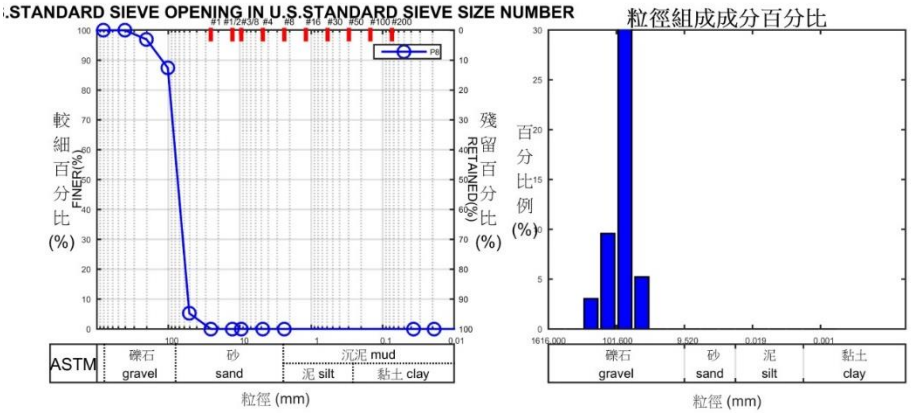


圖 5.2.8　大武漁港周邊海岸(p8)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

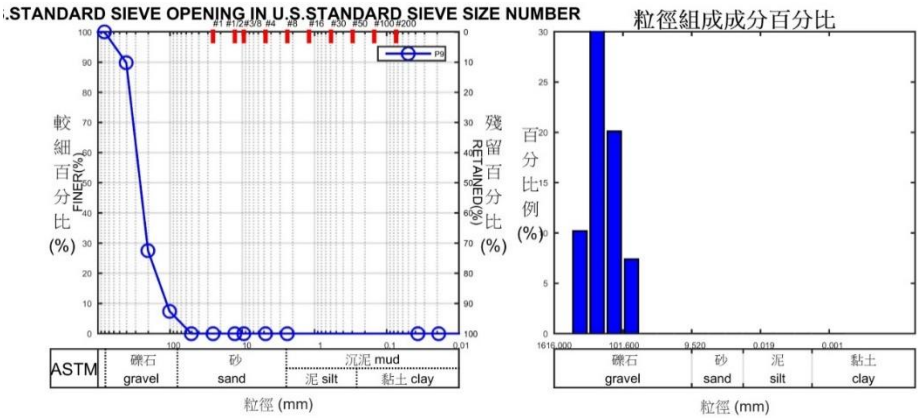


圖 5.2.9　大武漁港周邊海岸(p9)底質粒徑組成成分以及累積曲線分析成果

表 5.2.2　大武漁港周邊海岸粒徑特性分析(網格法)

點位	坐標		D10(mm)	D30(mm)	D50(mm)	D60(mm)	D90(mm)	Dm(mm)	Cu	Cc	gravel(%)	sand(%)	silt(%)
P6	120.8943	22.3332	65.44	78.19	80.83	82.83	140.64	96.70	1.27	1.13	100.00	0.00	0.00
P7	120.8937	22.3313	91.88	148.93	215.74	237.84	350.46	234.72	2.59	1.01	100.00	0.00	0.00
P8	120.8934	22.3290	56.93	71.08	75.85	78.51	111.28	88.34	1.38	1.13	100.00	0.00	0.00
P9	120.8929	22.3259	116.70	211.73	260.52	278.97	405.73	286.77	2.39	1.38	100.00	0.00	0.00

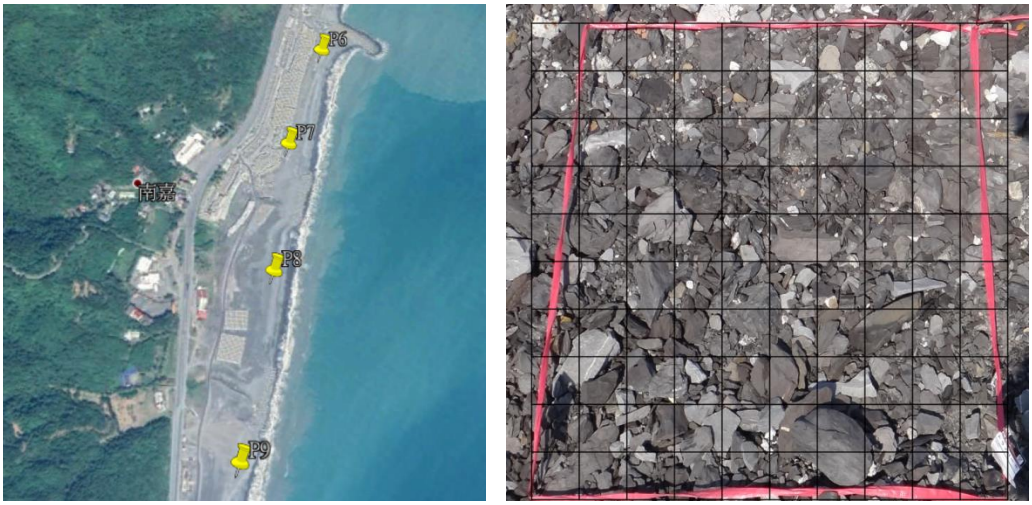


圖 5.2.10　大武漁港周邊海岸(p6~p9)草埔隧道養灘底質粒徑組成成分 (網格法 10cm)

進一步依據現場底質調查結果，建立漂砂模式加以評估，漂砂模式計算利用 Van Rijn 漂砂計算法模擬，底質粒徑給定大武漁港粒徑 11mm，漂砂密度 2650kg/m^3，底床孔隙率 0.4。

在模式建置方面，為了能夠詳細的描述大武漁港內側的地形，同時能兼顧計算效率，研究於水動力以及地形變遷方面，採用四元素加密網格配置，網格配置以及計算範圍如圖 5.2.11，其中最外側之網格解析度為$50m \times 50m$，於近岸 25 公尺水深以內網格加密至$25m \times 25m$，至大武漁港處加密至$2.5m \times 2.5m$ 公尺網格，漁港周圍網格配置如圖 5.2.12。波浪計算則採用均勻網格，波浪計算網格配置為$15m \times 15m$ 。

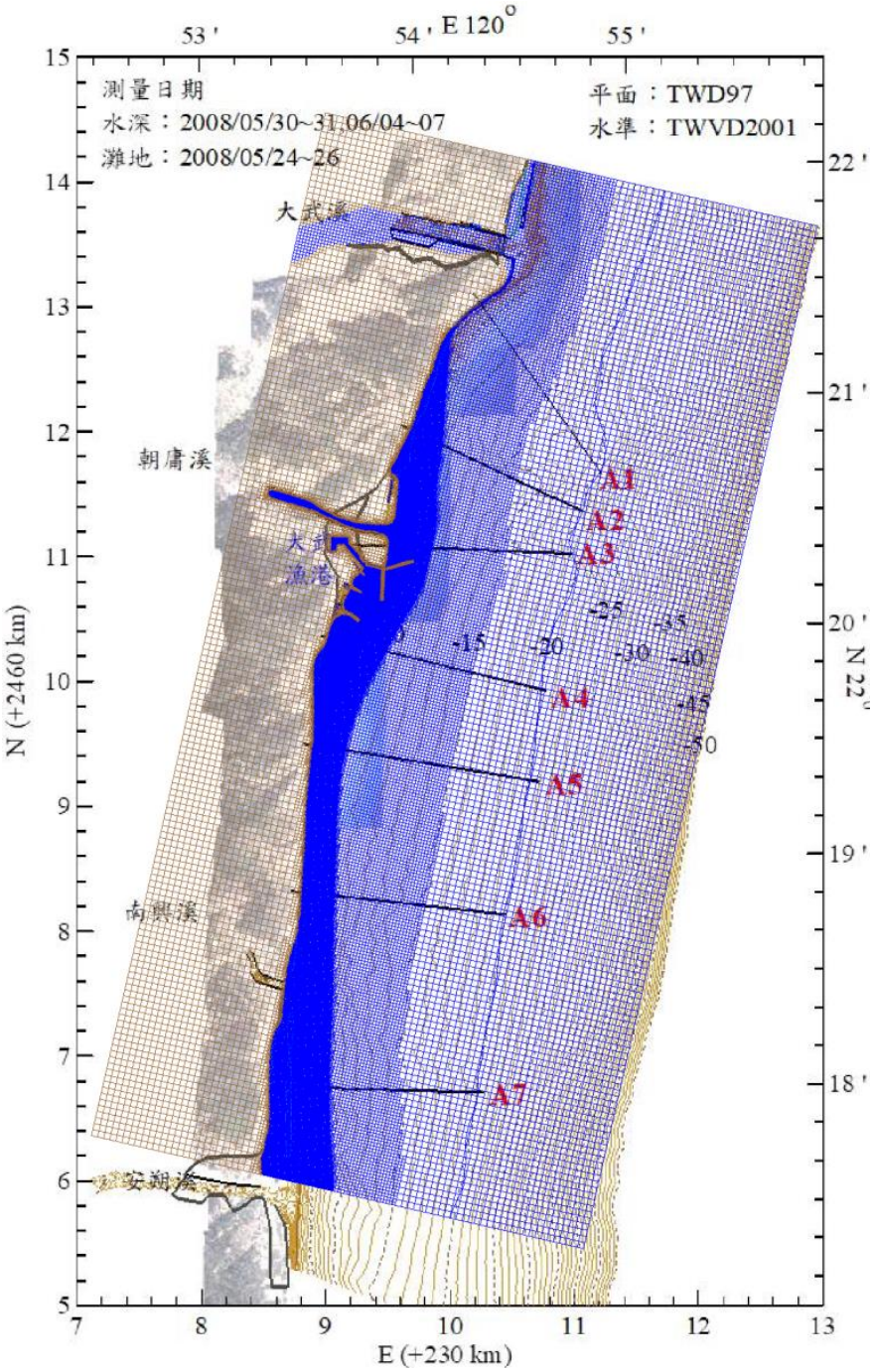


圖 5.2.11　南興路段漂砂評估網格範圍及配置

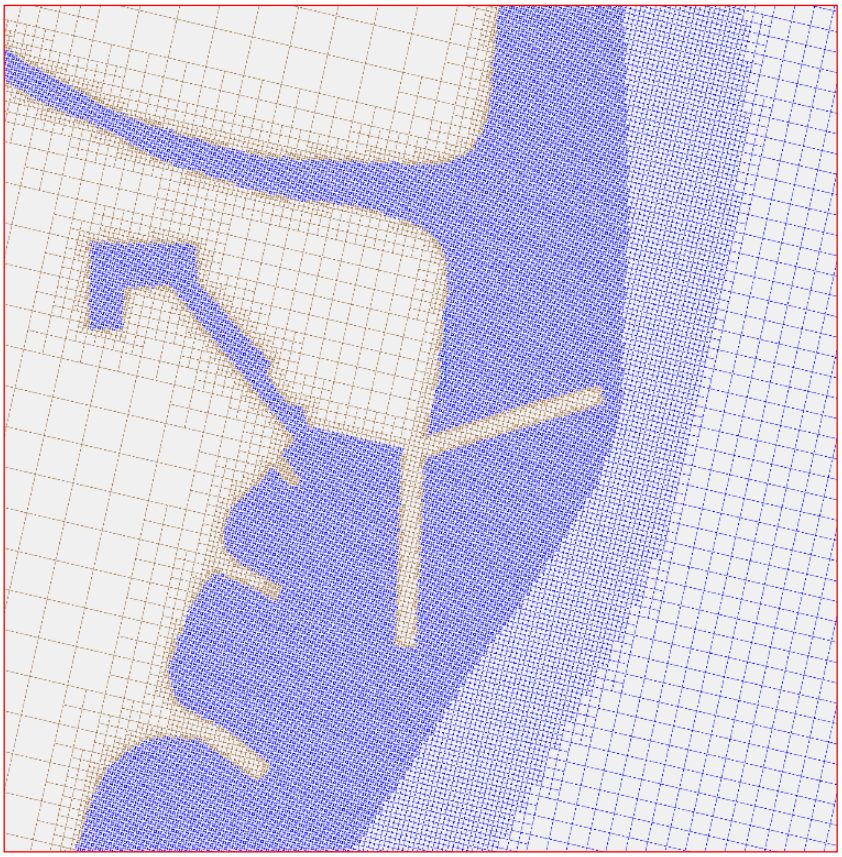


圖 5.2.12　大武漁港區域漂砂評估網格範圍及配置

5.2.2　南興路段養灘區域對台 9 線影響評估

依據本計畫於大武漁港周圍粒石採樣分析結果，進行地形變遷模擬，以利瞭解目前藉由草埔隧道粒石養灘區域，若於中長期地形變遷影響下，是否會對海岸造成影響，進而衝擊台 9 線公路安全。

海岸地形變遷模擬通常需考量代表性波浪條件，因此得先分析計畫區長期代表性波浪趨勢。外海波浪條件則蒐集中央氣象局臺東外海觀測浮標之長期波浪觀測資料，資料結果如圖 5.2.13，資料長度為 2010/09 ~ 2018/03。進一步將夏季以及冬季分開統計，其波浪特性玫瑰圖如圖 5.2.14，根據季節性示性波高、週期之累積機率分布可推估本計畫區內在夏季季風期間表性波高為 1.43 m，代表性週期為 5.81 s，主要波向 ESE ，群波波速為 4.81 m/s。冬季代表性波高為 1.74 m，代表性週期為 6.44 s，主要波向 E，群波波速為 5.55 m/s；全年度代表性波高為 1.62 m，代表性週期為 6.12 s，主要波向 E，群波波速為 5.16 m/s。

透過海洋數值配合代表性波浪條件，模擬代表性波浪條件下南興路段海岸地形變遷情況(參見圖 5.2.15)。圖中顯示，大武漁港南側養灘後之地形變遷變化，仍呈現部分侵蝕趨勢。圖 5.2.16 為災害特性分析結果，其顯示南興路段海岸侵淤情況已較不顯著，惟於中長期變化趨勢中，部分區域仍會呈現侵蝕趨勢。由現況粒徑分析結果可知，大武漁港周圍灘岸粒徑分布類型較廣，於中長期地形變遷下，部分粒徑較小砂源仍有被自然營力帶動之可能性。雖侵蝕趨勢不顯著，惟中長期趨勢下，仍有可能對台 9 線邊坡造成影響，若要強化養灘段之穩定度，仍須再透過區域性改善對策進行補強(例如：離岸潛堤或重新分配養灘級配)，才可能達至穩定之效果，因此仍應持續觀察該海岸變遷情況。

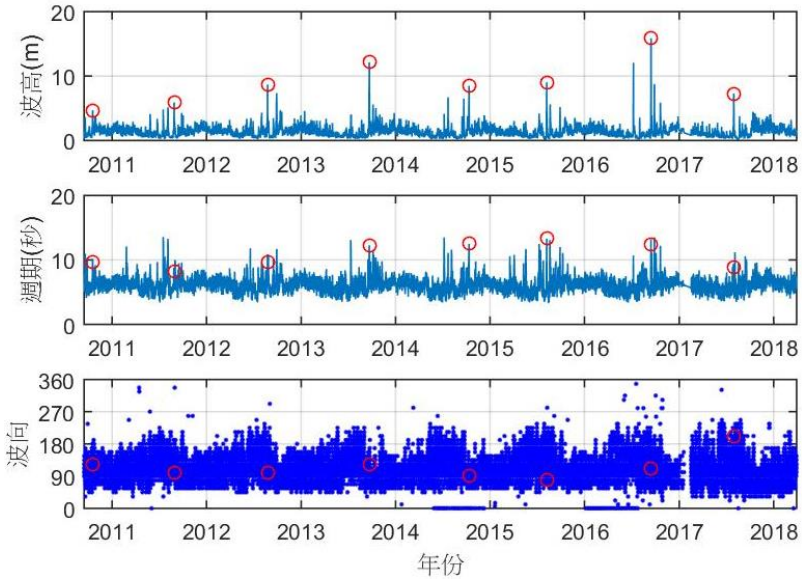
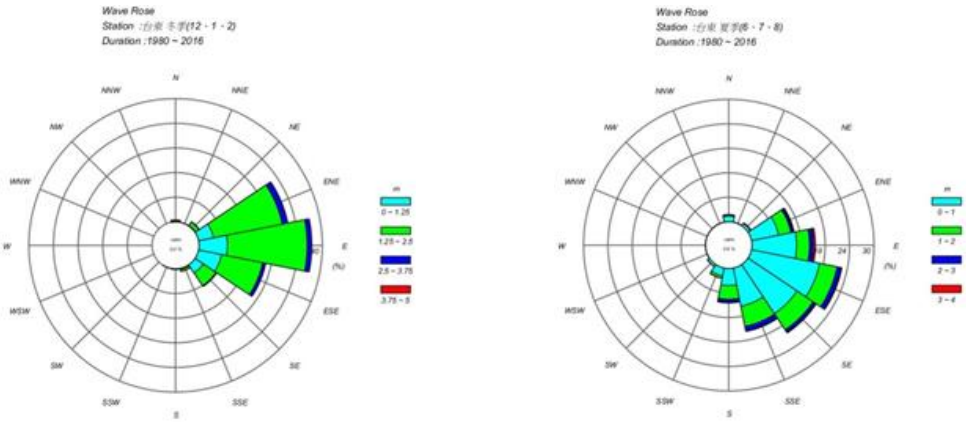


圖 5.2.13　臺東浮漂波浪資料時序列



冬季代表性波浪　　夏季代表性波浪

圖 5.2.14　臺東浮漂夏、冬季波浪資料統計結果

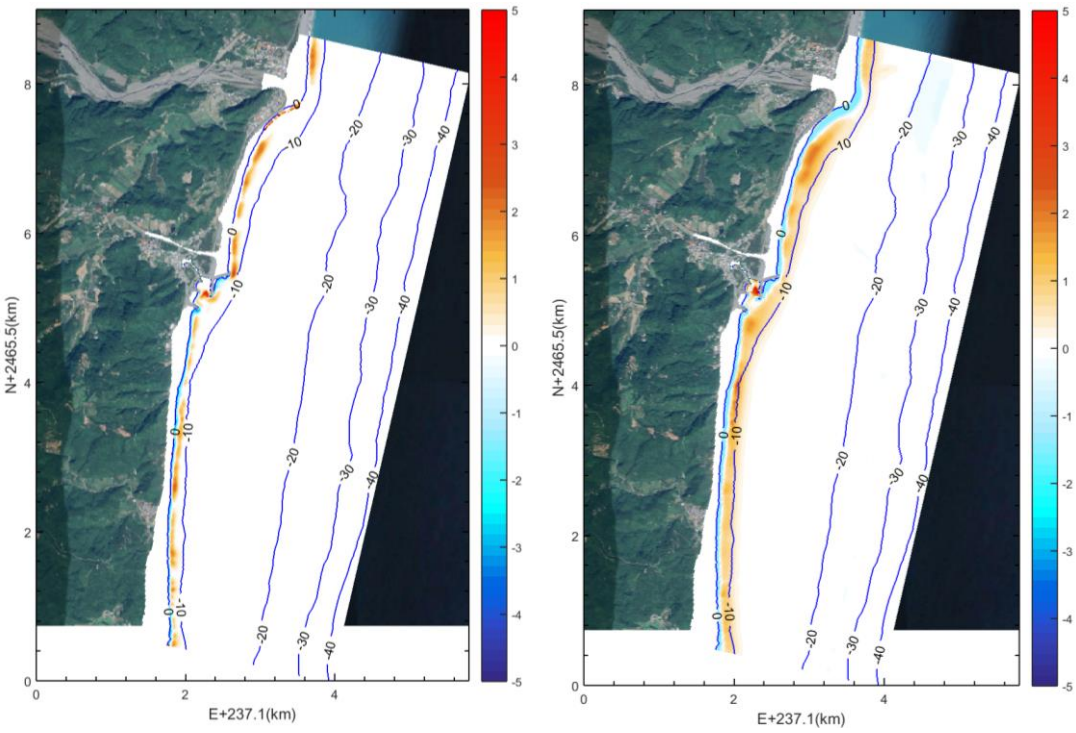


圖 5.2.15　南興路段夏、冬季侵淤結果

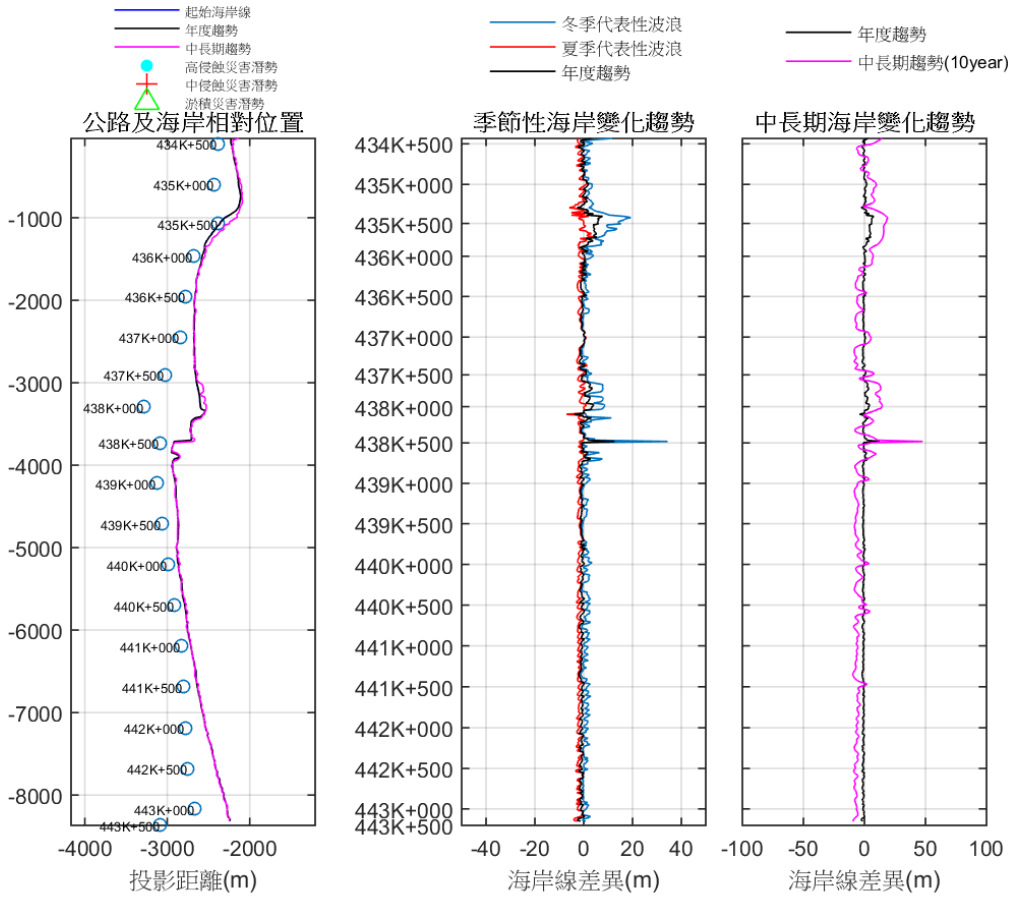
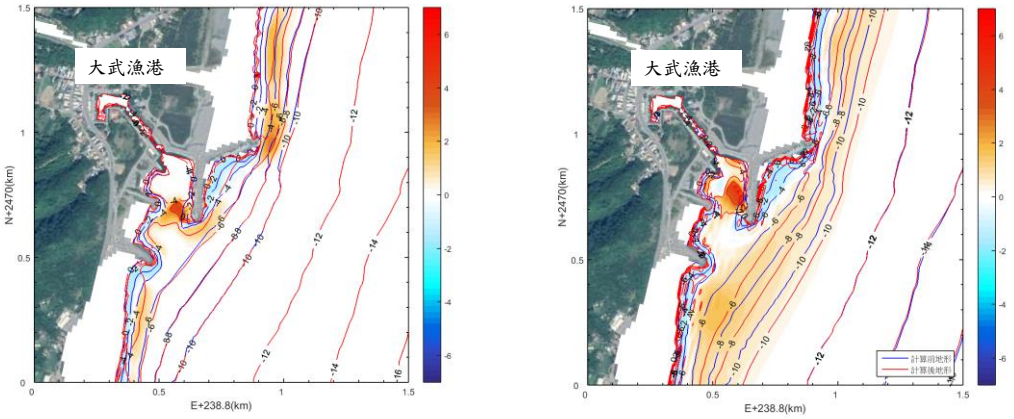


圖 5.2.16　南興路段侵淤災害特性分析

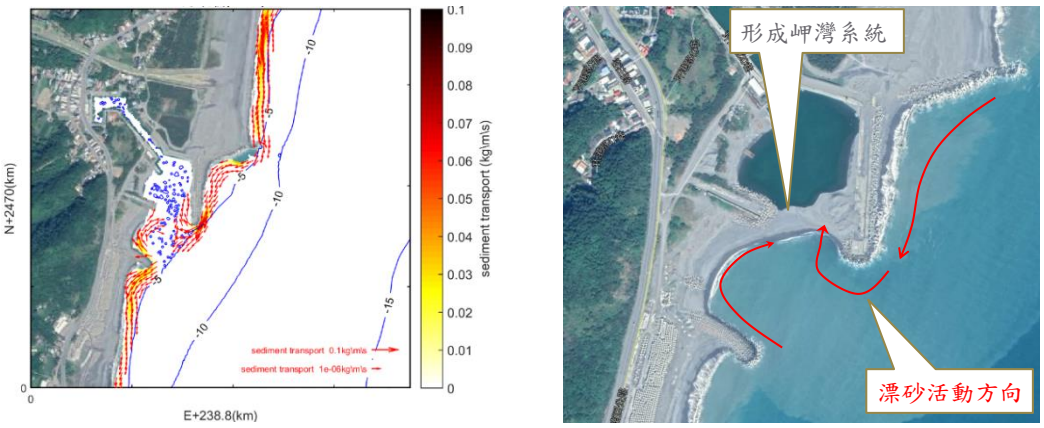
5.2.3　迂迴供砂法評估

在進行迂迴供砂法評估前，應先對大武漁港淤積機制有所瞭解，透過數值模擬方式，研討漁港淤積之原因，以做為改善台 9 線對策構思之基礎。圖 5.2.17 顯示，大武漁港內於冬夏季條件皆呈現淤積趨勢，可知大武漁港目前所在地理位置淤砂趨勢是屬於必然結果。分析大武漁港附近漂砂傳輸現象(參見圖 5.2.18)，可知漂砂運動優勢方向為由北往南，漂砂淤積以南側開口靠東為主，夏季波浪可將其推入港內。此外，由分析結果顯示，漁港東側堤與其位於南側突堤形成類似岬灣系統，藉以增加港嘴淤積趨勢。由此可知，若依目前清淤工程流程，將清淤土方放置東側堤與養灘區之間或是放於北側突堤灘岸，均可能因颱風波浪與東北季風波浪作用將漂砂再帶回港嘴周圍，進而再提升淤積可能性。



冬季代表性波浪　　夏季代表性波浪

圖 5.2.17　大武漁港夏、冬季侵淤結果



漂砂傳輸流況　　漂砂活動方向示意圖

圖 5.2.18　大武漁港漂砂概況

由上述大武漁港漂砂運動分析結果可知，漁港淤積現況概為常見之現象，且目前漁港南側養灘區域於中長期變化下仍有侵蝕趨勢發生。因此，本計畫透過「迂迴供砂」方式，評估將漁港內淤砂挖掘至適合放置點進行養灘，其目的除期望能夠減緩南側海岸侵蝕，降低衝擊台 9 線公路之可能性外，亦藉由養灘工法實施，提升目前防制公路浪襲工法之成效。最後，則再針對清淤養灘後之土方，評估回流港內之可能性。

依臺東縣政府 1999 年委託台灣漁業技術顧問社辦理之「大武漁港海岸地形監測及漂砂水工模型試驗」計畫，由水工模型試驗結果，建議淤積於北攔砂堤之砂石，每年開挖約 5 ~ 6 萬立方公尺土方，供作土砂側渡補給於漁港南岸砂灘。其建議之開挖量與上述評估可能南漂移至大武漁港與其南側海域之土方量(5.6 萬立方公尺)相仿。(臺東海岸(尚武段)監測調查計畫，民國 99 年)。因此，本計畫迂迴供砂將以每年 5.6 萬立方公尺做為挖掘之砂量，並依此量體進行拋砂養灘模擬評估，情境條件則分別採用夏季代表波浪條件、冬季代表波浪條件及颱風事件，其中颱風事件則選擇近年來對東部海岸影響較顯著的「2016 莫蘭蒂颱風」事件(參見附錄三)。

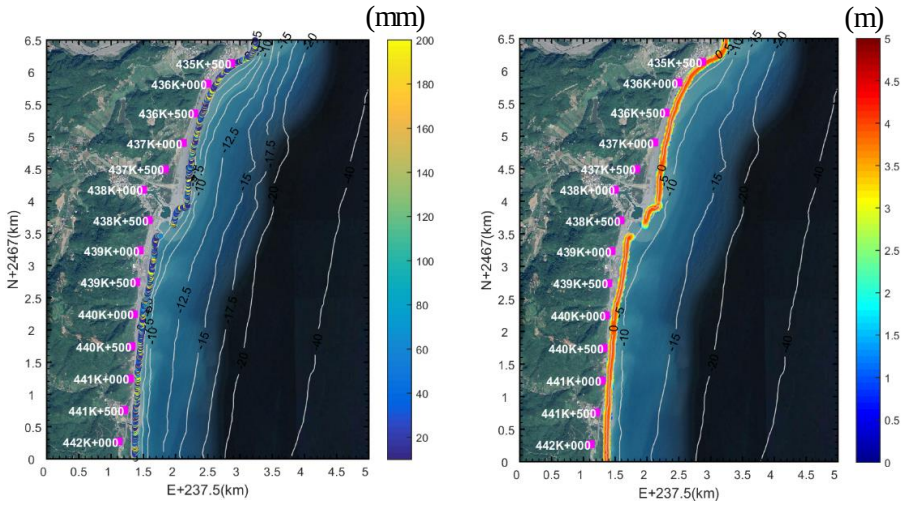
為評估迂迴供砂適合拋砂之點位，得先進行拋砂模擬測試，以瞭解大武漁港周圍各處拋砂傳輸行為。圖 5.2.19 為拋砂模擬測試配置情況，先沿水深 0 米線放置拋石，且每個粒子都設定本計畫採樣所得之粒徑曲線分布，再透過各粒子體積與網格面積則可換算土方量分布。圖 5.2.20 為各波浪條件下，大武漁港周圍拋石傳輸情況，其顯示，於夏季波浪條件時，波向幾乎正向入射海岸，擾動粒徑較大之拋石，使其沿底床斜坡往海側位移，粒徑較小之拋石則往灘岸移動，而大武漁港附近的拋石，則被帶入港內亦造成淤積；於冬季波浪條件時，粒徑較大之拋石移動情況不顯著，粒徑較小之拋石則於沿岸傳輸，漁港附近拋石亦會被帶入港內；於颱風波浪條件下，粒徑較大之拋石亦有往海側移動現象發生，漁港附近拋石亦會帶入港內造成淤積。

進一步分析各波浪條件拋砂土方高度分布(參見圖 5.2.21)，其結果顯示夏季與冬季雖傳輸拋石粒徑有所差異，但整體土方差異並

不顯著，而在颱風波浪條件作用下，於漁港南側會出現土方缺口，此為拋石放置此處仍會受水動力影響導致侵蝕。因此，本計畫建議可將清淤土方放置該土方缺口南側(亦為防制浪襲工程前方，約為440K+500 路段)，除可強化公路浪襲防制效果外，亦減緩拋石回流至港內之量體，且可補注侵蝕區域，減緩侵蝕災害影響台 9 線之可能性。由上述分析，除可擬訂清淤土方適合拋放位置外，亦可瞭解若將土方放置漁港附近時，在受水動力影響下，仍會造成漁港淤積。

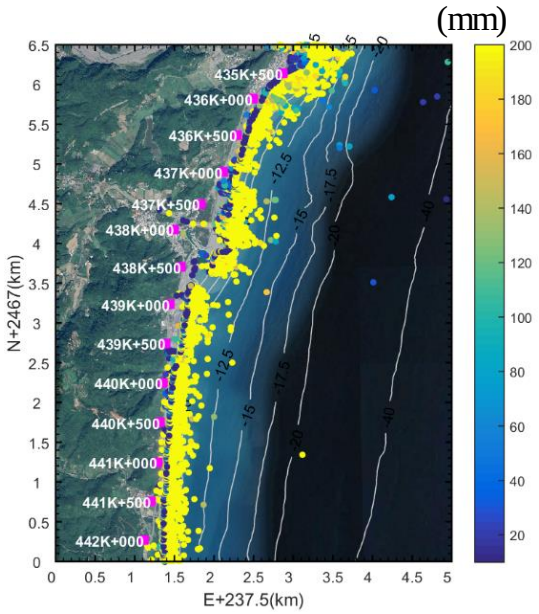
圖 5.2.22 為拋石養灘於各波浪條件下之影響，粒徑較大之拋石，於夏季波浪與颱風波浪條件下，會由外海帶動之現象發生，較小粒徑仍有機會帶至港內，颱風波浪條件又較夏季波浪條件明顯，惟其量體不多，仍應有減緩漁港嚴重淤積之成效。

為量化迂迴供砂法抑制回淤漁港之成效，則以回淤比例做為成效依據，將拋石量體與回淤至港內量體之比例做為量化數據。圖 5.2.23 則為各情境模擬與回淤比例之比較圖，其中迂迴供砂法於冬季情境下，並無回淤港內現象因而不再評估其會淤比例。此外，為在強化迂迴供砂減緩回淤港內之效果，另於 439K+ 750 路段加設長度約 200 公尺之突堤，以加強阻隔養灘砂石回流之現象，此方案亦做為迂迴供砂對策成效比較之情境。由圖 5.2.23 成果可知，迂迴供砂法之回淤比例顯著較現況清淤方式低，若再加以突堤補強，則可使回淤比例降至更小，可將清淤土方更穩固置留於養灘區域。

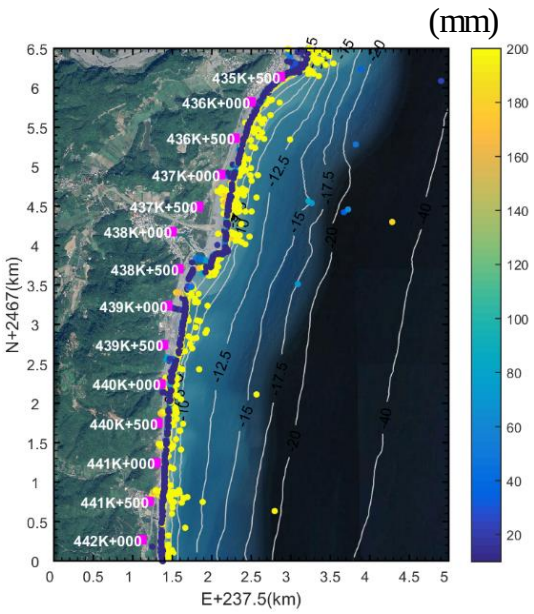


粒子分布情況　　土方高度分布

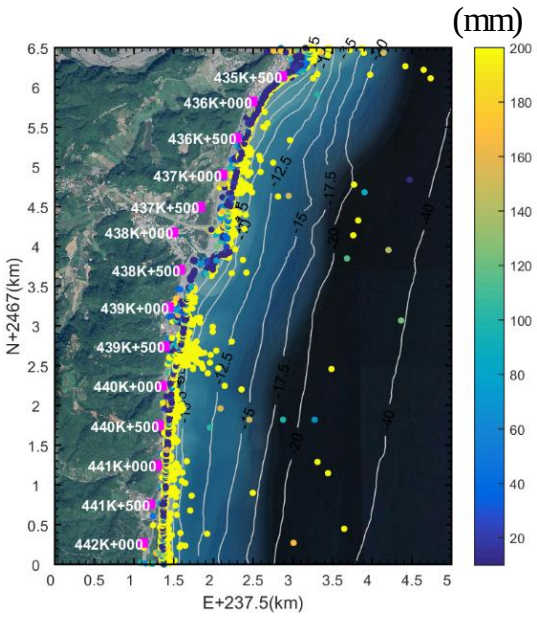
圖 5.2.19　拋砂模擬測試配置圖



夏季波浪條件

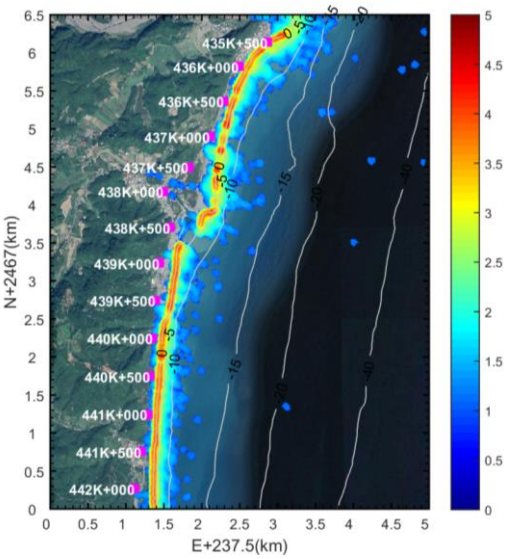


冬季波浪條件

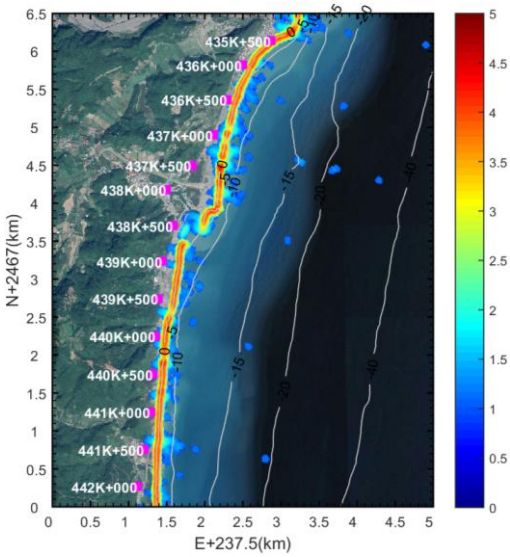


颱風波浪條件

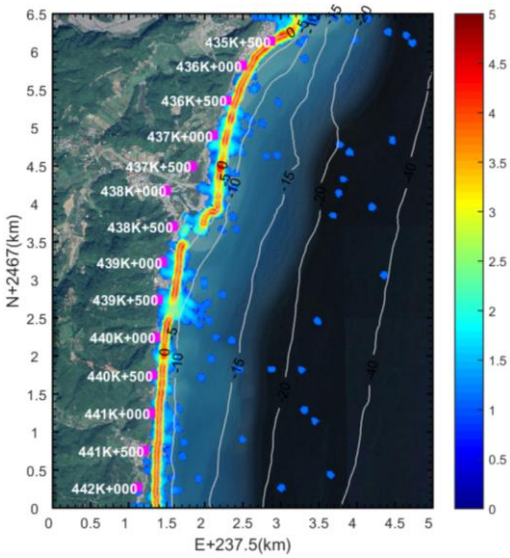
圖 5.2.20　各波浪條件拋砂測試圖



夏季波浪條件

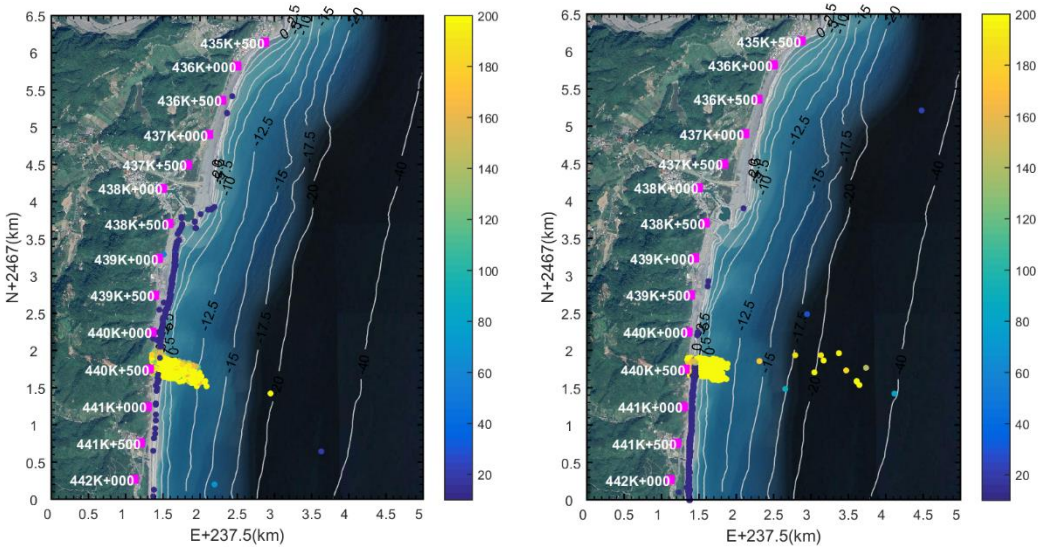


冬季波浪條件

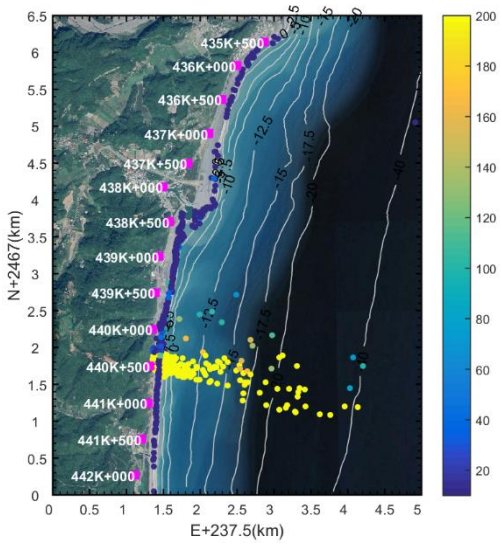


颱風波浪條件

圖 5.2.21　各波浪條件拋砂測試土方高度分布圖



夏季波浪條件　　冬季波浪條件



颱風波浪條件

圖 5.2.22　各波浪條件拋砂養灘分布情況

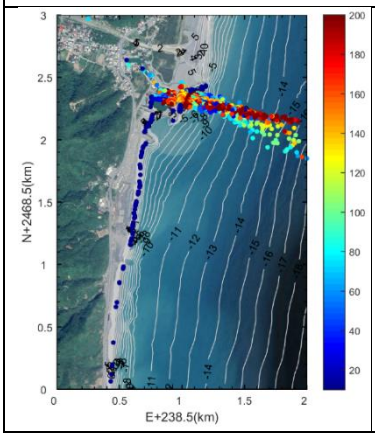
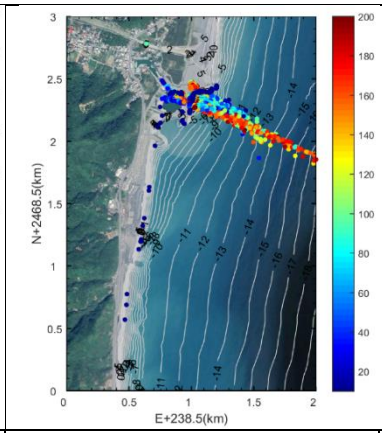
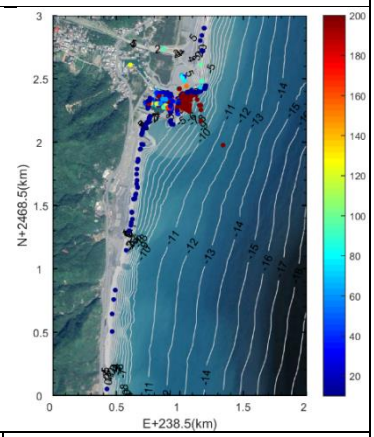
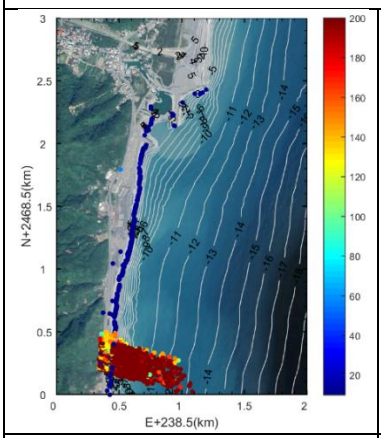
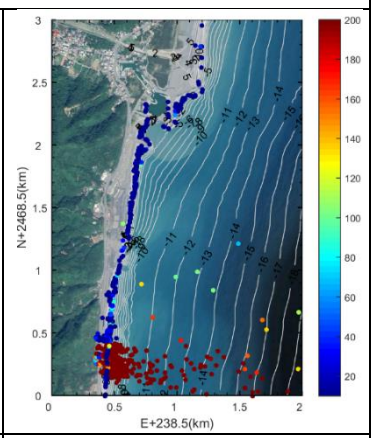
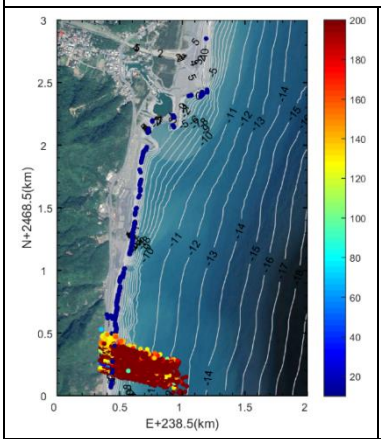
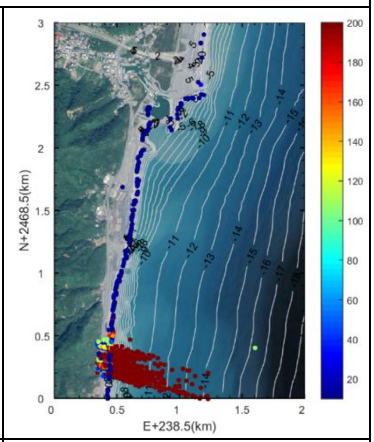
<table>
<tr><td colspan="3">大武漁港北側突堤養灘(現況)</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>冬季波浪條件
(回淤比例：1.04%)</td><td>夏季波浪條件
(回淤比例：0.74%)</td><td>颱風波浪條件
(回淤比例：1.10%)</td></tr>
<tr><td rowspan="6"></td><td colspan="2">迂迴供砂工法</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>夏季波浪條件
(回淤比例：0.46%)</td><td>颱風波浪條件
(回淤比例：0.17%)</td></tr>
<tr><td colspan="2">迂迴供砂工法配合突堤工法</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>夏季波浪條件
(回淤比例：0.02%)</td><td>颱風波浪條件
(回淤比例：0.04%)</td></tr>
</table>

圖 5.2.23　迂迴供砂成效比較

5.2.4　南興路段浪襲改善對策評估

本節針對南興路段易浪襲路段進行對策評估，目前該路段已有改善工法實施(世曦工程)，因此本計畫將研討工法對浪襲改善之效益。圖 5.2.24 為施工前後地形比較，水平軸座標之起始點表示台 9 線道路面海側邊緣。由地形比較圖可見，此工法將岸線及沖刷帶往海側延伸約 70 公尺，有效地隔離太平洋及台 9 線臨海道路。雖工法所延伸之海岸緩衝帶以消波塊組成為主，然本節之分析先一致性地以不透水結構物處理工法改善前後之地形，用以瞭解相同波浪條件作用下對海岸公路所造成之影響。

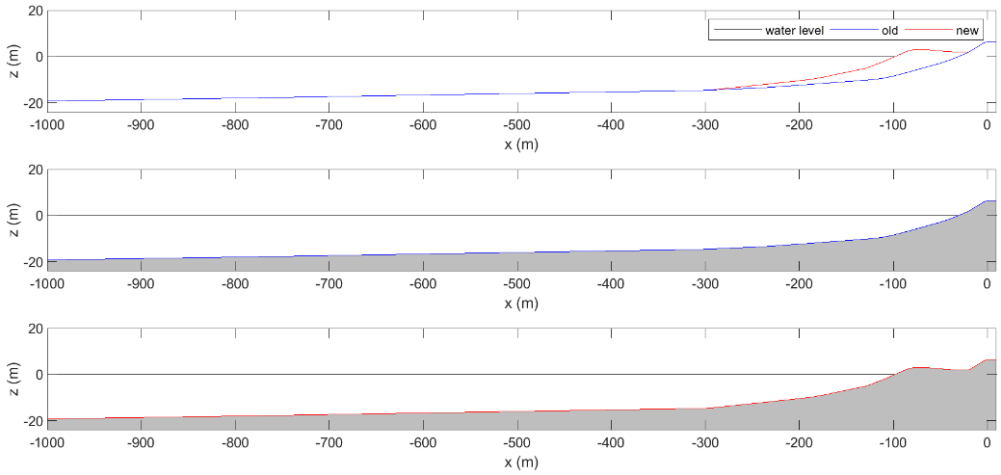


圖 5.2.24　世曦工法施工前後比較

為評估極端海象條件對此路段之影響，本節以莫蘭蒂颱風造成的波浪條件分析之。透過二維海洋模式計算颱風波浪與暴潮變化後，萃取近岸水動力計算結果，以做為二維斷面模式之邊界條件，其中最大波高約為 15.8 公尺、週期 12.5 秒、潮位 0.58 公尺。另莫蘭蒂颱風影響台灣期間為大潮，此亦納入模擬分析。數值水槽之左側為造波邊界產生規則波，另一側則是海岸公路。圖 5.2.25 ~ 圖 5.2.28 為不同時刻之上述條件的規則波作用於浪襲工法施工前(old)、後地形(new)之水面變化特性，其中 t = 0 s 為波浪開始入射之時刻。更具體的說明，圖 5.2.25 顯示波浪碎波，並沿地形爬升，而新工法使得波浪更早碎波、衰減入射波能，然舊地形在相同時刻下尚未有明顯破碎，此證實了新地形削減了較多的入射波能。圖 5.2.26 顯示在施工前地形下，波浪碎波後之湧浪已相當接近公路，圖 5.2.27 顯現波浪已越過堤防，躍上海岸公路。反之，施工後所延長之緩衝帶有效

地消波，波浪無法越堤，如圖 5.2.28。由於施工後，約於 x = -90 ~ -20 m 的區域呈一凹型，部分水體殘留於此為目前考慮不透水結構物之限制，實際以消波塊排列而成之工法對水體殘留之現象或許有異。圖 5.2.29 則是選取數個位置點以時序列的方式展現不同地形所造成之波高差異，其中 x = 0.0 m 為位於道路向海側之邊界，水位為零代表無越波發生，結果顯示施工後地形波浪無法越堤，而施工前地形波浪之越堤最大約 0.60m、平均約 0.25m。於 x = -25.0 m 為施工後最凹處，積水平均約 1.0m。此外，x = -50.0 m 及 x = -70.0 m 在施工前與後地形分別是碎波帶與沖刷帶，波高時序列差異極大，如以第一個波而言，舊地形約有 5m 波高越過、新地形則僅約有 2m 浪高，顯示施工後地形的消能效果良好，可有效地減少波浪躍上台 9 線海岸公路之機率。

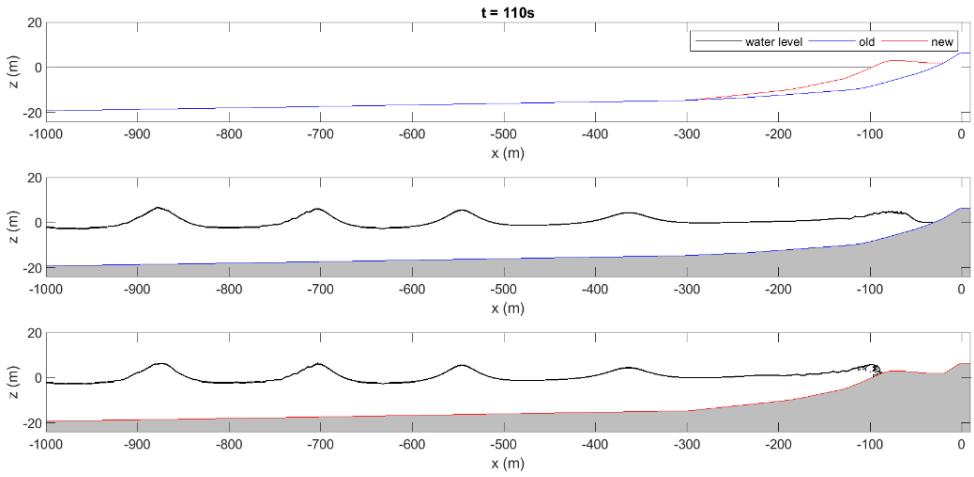


圖 5.2.25　波浪於施工前後地形之傳動 (t = 110 s)

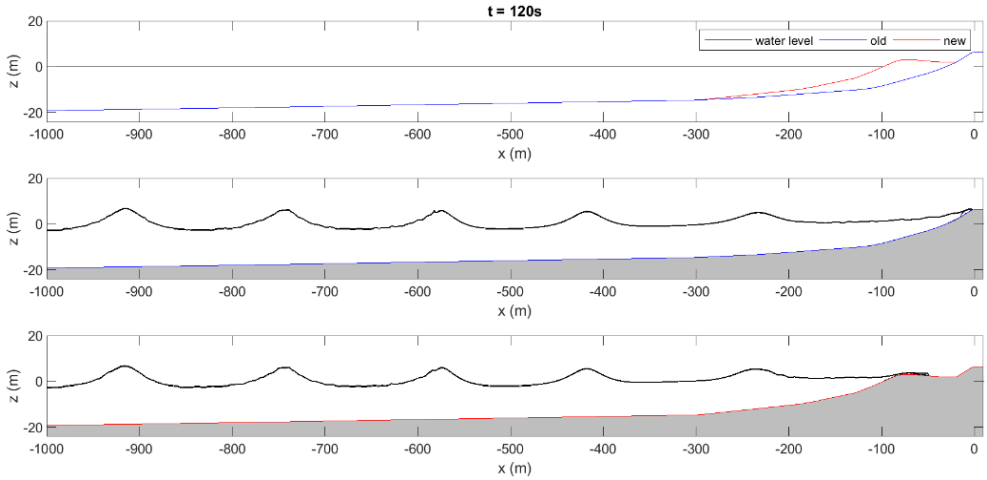


圖 5.2.26　波浪於施工前後地形之傳動 (t = 120 s)

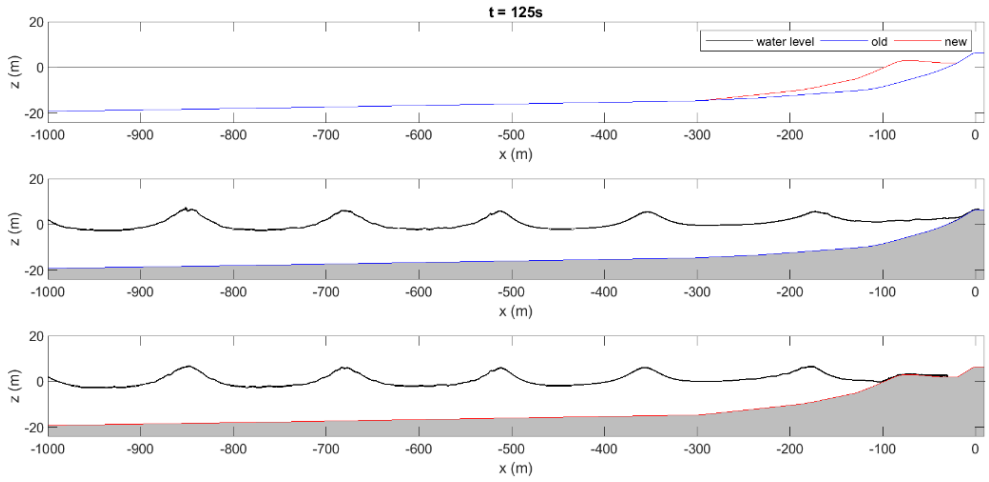


圖 5.2.27　波浪於施工前後地形之傳動 (t = 125 s)

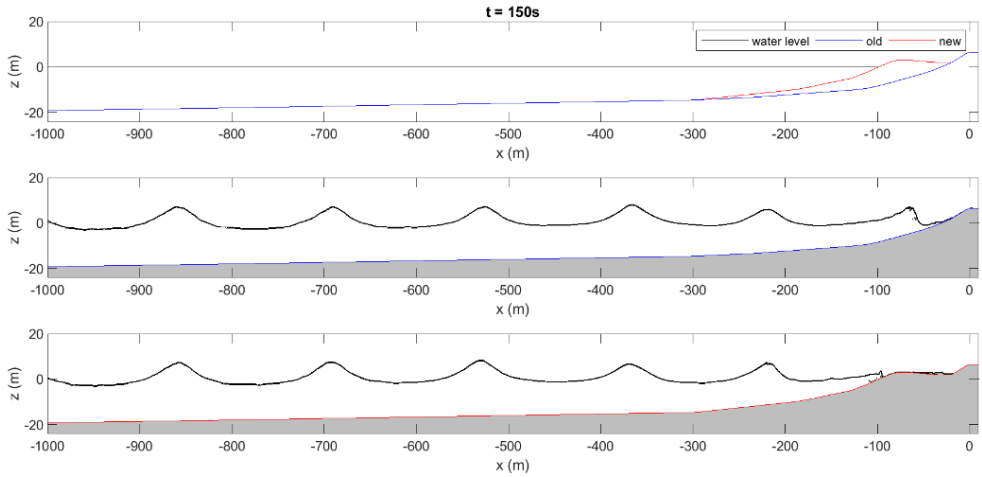


圖 5.2.28　波浪於施工前後地形之傳動 (t = 150 s)

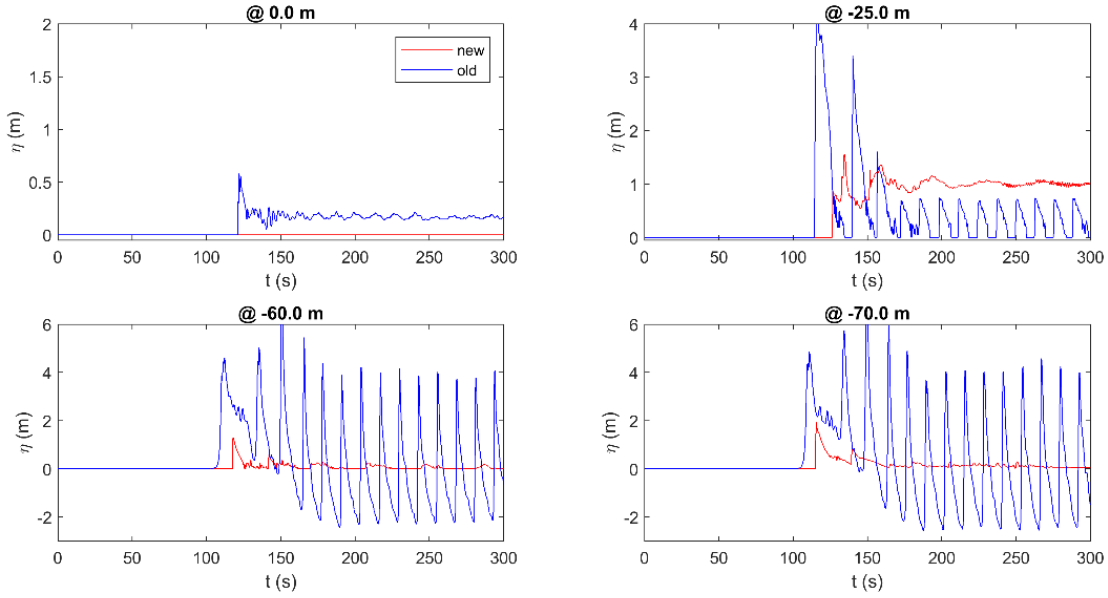


圖 5.2.29　波浪於施工前後地形傳動之波高時序列

由於大武漁港長期嚴重淤砂，長年疏濬航道為不可避免之勢。然淤塞於港內之砂石大多來自上游，供需失衡，使得下游產生嚴重海岸侵蝕。本節擬利用挖取之砂石做為人工養灘之砂源，並評估於此路段養灘是否能更進一步地減少浪襲公路之機率。於此，將考慮三種情況，即養灘前(即為浪襲工程施工後地形)、養灘後之初始地形斷面及養灘後受波流潮作用後之地形剖面(1 年作用時間)，其中三種地形比較如圖 5.2.30。而海象條件將與上述莫蘭蒂颱風所造成之波浪條件一致。

圖 5.2.31 顯示波浪溯上、沖刷之過程，在此時刻三種地形所造成的波浪破碎大致上相近，然，尤以養灘後初始地形消減之入射波能較多。圖 5.2.32～ 圖 5.2.33 則是沖刷帶之過程。若以追蹤波浪前緣來看，同時刻下波前進距離與波能之消減呈負相關，換言之，波能削減越多其於岸上前進距離越短，波能消減低至高依序為養灘前、養灘後受波流潮作用後及養灘後之初始地形。圖 5.2.34 則是波浪流過養灘前地形凹處之水體殘留。圖 5.2.35 則是三種地形於不同位置之波高差異時序列，此更加明顯地顯示波浪無法越過公路，而造成波高衰減的地形，由多到少分別是養灘後之初始地形斷面、養灘後受波流潮作用後之地形剖面，最後是養灘前之地形。

大致而言，三個情況都不會造成公路浪襲的危害，剛養灘後越波的量會較原本(養灘前之地形)來的小，經波潮流作用後養灘坡度雖有變化，但原則上還是有減緩越波量，且因養灘關係使灘岸加長，會更避免公路受到波浪侵襲，整體分析養灘有其功效存在。

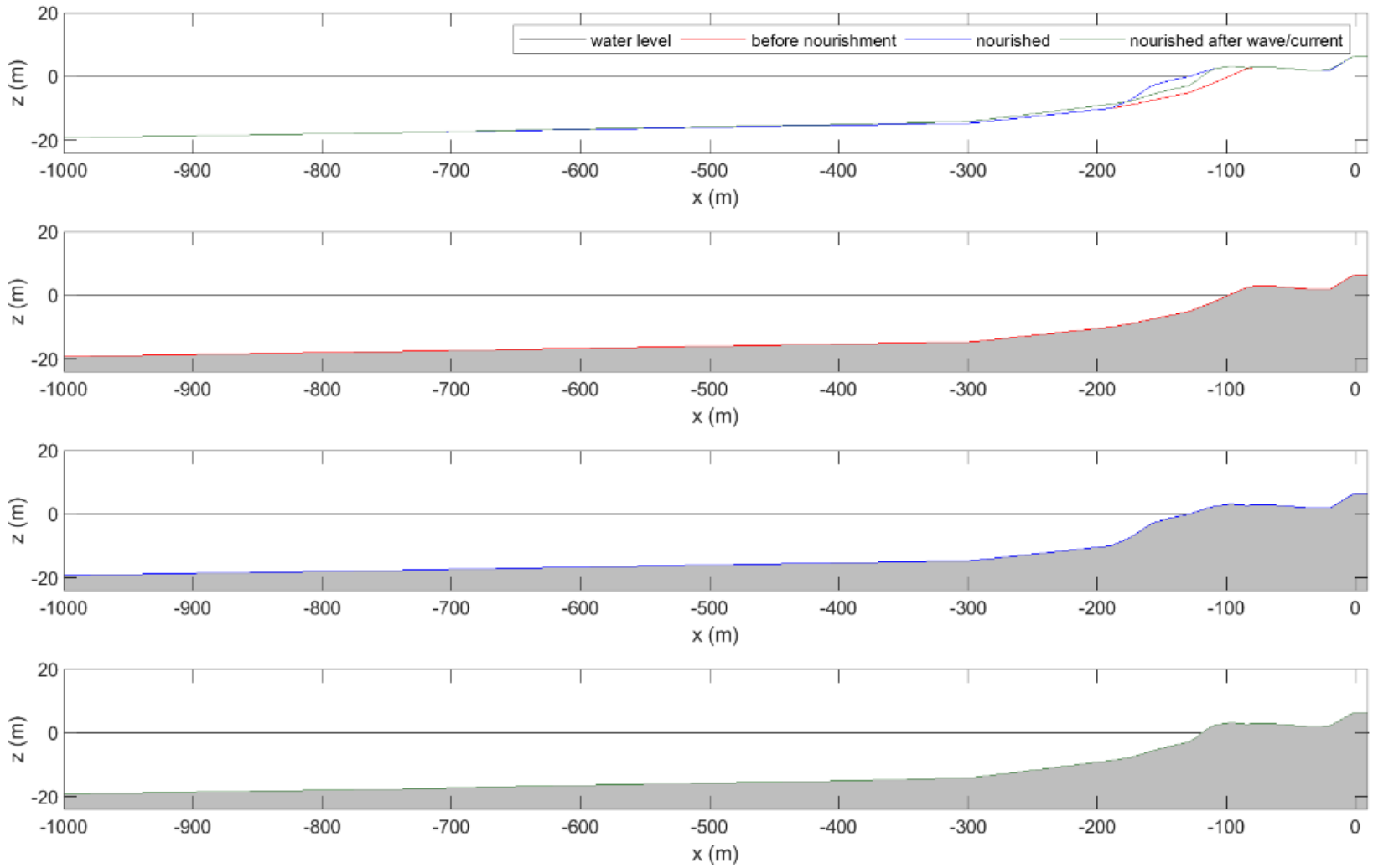


圖 5.2.30　養灘前地形、養灘後初始地形及養灘後受波流潮作用後地形之比較

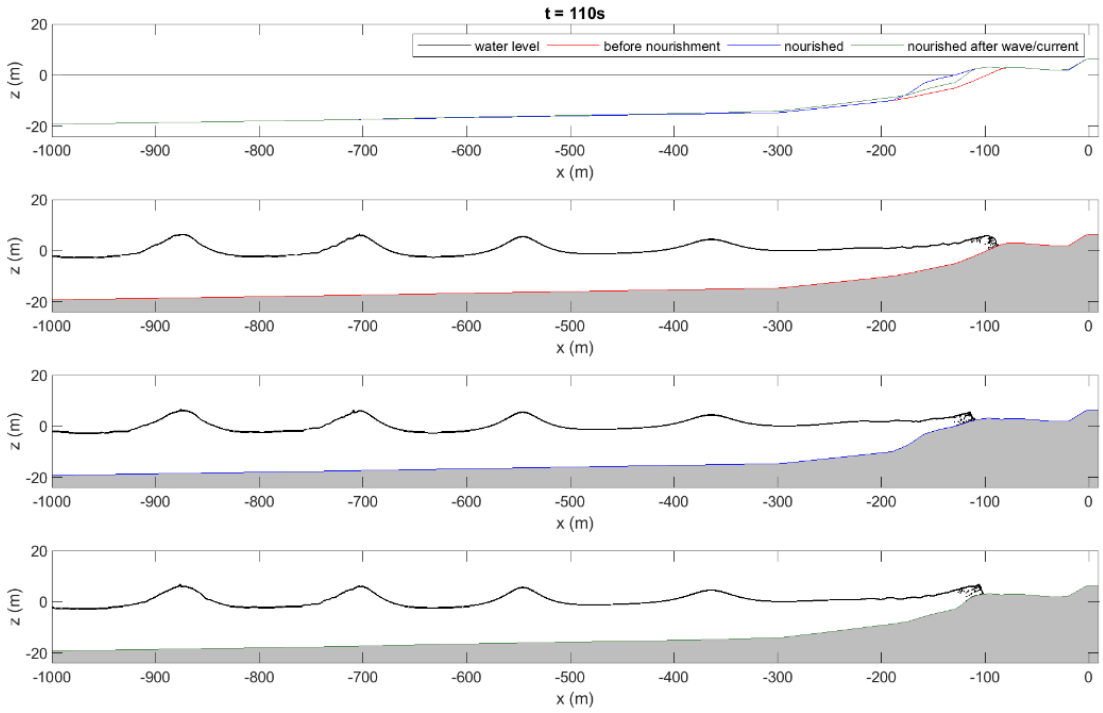


圖 5.2.31　波浪於養灘前後地形之傳動 (t = 110 s)

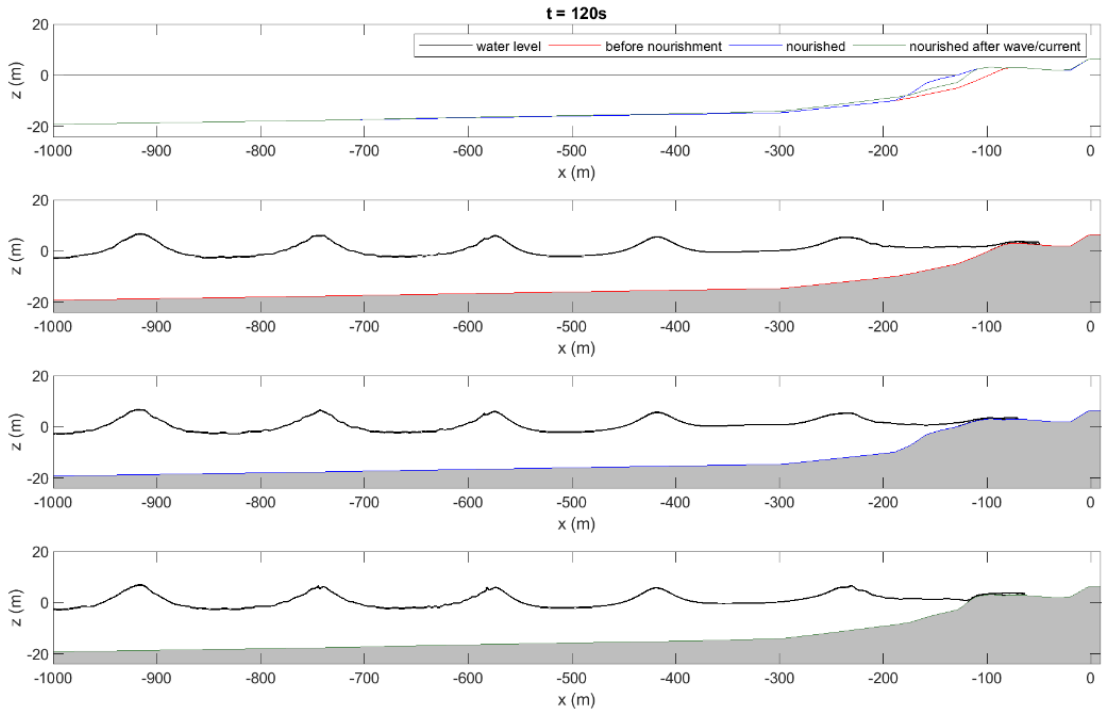


圖 5.2.32　波浪於養灘前後地形之傳動 (t = 120 s)

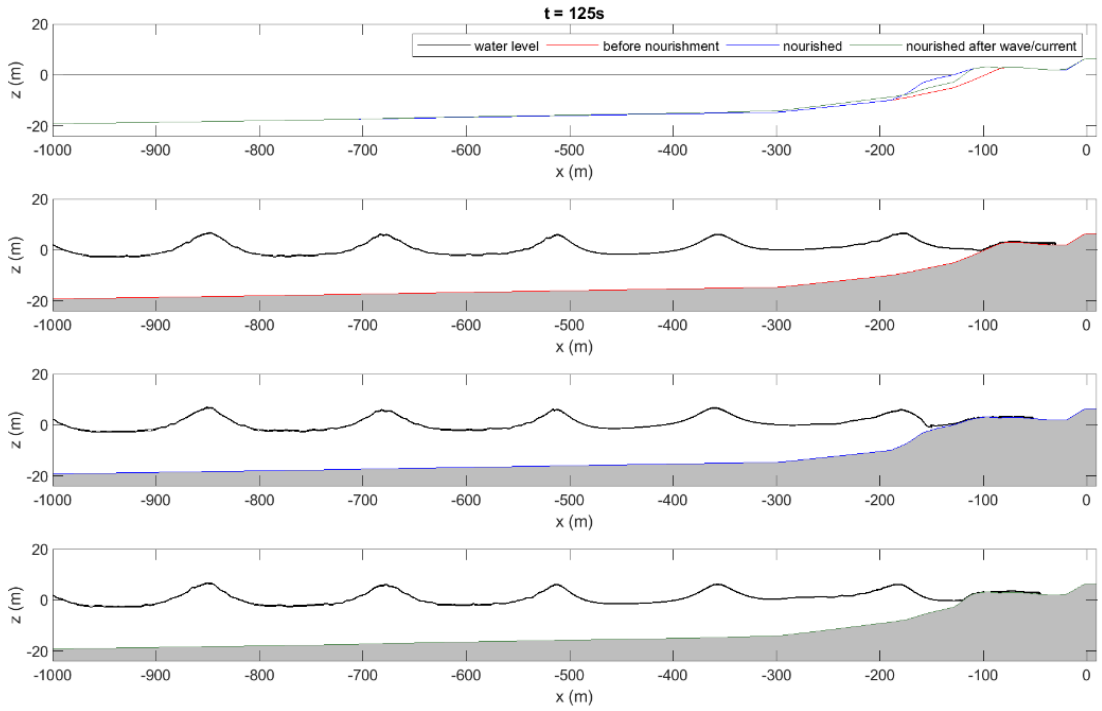


圖 5.2.33　波浪於養灘後地形之傳動 (t = 125 s)

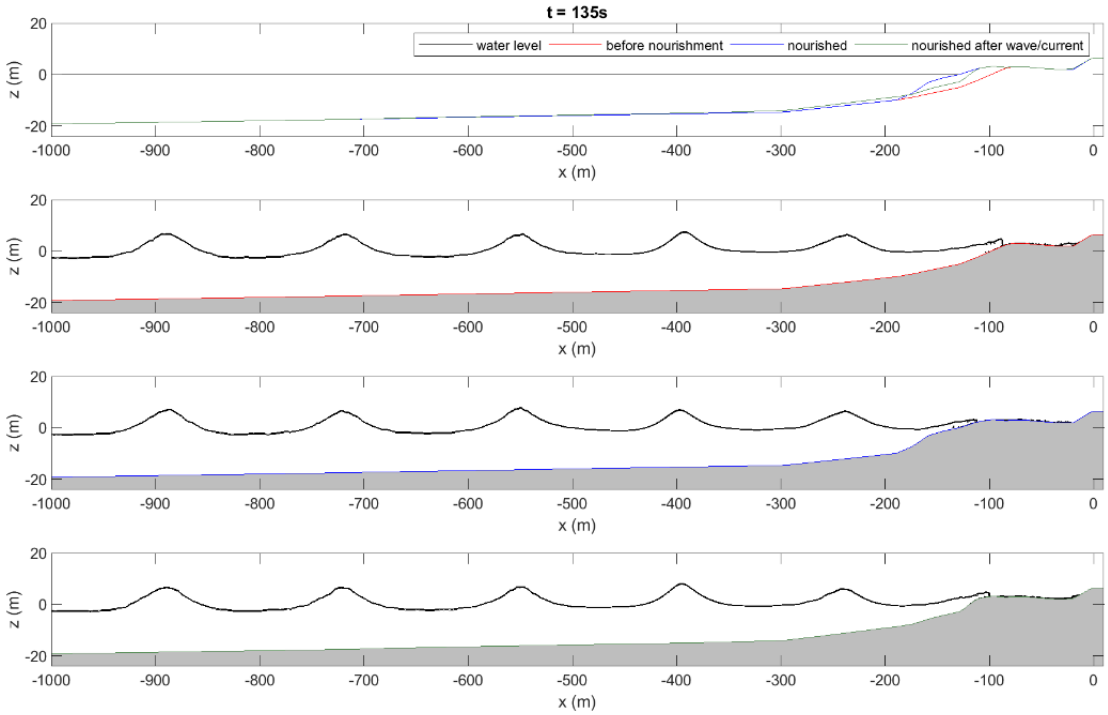


圖 5.2.34　波浪於養灘後地形之傳動 (t = 135 s)

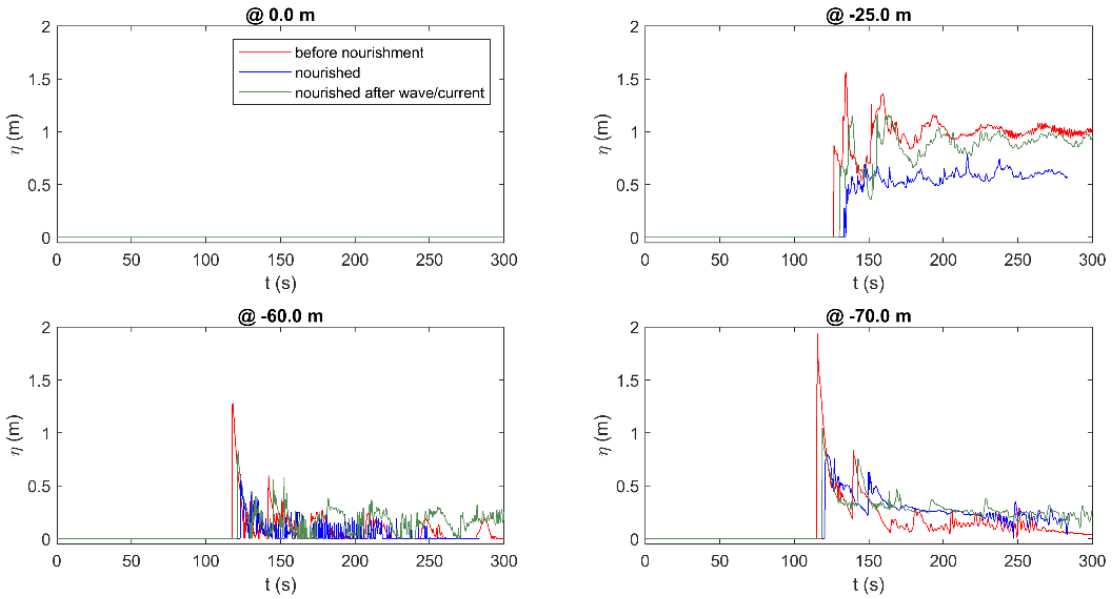


圖 5.2.35　波浪於養灘前後地形傳動之波高時序列

5.3　多良路段區域

依據前述改善對策研擬(參閱 4.2 節)可知，該路段所遭遇災害為「公路浪襲」與「侵蝕災害」兩種，而針對公路浪襲部分，依三工處所述，已於今年(民國 108 年)7 月已發包防護工程設計規劃，其防護工法會參酌南興路段防護工程進行辦理，以往昔經驗該防護工程實施後應可有效降低公路浪襲之危害。然因公路浪襲防護計畫仍在執行階段，本計畫並無法取得改善後之工法配置，因此於此路段短期改善對策上，先僅就目前地形現況進行公路浪襲現況之探討，並提供相關資訊參酌；侵蝕災害方面，目前計畫區域海岸侵蝕趨勢較不顯著，主要於 420K+000 與 418K+000 有中潛勢侵蝕現象，考量中長期地形變遷情境，仍有海岸侵蝕之可能性，因此可透過海岸侵蝕改善工法做為長期改善對策。

5.3.1　海岸侵蝕改善工法擇選

配合多良路段環境背景，擇選適合改善對策。表 5.3.1 為各海岸保護對策工法之比較，考量海岸景觀特性，應可採用「人工岬灣」或「離岸潛堤(礁)」做為較適合之改善對策。其中，人工岬灣需配合人工養灘才能有較佳之成效，而多良路段相較於南興路段，缺乏天然淤砂之點位(例如：大武漁港淤積)，因此在此路段進行養灘工程，較無前述南興路段改善對策能夠達到複合之效益(提升防制公

路浪襲工程之成效，並減緩漁港淤積之效果)。因此，本計畫於該路段海岸侵蝕改善工法上擇選「離岸潛堤」來做為該區域長期改善對策之工程手段，相關潛堤種類，以及對海岸防護概況說明如下。

表 5.3.1　海岸保護對策工法之比較

項目	離岸堤(群)	突堤(群)	人工岬灣	潛堤(礁)
向離岸型漂沙淤沙效果	尚可	尚可	佳(配合人工養灘效果更佳)	尚可
降低波高功能	佳	無	對固定波向較有效	佳(較大波高時需採加寬堤寬或數列潛堤)
對景觀衝擊程度	大	大	小	
堤後設施利用改變程度	有影響	有影響	可能有影響	
經費	高	普通	高	普通
施工性	海上	普通	高	海上
配合措施	人工養灘(用於沙源不足時)		人工養灘	人工養灘(用於沙源不足時)
漁民安全	夜間配警示標幟	影響低	夜間配警示標幟	有影響

來源：中華顧問公司，2000

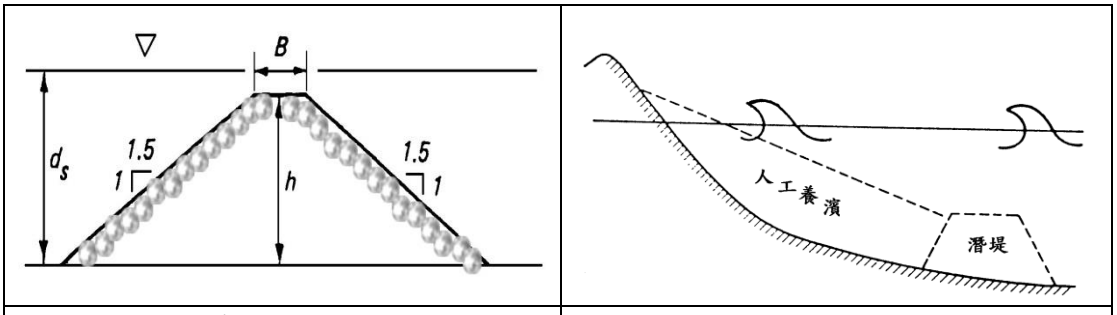
潛堤如從其外型分類大致可分為下列數種：

1. 線形潛堤：一座堤整體堤寬相同成直線平行或大約平行海岸佈置。

依其堤高可分為：

(1) 高潛堤：堤頂高等於或大約等於堤趾水深，堤頂水深甚小用於消能者如圖 5.3.1(左)所示。

(2) 低潛堤：堤高低、堤頂高出底床有限而堤頂水深大於堤高者如圖 5.3.1(右)又稱為低檻堤(Perched breakwater)，多設置於水深處，用於阻止養灘砂流向深海損失。



高頂潛堤	低頂潛堤

資料來源：海岸防護及環境復育規劃參考手冊(2010)

圖 5.3.1　線形潛堤

依其堤寬分又可分為：

(1) 一般潛堤：如一般傳統式之離岸堤斷面大約堤頂寬只有 3~5 個消波塊，約數公尺寬與波長比甚小者，主要目的在藉堤體產生碎波及波浪分裂減衰波能。

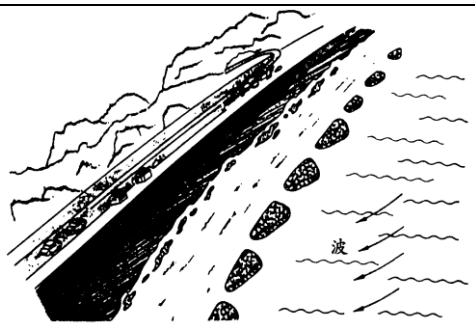
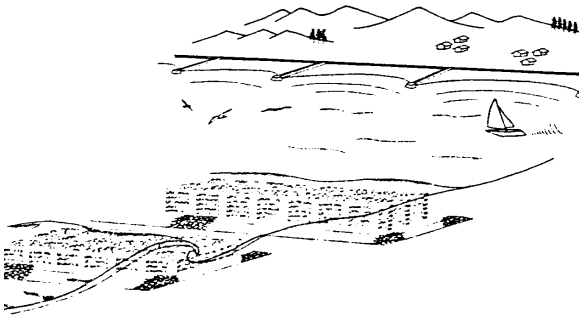
(2) 寬頂潛堤：堤頂寬達數十公尺約為數倍於波高之堤寬，或約與波長同位階有如珊瑚礁岩，故又稱人工潛礁(Artificial reef)。乃藉寬大之淺水區使波浪碎波，並使碎波有充分之距離可衰減。

2. 非直線形潛堤：一座堤堤頂兩端寬度不同，其平面形狀為三角形、盾形或梯形如圖 5.3.2(左)大約平行海岸佈置，主要目的在使波浪發生折繞射改變波浪進行方向，使波向線交叉發生碎波並改變沿岸流流向與分佈。

3. 依堤列數分

(1) 單列式潛堤：僅有一道潛堤。

(2) 多列式潛堤：二道或二道以上潛堤並列，借其堤間波浪共鳴及碎波減衰波浪如圖 5.3.2 所示。

	
梯形潛堤	多列潛堤

資料來源：海岸防護及環境復育規劃參考手冊(2010)

圖 5.3.2　非直線形潛堤

潛堤之功能，使入射波產生碎波、分裂、滲透、反射或折射等，減衰入射波能量或改變其進行方向，抑制堤背後波浪能量，減少海岸災害或控制海灘之結構物。其功能為：

1. 強制波浪提早碎波：藉堤頂水深小於底床並小於入射波之碎波界限，強迫大於堤頂之入射波發生碎波使波能減衰。
2. 促進波浪分裂：經由寬潛堤堤頂促使入射波分裂產生高頻成份波轉移主成份波能量。
3. 藉潛堤透水性使波動產生之滲透水流因摩擦、攪亂而損失波能。
4. 藉潛堤形狀及其平面佈置，使波浪發生折繞射改變波浪進行方向，並使之碎波減衰波能，同時改變沿岸流流向控制漂砂分佈。
5. 促使波高減衰使海堤溯升及溢流降低，減少災害並安定海灘。
6. 抑制水流及波高，以利水中及底棲生物棲息。

透過離岸潛堤設置期可降低該路段侵蝕災害之現象，配合該路段未來實施之防制公路浪襲工法，亦可使波浪提前消能，由圖 5.3.3 顯示於設置離岸潛堤的區域，能有效的減少離岸潛堤靠陸側波高(相關配置參見 5.3.3 小節)，達到強化公路減災之效果。

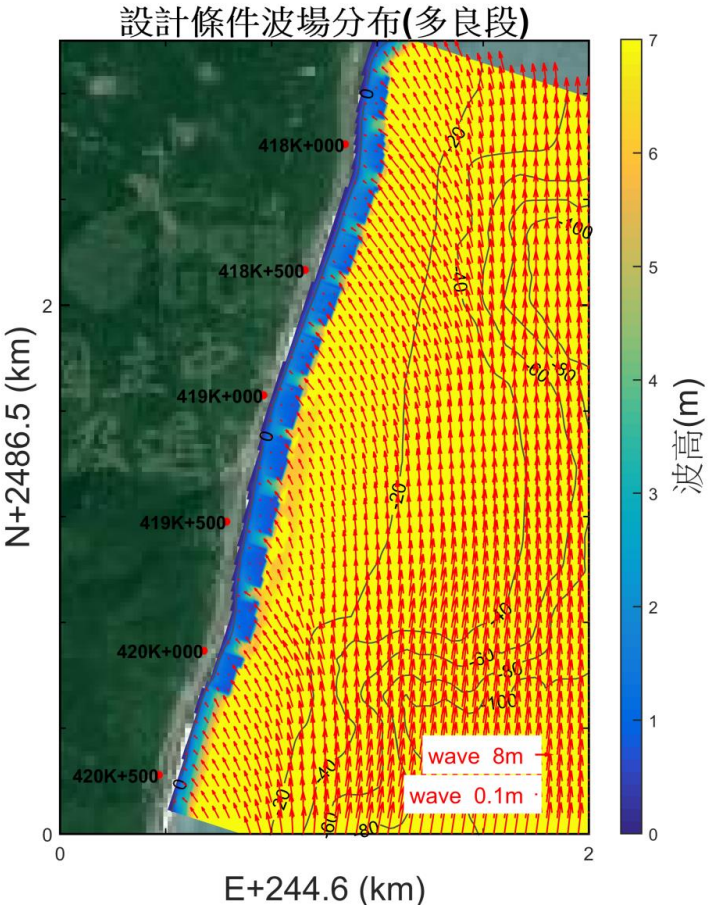
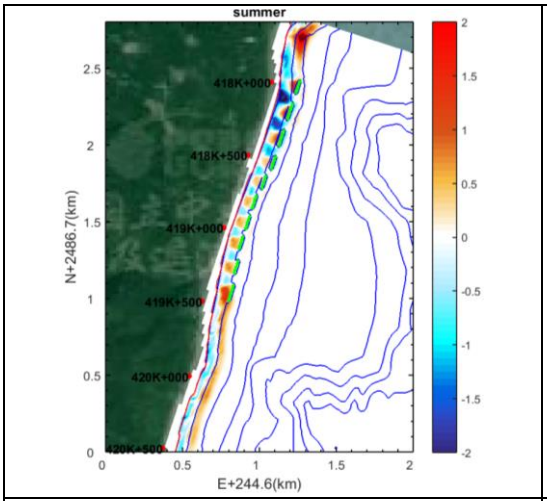


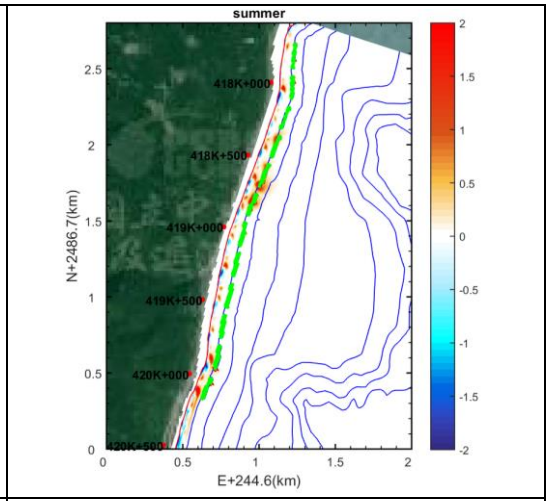
圖 5.3.3　颱風波高經離岸潛堤作用下波浪衰減之情況

此外，花蓮南、北濱與化仁海岸已有離岸潛堤成功之案例，目前該路段水深坡度(1/13 ~ 1/16)條件相較於南、北濱水深坡度(約1/10)更緩，其工程建置應具可行性，參考花蓮海岸成功之案例，本計畫認為較可行的方式為線形潛堤中的高頂潛堤。

5.3.2　海岸侵蝕災害改善對策評估

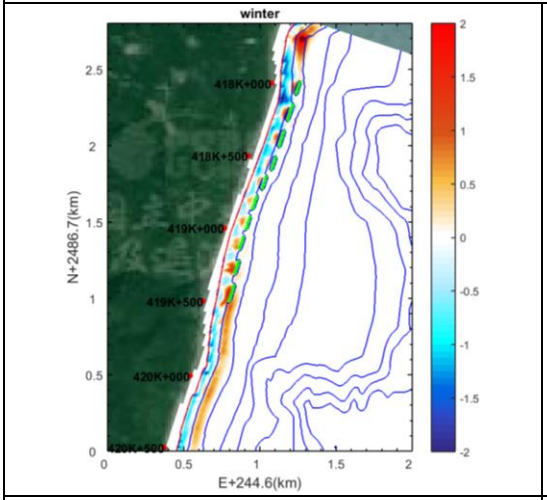
圖 5.3.4 為多良路段(417K+500 ~ 420K+000)改善對策評估成果，透過「離岸潛堤」工法進行海岸侵蝕區域的改善。其中，潛堤的配置位置與海岸地形平衡有相當大之關係，高頂潛堤實際消波高能應類似於透水離岸堤。本計畫初步設置潛堤採用類似離岸堤方式配置，根據 Saiji 等人(1987)調查日本現場資料之統計，大約於潛堤長度與潛堤離岸距離比值約為 1.6 時繫岸沙洲可達最大。由此可知，如欲使繫陸洲相對面積最大，則堤長與離岸距離應保持 1.6 倍最佳；而開口寬度與離岸堤長比值約為 0.3，則較會產生繫岸沙洲，本計畫離岸潛堤配置則採用兩個方案模擬比較。

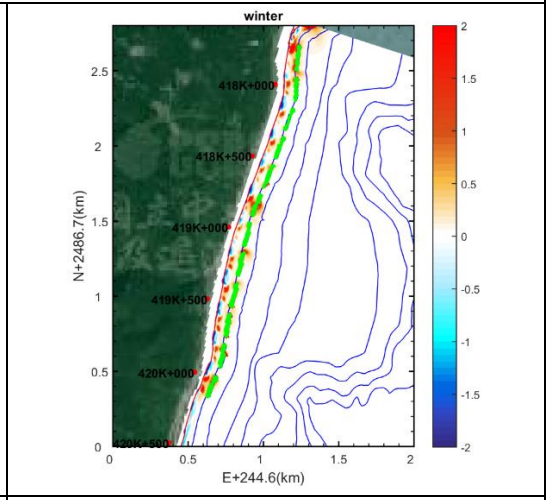




方案 1	方案 2

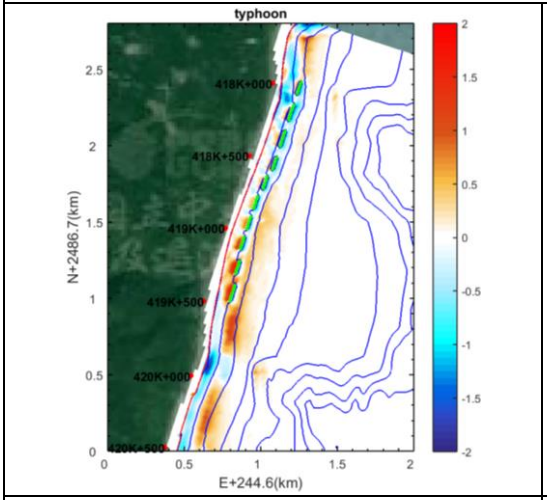
夏季波浪條件

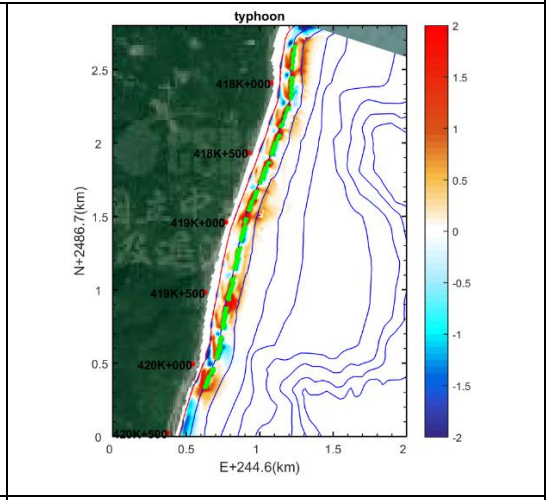




方案 1	方案 2

冬季波浪條件





方案 1	方案 2

颱風波浪條件

圖 5.3.4　多良路段離岸潛堤改善對策成果

方案 1 模擬結果如 4 所示，針對侵蝕潛勢較嚴重之區域(418 K+000～419K+500)設置 10 座潛堤，潛堤配置為堤長 120 公尺、距離陸地約 90 公尺，潛堤靠岸處大致沿 8 公尺水深設置、堤間距 50 公尺及堤寬 15 公尺，其中潛堤堤頂水深為 0.5 公尺。由結果顯示，於冬季、夏季及颱風波浪作用下，於設置離岸堤海岸產生較明顯的侵淤互現之變化，於潛堤後側呈現淤積狀態，但是於潛堤間隙之區域卻呈現侵蝕現象。由於漂砂由北往南移動，加上過多的沙源集中於離岸潛堤與陸地間或是南側 419K+500 位置之 5 公尺水深處，導致潛堤北側 418K+000 呈現較嚴重侵蝕趨勢，於颱風條件下，於 420K+000 與 418K+000 位置均呈現侵蝕趨勢，此造成雖減緩部分路段海岸侵蝕現象，但亦使部分路段可能發生海岸侵蝕影響公路邊坡穩定之潛勢危機。由以上結果可知，該方案侵蝕位置皆位於地形轉折處，且都發生於離岸潛堤保護之後側，故針對此特性另設置改善方案 2。

方案 2 如 4 所示，目前潛堤配置分別為堤長 150 公尺、距離陸地約 50 公尺 ～70 公尺，潛堤靠岸處大致沿 5 公尺水深設置、堤間距 50 公尺及堤寬 15 公尺，方案 2 除增加潛堤的長度，減少離陸地之距離之外，亦增加潛堤至 12 座，將保護範圍延伸至地形轉折點(418K+000 北側 ～420K+000 南側)。其結果顯示，於夏季與颱風條件波浪作用下，潛堤後側仍可淤積漂砂形成灘岸；於冬季季風條件下，雖沿岸部分區域有侵蝕現象發生，惟潛堤部分區域仍呈現穩定的地形變遷變化趨勢，應可有效降低海岸侵蝕對台 9 線公路之影響。

整體評估結果顯示，如果採用最佳離岸堤設置方案 1，在海岸達到新平衡狀態時，雖然有達到局部繫陸洲之生成情況，但卻有對南北兩側海岸造成侵蝕之危機；方案 2 是針對方案 1 模擬結果所產生之缺點進一步改善配置之成果，由其成果可見，計畫區域海岸大範圍侵蝕狀況可獲得改善，整體海岸侵淤達到平衡，且淤積趨勢顯著，如再配合部分養灘可提升抑制海岸侵蝕，減緩公路邊坡穩定危害之效果，此設置可做為未來該路段改善計畫之參考，惟如要具體實施建議再做細部配置模擬評估。

由上述評估可知，潛堤工法確可改善多良路段海岸侵蝕之現象，

並可進一步減緩海浪對公路邊坡穩定之影響。藉由潛堤工法建置固然能夠避面景觀遮蔽問題，然若要進一步降低工法對生態環境之衝擊影響，則需於潛堤材料再斟酌考量。本計畫第二章節國外改善對策蒐集可知，人工潛堤可採用較親近生態的材料來建造潛堤(例如：魚礁球)方式建構離岸潛堤，以達到防災、景觀與生態各面向兼顧之目的。此外，目前 Boskalis 運用「現地取材」之方式建構潛堤，透過當地的沙土，配合 3D 列印技術建造潛礁，使其對當地海域生態環境之衝擊影響較小，此方式已有於摩納哥海岸運行，且其效果良好。

5.3.3　多良路段區域浪襲改善對策評估

由於莫蘭蒂颱風對多良路段影響較設計條件波浪小，本節以 50 年回歸波浪條件分析之，其中波高 15.71 公尺、週期 15.2 秒、潮位 1.32 公尺。圖 5.3.5 顯示波浪爬坡、沖刷等過程，惟波浪越過海岸道路之水層厚度僅約 0.30 公尺，但仍有波浪越堤之可能性。然，目前三工處亦已針對此路段區域進行浪襲改善對策之規劃，預期該對策會參酌南興路段防浪襲改善工法進行設計，其可達到削減波浪能量，降低浪襲發生機率之目的。另，由前述成果可知(參見圖 5.3.3)，多良路段離岸潛堤改善對策確有減低波浪能量之效果，因此未來於既有抑制浪襲改善對策實施前提下，若再增加離岸潛堤長期改善對策，將可提升防浪襲對策之成效，並兼顧抑制海岸侵蝕影響公路邊坡穩定之效果。

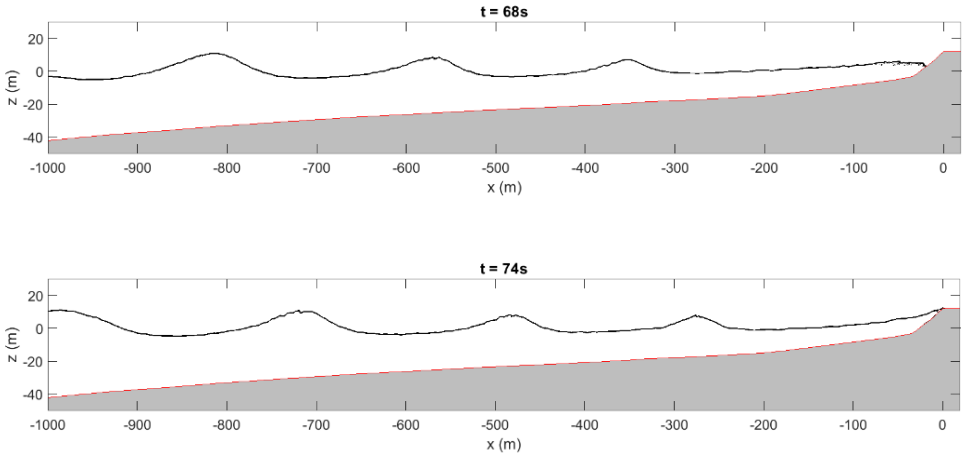


圖 5.3.5　波浪於多良段剖面地形之傳動 (t = 68s and t = 74s)

第六章　適合改善對策建議

6.1　各改善對策研析

依據本計畫第二章「改善對策資料蒐集」與第五章「對策可行性評估」成果進行研析，以瞭解各對策於台 9 線海岸公路災害抑制之適用性，各分述如後：

1.工程對策方面：

(1) 本計畫彙整因應公路浪襲工程手段方面，概有人工養灘與海岸結構物兩種對策，其中人工養灘對策可抑制波浪能量，減緩浪襲可能性，並兼顧不阻礙海岸景觀之效果，惟工法實施上，需考量改善區域漂砂特性，並配合適合粒徑砂源才能進行有效養灘。若無適合砂源時，得透過運輸方式補砂，此需較大之工程成本。依據目前台 9 線災害特性分析成果，南興路段仍有海岸侵蝕與浪襲之疑慮，因此可運用「迂迴工法」將大武漁港長年淤積之漂砂補助至目前浪襲防制工程前方海域進行養灘，以強化防制浪襲之效果，並輔助減緩漂砂迴流之大武漁港之現象。此養灘對策雖可藉由現有淤積漂砂來加強防制浪襲成效，惟仍透過長期運作，才能瞭解實際對策效益，屬於長期規劃改善對策手段。而海岸結構物對策，主要是透過改變護岸型式，來強化防制浪襲之效果。然，目前已實施之浪襲改善對策概以不改變現有護岸型式為原則進行規劃，透過消波塊設置削減波浪能量，以達減緩浪襲之目的，現階段實施已具成效。因此，在現有改善對策中，建議以「加強護岸防制功能」為原則，透過防波柵設置，以降低浪襲危害，藉此在不轉換現有護岸擋土牆型式之前提下，應可提升防制浪襲之能力，且為短期可建議實行之方案。

(2) 本計畫於因應海岸侵蝕手段方面，概有蒐集人工養灘、離岸堤、離岸潛堤及人工岬灣等對策。其中，人工養灘、離岸潛堤與人工岬灣會兼顧減緩海岸侵蝕與不阻礙景觀之效果，惟人工養灘具砂源取得不易，人工岬灣亦需人工養灘配合實施，才能有較佳之效果，因此目前於台 9 線具海岸侵蝕潛勢路段，建議可以

離岸潛堤做為改善對策。然，離岸潛堤設置勢必會改變既有海流與漂砂現象，因此仍須透過長期實施和觀測，才能瞭解工法之實際效益。

(3) 因應海岸淤積災害方面，目前台 9 線海岸公路區域，僅有大武漁港有淤積災害潛勢現象。而目前蒐集國外改善對策資料，主要是以興建導流牆方式來改變港內流場行為，以降低漂砂淤積之可能性。然，臺灣東部於颱風侵襲時，概處於首當其衝之位置，再加上颱風發生頻率頻繁，往往一次性的颱風侵襲，就使漁港嚴重淤積，僅靠改變流場方式對於大武漁港淤積災害之效果可能有所侷限。建議配合南興路段浪襲工法，透過「迂迴供砂」方式，減緩漂砂回淤量，以降低災害程度。

2.非工程對策方面：

(1) 於非工程對策方面，蒐集國外相關資訊，概可分為預警系統與管理層面來說明。於歐洲，概均以歐盟發展模式為基礎，進行公路浪襲預警系統之建置，通常會針對各重點區域或海岸線進行區域預警系統建立。預警系統顯示介面會含括波高與波向資訊、越波風險地圖及越波預警圖等資訊，藉以完善災前整備與災中應變作業。於日本，除預警系統外相關資料，亦有蒐集公路浪襲防制之相關管理手段，其中包含較可能引致嚴重浪襲之颱風路徑、當地較可能發生浪襲之水位與波高條件及較可能發生嚴重浪襲之海象情況等資料。

(2) 於國內非工程對策方面，亦有於台 9 線海岸公路建置防制浪襲預警系統，並以簡易網頁方式，提供台 9 線浪襲易致災路段(多良段、南興段)於颱風期間預警資訊。於管理手段方面，則有「整體海岸管理計畫」與「海岸防護計畫」，以做為國家海岸防護及改善施政之參考依據。並有持續透過精進的數值模式進行海岸為海程度分析與劃設，進一步透過統計分析，繪製臺灣颱風波浪潛勢風險地圖，此均可給予國內海岸公路相關單位做為防減災參酌依據。

6.2 適合改善對策建議

依據本計畫改善對策蒐集與對策可行性評估成果，概可針對「南興路段」與「多良路段」研提改善對策建議。於改善對策方面可概分為「工程對策」與「非工程對策」建議，工程改善對策方面，將綜整可行性評估成果(參見第五章)與國外相關改善工法內容，研提各改善區段「短期改善對策」與「長期改善對策」之建議；非工程改善對策方面，將參考國外海岸公路管理與預警系統策之相關資訊，研提相關建議，各改善對策建議參見表 6.2.1。

表 6.2.1 適合改善對策建議

路段	對策類型	建議
南興路段 (特殊案例對策)	工程手段	短期改善對策(439K+000 ~ 441K+000)： 1.目前防浪襲工法已有減緩公路浪襲之功效，且於重大災害事件後，均會進行重新檢視，以進行消波設施(消波塊)補強作業。 2.若需再強化浪襲防制效果，建議可提升公路護岸防制越波功能，例如：日本於海岸公路護岸端架設具一定高度之透明防波柵，可兼具防浪襲與景觀之功效。
		長期改善對策： 1.建議透過「迂迴供砂」方式，將大武漁港清淤土方，導致養灘區域(草埔隧道粒石養灘區域)南側(約 440K+500 處)，藉以加強現有防制浪襲工法岸前消能效果，提升公路減災成效。 2.迂迴供砂對策建議採「陸運移動系統」，藉由目前清淤工程所使用之「陸上機械動力設備」進行挖砂作業；再由「車具運輸法」，運至養灘區南側進行養灘工程。

表 6.2.1　(續)適合改善對策建議

路段	對策類型	建議
多良路段 (特殊案例對策)	工程手段	短期改善對策(417K+000 ~ 419K+000)： 1.依據大武路段成功經驗，已規劃防制浪襲工程，應可有效抑治浪襲衝擊。 2.設置防波柵強化公路護岸防浪襲之效果。
		長期改善對策(417K+500 ~ 420K+000)： 1.運用「離岸潛堤」工法改善該路段海岸侵蝕之情況，透過工法養灘效果，可改善原有侵蝕災害之路段，並達到穩定海岸地形變遷之效果。此外，潛堤沒入海域，對公路景觀影響較不顯著。 2.離岸潛堤工法可以「人工魚礁」方式建置，使潛堤可達到防止侵蝕、削減波能及維持生態環境之功效。 3.潛堤材料盡量考量「現地取材」，藉此可降低工法對當地生態環境之衝擊。
台 9 線路段 (通案式對策)	非工程手段	1.建議可於既有的海象模擬作業化系統中，加入越波預警模組，以利針對海岸公路進行「面狀」浪襲預警，並可含括港灣範圍，以提升整體預警功能，並強化防災撤退決策之可靠性。 2.因應氣候變遷衝擊，硬式防護對策雖可提供接近「防災」之效果，惟仍應強化災害預警系統能力與較全面性的風險評估，以提升防災韌性，降低公路災害。

第七章　結論與建議

本計畫主要為針對台 9 線海岸公路之災害因應對策進行探討，除針對國內外改善對策蒐集外，亦須針對計畫區域進行現況分析，瞭解現階段改善工法之概念，以利研提未來改善對策之思維，才能進一步針對改善對策進行可行性評估。本計畫結論、建議、成果效益與應用情形說明如後。

7.1　結論

1.改善對策資料蒐集方面：

(3) 「工程對策」方面主要針對公路浪襲、海岸侵蝕及海岸淤積等三種災害類型進行因應工法探討，改善公路浪襲對策概為人工養灘與海岸結構物兩類，其中海岸結構物除探討不同型式擋土牆外，亦有強化公路護岸防浪襲功能之防波柵工法；人工養灘亦為改善海岸侵蝕對策之一，而砂袋/砂管亦為減緩海岸侵蝕之軟式工法；因應淤積災害工法則是透過建置導流堤，改善港口流場型態，藉以減緩淤積情況。此外，針對「侵蝕/淤積災害」與「氣候變遷衝擊」亦有相關因應對策擬訂，其中迂迴供砂工法則為同時減緩淤積與侵蝕災害之對策，而透過複合式的海岸防禦方法則可降低氣候變遷對海岸環境的衝擊。

(4) 「非工程對策」則含括海岸管理、公路風險評估及警示系統等內容，於歐盟體系中，透過人工智慧演算法估算不同地形及結構物類型之溯升高及越波量，以利管理公路浪襲防制；於日本，除有完整防制浪襲系統外，亦有於公路沿岸架設越波計與監視裝置，以即時瞭解現地浪襲情況，而於越波監測步驟可概分「越波警戒」、「警告公路使用者」及「越波系統預警」等作為；於國內，海岸災害防護與海岸公路有所關連，因此近年所擬訂的海岸管理計畫及海岸風險評估均有間接防制公路災害之影響，而為提升台 9 線浪襲防災應變能力，亦有針對台 9 線易致災路段建立臺東海岸公路浪襲預警系統。

2.往昔改善對策蒐集與分析方面：

(1) 蒐集台 9 線公路往昔改善對策，概以「南興路段」與「香蘭路段」有相關資料，以南興路段而言，因有顯著浪襲災害，所以持續進行浪襲防制相關改善計畫，主要為透過消波工程削減波浪能浪，以減緩浪襲之機率；而南興路段中大武漁港長年遭受淤積災害困擾，因此亦有長期港口減淤對策實施。此外，為提高沿岸土地對颱風巨浪之防護能力，水利單位長期香蘭海岸佈設保護工。經由現場堪查「多良路段」海岸結果可知該路段，雖亦有抑制浪襲工法實施，惟概以於灘岸放置消波塊抵禦波浪為主，於民國 108 年則開始實施防浪襲工程規劃設計作業。

(2) 為瞭解計畫區域現地情況(包含易致災區域位置、工法設計概念及改善區域現況等)，已辦理相關單位訪談與現地勘查作業。藉此明確瞭解在地致災資訊、改善工法設計理念與現況及蒐集改善區域現地相關資料。藉由三工處與世曦工程訪談所得資料，除可確認本計畫災害潛勢分析之合理性外，亦獲致多良與南興路段海域之新測水深地形資料(世曦工程提供)，俾利改善此兩路段之災害潛勢分析，使其更符合現地災害發生情況。此外，也瞭解目前台 9 線海岸公路災害防制對策實施情況。

3.改善對策研擬方面：

(1) 依據相關單位之建議與工法設計經驗，已擬訂本計畫評估改善對策之區域範圍與內容，並研提各改善對策評估方法。另透過易致災潛勢分析結果與蒐集現地相關資料，本計畫擇選「南興路段」與「多良路段」為改善對策擬訂之區域。

(2) 南興路段路段於短期改善對策評估方面，以評估現有改善工法與往昔未實施改善工法之差異，以利瞭解改善工法之成效；長期改善對策方面，則透過「迂迴供砂」方式，將漁港淤積土方移至目前草埔隧道粒石養灘區域南側進行養灘工程，藉以達到「提升現有防制公路浪襲工程效益」、「補注養灘區域砂源減緩海岸侵蝕」及「降低清淤土方再回港內之機率」等功效。

(3) 多良路段於短期改善對策評估方面，現況海岸情況雖仍有公路浪襲災害潛勢，惟已有規劃防制浪襲工程，依據大武路段經驗應該有可抑制浪襲災害強度；長期改善對策方面，可考量防制海岸侵蝕路段進行改善。

4.對策可行性評估方面：

(1) 依據地形變遷模式計算結果可知，南興路段目前由草埔隧道粒石養灘區域(大武漁港以南)，於中長期變遷下，仍有持續海岸侵蝕潛勢現象，主要可能因該區域養灘粒石級配較為複雜，使於水動力作用下，部分粒徑較小粒石會被帶走，而較大粒徑粒石可能因此藉由重力而運動。

(2) 因大武漁港長年有淤積砂石，因此藉由迂迴供砂方式將清淤之土方運至南側防制浪襲工程前方(約為 440K+500 路段)進行養灘作業。評估此方式可因創造更廣之灘岸使防制浪襲成效更為提升，且可補注侵蝕區域，減緩侵蝕災害影響台 9 線之可能性，亦有減緩拋石回流至大武漁港之量體，透過增加突堤工法則可顯著降低清淤土方回淤至漁港之現象。

(3) 於多良路段方面，本計畫透過不同方案之潛堤配置情境模擬結果可知，透過潛堤工法確可降低多良路段北側海岸侵蝕之現象，且可使海岸較為穩定平衡，藉以降低海岸侵蝕導致公路邊坡穩定之危機。

(4) 依據本計畫評估結果，多良路段浪襲現象雖較南興路段輕微，惟仍有浪襲發生之可能性。目前三工處已有針對易發生浪襲區域進行抑制浪襲工法設計規劃，依據南興路段浪襲防制之經驗，未來應可有效改善浪襲災害。此外，依據本計畫潛堤對策評估結果，該對策除可降低海岸侵蝕現象外，亦有削減波能，提升防制浪襲之成效。

5.本計畫依據國內外改善對策資料蒐集與改善對策可行性評估成果，研提台 9 線海岸公路具體適合改善對策之建議。特殊案例對策方面，針對「南興路段」與「多良路段」各自研提短期與長期改善對策規

劃，此部分均為工程手段；通案式對策方面則針對非工程手段研提相關改善建議，俾利相關單位施政參酌。

7.2 建議

1.由災害特性分析過程可知，地形水深資料對數值模擬與災害特性分析結果影響重大。本計畫雖已透過各報告資料蒐集，建置數值模式所需之水深地形，惟若有更完整之地形資料，可提升數值模擬之精確度，對未來改善對策評估有所助益。

2.本計畫目前改善對策評估乃著重於工法功效，若要進一步研討改善對策之適用性，仍須深入探討對策之可行性(工程經費、施工環境影響及生態調查等)。

7.3 研究成果之效益

1.本研究成果有研提特殊案例對策，可依據台 9 線海岸公路特定路段進行改善，相關評估成果可做為相關單位施政之參考。

2.通盤式例對策方面，除可做為台 9 線海岸公路改善對策外，相關建議亦可做為各施政單位之參考。

7.4 提供政府單位應用情形

在施政上，本計畫可做為交通部、公路總局、水利署及第八河川局等相關單位做為未來施政與後續計畫參考，俾利擬定台 9 線海岸公路相關改善對策。

參考文獻

1. Bridges, T., Henn, R., Komlos, S., Scerno, D., Wamsley, T., & White, K. 2013. “Coastal Risk Reduction and Resilience: Using the Full Array of Measures.” Washington, DC.
2. Bridges, T. S., Burks-Copes, K. A., Bates, M. E., Collier, Z. A., Fischenich, J. C., Piercy, C. D., Rosati, J. D. 2015. “Use of natural and nature-based features (NNBF) for coastal resilience.” US Army Engineer Research and Development Center, Environmental Laboratory, Coastal and Hydraulics Laboratory.
3. Board, O. S. 2014. “Reducing Coastal Risk on the East and Gulf Coasts.”
4. Bruce, T., van der Meer, J.W., Franco, L., Pearson, J.M. (2009) “Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters”, Coastal Engineering, 56(2), 166-179.
5. Castellino, M., Sammarco, P., Romano, A., Martinelli, L., Ruol, P., Franco, L., De Girolamo, P. (2018) “Large impulsive forces on recurved parapets under non-breaking waves. A numerical study”, Coastal Engineering, 136, 1-15.
6. EurOtop, 2016. “Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on european research, but for worldwide application”, Second Edition, Authors: J.W. van der Meer, N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. DeRouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch and B. Zanuttigh.
7. Frandsen, J.B., Bérubé, F., Tremblay, O. (2015) “Beach nourishment project：Large scale flume experiments - Evaluation of cobble-gravel-sand beaches”, Institut National de la Recherche Scientifique, Qu´ebec, Canada.
8. FHWA, 2014. “Highways in the Coastal Environment: Assessing Extreme Events.” Hydraulic Engineering Circular, 25(2), FHWA-NHI-14-006, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

9. Harris, 2001. “Status Report For The Reef Ball™ Artificial Reef Submerged Breakwater At Gran Dominicus Beach Resort Near La Romana, Dominican Republic.” Ocean Engineering & Oceanography Division of Marine & Environmental Systems Florida Institute of Technology Melbourne, FL USA.

10. Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981. “Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries.” Journal of Computational Physics 39, 201-225.

11. Hsiao, S.-C., Lin, T.-C., 2010. “Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: Experiment and rans modeling.” Coastal Engineering 57(1), 1-18.

12. Kerpen, N.B., Schoonees, T., Schlurmann, T. (2018) “Wave impact pressures on stepped revetments”, Journal of Marine Science and Engineering, 6(4), 156.

13. Kisacik, D., Troch, P., Van Bogaert, P. (2012) “Description of loading conditions due to violent wave impacts on a vertical structure with an overhanging horizontal cantilever slab”, Coastal Engineering, 60, 201-226.

14. Kuijper, C., Christiansen, H., Cornelisse, J.M., Winterwerp, J.C. (2005) “Reducing harbor siltation. II：Case study of Parkhafen in Hamburg”, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 131(6), 267-276.

15. Lin, P., Liu, P.L.-F., 1998a. “A numerical study of breaking waves in the surf zone.” Journal of Fluid Mechanics 359, 239-264.

16. Lin, P., Liu, P.L.-F., 1998b. “Turbulence transport, vorticity dynamics, and solute mixing under plunging breaking waves in surf zone.” Journal of Geophysical Research 103(C8), 15677-15694.

17. Loza P., 2008. “Sand Bypassing System.”

18. Marine Board (1995) “Beach Nourishment and Protection”, National Research Council, Washington, D.C, National Academy press.

19. Oregon Department of Transportation (2016) “Green infrastructure techniques for resilience of the Oregon coast highway”, Federal Highway Administration, US Department of Transportation.

20. PRIF (2017) “Fuidance for coastal protection works in Pacific island countries”, published by the Pacific Region Infrastructure Facility (PRIF).

21. Sabino, A., Rodrigues, A., Araújo, J., Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C.J., 2014. “Wave overtopping analysis and early warning forecast system.” Computational Science and Its Applications (ICCSA 2014), Cham, 267-282.

22. Shih, T.H., Zhu, J., Lumley, J.L., 1996. “Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows.” International Journal for Numerical Methods in Fluids 23, 1133-1144.

23. Shih, H.J., Chen, H., Liang, T.Y., Fu, H.S., Chang, C.H., Chen, W.B., Su, W.R.,Lin, L.Y., 2018. “Generating potential risk maps for typhoon-induced waves along the coast of Taiwan.” Ocean Engineering 163, 1-14.

24. Torres-Freyermuth, A., Lara, J.L., Losada, I.J., 2010. “Numerical modelling of short- and long-wave transformation on a barred beach.” Coastal Engineering 57(3), 317-330.

25. van Gent, M.R.A., Wolters, G. (2018) “Effects of storm duration and oblique wave attack on open filters underneath rock armoured slopes”, Coastal Engineering, 135, 55-65.

26. Winterwerp, J.C. (2005) “Reducing harbor siltation. I：Methodology”, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 131(6), 258-266.

27. Wu, Y.-T., Hsiao, S.-C., 2013. “Propagation of solitary waves over a submerged permeable breakwater.” Coastal Engineering 81, 1-18.

28. Wu, Y.-T., Hsiao, S.-C., Huang, Z.-C., Hwang, K.-S., 2012. “Propagation of solitary waves over a bottom-mounted barrier.” Coastal

Engineering 62, 31-47.

29.安倍隆二 (1998) “越波監視システムを利用した道路管理手法について－安全な道路を目指して”

30.涂盛文、吳昭融 (1996)“海堤堤趾防止沖刷之試驗研究”，第 18 屆海洋工程研討會論文集，國立台灣大學，pp. 729-735。

31.經濟部水利署 (2008) “易淹水地區水患治理計畫”。

32.郭少谷、吳宗儒、朱志誠、吳宏謀 (2009) “西子灣人工養灘工法成效評估”，第 31 屆海洋工程研討會論文集，國立中興大學，pp. 693-698。

33.蕭松山、方惠民、賴澄燦、陳昭仁、詹佩紋 (2010) “鹽寮沙灘養灘工法探討”，第 32 屆海洋工程研討會論文集，國立臺灣海洋大學，pp. 451-456。

34.經濟部水利署 (2010)“臺東海岸(尚武段)監測調查計畫(2/2)”。

35.經濟部水利署 (2010)“臺東海岸(太麻里段)環境營造改善計畫)”。

36.楊立帆、邱柏鈞、陳志欣、林俊遠、黃清哲 (2011) “波浪與曲面海堤交互作用之研究”，第 33 屆海洋工程研討會論文集，國立高雄海洋科技大學，pp.293-298。

37.郭少谷、賴彥廷、林螢俞、朱志誠 (2017) “旗津潛堤養灘工程之長期監測現象探討”，第 39 屆海洋工程研討會論文集，弘光科技大學，pp.317-322。

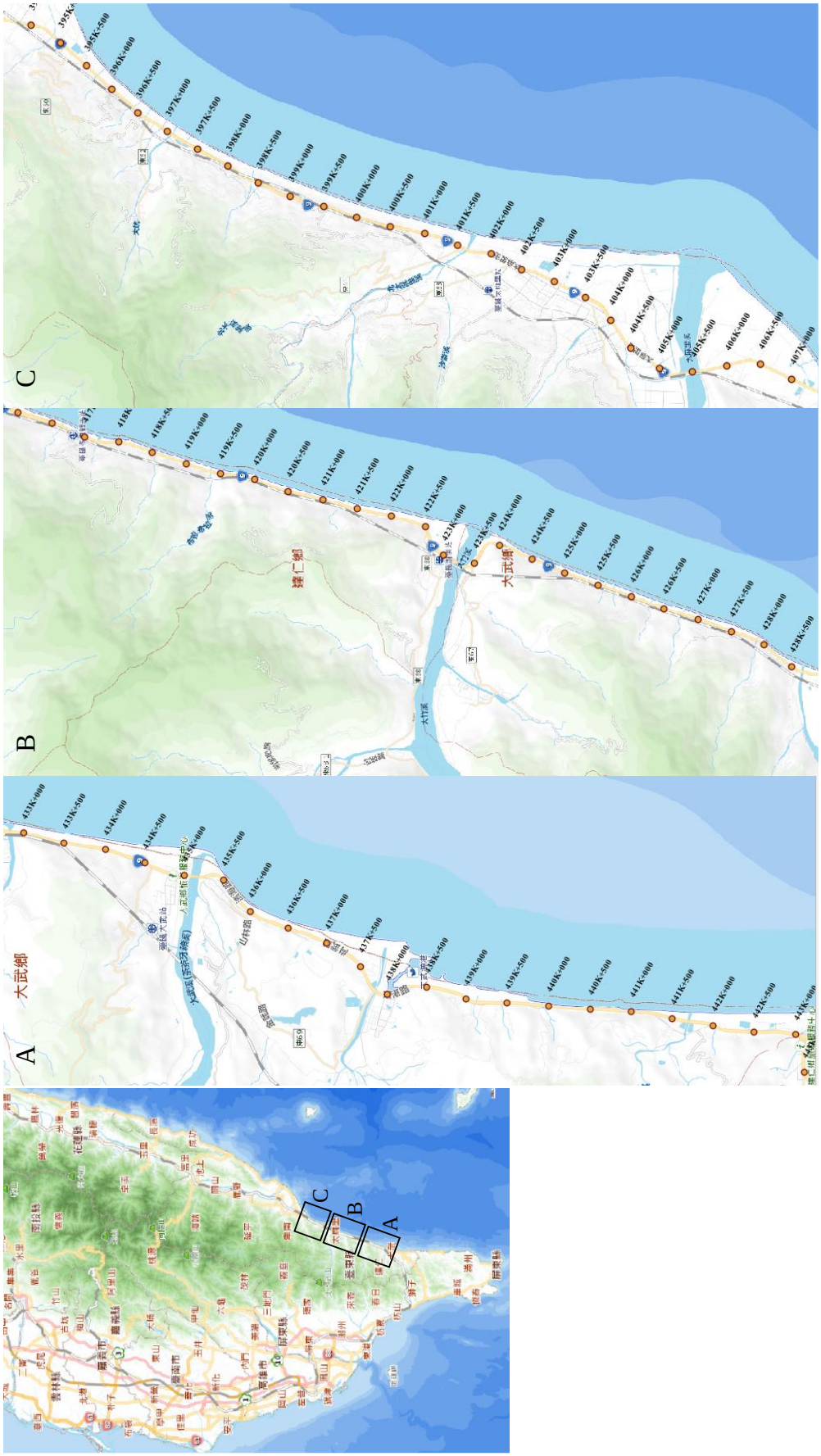
38.港灣研究中心(2018)“臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究”。

39.經濟部水利署 (2018)“氣候變遷對近岸沙洲之衝擊研究”。

40.臺東縣政府 (2019) “臺東縣二級海岸防護整合規劃”。

附錄一

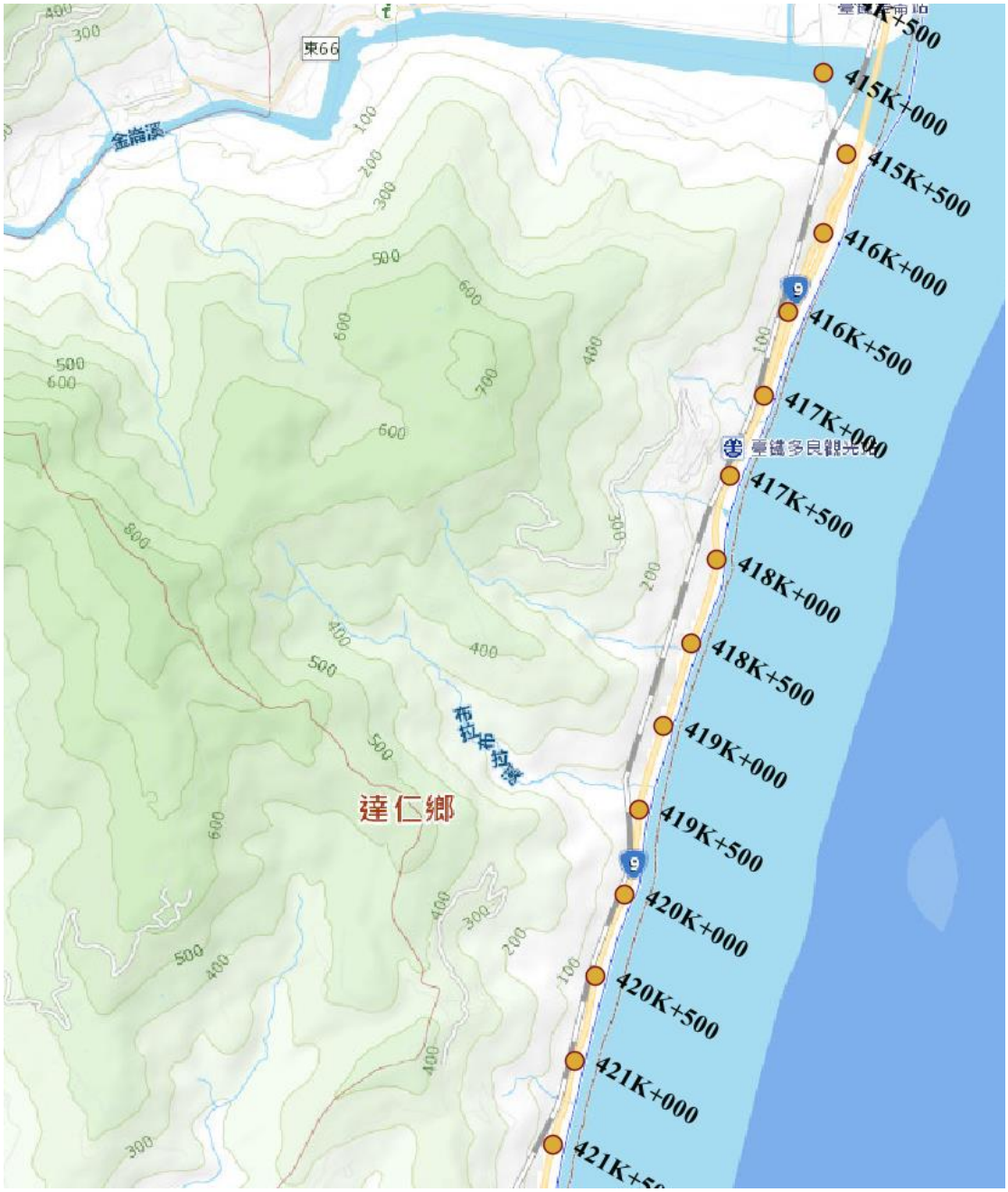
台 9 線概況



附錄 1-1


大武分局尚武派出所
大武鄉圖書館
學府路
環港路
環港路 5巷
大武漁港
438K+000
438K+500
439K+000
439K+500

南興路段


東66
金崙溪
415K+000
415K+500
416K+000
416K+500
417K+000
417K+500
418K+000
418K+500
419K+000
419K+500
420K+000
420K+500
421K+000
達仁鄉

多良路段

附錄二

PTM 模式理論

PTM (Particle Tracking Model) 計算分為兩個部分：第一部分為「歐拉輸砂計算」如：沈積物活動度、底床形成過程等等，第二部分則為「拉格朗日輸砂計算」如：砂的活動特性、夾帶作用、對流、分散及沉降。

1. 歐拉輸砂計算

經由顆粒軌跡模型的計算，不管是關於沈積物平流、侵蝕還是沈澱，在研究領域中都必須先對一些基本的輸砂參數做出定義。其包括了近底床流況、底床剪應力、底床形成及沈積物顆粒流動性。

(1) 粗糙度

模式中的底床糙度是基於底床表面的粒徑大小來計算的。粒徑中位數D_{50}被用以計算底床形成（bed forms），其提供了型態糙度（form roughness）。90%粒徑D_{90}被用以計算表面糙度（skin roughness）。

(2) 剪應力

剪應力是流況與底床狀態的函數。在 PTM 中會計算四種剪應力：

A.因表面摩擦力（skin friction）、由流產生的剪應力τ_c'

B.因形狀阻力（form drag）、由流產生的剪應力τ_c''

C.因表面摩擦力、由波產生的剪應力τ_w'

D.因形狀阻力、由波產生的剪應力τ_w''

對於因形狀阻力由流產生的剪應力τ_c'，形狀粗糙高度k_s'是結合底床形狀長度（bed form length）及陡峭度（steepness）來估算的。PTM 工具的計算剪應力的方法可見於 van Rijn, 1993。以下是這些方法的概述：

底床剪應力（bed shear stress）可由水深平均速度$\overline{U}$獲得，如：

$$\tau_c^{''} = \frac{\rho \overline{U}^2}{C^{''2}} \tag{1}$$

ρ為水密度，$C^{''}$是無因次 Chézy 常數，在劇烈紊流中約為：

$$C^{''} = 2.5\, ln\left(11\frac{h}{k_s^{''}}\right) \tag{2}$$

其中，h為流深度（flow depth,(m)）。

底床剪力速度(bed shear velocity, u_* (m/sec)如此計算：

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_c^{''}}{\rho}} = \frac{\overline{U}}{C^{''}} \tag{3}$$

對於劇烈紊流，底床剪力速度u_*與流深h、流的特徵糙度$k_s^{''}$、以及$\overline{U}$有關：

$$u_* = \frac{\overline{U}}{2.5\, ln\left(11\frac{h}{k_s^{''}}\right)} \tag{4}$$

對於因表面摩擦力由流產生的剪應力τ_c'，這裡引入了用以代表底床表面粗糙度或底床表面砂粒徑大小的粗糙高度k_s'。在 PTM 中，對於可侵蝕底床，表面糙度直接代入三倍的D_{90}，其中D_{90}表示此粒徑下有百分之 90 的沈積物粒徑比這個值更小（由重量計量）。這個值在模式介面中您可以修改為您指定的數值。

當處於波流交互作用時，情況會變得較為複雜。此情況下，摩擦力的影響不能獨立界定，相反地，必須考慮交互作用帶來的影響。經多份著作顯示，在近底床的波流交互作用下，得調整能量消散及底床剪應力。（參見 Bijker 1966; Kemp and Simons 1982; O'Connor and Yoo 1988）舉例來說，精細的近底床相關觀測顯示，由於波浪造成的渦黏度增加，導致近底床的流的速度會有所減少。

PTM 模組合併了兩種不同的演算法以計算結合波流交互的

剪應力 τ'及τ''。此為 O'Connor(1988)及 van Rijn(1993)的演算法。

(3) 漂砂運動之啟動的臨界值

底床沈積物的運動及顆粒沈積的臨界值通常透過 Shields 曲線來定義（參見 Yalin(1977)的第四章），引用無因次 Shields 參數θ：

$$\theta = \frac{\tau'}{\rho g(s-1)D} \tag{5}$$

g為重力加速度，s為砂粒比重，D為特徵粒徑。無因次臨界 Shields 常數(critical Shields parameter, θ_{cr})即為能開始造成輸砂的θ：

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{\rho g(s-1)D} \tag{6}$$

此處剪應力為臨界剪應力τ_{cr}，即對應到開始造成輸砂的情況。

Soulsby and Whitehouse(1997) 為了預測開始造成輸砂的條件，以無因次粒徑D_{gr}為函數重新試驗了 Shields 曲線：

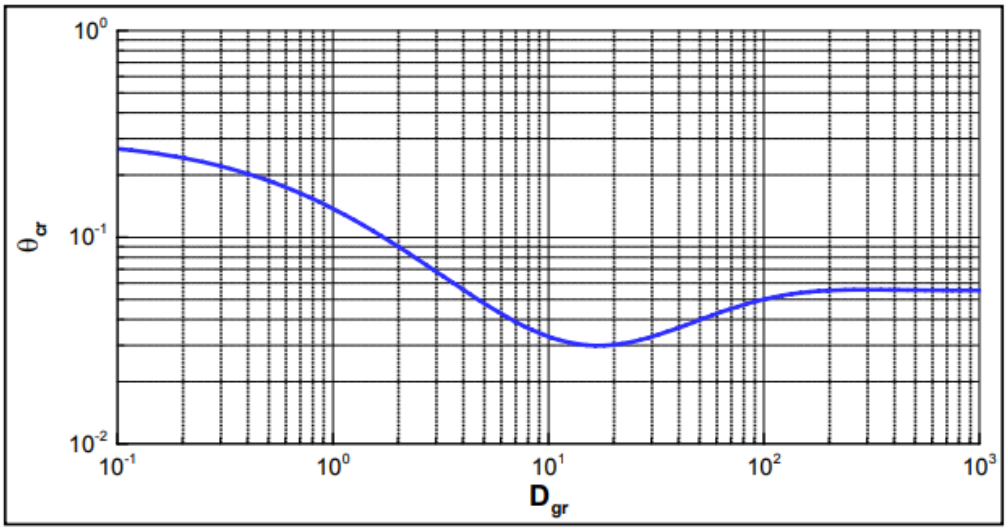
$$D_{gr} = D_{50}\sqrt[3]{\frac{(s-1)g}{\nu^2}} \tag{7}$$

D_{50}表示一半重量的沈積物粒徑小於此粒徑大小的值，ν為流體的運動黏滯性(m^2/sec) Soulsby and Whitehouse(1997)展示了以下以D_{gr}為其函數的θ_{cr}解析解，其為：

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1+1.2D_{gr}} + 0.055[1-e^{-0.02D_{gr}}] \tag{8}$$

式(8)的解顯示在附圖 2.1。Soulsby and Whitehouse(1997)也表示在剪應力為軌跡近底床剪應力峰值（peak orbital near-bed shear stress）的情況時的波動可以應用同種 Shields 標準。雖然 Stive 等人(2005)認為在波浪造成的輸砂中，Shields 參數的使用是因加速度項的不相容而受到限制的。這對於會受到相對短波影響的較粗

砂質是一大缺點，對於廣範圍的波浪條件下的砂質，Shields 曲線法提供了合理的輸砂活動度估算(particle transport mobility)。



附圖 2.1　水流作用下的輸砂臨界值
(Sediment transport threshold under currents)

(4) 輸砂活動度

無因次活動度M為「作用於底床的表面剪應力」τ'與「臨界剪應力」τ_{cr}的比值：

$$M = \frac{\tau'}{\tau_{cr}} = \frac{\theta}{\theta_{cr}} \tag{9}$$

臨界剪應力τ_{cr} (Pa)，可以此計算：

$$\tau_{cr} = \theta_{cr}\rho(s-1)gD \tag{10}$$

無因次輸砂參數T也常被用以估算活動度，其為：

$$T = \frac{\tau' - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} = M - 1 \tag{11}$$

經由在計算域中已知的定點（底床表面）沈積物及流況的分布，就可以計算底床沈積物（及底床上的顆粒）的活動度了。活動度的時空分布圖是非常有用的工程工具，PTM 中的 SMS 介面中提供了使用者設定選項，以便使用者儲存這些時空分布資料。

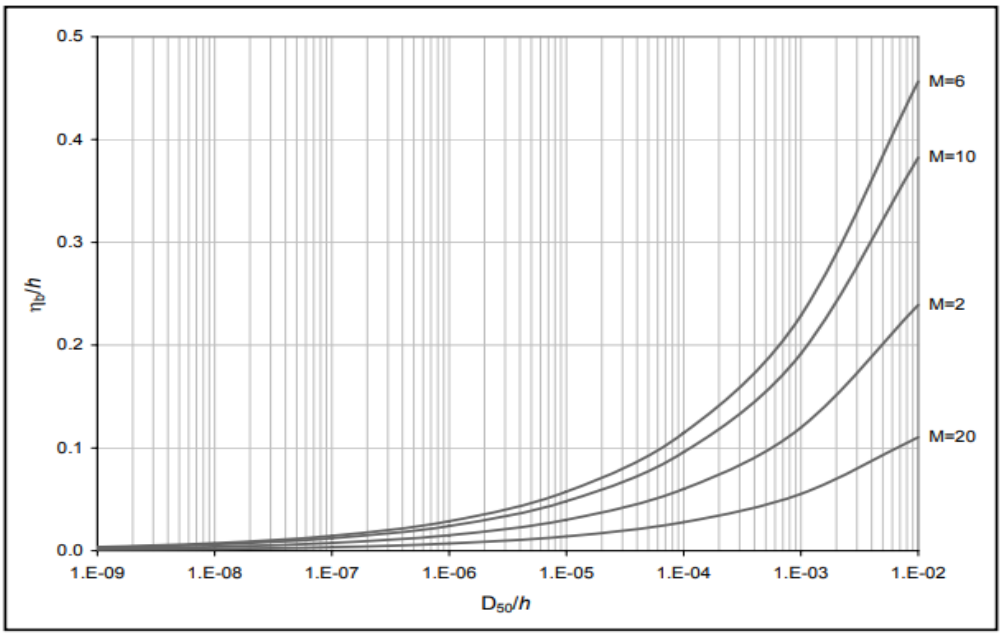
(5) 底床形態計算

若要計算因形態阻力造成的剪應力τ"以及由底床提供的總流抗力，則估算底床的幾何形狀是必要的。在波流共存時的底床形狀平衡維度（equilibrium dimensions of bed forms）中，流的部份是參考 van Rijn(1984c)的方法，波流共存的部分是以 Mogridge 等人(1994)的方法計算。

Van Rijn(1984c)的底床形狀及糙度的計算方法如下，其中平衡底床形狀高度 η_b (equilibrium bed form height)是基於活動度、流深(flow depth)及粒徑來決定

$$\begin{aligned} &\eta_b = 0 && M \le 1 \\ &\eta_b = 0.11h\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0.3}\left[1-e^{-0.5(M-1)}\right](24-M) && 1 < M \le 24 \\ &\eta_b = 0 && M > 24 \end{aligned} \tag{12}$$

此為穩態方程式，活動度小於 1（無輸砂）時或在活動度大於 24（會淘洗掉底床形狀的高流況）時，是預測不出任何底床形狀。式(12)的繪圖可見於附圖 2.2。



附圖 2.2　在不同活動度，Van Rijn (1984c)對以相對深度為底床形狀高度函數的預測

對於極細砂質（$D_{50} < 0.05mm$），底床形狀無法發展。於 PTM

中，若$D_{50} < 0.05mm$，則假設底床糙度僅以表面摩擦力來定義，如：

$$k_s' = 3 \cdot D_{90} \tag{13}$$

以上的公式可計算平衡底床形狀高度(equilibrium bed form height)。在自然界中，底床形狀不斷因流況改變而調整。底床形狀變化率與局部底床載輸砂率(local bed load transport rate 有關（van Rijn 1984a; Nielsen 1992）。在 PTM 中應用了一個簡單的算法以使底床形狀可由原本的高度逐漸調整成其新的平衡高度。底床形狀高度變化率與總輸砂有關。在這個情況，PTM 用了輸砂抬升率q_p (m/sec) (transport pickup rate)來估算底床形狀的最大時變率。在模擬時間點t時，存在於底床上的底床形狀高度η會與預測公式計算得的平衡底床形狀高度η_b進行比較。若$\eta < \eta_b$，則底床形狀會成長；若$\eta < \eta_b$，則底床形狀會消蝕。而底床形狀高度時變率則可以此計算：

$$k_s' = 3 \cdot D_{90} \tag{14}$$

此處假設底床形狀高度會對流況的變化即時做出反應。

(6) 輸砂勢能率(Potential transport rate)：

PTM 需要計算域的輸砂勢能率來計算輸砂之梯度以推估定點底床侵蝕或沈積的潛勢。輸砂勢能率被用來計算一個沈積物顆粒在沈積後被埋沒的概率。這個可以被輸出及標示成圖的資訊可用來當作計算域中的輸砂狀態的指標。

針對波流共存時的總輸砂勢能率，PTM 有兩種演算方法提供選擇：Soulsby-van Rijn(Soulsby 1997)及 van Rijn(1993)。Soulsby-van Rijn 的總輸砂方程式(Soulsby 1997)為：

$$q_t = A_s \overline{U} \left[\left(\overline{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} \overline{U}_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - U_{cr} \right]^{2.4} \tag{15}$$

其中，

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} \tag{16}$$

$$A_{sb} = \frac{0.005h\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{1.2}}{[g(s-1)D_{50}]^{1.2}} \tag{17}$$

$$A_{ss} = \frac{0.012D_{50}D_{gr}^{-0.6}}{[g(s-1)D_{50}]^{1.2}} \tag{18}$$

$$C_D = \frac{0.4}{\left[ln\left(\frac{h}{z_0}\right)-1\right]^2} \tag{19}$$

U_{cr}為臨界速度：

$$U_{cr} = \begin{cases} 0.19D_{50}^{0.1}\, log_{10}\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) & D_{50} < 0.5mm \\ 8.5D_{50}^{0.6}\, log_{10}\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) & D_{50} \geq 0.5mm \end{cases} \tag{20}$$

2. 粒子傳輸輸砂計算

於不同之操作的模式，各種計算都會表現得不一樣。例如，平流速度在 2D 及 Q3D 模式中的計算將會需要計算懸浮及底床載的濃度剖面，然而 3D 模式僅需顆粒的位置來計算，與定點輸砂(local transport)無關。其他的計算，諸如沉降速度等等。

(1) 顆粒位置(Particle position)：

PTM 使用了一種二階的預測校正法來求解於時間$t + dt$，在三個維度：x,y,z的顆粒位置。以下將以x方向為範例闡述。第一種方案使用了當下的顆粒時空坐標資料來預測顆粒在一半時距後的位置x'，如：

$$x' = x_n + \frac{1}{2}(u_A dt + u_D dt) \tag{21}$$

其中，u_A及u_D分別是（在位置x與時距n時的）平流速度與擴散速度(advection and diffusion velcities)。而第二種方案使用了全時距位置資料：

$$x_{n+1} = x_n + u'_A dt + u'_D dt \tag{22}$$

其中，u'_A及u'_D分別是（在位置x'與時距$n+\frac{1}{2}$時的）平流速度與擴散速度。這些速度的計算會根據模式而有所不同：

A.2D 模式：對於有顆粒特性的沈積物，使用輸砂分布的形心高度的定點水平速度。

B.Q3D 模式：使用顆粒形心高度的定點水平速度，其可能依底床交互作用而變。

C.3D 模式：使用顆粒形心高度的定點水平速度。

本文使用 2D 計算，其理論將於以下幾節說明。

(2) 平流速度(Advection velocity)：

在 2D 及 Q3D 模式計算水平平流速度，會需要輸砂分布形心高度的相關知識。於柱狀水體單位中的顆粒濃度為濃度(kg/m^3)在深度上的積分：

$$C=\int_{z_0}^{h}C(z)dz \tag{23}$$

輸砂率(transport rate)為濃度與速度之乘積：

$$\vec{q}_s=\int_{z_0}^{h}C(z)\vec{u}(z)dz \tag{24}$$

平均顆粒平流流速$\vec{u}_A$ (mean particle advection velocity)是由輸砂勢能率除以沈積物載來計算：

$$\vec{u}_A=\frac{\int_{z_0}^{h}C(z)\vec{u}(z)dz}{\int_{z_0}^{h}C(z)dz} \tag{25}$$

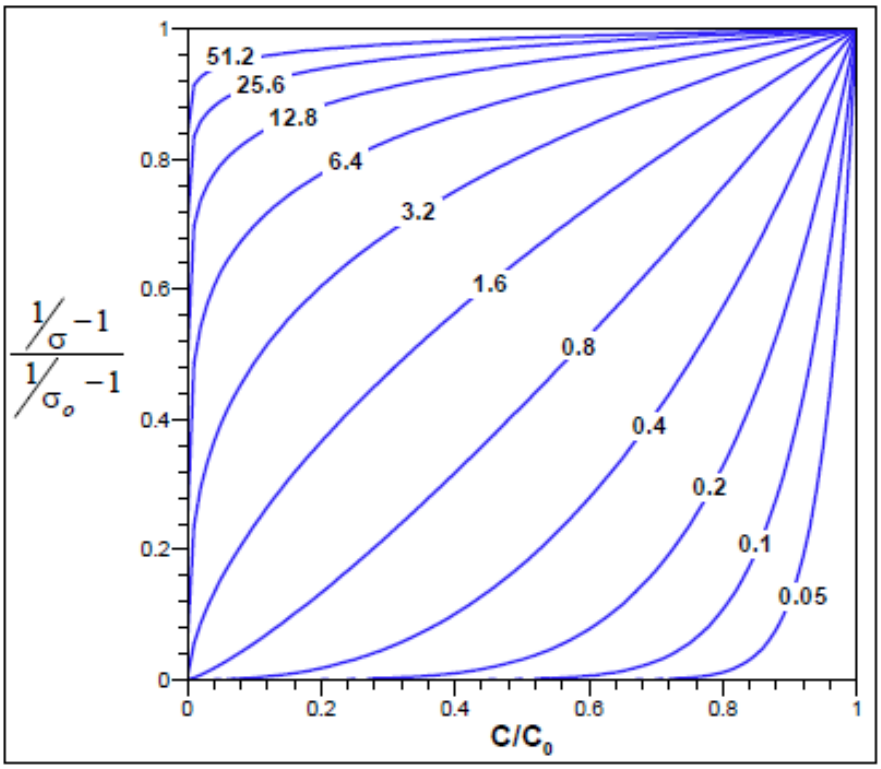
此平流速度也可以視為是在顆粒輸砂率分布的形心位置上的流的速度。直接在 PTM 中求解此公式將會太過耗時，故接下來將介紹所採用一個更簡易的方法。

懸浮顆粒濃度剖面(suspended particle concentration profiles)可以如 Rouse(1939)的形式來假設（見式(26)）

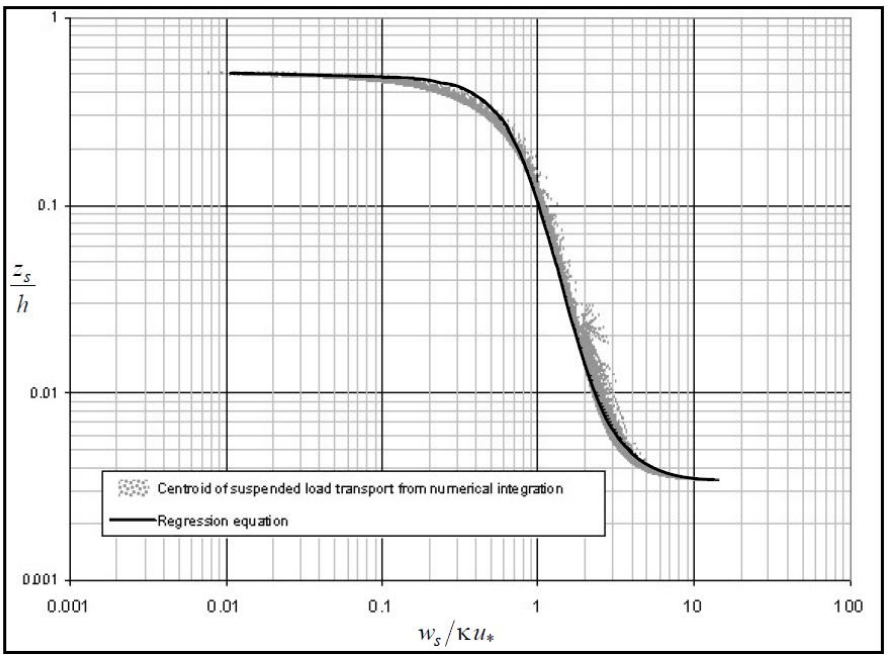
$$\frac{C}{C_0}=\left(\frac{\frac{1}{\sigma}-1}{\frac{1}{\sigma_0}-1}\right)^{\frac{w_s}{k\beta u_*}} \tag{26}$$

其中，σ為由底床起算的相對高度(z/h)，κ =0.4，β =1，C_0為於高程σ_0的基準底床濃度。Rouse 濃度剖面形狀被認為能表現出顆粒大小與剪應力在懸浮濃度剖面的相對影響（參見附圖 2.3）。

以上的濃度曲線乘積與假設的速度對數分布已結合以計算懸浮載輸砂分布的形心高度z_s以計算$\frac{w_s}{\kappa u_*}$。形心高度迴歸分析可以得到一個懸浮載的形心高度z_s的表示式，其為$\frac{w_s}{\kappa u_*}$之函數（參見附圖 2.4）。



附圖 2.3　基於 Yalin(1977)後的 Rouse 濃度分布，曲線標籤為 $w_s/\kappa u^*$的值

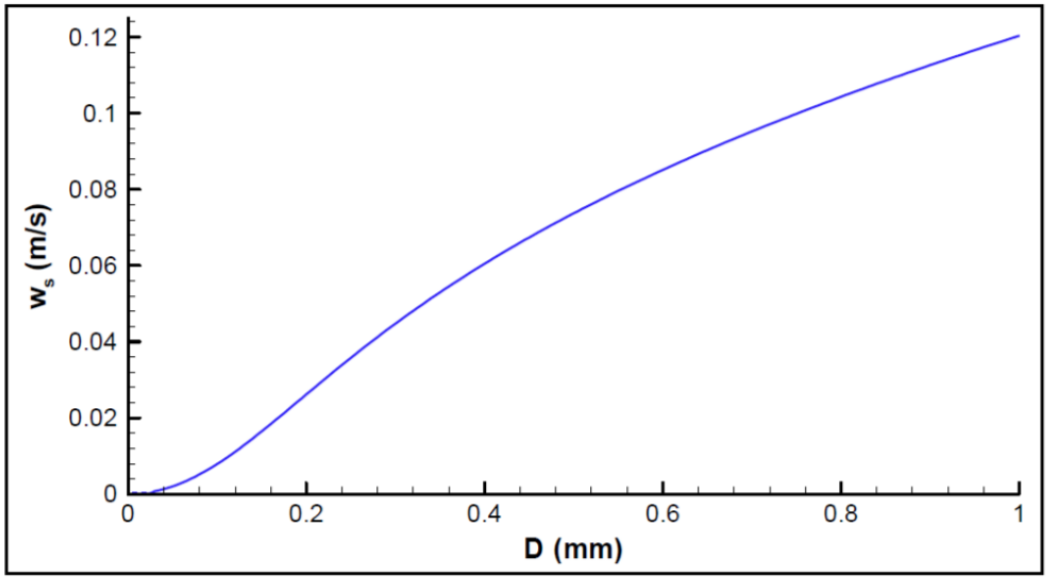


附圖 2.4　用以計算懸浮載輸砂形心的關係圖

結果可以得出懸浮載形心高度z_s之公式：

$$\frac{z_s}{h} = 0.0398.10^{-1.08\,tanh\left[1.2\,ln(\frac{w_s}{ku_*})-0.4\right]} \tag{27}$$

顆粒沉降速度（見附圖 2.5）w_s (m/sec) 定義為無因次粒徑D_{gr}之函數，並可用以下 Soulsby(1997)之近似公式求得，針對細粒徑($D_{gr} < 0.0672$)有做些改寫：



附圖 2.5　沈積物沉降速度

$$\frac{w_s D}{\nu} = \begin{cases} \sqrt{107.33 + 1.049 D_{gr}} - 10.36 & D_{gr} \geq 0.675 \\ 0.0077 D_{gr}^2 & D_{gr} < 0.675 \end{cases} \tag{28}$$

懸浮載之平流速度u_s (m/sec)為於高程z_s (m)之速度，其為對數函式：

$$u_s = 2.5 u_*^{''} \, ln\left(30 \frac{z_s}{k_2^{''}}\right) \tag{29}$$

底床載是用一以速度u_b行進的均勻厚度層表示。底床載速度之估算已由 Yalin(1977)、van Rijn(1984a)作討論。在 PTM 中，底床載速度是以 Engelund and Fredsoe(1976)之關係式來估算：

$$u_b = u_*' \left(10 - \frac{7}{\sqrt{M}}\right) \tag{30}$$

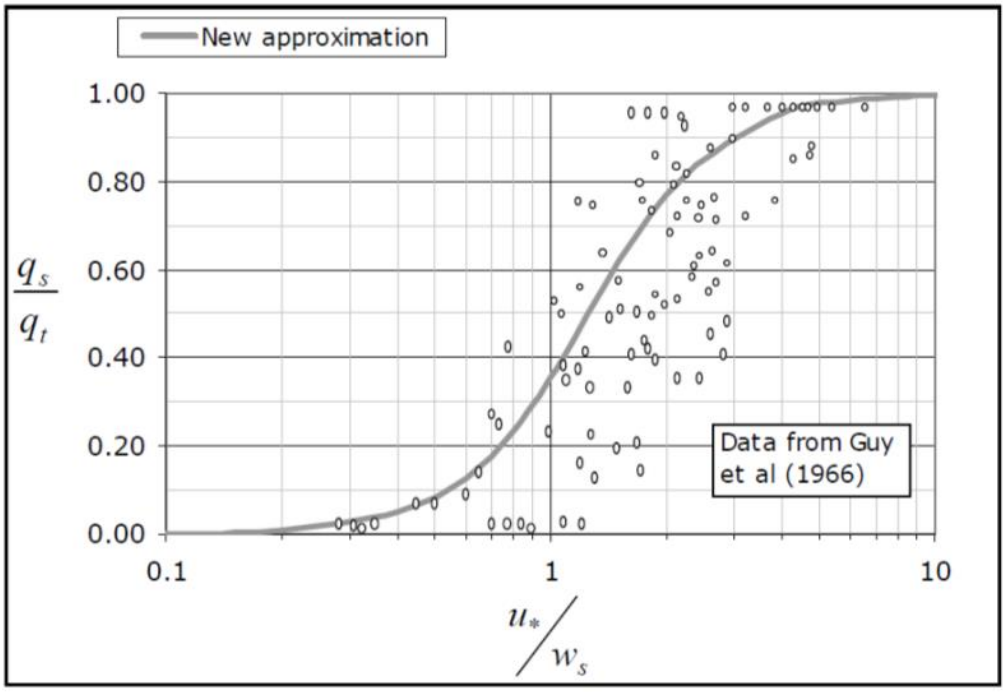
總砂載的加權平均速度是由懸浮載與總砂載之比值$\frac{q_s}{q_r}$進行計算。此比值可透過預測輸砂垂直剖面之積分來取得。一個更簡單的關係式將在接下來的圖以穎線疊加的樣式來表現。

附圖 2.6 是基於 van Rijn(1984b)以及 Guy et al.(1966)的數據資料來進行調整的。此曲線函式如：

$$\frac{q_s}{q_r} = 0.5 \, tanh\left\{1.3\left[ln\left(\frac{u_*^{''}}{W_s}\right) - 0.3\right]\right\} + 0.5 \tag{31}$$

沈積物顆粒的平流速度是基於底床載與懸浮載成分的高程來進行計算。總砂載的加權平流速度u_c可由懸浮載與底床載的比值來獲得：

$$u_c = \frac{q_s}{q_r} u_s + \left(1 - \frac{q_s}{q_r}\right) u_b \tag{32}$$



附圖 2.6　懸浮載與總砂載之比值

底床起算之高程對應之速度可基於流之分布為對數函數的假設來進行計算：

$$u(z) = u_*^{''}\left[5.75\, log_{10}\left(\frac{z}{k_s^{''}}\right) + 8.5\right] \tag{33}$$

此高度為輸砂形心高程z_c，其可以此求得：

$$z_c = k_s^{''} \cdot 10^{\left[0.1739\left(\frac{u_c}{u_*^{''}}\right) - 1.47826\right]} \tag{34}$$

水平平流速度$\vec{u}_A$，即 2D 模式中的速度：

$$\vec{u}_A = u_*^{''}\left[5.75\, log_{10}\left(\frac{z}{k_s^{''}}\right) + 8.5\right]\frac{\vec{U}}{|U|} \tag{35}$$

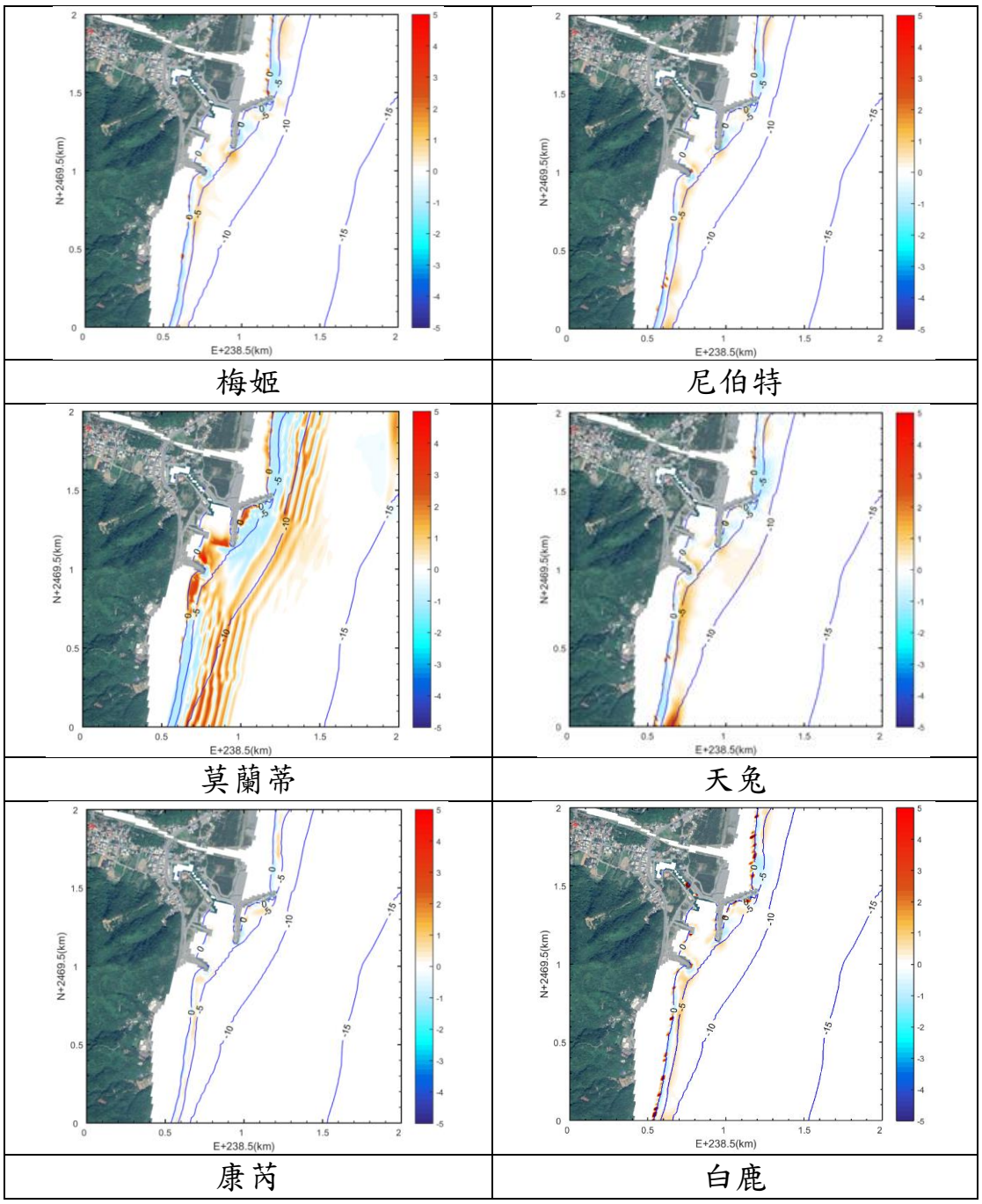
此水平平流速度在 PTM 中解出為向量形式。

2D 模式中，所有的顆粒都是在其所處之輸砂粒徑形心高度上游移，故平流速度無垂向成分。然而，顆粒還是可能在垂直方向上移動，這是因為形心高度會依流體動力之因素而改變。

附錄三

各颱風事件模擬成果

依據期中報告審查意見，需於各模擬案例除冬、夏季季風情境外，需再增列颱風事件。本團隊已依據所內提供海象資料擇選，6 場颱風事件(梅姬、尼伯特、莫蘭蒂、天兔、康芮及白鹿)進行模擬，其中以莫蘭蒂對東部影響較大，因此擇選此事件為代表性颱風案例。相關模擬成果如後。



附圖 3-1　各颱風事件模擬成果

附錄四

期中審查意見回覆表

壹、時間：中華民國108年7月24日（星期三）下午13時30分

貳、地點：港研中心2樓簡報室

參、主持人：陳副所長天賜　　記錄：陳鈞彥

肆、出（列）席單位及人員：(略)

伍、主席致詞：(略)

陸、合作單位簡報：(略)

柒、審查委員意見與回覆表：

審查意見	意見回覆說明	本所計畫承辦單位審查意見
一、郭一羽委員		
(一)請與目前進行中的臺東海岸防護計畫取得協調，以利資料流通。	感謝委員建議。 本計畫擬先彙整目前臺東海岸防護計畫與本計畫之相關內 容，以利瞭解兩計畫探討內容之相似點，再進一步協調兩計畫之連結內容。相關內容將於期末報告進行補充說明。	同意辦理。
(二)此計畫與大武漁港的存在息息相關，依海岸法此地區的侵蝕應以清淤或迂迴供沙做補償，本計畫應將此考慮在內。	感謝委員建議。 依據委員建議，本計畫擬針對「迂迴供沙」工法，進行資料蒐集，並進一步分析該工法於大武漁港施行之可能作法。相關內容將於期末報告補充說明。	同意辦理。
(三)現況災害的探討相當用心，但颱風方向不定，不能確定災害位置，但災害可做為數值模擬的驗證。	感謝委員肯定。 關於數值模式驗證方面，本計畫於前期計畫(臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究)中，已有配合擇選颱風事件，針對	同意合作單位之說明與處理情形。

	計畫區進行各數值模式之物理參數之驗證(例如：波高、潮位及地形變遷等)，惟於事件所造成「浪襲」、「侵蝕」及「淤積」災害現象，僅以情境條件推估之「潛勢分析」結果與三工處提供之現地致災經驗進行比較分析。然，誠如委員所述「風方向不定，不能確定災害位置，災害可做為數值模擬的驗證」，因此本計畫擬挑選具代表性之颱風事件進行模擬，並使用災害特性分析結果與實際發生災害資料進行比對，以提升模式驗證之可靠度。	
(四)季風影響地形變遷，但災害發生於颱風應分開討論。	感謝委員建議。 本計畫擬擇選具代表性之颱風事件，做為極端條件進行災害特性分析，據此本計畫於工法效益與災害分析上將兼具「代表性情境」(季風條件)與「極端性情境」(颱風事件)之分析成果，藉以強化本計畫改善對策效益分析之完整性。	同意合作單位之說明與處理情形。
(五)數值模擬應多方探討，確實預測未來可能發生災害的地點與災情，數值模擬的可靠性為所有成果的最主要依據。	感謝委員建議。 為強化本計畫數值模擬之嚴謹度，擬增加具代表性之颱風事件進行模擬，並使用災害特性分析結果與實際發生災害資料進行比對驗證，以提升模式驗證之可靠度。相關資	同意辦理。

	料將補充於期末報告內容。	
(六)工法的考慮希望多元化和彈性，除了一般工程手段外，亦應考慮撤退和持續維護方案，以減少工程經費和量體負擔，另需留意視覺景觀效果。	感謝委員建議。 本計畫擬持續蒐集「撤退和持續維護」相關資料補充於期末報告，且於改善對策考量上，盡可能以較為「不影響景觀與人為活動」之工法為考量(例如：離岸潛堤、岬灣工法及養灘等)。	同意合作單位之說明與處理情形。
(七)侵蝕現象或許為某一時期現象，故不宜做太大或永久性的工程設施。	感謝委員建議。 本計畫於侵蝕改善對策考量上，盡可能以較為「不影響景觀與人為活動」之工法為考量(例如：離岸潛堤、岬灣工法及養灘等)。	同意合作單位之說明與處理情形。
二、蔡政翰委員		
(一)2-14 頁 Shih et al.(2018)在參考文獻找不到。	感謝委員指正。將會於期末報告中補充該參考文獻。	同意辦理。
(二)建議給 1 張海岸線地圖標出報告中所有提到地名與溪流的位置，若 1 張不夠可分多張畫。如此應較容易閱讀此報告。	感謝委員建議。 擬繪製計畫區域圖資，並清楚標示計畫區地名、溪流及重要建物等相關資料，俾利提升本報告之易讀性。該圖資將於期末報告補充說明。	同意辦理。
(三)4-9 頁提到大武漁港淤積的改善，此計畫擬以情境模擬評估漁	感謝委員建議。 本計畫擬針對「迂迴供沙」(sand by passing)工法，	同意辦理。

港北側突堤攔沙效果與南岸養灘區的成效。不過如圖 3.1.1 所示過去已經多次以興建或延長防波堤、北攔沙提與南側突堤等工法都沒有效果，現在大武漁港出口還是堵塞住，我猜不管如何作情境模擬(過去已經做很多了)還是沒辦法解決問題。是否考慮用 sand by passing system 的方法,就是用 pump 將沙從堆積側送到下游側，並加上在港口處定期挖沙再送到下游側。Sand by pass 只是將原本應漂往下游但被海岸結構擋住的沙送往結構物的下游。Sand by pass 在美國是經常使用的方法，另此報告也顯示南岸養灘處似乎有穩定的現象，這更說明用 sand by pass 的方法應該可行，假如不超過此計畫的工作範圍，可稍為評估需 pump 多少流量的沙才足夠，並作出建議。(此影片是澳洲的案例：https://www.youtube.com/watch?v=18Q8RLiLZEw)。	進行資料蒐集，並進一步分析該工法於大武漁港施行之可能作法。相關內容將於期末報告補充說明。	

三、陳文俊委員		
(一)期中報告內容完整，已符合期中進度要求，給予團隊及主辦單位肯定。	感謝委員肯定。	
(二)有關改善對策蒐集中，針對溯升及越波有蒐集葡萄牙之溯升預警系統，建議了解該系統中有關溯升及越波估算公式為何？又其預警之門檻值為何？如欲使用臺東海岸公路沿岸之預警是否適用？	感謝委員意見。 該系統中，溯升及越波主要是透過經驗公式與類神經網路法進行估算，詳細內容會於期末報告進行補充。	同意辦理。
(三)團隊所統計出目前416K+500-443K+000之範圍內有評估出溢淹及侵蝕之潛勢區，不知其溯升高度及侵蝕幅度大致多少？概如致災機率不大，且侵蝕量或越波量不大之處，可以持續觀察或堤址消能增強即可減低越波及侵蝕之潛勢，概東部海岸坡度較陡，只以硬式結構物作為災害減緩對策並非適當。	感謝委員意見。 依據本計畫目前潛勢分析成果，可知最大溯升高度概約15m~16m，而相對應之公路高程約為10m～13m；而侵蝕潛勢概呈現2.21m～3.46m/yr之「中潛勢」趨勢。另，於浪襲或侵蝕改善對策考量上，盡可能以較為「柔性」之工法為考量(例如：離岸潛堤、岬灣工法及養灘等)。	同意合作單位之說明與處理情形。
(四)簡報第 21 頁中納入潛勢區域段似乎並非溯升高度高出公路高程較多之路段，不知原因為何？另所謂公路高程是指路面高程	感謝委員意見。 本計畫公路溢淹潛勢分析上，除考量溯升高度高於公路高程為溢淹條件外，另亦需考量發生該溯升高度位置與公路之距	同意合作單位之說明與處理情形。

亦或護欄高程？	離，若距離超過25m則不納入潛勢評估區域。另，本計畫所指公路工程，乃為運研所提供之路面高程資料。	
(五)本案之適宜東部海岸之解決方案應可考慮加強潛勢區之消能緩衝概念，比如加強公路邊坡或崖址之消能，或利用大武漁港浚挖之淤沙以 sand by pass 方式來增加緩衝寬度，或作為侵蝕潛勢段之沙源補充，則可減緩侵蝕段堤址淘刷機會，增加邊坡及崖坡之穩定亦可減緩越波機率，惟因權責問題，可以權責配合單位方式給予敘述。	感謝委員建議。 本計畫擬針對「公路邊坡或崖址之消能」方式與「迂迴供沙」(sand by passing)工法，進行資料蒐集，並進一步分析此些方式做為改善對策之可能性。	同意辦理。
(六)本計畫所模擬冬夏代表性波浪作用後之地形變化(大武漁港北側至南興路段南側)，0~10km 內之地形侵淤特性，輸沙邊界為何？概由模擬結果圖之模擬範圍之淤積會多於侵蝕，尤以夏季波浪之堆積量更明顯，建議是否考慮增加颱風風浪之模擬。	感謝委員建議。 於大武漁港周圍地形變遷模擬上，輸砂主要是給定大武溪之流量與濃度值做為輸砂之來源。另，本計畫擬擇選具代表性之颱風事件，做為極端條件進行災害特性分析，據此本計畫於工法效益與災害分析上將兼具「代表性情境」(季風條件)與「極端性情境」(颱風事件)之分析成果，藉以強化本計畫改善對策效益分析之完整性。	同意合作單位之說明與處理情形。

四、蘇青和委員		
(一)引用前期分析臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷之特性，發掘台 9 線公路易致災之區段資訊，並依分析結果標示「公路溢淹」、「侵蝕災害」及「淤積災害」三種災害類型潛勢區域，為提供研擬改善地形變遷因應對策重要依據。利用數值分析方法所得三種災害類型潛勢區域，建議再加強其他相關資訊之佐證，例如本年度於三工處訪談所提之實務現場經驗。	感謝委員建議。 本計畫於前期計畫中(臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究)中，已有配合擇選颱風事件，針對計畫區進行各數值模式之物理參數之驗證(例如：波高、潮位及地形變遷等)，惟於事件所造成「浪襲」、「侵蝕」及「淤積」災害現象，僅以情境條件推估之「潛勢分析」結果與三工處提供之現地致災經驗進行比較分析。為加強本計畫數值模擬之嚴謹度，擬挑選具代表性之颱風事件進行模擬，並使用災害特性分析結果與實際發生災害資料進行比對，以提升模式驗證之可靠度。	同意辦理。
(二)有關非工程改善對策研究，可增加如何強化本所建置「臺東海岸公路浪襲預警系統」相關效益，讓公路單位第一線人員，可容易獲得即時及預報性之封路輔助資訊，提高颱風期間用路人之安全性及便利性，降低行車風險。	感謝委員建議。 本計畫擬於期末報告中，補增「日本」於非工程手段之相關資料，因而將彙整本計畫之相關蒐集資料，並給予在地化加強之建議。相關資料將補充於期末報告內容。	同意辦理。
(三)有關短期工程改善對策研究，可著重於如何強化現有海岸保護	感謝委員建議。 本計畫擬針對「公路邊坡或崖址之消能」之方式進	同意辦理。

設施，如增加海堤或消波塊之保護效益，或延長其保護年限等措施或工法。	行相關資料蒐集，並進一步分析此些方式做為改善對策，提升公法效益性之可能性。	
(四)除評估利用草埔隧道粒石於大武漁港南側海岸養灘區域，中長期可能之地形變遷外，未來土方如果有流失之趨勢，建議可考慮引用「岬灣理論」進行強化保護這個養灘區域。	感謝委員建議。 本計畫擬針對「岬灣理論」之相關資料蒐集，進行相關資料蒐集，並進一步分析此些方式做為改善對策之可能性。	同意辦理。
(五)有關長期工程改善對策，可著重於利用結構物(突堤、離岸堤及潛堤等)，以同時改善「侵蝕災害」及「淤積災害」兩者為最佳策略目標，因經費、權責單位及環保等因素甚為複雜，需多方考量。	感謝委員建議。 為維持台9線海岸公路之景觀性，本計畫盡可能以較為「不影響景觀與人為活動」之工法為考量(例如：離岸潛堤、岬灣工法及養灘等)，進以評估各工法做為改善對策之效益性。	同意合作單位之說明與處理情形。
(六)改善現有大武漁港淤積災害，如何有效引導漂沙可順利移至南側海岸(侵蝕災害)，也是改善對策研究可加強之處。	感謝委員意見。 本計畫原擬訂針對大武漁港周圍進行目前養灘方式之合適性(包含現存草埔隧道塊石養灘、漁港清淤之放置區域及突堤效用等)研討，應可瞭解大武漁港淤積與南側侵蝕之原因，本團隊擬再依據目前各委員提供之「迂迴供沙」(sand by passing) 工法之資訊，進行相關資料蒐集，與其做為改善對策可能性之評估。	同意辦理。

(七)報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入英文摘要。	依委員意見辦理，將補充於期末報告內容。	同意辦理。
五、李俊穎委員		
(一)第 4.1.1(p4-3)加津林至多良段溯升高158m，似乎誤植，請再確認。	感謝委員指正，此確為本團隊誤植，將於期末報告修改。	同意辦理。
(二)在 5.2.2 漂沙模擬代表性波浪條件請補充於報告內(簡報已補充)，後續建議可再評估單一颱風案例分析。	感謝委員建議。 代表性波浪條件將補充於期末報告內容。另，本計畫擬擇選具代表性之颱風事件，做為極端條件進行災害特性分析，據此本計畫於工法效益與災害分析上將兼具「代表性情境」(季風條件)與「極端性情境」(颱風事件)之分析成果，藉以強化本計畫改善對策效益分析之完整性。	同意辦理。
(三)建議可增加蒐集有關日本海岸公路溢淹維管及工法資料。	感謝委員建議。 將於期末報告中，增補「日本」海岸公路溢淹維管與工法資料。	同意辦理。
六、羅冠顯委員		
(一)報告 P.4-3 里程標示(42117K+500~) 請研究團隊再確認。	感謝委員指正，此確為本團隊誤植，將於期末報告修改。	同意辦理。
(二)報告 P4-6 4.1.2「冬季代表性波浪」、「夏季代表性波浪」等模擬條件(如波高、波向及週期)如何給定，建議	感謝委員建議。 代表性波浪條件將補充於期末報告內容	同意辦理。

於文中說明。		
(三)改善對策或方案研擬(如擋土牆型式擇定)建議應先與三工處、台灣世曦等相關單位訪談。	感謝委員建議。 本計畫改善對策或方案研擬成果將與詢問相關單位之建議。	同意辦理。
(四)報告 P4-9 4.2 節提到將以COBRAS評估不同型式擋土牆阻擋波浪溢淹效益，請問模式 input 數值如何給定?是將其他模式輸出結果提供給COBRAS？	COBRAS於本計畫中，主要針對「斷面」型式進行模擬分析，其邊界條件與地形水深資料均由本計畫大範圍模式模擬結果，配合斷面模擬範圍，分別輸出水動力條件與地形條件所給定。	同意合作單位之說明與處理情形。

附錄五

期末審查意見回覆表

壹、時間：中華民國108年11月13日（星期三）下午13時00分

貳、地點：港研中心2樓簡報室

參、主持人：李科長俊穎(代)　　記錄：陳鈞彥

肆、出（列）席單位及人員：(略)

伍、主席致詞：(略)

陸、合作單位簡報：(略)

柒、審查委員意見與回覆表：

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
一、李俊穎委員		
(一)請參閱本所出版品印製規範調整摘要及結論與建議。	感謝委員意見，遵照辦理。	同意辦理。
(二)請蒐集補充南興段浪襲路段工程處已完成之計畫及採用工法(工程斷面圖、平面圖)相關資料作為參考。	感謝委員建議，將補充世曦工程計畫之工法斷面圖做為參考。參見圖3.1.1及圖3.2.5。	同意辦理。
(三)南興段所建議方案迂迴供沙，建議依過往紀錄提供每年預計疏濬量(可供沙量)，模擬資料不同位置條件下之量化數據，如拋沙後回淤量(比例)，以及迂迴供沙後除建議補沙位置外，建議提出適合工法以減緩沙子回淤情形。	感謝委員意見，將於修正報告中補充迂迴供砂相關說明，包含可供沙量、回淤量比例及適合搭配工法建議。參見5.2.3節。	同意辦理。
(四)多良段保護工法建議提供較詳細說明，如離岸潛堤佈置方式、原則及所提「就地取材」實際作為為何?請補充說明。	感謝委員意見，將於修正報告中補充離岸潛堤相關說明，包含佈置原則與測試案例。就地取材方面則會補充團隊蒐集離岸潛堤「就地取材」相關文獻資料，俾利未來工法參酌。參見5.3.2節。	同意辦理。
(五)請提供本所海報、成果簡報或動畫等呈現本案具體成果。	遵照辦理。	同意辦理。

二、陳文俊委員(請假)		
三、郭一羽委員(書面意見)		
(一)本研究計畫內容充實，有具體對策和成果。	感謝委員肯定。	
(二)本研究計畫成果與未來的執行，必須與臺東海岸防護計畫結合，故需與其有所協調和共識，並將本計畫成果納入其中，否則基於海岸法，計畫成果礙難執行。	感謝委員意見，於期末報告中2.2.2節已有彙入「臺東縣二級海岸防護整合規劃」(民國108年)中，與本計畫相關之資料，且針對兩計畫分析差異進行論述。該計畫分析成果與建議工法上與本計畫成果應有相似結論，且於本計畫中已有實際評估工法成效。	同意合作單位之說明與處理情形。
(三)臺東海岸防護計畫中似乎臺東海岸無暴潮溢淹災害，與本計畫研究內容有出入。	感謝委員意見，臺東海岸除三和海岸外，大多為「公路浪襲」災害，於本計畫中已有將「暴潮溢淹」災害修正為「公路浪襲」災害。	同意合作單位之說明與處理情形。
(四)重要圖示如圖 5.2.24 至圖 5.2.34，請放大，否則看不清楚。	感謝委員建議，遵照辦理。	同意辦理。
(五)第四章各路段之敘述，建議用表來說明，較容易明瞭。	感謝委員建議，將於修正報告中補充彙整表。參見表4.2.1。	同意辦理。
(六)臺東海岸之公路災情只存在於大武和多良，請以實際災情做確認，並災害類型請說明清楚。	已於期末報告中，補充4.1.3節「災害潛勢分析與歷史災害比較」，透過往昔在地經驗瞭解實際發生災害之路段，並與本計畫分析成果作比對。	同意合作單位之說明與處理情形。
(七)依本計畫對上述這兩個海岸區段做公路保護措施，此是否會殃及其他海岸地區，必須確認，這是海岸法所關注的議題。	感謝委員意見。 本計畫目前評估方向，均已公路為主要對象，而海岸災害與公路安全關係緊密，因	同意合作單位之說明與處理情形。

	而本計畫會以海岸災害防護方向切入，探討改善公路災害之對策。目前於改善對策上，本計畫有研提「短期」與「長期」兩種改善對策，短期對策是可立即執行，且對海域環境影響不大；而長期對策目前評估成果來看，對於公路災害與海岸災害均有減災之成效，惟其對策對海域環境影響重大，建議於實際執行前，仍須透過更詳細之背景資料和現調成果，才能完善改善對策之內容，降低對海岸環境之衝擊。	
(八)透明玻璃柵的引用立意甚佳，但其地段和長度是否能夠明確建議。	感謝委員建議，將於修正報告第六章補充說明。參見表6.0.1。	同意辦理。
(九)未來工程經費的負擔可能是公路局或水利署或漁業署，因此會有財務、社會或行政上的困難，本計畫無替代方案或其他方案選擇的彈性，似有所不足。	目前於改善對策上，本計畫有研提「短期」與「長期」兩種改善對策，短期對策是可立即執行，且對海域環境影響不大；而長期對策目前評估成果來看，對於公路災害與海岸災害均有減災之成效，惟其對策對海域環境影響重大，建議於實際執行前，仍須透過更詳細之背景資料和現調成果，才能完善改善對策之內容，降低對海岸環境之衝擊。	同意合作單位之說明與處理情形。
(十)非工程手段的應用希望有較強的著墨，其應只限於有災情發生可能的路段，且依路段不同，有各層級的管制和預警措施。	感謝委員意見，本計畫為兩年度執行，第一年度旨在分析台9線災害特性，及各路段災害潛勢；第二年度則是以前期計畫為基礎，針對可能致災路段進行對策評估。	同意合作單位之說明與處理情形。

四、簡仲璟委員		
(一) P3-1 頁往昔海岸防護對策蒐集分析，為何僅以香蘭及大武為例？建議依本計畫研究範圍進行蒐集，圖 3.1.1 及表 3.1.2 之資料來源請補列機關單位名稱；尚武是否即大武？請查對並修正。	感謝委員意見。3.1節主要針對計畫區改善對策進行資料蒐集，而計畫範圍包含台9線濱海公路段，因而含括南興至三和之路段。目前針對海岸防護對策僅有蒐集香蘭段資料；港口災害則僅有大武漁港減淤對策。團隊將於修正報告再次補充南興路段目前防浪襲工程之相關資料，並嘗試蒐集其餘路段相關改善對策資料。現況分析主要是針對圖表資料來源與地名將查對並修正，並補充於修正報告。參見表3.1.1及表3.1.2。	同意合作單位之說明與處理情形。
(二)P4-1 災害發生之原因應該有較深入的分析及探討(是否前期計畫已辦理？若是則請擇要補充)？如此所研擬之改善對策才能對症下藥。	感謝委員意見，遵照辦理。 參見4.1.1節。	同意辦理。
(三)公路浪襲本研究定義為溯升高大於公路高程且公路在溯升位置 25 公尺內，此與波浪溯升或越波造成水體溢淹至路面之實際狀況是否接近？	本計畫評估路段浪襲潛勢，是採用數值模式推算近岸波高揚分布結果後，再由CEM經驗公式計算各斷面溯升及越波情況，因此當推算越波高度大於公路高程且其距離小於25公尺(網格精度範圍)內，則該路段納為浪襲潛勢區域。	同意合作單位之說明與處理情形。
(四)4.1.1 節，「越波量」、「越流量」、「溯升溢流量」是否同義？若是請統一，若不是請補充說明其差異。三個潛勢路段(南興至大武、加津林至多良、香蘭至三和)是否	感謝委員建議。 「越波量」、「越流量」、「溯升溢流量」為同義，將於修正報告統一用法。本計畫判斷是否滿足交通安全之越波量，	同意合作單位之說明與處理情形。

均為滿足交通安全之越流量？	其分級標準是引用CEM手冊資料，若要滿足交通安全標準，其越波量至少要低於5 x 10^{-4}(cms/m)。目前本計畫分析結果顯示，南興至多良路段，有納為「浪襲潛勢路段」的點位，大多未滿足交通安全標準越波量；香蘭至三和因公路高程普遍較高，因此僅有一處路段未滿足。	
(五)4.2 節，建議依 4.1.1 和 4.4.2 小節所述三個潛勢路段研擬改善對策，大武漁港之航道、港口淤積問題，非本研究臺東海岸公路的主要課題，海岸侵蝕造成海岸公路路基掏空或公路浪襲才是重點。	感謝委員意見。本計畫依據前期計畫區域，擇選兩路段來進行改善對策研擬，除災害潛勢考量外，亦因該兩區域背景資料取得較為齊全，進行細緻化模擬較具合理性。另大武漁港路段之改善對策，是以「降低公路災害為主，改善海岸環境為輔」為主要課題，因此改善對策中的迂迴供砂法，也是以探討是否能藉由大武漁港淤砂，降低台9線海岸侵蝕現象、淤砂養灘是否能提升防浪襲工法效益此兩議題為主軸，再而輔助討論此工法可否加值減緩大武漁港淤積問題。本團隊於修正報告撰寫上會再進行修改，以利報告重點強化。參見4.2節、5.2節及5.3節	同意合作單位之說明與處理情形。
(六)P5-43 養灘對公路浪襲的改善效果，建議可由養灘前後之地形比較做初步判斷，因此圖 5.2.29 請放大，並比較養灘前後地形差異及分析說明。此外養灘前及養灘後初始地形也應比較。文中「新地形」是否只世曦公司所提改善工	感謝委員意見，遵照辦理。將於修正報告中修改。參見5.2.4節	同意辦理。

法後之地形？若是建議改為「原地形」或「養灘前」。養灘後地形是指受多長時間隻波流潮作用？文中「若以追蹤波浪前緣來看，…，此與波能之消滅呈正相關」此段敘述語意不清，請補充修正。圖 5.2.33 僅圖示無相關說明。		
(七)改善對策應著重在降低公路浪襲與路基掏空災害，其他有關海岸侵蝕、淤積之海岸保護或大武漁港淤積課題，非本機關權責宜有說明。不過未來大武漁港的改善是否影響鄰近海岸公路的安全性應加以注意。	感謝委員意見。 本計畫確以「降低公路災害為主，改善海岸環境為輔」來進行研究，部分報告內容尚有不明確之處，本團隊會於修正報告撰寫上會再進行修改，以利報告重點強化。參見5.2節及5.3節	同意辦理。
五、蘇青和委員		
(一)致災區段分為「公路溢淹(浪襲)」、「侵蝕災害」及「淤積災害」等三類，模擬結果納入工程單位意見已做部分修正，但溢淹與浪襲機制不同，三和地段多為溢淹或浪襲應釐清。	感謝委員意見。 三和路段於暴潮潛勢，或是實際溢淹情況而言，應屬於暴潮溢淹現象，本團隊會於修正報告中描述清楚。參見P.4-5及P.4-17。	同意辦理。
(二)多良段與南興段為浪襲區段，也是重要改善對策評估區，文中使用「大武漁港周圍路段」之名稱建議更正，多良段與南興段之區段也建議做更明確的定義。	感謝委員意見，遵照辦理。參見5.2節及5.3節。	同意辦理。
(三)多良段因應策略在潛堤配置包括堤長、堤寬、間隔及個數安置設計，建議做較完整說明。	感謝委員建議，將於修正報告中補充離岸潛堤相關說明，包含佈置原則與測試案例。參見5.3.2節。	同意辦理。
(四)如何鋪設南興段在草埔隧道養灘段的土沙穩定，可增加補述。	感謝委員意見。依據目前迂迴供砂對策評估結果看來，將沙源補注至養灘段以南處，仍有部分漂砂會往北側	同意合作單位之說明與處理情形。

	移動，惟其量體已減少許多，而部分漂砂會於養灘區再次淤積，可以減緩養灘區持續侵蝕之現象。然，若要強化養灘段之穩定度，仍須再透過區域性的改善對策進行補強(例如：離岸潛堤或重新分配養灘級配)，才可能達至穩定之效果，相關論述將於修正報告中補充說明。參見P.5.32。	
(五)摘要及結論建議加強成果之論述。	感謝委員意見，遵照辦理。	同意辦理。
六、羅冠顯委員		
(一) P5-35，有關大武漁港颱風事件評估，建議可再增加幾場較俱代表性颱風案例列入分析探討。	感謝委員建議，本團隊於期中報告後，已依據所內提供海象資料擇選， 6場颱風事件(梅姬、尼伯特、莫蘭蒂、天兔、康芮及白鷺)進行模擬，其中以莫蘭蒂對東部影響較大，因此擇選此事件為代表性颱風案例。相關模擬結果將補充至附錄呈現。參見附錄三。	同意合作單位之說明與處理情形。
(二)P5-48，多良段颱風事件評估，建議可再增加幾場較俱代表性颱風案例列入分析探討。	感謝委員建議，本團隊於期中報告後，已依據所內提供海象資料擇選， 6場颱風事件(梅姬、尼伯特、莫蘭蒂、天兔、康芮及白鷺)進行模擬，其中以莫蘭蒂對東部影響較大，因此擇選此事件為代表性颱風案例。相關模擬結果將補充至附錄呈現。參見附錄三。	同意合作單位之說明與處理情形。
(三)P5-48，多良段「海岸侵蝕災害改善對策評估」、「浪襲改善對策評	感謝委員建議，將於修正報告中補充離岸潛堤相關說	同意辦理。

估」，建議再增加論述內容。	明，包含佈置原則與測試案例。參見5.3.2節及5.3.3節。	
(四)P7-1，結論建議章節，建請依本所規定編排撰寫	感謝委員意見，遵照辦理。	同意辦理。

附錄六

期末審查簡報資料

交通部運輸研究所港灣技術研究中心

交通部運輸研究所

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

期末報告 審查簡報

計畫主持人：蕭士俊 教授
協同主持人：吳昀達 助理教授
協同主持人：吳漢倫 博士後研究員
協同主持人：陳彥龍 博士後研究員

成大水利及海洋工程學系
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

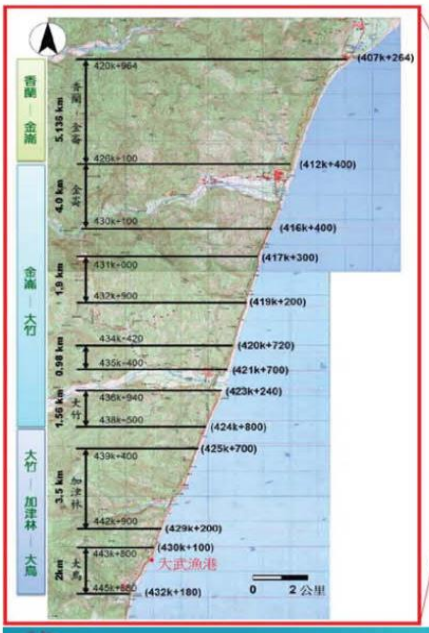
執行單位：國立成功大學

中華民國108年11月13日

簡報大綱

- 計畫緣起與目的
- 進度說明
- 改善對策資料蒐集
- 計畫區現況分析
- 易致災潛勢區因應對策分析
- 對策可行性評估
- 適合改善對策建議
- 結論與建議

計畫緣起與目的



花東地區與南部高屏地區之主要運輸交通幹道

↓

受制於地形地勢之限制，道路有設計標準偏低

↓

執行道路拓寬工程
(建設期程100年至106年)

↓

有評估道路拓寬後影響之必要性

↓

公路浪襲評估　地形變遷評估

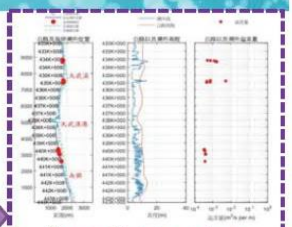
計畫緣起與目的

前期計畫成果–臺東海岸公路溢淹及沿岸地形變遷特性研究

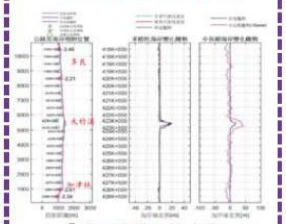
資料分析
- 現勘作業
- 資料蒐集
- 影像分析

數值評估
- 遠域模式
- 中域模式
- 近域模式

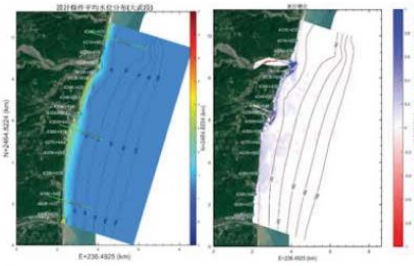
災害分析
- 公路浪襲
- 侵蝕災害
- 淤積災害



「公路浪襲災害」分布圖



「侵淤災害」分布圖



- 劃分可能致災潛勢區域。
- 繪製相關圖資。

計畫緣起與目的

計畫目的–臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

改善工法資料分析
- 公路浪襲
- 侵蝕災害
- 淤積災害

加強現況瞭解
- 對策蒐集
- 現況勘查
- 現況工法研討

對策研擬與建議
- 對策研擬
- 數值評估
- 可行性分析

- 強化國內外改善工法瞭解
- 現況對策瞭解與分析
- 研擬改善對策
- 改善對策可行性評估
- 適合改善對策建議

工作進度規劃

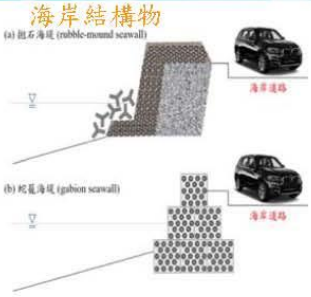
預定進度
達成進度

工作內容項目	月次	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	年別	108											
	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(一)改善對策資料蒐集													
(二)計畫區現況分析													
(三)易致災區潛勢區因應對策分析													
(四)對策可行性評估													
(五)適合改善對策建議													
(六)報告撰寫			▲				▲				▲		▲
預定進度累積百分比（%）		-	5	15	25	35	45	55	65	75	85	90	100

查核點(▲)	預定查核點	查核點內容說明
1	第1季	政府部門研究計畫基本資料表登錄
2	第2季	期中報告初稿
3	第3季	期末報告初稿
4	第4季	成果報告修正及經費支出報告表

改善對策資料蒐集

海岸結構物



迂迴供砂

工程對策蒐集

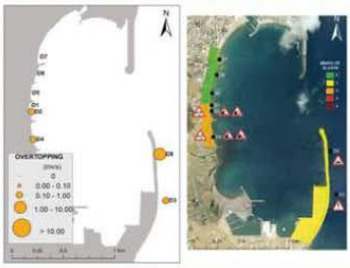
- 因應浪襲災害
- 因應侵蝕災害
- 因應淤積災害
- 因應侵蝕/淤積災害
- 因應氣候變遷衝擊

對策蒐集

非工程對策蒐集

- 國外非工程對策
- 國內非工程對策

葡萄牙海岸越波災害預警系統



改善對策資料蒐集

工程對策資料蒐集

工法資料蒐集

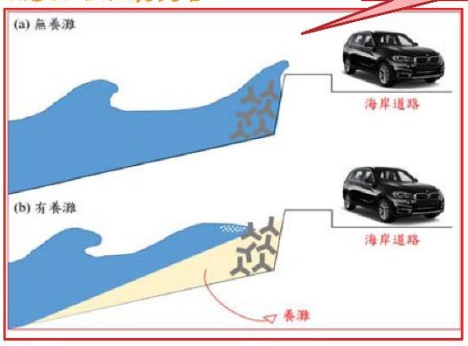
- **公路浪襲**
  - 人工養灘
  - 海岸結構物
- **侵蝕災害**
  - 混合鵝卵石、礫石與砂石之養灘
  - 使用砂袋/砂管減緩海岸侵蝕
  - 離岸堤、潛堤
- **淤積災害**
  - 透過導流牆改變流場運動

改善對策資料蒐集

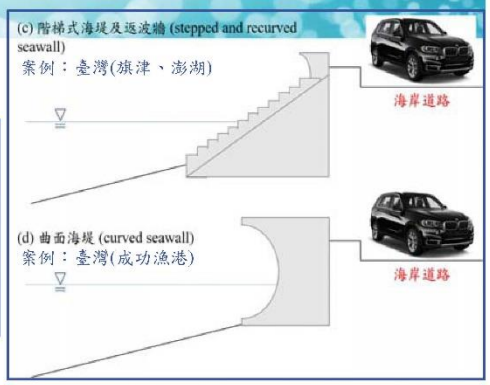
工程對策資料蒐集

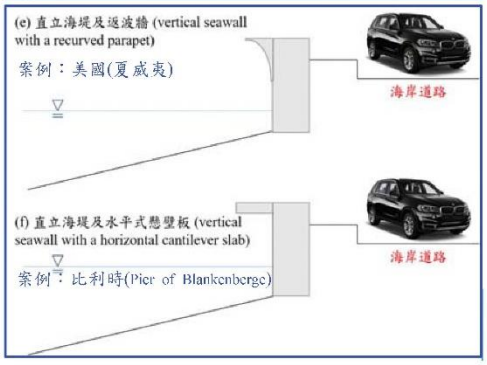
因應公路浪襲災害

人工養灘



海岸結構物

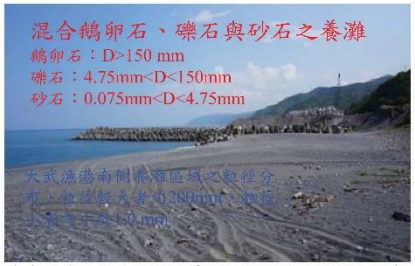




改善對策資料蒐集

工程對策資料蒐集

因應海岸侵蝕災害



臺東大武漁港南側利用草埔隧道開挖之砂石進行養灘

- 多孔性
- 削減波能
- 自然調整海灘地形
- 具砂源流失之風險

以砂袋/砂管作為減緩海岸侵蝕之工法

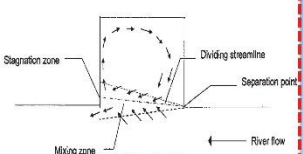
- 固定砂源
- 削減波能
- 砂包型式彈性

花蓮南濱、化仁海岸潛堤　旗津海岸潛堤

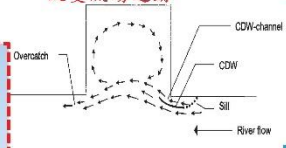
- 降低堤後波浪及流速
- 削減波能
- 親水特性

因應海岸淤積災害

臺東大武漁港航道淤積嚴重



以導流牆方式改變流場運動



興建導流牆(CDW)用以改善港口淤砂之示意圖(德國漢堡的Parkhafen港案例)

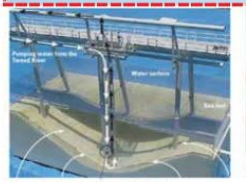
- 改變流場運動行為
- 改變原易淤積區位
- 減少港口淤砂

改善對策資料蒐集

工程對策資料蒐集

因應侵蝕/淤積災害-迂迴供砂

迂迴供砂法，是以人為方式將累積於港口、灘岸或航道的淤砂傳輸至下游側海岸，以減少下游側海岸侵蝕，及上游側海岸長期淤積影響港灣運行之災害。



因應氣候變遷衝擊-海岸友善工法

因應氣候變遷衝擊，藉由混和硬性工法和柔性工法及調適對策，能最大限度的降低海岸災害風險。

- 沙洲
- 濕地

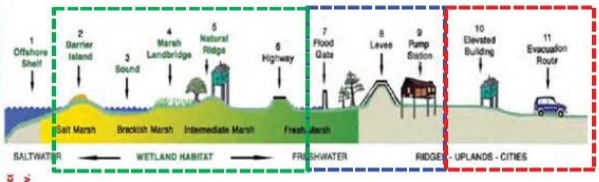
柔性工法

- 堤防
- 抽水設備

硬性工法

- 架高
- 後撤

調適對策



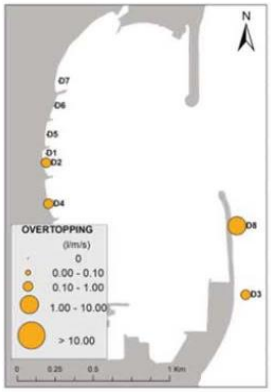
Source: www.

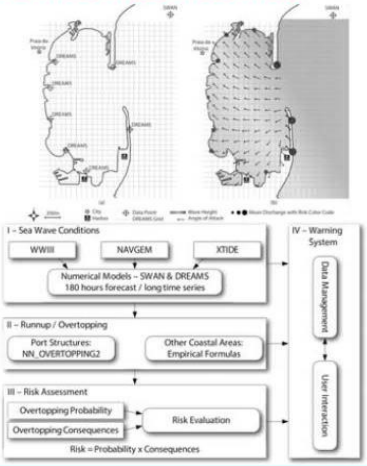
改善對策資料蒐集

非工程對策資料蒐集

國外非工程對策

於葡萄牙海岸越波災害管理方式中，有發展一套越波預警系統。該系統整合多套波浪模式，包含大範圍外海波高模擬，傳遞至近岸之計算，再透過類神經網路或經驗公式等計算溯升、越波及浪襲，可針對港灣與海岸公路進行災害預警效果。





Wave Overtopping Analysis and Early Warning Forecast System, Sabino et al. (2014)

改善對策資料蒐集
非工程對策資料蒐集

國外非工程對策

- 日本地理條件與臺灣相似，亦經常有波浪侵襲公路的問題。
- 於公路沿岸安裝越波計與監視裝置，即時接收越波水位高度與現地浪襲情況，藉以越波警戒與應變所用。
- 當預報有浪襲災害時，該路段會透過警示告牌，提醒駕駛人員注意車速與行車安全。

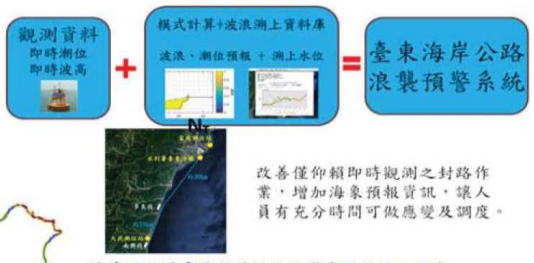
Sonic Corporation

改善對策資料蒐集
非工程對策資料蒐集

國內非工程對策

經濟部水利署

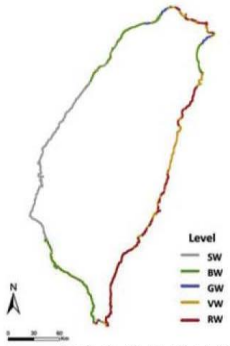
一級、二級海岸防護區位示意圖



改善僅仰賴即時觀測之封路作業，增加海象預報資訊，讓人員有充分時間可做應變及調度。

海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究

臺東海岸公路浪襲預警系統



颱風波浪風險地圖

Generating potential risk maps for typhoon-induced waves along the coast of Taiwan
Shih et al. (2018)

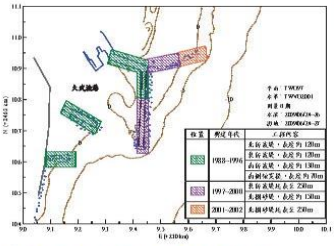
- 大多針對海岸風險進行評估
- 海岸風險與海岸公路災害相關
- 公路預警系統目前以斷面預警為主

計畫區現況分析
往昔改善對策蒐集與分析

- 海岸防護對策：為提高沿岸土地對颱風巨浪之防護能力。
- 港口減淤對策：大武漁港淤積造成船隻通行困難，進而影響漁民生計，減淤對策持續進行。

臺東海岸尚武段海岸環境與防護措施概述表

地理區段	地理位置	海岸防護構造物類型	
大武溪以北	大武溪北側	崖腳消波防護工	消波塊沿岸約0.5公里長度，崖腳處鋪設10噸天允消波塊
大武溪至朝庸溪	大武溪南側	崖腳消波防護工	消波塊沿岸約1公里長度，崖腳處鋪設4排10噸林克消波塊
		無	---
	朝庸溪北側	崖腳消波防護工	沿岸約1公里長度，崖腳處鋪設4排10噸林克消波塊
	朝庸溪出海口	導流堤	朝庸溪出海口導流堤2座，其長度約為60公尺
大武漁港	大武漁港北防波堤處	柵砂堤	漁港北防波堤海側乙座柵砂堤，其長度約為250公尺
	大武漁港南側	短突堤	漁港南側1座短突堤，其長度約為80公尺
大武漁港至南興溪	大武漁港南側	崖腳消波防護工	沿岸約1.2公里長度，崖腳處鋪設亂拋10噸消波塊
南興溪至安朔溪	南興溪北側	無	---
	安朔溪北側	無	---



臺東海岸（尚武段）監測調查計畫

大武漁港各防護設施興建年份示

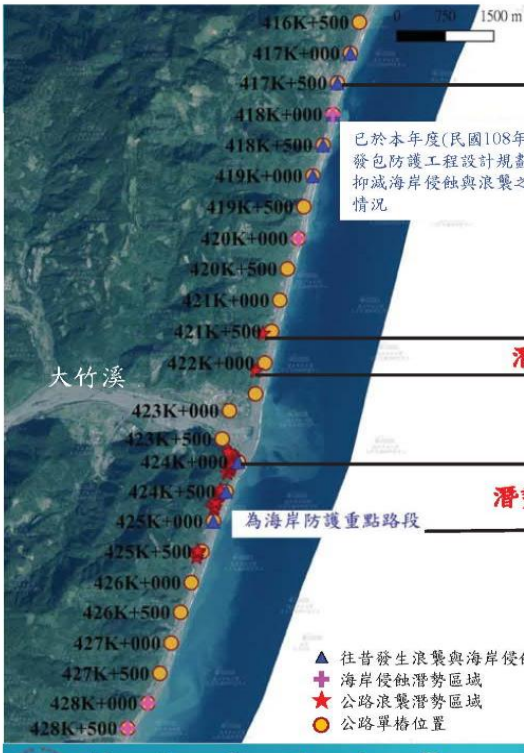
海岸歷年海岸防護工程施作概要（以香蘭海岸為例）

年度(民國)	工程名稱	工程內容	位置桿號(海岸里程)
77年	臺東縣香蘭海堤工程(新建)	海堤消波工295公尺 六角塊兩層排列	0+000~0+295 (2K+325~2K+030)
81年	臺東縣香蘭海堤工程(加強)	原部分消波工損壞修復，並延長加強90公尺 六角塊兩層排列	0+000~0+385 (2K+325~1K+940)
81年	臺東縣香蘭海堤工程(延長)	修復並加強擴大保護範圍215公尺 基礎15噸元鼎塊排列 上層六角塊兩層排列	0+385~0+600 (1K+940~1K+725)
84年	香蘭海岸保護工工程(延建)	海岸保護工356公尺 基礎10噸三腳鼎塊排列 上層以天允塊兩層排列	0+620~0+976 (1K+705~1K+349) (現存0+620~0+855)
93年	太麻里段海岸復育及環境營造工程	香蘭海岸保護工重新吊放二處(以10噸混凝土蜂巢塊五層吊排)	0+70~0+84與 0+295~0+399 (2K+255~2K+241 與2K+030~1K+926)
98年	香蘭海岸環境營造工程	原15噸混凝土六角塊往前吊放作為短突堤，每75公尺一座，共七座	0-075(No.4),0+000(No.1), 0+075(No.2),0+150(No.3), 0+300(No.5),0+450(No.7) 0+525(No.6)
		原位置新設10噸級蜂巢塊五層排列	0+000~0+165與 0+172~0+300 (2K+325~2K+160 與2K+153~2K+025)
99年	太麻里海岸環境改善工程	修補香蘭海岸突堤2座 拋放15噸林克塊	0+450(No.7),0+525(No.6)

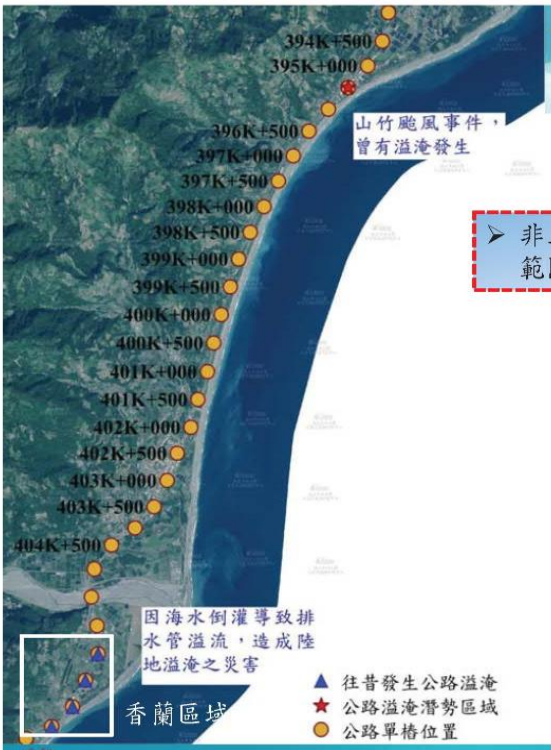
計畫區現況分析
現況勘查及現階段工法研討

- 工程設計單位訪談：瞭解現地實際浪襲與侵蝕情況與點位，並請教工法設計概念。
- 現勘作業：現地勘查及粒徑採樣。

- 大武漁港淤積為長期災害問題。
- 於大武漁港南側公路均評估為浪襲重點區域。



- 大竹溪以南均評估為浪襲重點區域。
- 417K+000~419K+000路段，三工處與世曦點區域評估為浪襲重點區域。
- 本計畫蒐集世曦水深地形資料，重新檢視417K+000~419K+000路段。



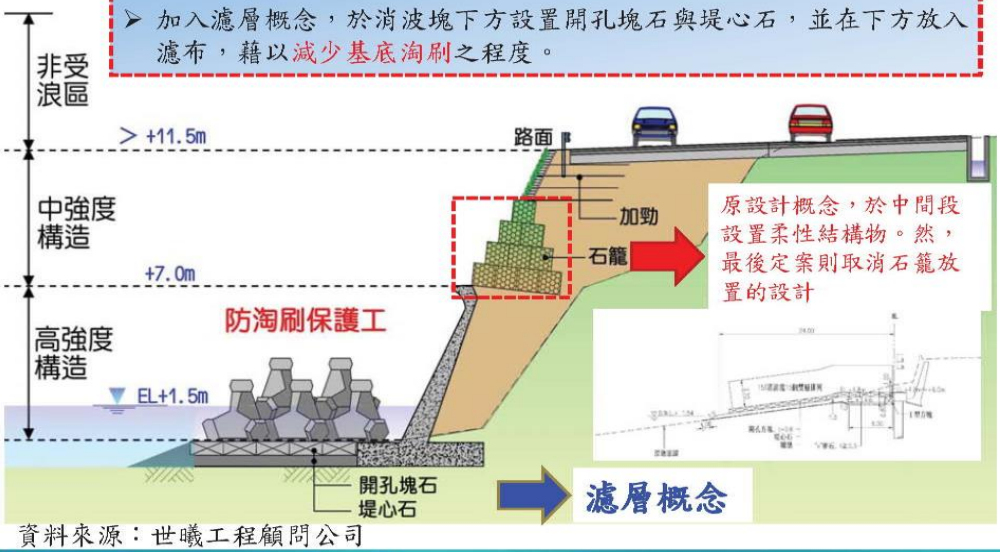
➢ 非三工處與世曦主要關注範圍

計畫區現況分析

現況勘查及現階段工法研討

➢ 以不改變現有擋土牆為主，透過消波塊舖設使波浪達到消能效果，降低波浪襲擊公路之目的。

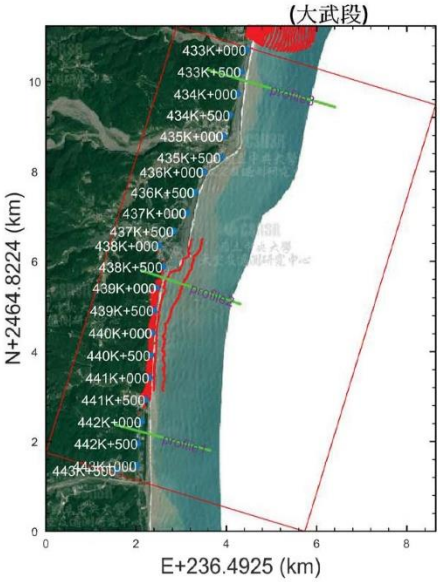
➢ 加入濾層概念，於消波塊下方設置開孔塊石與堤心石，並在下方放入濾布，藉以減少基底淘刷之程度。



資料來源：世曦工程顧問公司

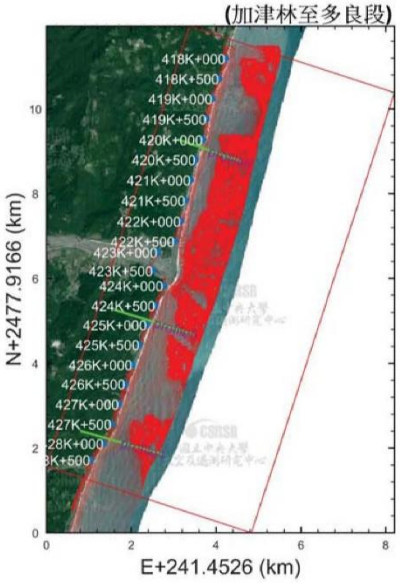
計畫區現況分析
現況勘查及現階段工法研討

(大武段)



世曦工程提供水深資料

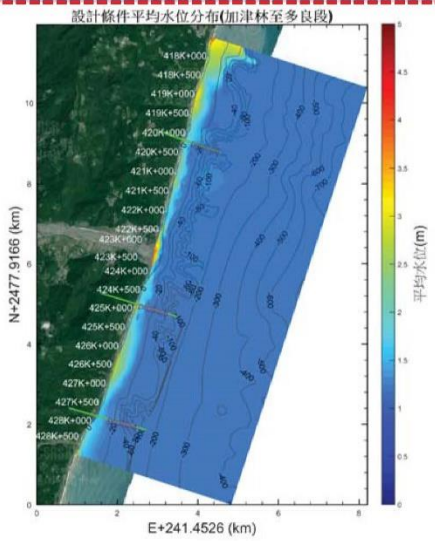
(加津林至多良段)



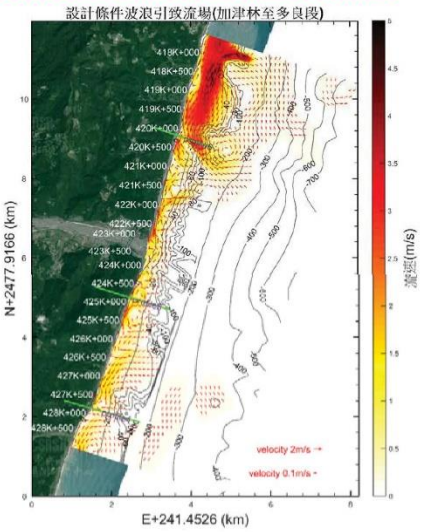
計畫區現況分析
現況勘查及現階段工法研討

導入世曦工程提供水深資料，重新分析加津林-多良路段之水位與流場分布。

設計條件平均水位分布(加津林至多良段)



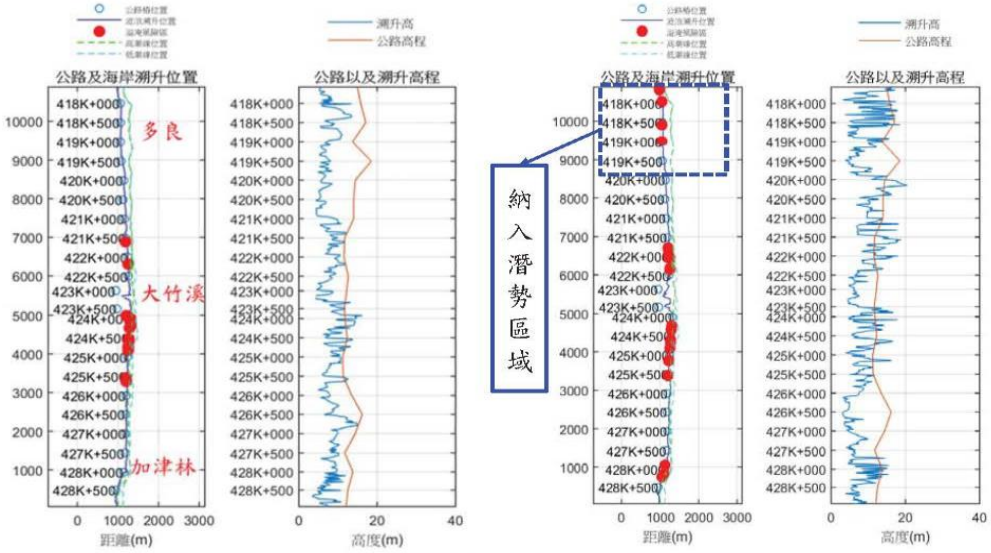
設計條件波浪引致流場(加津林至多良段)



計畫區現況分析

現況勘查及現階段工法研討

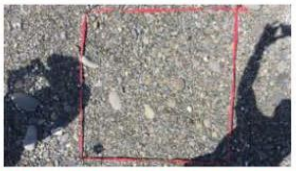
導入世曦工程提供水深資料，重新分析加津林-多良路段之可能浪襲災害潛勢分布。



計畫區現況分析

現況勘查及現階段工法研討

網格法



體積法

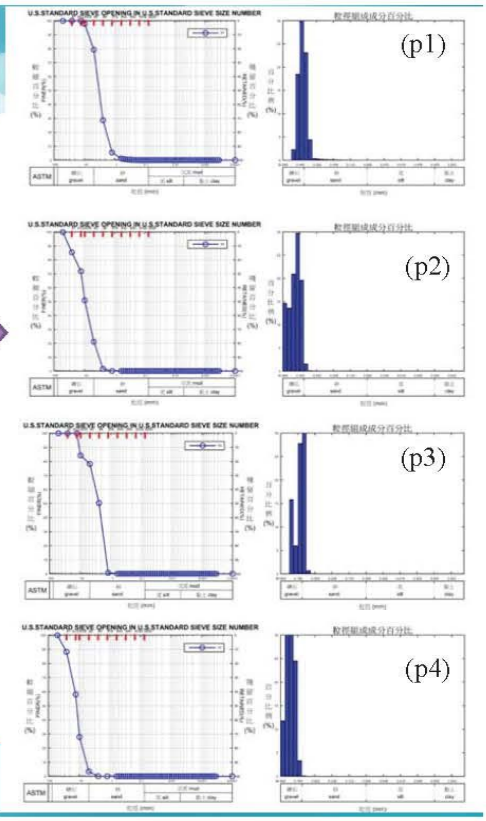
- 依據「河床質調查作業參考手冊」，利用「網格法」與「體積法」進行採樣作業

計畫區現況分析
現況勘查及現階段工法研討

大武漁港周邊採樣位置

體積法

篩分析

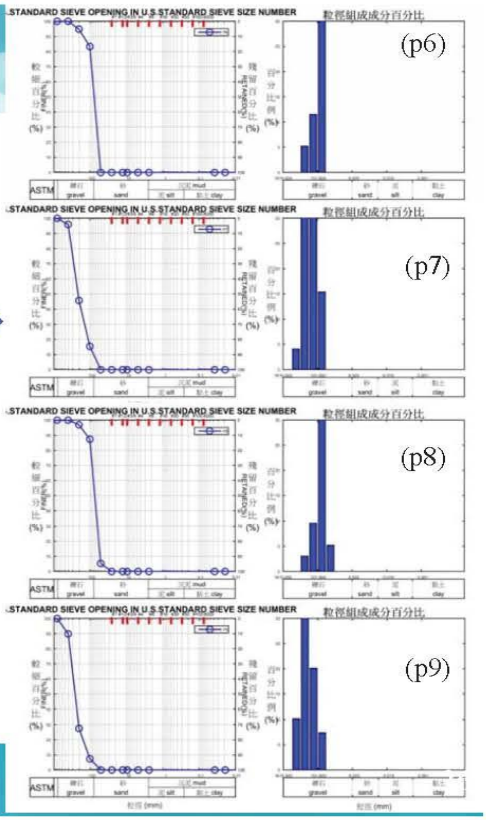


- 大武漁港周邊底質粒徑分布算是集中分布，整體而言大武漁港周邊海岸，以礫石以及粗砂為主。
- 底質中值粒徑介於2.79mm~13.04mm不等。
- 由底質粒徑大小可見，其海岸漂砂活動主要驅動力來至於波浪活動。

計畫區現況分析
現況勘查及現階段工法研討

大武漁港周邊(草埔隧道養灘底質)

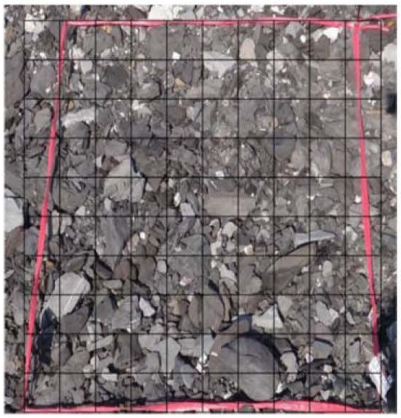
網格法



- 於大武漁港南側海岸，目前已利用草埔隧道開築工程之土石進行養灘工作，目視大多土砂之粒徑大於8cm。
- 隧道所浚挖之土石，中值粒徑介於80mm~200mm之間，以礫石為主。

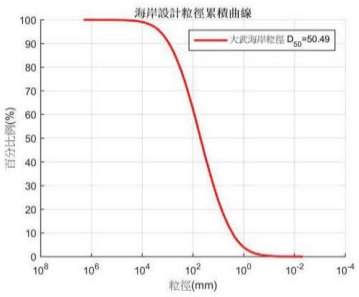
計畫區現況分析

現況勘查及現階段工法研討



網格法

體積法



模式輸入之粒徑

易致災潛勢區因應對策分析

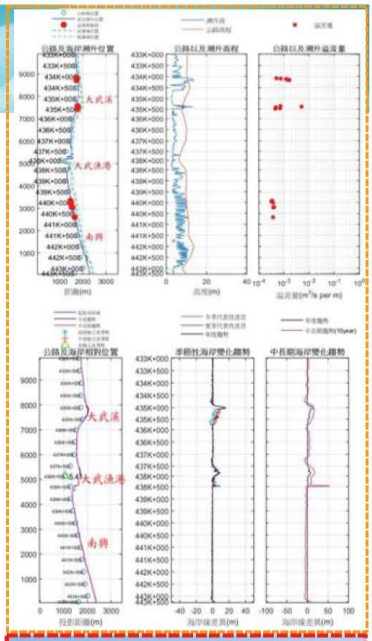
易致災潛勢區因應對策分析

現階段改善對策研討 → 易致災潛勢區說明 ← 前期計畫災害特性評估成果

工作討論會

欲規劃改善對策之區域確認

研擬改善因應對策 ← 工法資料蒐集與分析成果



- 以災害分析成果為基礎
- 參酌現況改善對策經驗
- 導入蒐集工法分析成果
- 研擬改善因應對策

研擬改善因應對策

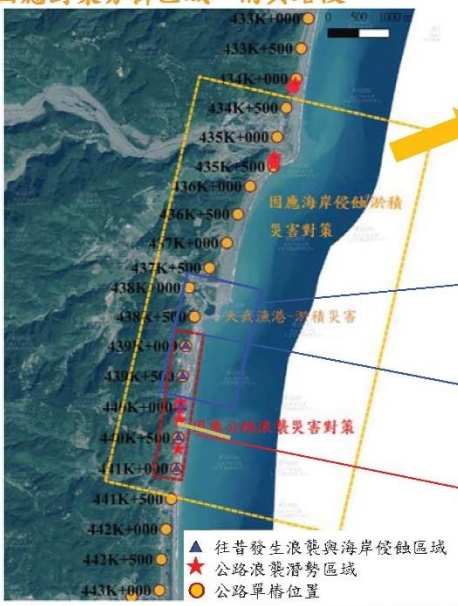
- 以改善「台九線公路」災害為基礎，進行對策研擬。
- 「直接」造成公路衝擊之災害，以「公路浪襲」為主。
- 以「南興路段」與「多良路段」為改善對策分析對象。
- 短期改善對策以「防制公路浪襲」為主。
- 長期改善對策以「強化防制公路浪襲為主，改善海岸環境為輔」。

本計畫改善對策概述表(工程手段)

區域	改善對策	評估內容
南興路段	短期改善對策：評估現有改善工法之成效。	波浪溯升高度和越波高度影響公路之可能性。
	長期改善對策：利用「迂迴供砂」法，改變大武漁港清淤土方放置點位，評估可否再利用於強化公路浪襲防治之可能性	漂砂傳輸變化、沿岸侵蝕與淤積變化。養灘前、後波浪越波之情況。
多良路段	短期改善對策：評估現有改善工法之成效。 長期改善對策：透過防侵蝕工法改善海岸侵蝕情況。	波浪溯升高度、越波高度、漂砂傳輸變化、沿岸侵蝕與淤積變化。

易致災潛勢區因應對策分析

因應對策分析區域－南興路段



計算範圍

評估大武漁港南側養灘中長期變化情況，對台九線之影響

評估大武漁港清淤放置區之影響性

- 評估設計波高之影響性(斷面分析)
- 比較現況與過往之差異
- 養灘效益評估(抑制浪襲效益、漂砂變化趨勢)

地形變遷災害評估

易致災潛勢區因應對策分析

因應對策分析區域-多良路段

計算範圍

- 評估設計波高之影響性(斷面分析)

公路浪襲災害評估

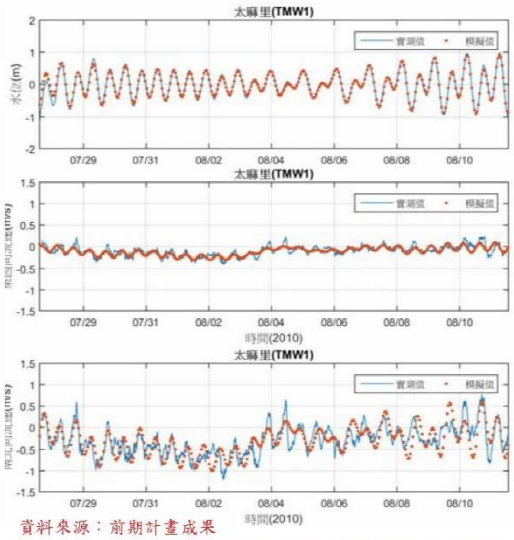
- 抑制海岸侵蝕對策評估
- 強化抑制公路浪襲成效

地形變遷災害評估

對策可行性評估

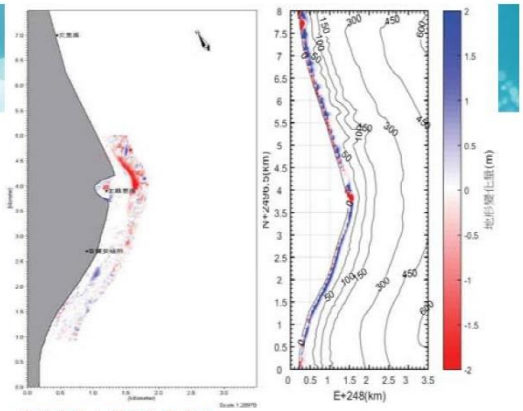
數值模式說明

模式驗證結果



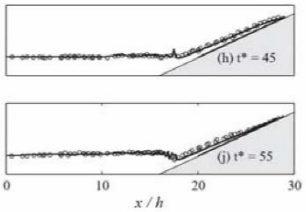
資料來源：前期計畫成果

CMS 水動力驗證結果 (水位及流場)



資料來源：前期計畫成果

CMS 及PTM地形變遷驗證結果



資料來源：本團隊過往成果

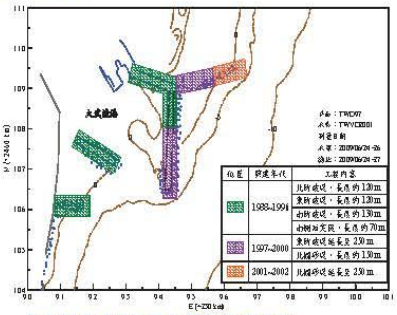
孤立波溯升試驗(Synolalis, 1986)與COBRAS模式模擬結果

對策可行性評估

對策評估

因應對策分析區域

(南興路段)



臺東海岸（南武段）監測調查計畫

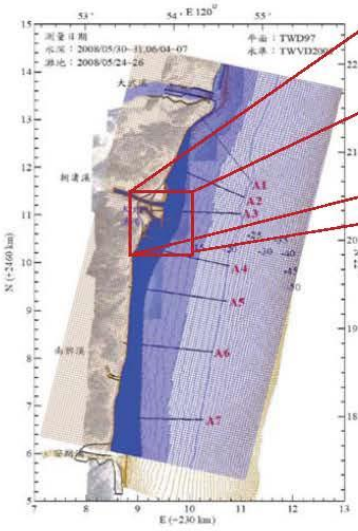
大武漁港各防護設施興建年份示意圖

- 透過多年的改善工法對策，雖抑制大武漁港南側海岸侵蝕災害，但大武漁港仍受長年淤積災害影響船隻通行。
- 分析目前養灘於中長期之變化是否影響台九線公路，建議大武漁港清淤置放點位，評估強化抑制浪襲之可能性。

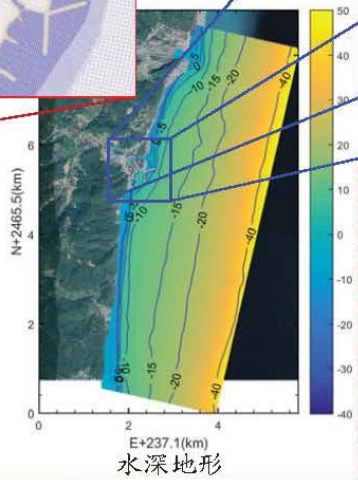
對策可行性評估

對策評估

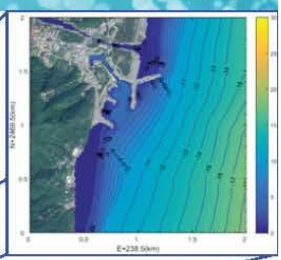
因應對策分析區域(南興路段)



大武漁港周圍評估網格範圍及配置



水深地形



- 外側網格 50m x 50m；近岸25m x 25m；大武漁港處 2.5m x 2.5m
- 為了分析港，大武漁港周邊海岸，於漁港計算地形條件設定上，先以大武漁港內清淤至5米水深來做計算

國立成功大學
National Cheng Kung University

對策可行性評估

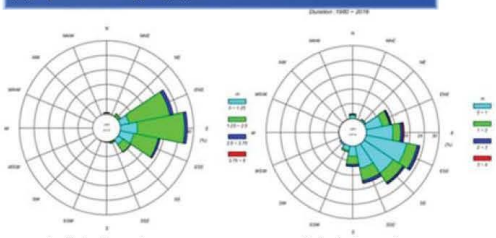
對策評估

因應對策分析區域

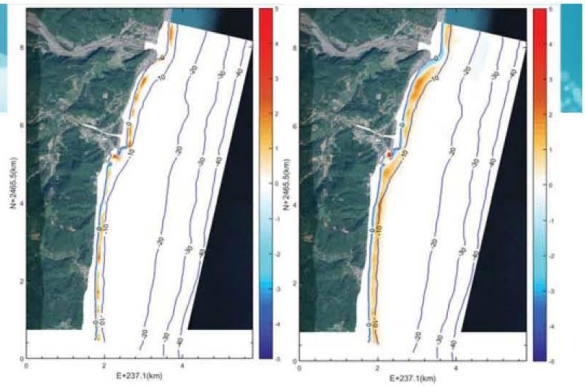
南興路段路段

- 南興路段養灘區域對台九線影響評估

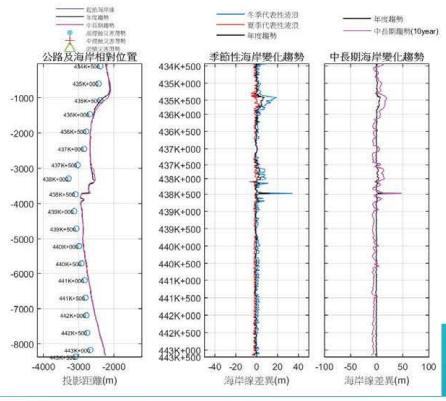
夏季季風代表性波高為1.43 m、週期為5.81 s主要波向ESE ；冬季代表性波高為1.74 m週期為6.44 s主要波向E。



冬季代表性波浪　　夏季代表性波浪



冬季代表性波浪　　夏季代表性波浪

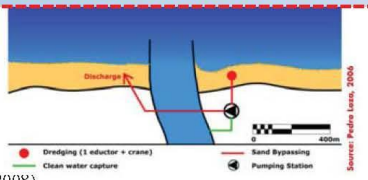


- 由現況粒徑分析結果可知，大武漁港周圍灘岸粒徑分布類型較廣。
- 於中長期地形變遷下，部分粒徑較小砂源仍有被水動力作動之可能性。
- 雖侵蝕趨勢不顯著，惟中長期趨勢下，仍有可能對台九線邊坡造成影響，需持續觀察該海岸變遷情況。

對策可行性評估

南興路段－清淤放置點評估(迂迴供砂工法)

港灣建設中，常用突堤或防波堤穩定航道，以致攔截海岸線沿岸流與漂砂，造成下游側海岸侵蝕災害。迂迴供砂法，則是以人為方式將累積於港口、灘岸或航道的淤砂傳輸至下游側海岸，以減少下游側海岸侵蝕，及上游側海岸長期淤積影響港灣運行之災害。



SAND BYPASSING SYSTEMS (2008)

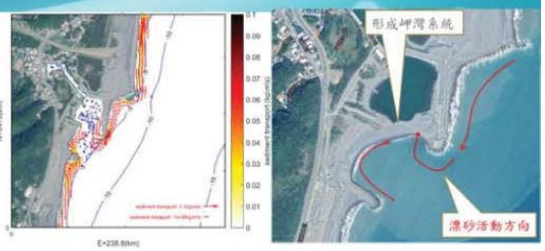
具彈性與機動性	運作模式	運作排程與容量
• 水域移動式系統(例如：浮動式挖泥船) • 陸域移動式系統(例如：陸上移動式挖泥機、噴射泵) • 固定式系統(例如：利用架設平台或防波堤)	• 攔截運作系統(Interception-mode systems) • 貯藏運作系統(Storage-mode systems)	• 連續運作 • 週期性運作 • 量體估算

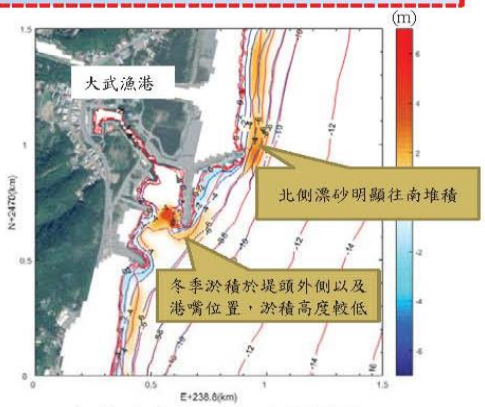
對策可行性評估

對策評估

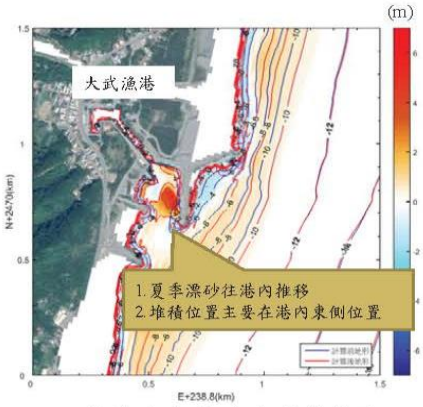
南興路段－清淤放置點評估(迂迴供砂工法)

- 冬夏季條件皆可造成大武漁港淤積
- 冬季以漁港外側以及港嘴淤積為主
- 於夏季在將外側淤積之砂源推入港內
- 南側突堤與東側突堤會形成岬灣系統，使漂砂更易累積漁港嘴周圍





冬季代表性波浪計算結果



夏季代表性波浪計算結果

對策可行性評估

對策評估

南興路段－清淤放置點評估(迂迴供砂工法)

大武漁港長期淤積現象

南側養灘區域仍有發生侵蝕趨勢之可能性

清淤土砂需有適合放置點

迂迴供砂法

漁港內淤砂挖至適合放置點進行養灘

減緩南側海岸侵蝕，降低衝擊台九線公路之可能性

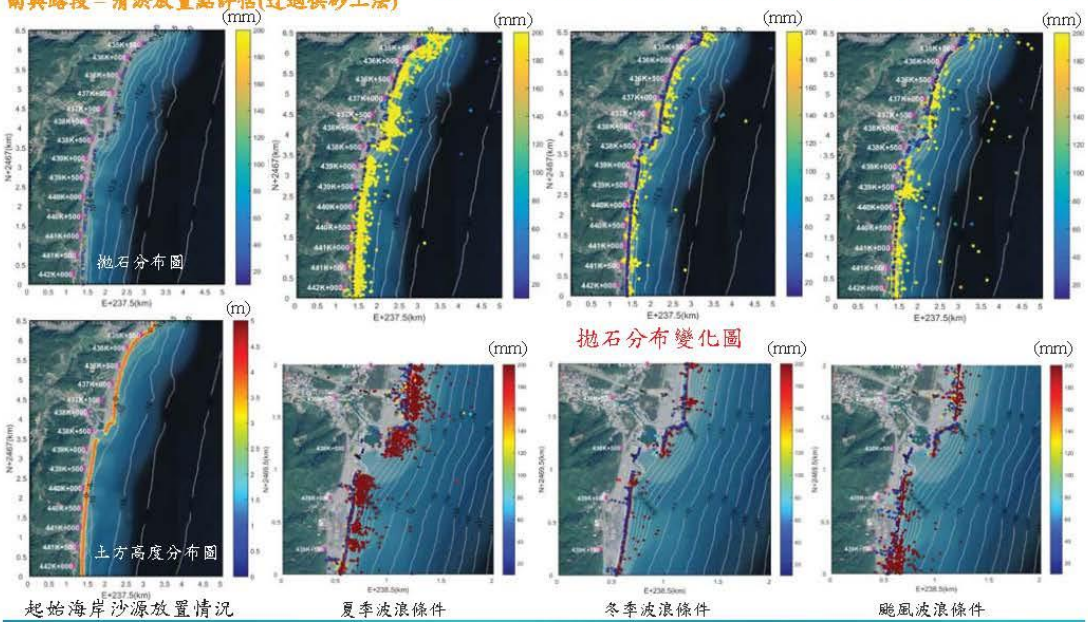
提升目前防制公路浪襲工法之成效之可能性

對策可行性評估

對策評估

- 先沿水深0米線放置拋石。
- 於夏季、冬季及颱風條件下，漁港周圍的拋石均會帶入港內造成淤積。

南興路段－清淤放置點評估(迂迴供砂工法)

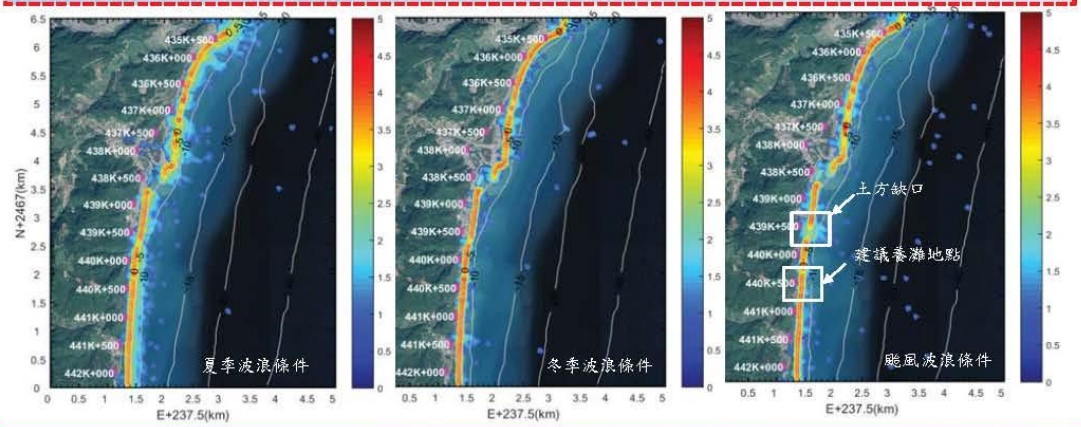


對策可行性評估

對策評估

南興路段－清淤放置點評估(迂迴供砂工法)

- 夏季與冬季雖傳輸拋石粒徑有所差異，但整體土方差異並不顯著。
- 颱風波浪條件作用下，於漁港南側會出現土方缺口。
- 建議可將清淤土方放置該土方缺口南側(440K+500路段)
  - ✓ 為防浪襲工程前方，可達抑制浪襲效果
  - ✓ 漂砂往北側帶動時，可減緩養灘區域侵蝕現象



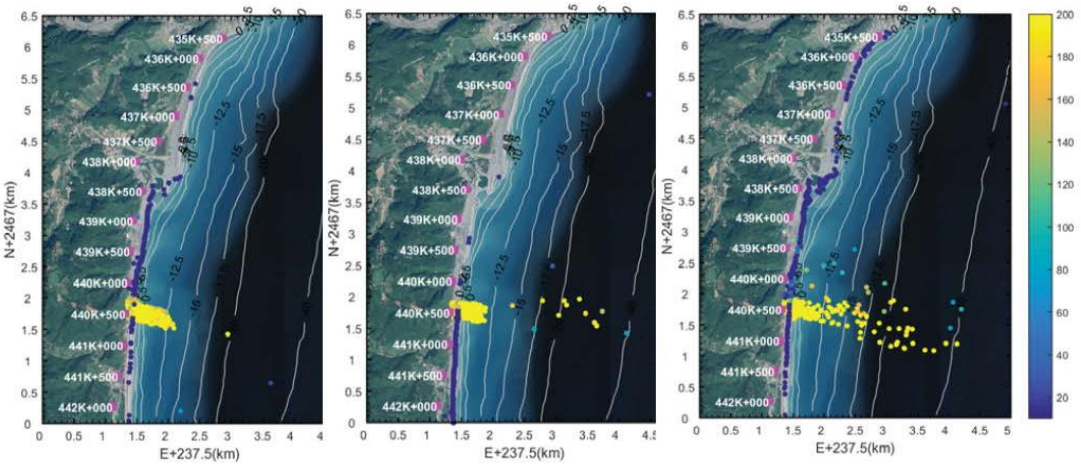
土方高度分布圖

對策可行性評估

對策評估

南興路段－清淤放置點評估(迂迴供砂工法)

- 粒徑較大之拋石，於夏季波浪與颱風波浪條件下，有往外海帶動之現象發生。
- 較小粒徑仍有機會帶至港內，颱風波浪條件又較夏季波浪條件明顯，惟其量體不多，仍應有減緩漁港嚴重淤積之成效



夏季波浪條件　　冬季波浪條件　　颱風波浪條件

各波浪條件拋砂養灘分布情況

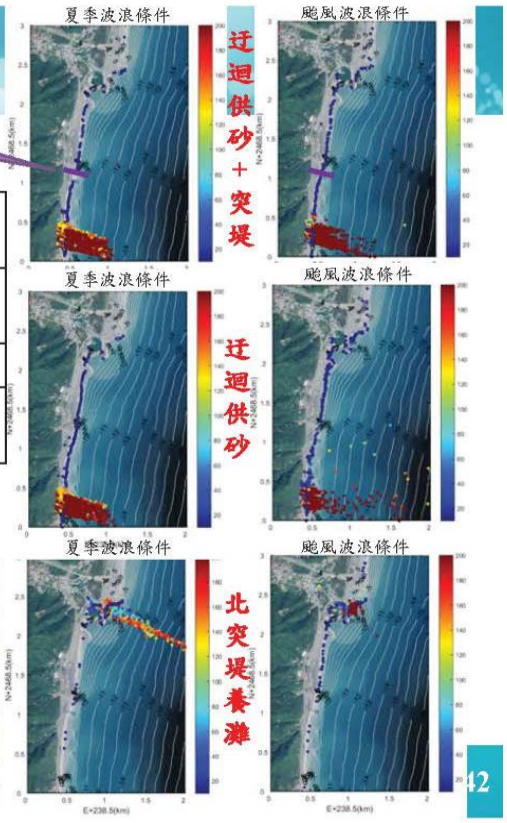
對策可行性評估

對策評估

建於439K+ 750路段
長度約200公尺

南興路段－
清淤放置點評估(迂迴供砂工法)及加設突堤工法

情境	夏季季風(回淤比例)	冬季季風(回淤比例)	颱風事件(回淤比例)
迂迴供砂+增設突堤	0.02 %	0.0 %	0.04 %
迂迴供砂	0.46 %	0.0 %	0.17 %
現況(北突堤養灘)	0.74 %	1.04%	1.10%



- 整體而言，迂迴供砂對策實施，應可有效降低清淤土方再帶回港內之機率。
- 迂迴供砂若再配合突堤設置，可更有效降低清淤土方帶回港內之量體。。

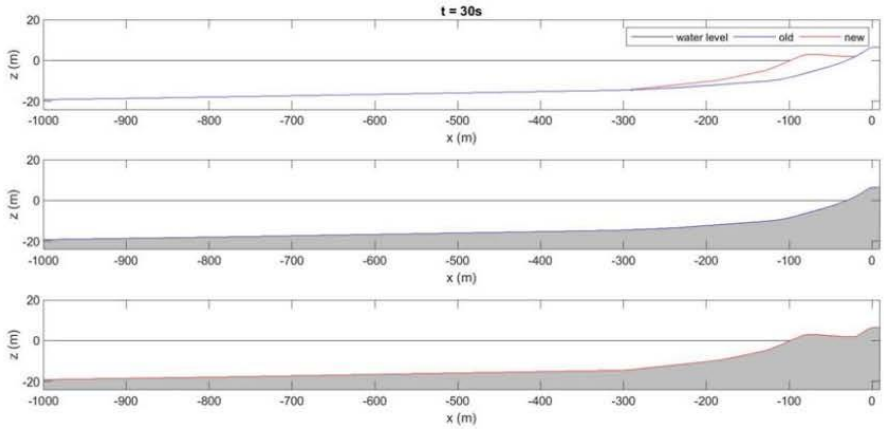
對策可行性評估

對策評估

南興路段－大武漁港南側浪襲改善對策評估(迂迴供砂工法)

- 目前該路段已有改善工法實施，因此本計畫將研討工法對浪襲改善之效益。
- 舊地形下，波浪碎波後之湧浪已相當接近公路，並躍上海岸公路。反之，施工後所延長之緩衝帶有效地消波，波浪無法越堤。

最大波高約為15.8公尺、週期12.5秒、潮位0.58公尺
(依據二維平面模式模擬莫蘭蒂事件結果)

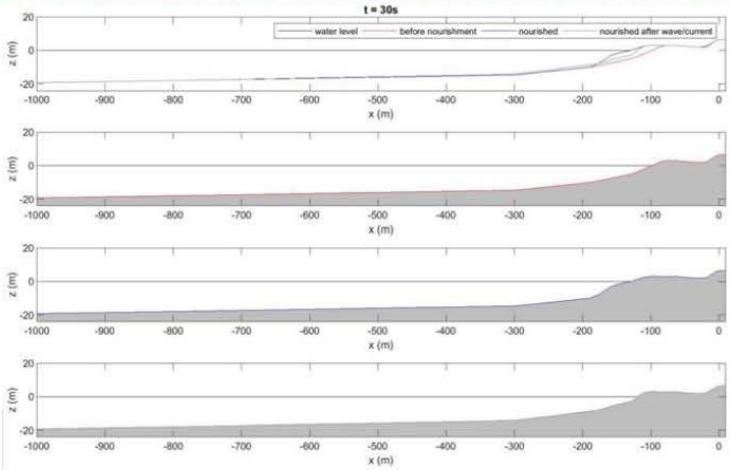


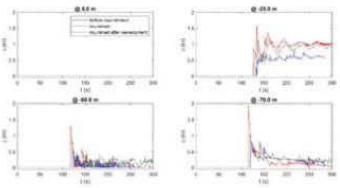
對策可行性評估

對策評估

南興路段－大武漁港南側浪襲改善對策評估(迂迴供砂工法)

- 利用挖取之砂石做為人工養灘砂源，評估提升抑制浪襲之效益。
- 大致而言，三個情況都不會造成公路浪襲的危害。
- 剛養灘後越波的量會較原本(未養灘之地形)來的小。
- 經波潮流作用後養灘坡度雖有變化，惟仍有減緩越波量，且因養灘關係使灘岸加長，會更避免公路受到波浪侵襲。





對策可行性評估

對策評估

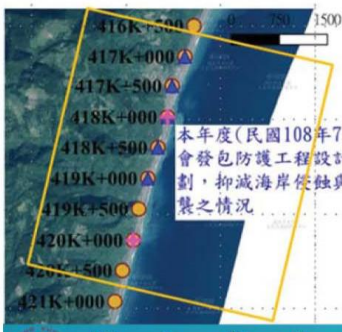
多良路段-海岸侵蝕改善工法

表 2-3 海岸保護對策工法之比較(中華顧問工程司，2000)

項目	離岸堤(群)	突堤(群)	人工沙灘	潛堤(礁)
向離岸型漂沙淤沙效果	尚可	尚可	佳(配合人工養灘效果更佳)	尚可
降低波高功能	佳	無	對固定波向較有效	佳(較大波高時需採加寬堤寬或數列潛堤)
對景觀衝擊程度	大	大	小	
堤後設施利用改變程度	有影響	有影響	可能有影響	
經費	高	普通	高	普通
施工性	海上	普通	高	海上
配合措施	人工養灘(用於沙源不足時)		人工養灘	人工養灘(用於沙源不足時)
漁民安全	夜間配置示標燈	影響低	夜間配置示標燈	有影響

➢ 考量海岸景觀特性，應可採用「離岸潛堤(礁)」做為較適合之改善對策。

➢ 為減緩浪襲災害，已有護岸與消波工法實行。



各種海岸保護方式之考量因子及其特點(中華顧問工程司，2000)

保護	防災面				利用面		環境面			備註
	波浪	高潮	津波	侵蝕	海洋性遊憩	其他(漁業)	背後環境	景觀	海水淨化	
高潮津波防波堤+規防、護岸(灣口防波堤組合人工島)	廣大水域穩靜	聯合抗浪	聯合抗浪	有效	可利用穩靜水域	可利用穩淨水域來養殖	因穩淨化可降低背後設施之高度	妨礙		通常為大規模
離岸堤+規防、護岸	有效	規防、護岸單獨抗浪	小規模時，規防、護岸單獨抗浪		若生成海灘可多方利用	有魚礁效果，影響漁船航行	的量降低背後設施之高度	需多考量	離岸堤具透氣效果、沙灘具擋氣效果	
潛堤+規防、護岸	對大波浪有效，但效果較離岸堤小		規防、護岸單獨抗浪			有魚礁效果，須注意鄰近漁場於機度漁船航行安全		較好	潛堤具透氣效果、沙灘具擋氣效果	潛堤頂寬一般均較離岸堤寬，易變成大\規模設施
規防、護岸+養灘	若養灘沙流出，則僅以規防、護岸抗浪			若養灘沙流出，則僅以規防、護岸抗浪		須注意鄰近漁場於機	若養灘沙流出，則效果會沒有		沙灘具擋氣效果	須注意養灘沙之穩定
離岸堤+規防護岸+養灘	若養灘沙穩定性高，可聯合抗浪			養灘沙穩定性高，可聯合抗浪	可創造出預計之沙灘向加以多方利用	有魚礁效果、影響漁船航行		需多考量	離岸堤具透氣效果、沙灘具擋氣效果	實績較多，除於自然條件較惡劣處外，技術已屬成熟
潛堤+規防、護岸+養灘	聯合抗浪				若以養灘為目的之設施，可創造出預計之沙灘			良好	潛堤具透氣效果、沙灘具擋氣效果	實績少，潛堤頂寬一般均較離岸堤寬，易變成大\規模設施
人工岩礁+規防、護岸(+養灘)										
人工砰、陸等+規防、護岸(+養灘)				各設施可合為一體系抗蝕	利用各設施之特性，可得預計之效果			不妨礙	沙灘具擋氣效果	不妨礙海岸景，可形成穩定性高之海灘，設施規模大

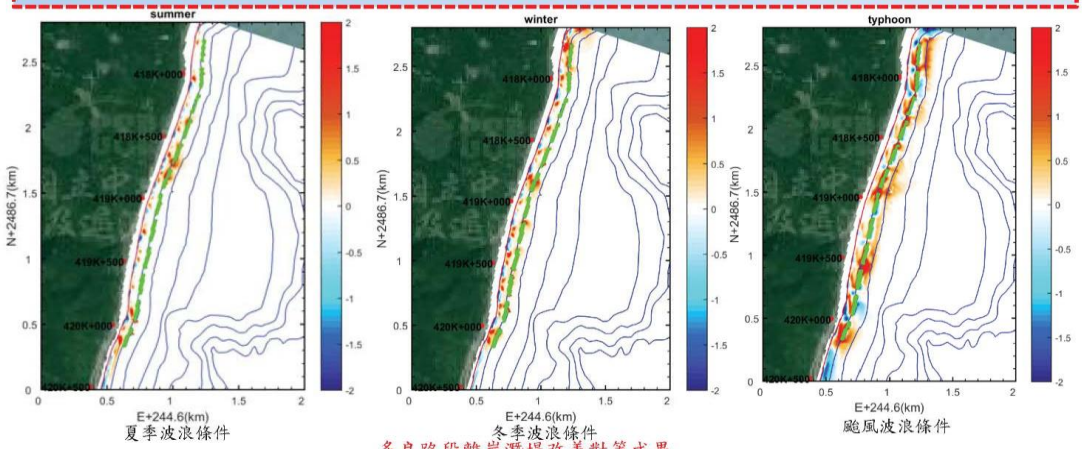
對策可行性評估

對策評估

多良路段-海岸侵蝕改善工法

➢ 目前潛堤配置分別為堤長150公尺、距離陸地約50~70公尺，潛堤靠岸處大致沿5米水深設置、堤間距50及堤寬15公尺，共12座。

➢ 潛堤後方可淤積漂砂形成潛沒灘岸，沿岸部分區域有局部侵蝕現象發生，整體潛堤部分區大致可呈現穩定平衡狀態，應有效降低海岸侵蝕對台九線公路之影響。



夏季波浪條件　冬季波浪條件　颱風波浪條件

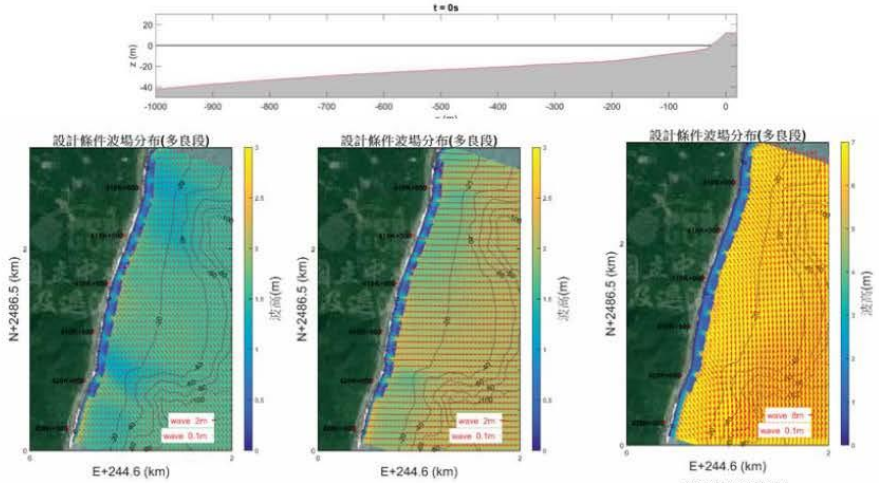
多良路段離岸潛堤改善對策成果

對策可行性評估

對策評估

多良路段-多良路段區域浪襲改善對策評估

- 波浪越過海岸道路之水層厚度僅約0.30公尺，但仍有波浪越堤之可能性，目前三工處亦已針對此區域進行浪襲改善對策之規劃。
- 潛堤工法設置於抑制浪襲工法前端海域，可提前削減波浪能量，降低浪襲之機率。



夏季波浪條件　　冬季波浪條件　　颱風波浪條件

適合改善對策建議

適合改善對策建議

路段	對策類型	建議
南興路段 (特殊案例對策)	工程手段	短期改善對策(439K+000～441K+000)： 1.目前防浪襲工法已有減緩公路浪襲之功效，且於重大災害事件後，均會進行重新檢視，以進行消波設施(消波塊)補強作業。 2.若需再強化浪襲防治效果，建議可提升公路護岸防治越波功能，例如：日本於海岸公路護岸端架設具一定高度之透明防波柵，可兼具防浪襲與景觀之功效。
		長期改善對策： 1.建議透過「迂迴供砂」方式，將大武漁港清於土方，導致養灘區域(草浦隧道粒石養灘區域)南側(約440K+500處)，藉以加強現有防治浪襲工法岸前消能效果，提升公路減災成效。 2.迂迴供砂對策建議採「陸運移動系統」，藉由目前清於工程所使用之「陸上機械動力設備」進行挖砂作業；再由「車具運輸法」，運至養灘區南側進行養灘工程。
多良路段 (特殊案例對策)	工程手段	短期改善對策(417K+000～419K+000)： 1.依據大武路段成功經驗，已規劃防治浪襲工程，應可有效抑治浪襲衝擊。 2.設置防波柵強化公路護岸防浪襲之效果。
		長期改善對策(417K+500～420K+000)： 1.運用「離岸潛堤」工法改善該路段海岸侵蝕之情況，透過工法養灘效果，可改善原有侵蝕災害之路段，並於海岸創造親水空間。此外，潛堤沒入海域，對公路景觀影響較不顯著。 2.離岸潛堤工法可以「人工魚礁」方式建置，使潛堤可達到防止侵蝕、削減波能及維持生態環境之功效。 3.潛堤材料盡量考量「現地取材」，藉此可降低工法對當地生態環境之衝擊。
台九線路段 (通案式對策)	非工程手段	1.建議可於既有的海象模擬作業化系統中，加入越波預警模組，以利針對海岸公路進行「面狀」浪襲預警並可含括港灣範圍，以提升整體預警功能，並強化防災撤退決策之可靠性。 2.因應氣候變遷衝擊，硬式防護對策雖可提供接近「防災」之效果，惟仍應強化災害預警系統能力與較全面性的風險評估，以提升防災韌性，降低公路災害。

結論與建議

結論：

- 已針對「工程對策」與「非工程對策」進行國內外相關資料蒐集。
- 為瞭解計畫區域現地情況(包含易致災區域位置、工法設計概念及改善區域現況等)，已辦理相關單位訪談與現地勘查作業。
- 依據相關單位之建議與工法設計經驗，已擬訂本計畫評估改善對策之區域範圍與內容並研提各改善對策評估方法。
- 大武漁港周圍路段於短期改善對策評估方面，以評估現有改善工法與往昔未實施改善工法之差異，以利瞭解改善工法之成效；長期改善對策方面，則建議採用「迂迴供砂」工法進行。
- 多良路段於短期改善對策評估方面，現況海岸情況雖仍有公路浪襲災害潛勢，惟已有規劃防制浪襲工程；長期改善對策方面，可考量運用潛堤工法針對海岸侵蝕路段進行改善。

建議：

- 若有更完整之地形資料，可提升數值模擬之精確度，對未來改善對策評估有所助益。
- 本計畫目前改善對策評估乃著重於工法功效，若要進一步研討改善對策之適用性，仍須深入探討對策之可行性(工程經費、施工環境影響及生態調查等)。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心

交通部運輸研究所

臺東海岸公路沿岸地形變遷因應對策研究

簡報完畢 敬請指正

國立成功大學
National Cheng Kung University

附錄七

台 9 線新舊里程樁號對照表

台九線南興段	
舊里程編號	對應的 2020 新里程編號
439K+700	422k+765
440K	423k+065
440K+260	423k+325
440K+500	423k+565
440K+740	423k+805
441K	424k+065
441K+240	424k+305

台九線多良段	
舊里程編號	對應的 2020 新里程編號
418K+660	401K+760
418K+700	401K+800
418K+860	401K+960
419K+060	402K+160
419K+100	402K+200
419K+140	402K+240
419K+580	402K+680
419K+600	402K+700
419K+620	402K+720
419K+660	402K+760
419K+720	402K+820
419K+820	402K+920