

114-019-7D88
MOTC-IOT-113- H1CA001g

港區地震液化風險評估模式 精進(3/5)-高雄港模式精進



交通部運輸研究所

中華民國 114 年 3 月

114-019-7D88
MOTC-IOT-113- H1CA001g

港區地震液化風險評估模式 精進(3/5)-高雄港模式精進

著者：曾文傑、賴俊呈

交通部運輸研究所

中華民國 114 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港區地震液化風險評估模式精進. (3/5) : 高雄港模式精進 / 曾文傑, 賴俊呈著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 114.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-531-646-4(平裝)

1.CST: 港埠管理 2.CST: 土壤液化 3.CST: 地層下陷 4.CST: 風險評估

443.2

114001719

港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

著者：曾文傑、賴俊呈

出版機關：交通部運輸研究所

地址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網址：www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 114 年 3 月

印刷者：綠凌興業社

版(刷)次冊數：初版一刷 50 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話：(02)2349-6789

國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話：(02)2518-0207

五南文化廣場：400002 臺中市區中山路 6 號•電話：(04)2226-0330

GPN：1011400208 ISBN：978-986-531-646-4(平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

港區地震液化風險評估模式精進(Ⅱ)－高雄港模式精進

交通部運輸研究所

GPN: 1011400208

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進			
國際標準書號 (或叢刊號) ISBN 978-986-531-646-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1011400208	運輸研究所出版品編號 114-019-7D88	計畫編號 MOTC-IOT-113-H1CA001g
主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：曾文傑 研究人員：賴俊呈 聯絡電話：04-26587200 傳真號碼：04-26571329			研究期間 自 113 年 1 月 至 113 年 12 月
關鍵詞：土壤液化、液化潛勢評估、震後沉陷量			
<p>摘要：</p> <p>考量災害防救法第 2 條明定土壤液化屬天然災害範圍，本計畫延續交通部運輸研究所運輸技術研究中心前期「港灣地區地工資料建檔及液化自動分析模組之建立」及「港灣地區地震監測與土壤液化潛勢評估之研究」成果，針對臺灣港務公司管轄商港，就現行耐震設計規範建議之評估方式，進行全面性液化潛勢評估，更新地工資料庫。</p> <p>本計畫延續運技中心前期「港灣地區地工資料建檔及液化自動分析模組之建立」及「港灣地區地震監測與土壤液化潛勢評估之研究」成果，針對港務公司管轄之西部商港，進行地工資料庫更新，111 年度與 112 年度已分別完成臺中港與臺北港相關液化分析，113 年度主要針對高雄港進行評估，並於原有液化評估法中，加入國內建築技術規則所列液化評估法及國際間採用之定值(deterministic)與機率(probabilistic)液化潛勢評估法，包括以 SPT-N 為指標之 NCEER 法、國震中心 HBF 法及 Cetin 機率法，對更新之地工資料庫進行不同地表加速度值下液化土層發生深度與範圍進行分析，並以 Ishihara and Yoshimine (1992)所建議之程序，推估自由場液化後沉陷量，結合更新之現地港區地震監測站，提供顯著地震後快速液化災損評估，提供液化範圍、深度與港區沉陷值，並及時通知相關管理人員，進行相關巡查與檢視。</p> <p>研究成果效益與應用：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.完成增加地工資料庫於高雄港之可用鑽探資料至 886 孔。 2.完成符合國內耐震設計規範之液化評估法，進行高雄港港區全面性液化潛勢評估。 3.完成推估高雄港港區不同等級地震發生之液化風險。 <p>提供政府單位應用情形：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.提供高雄港港區地震安全評估相關資訊，做為臺灣港務公司及高雄港務分公司辦理震後相關巡查、檢測及防救災決策之應用參考。 2.提供本所後續相關研究及臺灣港務公司及各分公司在港灣工程規劃、設計及施工之應用。 3.研究成果提供產官學研各界應用參考。 			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
114 年 3 月	150	200	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。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

Publication Name: Refinement for Seismic Liquefaction Risk Assessment Model for Port Area (3/5)-Refinement of Kaohsiung Port Model			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-646-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011400208	IOT SERIAL NUMBER 114-019-7D88	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-113-H1CA001g
DIDIVISION: Transportation Technology Research Center DIDIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Chieh Tseng PROJECT STAFF: Chun-Cheng Lai PHONE: +886-4-26587200 FAX: +886-4-26571329			PROJECT PERIOD FROM January 2024 TO December 2024
KEY WORDS: SOIL LIQUEFACTION; LIQUEFACTION ANALYSIS; POST-LIQUEFACTION SETTLEMENT			
Abstract: <p>The second article of the Disaster Prevention and Rescue Act stipulates that soil liquefaction falls within the scope of natural disasters. This project builds upon the earlier achievements of the Transportation Technology Research Center in establishing the "Documentation of Geotechnical Data in Harbor Areas and Development of an Automated Liquefaction Analysis Module" and conducting research on "Seismic Monitoring in Harbor Areas and Assessment of Soil Liquefaction Potential.." Specifically focusing on ports under the jurisdiction of the Port Authority, the project aims to comprehensively assess liquefaction potential in accordance with current seismic design specifications. This involves updating the geotechnical database.</p> <p>In the fiscal year 2022, the liquefaction analysis pertaining to Taichung Port has been completed. In the fiscal year 2023, the primary focus will be on evaluating Taipei Port. Within the existing liquefaction assessment methodology, domestically established evaluation methods from the Building Technology Code and internationally recognized deterministic and probabilistic liquefaction potential assessment methods will be incorporated. These include the NCEER method using SPT-N as an indicator, the HBF method from the Central Weather Bureau Seismology Center, and the Cetin probability method. The updated geotechnical database will undergo analyses of liquefied soil layer depths and extents under various ground acceleration values. Additionally, employing the procedure recommended by Ishihara and Yoshimine (1992), the post-liquefaction settlement in free fields will be estimated. The updated on-site seismic monitoring stations within the port area will be integrated to provide rapid post-earthquake liquefaction damage assessment. This will offer information on liquefaction extents, depths, and port settlement values promptly, enabling timely notifications to relevant management personnel for necessary inspections and reviews.</p> <p>Research Outcome Benefits and Applications:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Completion of the addition of geotechnical database usable drilling data to 886 boreholes at Kaohsiung Port. 2. Completion of liquefaction potential assessment for Kaohsiung Port's harbor area using methods compliant with domestic seismic design specifications. 3. Completion of estimating liquefaction risks in Kaohsiung Port's harbor area for various levels of seismic activity. <p>Government Agencies' Utilization Scenarios:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Providing seismic safety assessment information for Kaohsiung Port's harbor area as a reference for engineering maintenance personnel of Taiwan Ports Corporation and Kaohsiung Harbor Bureau for post-earthquake inspections, testing, and disaster prevention decision-making. 2. The results are provided to the Institute's subsequent research and application in planning, design and construction of harbor projects by the Taiwan International Port Corporation and its subsidiaries. 3. The research outcomes provide references for applications across industries, government, academia, and research sectors. 			
DATE OF PUBLICATION Mar 2025	NUMBER OF PAGES 150	PRICE 200	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XI
第一章 前言.....	1-1
1.1 研究緣起.....	1-1
1.2 研究目的.....	1-4
1.3 研究方法.....	1-4
1.4 研究內容.....	1-5
1.5 預期成果(效益)及其應用.....	1-6
1.6 前期計畫發展歷程.....	1-7
第二章 文獻回顧.....	2-1
2.1 液化機制.....	2-1
2.2 可能發生土壤液化之地質.....	2-4
2.3 土壤液化潛能安全評估.....	2-5
2.4 土壤液化評估方法.....	2-6
2.5 土壤液化風險評估.....	2-13
2.6 土壤液化引致沉陷量推估.....	2-14
第三章 高雄港港區液化潛勢分析.....	3-1

3.1 液化分析基本參數與資料說明.....	3-3
3.2 以定值法進行高雄港液化潛勢分析.....	3-10
3.3 Cetin 機率法分析成果.....	3-15
3.4 高雄港受震液化潛勢分析說明.....	3-17
第四章 高雄港地震後沉陷量評估.....	4-1
4.1 SPT-N 鑽孔之震陷量評估.....	4-3
4.2 高雄港震陷量潛勢分布.....	4-4
4.3 不同分析加速度 a_{max} 之震陷量推估.....	4-8
第五章 震後快速液化災損評估訊息研擬.....	5-1
5.1 高雄港港區分區災損指標訂定.....	5-1
5.2 震後快速液化災損評估訊息.....	5-2
第六章 港區地震速報精進與維護.....	6-1
6.1 各港地震監測站維護.....	6-1
6.2 各港地震速報精進.....	6-8
6.2.1 各港區地震新震度級數精進.....	6-9
6.2.2 布袋港地震速報精進.....	6-10
6.2.3 更新高雄港地震速報簡訊內容.....	6-12
6.2.4 地震速報資料介接.....	6-12
第七章 結論與建議.....	7-1
7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-2
7.3 研究成果效益.....	7-3
7.4 提供政府單位應用情形.....	7-3

參考文獻.....	參-1
附錄一 113 年各港區地震資料比對.....	附錄 1-1
附錄二 專家學者座談會會議紀錄.....	附錄 2-1
附錄三 第 1 次工作會議紀要.....	附錄 3-1
附錄四 第 2 次工作會議紀要.....	附錄 4-1
附錄五 第 3 次工作會議紀要.....	附錄 5-1
附錄六 期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 6-1
附錄七 期末報告簡報資料.....	附錄 7-1

圖目錄

圖 1.1	2021 年版臺灣活動斷層分布圖	1-3
圖 1.2	研究流程圖	1-5
圖 2.1	液化致使土壤顆粒沉積狀態改變示意圖	2-2
圖 2.2	2016 年美濃地震臺南市安南區民宅因土壤液化災損狀況	2-3
圖 2.3	2022 年長濱地震花蓮縣玉里舊鐵橋北側，小規模液化現象 ..	2-3
圖 2.4	NCEER 法(2001)液化評估法之計算流程圖	2-8
圖 2.5	雙曲線函數(HBF)液化評估法之計算流程圖	2-10
圖 2.6	液化潛能指數 PL 計算說明	2-14
圖 2.7	液化後體積應變、最大剪應變與抗液化安全係數關係	2-15
圖 2.8	不同液化敏感類別液化後沉陷量隨 PGA 之變化情形	2-16
圖 2.9	東北地震後建築物不同基礎形式液化後引致沉陷量差異	2-17
圖 2.10	液化後引致建築物位移機制示意圖	2-17
圖 3.1	高雄港整體規劃及未來發展 110 年現況圖	3-1
圖 3.2	高雄港鄰近區域液化潛勢圖資	3-2
圖 3.3	國家地震工程研究中心臺灣規範反應譜查詢介面	3-4
圖 3.4	地工資料庫高雄港港區鑽探孔位分布圖	3-6
圖 3.5	高雄港港區可用 SPT 鑽探資料分布情況	3-7
圖 3.6	高雄港港區分析範圍與 SPT 鑽探分布網格圖	3-10
圖 3.7	中小地震下高雄港港區液化潛勢圖(HBF 法)	3-12
圖 3.8	設計地震下高雄港港區液化潛勢圖(HBF 法)	3-12
圖 3.9	最大考量地震下高雄港港區液化潛勢圖(HBF 法)	3-13
圖 3.10	中小地震下高雄港港區液化潛勢圖(NCEER 法)	3-13

圖 3.11 設計地震下高雄港港區液化潛勢圖(NCEER 法).....	3-14
圖 3.12 最大考量地震下高雄港港區液化潛勢圖(NCEER 法).....	3-14
圖 3.13 中小地震下高雄港港區液化機率分布圖(Cetin 法)	3-16
圖 3.14 設計地震下高雄港港區液化機率分布圖(Cetin 法)	3-16
圖 3.15 最大考量地震下高雄港港區液化機率分布圖(Cetin 法).....	3-17
圖 3.16 不同 SPT-N 簡易評估法於高雄港高潛勢區面積佔比差異 ..	3-18
圖 3.17 高雄港高潛勢區面積佔比與不同尖峰水平加速度關係	3-19
圖 4.1 地震致使超額孔隙水壓力激發後土層消散壓密沉陷.....	4-1
圖 4.2 中小地震下高雄港港區震陷潛勢圖(HBF 法).....	4-5
圖 4.3 設計地震下高雄港港區震陷潛勢圖(HBF 法).....	4-5
圖 4.4 最大考量地震下高雄港港區震陷潛勢圖(HBF 法).....	4-6
圖 4.5 中小地震下高雄港港區震陷潛勢圖(NCEER 法).....	4-6
圖 4.6 設計地震下高雄港港區震陷潛勢圖(NCEER 法).....	4-7
圖 4.7 最大考量地震下高雄港港區震陷潛勢圖(NCEER 法).....	4-7
圖 4.8 高雄港不同分析加速度 a_{max} 之震陷量 S 經驗評估公式	4-10
圖 5.1 高雄港港區災損指標訂定流程圖	5-1
圖 5.2 震後快速液化災損評估訊息發布流程與示意.....	5-2
圖 5.3 高雄港地震速報簡訊分階門檻加速度訂定說明.....	5-3
圖 5.4 設計地震下高雄港可能發生震陷位置示意圖.....	5-4
圖 6.1 新地震震度分級的震度計算流程圖.....	6-10
圖 6.2 布袋港舊地震儀(CV373 型)拆除示意圖.....	6-11
圖 6.3 布袋港 CV374 型地震儀更新安裝示意圖	6-11
圖 6.4 港灣構造物維護管理系統.....	6-13

圖 6.5 商港海氣象資訊系統.....	6-14
圖 6.6 港灣環境資訊網.....	6-14
圖 6.7 港區資料夾.....	6-15
圖 6.8 各港資料夾.....	6-15
圖 6.9 自動上傳地震檔案至雲端.....	6-15

表 目 錄

表 1-1 歷年(90-112 年) 地震監測發展歷程	1-7
表 2-1 可能發生液化之地質	2-5
表 2-2 SPT-N 值簡易液化評估法之比較	2-12
表 3-1 不同縣市土壤液化分析建議之地震規模	3-4
表 3-2 高雄港港區不同分析情境之地震規模與分析加速度	3-5
表 3-3 高雄港港區 SPT 鑽探資料來源與數量統計	3-6
表 3-4 本所運技中心地工資料庫鑽探試驗資料登錄名詞說明(A).....	3-8
表 3-5 本所運技中心地工資料庫鑽探試驗資料登錄名詞說明(B).....	3-9
表 3-6 高雄港不同 SPT-N 簡易評估法液化潛勢區佔比	3-18
表 4-1 震陷量 S 與沉陷等級分類	4-2
表 4-2 高雄港不同地震情境評估震陷量範圍與分布占比	4-9
表 5-1 新制地震震度分級表(取自中央氣象署).....	5-4
表 5-2 高雄港地震速報簡訊內容一覽表	5-5
表 5-3 高雄港地震速報簡訊內容(目前)一覽表.....	5-6
表 6-1 各港區 113 年傳送的地震速報簡訊統計表	6-8

第一章 前言

1.1 研究緣起

臺灣位處於環太平洋地震帶西側，受到歐亞大陸與菲律賓海板塊間的地質構造作用，導致地震頻繁，常造成嚴重的人民生命與財物損失，分別包括 1848 年彰化地震、1906 年梅山地震、1935 年新竹-臺中地震、1999 年 921 地震與 2016 年美濃地震，皆造成嚴重災情^[1]。其中有 3 次地震發生於中部地區，分別由彰化斷層、屯子腳斷層、車籠埔斷層所引發，相對位置可參考經濟部地質調查及礦業管理中心(以下簡稱地礦中心) 2021 年新發布之活動斷層分布圖^[2](如圖 1.1)，另地礦中心新增初鄉斷層、口宵里斷層及車瓜林斷層等 3 條斷層，分別位於南投縣、臺南市及高雄市，總計 36 條活動斷層。

臺灣西部沿海港灣地區因多屬砂岸地形，地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及海埔新生地，且壓密尚未全部完成，極可能因地震作用產生土壤液化，造成碼頭等結構物損壞，導致港區無法正常運作，營運功能大受影響，且碼頭興建時多以水力抽砂回填施工，此類地質及施工方式最易發生土壤液化(liquefaction)及因液化引發承载力破壞(bearing capacity failure)、地表沈陷(subsurface settlement)、側潰(lateral spreading)及沉箱式基礎位移等災害，相關案例，如 1995 年日本 Kobe 地震後港區液化(JGS, 1996)^[19]、1999 年土耳其 Kocaeli 地震後臨海區液化(Bray and Sancio, 2006)^[20]與 1999 年 921 地震後臺中港區 1 至 4A 號碼頭液化沉陷^[3]等(交通部運輸研究所(以下簡稱本所)運輸技術研究中心(以下簡稱運技中心)等港區受災損現象。爰此，臺北港、臺中港、布袋港、安平港及高雄港等港區在強烈地震作用下，可能會發生液化現象，造成港灣設施、房屋與地下管線等基礎設施，發生沉陷、傾倒、側潰等災損。

本所 111、112 年度分別以臺中港與臺北港為研究對象進行土壤液化分析，基於更新的 SPT 鑽探資料做為分析資料庫，由 SPT-N 定值法液化分析成果，當尖峰水平加速度(Peak Horizontal Acceleration, PHA)

達 0.28 g 時，以臺中港為例，陸域約有 80%面積屬高潛勢區，而最大考量地震時(PHA=0.36g)，則高潛勢區面積占比達 90%以上。針對臺灣港務股份有限公司管轄之西部商港，包括臺北港、臺中港、布袋港、安平港及高雄港，其地層構造多為沖積土層與海埔新生地，在強烈地震作用下，可能再度發生液化現象，造成港灣設施、房屋與地下管線等基礎設施，發生沉陷、側潰等災損。

本計畫蒐集高雄港港區近年新建工程所增加之地質鑽探資料，重新進行液化風險評估，以提供臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)防災管理人員，進行相關巡查與檢視，做為防患土壤液化可能引致港區設施、人員及車輛等危害之應用參考。



圖 1.1 2021 年版臺灣活動斷層分布圖⁽²⁾

1.2 研究目的

本計畫基於本所運輸研究業務需要與支援國內重大交通設施之職責，以及延續運技中心前期「港灣地區地工資料建檔及液化自動分析模組之建立」、「港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估之研究」及「港區震災速報系統維護及地層下陷調查分析研究」成果，針對高雄港新建工程所增加之地質鑽探資料，重新進行港區液化分析及風險評估，提供港務公司及高雄港務分公司做為港灣規劃及設施維護管理之應用參考。

本計畫研究目的說明如下：

- 1.藉由蒐集、建立高雄港新建工程地質鑽探資料，重新進行港區液化分析及風險評估。
- 2.透過探討國內、外液化潛勢評估分析方法，瞭解高雄港港區不同等級地震發生之液化風險。

1.3 研究方法

本計畫針對高雄港港區進行液化潛勢分析，分別使用以 SPT-N 為指標之 NCEER 法^[21]、國震中心 HBF 法^[4] 及 Cetin 機率法^[22]，針對蒐集更新之地工資料庫，於不同地表加速度值下之液化土層發生深度與範圍進行分析，並以 Ishihara and Yoshimine (1992)^[23]建議程序，推估液化後沉陷量，進而研擬地震後快速液化災損評估內容，提供不同震度下液化範圍、深度與港區沉陷值，輔助港務公司防災管理人員，進行相關巡查與檢視，整體研究方法，如圖 1.2 研究流程圖所示。

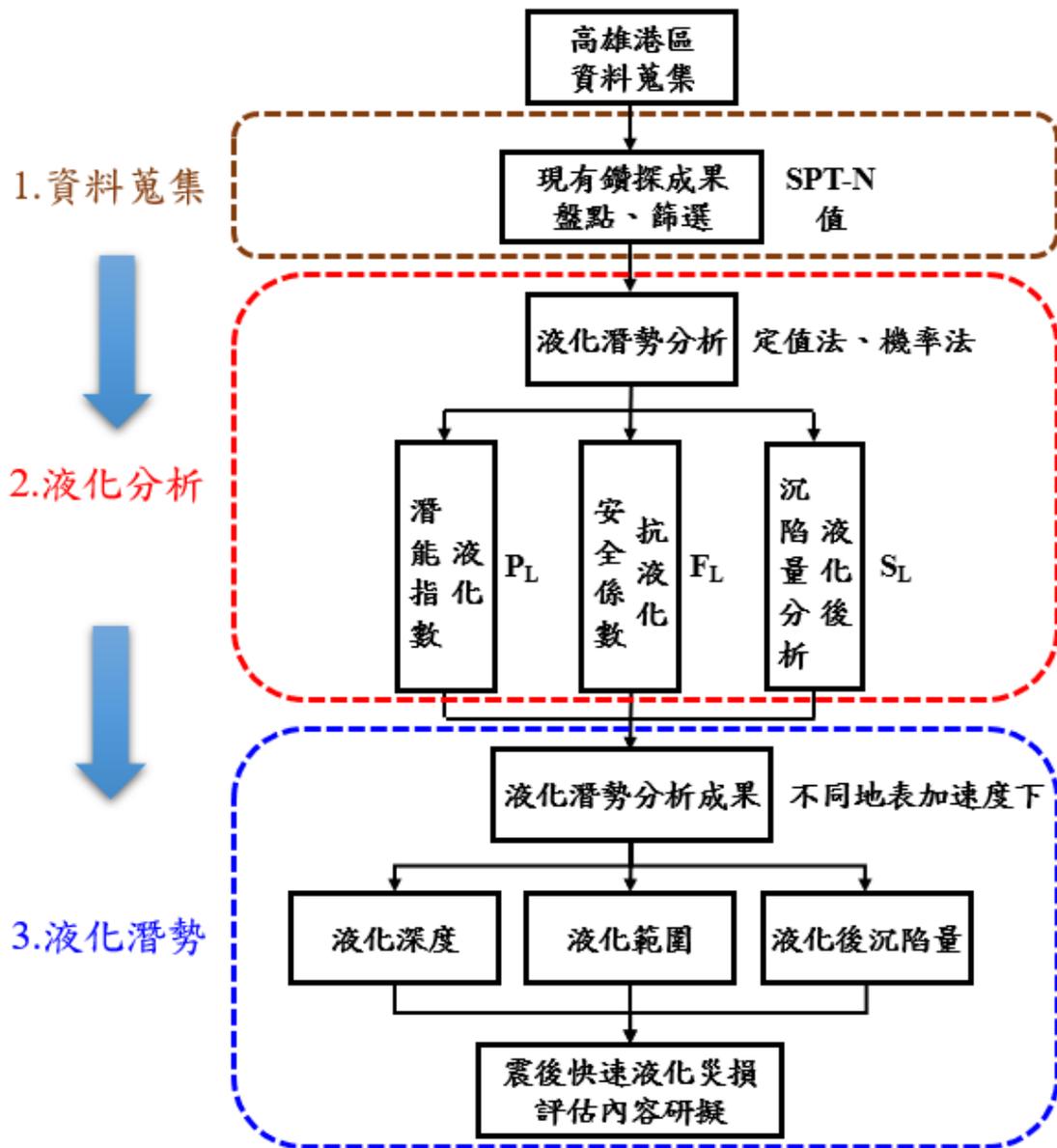


圖 1.2 研究流程圖

1.4 研究內容

本計畫研究內容說明如下：

1. 相關文獻回顧

蒐集液化評估方法相關文獻並進行彙整研析，以供後續探討高雄港液化潛勢評估分析應用。

2. 蒐集與研析相關資料

訪談港務公司高雄港務分公司，蒐集近年來高雄港港區新建工程地質鑽探資料，予以彙整研析，以供後續於推估高雄港港區針對不同地震之液化潛勢評估及液化風險應用。

3. 探討液化潛勢評估分析方法

探討國內建築技術規則所列液化評估法及國際間採用之液化潛勢評估法，以提供後續高雄港港區地震液化潛勢評估分析之應用。

4. 推估高雄港港區液化風險

以高雄港港區地質鑽探資料，利用液化潛勢評估方法，進行不同地表加速度值下液化土層發生深度與範圍分析，進而推估高雄港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

1.5 預期成果(效益)及其應用

1. 預期成果(效益)

- (1) 完成高雄港港區新建工程地質鑽探資料蒐集與擴充。
- (2) 完成高雄港港區液化潛勢評估分析。
- (3) 完成推估高雄港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

2.應用

(1)提供高雄港港區地震安全評估相關資訊，可做為港務公司及高雄港務分公司工程維管人員，震後相關巡查、檢測及防救災決策之應用。

(2)本計畫研究成果可提供本所後續相關研究與港務公司及各分公司在港灣工程規劃、設計及施工之應用。

1.6 前期計畫發展歷程

本所運技中心自民國 89 年起除了於安平港、臺中港、布袋港、臺北港、高雄港、蘇澳港等逐年分別設置完成一組井下地震(CV-373 型)及動態孔隙水壓監測站外，另為降低地表地震儀之儀器或外部干擾產生雜訊，新增地表網路地震儀(CV-374 型)連接井下地震監測儀組成地震災後速報。並於民國 101 年起增加花蓮港與基隆港 2 站地震儀(CV-374 型)，歷年(90-112)地震監測成果發展歷程，簡述如表 1-1 所示。

表 1-1 歷年(90-112 年) 地震監測發展歷程

年度	研究重要歷程	成果效益
90-97	<ul style="list-style-type: none">● 90-93 年港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估。● 93 年建置一套自動化之港區地震監測系統。● 94-97 年港灣地區地震及液化之常態監測研究。	<ul style="list-style-type: none">● 89-94 年期間，於蘇澳、臺北、臺中火力電廠、臺中港、布袋、安平及高雄等港區設置地震計及動態水壓計。● 臺中港區有 5 處土質較為鬆軟，極易因強烈地震而造成較嚴重之液化及沉陷災害，其分別位於第 1-4、8-10、W10-W12 號碼頭及南突堤之貨櫃基地與臨港工業專業區(II)。● 港區選取測站之理想設置地點並不容易，應避免監測受貨櫃車輛及施工震動之干擾。● 建立本土化安全係數法、本土化液化機率法及 Liao(1988)液化機率法 3 種模式，分析臺中港液化危害度之結果

		<p>比較顯示，本土化分析結果，與 921 地震臺中港液化災害現象最為吻合；臺中港液化之臨界地表加速度為 0.13g，臺北港為 0.12g，高雄港為 $A_{max}=0.07g$。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 由地震波放大倍率之研究可發現：臺中港震波放大倍率約為 3 倍；臺北港約為 4 倍；高雄港約為 4.5 倍。由此可見高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱，且與深層地層之軟硬比最大，臺北港次之，臺中港最小。另由地震波放大倍率隨深度變化之初步探討結果亦可發現：臺中港、臺北港及高雄港淺層地層之震波放大皆稍大於 Seed & Idriss (1971) 之平均值。 ● 完成棧橋式碼頭動態有效應力分析，可應用在震後土層液化分佈之快速評估與災害速報系統。 ● 出版 8 本研究報告，發表研討會論文 5 篇。
98-107	<ul style="list-style-type: none"> ● 98-99 年港灣地層下陷監測之研究 ● 100-103 年港區現地監測與碼頭耐震功能性能評估 ● 102-103 年港區地震與地層下陷監測之研究 ● 104-105 年西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測分析 ● 106 年臺灣西南地區地層下陷調查及基本資料建置研究 ● 107 年港區地震監測及地層下陷調查分析研究 	<ul style="list-style-type: none"> ● 維護各港區地震災況速報系統，使其能正常運作。 ● 完成西南沿海地質資料建檔及地層下陷量測。 ● 建置港灣工程基本資料庫。 ● 98 年設置臺中港與安平港 2 站各 1 套地表地震儀(CV-373 型)，以精進確保地震速報系統之通報資訊正確。 ● 99 年設置高雄港與基隆港 2 站各 1 套地表地震儀(CV-373 型)。 ● 100 年設置臺北港與布袋港 2 站各 1 套地震儀(CV-373 型)。 ● 101 年設置花蓮港與基隆港 2 站各 1 套地震儀(CV-374 型)。 ● 完成港區地層下陷及地震監測資料，供港務公司管理單位維護港區結構物之參考。 ● 出版 10 本研究報告，發表研討會論文 5 篇 ● 維護各港區地震災況速報系統，使其能正常運作。
108-110	<ul style="list-style-type: none"> ● 108-110 年港區震 	<ul style="list-style-type: none"> ● 維護各港區地表地震災況速報系統

	<p>災速報系統維護及地層下陷調查分析研究。</p>	<p>(基隆、臺北、蘇澳、臺中、高雄、安平、布袋及花蓮等 8 港)，使其能正常運作。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 108 年增設基隆港與花蓮港室內(原室外各有 1 臺)三向度網路型地表地震儀(CV-374 型) 各 1 套，以精進確保地震速報系統之通報資訊正確。 ● 108-110 年共完成 11 次各地區地層分層沉陷、水位量測及資料分析。 ● 109-110 年完成臺中火力發電廠及布袋港區地震監測站，共 2 臺中央集錄系統更新，使本所港灣環境資訊網資訊正確。 ● 110 年完成各港區之三向度網路型地表地震儀(CV-374 型)與本所港灣環境資訊網、港灣構造物維護管理資訊系統及應變即時系統等介接相關工作規劃。 ● 109 年及 110 年分別完成遷移基隆港與花蓮港地表地震監測設備至適當場域，以精進確保地震速報系統之通報資訊正確。 ● 完成 3 次各港防救災管理相關人員地震簡訊接收者之名單及地震資料更新。 ● 出版 4 本研究報告，投稿港灣季刊論文 1 篇。
111	<ul style="list-style-type: none"> ● 港區地震液化風險評估模式精進(1/5)-臺中港模式精進。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 完成臺中港 SPT-N 鑽孔資料蒐集、建立、盤點更新與篩選，共計 311 孔鑽探資料。 ● 以 HBF 法與 NCEER 法進行臺中港液化潛勢分析，當尖峰水平加速度 A 達 0.28 g 時，臺中港區陸域約有 80% 之面積處於高潛勢區，而最大考量地震時(A=0.36g)，則高潛勢區面積占比達 90%以上。 ● 採用 Ishihara and Yoshimine (1992)自由場震陷評估方法，進行臺中港震陷量評估，震陷量之變化範圍約為 0~1 cm (HBF 法)與 0~12 cm (NCEER 法)；設計地震下，震陷量變化範圍分別為 4~82 cm (HBF 法)與 4~81 cm

		<p>(NCEER 法)；最大考量地震下，震陷量變化範圍分別為 5~82 cm (HBF 法)與 6~82 cm (NCEER 法)。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 完成震後快速液化災損評估訊息內容，可供臺中港災損評估簡訊傳送內容之依據。 ● 111 年持續維護各港區之三向度網路型地表地震儀(CV-374 型)與本所港灣環境資訊網、港灣構造物維護管理資訊系統及應變即時系統等，使其介接能正常運作。 ● 完成 2 次各港防救災管理相關人員地震簡訊接收者之名單及地震資料更新。 ● 出版 1 本研究報告，投稿港灣季刊論文 1 篇。
112	<ul style="list-style-type: none"> ● 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 完成臺北港 SPT-N 鑽孔資料蒐集、建立、盤點更新與篩選，原本所運技中心地工資料庫可用資料筆數為 42 孔，港務公司鑽探報告可用資料為 106 孔，共計 148 孔鑽探資料。 ● 以 HBF 法與 NCEER 法進行臺北港液化潛勢分析，兩方法於不同地震情境之潛勢分布相近，當尖峰水平加速度 a_{max} 達 0.24 g 時，臺中港區陸域約有 70%以上之面積處於高潛勢區，而最大考量地震時($a_{max}=0.32$ g)，則高潛勢區面積占比可達 79%以上。 ● 採用 Ishihara and Yoshimine (1992)自由場震陷評估方法，進行臺北港不同地震情境之自由場震陷量評估，震陷量之變化範圍約為 0~0.7 cm (HBF 法)與 0~7.6 cm (NCEER 法)；設計地震下，港區震陷量變化範圍分別為 0.2~81.9 cm (HBF 法)與 3.4~82.1 cm (NCEER 法)；最大考量地震下，震陷量變化範圍分別為 0.4~88.7 cm (HBF 法)與 3.5~82.2 cm (NCEER 法)。 ● 完成震後快速液化災損評估訊息內容，以精緻化分區進行門檻加速度

		<p>設定，並計算對應震陷量，搭配現地震震監測站，成果可供不同加速度於臺北港簡易分區災損評估簡訊傳送內容之依據。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 維護各港區地表地震災況速報(基隆、臺北、蘇澳、臺北、高雄、安平、布袋及花蓮等 8 港)，使其能正常運作。 ● 112 年持續維護各港區之三向度網路型地表地震儀(CV-374 型)與本所港灣環境資訊網、港灣構造物維護管理資訊系統及商港海氣象資訊系統等，使其介接能正常運作。 ● 完成 3 次各港防救災管理相關人員地震簡訊接收者之名單及地震資料更新。 ● 出版 1 本研究報告，投稿港灣季刊論文 1 篇。
--	--	--

第二章 文獻回顧

依據國內建築技術規則(營建署, 2020), 建築物位於極軟弱土層或飽和砂土層時, 應進行地震時地盤穩定性評估, 若建築物等基礎設施發生液化, 可能致使嚴重災損, 如 1964 年日本新潟地震、1990 年菲律賓北呂宋地震、1995 年日本阪神地震、1999 年集集大地震及 2016 年美濃地震均有建築物液化損壞案例。

臺灣四面臨海, 港口為國家重要物資進出通道, 又身處歐亞版塊與菲律賓海版塊交界處, 地震頻繁, 再加上臺灣西部因多屬砂岸地形, 港區地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及海埔新生地, 且興建時多以水利抽砂回填施工, 對於疏鬆飽和砂土層, 在地震作用下, 將因土壤內超額孔隙水壓增加, 直至液化現象產生, 導致建築物基礎鉛直向承載力與水平向抵抗力大幅降低, 發生災害, 為確保位於港區軟弱沖積土層結構設施之安全, 應謹慎考慮土壤液化可能引致港區人員、車輛及設施等之危害。本章就國內外有關土壤液化之研究成果, 綜整如下:

2.1 液化機制

土壤液化係指飽和疏鬆顆粒性土壤, 受到短期靜力(monotonic loading)或反覆應力(cyclic loading)作用, 孔隙間水分無法完全排出並完全承受此外力, 致使超額孔隙水壓上升, 當此超額孔隙水壓力持續累加, 土壤所受之有效應力將逐漸趨近於零, 此時土壤顆粒將懸浮於水中並喪失剪力強度^{[4][24]} (如圖 2.1)。土層發生土壤液化現象可能致使不同程度之沉陷、側向位移或是砂潰等現象, 使液化土層上承之構造物、地下管線與建築設施發生差異沉陷、上浮、側傾或倒塌等災害^[5], 在臺灣有多次歷史地震引起土壤液化現象的記載, 近幾年集集大地震、甲仙地震、美濃地震(如圖 2.2)^[6], 以及長濱地震(如圖 2.3)^[2]也發生土壤液化災害。

地震來時, 引致土壤液化多發生在沖積平原、河岸與水力回填之海埔新生地等較多^[25], 一般來說液化土層具備現場地下水位高、土壤組

成為疏鬆砂土且液化深度較淺等特性，影響土壤液化的因素眾多，包括：

1. 相對密度：

對於同一非凝聚性土壤，其相對密度越高，其剪脹特性 (dilatancy) 越趨明顯，因此，當顆粒性土壤受一地震反覆剪應力時，由於剪應力引起土顆粒間相互位置的變化，使排列變化從而使顆粒間的孔隙加大，從而發生了體積變化，致使超額孔隙水壓不易上升。Casagrande 以臨界孔隙比說明液化現象^[26]，當砂土處於不排水狀況，且初始孔隙比大於臨界孔隙比時，砂土體積會因反覆剪動越趨緊密，致使孔隙水壓力提高，直至液化現象產生。Seed and Idriss [27]於 1964 年新瀉地震案例，歸納出相對密度 50% 左右之砂土層均發生嚴重液化現象，而相對密度 70~75% 之砂土層，液化情形較為罕見。

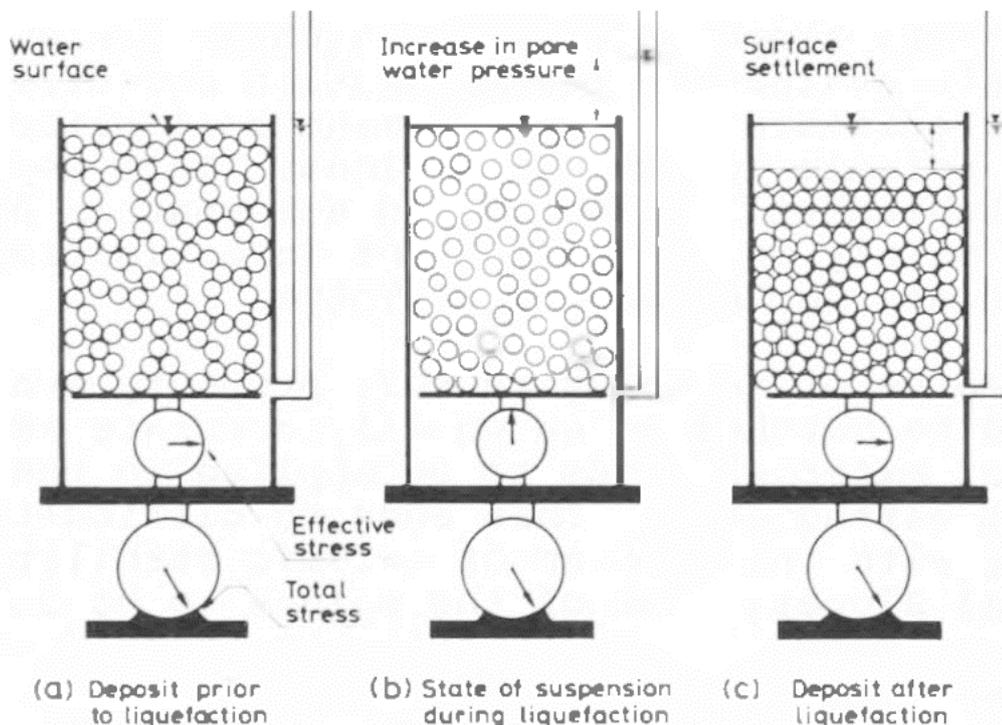


圖 2.1 液化致使土壤顆粒沉積狀態改變示意圖^[24]



圖 2.2 2016 年 美濃地震臺南市安南區民宅因土壤液化災損狀況^[5]

圖 2.3 2022 年 長濱地震花蓮縣玉里舊鐵橋北側，小規模液化現象^[2]

2. 顆粒特性：

顆粒特性包含顆粒級配、大小及形狀，Seed and Idriss^[27]以不同顆粒特性試體探討抗液化能力之影響，依實驗結果，當平均粒徑 D_{50} 越大時，其抗液化能力越強，說明中細砂土壤較容易液化；就級配而言，優良級配較均勻級配之試體抗液化能力高，就顆粒形狀而言，圓形顆粒具有較高之液化潛能。因此，土壤顆粒反覆受剪時，孔隙間顆粒之互制作用對體積應變的影響為液化是否發生之關鍵。

3. 細粒料含量(fines content, FC)：

對於非凝聚性土壤，當其小於 200 號篩之含量越高時，其液化阻抗有增加之趨勢^{[28] [29]}。對於臺灣中南部典型之粉質砂土，細粒料含量對抗液化強度之影響尤其重要，目前液化評估法皆考量其比例，進行液化阻抗計算之修正。

4. 地下水狀況：

Sherif 依研究結果^[30]指出非飽和土壤因其氣相之高壓縮性特

性，孔隙水壓相較飽和土壤，其孔隙水壓僅有少量增加。惟地下水位以下之土壤，因飽和度高，受反覆剪應力作用時，超額孔隙水壓快速累積，因此更容易產生液化現象。再者依 Seed et al. 研究結果^[31]，若相較於超額孔隙水壓累積速度，土壤本身排水速率較快時，則抗液化潛能較高。

5. 覆土有效應力：

Seed et al.^[29]指出，土層液化所需之剪應力會隨深度而增加，即深層土壤較淺層土壤不易達到液化。再者依 Iwasaki et al.^[25]於液化潛能評估中，建議主要考量液化深度 20 公尺內的範圍。

6. 土壤應力、應變歷史^[4]

由於土壤本身之早期微小應變歷史，造成結構間的互鎖作用 (interlocking)，因此，曾受過小規模地震的土層，將呈現較大的液化阻抗。若土層之年代久遠，沈積過程中顆粒間形成膠結作用，因此，其抗液化的能力較高；過壓密土壤亦較正常壓密土壤不易液化。當砂土受不同持續荷重之影響，顯示較長荷重持續時間作用下，其導致土壤液化所需之剪應力比有明顯增加之趨勢。

Kramer 將土壤液化現象按照發生機制^[32]，分類為流動液化(flow liquefaction)與反覆流動變形(cyclic mobility)，流動液化發生於土壤液化前所受之靜剪應力(static shear stress)小於液化後土壤殘餘剪力強度時，不穩定之土壤結構將產生如同液體流動之大量變形。反之，當土壤液化前所受之靜剪應力大於液化後土壤殘餘剪力強度時，此時土壤變形量於受剪過程中，會逐步累加，但其變形量有限。

2.2 可能發生土壤液化之地質^[4]

發生土壤液化之地質，如果發生液化的砂層位置較淺，其上方覆蓋未液化土層厚度又很薄時，即可能發生地表破裂，產生噴砂及大量沉陷的土壤液化表徵。

由土壤液化的成因來看，具有下列條件者，有較高的液化潛能：

1. 地下水位高。
2. 土壤主要為飽合之疏鬆細砂、粉土質砂，而且分佈深度較淺。
3. 地盤振動規模大、地表加速度大、場址地震強度放大效應強。

根據 Iwasaki et al 分析了數十個日本地震引致的液化案例，提出區域地質狀況與液化現象間之關係，如表 2-1 所示。

表 2-1 可能發生液化之地質^[4]

等級	地質	液化潛能
A	現有河床、古河道、沼澤、新生地、谷地	最可能發生液化
B	沖積扇、沖積平原、天然土堤、沙丘、海灘、河灘、平原地	可能發生液化
C	台地、丘陵、山地	較不會發生液化

2.3 土壤液化潛能安全評估

土壤液化潛能安全評估需考量實際土層之抗液化強度，可分為簡易評估法與室內試驗法兩種，對於地震引致之土壤液化現象，除須考慮土壤本身之抗液化能力，亦需考慮地震發生之規模與各地實際發生之震度，依據建築設計規則，土層是否液化，由抗液化安全係數 F_L 值決定之，其定義如式 2.1：

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (\text{式 2.1})$$

式中 CRR 為土層抗液化剪力強度比，可依各液化潛能評估方法進行計算，亦可依室內試驗方法進行求取，而 CSR 為地震引致土層之平均反覆剪應力比，依 Ishihara (1993)^[33] 之定義如式 2.2：

$$CSR = 0.65 \times \frac{a}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \times \gamma_d \quad (\text{式 2.2})$$

式中 a 為尖峰水平地表加速度，規範中規定應檢核中小地震、設計地震與最大考量地震時之不同地表加速度值， g 為重力加速度， σ_{v0} 與 σ_{v0}' 分別為垂直覆土總應力與有效應力， γ_d 為深度折減因子，即地震時剪應力沿地層深度方向之折減係數，依不同液化評估方法有所不同。

2.4 土壤液化評估方法^[4]

現有之土壤液化潛能分析評估方法眾多，大致上可分為理論或數值分析方法，以及採用經驗或半經驗公式之簡易分析法兩種。基於液化潛能評估之理論或數值分析方法，通常須透過複雜的電腦程式進行運算，因此於工程界較少人使用。當今世界上工程界著名之土壤液化評估方法，大多是累積許多地震液化案例，以及大量現場或室內試驗研究成果，並針對工程實務應用發展而成。基本上，這些方法都不需要煩雜之理論計算，經由簡單公式，即可獲得符合工程需要之評估結果，稱之為簡易分析法(Simplified Method)，目前廣為工程界普遍應用。

簡易分析法之計算工作可分為兩大部份，第一部份是利用地震來時之地表最大加速度 PGA(Peak Ground Acceleration)，以半經驗之簡易公式計算地震時土層所受之反覆剪應力比(Cyclic Stress Ratio)，第二部份則是估計土層之抗液化強度〈以反覆剪應力比表示〉，此部份之抗液化強度可取現地不擾動土樣於室內進行動態強度試驗求得，稱之為室內試驗法；或採用現地試驗參數如 SPT-N、CPT-qc 或震測剪力波 Vs 等，利用地震液化案例反求之經驗曲線，稱之為現地經驗法。

SPT-N 法為目前工程界評估液化潛能最常使用的方法，這是基於一般地層液化案例之鑽探調查資料中，大多有標準貫入試驗及劈管取樣成果資料，除可獲知 N 值之外，藉由劈管取樣所取得之銅圈土樣進行一般物理性質試驗，可進一步獲得準確之土壤分類與指數性質及粒徑分佈資料，因此，目前世界各國設計規範，均以 SPT-N 法為基本方法，並成為工程界之主流，廣為各界所採用。其中較常被使用的相關方法說明如下：

1. NCEER 法

NCEER 法源自 Seed et al. (1985)^[34]提出之簡易評估法，歷經 1997 年(Youd and Idriss, 1997)^[35]與 2001 年(Youd et al., 2001)^[21]兩個版本，屬美國 NCEER 研討會後，經各學者討論歸納之彙整版本，因此通稱 NCEER 法。Seed 簡易經驗評估法早年蒐集全球地震規模(Mw)約 7.5 大地震發生時液化及未發生液化之案例，並估算現地土壤所受平均反覆剪應力比與 SPT-N 值之關係，選定區分液化案例之分界線。NCEER 法(2001)^[21]廣泛應用於歐美等國家，為工程師較熟悉之液化評估方法，其分析流程如圖 2.4 所示。

其抗液化安全係數 FS 如公式 2.1 之定義，可分別估算 CSR(式 2.2)與 CRR 來評估液化潛勢，由於 NCEER 法係由 Youd et al. (1997)^[35]基於 Seed et al. (1985)^[34]之圖解法所提出之迴歸公式，以方便方程式計算，其深度修正因子公式，如式 2.3：

$$\gamma_d = \frac{(1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2)} \quad (\text{式 2.3})$$

式中 z 為深度，單位為公尺(m)，其餘參數皆屬迴歸係數。而 $CRR_{7.5}$ 係為乾淨砂之抗液化剪力強度比，其公式如式 2.4：

$$CRR_{7.5} = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4} \quad (\text{式 2.4})$$

式中 x 為修正後之乾淨砂 $(N1)_{60,cs}$ ，餘參數皆屬迴歸係數。綜上所述，可分別計算評估土層之 CSR 與 CRR，進行抗液化安全係數 FS 值之計算，並配合 Iwasaki et al. (1982)^[25]考量 20 公尺內深度範圍之液化潛能分析，可計算液化潛能指數 PL 值。

function, HBF)表示土壤之抗液化強度，故為包含本土地震資料之液化評估法(黃俊鴻等人，2012)^[4]。

針對沖積層之飽和土層，符合以下條件時，應按下列方法進行土壤液化之評估：

- (1) 位於地表面下 20 公尺以內，且位於地下水位以下之飽和土層。
- (2) 塑性指數 I_p 小於 7 之土層。

當抗液化安全係數 FL 值(參考式 2.1)小於 1.0 時，即判定該土層可能液化。整體計算流程如圖 2.5 所示，主要分為地震與地盤兩大類，分別為計算特定地震規模 M 引致土層之平均反覆剪應力比 CSR(參考式 2.2)，其中深度修正因子以式 2.5 進行計算：

$$\gamma_d = \begin{cases} 1.0 - 0.01z & (z \leq 10m) \\ 1.2 - 0.03z & (10m < z \leq 20m) \end{cases} \quad (\text{式 2.5})$$

式中 z 為深度。並計算土層抗液化剪力強度比 CRR，其主要依據 SPT-N 值進行估算，如式 2.6 所示：

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF \quad (\text{式 2.6})$$

式中 $CRR_{7.5}$ 為地震規模 7.5 之抗液化剪力強度比， MSF 為地震規模修正因子(magnitude correction factor)。 $CRR_{7.5}$ 係為乾淨砂之抗液化剪力強度比，其公式如式 2.7：

$$CRR_{7.5} = 0.08 + \frac{0.0035 \times (N_1)_{60cs}}{1 - (N_1)_{60cs} / 39} \quad (\text{式 2.7})$$

式中 $(N_1)_{60cs}$ 為考量土壤細粒料含量影響之修正 SPT-N 值，若所評估之土層屬粉質砂土時，應考量細粒料含量 FC 進行對應修正。

綜上所述，可分別計算評估土層之 CSR 與 CRR，進行抗液化安全係數 FL 值之計算，並配合 Iwasaki et al. (1982)^[25] 考量 20 公尺內深度範圍之液化潛能分析，可計算液化潛能指數 PL 值。

別為 2.5%、5%與 7%時的初始液化反覆剪應力比。

4. 日本道路橋協會簡易經驗法

1995 年日本阪神地震後，日本道路橋梁協會將此次地震液化經驗與學者相關研究結果整合後，重新擬定新的土壤液化潛能分析方法；而內政部建築研究所之研究計畫成果報告「建築技術規則建築構造設計規範（含解說）」(1998)有關液化評估方法，則已介紹日本道路橋梁協會簡易經驗法（JRA，1996）^[7]。規範中規定於下列情況下，須進行土壤液化潛能之判定：如(1)土層為沖積砂質土。(2)地下水位在地表面下 10m 以內且深度在 20m 以內。(3)土壤本身細料含量 $FC < 1\text{mm}$ 。

5. Liao 液化機率分析方法

Liao et al.(1988)，以邏輯轉換(Logic Transformation)及最大似然性法 (Maximum Likelihood)之推定分析，將液化機率 PL 表示成地震力參數及土壤特性參數之函數。Liao 蒐集了震災地區共 278 組 SPT 現場數據，以邏輯迴歸方法進行分析，建立以 SPT-N 值評估液化機率之迴歸模式。此法之最大優點為允許更多影響液化特性之參數，納入邏輯迴歸之評估中，另一優點為能夠直接定量表達工址可能發生液化之機率。黃富國等(1999)^[8]，將 SPT-N 值簡易液化評估法進行比較，結果如表 2-2 所示。

6. Cetin 機率法

Cetin et al. (2004)^[22]綜合 Seed et al. (1985)^[34]分析資料庫與 1984 年後 300 筆案例資料，考量初始液化之似然性(likelihood)，計算液化機率(probability of liquefaction, PL)，本研究以 PL 做為代表符號，以與液化潛能指數 P_L 值進行區隔，與抗液化剪力強度比 CRR 表示為地震力參數及土壤特性參數之函數，主要考量因子為 SPT-N 值、地震規模、反覆剪應力比、覆土應力與細粒料含量，以邏輯迴歸分析方法進行分析。建立之液化機率 PL 計算公式，如式 2.8：

$$PL = \Phi\left(-\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR_{eq}) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.05 \cdot FC + 16.85\right)}{2.70}\right) \quad (式 2.8)$$

其中液化機率 PL 為小數點方式呈現，如液化機率 30% 以 0.3 作為代表，FC 為細粒料含量， CSR_{eq} 為等值反覆剪應力比， M_w 為地震規模， σ'_v 為有效覆土應力，而 Φ 為常態累積分布機率值。

而抗液化阻抗比 CRR 計算公式如式 2.9：

$$CRR = \exp\left(\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.05 \cdot FC + 16.85 + 2.70 \cdot \Phi^{-1}(PL)\right)}{13.32}\right) \quad (式 2.9)$$

其中 Φ^{-1} 為常態累積分布之反函數，需考量式 2.8 計算之液化機率 PL，相較於 NCEER 法與 HBF 法，式 2.9 計算成果為特定機率下土壤之抗液化阻抗比。當採定值評估安全係數時，以 $PL=0.15$ 最接近 Seed and Idriss (1971)^[27] 採用的液化與非液化案例邊界，因此，建議以 $PL=0.15$ 進行定值安全係數之計算。

表2-2 SPT-N值簡易液化評估法之比較^[8]

		Seed	T&Y	JRA96	Liao
地震參數		PGA, M	PGA, M	PGA	PGA, M
土壤參數		N, FC	N, FC, γ	N, D50, FC	N, FC
鑽桿能量比%		60	80	72	60
動態 強度	循環次數	15	15	-	-
	振幅應變	5%	2.5~7.5%	-	-
剪應力特性		等值剪應力	等值剪應力	最大剪應力	-
方法特性		半經驗法	半經驗法	半經驗法	機率統計法
安全係數		1.25~1.5	疏鬆砂土層 $N_1 < 10$ ，取 1.5，中等緊 密砂至緊砂， 取1.3	1.0	發生機率 0~1

2.5 土壤液化風險評估

Iwasaki et al. (1982)^[25]考量土層深度之影響，提出以深度進行加權評估整體鑽孔之液化潛能方法，以液化潛能指數 PL(liquefaction potential index)來表示土壤液化潛勢，圖 2.6 為 PL 之計算說明示意圖， P_L 計算公式如式 2.10：

$$P_L = \int_0^{20} F(z)W(z)dz \quad (\text{式 2.10})$$

式中 $F(z)$ 為特定深度抗液化安全係數 F_L 與安全係數 1.0 之差值， $W(z)$ 為深度修正因子，其計算如式 2.11 及式 2.12 所示：

$$F(z) = 1 - F_L(z) \quad (\text{式 2.11})$$

$$W(z) = 0.5(20 - z) \quad (\text{式 2.12})$$

式中深度修正因子給予不同深度之權重修正，並主要考量 20 公尺內深度範圍之液化潛能分析。

Iwasaki et al. (1982)^[25]比較多個液化與非液化場址之液化潛能指數 P_L 值，歸納出 $P_L=15$ 時，為大部分液化與非液化場址之分界線，因此，提出三個液化風險等級，分別為輕微液化($0 \leq P_L \leq 5$)、中度液化($5 \leq P_L \leq 15$)與嚴重液化($P_L > 15$)，做為土壤液化風險評估之依據，但液化潛能指數與液化發生機率之物理意義並不相同，目前國家地震中心提出之 TELES 系統與地礦中心進行之全國液化潛勢圖調查，皆採用 Iwasaki et al. (1982)^[25] 之液化潛能指數 P_L 來區分液化風險程度。

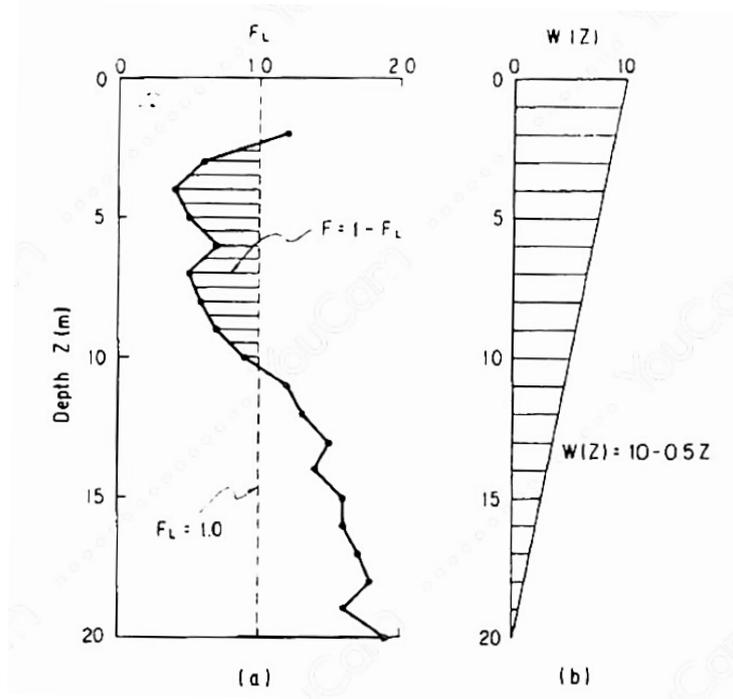


圖 2.6 液化潛能指數 PL 計算說明^[25]

2.6 土壤液化引致沉陷量推估

Ishihara and Yoshimine (1992)^[37]提出因土壤液化引致之沉陷量推估模式，此模式係依最大剪應變與最大體積應變之關係式提出，可進一步推估最大剪應變與抗液化安全係數之關係，並用於推估沉陷量，其成果屬圖解法(如圖 2.7)，紀雲曜(1997)^[9]以非線性迴歸方法提出公式，求解液化引致之沉陷量。國內以葉錦勳(2003)^[10]採用紀雲曜(1997)^[9]提出之評估模式，計算不同地震規模、地下水位和最大地表加速度 PGA 等條件下，液化土壤引致之沉陷量，其成果如圖 2.8 所示，可發現當 PGA 越大時，沉陷量將趨於定值，且正規劃之液化後沉陷量與 PGA 呈現類似對數常態分佈曲線關係。

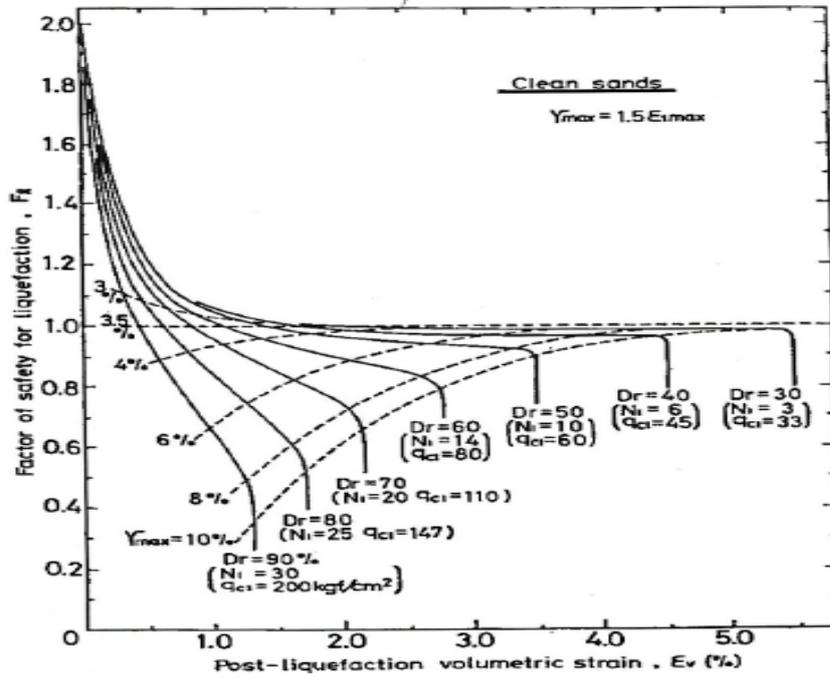
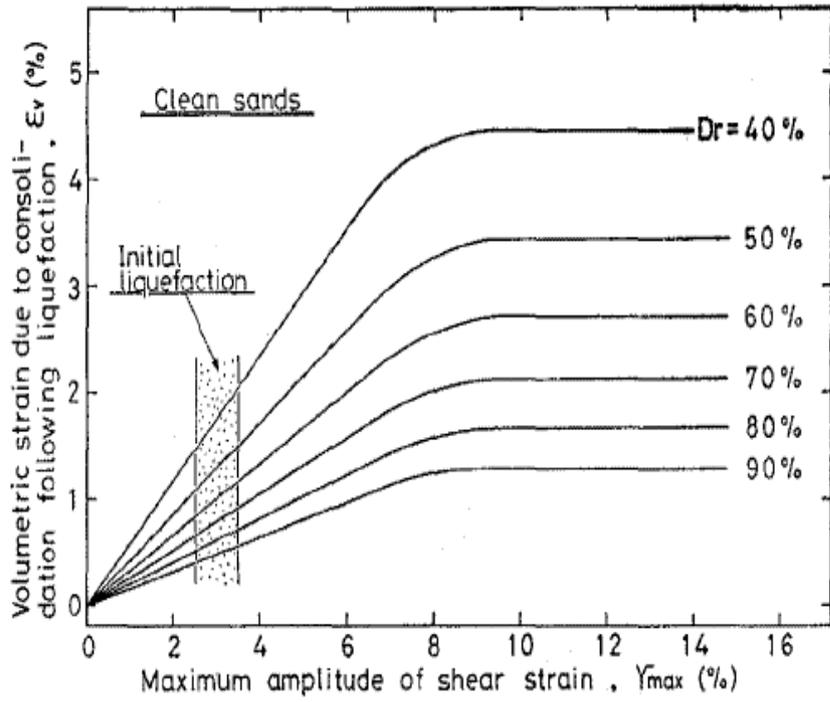


圖 2.7 液化後體積應變、最大剪應變與抗液化安全係數關係^[37]

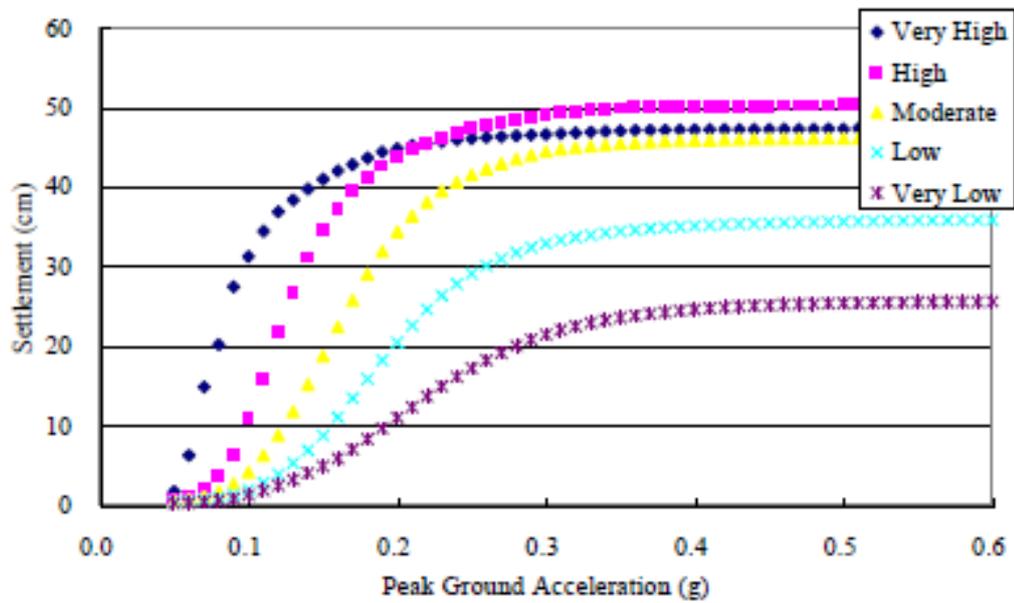


圖 2.8 不同液化敏感類別液化後沉陷量隨 PGA 之變化情形^[10]

Ishihara and Yoshimine (1992)^[37]提出之液化引致沉陷分析方法，僅考量液化砂土層本體體積應變之變化，若液化土層上方存在建築物時，則此分析方法可能產生低估之現象，Ashford et al. (2011)^[38]觀察日本 2011 年東北地震液化後鄰近建物之沉陷差異(如圖 2.9)，照片左側建物基礎型式為樁基礎，其樁基礎承載位置穿過液化土層，因此建物本身無明顯沉陷，然而鄰近路面產生約 30 公分沉陷量，照片右側屬淺層筏式基礎，建物本身下沉約 70 公分。因此，Macedo and Bray (2018)^[39]提出液化引起之建築物沉陷主要可分為(1)受剪力作用引致 D_s 、(2)產生體積應變引致 D_v 及(3)噴砂後產生之地表變形 D_e 共三類，如圖 2.10 所示。



圖 2.9 東北地震後建築物不同基礎形式液化後引致沉陷量差異

(modified after Ashford et al., 2011) [38]

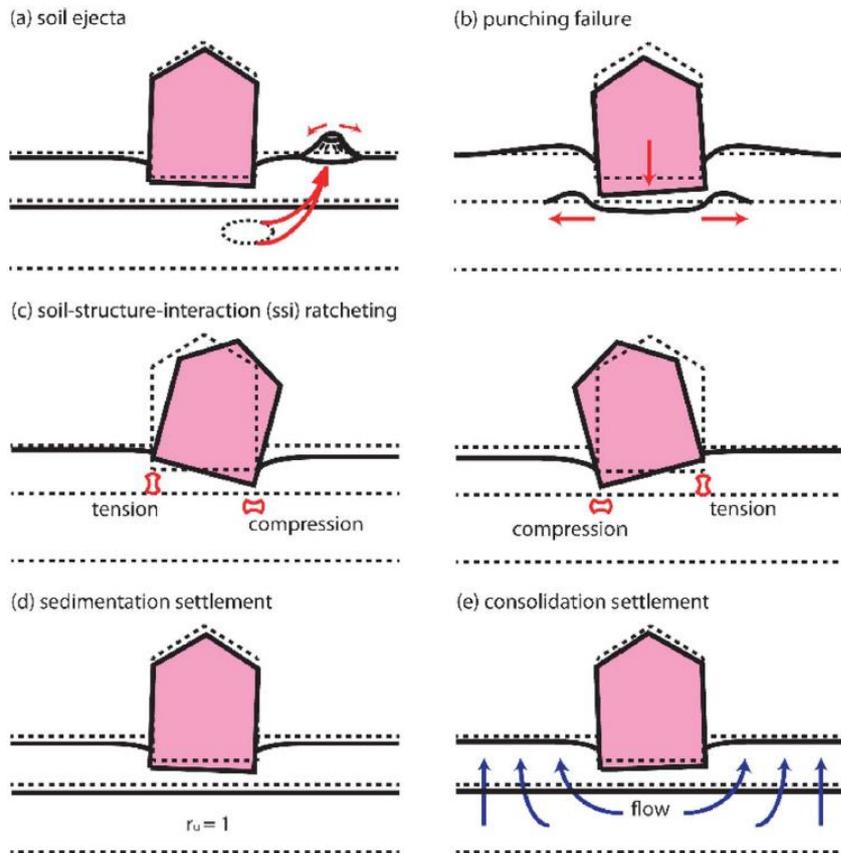


圖 2.10 液化後引致建築物位移機制示意圖 [21]

第三章 高雄港港區液化潛勢分析

高雄港位處高雄市，港區面積為 17,736 公頃，其中陸域面積 1,871 公頃(如圖 3.1 所示)^[11]，佔全港面積之 10.55%，水域面積 15,865 公頃，佔全港面積之 89.45%，有兩個入海通道，進出港航道長 18 公里。目前高雄港航道和港區水域水深為 11.3 公尺至 17.6 公尺不等，可供 15 萬噸級海輪進出港和停泊。

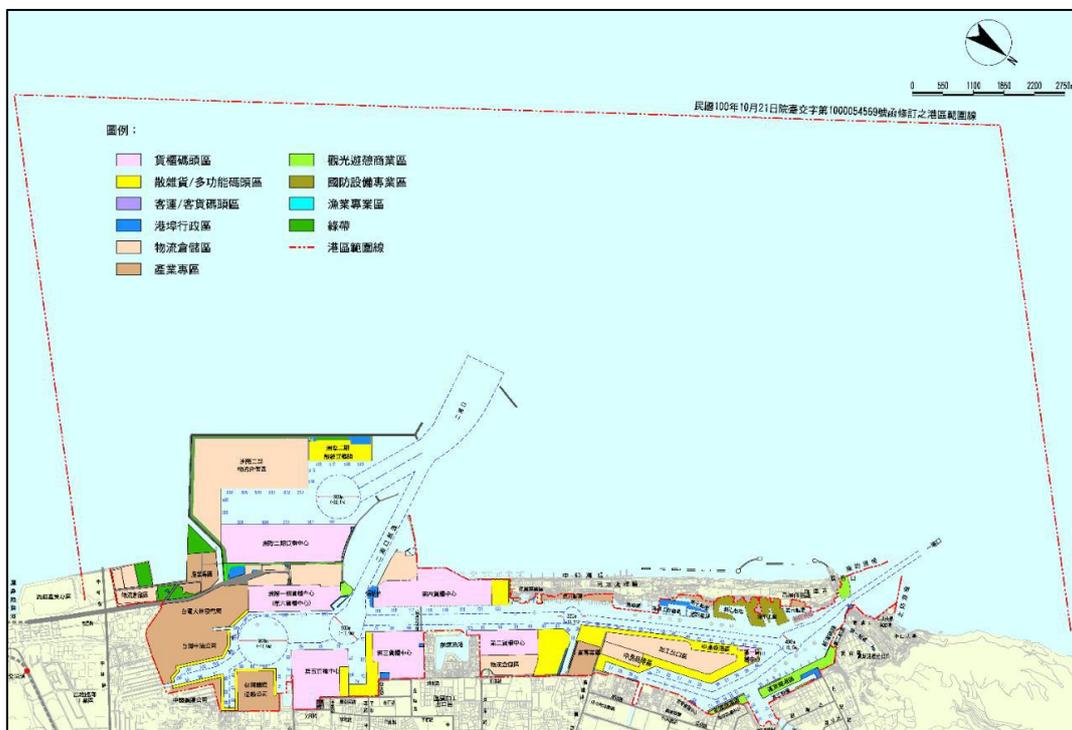


圖 3.1 高雄港整體規劃及未來發展 110 年現況圖(港務公司提供)

圖 3.2 為地礦中心公布鄰近高雄港土壤液化潛勢圖資，可發現高雄港部分區域並無液化分析潛勢判別，且地礦中心之液化潛勢圖資系統係以高雄市為分析單元，其採用的 SPT 鑽探資料未必為全符合高雄港分析現況，針對高雄港此類重要公共設施，相關液化分析有其必要性。因此本章節以完整蒐集之 SPT 鑽探試驗資料進行不同地震規模之液化分析，建構高雄港完整液化潛勢分析成果，NCEER 法主要為國際採用

方法，HBF 法主要以 NCEER 法為架構，加入國內 921 地震案例，可相對符合中南部特有粉土質砂於液化現象之評估，屬國內規範通用方法，因此，同時採用兩分析方法基於更新之 SPT-N 鑽探成果進行液化潛勢分析。以作為第五章震後快速液化災損評估訊息研擬之依據，以下就高雄港液化分析基本參數、資料分布與不同方法之液化分析成果依序進行說明：

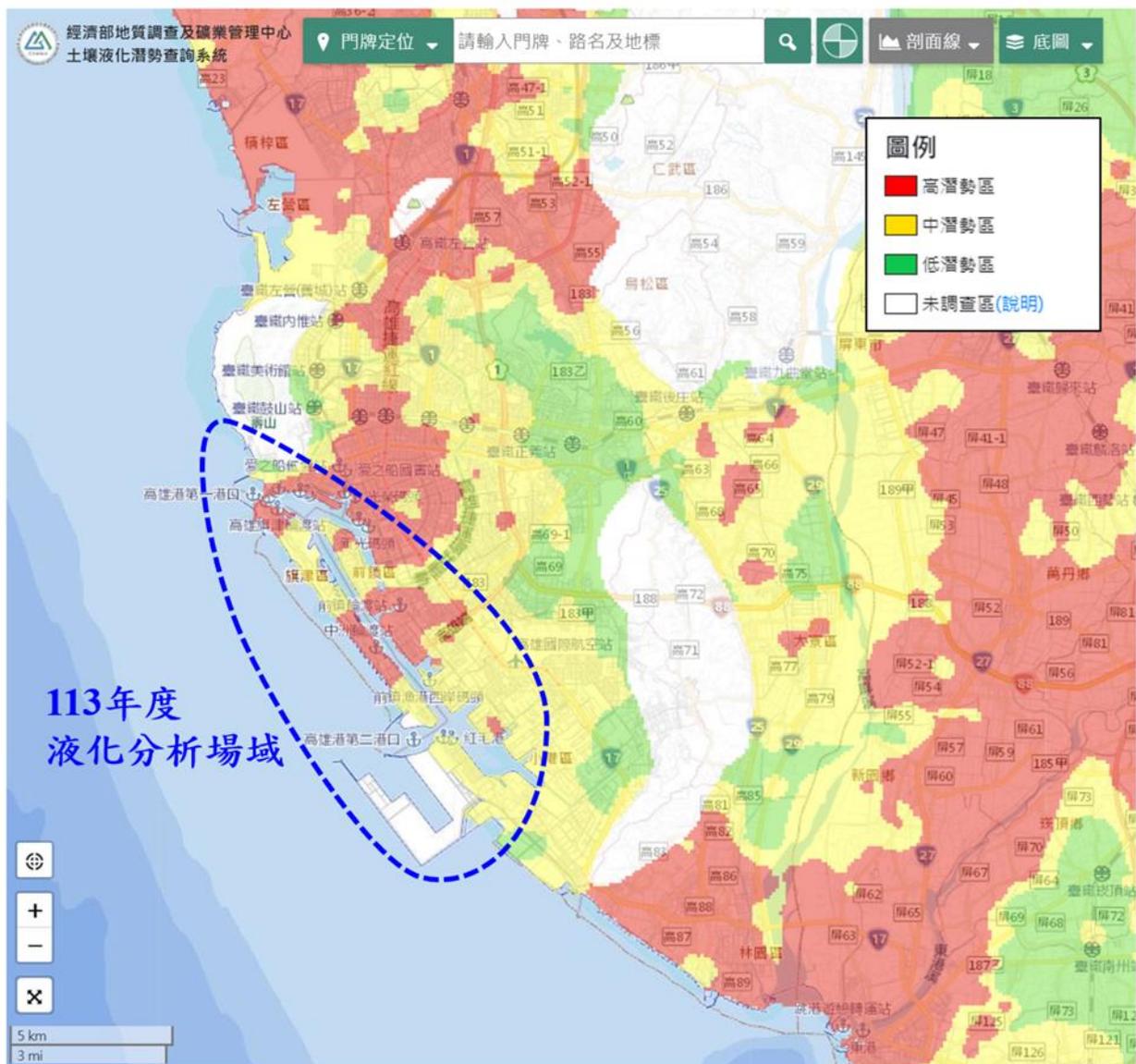


圖 3.2 高雄港鄰近區域液化潛勢圖資(改繪自地礦中心)

3.1 液化分析基本參數與資料說明

依據內政部國土管理署(2022)^[12]最新版本之建築物耐震設計規範及解說，建築物工址位於飽和砂土地層時，在地震時可能產生液化現象，應就規範規定計算抗液化安全係數 F_L 值(式 2.1)，以判定該土層是否為液化土層。評估方法可分為室內試驗法與簡易評估法兩類，惟工程實務中常採用簡易評估法，如 SPT-N 法、CPT- q_c 法及 V_s 法等，各種液化評估法皆有其發展背景、基本資料庫與限制條件等，長期以來，國內通常採用 SPT-N 法，規範列舉如 HBF 法(黃俊鴻等人，2012)^[4]、NCEER 法(Youd et al., 2001)^[21]與日本道路協會法(JRA, 1996)^[7]。本計畫係以 HBF 法與 NCEER 法進行定值法液化分析，另外以 Cetin 機率法進行高雄港陸域液化機率探討。

耐震設計規範規定簡易評估法應就不同地震規模進行計算，分別為以中小地震、設計地震與最大考量地震(用途係數 $I=1.5$ 之建築物)進行評估。表 3-1 為規範中表列不同縣市於土壤液化潛勢評估中，建議使用之地震規模 M_w ，高雄港位處高雄市，後續分析中分別以 6.9、7.1 與 7.3，對應中小地震、設計地震與最大考量地震進行地震規模修正因子之計算。於抗液化安全係數 F_L 計算中，需考量不同地震加速度下，地震引致土層之平均反覆剪應力比(CSR)，依 1.2 定義進行計算。而不同地震規模下，尖峰水平地表加速度 a_{max} 應就分析工址之設計地震頻譜進行計算，如式 3.1 至式 3.3：

$$a_{max} = \frac{0.4 S_{DS}}{4.2} g \text{ (for 中小地震)} \quad (\text{式 3.1})$$

$$a_{max} = 0.4 S_{DS} g \text{ (for 設計地震)} \quad (\text{式 3.2})$$

$$a_{max} = 0.4 S_{MS} g \text{ (for 最大考量地震)} \quad (\text{式 3.3})$$

其中 S_{DS} 與 S_{MS} 為工址水平譜加速度係數，可由國家地震中心開發之臺

灣規範反應譜查詢介面中查詢(如圖 3.3)，後續分析中主要以此結果之震區水平譜加速度係數進行液化分析，分析中之尖峰水平地表加速度 a_{max} ，分別以 0.05 g、0.20 g 與 0.28 g，對應中小地震、設計地震與最大考量地震進行考量，則 CSR 基本分析參數，彙整如表 3-2 所示。雖目前規範未直接列出中小地震、設計地震與最大考量地震對應之尖峰水平地表加速度，但由規範定義尖峰水平地表加速度 a_{max} 公式(式 3.1 至 3.3)，可配合不同縣市土壤液化分析建議之地震規模(表 3-1)與臺灣規範反應譜，在相同分析工址可計算相同設計頻譜之分析加速度。

表 3-1 不同縣市土壤液化分析建議之地震規模^[12]

縣、市	對應中小度地震之地震規模	對應設計地震之地震規模	對應最大考量地震之地震規模
基隆市、新北市、臺北市、宜蘭縣、花蓮縣、台東縣	7.1	7.3	7.5
桃園市、臺中市、彰化縣、南投縣、雲林縣、嘉義縣市、臺南市、高雄市	6.9	7.1	7.3
新竹縣市、苗栗縣、屏東縣	6.7	6.9	7.1
澎湖縣、金門地區、馬祖地區	6.5	6.7	6.9



圖 3.3 國家地震工程研究中心臺灣規範反應譜查詢介面^[12]

表 3-2 高雄港港區不同分析情境之地震規模與分析加速度

分析情境	中小地震	設計地震	最大考量地震
地震規模 M_w	6.9	7.1	7.3
分析加速度 a_{max}	0.05	0.20	0.28

註:地震規模無單位，分析加速度之單位: g

運技中心地工資料庫之 SPT 鑽探資料處於高雄港陸域位置為 697 孔(相對位置請參考圖 3.4)^[13]，為完整進行高雄港區土壤液化安全評估，另蒐集港務公司提供之歷年工程相關鑽探報告資料 189 孔，其中部分專用區鑽探資料較欠缺，主因為港務公司於興建時皆有施作土壤地質改良，並未留存興建前原始鑽探資料(包括:洲際一期貨櫃中心、洲際二期物流倉儲區、台灣國際造船公司、中國鋼鐵公司、台電大林發電廠、台灣中油公司、高雄港洲際貨櫃中心第二期工程計畫)。彙整本計畫合計 886 孔 SPT 鑽探資料(如表 3-3)用以進行高雄港液化分析作業，其篩選過後採用鑽探資料與位置之地理空間分布請參考圖 3.5，相關 SPT-N 試驗資料須資料篩選，其條件如下：

1. SPT 試驗資料之鑽探深度需 ≥ 10 m，且高程大於 0 (著重陸域 SPT 鑽探資料)。
2. 避開棧橋式碼頭位置，因該碼頭型式係由樁基礎所進行支撐，不可能發生土壤液化問題。
3. SPT 試驗資料須具備鑽孔座標資料，以供後續 GIS 系統進行空間內插使用。
4. 由於簡化分析法係以乾淨砂作為基本資料庫，進行液化分析時，需進行細粒料含量修正，因此鑽探資料應包含 FC 值(即粉土+黏土之比例)。

5. SPT 值施作間隔為固定規律，指定分析深度內皆有 N 值。

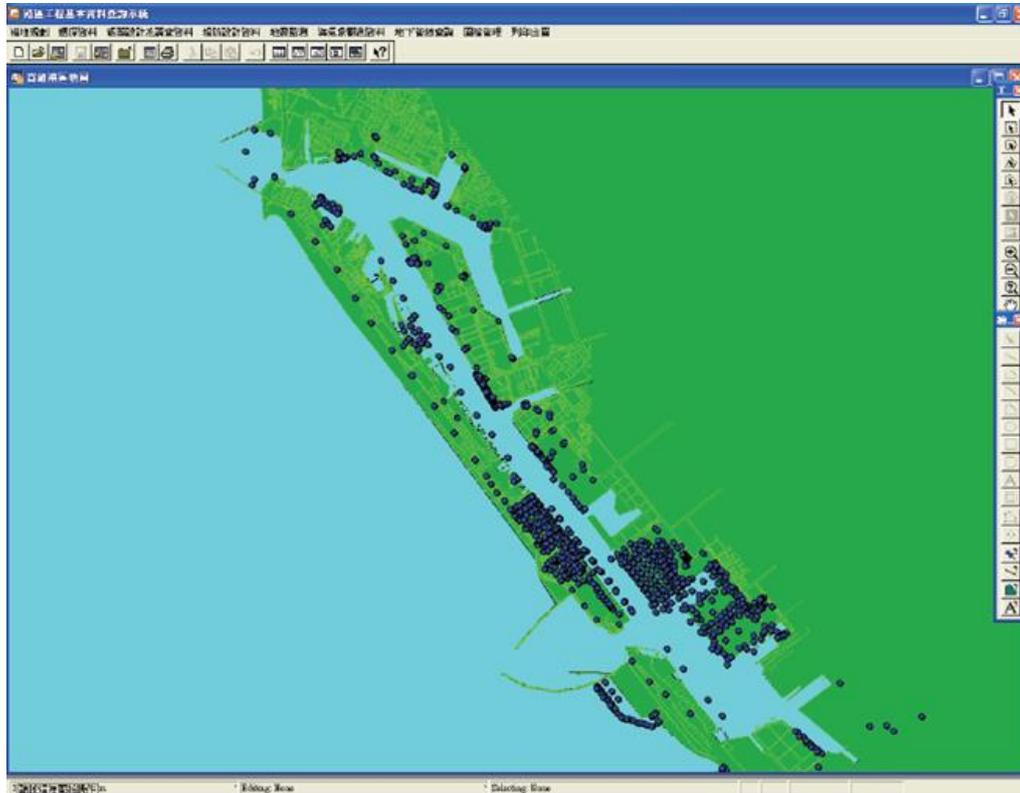


圖 3.4 地工資料庫高雄港港區鑽探孔位分布圖(運研所，2011)^[13]

表 3-3 高雄港港區 SPT 鑽探資料來源與數量統計

資料來源	原始資料	可用資料 筆數
港研中心 地工資料庫	713 孔	697 孔
港務公司 鑽探報告	196 孔	189 孔
可用資料筆數		886 孔



圖 3.5 高雄港港區可用 SPT 鑽探資料分布情況

為符合運技中心地工資料庫相關登錄資料名詞(如表 3-4 與表 3-5)，新增 189 孔之 SPT 鑽探資料，係採相關格式進行數化資料登錄，包含引索標籤(Tag_key)、計畫名稱(Project)、鑽孔名稱(Hole_no)、提供單位(Offer_comp)、Boring_comp(鑽探公司)、鑽探日期(Boring_date)、鑽孔位置(Locat_desc)、TWD97 制座標(Pos_x、Pos_y)、高程(Pos_z)、鑽孔深度(H_depth)與鑽探水位深度(D_w)，完整建置高雄港區鑽探資料數化資訊。

而 SPT 試驗資料則包含試驗深度(Depth)、土/岩層說明(Desc)、USCS 分類(Class)、SPT-N 值(N_value)、土壤組成比例(Gravel、Sand、Silt 及 Clay)、含水量(Water_cont)、液性限度(LL)、塑性限度(PL)、單位重(Unt_weight)、比重(S_gravity)與孔隙比(Void_ratio)，相關數化成果後

續可依中心需求，快速整合至地工資料庫中使用。原地工資料庫以建置之 SPT 鑽探資料，其引索標籤(Tag_key)維持原有編號，後續補充之鑽探資料，採 SXX-YY 進行編號，其中 XX 為相同鑽探報告來源，而 YY 為相關報告之鑽孔數量，例如，S01-12 為補充資料編號 01 的第 12 孔鑽探資料。

表 3-4 本所運技中心地工資料庫鑽探試驗資料登錄名詞說明(A)

系統名稱：港區土層分佈資料庫			日期： / /	
檔案名稱：Welldata			檔案格式：表格 (.DBF)	
檔案說明：港區各鑽探孔位座標高程試驗公司等資料				
編號	欄位名稱	欄位中文說明	資料型態及長度	備註
1	Tag_key	索引標籤	Char(10)	
2	Project	計畫名稱	Char(40)	
3	Hole_no	鑽孔名稱	Char(10)	
4	Offer_comp	提供單位	Char(40)	
5	Borin_comp	鑽探公司	Char(40)	
6	Test_comp	試驗公司	Char(40)	
7	Borin_date	鑽探日期	Date	MMDDYY
8	Locat_desc	鑽孔位置	Char(40)	
9	Pos_x	X 座標	Decimal(12, 2)	
10	Pos_y	Y 座標	Decimal(12, 2)	
11	Pos_z	高程	Decimal(7, 2)	
12	Pizometer	水位計	Char(20)	
13	Pizo_depth	埋設深度	Decimal(7, 2)	
14	H_angle	鑽孔傾角	Decimal(3, 0)	
15	H_diameter	鑽孔孔徑	Decimal(6, 0)	
16	H_depth	鑽孔深度	Decimal(7, 2)	
17	Gw_level1	第 1 次地下水位量測 深度	Decimal(7, 2)	
18	Gw_date1	第 1 次地下水位量測 日期	Date	MMDDYY
19	Gw_level2	第 2 次地下水位量測 深度	Decimal(7, 2)	

表 3-5 本所運技中心地工資料庫鑽探試驗資料登錄名詞說明(B)

系統名稱：港區土層分佈資料庫			日期： / /	
檔案名稱：(tag-key)			檔案格式：表格 (.DBF)	
檔案說明：鑽孔之試驗資料				
編號	欄位名稱	欄位中文說明	資料型態及長度	備註
1	Depth	深度	Decimal(6, 2)	
2	Desc	土/岩層說明	Char(40)	
3	Class	土壤岩石分類	Char(10)	
4	Smpl_rate	取樣率	Decimal(3, 0)	
5	Rqd	岩心完整性	Decimal(3, 0)	
6	N_value	錘擊數	Decimal(3, 0)	
7	Smpl_no	採樣編號	Char(5)	
8	Gravel_%	礫石含量	Decimal(3, 0)	
9	Sand_%	砂土含量	Decimal(3, 0)	
10	Silt_%	粉土含量	Decimal(3, 0)	
11	Clay_%	黏土含量	Decimal(3, 0)	
12	Water_cont	自然含水量	Decimal(5, 1)	
13	LL	液性限度	Decimal(5, 1)	
14	PI	塑性指數	Decimal(5, 1)	
15	Unt_weight	總體單位重	Decimal(5, 2)	
16	W_gravity	比重	Decimal(5, 2)	
17	Void_ratio	孔隙比	Decimal(5, 2)	
18	D10	10%通過粒徑	Decimal(7, 4)	
19	D50	50%通過粒徑	Decimal(7, 4)	
20	Other_test	其他試驗	Char(20)	

圖 3.6 為高雄港區 SPT 鑽探資料分布網格圖，本計畫參考地礦中心之土壤液化調查與風險評估計畫執行作要要點：「鑽探配置是以重要性、人口密度及地質條件為原則，在都市計畫範圍以每平方公里應有四孔鑽探為原則；非都市計畫範圍以每平方公里 2 孔鑽探為原則；而地質條件單純、且工程性質不易發生土壤液化地層以每四平方公里 1 孔鑽探為原則」。由上可知，目前高雄港區 SPT 鑽探資料之空間分布大部

分可滿足鑽探配置需求。



圖 3.6 高雄港區分析範圍與 SPT 鑽探分布網格圖

3.2 以定值法進行高雄港液化潛勢分析

本計畫分別以 NCEER(2001)^[21]與黃俊鴻等人(2012)^[4]提出之本土化 SPT-N 簡易評估法進行高雄港區液化分析。HBF 法分析流程請參考圖 2.4，可評估土層不同深度之抗液化剪力強度比 CRR，搭配不同地震情境估算之平均反覆剪應力比 CSR(式 2.2)，可計算土層抗液化安全係數 F_L 隨深度變化。研究搭配 Iwasaki et al.(1982)提出之深度加權方法(式 2.10)計算各 SPT 鑽孔之液化潛勢指數 P_L ，空間內插方式呈現高雄港區不同分析情境之液化潛勢圖資，以不同地震情境之地震規模 M_w 與尖峰地表加速度值 a_{max} (如表 3-2)，分別進行計算中小地震、設計地震與最大考量地震情境之液化潛勢圖資。

研究採用 QGIS 進行相關圖資計算與呈現，QGIS 是一套開源的地圖資料管理系統，使用者可透過蒐集、處理、分析及整合地理空間資料，以繪製主題式地圖，呈現地理現象和資訊型態的分佈，藉由 GIS 資訊系統之使用，可整合高雄港區安全評估圖資，以供後續應用。而港區不同點位液化潛勢指數 P_L 之空間內插方法，係採用反距離權重法(Inverse distance weighting, IDW)進行計算，IDW 法以各內插點的值與鄰近樣本點的距離作為權重參數，其距離越遠關係越小，離內插點越近的樣本點賦予的權重越大，用於內插高雄港陸域面積內不同點位之液化潛勢指數 P_L 。以 HBF 法所完成的液化潛勢圖資成果，如圖 3.7 至圖 3.9。

國際常採用之 NCEER 法其分析流程，如圖 2.4，NCEER 法與 HBF 法差異主要在於抗液化剪力強度比 CRR 之基本資料庫與 CSR 之深度修正因子不同。以 NCEER 法所完成的液化潛勢圖資成果，如圖 3.10 至圖 3.12。由不同液化潛勢圖資可發現，兩方法在高雄港區評估之低、中潛勢區分布位置大致相同，在中小地震規模下($a_{\max} = 0.05 g$)，港區陸域大部分屬於低潛勢區 ($0 \leq P_L \leq 5$)，其液化風險等級屬輕微液化；在設計地震規模下($a_{\max} = 0.20 g$)，港區陸域大部分則轉變為高潛勢區 ($P_L > 15$)，其液化風險等級屬嚴重液化；而最大考量地震下($a_{\max} = 0.28 g$)，經檢視分析資料後，兩方法高潛勢區明顯差異很大，其原因為 Iwasaki et al.(1982)定義液化潛能指數 P_L 值大於 15 屬高液化風險，而 HBF 方法較多鑽探剛好達此門檻值，造成 HBF 法於高雄港陸域分析得較高潛勢面積之現象，因此最大考量地震情境將以 NCEER 方法做為參考。



圖 3.7 中小地震下高雄港港區液化潛勢圖(HBF 法)

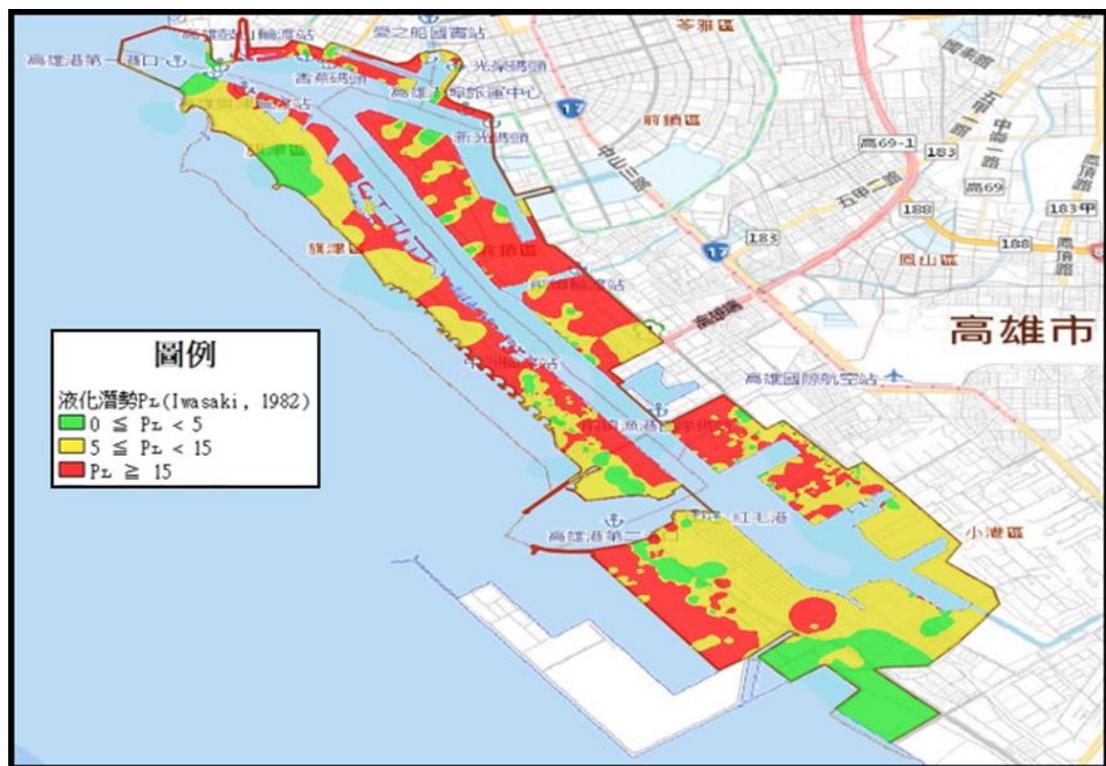


圖 3.8 設計地震下高雄港港區液化潛勢圖(HBF 法)

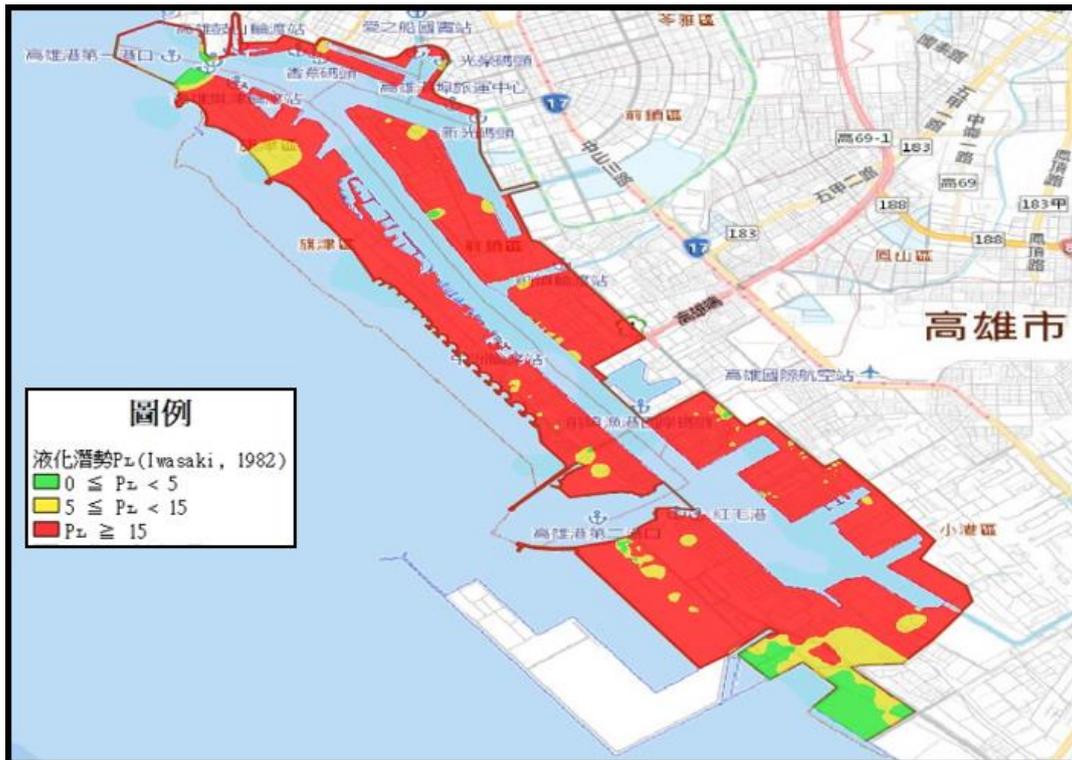


圖 3.9 最大考量地震下高雄港港區液化潛勢圖(HBF 法)



圖 3.10 中小地震下高雄港港區液化潛勢圖(NCEER 法)

3.3 Cetin 機率法分析成果

液化簡易評估方法大致可區分為定值法與機率法兩種類型，3.2 節主要以國內建築技術規則所列定值(deterministic)液化潛勢評估法(NCEER 法與 HBF 法)評估不同地震情境下高雄港液化潛勢分布。除定值分析方法，本節依 Cetin et al. (2004)^[22]提出之機率(probabilistic)液化潛勢評估法，計算高雄港區內 886 孔鑽探資料不同深度之液化機率 PL，其計算公式如式 2.8。

考量 Cetin 法計算所得之液化機率 PL 僅為單一深度結果，無法直接以平均結果代表個別鑽孔之液化機率，計畫參考 Iwasaki(1982)^[25]以深度作為加權因子，計算鑽孔液化機率 PL，其定義如式 3.4：

$$\text{鑽孔液化} PL = \frac{\int_0^{20} PL(z)w(z)dz}{\int_0^{20} w(z)dz} \quad (\text{式 3.4})$$

其中計算深度 z 應小於 20 公尺，而加權因子 $w(z)=20-z$ ，以求取加權後的鑽孔液化機率 PL ($0\% \leq PL \leq 100\%$)。

不同點位液化機率 PL 之空間內插方法，同樣採用反距離權重法(IDW 法)進行計算，高雄港陸域面積內不同點位之液化機率 PL 空間數值內插成果，整理如圖 3.13 至圖 3.15 所示。比較 NCEER 定值法、HBF 定值法與 Cetin 機率法成果，在相同地震情境下，中高液化危害度分布位置大致相同，說明分析成果具有高度一致性。而機率法可提供相較液化潛勢指數 P_L 更為直觀之參考指標，以液化機率 PL 說明在特定情境下，高雄港區陸域各位置是否有機會產生液化災害。



圖 3.13 中小地震下高雄港港區液化機率分布圖(Cetin 法)

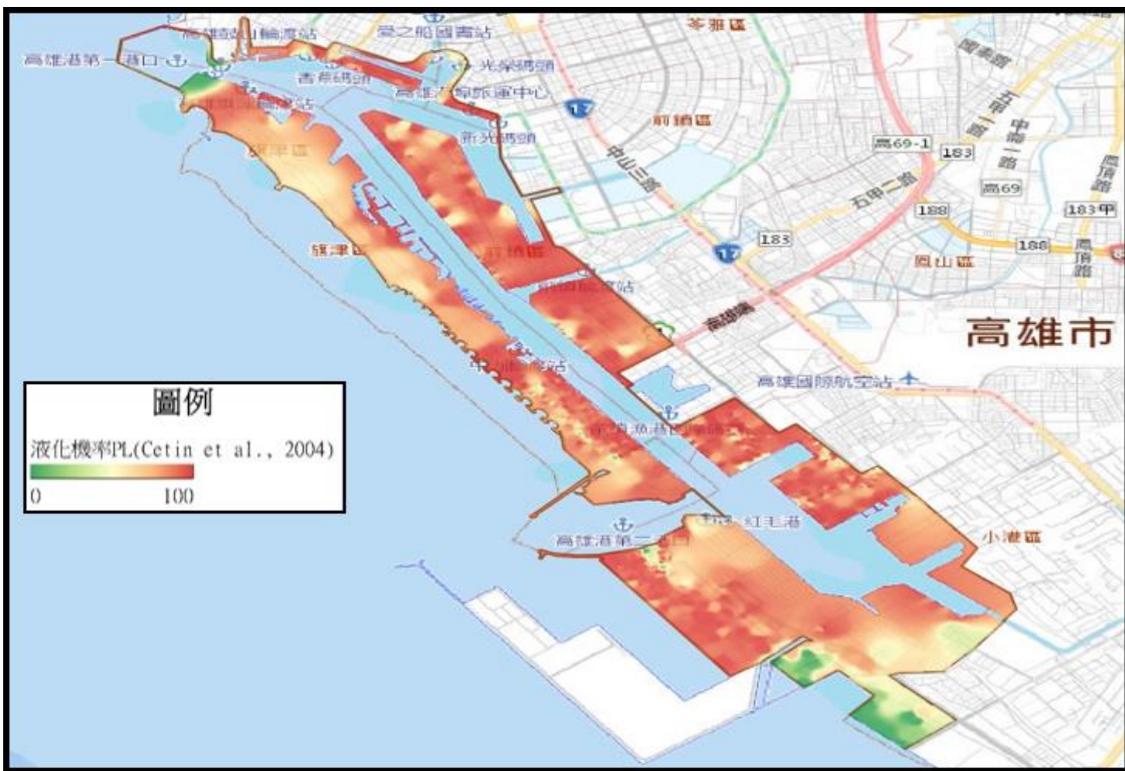


圖 3.14 設計地震下高雄港港區液化機率分布圖(Cetin 法)

表 3-6 為歸納 3.2 節定值法液化潛勢成果，比較不同地震情境下，低、中與高潛勢區之面積占比變化。如圖 3.16 所示，以高雄港區陸域約 1,871 公頃來說，當尖峰水平加速度 a_{max} 達 0.20 g 時，高雄港區陸域約有 38% 左右的面積處於高潛勢區，而最大考量地震時($a_{max}=0.28$ g)，則高潛勢區面積占比分別為 86.6% 與 45.3%，兩種分析方法於最大考量地震情境時發生較大的差異。以不同地震情境之尖峰水平加速度 a_{max} 與高雄港高潛勢區佔比進行線性迴歸時，扣除 HBF 法於 a_{max} 為 0.28 g 之數據點，其成果如圖 3.17 所示，其判定係數(coefficient of determination, R^2)高達 0.99，可供地震災損面積評估使用。成果中之低、中與高潛勢定義係由 Iwasaki(1982)方法著重討論深度於 20 公尺內之鑽孔液化機率。此次在最大考量地震下 HBF 法在中潛勢區面積佔比偏低，可能因 HBF 方法考量本土粉質砂土案例，造成在相同分析加速度下，HBF 方法偏保守，即中潛勢區面積較低。另本計畫主要採用 HBF 法及 NCEER 法為架構，加入國內 921 地震案例，可相對符合中南部特有粉土質砂於液化現象之評估，目前兩方法在規範中皆可使用。兩分析架構相似，重點在於其分析案例之差異，雖 HBF 法加入國內 921 地震案例，但也無法說明其更適用於高雄港。

表 3-6 高雄港不同 SPT-N 簡易評估法液化潛勢區佔比

簡易 評估法	地震情境	地震 規模 M_w	尖峰 水平 加速度 a_{max} (g)	(%)		
				低潛勢區	中潛勢區	高潛勢區
HBF 法	中小地震	6.9	0.05	98.0	0.9	1.1
	設計地震	7.1	0.20	15.9	45.3	38.8
	最大考量地震	7.3	0.28	4.7	8.8	86.6
NCEER 法	中小地震	6.9	0.05	99.8	0.2	0.0
	設計地震	7.1	0.20	18.2	44.0	37.8
	最大考量地震	7.3	0.28	13.7	41.0	45.3

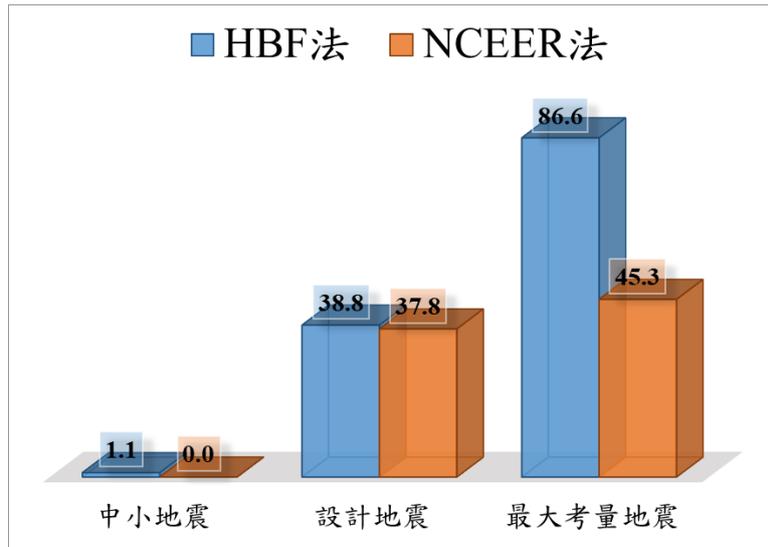


圖 3.16 不同 SPT-N 簡易評估法於高雄港高潛勢區面積佔比差異

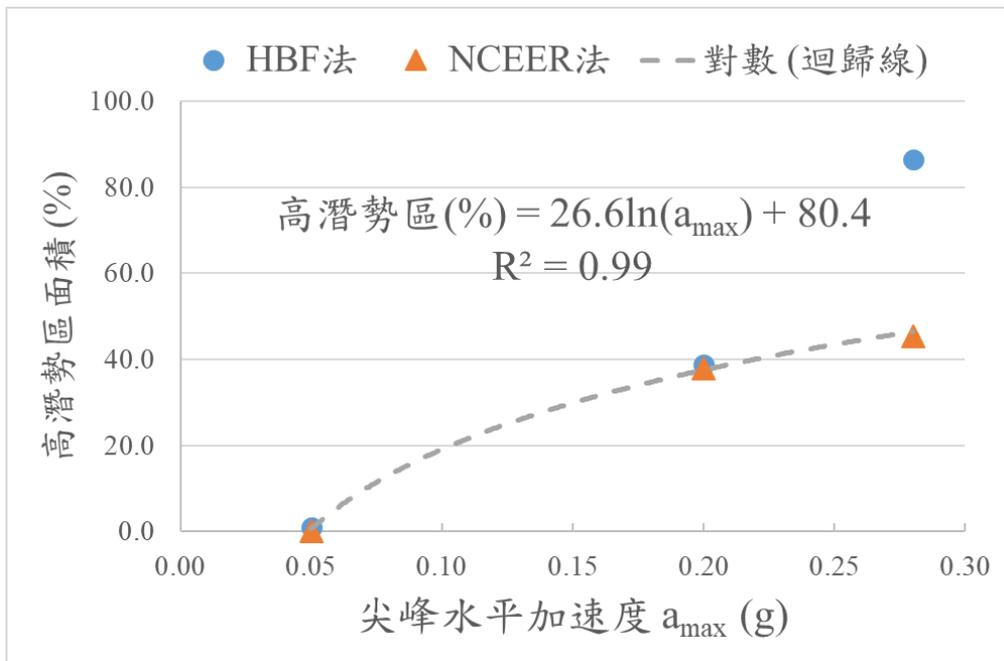


圖 3.17 高雄港高潛勢區面積佔比與不同尖峰水平加速度關係

第四章 高雄港地震後沉陷量評估

對於飽和疏鬆砂層，受地震力動態加載，在短期不排水情況下，土層動態水壓隨加載上升直至液化產生或喪失部分強度，加載期間累積之超額孔隙水壓於震後將逐步消散，伴隨此過程土層產生一體積應變 (Kramer, 1996)^[32]，如圖 4.1 所示，對於一砂土層初始狀態為 A 點，於地震過程中激發超額孔隙水壓至 B 點，地震後土層水壓消散而移至 C 點，則 A 與 C 點之孔隙比差異變化，反應於地表面下降(即地層下陷)，此沉陷量定義為震陷量(post-liquefaction settlement, S)。依第三章成果，若高雄港遭遇如尖峰水平加速度 0.2 g 之地震時，估計於高雄港區陸域面積產生約 45% 左右之高液化潛勢區，而對於土壤液化引致之災損，除液化潛勢指數 P_L 外，常以評估震陷量 S 來探討災害災損程度。

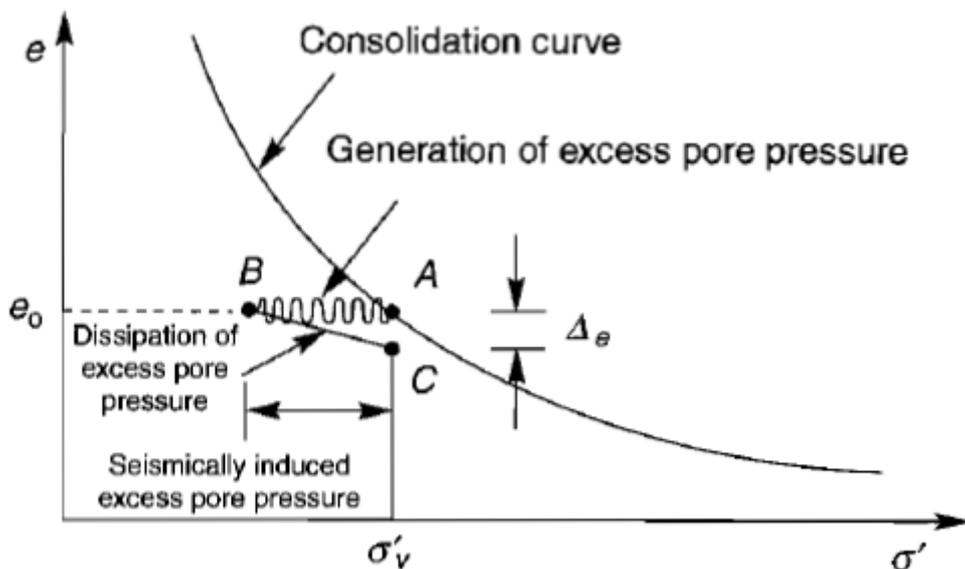


圖 4.1 地震致使超額孔隙水壓力激發後土層消散壓密沉陷^[32]

Ishihara(1996)^[40]觀察日本多處地震後震陷變形行為，指出當震陷量 S 小於 10 cm 時，災害程度僅為輕微或無沉陷，地表伴隨微小裂隙；當震陷量 S 大於 30 cm 時，此時災損將集中於地表面，發生如噴砂、開裂與大量位移等現象，相關沉陷等級與震陷量關係，如表 4-1 所示。

震陷量推估方法目前常使用 Ishihara and Yoshimine (1992)^[37] 依室內試驗成果歸納之經驗圖表(如圖 2.7 所示), 對於液化後引致之體積應變(ϵ_v)大小, 主要與土層相對密度(D_r)、地震力引致最大剪應變(γ_{max})與抗液化安全係數(F_L)相關, 並應用於分層估算震陷量 S 。

表 4-1 震陷量 S 與沉陷等級分類^[42]

Extent of damage	Settlements (cm)	Phenomena on the ground surface
Light to no damage	0-10	Minor cracks
Moderate damage	10-30	Small cracks, oozing of sand
Extensive damage	30-70	Large cracks, spouting of sands, large offsets, lateral movement

Ashford et al. (2011)^[38] 依日本 2011 年東北地震液化後鄰近建物之沉陷差異勘查成果, 指出當液化土層上方存在建築物時, 鄰近區域不同建物之基礎型式、載重與自由場(free field)觀察到的下陷量明顯不同。Macedo and Bray (2018)^[39] 提出液化引起之建築物沉陷主要可分為(1)受剪力作用引致 D_s 、(2)產生體積應變引致 D_v 及(3)噴砂後產生之地表變形 D_e 共三類, 而 Ishihara and Yoshimine (1992)^[37] 提出之液化引致沉陷分析方法, 僅考量液化砂土層本體因孔隙水壓消散造成的體積應變變化。

對於液化噴砂造成的地表變形 D_e 而言, 噴砂將造成等比例之體積置換, 但噴砂量通常為局部且不易評估, 建議以現場量測成果為準(Bray and Macedo, 2017)^[41]; 而液化時土層因建築物受剪力作用產生之 D_s , 則需考量建物基礎型式、大小、埋設深度與建物載重等因子, 須依各探討案例進行計算, 因此本章震陷量 S 評估主要考量產生體積應變引致之 D_v 。以下就高雄港震陷量評估方法、震陷潛勢與不同分析加速度 a_{max} 引致之震陷量推估進行說明：

4.1 SPT-N 鑽孔之震陷量評估

目前震陷量 S 推估方法主要使用 Ishihara and Yoshimine (1992)^[37] 之經驗圖表，但其成果需進行查圖，無法使用方程式進行計算，因此本研究參考紀雲曜(1997)^[9] 基於 Ishihara and Yoshimine (1992)^[37] 試驗成果提出之迴歸分析方程式與流程，計算最大剪應變 γ_{\max} 與體積應變 ε_v 之大小。以下為震陷量 S 之推估流程：

1. 依據 SPT-N 值計算土層相對密度 D_r (%)，採 Meyerhof(1957)^[44] 提出之經驗公式，如式 4.1 所示。

$$D_r = 16\sqrt{(N_1)_{78}} = 14\sqrt{(N_1)_{60}} \quad (\text{式 4.1})$$

2. 使用前章節 SPT-N 液化分析求得之抗液化安全係數 F_L 成果。
3. 計算地震力引致最大剪應變 γ_{\max} ，採紀雲曜(1997)提出之迴歸方程式，如式 4.2 所示。

$$\gamma_{\max} = 0.5 \times (0.5714F_L - b_2 - \sqrt{(b_2 - 0.5714F_L - 4b_1b_2)}) / b_1 \leq 8\% \quad (\text{式 4.2})$$

其中 b_1 、 b_2 與 b_3 為迴歸方程式之待定係數，採式 4.3 至 4.5。

$$b_1 = (-7.3825 - 2.1981D_r + 0.1124D_r^2 - 0.0018D_r^3) \times 10^{-4} \quad (\text{式 4.3})$$

$$b_2 = 0.5331 + 0.0042D_r - 1.34 \times 10^{-4} D_r^2 + 1.151 \times 10^{-6} D_r^3 \quad (\text{式 4.4})$$

$$b_3 = 2 - 12.25b_1 - 3.5b_2 \quad (\text{式 4.5})$$

4. 計算分層體積應變 ε_v ，採紀雲曜(1997)^[9] 提出之迴歸方程式，如式 4.6 所示。

$$\varepsilon_v = (-1.131 \times \log D_r + 2.347) \gamma_{\max} \quad (\text{式 4.6})$$

5. 計算分層沉陷量 S_i ，並加總為震陷量 S ，如式 4.7 所示。

$$S = \sum_{i=1}^{20} S_i = \sum_{i=1}^{20} \varepsilon_{v,i} \times H_i \quad (\text{式 4.7})$$

綜合上述，可進行各別 SPT 鑽孔之震陷量，考量分析孔數多達 886 孔，因此同第三章之液化潛勢分析，採 Excel 之 VBA 程式，基於運技中心地工資料庫之格式與液化潛勢分析成果，可快速完成不同孔位與不同地震情境之震陷量變化。震陷量分析流程中須注意相對密度 D_r 最大值不可超過 100%， F_L 大於 2 時，分層體積應變 ε_v 為零，其原因為 Ishihara and Yoshimine (1992)^[37] 成果之 F_L 最大值為 2(如圖 2.7)。

4.2 高雄港震陷量潛勢分布

港區不同點位震陷量之空間內插，同 3.2 節採用反距離權重法 (Inverse distance weighting, IDW) 進行計算，完成的震陷潛勢圖資成果如圖 4.2 至圖 4.7，可提供不同地震情境下高雄港受震引致沉陷量分布。在中小地震下 ($a_{\max}=0.05 \text{ g}$) 時，受液化後震陷量不明顯，屬低度災損等級 (light damage)；設計地震與最大考量地震時 (a_{\max} 分別為 0.20 g 與 0.28 g)，則震陷量 S 有明顯上升之趨勢，且以高雄港各分區皆有顯著震陷量，可達高度災損等級 (extensive damage)。



圖 4.2 中小地震下高雄港港區震陷潛勢圖(HBF 法)

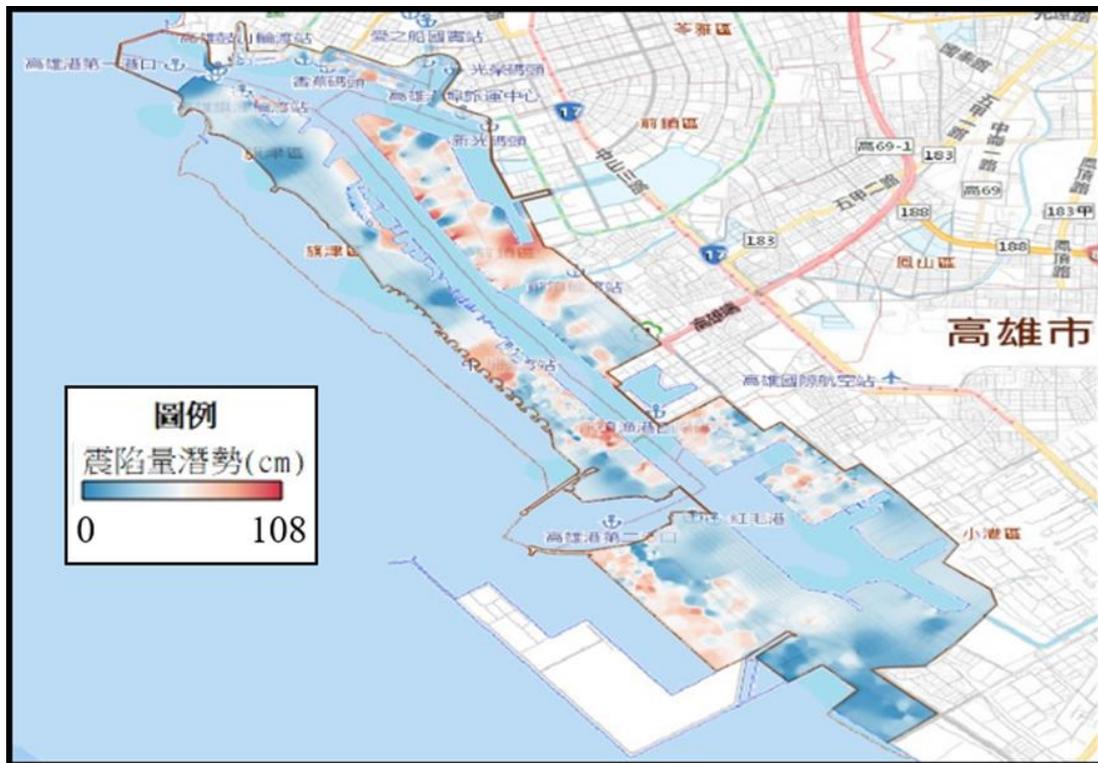


圖 4.3 設計地震下高雄港港區震陷潛勢圖(HBF 法)

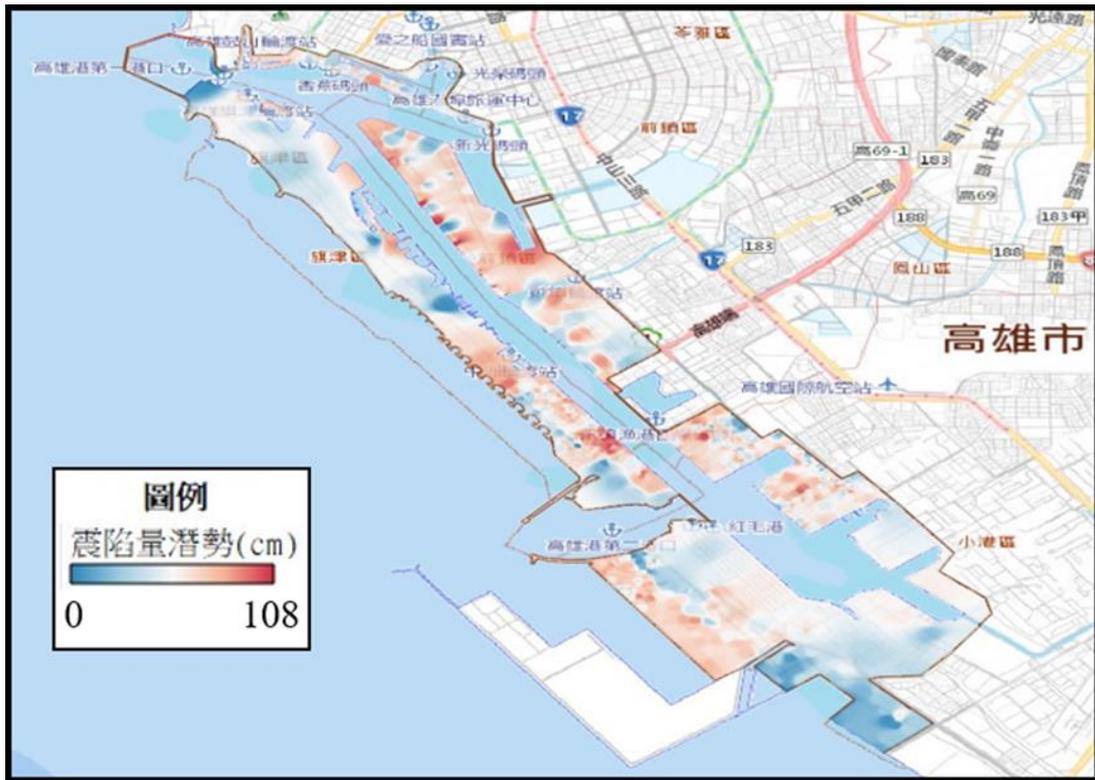


圖 4.4 最大考量地震下高雄港港區震陷潛勢圖(HBF 法)



圖 4.5 中小地震下高雄港港區震陷潛勢圖(NCEER 法)



圖 4.6 設計地震下高雄港港區震陷潛勢圖(NCEER 法)

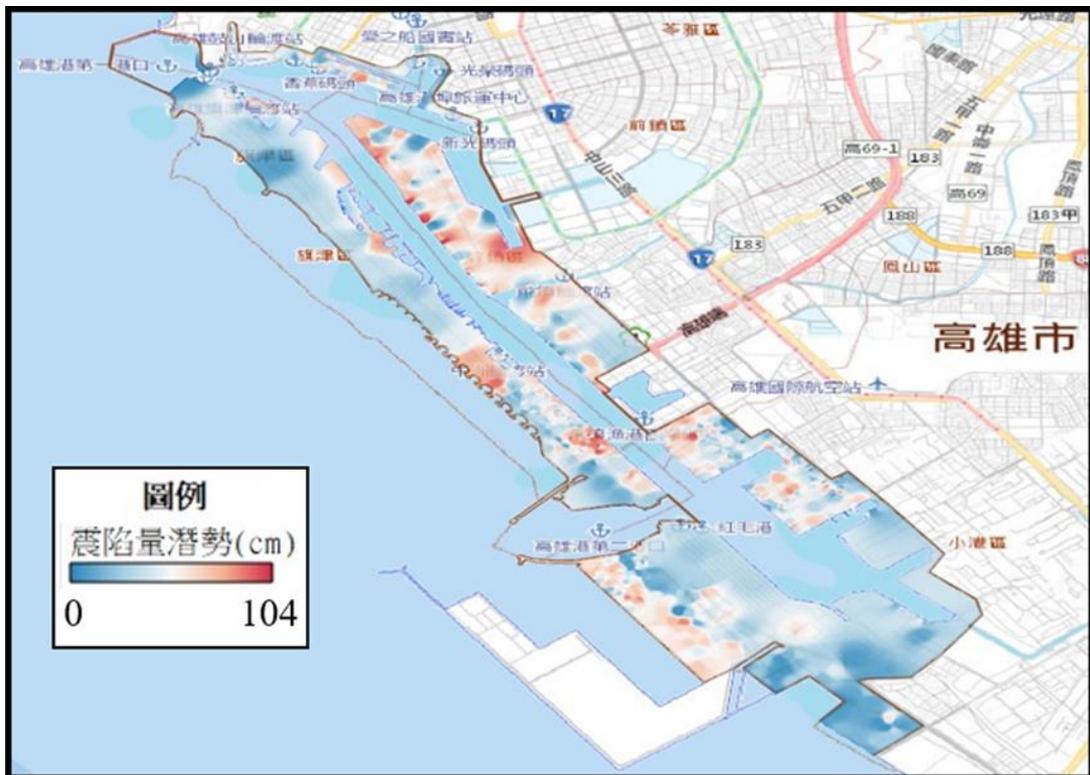


圖 4.7 最大考量地震下高雄港港區震陷潛勢圖(NCEER 法)

4.3 不同分析加速度 a_{max} 之震陷量推估

本計畫震陷量推估主要依據 Ishihara and Yoshimine (1992)^[37] 震陷量評估方法，以紀雲曜(1997)提出之迴歸方程式進行震陷量 S 的評估，為完整探討高雄港震後液化沉陷之變化，分析參數包含不同地震規模 M_w 、尖峰水平加速度 a_{max} ，就耐震設計規範(營建署，2022)^[12] 建議之情境，分別就中小地震、設計地震與最大考量地震進行評估。依 4.2 節之震陷潛勢分布圖資，可進一步歸納不同地震情境評估震陷量範圍與分布占比，基於不同 SPT-N 分析方法之 F_L 分析成果，於中小地震情境下，高雄港港區評估震陷量之變化範圍約為 0~0.2 cm (HBF 法)與 0~4.0 cm (NCEER 法)；設計地震下，港區震陷量變化範圍分別為 0.8~100.9 cm (HBF 法)與 0.9~101.1 cm (NCEER 法)；最大考量地震下，震陷量變化範圍分別為 1.2~107.2 cm (HBF 法)與 1.0~103.6 cm (NCEER 法)。

由成果可發現震陷量隨分析加速度 a_{max} 增加時，震陷量增加比例逐漸遞減，設計地震與最大考量地震之震陷量變化上、下限並無太大差異，而中小地震規模下，以 NCEER 法產生之震陷量上限較大，其上限值差異極大。為提供未來高雄港區快速震陷量評估使用，本計畫採用三分法，分離相較離散之震陷量數據點，分為低、中與高三個部分，嘗試以具代表性之震陷變化範圍作為震陷量評估公式之基礎數據點。

高雄港不同地震情境評估震陷量範圍與分布占比成果彙整如表 4-2 所示，對於 HBF 法而言，高雄港區不同位置於中小地震下，其震陷量主要集中於 0~0.1 cm 區段，約佔分部面積之 99.4%，設計地震下，則要集中於 34.2~67.5 cm 區段，約佔分部面積之 55.7%，最大考量地震之震陷量集中於 36.5~71.9 cm，約佔 71.8%；而 NCEER 法，中小地震下，其震陷量主要集中於 0~1.3 cm 區段，約佔分部面積之 95.7%，設計地震下，則要集中於 34.3~67.7 cm 區段，約佔分部面積之 43.7%，最大考量地震之震陷量集中於 35.2~69.4 cm，約佔 51.0%。透過上述方法，可降低部分 SPT 鑽探成果較離散之影響，而兩分析方法於不同分析加速度下的震陷量變化範圍與佔比相近。

圖 4.8 為高雄港不同分析加速度 a_{max} 與震陷量 S 之關係，採用具代表性之震陷變化範圍進行迴歸分析，可供不同分析加速度之快速評估平均震陷量與上、下限範圍，其定義如式 4.8：

$$S = C_1 * \ln(A) + C_2 \quad (\text{式 4.8})$$

其中 C_1 與 C_2 參數係經由震陷潛勢分析求得，當求取平均(average)震陷量時，採 $C_1=19.0$ 、 $C_2=50.0$ ；求取震陷量上限(upper bound)，採 $C_1=36.0$ 、 $C_2=103.8$ ；震陷量下限(lower bound)，採 $C_1=16.8$ 、 $C_2=47.0$ ，以 a_{max} 代入計算可求得震陷量 S (注意加速度單位為 g)，而震陷量 S 單位採 cm 。

綜合第三章與第四章成果，可完整建立不同分析加速度下，高雄港區於地震後之快速液化災損評估分析使用，包含不同地表加速度之液化潛勢區面積、液化後震陷量 S 。

表 4-2 高雄港不同地震情境評估震陷量範圍與分布占比

簡易評估法	地震情境	地震規模 M_w	尖峰水平加速度 a_{max} (g)	震陷量範圍與港區分布面積佔比		
				低	中	高
HBF 法	中小地震	6.9	0.05	0~0.1 cm (99.4%)	0.1~0.2 cm (0.3%)	0.2 cm 以上 (0.3%)
	設計地震	7.1	0.20	0~34.2 cm (35.8%)	34.2~67.5 cm (55.7%)	67.5 cm 以上 (8.4%)
	最大考量地震	7.3	0.28	0~36.5 cm (16.3%)	36.5~71.9 cm (71.8%)	71.9 cm 以上 (11.9%)
NCEER 法	中小地震	6.9	0.05	0~1.3 cm (95.7%)	1.3~2.7 cm (2.5%)	2.7 cm 以上 (1.8%)
	設計地震	7.1	0.20	0~34.3 cm (49.5%)	34.3~67.7 cm (43.7%)	67.7 cm 以上 (6.8%)
	最大考量地震	7.3	0.28	0~35.2 cm (42.0%)	35.2~69.4 cm (51.0%)	69.4 cm 以上 (7.0%)

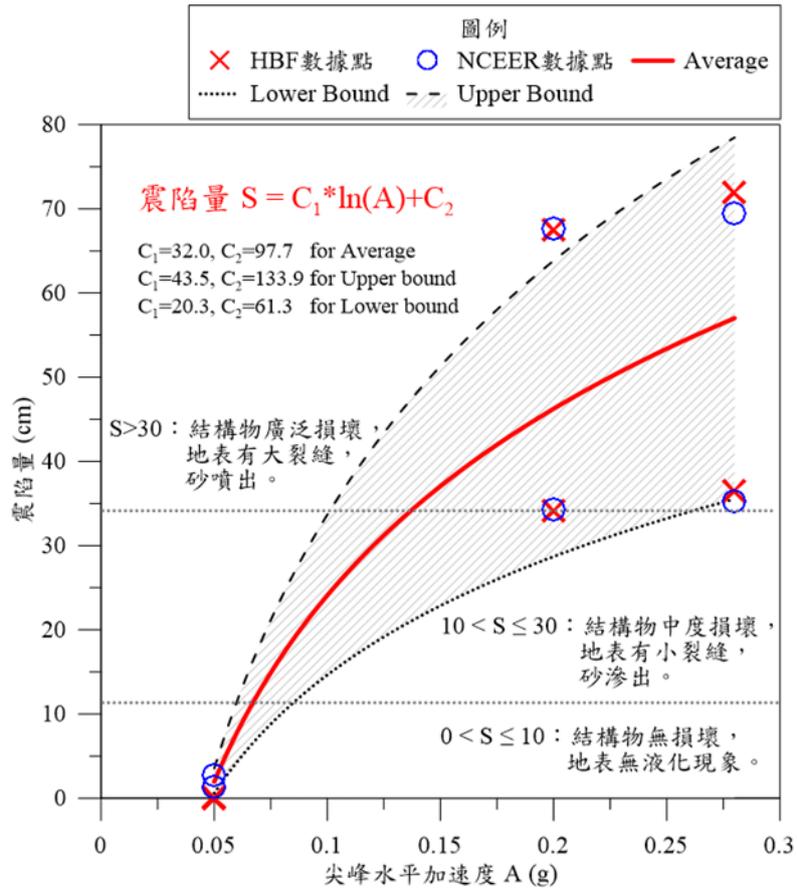


圖 4.8 高雄港不同分析加速度 a_{max} 之震陷量 S 經驗評估公式

第五章 震後快速液化災損評估訊息研擬

5.1 高雄港港區分區災損指標訂定

高雄港港區災損指標訂定流程，如圖 5.1 所示，以 886 孔 SPT 鑽探資料做為基本資料庫，以符合耐震設計規範之分析流程與參數進行不同情境之液化潛勢分析，並推估港區震陷量分布，建立不同地震情境下，高雄港區於地震後之快速液化災損評估分析。為進行分區指標訂定，本計畫參考目前高雄港現況(如圖 3.1 所示)之劃分，包含行政區、碼頭區與倉儲區等特定用途，考量不同區段之液化潛勢與專業區用途，並依高潛勢液化區面積隨分析加速度之變化，訂定各區門檻加速度與推估震陷量，以提供各級震度於各港設施各別區域之簡訊傳送內容文字警示之描述。

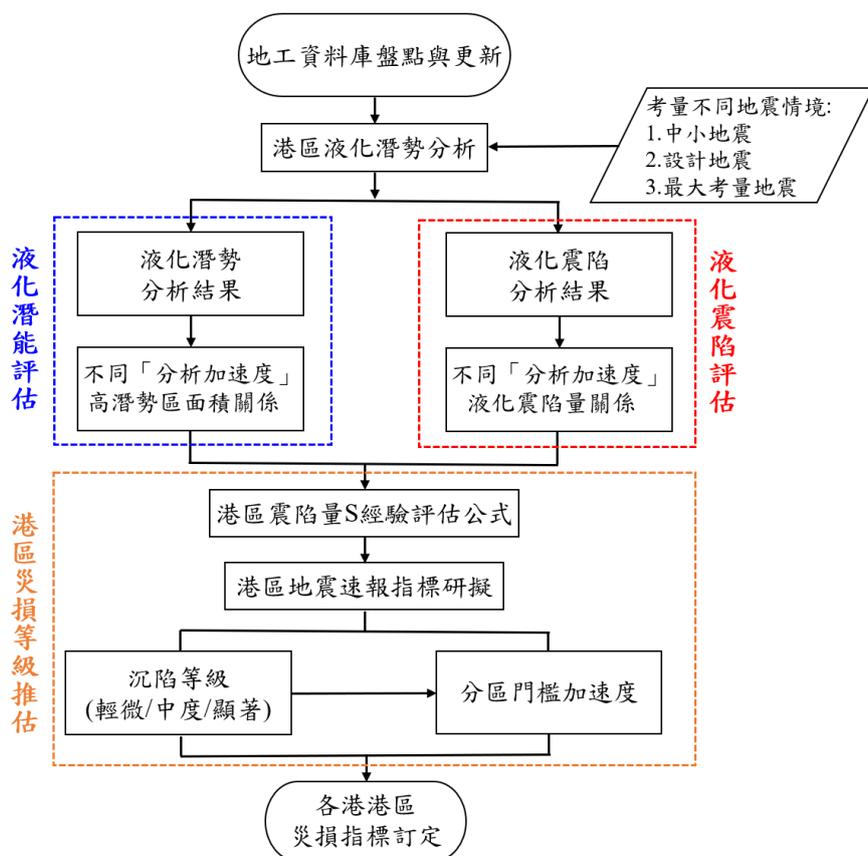


圖 5.1 高雄港港區災損指標訂定流程圖

5.2 震後快速液化災損評估訊息

於本(113)年度各項指標工作完成後，包含不同地表加速度之液化潛勢分析、地表沉陷量，可完整建立不同震度下，高雄港港區於地震後之快速液化災損評估分析，提供各級震度於各港設施個別區域之簡訊傳送內容文字警示之描述(如圖 5.2)^[16]。震後快速液化災損評估訊息依精緻化分區、門檻加速度值與平均震陷量評估值進行研擬。評估結果建議採分區觸發門檻值，以供進行主動式訊息通知。草擬訊息僅供參考，最終結果建議由港務公司，確認訊息內容及格式。

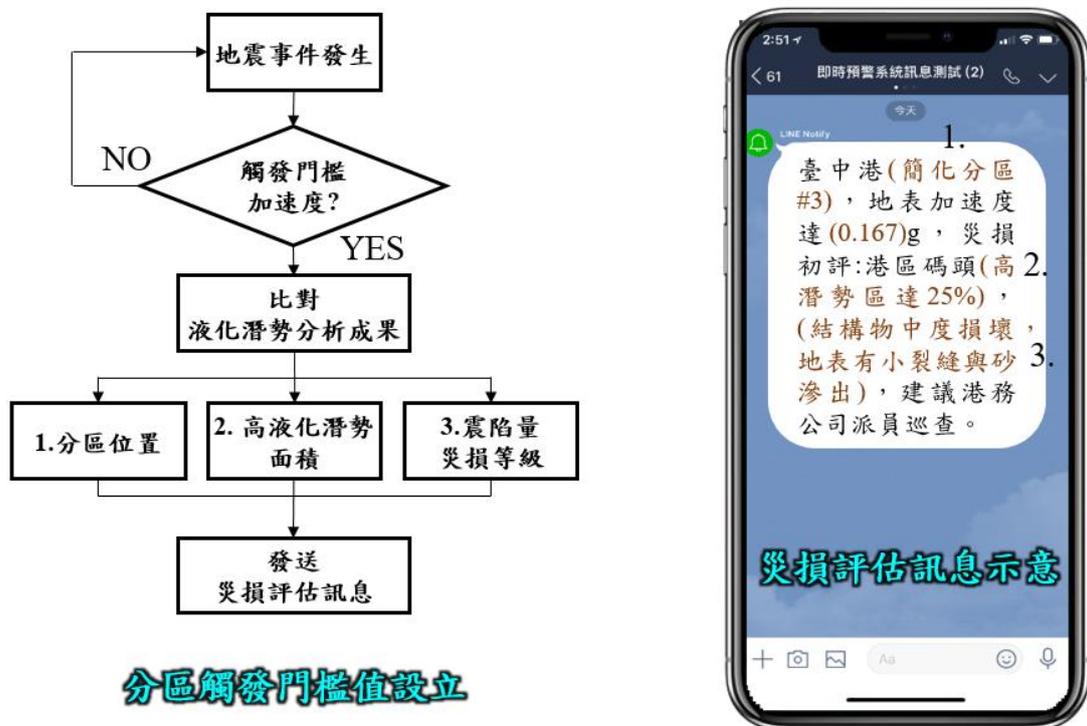


圖 5.2 震後快速液化災損評估訊息發布流程與示意(以臺中港為例)^[16]

本所運技中心多年來致力於精進臺灣重要港口之地震速報，包含高雄港、臺中港、蘇澳港、安平港、高雄港、布袋港、基隆港與花蓮港皆已進行地震設備佈設^[17]^[18]，地震速報目前設定於地震發生後1分鐘內會傳送簡訊內容於相關人員。除考量地震儀設置地點(須與港務公司討論)，減少誤報情形發生外，本計畫進行高雄港液化分析，可做為相關門檻加速度值訂定之依據，提供更合理之設定值。圖 5.3 為高雄港於

不同分析加速度之震陷量變化，為通盤考量高雄港腹地之推估震陷量，此處以平均震陷量(S_{avg})並參考 Ishihara(1996)提出之沉陷等級分類來擬定不同階段之通報門檻加速度，而沉陷等級依序可分為輕微沉陷($S < 10$ cm)、中度沉陷($10 \leq S \leq 30$ cm)與顯著沉陷($S > 30$ cm)3類。

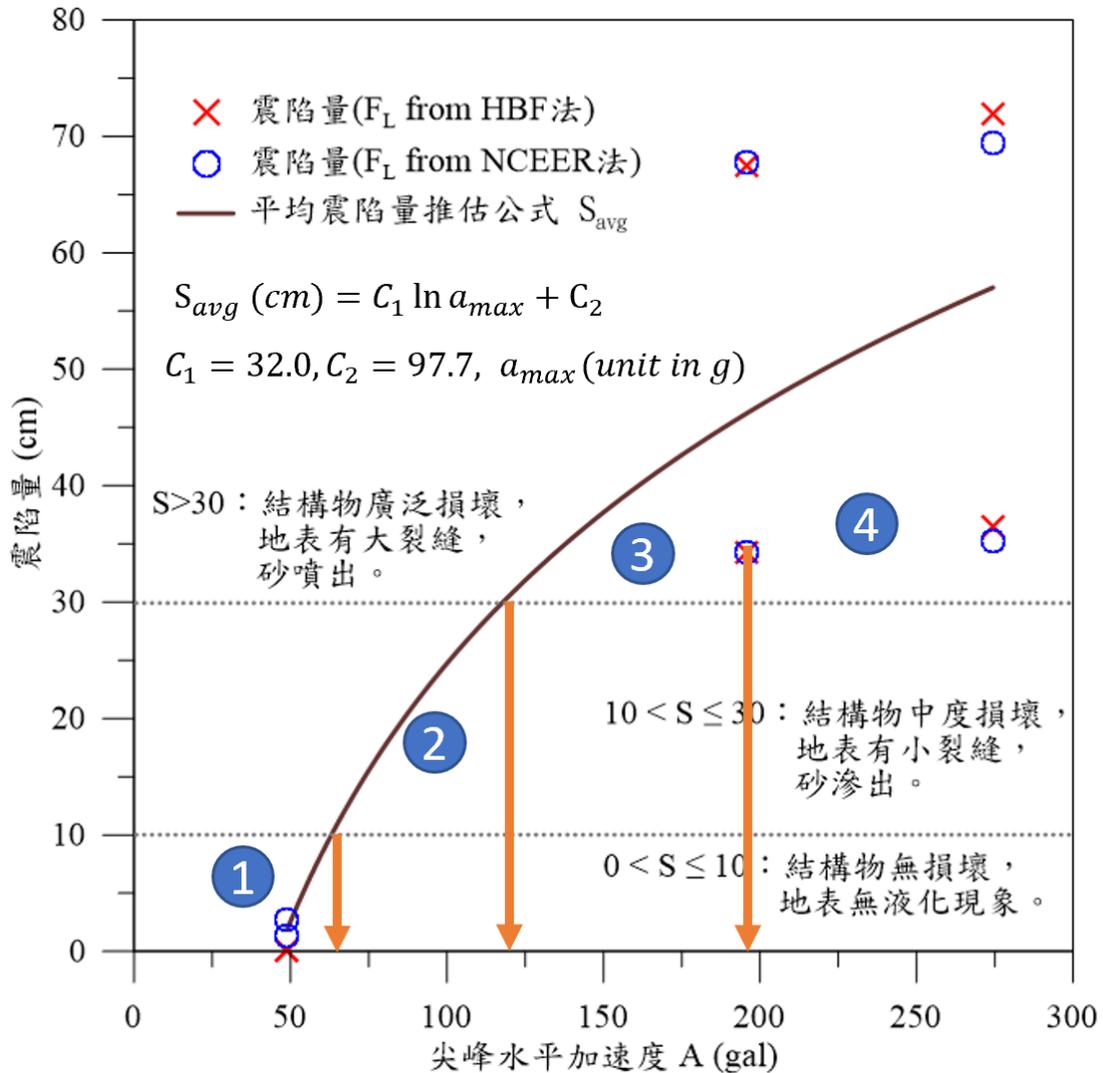


圖 5.3 高雄港地震速報簡訊分階門檻加速度訂定說明

對於第 1 階段之門檻加速度，以平均震陷量通過輕微沉陷之交會處做為代表，即以 65 gal 做為第 1 階段之門檻加速度，比較中央氣象署新制之地震震度分級(如表 5-1)，約可區分 4 級以內之震度，可有效減少不必要之通報；接著以震陷量 S 為 30 cm 之交點做為第 2 與第 3 階段之劃分，即 120 gal，而第 2 階段則接近設計地震之狀態，其可能

沉陷位置可參考圖 5.4；而當分析加速度持續上升時，可發現震陷量增量將明顯下降，因此以 196 gal 作為第 4 階段之劃分，此時港區可能有全面性液化現象，應注意碼頭穩定與後線沉陷變化(部分專區鑽探資料雖較欠缺，但由於土壤皆有施作地質改良較無液化風險，應不影響地震災損通報門檻值訂定)。相關門檻加速度與地震速報簡訊內容彙整於表 5-2 所示(簡訊傳送會先帶出高雄港<DATE>，<TIME>，震度<INTENSITY>，<PGA>gal，再接簡訊內容)。

表 5-1 新制地震震度分級表(取自中央氣象署)

中央氣象局新制地震震度分級表(109年1月1日起)										
震度	0級	1級	2級	3級	4級	5弱	5強	6弱	6強	7級
加速度 cm/sec ²	0.8	2.5	8.0	25	80					
速度 cm/sec					15	30	50	80	140	
	(速度劃分，已考慮加速度實際之影響)									



圖 5.4 設計地震下高雄港可能發生震陷位置示意圖

表 5-2 高雄港地震速報簡訊內容一覽表

階段	加速度範圍 (gal)	簡訊內容
1	0 – 65	◆港區初評安全。(TTRC 提供)
2	65 – 120	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆ 6-7、27、40-43、49-51、56-59、66-69、76-77、118-119 號碼頭，與洲際二期 S01-S05 地表可能有小裂縫，請優先派員巡查。(TTRC 提供)
3	120 – 196	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆港區多座碼頭後線地表可能有較大面積之顯著裂縫，請優先派員巡查。(TTRC 提供)
4	196 以上	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆港區可能有全面性液化現象，應注意碼頭穩定與後線沉陷變化，請優先派員巡查。(TTRC 提供)

註:TTRC(運輸技術研究中心簡稱)

綜合上述，透過推估震陷量與沉陷等級分類，可提供較合理之門檻加速度設定值，相較於目前設定值如表 5-3，其成果可更貼近於實際高雄港港區土層之液化危害度分析成果，本(113)年度各項指標工作完成後，包含不同地表加速度之液化潛勢分析(定值法與機率法)、地表沉陷量，可完整建立不同震度下，高雄港港區於地震後之快速液化災損評估分析成果。

表 5-3 高雄港地震速報簡訊內容(目前)一覽表

階段	加速度 範圍 (gal)	簡訊內容
1	0 – 25	◆港區初評安全。(TTRC 提供)
2	25 – 80	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆港區初評安全。(TTRC 提供)
3	80 – 150	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆新港橋、高字塔聯絡橋、MCC 倉庫聯絡橋及中興立體交叉道橋梁，請優先派員巡查。(TTRC 提供)
4	150 – 180	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆新港橋、高字塔聯絡橋、MCC 倉庫聯絡橋及中興立體交叉道橋梁，請優先派員巡查◆65-66、68-69、116-119 碼頭後線可能有部份龜裂，請優先派員巡查。(TTRC 提供)
5	180 – 210	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆新港橋、高字塔聯絡橋、MCC 倉庫聯絡橋及中興立體交叉道橋梁，請優先派員巡查◆ 6、7、33、45、48、50、58、68-70 碼頭後線，59-62 及 63-67 後方廠區可能有龜裂，116-119 後線可能龜裂或沉陷，請優先派員巡查。(TTRC 提供)
6	210 以 上	◆港區橋梁、碼頭、過港隧道及各項設施，請派員巡查◆新港橋、高字塔聯絡橋、MCC 倉庫聯絡橋及中興立體交叉道橋梁，請優先派員巡查◆ 中興小港蓬萊前鎮工業區及石化中心，請優先派員巡查。(TTRC 提供)

第六章 港區地震速報精進與維護

本所運技中心自 98 年起逐年編列經費，於安平港、布袋港、臺北港、高雄港、蘇澳港、臺中港、花蓮港及基隆港等 8 港區(以下簡稱各港區)設置地表地震速報監測站(以下簡稱地震監測站)，維護與精進各港區地震速報能正常運作，111 年起港區地震速報精進與維護之經費，改由港務公司委託本所辦理「海氣象監測及預警技術精進計畫(111~115 年)」代辦計畫之「港區地震速報精進與維護」計畫繼續運作；為使地震監測持續能正常擷取監測資料、發揮傳送速報簡訊功效，每年均需進行速報儀器、電力設備、電腦、冷氣機之維護保養與監測站(或保護箱)周邊環境清潔及木製圍籬簡易修復等工作，另今(113)年由於台灣東部海域於 4 月 3 日發生強烈地震(以下簡稱 0403 大地震)，震央位於花蓮縣近海，部分區域受地震影響而導致噴沙現象，本所也提供各港區地震速報監測成果之波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對資料，供港務公司及產官學界參考應用。另外，為精進確保地震速報之通報資訊正確，減少誤報情形發生，於今(113)年依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程，修改各港區監測站之既有地震即時速報軟體，並更新布袋港地表地震儀 1 臺，力求改善儀器遭遇鄰近各種作業產生之震動、外力碰撞或誤觸情形發生；今年亦持續將各港區地震速報接收的資料置放於中華電信雲端上，提供本所其他系統介接使用；此外，也蒐集高雄港區地質鑽探資料並擴充相關資料庫，重新推估液化災損範圍，進而結合、更新高雄港地震速報簡訊內容。本章就 113 年度各港區地震監測站維護及速報精進，分述於後：

6.1 各港地震監測站維護

本所運技中心於各港區逐年分別設置完成地震監測站，為使各項監測工作能正常運作，每年均需進行儀器維護保養與監測站周邊環境清潔等工作(6 月及 11 月)，並擷取彙整各港區地震資料及每月遠端連

線檢查設備是否正常運作，且需下載各港區有地震發生時，震度達 4 級 25gal(震度未達 4 級時，提供最大震度)以上之波形圖，並下載同時間中央氣象署揭示之地震資料；另當地震來時，原各港區監測站須依中央氣象署最大地動加速度值 PGA 來決定地震震度級數，今(113)年依據中央氣象署於 109 年所制訂新震度級數的計算流程，取 3 向量合成震波，計算最大地動加速度值 PGA，透過地震震度與 PGA 範圍的對照表計算地震震度（如表 5.1 所示），得到的計算震度不到 5 級時，以該計算震度為地震震度值，若計算震度為 5 級以上時，透過地震震度與 PGV 範圍的對照表（如表 5.1 所示），計算地震震度如該計算震度小於 4 級時，則設定地震震度值為 4 級，否則以得到的計算震度為地震震度值。進行修改各港區監測站之既有地震即時速報軟體，另布袋港之地震速報儀已使用 11 年，偶而會出現狀況均會影響監測品質，今年予以更新，期使各港區地震監測站都能正常運作。113 年度維護成果綜整如下：

1. 臺北港

(1)地點：臺北港入口右側花園。GPS 座標 25.150754,121.392692

(2)維護成果：

- a.於本所設置之地震速報監測站觀測屋內之儀器、周邊藤蔓與雜草及圍籬內雜物清除，另清洗冷氣機濾網及鎖板除鏽等保養清潔工作，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改臺北港區監測站之既有地震即時速報軟體。
- c.臺北港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 16 次，3 級地震強度 8 次，4 級地震強度 1 次，5 弱地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 26 次，震源大部份來至小區域或蘇澳外海地區。

d. 0403 大地震，臺北港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

2. 臺中港

(1)地點：臺中港#26 號碼頭。GPS 座標 24.273542, 120.520134。

(2)維護成果：

a.於本所設置之地震速報監測站觀測屋內之儀器、周邊藤蔓與雜草及圍籬內雜物清除，另清洗冷氣機濾網及鎖板除鏽等保養清潔工作，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。

b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改臺中港區監測站之既有地震即時速報軟體。

c.臺中港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 40 次，3 級地震強度 13 次，4 級地震強度 2 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 55 次，震源大部份來至小區域或東部外海地區。

d. 0403 大地震，臺中港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

3. 蘇澳港

(1)地點：進入蘇澳港港區管制站，馬路右邊轉角處。GPS 座標 24.590855, 121.863195。

(2)維護成果：

a.於本所設置之地震速報監測站觀測屋內之儀器、周邊藤蔓與雜草及圍籬內雜物清除，另清洗冷氣機濾網及鎖板除鏽等保養清潔工作，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。

- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改蘇澳港區監測站之既有地震即時速報軟體。
- c. 蘇澳港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 168 次，3 級地震強度 57 次，4 級地震強度 13 次，5 強地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 239 次，蘇澳港震源大部份來至蘇澳外海地區。
- d. 0403 大地震，蘇澳港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

4. 安平港

(1)地點：安平港營運處大樓。GPS 座標 22.9786495,120.176281。

(2)維護成果：

- a. 於本所設置之地震速報監測站觀測屋內之儀器、周邊藤蔓與雜草及圍籬內雜物清除，另清洗冷氣機濾網及鎖板除鏽等保養清潔工作，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改安平港區監測站之既有地震即時速報軟體。
- c. 安平港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 14 次，3 級地震強度 2 次，4 級地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 17 次，震源大部份來至小區域或花東外海地區。
- d. 0403 大地震，安平港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

5. 高雄港

(1)地點：高雄港港勤船舶管理中心附近花園。GPS 座標:22.598505, 120.283。

(2)維護成果：

- a.於本所設置之地震速報監測站觀測屋內之儀器、周邊藤蔓與雜草及圍籬內雜物清除，亦清洗冷氣機濾網等及鎖板除鏽等保養清潔工作，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改高雄港區監測站之既有地震即時速報軟體。
- c.高雄港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 5 次，3 級地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 6 次，震源大部份來至小區域或臺東外海地區。
- d. 0403 大地震，高雄港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

6. 布袋港

(1)地點：布袋港區內，GPS 座標 23.374752, 120.132662。

(2)工作內容：

- a.於本所設置於布袋港管理處 1 樓儲藏室之儀器、周邊雜物清除，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改布袋港區監測站之既有地震即時速報軟體。

- c. 本監測站 113 年 5 月 29 日，更新地表地震儀 1 臺，並連線功能測試，皆能正常運作。
- d. 布袋港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 57 次，3 級地震強度 16 次，4 級地震強度 4 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 77 次，震源大部份來至小區域或花東外海地區。
- e. 0403 大地震，布袋港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄如比對，附錄一。

7. 基隆港

- (1) 地點：基隆港港務處航管中心辦公室(內、外各一組 CV374A)。

GPS 座標 25.1600614, 121.7579926

- (2) 維護成果：

- a. 於本所設置於基隆港港務處航管中心辦公室內、外之儀器、周邊雜草與雜物清除，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改基隆港區監測站之既有地震即時速報軟體。
- c. 基隆港地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共測得 2 級地震強度 8 次，3 級地震強度 1 次，4 級地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 10 次，震源大部份來至小區域或花東外海地區。
- d. 0403 大地震，基隆港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

8. 花蓮港

(1)地點：花蓮港港務大樓辦公室(內、外各一組 CV374A)。GPS 座標：
23.9797153,121.62005836

(2)維護成果：

- a.於本所設置於花蓮港港務大樓辦公室內、外之儀器、周邊雜草與雜物清除，以及檢查地震儀器及軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- b. 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程及步驟，修改花蓮港區監測站之既有地震即時速報軟體。
- c.地表地震監測紀錄於 113 年 01 月 01 日至 11 月 22 日止，共獲得 2 級地震強度 188，3 級地震強度 66 次，4 級地震強度 27 次，5 弱地震強度 3 次，6 弱地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 285 次，震源大部份來至小區域或東部外海地區。
- d. 0403 大地震，花蓮港地震速報波形圖及同時間中央氣象署發佈之地震紀錄比對，如附錄一。

各港區傳送之地震速報簡訊種類，分為碼頭及橋梁兩種類型，並依據港務公司提供之接收者名單設定地震簡訊傳送對象（目前碼頭及橋梁簡訊接收名單都設一樣），由於臺灣今(113)年發生 0403 大地震，之後各港區又跟隨發生一連串餘震，截至 11 月 22 日止，彙整各港區傳送的地震速報簡訊，總計高達 715 次，比去(112)年 55 次足足多出 660 次(同時間碼頭及橋梁傳送 2 筆簡訊，計算 1 次)，如表 6-1 所示。

表 6-1 各港區 113 年傳送的地震速報簡訊統計表

測站	地震強度次數						總計
	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	
臺北港	16	8	1	1(127 gal)	0	0	26
臺中港	40	13	2(65 gal)	0	0	0	55
蘇澳港	168	57	13	0	1(203 gal)	0	239
安平港	14	2	1(32 gal)	0	0	0	17
高雄港	5	1(17 gal)	0	0	0	0	6
布袋港	57	16	4(31 gal)	0	0	0	77
基隆港	8	1	1(61 gal)	0	0	0	10
花蓮港	188	66	27	3	0	1(291 gal)	285
總計	496	164	49	4	1	1	715

6.2 各港地震速報精進

本所運技中心於各港區逐年設置完成地表地震災後速報傳輸。由於基隆港地震速報儀器原設置地點，偶而會遭遇外力碰撞或誤觸，為精進速報系統及減少誤報情形發生，於 109 年選定基隆港務分公司港務處航管中心重新設置地表地震監測設備，以精進確保地震速報系統之通報資訊正確；又於 110 年初花蓮港通知本所，請本所另覓適當場域遷移原置放於行政大樓外花園之地震監測設備，本所遂將上述監測設備遷移至行政大樓右側花園內^[17,18]；再於 111 年初安平港營運處通知本所，請本所將原置放於該港 8 號碼頭地震監測設備遷移至安平港營運處大樓地下室，以及 112 年初由於該地下室將進行整修工作，本所遂將上述監測設備拆移至適當空間暫放，並於 112 年 3 月 8 日再將地震監測設備復原，以確保地震速報能正確運作；並測試所有功能皆可正常運作；另為精進各港區地震速報之通報震度級數能與中央氣象署一致，於今

(113)年依據中央氣象署所制訂新震度級數，完成修改各港區監測站之既有地震即時速報軟體，並更新布袋港地表地震儀 1 臺。

另外，持續將各港區地震速報接收的地震資料置放於中華電信雲端上，配合提供本所港灣構造物維護管理資訊系統、港灣環境資訊網及商港海氣象資訊系統等 3 個系統介接使用；亦針對高雄港區進行地工資料庫更新，提供顯著地震後快速液化災損初步評估，以更新高雄港地震速報簡訊內容。今(113)年度地震速報精進分述於後：

6.2.1 各港區地震新震度級數精進

針對各港區 8 站既有地震即時速報軟體，當地震來時各測站顯示震度級數須依據中央氣象局所制訂新震度級數的計算流程來分析，演算地震發生後各軸向測錄的震動大小，並將各測站正確的震度級數顯示在簡訊內容上。

新震度分級計算步驟及流程圖，說明如下：

- 1.讀入加速度地震儀（強震儀）3 向量加速度資料。
- 2.資料進行 10Hz 低通濾波處理，適度過濾瞬間振動的高頻號。
- 3.取 3 向量合成震波，計算最大地動加速度值 PGA。
- 4.透過地震震度與 PGA 範圍的對照表（如表 5-1），計算地震震度。
- 5.得到的計算震度不到 5 級時，以該計算震度為地震震度值，結束整個震度計算流程；計算震度為 5 級以上時，持續進行下一步驟。
- 6.將 3 向量原始加速度資料積分至速度，同時進行 0.075Hz 低切濾波移除因積分動作所引進的低頻訊號。
- 7.取 3 向量合成震波，計算最大地動速度值 PGV。

- 8.透過地震震度與 PGV 範圍的對照表（如表 5-1），計算地震震度。
- 9.如該計算震度小於 4 級時，則設定地震震度值為 4 級，否則以得到的計算震度為地震震度值結束整個震度計算流程。
- 10.新地震震度分級的震度計算流程圖，如圖 6-1 所示。

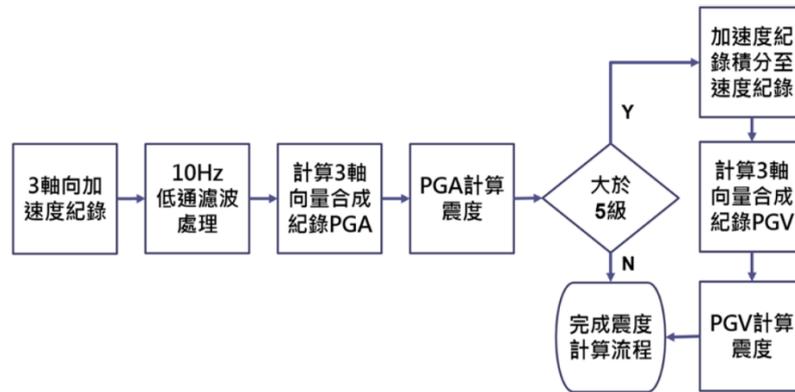


圖 6.1 新地震震度分級的震度計算流程圖

6.2.2 布袋港地震速報精進

本所運技中心於 98 年建置安裝布袋港地表地震速報設備，使用之儀器為日本東京測振公司製造之三向度網路型地表地震儀 CV373 型，當地震儀接收到地震訊號後，先傳至儀器主機經運算後，再同時儲存到工業級無風扇小型電腦中，此時地震訊號藉著中華電信 ADSL 網路，可將港區災況以簡訊方式依不同震度需求發送至各相關防救災及工程人員手機上，確保地震速報之通報資訊正確。

由於本所設置於布袋港監測站之三向度網路型地表地震儀，年久需汰舊換新，今(113)年將原 CV373 型之舊地表地震儀設備更新為 CV374 型地表地震儀，使地震儀設備能持續正常運作，且能成功發送簡訊，並能將地震接收的資料傳送至中華電信雲端。布袋港地震監測設備拆除、更新安裝及測試敘述如下：

1. 113 年 5 月 29 日進行舊地震儀拆除工作，如圖 6.2 所示，隨即確認地震儀方位及水平後，將新地震儀進行安裝，如圖 6.3 所示。



圖 6.2 布袋港舊地震儀(CV373 型)拆除示意圖



圖 6.3 布袋港 CV374 型地震儀更新安裝示意圖

2. 進行測試速報功能，確認連線地震儀及軟體皆能正常運作，且敲擊地震儀測試發送簡訊，並檢核測試地震速報接收之地震資料可傳輸至中華電信雲端，測試結果所有功能恢復正常運作。

6.2.3 更新高雄港地震速報簡訊內容

本所運技中心多年來持續努力確保各港地震速報之通報快速及資訊正確外，今(113)年針對高雄港區進行地工資料庫更新，並於本所

原開發之液化評估法中，加入國內、外採用之液化潛勢評估法，推估液化後沉陷量，提供顯著地震後快速液化災損初步評估，以更新高雄港地震速報簡訊內容；另近年來各港防救災管理相關人員多所異動，今(113)年除了上述簡訊內容精進外，並依據港務公司提供該公司及各港務分公司防救災管理相關人員之資料，完成更新地震速報簡訊接收者之名單資料，並依據上述液化潛勢評估分析成果及港務公司提供之地震簡訊內容範本，更新高雄港地震速報簡訊內容，以符合港務公司防災需求，俾利提昇地震速報之效能，增進各港整體安全。

6.2.4 地震速報資料介接

本所運技中心 101 年已整合各港區地震監控資訊，並展示於本所港灣環境資訊網，港灣環境資訊系統於接收地震資料之相關資訊，以自動/手動的方式接收地震資料，匯入至本所海情中心資料庫中，並於港灣環境資訊網中繪製展示地震三向度(x,y,z 軸)的地表資訊圖表，提供網頁訊息告知與歷史地震資訊查詢等功能。111 年起本所地震速報計畫經費，改由港務公司委託本所辦理「海氣象監測及預警技術精進計畫(111~115 年)」代辦計畫之「港區地震速報精進與維護」計畫繼續運作。113 年除了持續維護各港區地震速報即時監測站能正常運作外，並持續將各港區地震速報接收之地震資料傳輸至中華電信雲端，提供港務公司委託本所辦理「港灣構造物維護管理系統」、「商港海氣象資訊系統」及本所「港灣環境資訊網」等系統介接應用(如圖 6.4 至圖 6.6 所示)，各港區地震速報與中華電信雲端介接方式說明如下：

1. 使用 OneDrive 雲端儲存地震資料網址如下：

<https://70447525-my.sharepoint.com>

2. 點選港區資料夾，如圖 6.7 所示
3. 對應各港資料夾，如圖 6.8 所示
4. 地震後程式將自動上傳檔案至雲端供使用者去下載資料，包含副檔名 DBL(地震波形 需用 PWAVE 32 開啟).TXT(地震簡訊發送內容).

EDP. (地震加速度值及震度)EQI(地震簡訊格式).JPG(地震波形圖檔) 都可下載使用，如圖 6.9 所示。

港灣名稱	地震編號	日期	等級	GAL	檔案內容
蘇澳港 (sah)	20250103135247	2025-01-03 13:52:47	3級	12.9	蘇澳港01/03, 13:52, 震度3級, 12.9gal*港區初評安全。(TTRC提供)
蘇澳港 (sah)	20250102104707	2025-01-02 10:47:07	1級	1.2	蘇澳港01/02, 10:47, 震度1級, 1.2gal*港區初評安全。(TTRC提供)
蘇澳港 (sah)	20250101025221	2025-01-01 02:52:21	2級	6.6	蘇澳港01/01, 02:52, 震度2級, 6.6gal*港區初評安全。(TTRC提供)
布袋港 (bud)	20241230035206	2024-12-30 03:52:06	2級	4.9	布袋港12/30, 03:52, 震度2級, 4.9gal*港區初評安全。(TTRC提供)
安平港 (aph)	20241230035204	2024-12-30 03:52:04	2級	2.8	安平港12/30, 03:52, 震度2級, 2.8gal*港區初評安全。(TTRC提供)
臺中港 (tch)	20241230035203	2024-12-30 03:52:03	2級	4.4	台中港12/30, 03:52, 震度2級, 4.4gal*港區初評安全。(TTRC提供)
蘇澳港 (sah)	20241226160913	2024-12-26 16:09:13	2級	7.8	蘇澳港12/26, 16:09, 震度2級, 7.8gal*港區初評安全。(TTRC提供)
花蓮港 (hjh)	20241226160857	2024-12-26 16:08:57	3級	20.6	花蓮港12/26, 16:08, 震度3級, 20.6gal*港區初評安全。(TTRC提供)

圖 6.4 港灣構造物維護管理系統

商港海氣象資訊系統
The Marine Weather Information System of Seven International Ports

2024/12/26 20:24:50 登入註冊

海氣象資訊

港口	基隆港	臺北港	蘇澳港	花蓮港	臺中港	高雄港(一)	高雄港(二)	安平港	布袋港	澎湖(公)	澎湖(僑)
時間	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:10	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:10	12/26 20:20
平均風速	4級(7.8m/s)	4級(6.7m/s)	2級(2.3m/s)	5級(10.2m/s)	8級(20.0m/s)	2級(2.0m/s)	3級(4.2m/s)	4級(7.9m/s)	3級(4.7m/s)	5級(10.0m/s)	6級(12.8m/s)
平均風向	北北東	東北	西北西	北	北北東	北	北北西	北	北	東北	北
時間	12/26 19:40	12/26 19:00	非即時觀測	12/26 19:40	非即時觀測	12/26 19:40	12/26 19:40	12/26 18:00	12/26 19:30	12/26 19:00	12/26 19:00
港外波高(H ₀)	2.2	1.9		1.5		0.8	0.8	0.5	0.8	1.4	1.4
週期(s)	8.2	8.0		7.9		4.6	6.5	6.5	8.7	6.6	6.6
波向	東北	北		東南		西北西	西南西	西南	北北西	東北	東北
表面流速	0.29節(0.15m/s)	0.16節(0.08m/s)		1.2節(0.60m/s)		0.22節(0.11m/s)	0.5節(0.25m/s)	0.07節(0.03m/s)	0.32節(0.16m/s)	0.14節(0.07m/s)	0.14節(0.07m/s)
表面流向	東南	東北東		東北		西南	北北西	東南東	東南東	東南東	東南東
時間	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00	12/26 20:00
港內波高(H ₁)	0.33	0.14	0.20	0.06	0.05	0.09	0.14	0.11	0.27	0.11	0.06
時間	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18	12/26 20:18
潮位(mWd ₀)	0.05▼	0.80▼	-0.37▼	-0.85▼	1.58▼	0.23▼	0.24▼	0.35▼	0.76▼	0.89▼	0.34▼
潮位(CDL ₀)	0.97▼	2.23▼	0.55▼	-0.14▼	4.25▼	0.78▼	0.79▼	0.82▼	1.86▼	2.37▼	2.27▼
滿/乾潮	乾潮(12/27 00:32)	乾潮(12/27 02:04)	乾潮(12/26 21:52)	乾潮(12/26 22:02)	乾潮(12/27 02:14)	乾潮(12/27 00:29)	乾潮(12/27 00:29)	乾潮(12/27 01:08)	乾潮(12/27 01:55)	乾潮(12/27 02:29)	乾潮(12/27 02:29)
時間	12/26 20:20	非即時觀測	12/26 20:20	12/26 20:19	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:20	12/26 20:19	12/26 20:20
能見度	10.8哩以上 (20公里以上)		10.8哩以上 (20公里以上)	10.8哩以上 (20公里以上)	10.8哩以上 (20公里以上)	10.8哩以上 (20公里以上)	5.4-10.8哩 (10-20公里)	5.4-10.8哩 (10-20公里)	10.8哩以上 (20公里以上)	5.4-10.8哩 (10-20公里)	5.4-10.8哩 (10-20公里)
CWA時間	-	12/26 16:08	12/26 16:08	12/26 16:08	12/26 16:08	-	-	-	12/26 16:08	-	-
CWA震度	-	淡水(NTS)測站 1級	蘇澳(TWC)測站 2級	花蓮市(HWA)測站 4級	梧棲(WWC)測站 1級	-	-	-	義竹(CHNS)測站 1級	-	-
TTRC時間	-	-	12/26 16:09	12/26 16:08	-	-	-	-	-	無建置	無建置
TTRC震度	-	-	2級	3級	-	-	-	-	-	-	-

圖 6.5 商港海氣象資訊系統

港灣環境資訊網
Harbor Environment Information Website

網站導覽 觀測資訊 模擬資訊 腐蝕資訊 網站科普 公開資料 資訊圖臺

首頁 觀測資訊 地震

近期地震

臺中港

座標位置: (N120.52, E24.274)
地震時間: 2024-12-30 03:52:03
震度: 2級
地表加速度: 5.47gal 地表波形圖

安平港

座標位置: (N120.176, E22.979)
地震時間: 2024-12-30 03:52:04
震度: 2級
地表加速度: 2gal 地表波形圖

布袋港

座標位置: (N120.142, E23.38)
地震時間: 2024-12-30 03:52:06
震度: 2級
地表加速度: 4.55gal 地表波形圖

高雄港

座標位置: (N120.283, E22.599)
地震時間: 2024-11-22 20:40:44
震度: 2級
地表加速度: 5.9gal 地表波形圖

臺北港

座標位置: (N121.393, E25.151)
地震時間: 2024-08-16 07:36:55
震度: 3級
地表加速度: 9.37gal 地表波形圖

基隆港

座標位置: (N121.764, E25.161)
地震時間: 2024-08-16 07:36:43
震度: 2級
地表加速度: 2gal 地表波形圖

蘇澳港

座標位置: (N121.863, E24.591)
地震時間: 2025-01-03 13:52:47
震度: 3級
地表加速度: 3gal 地表波形圖

花蓮港

座標位置: (N121.548, E24.138)
地震時間: 2024-12-26 16:08:57
震度: 3級
地表加速度: 3gal 地表波形圖

圖 6.6 港灣環境資訊網



圖 6.7 港區資料夾

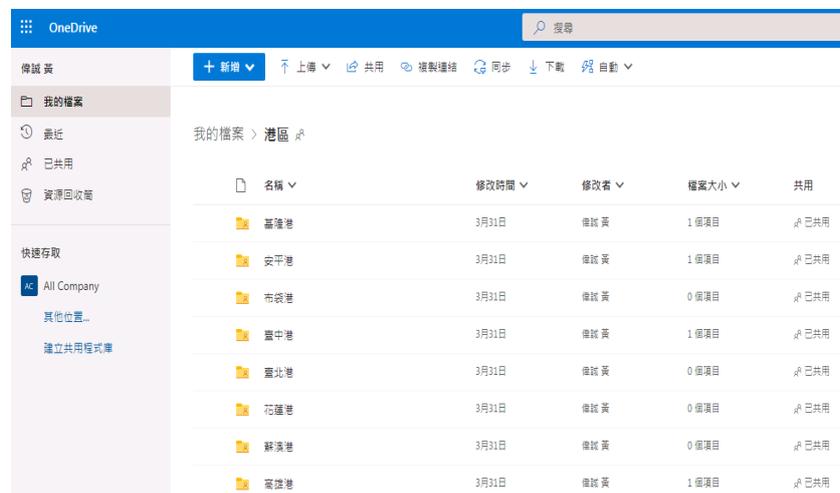


圖 6.8 各港資料夾



圖 6.9 自動上傳地震檔案至雲端

第七章 結論與建議

本年度計畫著眼於建立高雄港不同情境之液化潛勢分析圖資，方法採用建築物耐震設計規範建議之 SPT-N 定值簡易評估法(NCEER 法、HBF 法)，依中小地震、設計地震與最大考量地震情境進行評估，並以 Cetin 機率法，探討高雄港不同區段液化機率分布，提出港區不同分析加速度 a_{max} 之高潛勢區面積與震陷量經驗評估公式，成果可供智慧化災損評估使用。工作項目包括：高雄港區內鑽孔資料進行盤點更新與篩選、NCEER 及 HBF 法液化潛勢分析、Cetin 機率法液化潛勢分析、高雄港區液化後沉陷量推估與震後快速液化災損評估訊息研擬。

7.1 結論

1. 本計畫對高雄港 SPT-N 鑽孔資料進行完整盤點，原港研中心地工資料庫可用資料筆數為 697 孔，港務公司鑽探報告，可用資料為 189 孔，共計 886 孔鑽探資料，提高基本資料庫鑽孔數量，以精進液化分析成果。
2. 研究以 HBF 法與 NCEER 法進行高雄港液化潛勢分析，兩種方法於不同地震情境之潛勢分布相近，惟 HBF 法分析成果在相同分析加速度下，其液化潛勢 P_L 較 NCEER 法高。SPT-N 法之液化潛勢成果顯示，高雄港區陸域約 1,871 公頃，當尖峰水平加速度 a_{max} 達 0.20 g 時，港區陸域約有 38% 之面積為高潛勢區，而最大考量地震時($a_{max}=0.28 g$)，則高潛勢區面積占比可達 45% 以上。
3. 比較 NCEER 定值法、HBF 定值法與 Cetin 機率法成果，在相同地震情境下，中高液化危害度分布位置大致相同，說明分析成果具有高度一致性。而機率法可提供相較液化潛勢指數 P_L 更為直觀之參考指標，以液化機率 P_L 說明在特定情境下高雄港區陸域各位置是否有機會產生液化災害。

4. 除液化潛勢 P_L 外，液化後引致震陷量亦為常見之液化災損分析指標，本計畫基於 Ishihara and Yoshimine (1992)自由場震陷評估方法，進行高雄港不同地震情境之自由場震陷量評估，設計地震下，港區震陷量變化範圍分別為 0.2~81.9 cm (HBF 法)與 3.4~82.1 cm (NCEER 法)；最大考量地震下，震陷量變化範圍分別為 0.4~88.7 cm (HBF 法)與 3.5~82.2 cm (NCEER 法)。
6. 為提供未來高雄港區快速震陷量評估使用，本計畫以具代表性之震陷變化範圍作為震陷量評估公式之基礎數據點，建構高雄港不同分析加速度下震陷量經驗評估公式，搭配 Ishihara(1996)建議震陷量與災損等級分類，可作為災損評估分析之依據。
7. 震後快速液化災損評估訊息內容，以精緻化分區進行門檻加速度設定，並計算對應震陷量，搭配現地地震監測站，可提供較合理之門檻加速度設定值，相較於目前設定值，其成果可更貼近於實際高雄港港區土層之液化危害度分析成果。
8. 本(113)年度依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程，完成修改各港區 8 個監測站之既有地震即時速報軟體，及更新布袋港之三向度網路型地表地震儀 1 臺；另外，也蒐集高雄港港區地質鑽探資料並擴充相關資料庫，重新推估液化災損範圍，並更新高雄港地震速報簡訊內容，完成各港區地震速報精進。

7.2 建議

1. 液化分析程序中，分析地下水位參數為重要影響參數，而地下水位隨季節變化，建議後續地下水位參數選用，可考量以各商港設計潮位或築港高程進行分析，較能貼近實際港區設計參數。
2. 借鏡 0403 地震花蓮港產生液化之問題，未來各港區進行液化分析使用之鑽探資料應持續進行盤點與調查，並著重於港區實際現況地層分布，可精進液化潛勢分析與災損評估成果。
3. 考量地震下碼頭後線建築群實際變形與自由場不同，本計畫可於原

有成果加入液化後淺基礎變形之評估流程，針對港區中、高液化潛勢等具變形風險區域進行震後災損評估精進，精緻化震後受剪引致沉陷量估算之成果。

7.3 研究成果效益

1. 完成增加地工資料庫於高雄港之可用鑽探資料至 886 孔。
2. 完成符合國內耐震設計規範之液化評估法，進行高雄港港區全面性液化潛勢評估。
3. 完成推估高雄港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

7.4 提供政府單位應用情形

1. 各港區地震即時災況速報，可於災後將相關初步評估訊息以簡訊傳至港務公司相關人員，做為防救災及未來港灣結構物設計與維護之參考。
2. 出版研究報告，並將相關研究成果供產官學界參考應用。

參考文獻

1. 鄭世楠、葉永田 (2002),「1848 年彰化地震與彰化斷層關係的初步研究」, 港灣報導季刊, 61 期。
2. 中央地質調查所(2022),「20220323 長濱地震地質調查報告」, 第 29 頁。
3. 交通部運輸研究所 (1999),「臺中港 1 至 4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究」, 港灣技術研究中心專刊 172 號。
4. 黃俊鴻、陳正興、莊長賢 (2012),「本土 HBF 土壤液化評估法之不確定性」, 地工技術, 第 133 期, 第 77-86 頁。
5. 交通部運輸研究所(2003), 賴聖耀、謝明志、蘇吉立、陳志芳,「港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估之研究(1/3)」。
6. 張文忠 (2016),「表面波震測於美濃地震住宅區液化土層調查」, 地工技術, 第 148 期, 第 91-100 頁。
7. 日本道路協會 JRA (1996),「道路橋示方書, 同解說, V 耐震設計篇」, 日本規範。
8. 黃富國、何政弘 (1999)「土壤液化評估方法之研究」, 國家地震工程中心, NCREE-99-045。
9. 紀雲曜 (1997),「高雄縣永安沿海地區沖積層下陷及其潛能評估方法之研究」, 國立成功大學博士論文。
10. 葉錦勳 (2003),「台灣地震損失評估系統-TELES」, 國家地震工程研究中心技術報告。
11. 臺灣港務公司 (2024),「高雄港 110 年現況圖」, 高雄港整體規劃及未來發展。

12. 國土管理署 (2022), 「建築技術規則」, 建築法規, 內政部。
13. 交通部運輸研究所 (2004), 「港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估之研究(2/3)」。
14. 賴聖耀 (2002), 「以 921 地震液化案例之 SPT-N 值建立土壤液化潛能判別模式」, 液化潛能評估方法及潛能圖之製作研討會。
15. 交通部運輸研究所 (2007), 「現地模擬地震之液化試驗與碼頭動態監測研究(1/4)」。
16. 交通部運輸研究所 (2023), 曾文傑、胡啟文, 「港區地震液化風險評估模式精進(1/5)-臺中港模式精進」。
17. 交通部運輸研究所 (2021)曾文傑、陳志芳、謝明志, 「109 年港區震災速報系統維護及地層下陷調查分析研究」。
18. 交通部運輸研究所 (2022)曾文傑、謝幼屏, 「110 年港區震災速報系統維護及地層下陷調查分析研究」。
19. JGS. (1996). “Soils and Foundations — Special issue on geotechnical aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake.” Japanese Soc. Geotech. Eng.
20. Bray, J. D., Sancio, R. B. (2006). “Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(9), pp.1165-1177.
21. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D. and Castro, G. (2001). “Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), pp. 817-833.
22. Cetin, K. O., Seed, R. B., Kiureghian, A. D., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Kayen R. E. and Moss, R. E. S. (2004). “Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil

- liquefaction potential.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), pp.1314-134.
23. Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). “Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes.” *Soils and Foundations*, 32(1), pp. 173-188.
 24. Ishihara, K. (1985). “Stability of natural deposits during earthquakes.” In Vol. 1 of Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 321-376.
 25. Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K. (1982). “Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes.” In Proceedings of conference on soil dynamics & EQ engineering, pp. 925-939.
 26. Casagrande, A. (1936). “Characteristics of cohesionless soil affecting the stability of slopes and earth fills.” *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, reprinted in *Contributions to Soil Mechanics*, Boston Society of Civil Engineers, pp.257-276.
 27. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.” *J. Soil Mech. Found. Div.*, 97(SM9), pp.1249-1273.
 28. Ishihara, K., Sodekawa, M., and Tanaka, Y. (1978). “Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing fines.” *Dynamic Geotechnical Testing*, 654, pp. 246-264.
 29. Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *J. Geotech. Eng.* 109 (3), pp. 458-482.
 30. Sherif, M.A., Ishibashi, I., Tsuchiya, C. (1977). “Saturation effects on initial soil liquefaction.” In: *Proceeding of ASCE*, 103(GT8), pp. 914–917.
 31. Seed, H B., Martin, P. P. and Lysmer, J. (1975). “The generation and

- dissipation of pore water pressures during soil liquefaction.” University of California, Berkeley, CA, Tech. Rep. UCB-EERC-75/26.
32. Kramer, S. L. (1996). “Geotechnical earthquake engineering.” Prentice Hall, ISBN:0-13-374943-6.
 33. Ishihara, K. (1993). “Liquefaction and flow failure during earthquakes.” *Geotechnique*, 43(3), pp. 351-415.
 34. Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985). “Influence of SPT procedure in soil liquefaction resistance evaluations.” *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(12), pp. 1425-1445.
 35. Youd, T. L., and Idriss, I. M. (1997). “Proc. NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils.” Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo.
 36. Cetin, K. O., Seed, R. B., Moss, R. E. S., Kiureghian, A. D., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Kayen R. E. (2000). “Field case histories for SPT-based in situ liquefaction potential evaluation.” PEER Report No. UCB/GT-2000/09, Pacific Earthquake Engineering Research, Berkeley, CA.
 37. Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). “Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes.” *Soils and Foundations*, 32(1), pp. 173-188.
 38. Ashford, S., Boulanger, R., Donahue, J. and Stewart, J. (2011). “Geotechnical quick report on the Kanto Plain region during the March 11 2011, Off Pacific Coast of Tohoku earthquake, Japan.” GEER quick report, April 5.
 39. Macedo, J. and Bray J. D. (2018). “Key trends in liquefaction-induced building settlement.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), 04018076.
 40. Ku, C. K. and Juang, C. H. (2012). “Liquefaction and cyclic softening

potential of soils – a unified piezocone penetration testing-based approach.” *Geotechnique*, 62(5), pp. 457-461.

41. Bray, J. D. and Macedo, J. (2017). “Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, pp.215-231.
42. Meyerhof, G. G. (1957). “Discussion on research on determining the density of sands” *Proc., 4th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, 3, 110.

附錄一

113 年各港區地震資料比對

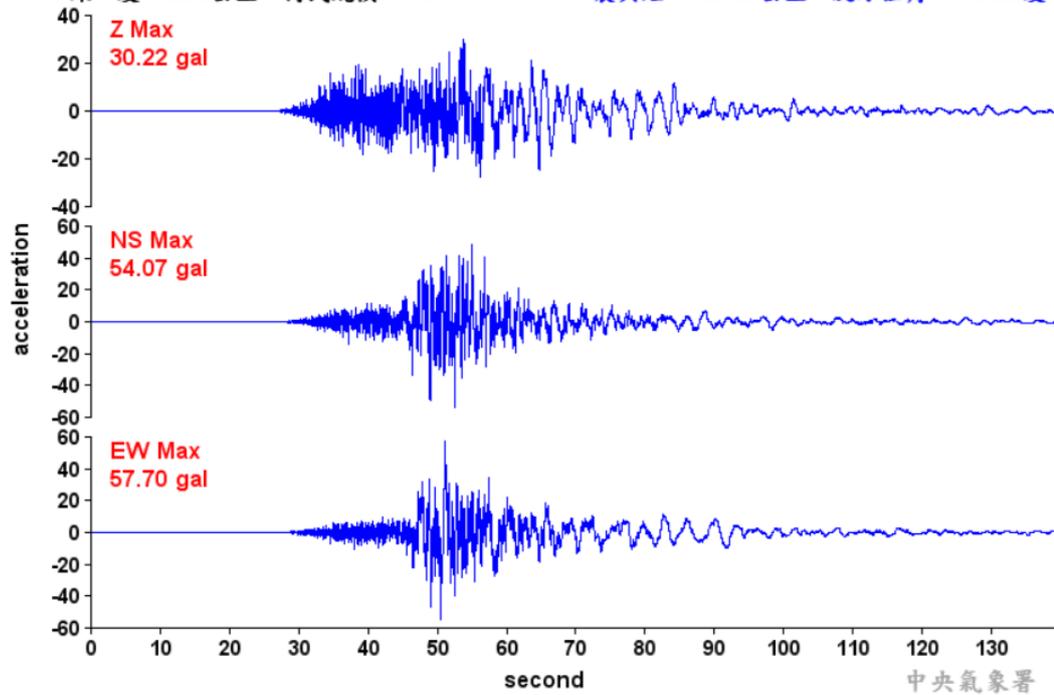
1.臺北港

中央氣象署

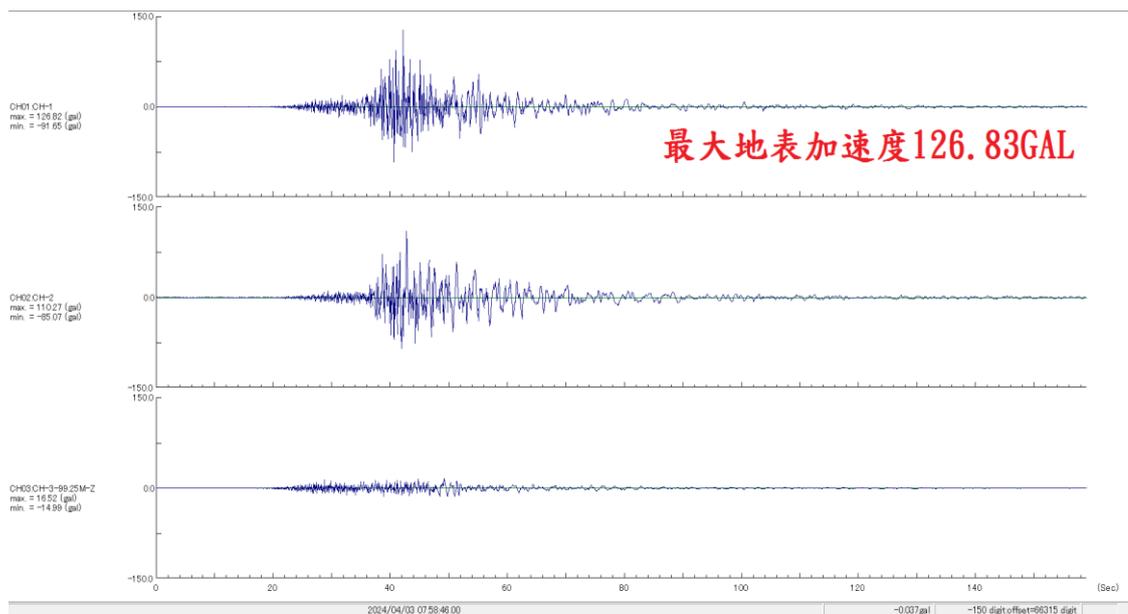
五股 (TWS1) 震度：4級

地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經121.42度，北緯25.10度
震央距：138.38公里，反方位角：173.26度



運研中心速報

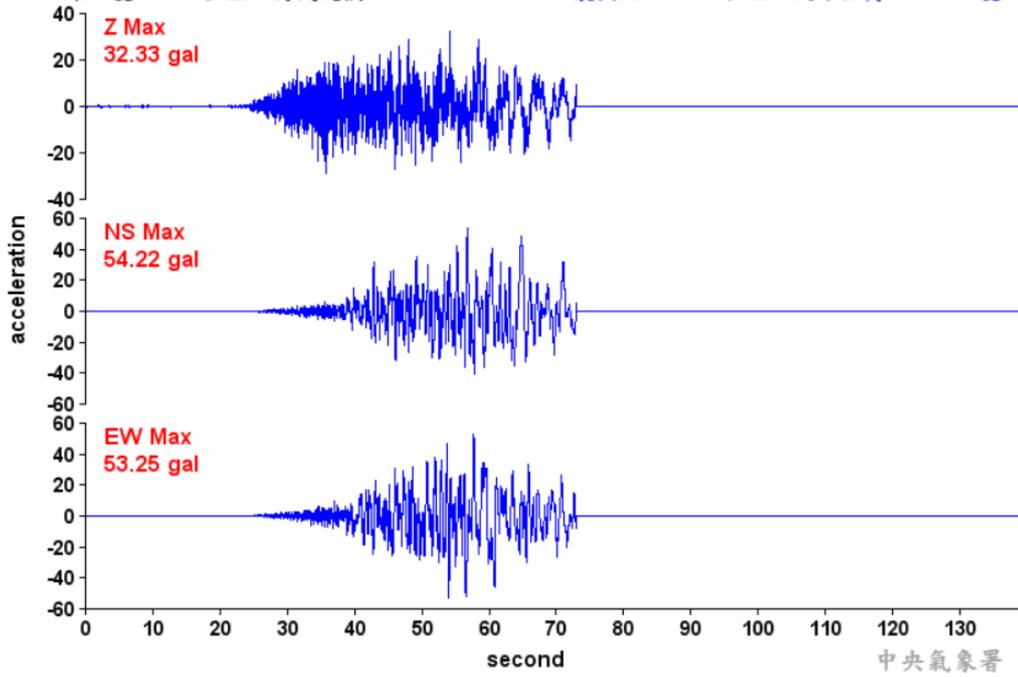


2.臺中港
中央氣象署

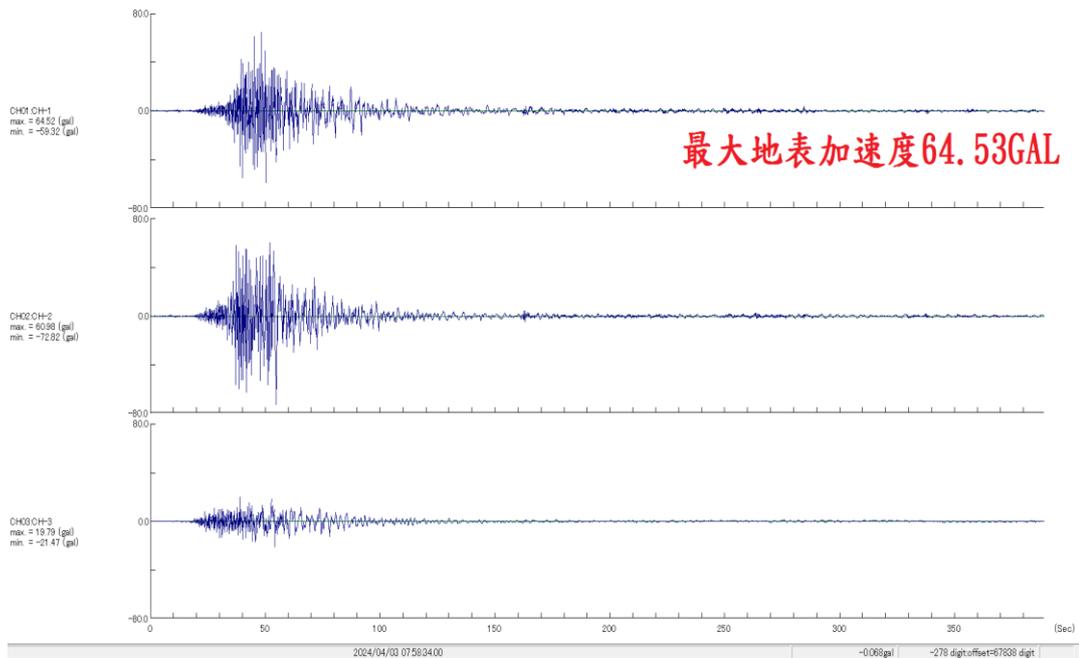
梧棲 (WWC) 震度：4級

地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經120.52度，北緯24.26度
震央距：116.4公里，反方位角：112.13度



運研中心速報



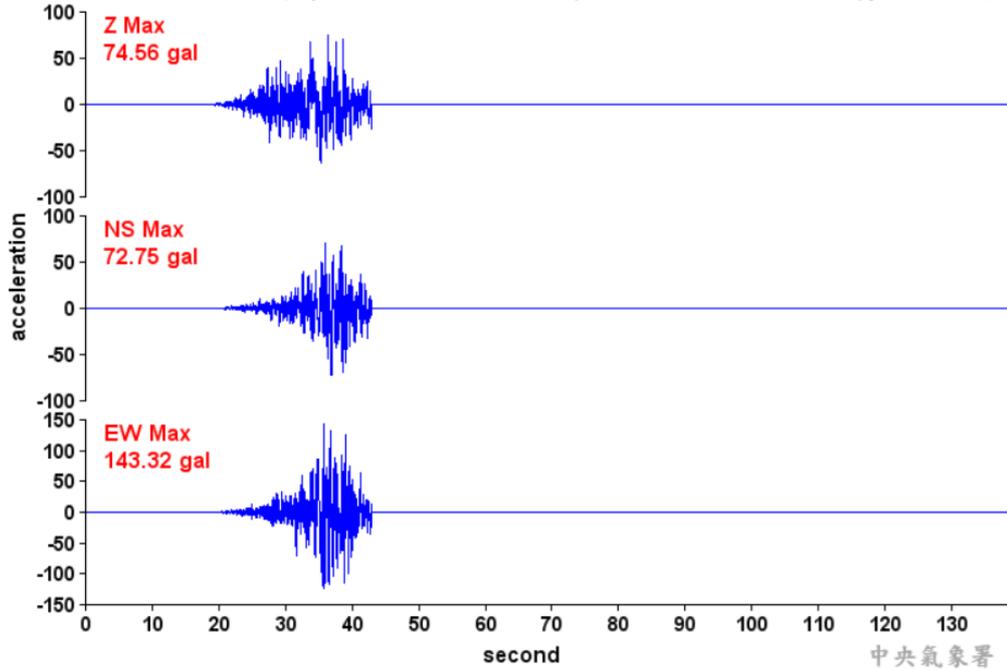
3.蘇澳港

中央氣象署

蘇澳 (TWC) 震度：5弱

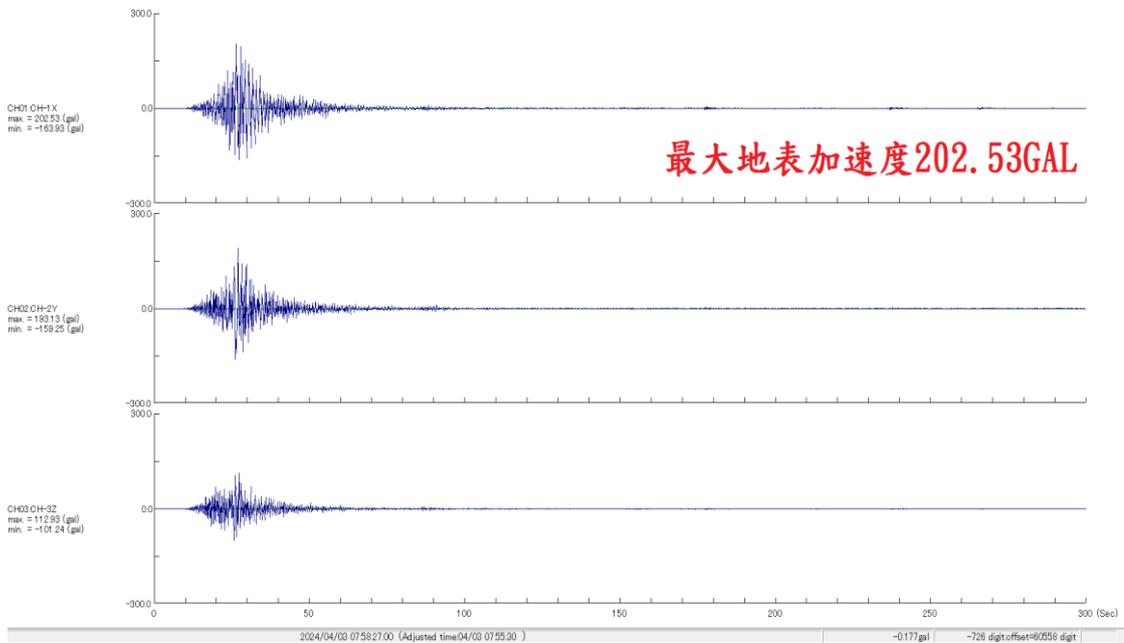
地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經121.86度，北緯24.61度
震央距：87.42公里，反方位角：198.72度



中央氣象署

運研中心速報

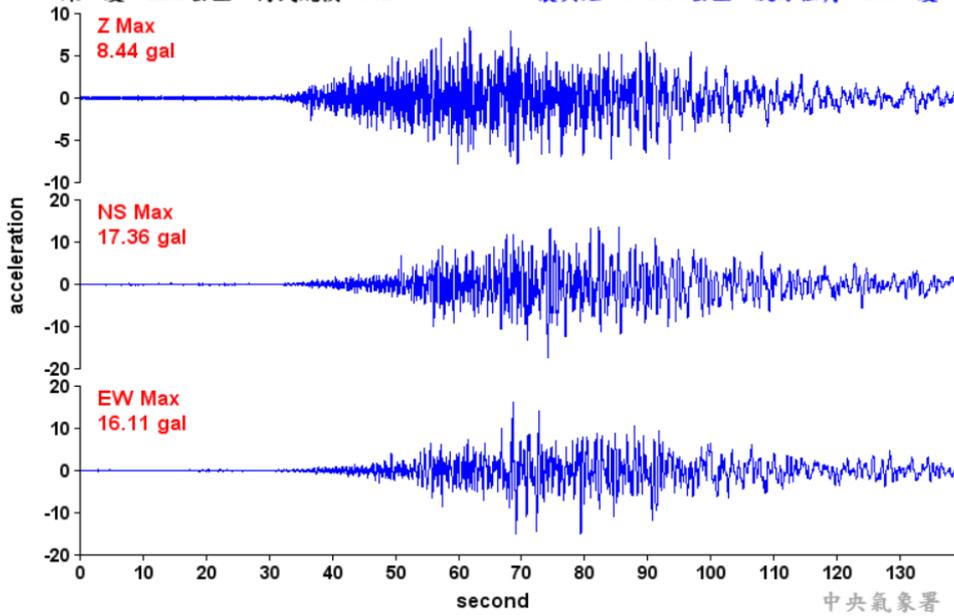


4.安平港
中央氣象署

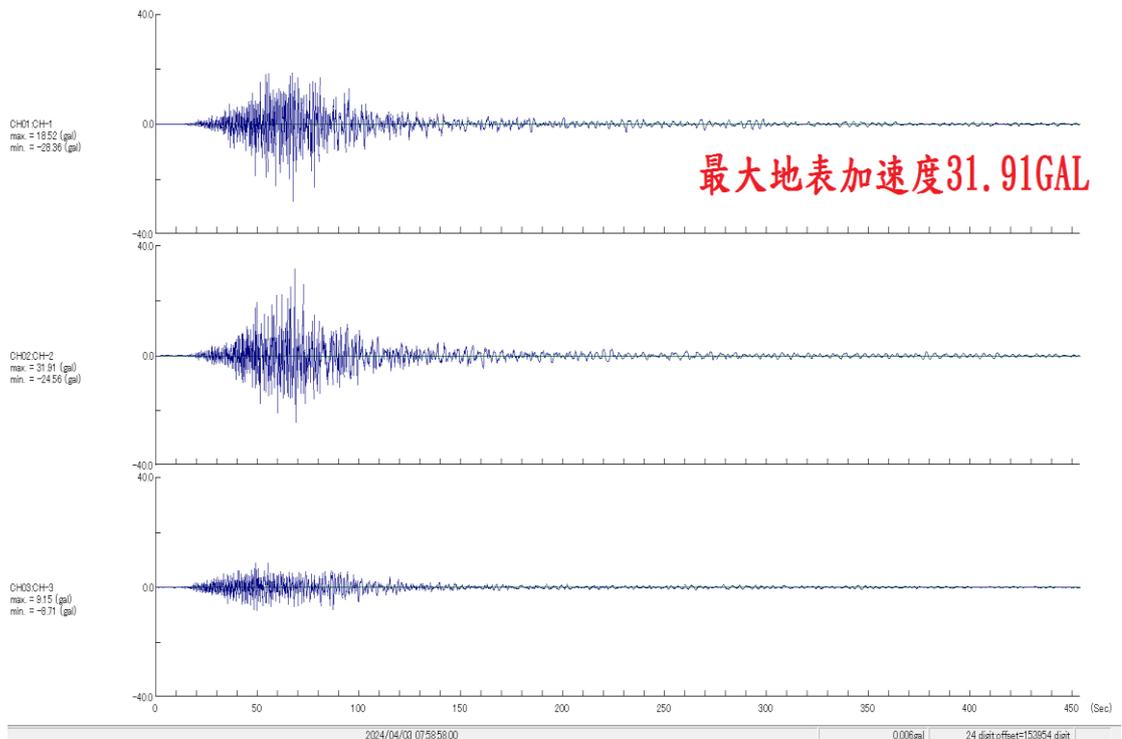
臺南市 (TAI) 震度：3級

地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經120.20度，北緯22.99度
震央距：170.54公里，反方位角：55.71度



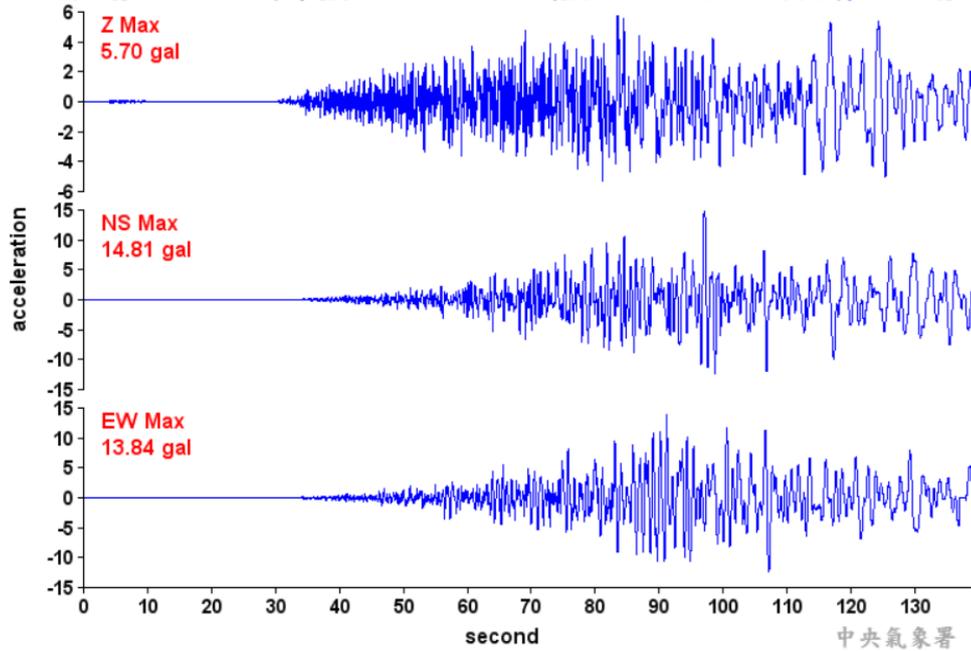
運研中心速報



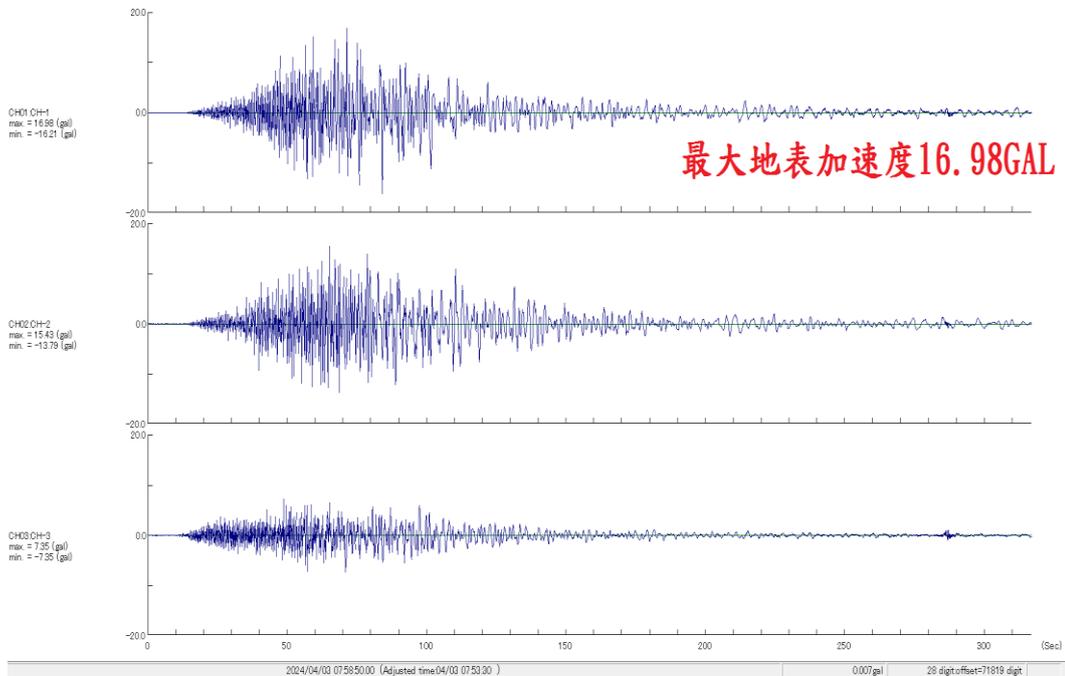
5.高雄港
中央氣象署

高雄市 (KAU1) 震度：3級

地震資訊	測站資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09	波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度	測站位置：東經120.31度，北緯22.59度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2	震央距：191.72公里，反方位角：42.95度



運研中心速報



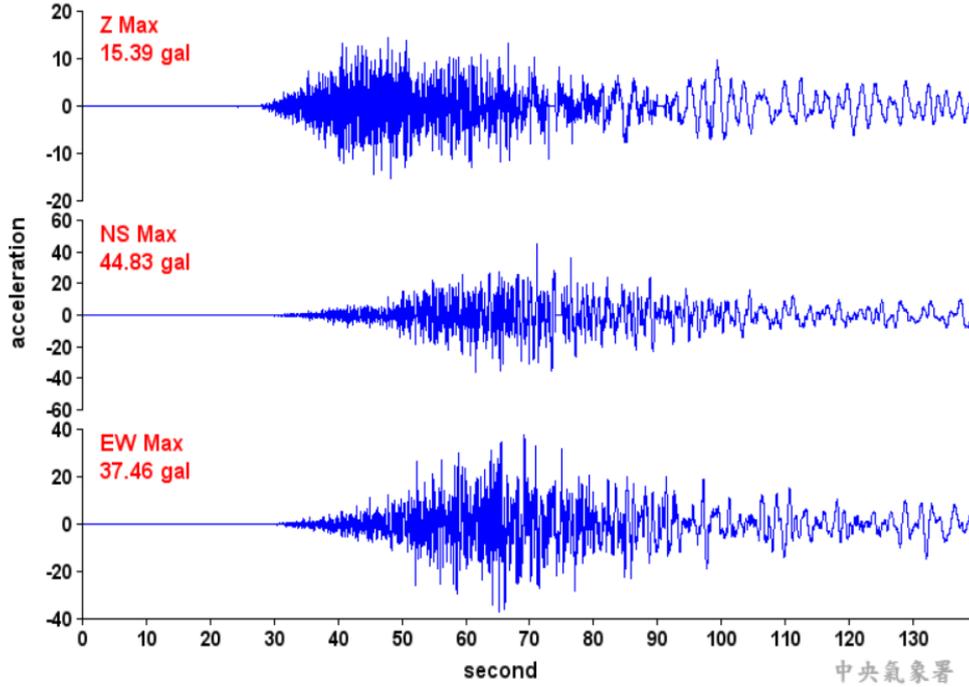
6.布袋港

中央氣象署

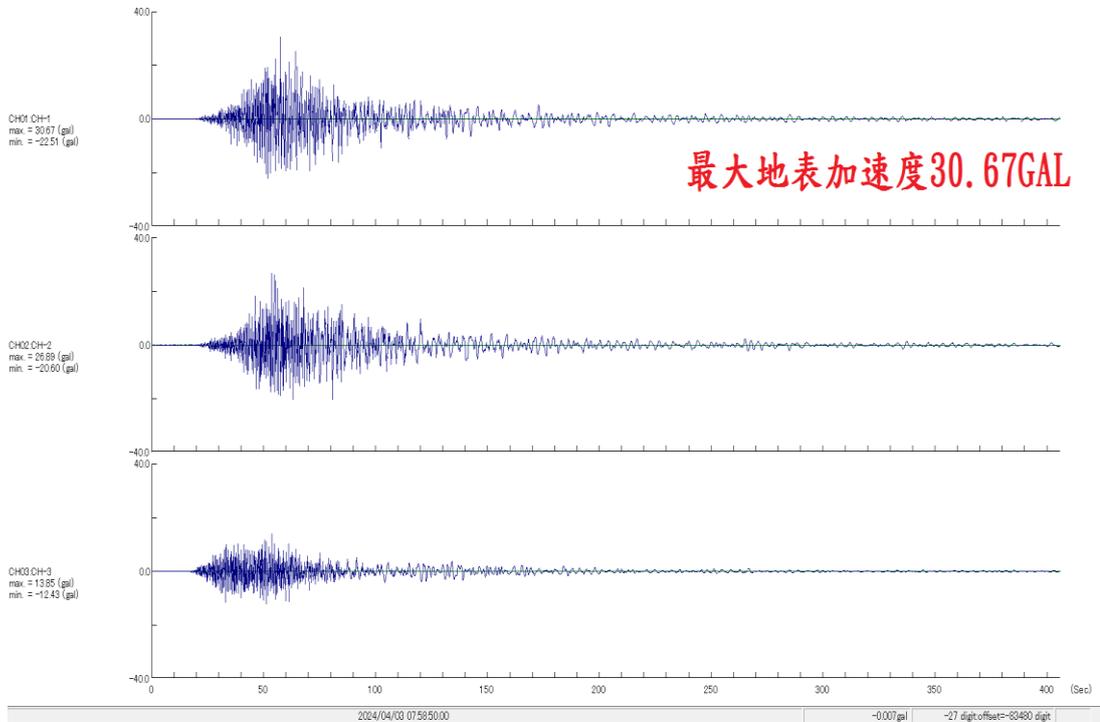
義竹 (CHN8) 震度：4級

地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經120.22度，北緯23.35度
震央距：150.07公里，反方位角：67.74度



運研中心速報



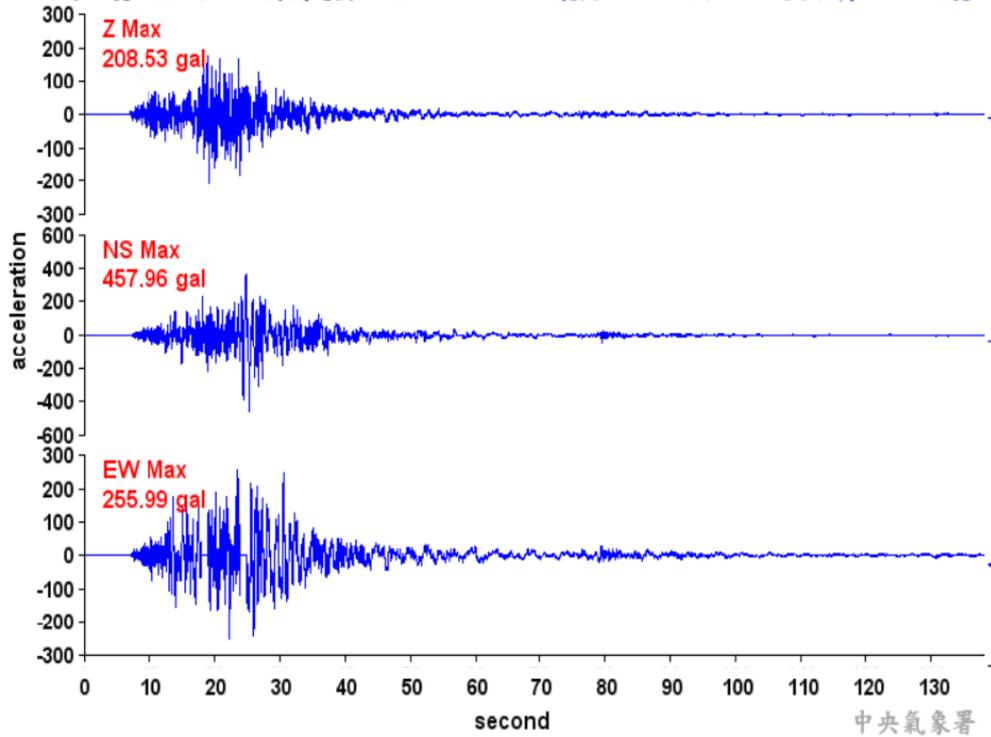
7.花蓮港

中央氣象署

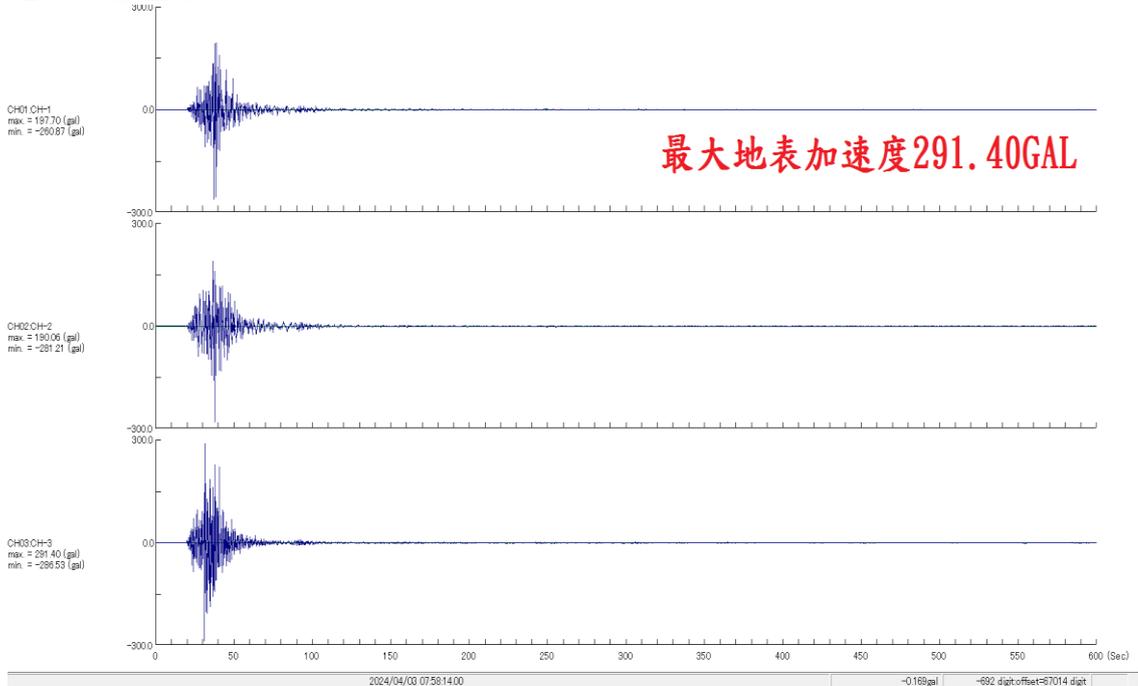
花蓮市 (HWA) 震度：6弱

地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經121.61度，北緯23.98度
震央距：13.02公里，反方位角：193.49度



運研中心速報



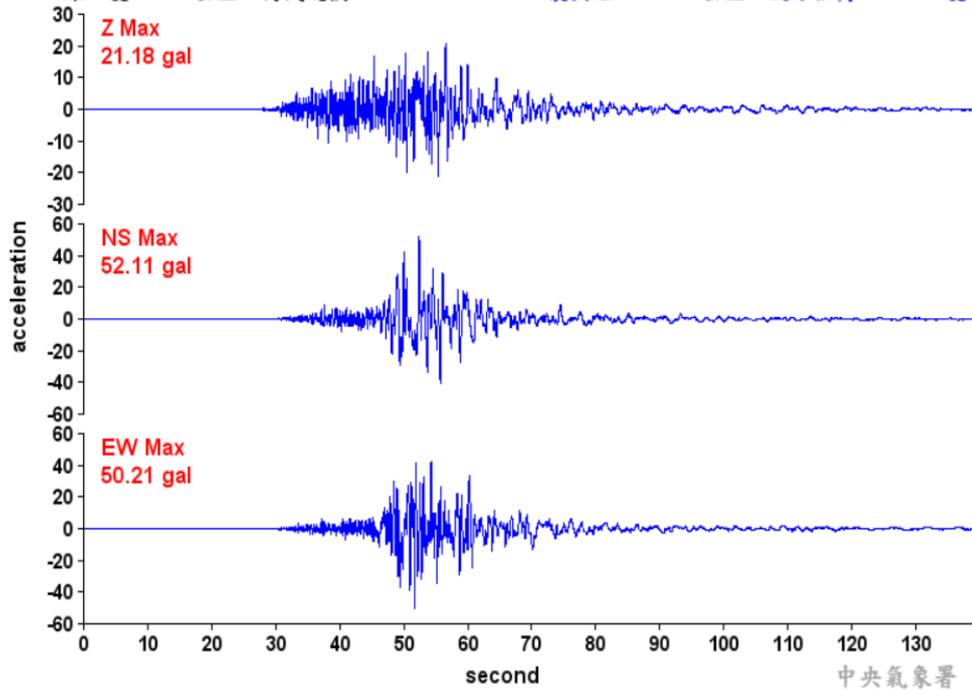
8.基隆港

中央氣象署

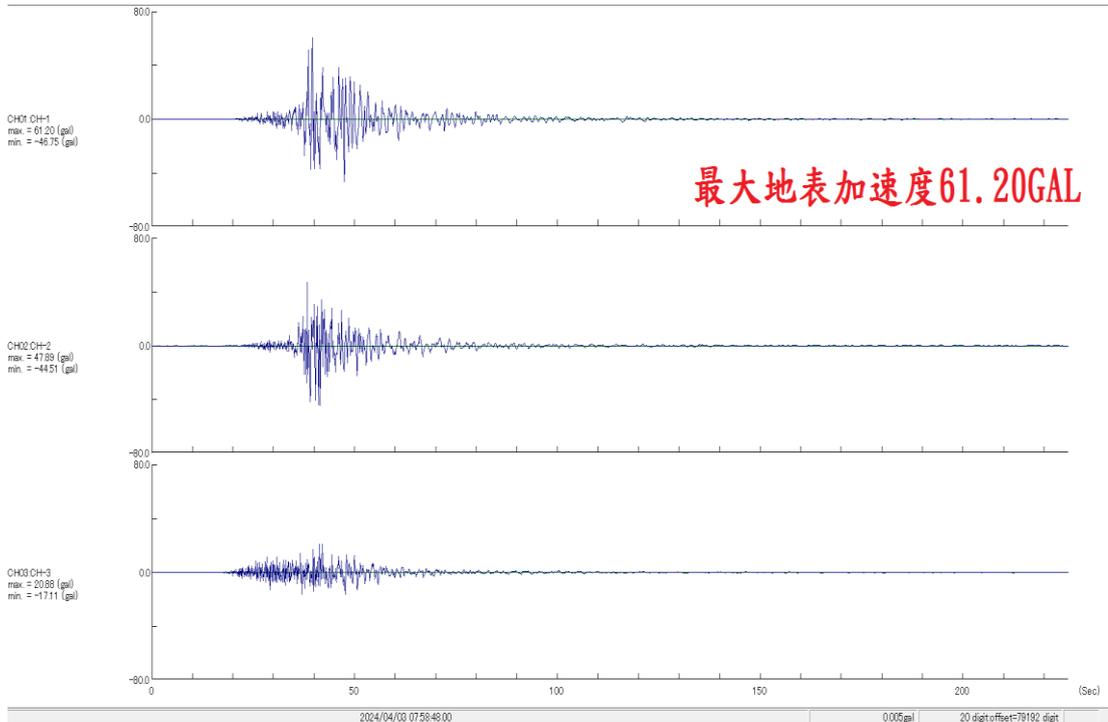
基隆市 (NOU) 震度：4級

地震資訊
發震時間：2024/04/03 07:58:09
震央位置：東經121.58度，北緯23.86度
深度：22.5公里，芮氏規模：7.2

測站資訊
波線起始時間：2024/04/03 07:58:08
測站位置：東經121.77度，北緯25.15度
震央距：144.03公里，反方位角：187.67度



運研中心速報



附錄二

專家學者座談會會議紀錄

交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：113 年 4 月 23 日(星期二) 下午 2 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：黃宇謙

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

一、王委員錦榮

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1.橋基保護是維持橋梁結構安全最重要的一環，本研究利用地工織布鋪設與鼎型塊結合，既可保護橋基，也可減少鼎型塊之流失，效益顯著，應可推廣應用，建議建立長期觀測，進一步驗證使用性及探討後續如何再精進。

2.本工法是否可運用於港區橋梁？建議後續可評估。

(二) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究，對港灣結構物之防蝕工法具有指導性之指標，可提供公共工程金屬結構物防蝕設計、延長使用壽齡及降低維護成本之應用，故本案有其推動的必要性及可行性。

(三) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

港灣構造物巡檢作業是港口管理機構日常工作之一，如何利用新興科技來進行實有必要性。

(四) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1.港區土地碼頭大部分均由填海造陸而成，故地震時土壤液

化有其風險性，例如：0403 花蓮地震，花蓮港確實產生土壤液化，並對碼頭造成破壞，爰此，針對港區地震液化風險的評估研究，確有必要性。

2.建議本研究可長期進行，並建立臺灣各商港液化風險模式及高液化風險資料庫為最終目標。

二、何委員鴻文

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

本案研究成果對於橋梁維管單位未來辦理橋基保護工作有助益，後續建議能依國 3 大甲溪橋試辦成效提出適用河段、織布規格、鋪設及固定綁紮方式等指南。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1.本案研究成果有助於檢測空間受限之橋梁檢測工作，未來申請專利建議需對目前已實際使用之檢測設備差異性及未來專利使用原則慎予評估。

2.本工法是否可運用於港區橋梁？建議後續可評估。

(三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

運用透地雷達於道路養護巡查並應用 AI 辨識將為未來趨勢，本案擬整合常用廠牌之資料前處理問題，將對後續 AI 辨識影像資料庫建置有助益。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

臺灣地區颱風、地震、豪雨頻繁，UAV 應用於邊坡防災之研議建議除公路主管單位外，亦可結合其他單位，例如：農業部農村發展及水土保持署、林業及自然保育署等。

三、吳委員松旺

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1.大甲溪近年較無劇烈沖刷，相關驗證成果仍需視未來降雨規模持續進行追蹤。

2.本年度公路管理單位仍將繼續進行橋墩鼎塊保護，後續可配合研究討論相關現地鋪設，以達理論及實務合作。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

建議可配合定期橋檢作業，持續研討合適之工具與方式，例如：鋼箱梁內部檢測。

(三) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

公路管理單位使用 UAV 多是針對路權內邊坡，針對單一場址路權外邊坡非屬公路單位管養，然若需整體分析建議可一併納入資料蒐集。

四、林委員鎮華

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

橋梁監測資料，例如：水位、流速等，建議回饋數值模擬進行驗證，另可考量不同環境情境之模擬。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

建議蒐集開放式橋梁及封閉式橋梁之比例，藉以思考後續工具的研發或如何搭配其他檢測工具。

(三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

建議可調查各式相關軟體的通用性，並取得不同單位的透地雷達使用資料，以增加資料量和 AI 學習之相容性。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

建議可針對有監測儀器之邊坡進行探討，以和 UAV 影像判識結果進行比較及相互驗證。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究建議納入在該環境中公共設施材料進行比對，探討其腐蝕速率變化以及如何回饋至防蝕和延壽，降低維護成本。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

建議建立防波堤透地雷達資料庫，並比對震後或其他災害

發生時之變化。

- (七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進建議配合鑽探報告資料，未來可於地震前後進行比對。

五、張委員欽森

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

- 1.本研究計畫共分111~114年共4年執行，之前尚有107~110年的相關研究，運輸技術研究中心(以下簡稱運技中心)同仁前前後後耗費8年時間進行本項研發工作，其中包括水工模型試驗、現場實作測試、數值模擬等作業，值得肯定，也希望本項研究最後能有良好成效，並實際推廣到相關政府單位來引用。
- 2.有關採用鼎型塊做為橋基保護工雖為一般橋梁河川慣用型式，惟因後續機關執行時，依政府採購法規定需有同等品之規定，以避免有綁標之嫌，因此，建議研究成果分析儘量可以較通則參數訂定此工法之材料型式，以利後續機關執行。
- 3.相關文獻及資料收集僅提到河道地形、歷年沖刷變化及流速等資料，建議應再增加相關河川流量、輸沙量及水位等水文資料，並進行必要之極值統計分析，以利試驗結果可對應後續設計所需採用之回歸期條件。
- 4.運技中心前往華光工程顧問股份有限公司(以下簡稱華光公司)推廣本研究成果時，曾提到本保護工法適用於卵礫石層，對砂質地形較不適用，在建置數值模式時對卵礫石層之模擬及試驗地形之重現合理性應是模式較為困難之處，也將攸關模式未來推測之成果，希望運技中心同仁多多費心思考相關議題，必要時可拜訪業界或學術界，共同討論研究。
- 5.建議本計畫可納入相關國內外經驗公式分析結果比較，如中興大學林呈教授對此領域有許多研究成果，除可進一步驗證國內適用之經驗公式之可行性外，亦可做為該工法量

化評估成效之參考。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

- 1.感謝運技中心蔡主任率領研究團隊到華光公司來分享本項研發成果，會中雙方進行相關技術及意見交流，希望對雙方都能有所助益。近期華光公司將爭取公路局橋梁檢測及耐震評估工作，以及鐵道局高架橋梁檢測業務，若能順利取得標案，將會適時與運技中心協商，應用此項研究成果在實際檢測工作之可行性。
- 2.前次推廣會議中，華光公司同仁曾建議鏡頭影像納入尺寸之可行性，以便在檢測時可即時判斷構件之劣化情形，及是否需再進一步仔細檢測之必要性。
- 3.在簡報中，辦理方式之推廣活動提到「評估本橋檢工具後續精進方向，或研發新型橋檢工具之可行性」，依以往工作經驗，港埠棧橋碼頭面板底部及港外碼頭連絡棧橋底部之檢測，各有其檢測之難處與限制，例如：棧橋碼頭面板底部或空間狹小，易受潮汐漲退影響，或碼頭縱深較深等；港外碼頭棧橋底部以往係以搭船並配合施工架方式進行檢測，需克服潮汐及風浪之影響，檢測作業都十分不方便，除耗時外，成果亦不易掌握。建議可思考納入後續研究之方向。
- 4.水管橋之檢測作業，沒有行車動線，如何考量應用於此類橋檢工作？

(三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

- 1.目前運用透地雷達檢測辨識地下管線及孔洞等的位置正確率僅 60%，且與雷達波長有關，探測深度約 2~5 米，因此，如何蒐集及整理成正確的訓練樣本，提供後續人工智慧進行 AI 辨識，應是關鍵課題。
- 2.透地雷達影像如若受到干擾訊號，都需要利用處理軟體進行消除，增益等方式處理，各廠牌透地雷達的分析應用軟體，可能有所差異，透過與業界或學者等訪談瞭解，應是正確之方向，可藉此加強後端由 AI 判別之能力。

- 3.各道路面層、基層、底層及下方土層等層面及材料的差異所造成的圖像特徵不盡相同，是否能夠針對此差異分類蒐集，以利後續研究之進行。
- 4.未來人工智慧辨識 AI 成果，建議應與實地資料比對，建立檢核方法及標準。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

- 1.針對裸露型落石邊坡之浮落石、張力裂縫之 AI 深度學習之訓練樣本，建議可先找開源資料集，並納入本地訓練樣本，一起進行模型訓練，以提升 AI 判識之成效。
- 2.邊坡防災之危險因子多，且非常複雜，建議可以納入：坡度、坡向、地質條件等其它因素進行整體性之判斷，其中坡度、坡向可利用 UAV 成果進行 DEM 計算取得。
- 3.未來建議評估利用 Insar 之資料進行 AI 訓練之可能性。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

- 1.本研究包含大氣腐蝕及水下腐蝕，自 96 年開始執行大氣腐蝕、104 年加入水下腐蝕，應累積足夠多資料可做比對，目前研究是否都是針對該年度的腐蝕進行分析，建議可加入歷年分析，以瞭解大氣腐蝕環境及水下環境的長年趨勢。
- 2.建議補充試驗對應之腐蝕因子，如螺旋金屬暴露試驗主要所得之腐蝕因子為何？
- 3.簡報 35 頁有辦理大氣腐蝕環境調查取樣維護作業，但並無辦理水下腐蝕環境調查作業說明。
- 4.計畫有說明大氣腐蝕因子，但是否針對水下腐蝕因子進行調查並分析，請補充說明。另建議補充目前所研析之腐蝕因子有哪些？是否有針對流速及水溫對水下腐蝕之影響？

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

- 1.建議可與臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)討論調整防波堤劣化度判定標準，依據「港灣構造物維護管理手冊」，部分判定標準過於嚴苛，例如：沉箱部分劣化

判定標準 2 及 3 是規定 3mm 之裂紋；而沉箱量體大，3mm 之裂紋判定為缺損尺度有失比例原則、差異過大，且沉箱大部分位於水下，透過水下攝影判斷 3mm 之裂紋難度高。另外，上部工亦有類似之規範，1cm 之裂紋可能為施工所致，且並不影響防波堤功能，建議可適度調整。

2. 建議防波堤進行檢修時，將檔案蒐整及歸類可納入應辦工作項目中，以利後續 5 年一次結構安全檢核之正確性及延續性。
3. 相關資料中均未提及新興科技是哪些項目，是否有預想項目？
4. 拋石防波堤之破壞通常由堤腳沖刷開始，導致消波塊移動及滑落，然人工巡檢僅能執行水面上之目視，初步判斷是否有異常情形，而水面下部分則需由潛水偵下水檢查，但因水流及波浪影響，潛水偵基於安全不容易接近防波堤檢視，因此，多音速測量應可被納入考量進行水面下結構物是否移動之佐證工具，提供參考。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 研究名稱所指精進定義是否僅為納入新建工程增加之地質資料，建議定義清楚是否僅為新增液化分析資料？
2. 研究項目及內容中，除液化潛能之評估及推估液化後沉陷量外，是否能增加其他可能造成碼頭損害之評估？

六、游委員中榮

(一) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 發明專利之標的較廣，通常是物質、物品、方法、材料及其用途的描述，新型專利之標的則僅及於物品之形狀、構造或組合的創作，建議可以發明專利為主。
2. 取得專利後，建議供我國研究機構或企業在我國管轄區域內製造或使用為優先，並鼓勵於橋檢相關專案推廣使用，提升國內橋檢技術發展。

(二) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

- 1.提醒應用 AI 需要辨識者對於異徵的知識，並且樣本和基礎圖資需標準化。
- 2.透地雷達管線資料或許比較容易取得，就個人所知已經有數個地方政府，例如：臺北市、新北市、桃園市、臺中市等，有利用透地雷達調查管線，並與管線資料庫做比對，或許有機會可以取得透地雷達斷面資料提供 AI 訓練，惟縣市政府應無圖像前處理的經驗。
- 3.是否可以取得適當的地下孔洞模式以做為 AI 訓練？據悉臺北市新工處似有相關資料，資訊供參。

(三) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

- 1.建議明確定義判釋標的，例如：落石坡、緩坡、人工邊坡，因其破壞機制皆有所不同。另外欲判釋的邊坡特徵，例如：坡面植生、坡頂坡面裂縫、浮石、岩石解理、人工邊坡構造設施等，亦需考量。
- 2.UAV 影像取得並非一定是由機關自行拍攝，有可能是委外辦理，不同 UAV 影像取得則需要標準化，建議可評估設定航線自行飛行取得影像。
- 3.建議提出 UAV 影像取樣率、航高、路線、拍攝角度、是否有參考比例(地面控制點)、取樣範圍(公路維管單位的關注範圍)和影像製作方式等建議。

(四) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

據悉港務公司有委託臺灣大學利用 UAV 結合 AI 進行港區設施自動化調查，建議可以蒐集資料參考。

(五) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

- 1.液化潛勢評估方式有好幾種，據悉新版的基礎設計規範有數種液化潛勢分析方法，現行港灣設計規範似乎只有 Seed 法，或許不同的研究成果可以提供給港務公司，提供設計規範修改的參考依據。
- 2.本計畫是否有包含液化後地盤沉陷的分析？是 Ishihara

& Yoshimine 法或是 Tokimatsu and Seed 法？

柒、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：下午 4 時 10 分

會議簽到表

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 113 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：113 年 4 月 23 日(星期二)下午 2 時

參、地點：本所運輸技術研究中心2樓簡報室

肆、主持人：蔡主任立宏 蔡立宏

伍、出席單位及人員：

所外委員	簽名
王委員錦榮	王錦榮
何委員鴻文	何鴻文
吳委員松旺	吳松旺
林委員鎮華	林鎮華
張委員欽森	張欽森
游委員中榮	游中榮
本所運輸技術研究中心 柯副主任正龍	柯正龍
第一科	賴瑞豐 許松海 胡哲文 曾文偉 蔡登鍵 張道光 黃宇謙
第二科	李信穎
第三科	林雅雯

(註：簽到表請掃描成 pdf 檔，若欲與會議紀錄整併成 1 個 pdf 檔，可至「https://www.ilovepdf.com/zh-tw/merge_pdf」，將會議紀錄與簽到表上傳後進行合併，再上傳至公文系統附件區供陳核)

附錄三

第 1 次工作會議紀要

113 年 6 月工作會議紀要

採購/自辦案件編號：

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

時間：113 年 6 月 26 日(星期三)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 數值水理分析及文獻蒐集。
2. 數值模型分析流程及檢定與驗證事件選取。
3. 階段性成果應用。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 相關智慧財產權及專利法規、專利申請程序，及專利地圖分析之相關研究文獻彙整。
2. 各構件之研發設計內容盤點，評估專利申請之可行性。
3. 本橋檢工具推廣應用工作執行進度。
4. 推廣活動回饋意見彙整。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 國內常用透地雷達廠牌、型號及其資料處理軟體彙整。
2. 支援相容各廠牌透地雷達分析應用軟體(第三方軟體)之基本

資訊彙整。

3. 專家學者訪談，訪談對象包括國內透地雷達代理商、業界專家及學界專家。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. UAV 結合 AI 於邊坡之相關研究文獻蒐集。
2. 公路局訪談摘要。
3. 邊坡維護管理機制及防災流程探討。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 完成第 1、2 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗取樣維護作業，完成 112 年第 4 季、全年與 113 年第 1 季，大氣腐蝕劣化因子化學分析及金屬試樣酸洗工作。
2. 完成 112 年度試驗資料綜整分析工作，並將資料擴增於資料庫，公開於本中心網站供外界查詢。
3. 完成撰寫及出版「2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」工作，提供相關單位選用金屬材料與防蝕工法應用。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 各港區防波堤之巡檢項目與維護管理制度彙整與研析。
2. 防波堤常見之劣化項目探討。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 液化評估法相關文獻彙整。
2. 高雄港近 10 年新建工程之地質鑽探資料蒐集。
3. 完成高雄港地質鑽探資料盤點。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 討論文獻相關數據之引用應確認其適用性。

2. 討論數值模擬分析流程與檢定與驗證事件選取。
- (二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣
1. 討論國內橋梁檢測相關設備專利發明現況。
 2. 討論推廣活動各橋檢廠商之回饋意見。
 3. 討論本橋檢工具後續精進方向及實務需求。
- (三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探
1. 討論蒐集透地雷達檢測數據資料之方式，及蒐集過程中會遇到的困難。
 2. 討論透地雷達檢測數據資料儲存格式，及如何讀取並顯示人員可以判釋之訊號圖像。
- (四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討
1. 討論現行公路邊坡維護管理機制及防災流程。
 2. 討論已蒐集之公路邊坡基本資料、分級、災害類型及監測手段。
 3. 討論公路局實務單位針對 UAV 結合 AI 進行增值應用之想法。
- (五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究
1. 討論去年新增之十八王公橋試驗點的腐蝕情況與取樣事宜。
 2. 討論腐蝕試驗點之氣鹽試架安裝工作。
- (六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業
1. 討論防波堤維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。
 2. 討論各港之防波堤構件劣化項目。
- (七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進
1. 討論土壤液化評估相關方法。
 2. 討論地質鑽探資料建置後，如何盤點及篩選。
 3. 討論後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址

數值模型建置及評估

- (一)梅雨季甫過，請視現場水位條件，安排於合適時間進行今年度現場試驗區第 1 次 UAV 觀測航拍，以觀測並記錄現場地形變化情形。
- (二)大甲溪石岡壩下游河段水理分析屬大範圍分析，請以二維模擬為宜；試驗橋址局部沖刷屬小範圍分析，請以三維模擬為宜，以有效率及合理分析評估本計畫工法之成效。

二、公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

- (一)橋檢人員回訓課程進行推廣時，設計調查問卷提供回訓學員填寫，持續蒐集第一線橋檢實務人員對本橋檢工具之專業意見及後續精進建議，並調查橋檢工作之實務需求。
- (二)依所蒐整推廣活動回饋意見，評估橋檢工具後續精進方向，並依實務需求，研擬後續研究計畫研發新式橋檢工具之可行性。

三、人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

- (一)對可能蒐集到之透地雷達檢測數據資料進行分類，如：訊號圖像（圖片檔案）、原始資料(Raw Data，二進位檔案格式)等，並分析不同類別數據資料對於訓練 AI 之助益。
- (二)後續報告中對於透地雷達儲存格式(二進位檔案格式)進行相關說明。

四、UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

- (一)依所蒐整之公路局優先關注邊坡曾經或正在應用 UAV 之狀況資料，釐清其邊坡災害類型及空拍影像數量，並以國內外文獻為借鏡，持續研析合適公路局之 UAV 結合 AI 切入課題及方法。
- (二)UAV 可實現酬載更換，以達更廣泛之情境使用。除蒐集 UAV 搭載光學鏡頭產製高解析度影像後進行之加值應用研究外，可擴大蒐集 UAV 搭載熱顯像、紅外線及 LiDAR 等結合 AI 之文獻。
- (三)依公路局提供轄下各分局管理之中高風險邊坡資訊，針對邊坡維護數量較多之山地工務段，安排後續訪談，並藉以瞭解實務需

求和研究著力點，達以終為始之目的。

五、113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

(一)研究成果後續可整理成論文，投稿防蝕研討會或港灣季刊。

(二)新增之十八王公橋試驗點腐蝕數據可提供維管單位參採。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

(一)統計並分類各防波堤構件之劣化項目，以瞭解防波堤常見損壞構件，提供後續防波堤維護之參考數據。

(二)水下之防波堤構件之檢測診斷項目可以探討用多音束與 ROV 來進行相關劣化度的判釋。

七、港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

(一)報告中呈現高雄今年新增港區之地質鑽探資料，應包含其新、舊資料之分佈區域，以利瞭解其分佈是否能滿足高雄港區液化評估之需求。

(二)今年度進行高雄港模式精進，除增加地質鑽探資料外，建議運用國內、外之液化分析方法，推估高雄港液化範圍及震陷量，提供地震速報簡訊之應用。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

貳、時間：113 年 6 月 26 日(星期三) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 助理研究員	張道光 謝妙燭 周哲 曾文守 鄭登鍊 黃彥瑋 賴俊呈 王培源
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李信穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄四

第 2 次工作會議紀要

113 年 8 月工作會議紀要

採購/自辦案件編號：

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

時間：113 年 8 月 26 日(星期一)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

- (一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估
 - 1. 現場觀測成果說明。
 - 2. 數值模型分析流程及二維模型檢定成果說明。
 - 3. 階段性成果應用說明。
 - 4. 後續研究項目說明。
- (二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣
 - 1. 鐵道橋梁及箱涵橋梁檢測國內外文獻蒐集彙整。
 - 2. 橋檢工具專利申請評估結果說明。
 - 3. 橋檢工具推廣應用工作執行進度說明。
 - 4. 推廣活動回饋意見彙整。
- (三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探
 - 1. 探討數據資料前處理方法(程序)及前處理過程中會遭遇之問題及困難，並初步研擬解決對策。

2. 辦理專家訪談針對國內外應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，及數據資料之前處理方法，詢問相關專業看法及意見。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 公路局邊坡資訊調查及蒐集情形說明。
2. 公路局邊坡維護管理機制及防災流程探討。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 完成第 1、2 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗的取樣維護、化學分析及金屬試樣酸洗工作，第 3 季工作辦理中。
2. 構建鋅金屬腐蝕速率與主要大氣腐蝕因子間的迴歸模式。
3. 後續工作項目說明。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 各港區防波堤經常及特別巡查設施之劣化項目之探討。
2. 多音束水深測量與行動應用程式應用於防波堤巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 建置高雄港地質鑽探資料，並盤點、篩選可用資料共 891 筆地質鑽探資料。
2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 今年度凱米颱風帶來可觀之降雨量，對於本計畫試驗區成效驗證有相當的幫助，對於整體量化成效之數據亦可藉此事件更新。
2. 對於本次凱米颱風事件下，石岡壩放流量及試驗區河床水位高之物理量，可建立通用性詞語或對等概念，便於對外說明使用。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 討論博大公司協助本橋檢工具專利申請評估結果。
2. 討論本橋檢工具於橋檢人員回訓課程推廣之問卷回饋意見。
3. 討論本橋檢工具於鐵道橋梁應用之可行性。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 討論蒐集透地雷達數據資料時，透地雷達的原始資料(Raw Data)要如何取得。
2. 討論若蒐集的透地雷達數據資料不足給 AI 進行訓練學習時，利用「生成對抗網路(GAN)」生成 AI 訓練學習資料的可能性。

(四)UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 討論現行公路局邊坡維護管理機制及防災流程。
2. 討論公路局邊坡應用 UAV、LiDAR 等科技巡檢實際案例。

(五)113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 討論迴歸模式之模式構建、解釋變數選定。
2. 討論後續迴歸模式之模式精進、解釋與預測工作。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 討論防波堤巡查檢測劣化項目與水下定期檢測劣化度探討。
2. 討論新興科技應用於防波堤巡檢作業。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 討論高雄港不同地震情境下液化潛勢分析。
2. 討論後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

- (一)凱米颱風事件後可驗證設置織布之保護效果，其中 P23 橋墩恰為左右各半採用傳統及織布保護工法之區域，相當適合做為本

計畫工法效果之說明。

(二)請依所規劃之後續工作項目執行。

二、公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

(一)鐵道橋梁之交通可及性與公路橋梁不同，應考量執行橋檢工作相關設備運送及人員之交通方式，以完整評估本橋檢工具於鐵道橋梁應用之可行性，建議接洽鐵道橋梁維管單位，並安排現場橋檢工作觀摩，以瞭解鐵道橋梁檢測實務之進行概況。

(二)本橋檢工具之後續精進方向，應以滿足橋檢公司及橋檢人員之實務需求，並請瞭解相關客製化所需成本，以利後續推廣工作之說明。

三、人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

(一)蒐集透地雷達數據資料時，透地雷達的原始資料(Raw Data)雖然大多由乙方掌握，請探討函請甲方要求其廠商(乙方)提供檢測的透地雷達原始資料(Raw Data)之可行性。

(二)後續請探討利用「生成對抗網路(GAN)」生成AI訓練學習資料的可行性。

四、UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

(一)依現況調查資料，公路局各工務段邊坡曾經或正在應用 UAV 進行空拍之數量約有 77 處，本計畫過往已訪談公路局北分局、中分局等轄下工務段，建議再安排其他分局進行訪談，以廣泛瞭解不同區域之實務需求。

(二)本計畫已整理公路局科技應用邊坡案例，並提出目前使用 UAV 搭載光學鏡頭或 LiDAR 主要進行之應用場景、優點和適用條件，後續於進行研析 UAV 結合 AI 深度學習影像判識方法之工作項目時，請以相關應用場景如何搭配 AI 輔助為切入點進行探討。

五、113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

(一)後續可運用構建的迴歸模式進行金屬腐蝕速率預測。

(二)在選擇解釋變數時，可檢視腐蝕速率與腐蝕因子之散佈圖。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施
巡查檢測作業

- (一)多音束水深測量在防波堤水下定期檢測劣化度判定(護面塊與護基塊)問題，建議可再探討其適用性。
- (二)防波堤水下與水上沉箱壁體與消波塊構件之檢測診斷項目，可以探討用 UAV 與 ROV 新興科技來進行相關劣化度的判釋。

七、港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

- (一)請補充液化風險評估之機率分析與定值分析之差異處。
- (二)高雄港洲際二期(倉儲物流區及散雜貨碼頭)由於地質鑽探資料太少，建議高雄港不同地震情境下液化潛勢比較圖中，洲際二期暫時不要分析液化潛勢。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：113 年 8 月 26 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 助理研究員 副研究員	胡懿 謝外屏 鄭登鍵 王浩源 賴俊呈 張道光 黃宇瑞 曾文傑 顏麗香
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李修穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄五

第 3 次工作會議紀要

113 年 10 月工作會議紀要

採購/自辦案件編號：

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：113 年 11 月 4 日(星期一)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：黃烟宏

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

- (一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估
 - 1. 113 年度前 3 季現場試驗觀測結果。
 - 2. 二維數值模型建置情形。
 - 3. 階段性成果應用。
 - 4. 後續研究項目。
- (二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣
 - 1. 本案橋檢工具專利申請作業進度。
 - 2. 本案橋檢工具推廣工作執行狀況及進度。
 - 3. 推廣活動回饋意見彙整。
 - 4. 研發新型橋檢工具需求及規劃。
- (三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探
 - 1. 透地雷達數據資料前處理過程遭遇之問題及初步解決對策。
 - 2. 草擬合作研究計畫「應用深度學習輔助辨識透地雷達道路潛

在下孔洞訊號圖像之研究」研究主題與重點。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. AI 深度學習技術探討。
2. UAV 結合 AI 深度學習影像判識方法。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~3 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗的取樣維護、化學分析及金屬試樣酸洗工作，第 4 季工作辦理中。
2. 構建鋅金屬腐蝕速率與主要大氣腐蝕因子間的迴歸模式，並應用模式進行鋅金屬腐蝕速率預測及腐蝕環境分類等級預測。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 依維護管理制度執行防波堤巡檢作業時所遭遇之問題。
2. 新興科技 UAV、多音束水深測量與水下無人載具應用於防波堤巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 高雄港不同地震情境下液化潛勢分析結果。
2. 高雄港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布結果。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 二維模型參數率定選用。
2. 河床大斷面資料導入。
3. 三維模式參數率定及驗證。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 本案橋檢工具授權及推廣模式。
2. 推廣活動回饋意見及本案橋檢工具功能精進方向。
3. 新型橋檢工具研發需求及後續規劃。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 保存數據資料、資料庫以及資料庫的不同及其必要性。
2. 對於透地雷達的訊號圖像而言，採用標註異常訊號特徵與標註正常訊號特徵做為 AI 訓練學習方式之優缺點。

(四)UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 分辨式 AI 及生成式 AI 之基本原理、代表模型及資源需求等。
2. 生成式 AI 應用於影像辨識之適用性及切入點。

(五)113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 迴歸模式的 R^2 值、以模式進行預測時的預測區間信賴水準。
2. 港區腐蝕因子調查數據的分析與應用，以及後續模式的精進方向。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 防波堤水下與陸上巡檢作業時所遭遇問題。
2. 應用新興科技強化防波堤之巡查與檢測作業。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 高雄港不同地震情境下地震沉陷潛勢。
2. 後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

(一)UAV 航拍勞務案，於完成康芮颱風事件之地形紀錄後，於 11 月下旬著手辦理相關結案驗收事宜，以利年度會計結算作業執行。

(二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理，並如期於 11 月底前提交期末報告初稿。

二、公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

(一)如未來本案橋檢工具有精進或客製化之規劃，應將本案彙整之

實務需求建議提供予本工具精進改良之執行單位或廠商，提升本橋檢工具應用價值，且符合應用單位之實際需要。

- (二)如未來規劃針對箱型橋梁內部檢測研發新式橋檢工具，應先完整調查箱型橋梁內部構造樣態及橋梁環境狀況，並充分瞭解檢測作業需求。

三、人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

本計畫所探討蒐集透地雷達數據資料的 2 種方式，其中蒐集他人已完成之探（檢）測或試驗數據資料這個方式，不論是在蒐集的過程還是在進行資料前處理的過程，都會產生困難和問題，雖然這些問題本計畫有初步研擬相關解決的對策或建議，但是並沒有實際的執行經驗，建議將蒐集他人已完成之探（檢）測或試驗數據資料這個方式納入後續的合作研究計畫實際執行，以確認是否能透過這個方式蒐集到質量都適合訓練 AI 的數據資料。

四、UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

- (一)依照本研究應用 AI 深度學習結合 UAV 空拍影像輔助影像判識之目的，可依蒐集之資料量及品質，決定運用單一或多個 AI 模型，針對不同階段來予以協處。
- (二)建議針對 UAV 如何取得較為精良之資料成果、影像處理方式以及可結合 AI 深度學習影像判識之課題進行梳理，呈現一套架構流程圖，俾供應用單位及本所後續參採。

五、113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

- (一)後續可因應不同區域特性，構建相對應的關聯模式，並將風速、風向、雨量等氣象因子的影響納入模式。
- (二)後續可就特定地區的二氧化硫、氯鹽調查結果做進一步的深入分析。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

- (一)建議加強新興科技應用於防波堤設施構件劣化項目對應於檢測

項目的表單。

(二)建議補充新興科技 UAV 與多音束水深測量應用於巡檢案例的說明。

七、港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估高雄港區之分區地震沉陷量，俾更新高雄港地震簡訊災況初評內容，並說明與原來地震簡訊災況初評內容之差異。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：113 年 10 月 31 日(星期四) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 助理研究員 副研究員 助理研究員 副研究員	曾文傑 謝幼屏 張道光 蘇登健 賴俊呈 胡啟文 黃炳宏 黃才瑞
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李修穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄六

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所自辦研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：「港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進」

執行單位：運輸技術研究中心第一科

審查意見	處理情形
一、 柯永彥委員	
(一)本研究液化潛勢評估，架構完整，方法合理。	感謝委員肯定
(二)由於目前之建築物耐震設計規範並未直接列出三級地震對應之尖峰水平地表加速度，液化潛能評估簡化法所需之尖峰水平地表加速度係以有效尖峰加速度 (Effective Peak Acceleration, EPA) 取代之，此脈絡建議補充說明。	雖目前規範未直接列出中小地震、設計地震與最大考量地震對應之尖峰水平地表加速度，但由規範定義尖峰水平地表加速度 a_{max} 公式(式 3.1 至 3.3)，可配合不同縣市土壤液化分析建議之地震規模(表 3-1)與臺灣規範反應譜，在相同分析工址可計算相同設計頻譜之分析加速度。已依委員意見，補充說明於報告書 p. 3-4。
(三)報告中回顧了數種液化潛能評估簡化法，但執行時僅採用 NCEER 法與 HBF 法，建議補充說明選取此兩種方法之理由。	NCEER 法主要為國際採用方法，HBF 法主要以 NCEER 法為架構，加入國內 921 地震案例，可相對符合中南部特有粉土質砂於液化現象之評估，屬國內規範通用方法，因此同時採用兩分析方法基於更新之 SPT-N 鑽探成果進行液化潛勢分析。已依委員意見，補充說明於報告書 p. 3-1 至 p. 3-2。
(四)液化潛勢高、中、低之分界為特定 PL 值，將造成高液化潛勢區域面積隨尖峰水平地表加速度之變化易呈現跳躍性之趨勢，建立兩者間關係時須特別注意。	感謝委員提醒，在分析液化潛勢時，會特別注意兩者間關係變化。
(五)建立尖峰水平地表加速度與液化震陷量關係時，除了三級地震對應之加速度值外，建議納入介於其間之其他加速度值，	本研究透過推估震陷量與沉陷等級分類，提供較合理之門檻加速度設定值，以修改高雄港地震速報簡訊內

<p>藉此將能對期間關係有更精細之描述，也較易應用於震後沉陷量快速評估。</p>	<p>容，目前三級地震對應之加速度值，已足夠評估高雄港港區於地震後之快速液化災損。</p>
<p>二、 林炳森委員</p>	
<p>(一)本研究針對高雄港進行定值與機率液化潛勢評估，方法正確，條理分明，並精進地震速報系統研究成果完整，具有創新性與實用價值，可提供高雄港區地震安全評估相關資訊，做為臺灣港務公司及高雄港務分公司辦理地震後相關巡查、檢測及防救災決策之應用參考，可以通過。</p>	<p>感謝委員肯定</p>
<p>(二)建議下列應修正：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 參考文獻應統一格式，如年代應列前面。 2. p. 2-1，歐亞版塊與菲律賓海版塊交界處。 3. p. 3-18，HBF 在中潛勢區面積(表 3-6)在最大考量地震下，偏低應補充說明。 4. p. 4-9，表 4-2 中，HBF 中潛勢面積在最大考量地震下為 71.8%，但 NCEER 為 51%，趨勢與表 3-6 相反，應補充說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已依委員建議，統一參考文獻格式。 2. 已依委員意見修改。 3. 此次在最大考量地震下 HBF 法在中潛勢區面積佔比偏低，研判因 HBF 方法考量本土粉質砂土案例，造成在相同分析加速度下，HBF 方法偏保守，即中潛勢區面積較低。已依委員意見，補充說明於報告書 p. 3-18。 4. 表 4-2 係以 Ishihara and Yoshimine (1992)方法討論地震引制下沉陷量，而表 3-6 係以 Iwasaki(1982) 方法討論鑽孔液化機率，兩者討論指標不同，分類依據也有所不同，不能進行比較。

三、 黃敏郎委員：	
(一)本計畫採用 HBF 法與 NCEER 法，何者較適用於高雄港，建議可於第三章或第七章中補充說明。	NCEER 法主要為國際採用方法，HBF 法主要以 NCEER 法為架構，加入國內 921 地震案例，可相對符合中南部特有粉土質砂於液化現象之評估，目前兩方法在規範中皆可使用。兩分析架構相似，重點在於其分析案例之差異，雖 HBF 法加入國內 921 地震案例，但也無法說明其更適用於高雄港。已依委員意見，補充說明於報告書 p. 3-18。
(二)p. 3-5，表 3-2 建議標註地震規模與分析加速度之單位。另第一行地調所應更新為地礦中心，其餘報告內文提及之單位請一併檢視更新。	已依委員建議修改。
(三)p. 3-11，第一段提及採用 IDW 進行空間內插，其可能會產生的 (bullseye effect)，建議後續計畫可以採用其它空間內插方法 (ex. 克利金法 (Kriging)) 進行比較，並擇優採用之。	本計畫採用 IDW 方法進行空間內插，重點在於凸顯各商港相對嚴重災損區域，IDW 方法為目前較優且常被使用的空間內插法。
(四)p. 參-2，參考文獻 16-18 之年份格式，建議與其它文獻統一。	已依委員建議，統一參考文獻格式。
四、 第一科賴瑞應科長	
(一)本計畫完成高雄港區鑽孔資料的蒐集及資料庫的擴充，也完成相關鑽孔資料分布探討與篩選，做為後續港區液化評估與沉陷量推估的依據，並提供地震後災損速報應用，研究成果能落實應用，予以肯定。	感謝肯定
(二)針對高雄港區所蒐集的鑽孔資料分布探討部分，建議加強說明部分專用區鑽探資料較欠缺的原因；另外，地震液化潛勢及沉陷量推估研究成果部分，也建	部分專用區鑽探資料較欠缺的原因，已加強說明於 p. 3-5。另外有些地區無液化潛勢或沉陷量，已補充說明於報告書 p. 3-17。

議能補充說明本研究分析成果礙於鑽探資料的分布，導致有些地區無液化潛勢或沉陷量。	
(三)基於上述因素，研究成果對於後續的地震災損通報是否有影響，建議也可以補充說明。	部分專用區鑽探資料較欠缺，惟專用區已完成地質改良較無液化風險，對於後續的地震災損通報並無影響，已補充說明於報告書 p. 5-4。
(四)報告 p. 5-6 表 5-3 高雄港地震速報簡訊內容(目前)一覽表，簡訊內容有 TIPC 提供，也有 TTRC 提供，請統一。另外，也建議在表後加註 TTRC 為何單位簡稱。	表 5-3 已統一修改為 TTRC，並在表後加註 TTRC 的簡稱。
五、 第二科李俊穎科長	
(一)本研究建立高雄港不同情境之液化潛勢分析圖資具參考應用性。	感謝肯定
(二)圖 3.1 太模糊，建議重新處理，讓分區文字保持清晰。	已依建議重新處理圖 3.1。
(三)建議能再多與過往研究進行比較，以利呈現今年度成果。	已於報告書 p. 3-17，增加與過往研究比較說明。
六、 第三科蔡世璿副研究員	
(一)p. 1-7，2. 應用第(1)項寫為「基隆港務分公司」，與本案高雄港區精進不同，請確認。	已依建議完成修改。
(二)內文所提地工資料庫，部份名稱為「運技」中心地工資料庫，部份為「港研」中心地工資料庫，建議統一名稱。	已依建議完成修改。
(三)第六章提及各港區地震速報資訊有介接至「港灣構造物維護管理資訊系統」、「商港海氣象資訊系統」及「港灣環境資訊系統」建議可於報告書中增加圖片說明展示成果，亦可具體呈現本研究的應用價值。	已於報告書中 p. 6-13 至 p. 6-14 增加圖片說明展示成果。

附錄七
期末報告簡報資料



113年度第一科自辦研究計畫

港區地震液化風險評估模式精進(3/5)- 高雄港模式精進

期末簡報

113.12.27



大綱

- 一 研究緣起與目的
- 二 研究項目與內容
- 三 土壤液化文獻回顧及分析方法
- 四 高雄港液化潛勢分析成果
- 五 高雄港震陷潛勢分布
- 六 結論與建議

一、研究緣起與目的

3

經費: 50千元

來源: 本所業務費

港區地震液化風險評估模式精進 (3/5)-高雄港模式精進

研究緣起與目的(WHY)

- ✓ 臺灣西部沿海地區，地層大都屬現代沖積層，土層疏鬆軟弱壓密尚未全部完成，極可能因地震作用產生土壤液化，造成結構物損壞。
- ✓ 本計畫為延續型計畫，111及112年分別完成臺中港及臺北港區地震液化風險評估模式精進，113年(今年)基於過去研究成果，針對高雄港新建工程所增加之地質鑽探資料，持續進行高雄港區地震液化風險評估模式精進。
- ✓ 推估高雄港港區針對不同地震發生之液化風險，提供港務公司對港灣工程及設施維護管理之應用。

研究範圍與應用單位(WHO)

- ✓ 本研究以臺灣港務公司所轄高雄港港區之地質鑽探資料為研究範圍。
- ✓ 應用單位為臺灣港務公司及高雄港務分公司，防救災與工程維管單位人員。

4

二、研究項目與內容

5

港區地震液化風險評估模式精進 (3/5)-高雄港模式精進

研究項目
與內容
(WHAT)

- ✓ **相關文獻蒐集與研析**
 - 蒐集液化評估法相關之文獻與彙整，以及蒐集建立高雄港新建工程所增加之地質鑽探相關資料，予以彙整研析。
- ✓ **探討液化潛勢評估方法**
 - 加入國內及國際間採用之液化潛勢評估法進行液化分析。
- ✓ **推估高雄港港區液化風險**
 - 以高雄港港區地質鑽探資料，利用液化潛勢評估方法，推估液化後沉陷量，進而推估高雄港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

辦理方式
(HOW)

- ✓ 蒐集相關之文獻與彙整，並拜會臺灣港務公司高雄港務分公司、經濟部地礦中心，蒐集、盤點、篩選港區內具代表性之可用地質鑽探資料，並建立高雄港新建工程所增加之地質鑽探相關資料，予以彙整研析。
- ✓ 邀集專家學者及應用單位座談，聽取相關建議及需求，以供計畫後續執行的參考。
- ✓ 以高雄港港區所新增之地質鑽探資料，依據液化潛勢評估法、地質分布與試驗成果，進行不同地表加速度值下液化土層發生深度與範圍分析，重新探討、判斷與調整風險評估模式，進而推估高雄港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

6

港區地震液化風險評估模式精進 (3/5)-高雄港模式精進

預期成果、
效益及
應用

- ✓ 預期成果(效益)
 - 完成蒐集建立高雄港港區新建工程地質鑽探資料。
 - 完成高雄港港區液化潛勢評估分析。
 - 完成推估高雄港港區針對不同等級地震發生之液化風險。
- ✓ 應用
 - 透過地震速報簡訊傳送，提供高雄港震後安全評估相關資訊，以提昇臺灣港務公司及高雄港務分公司工程維管人員，於震後相關巡查、檢測及防救災決策之應用。
 - 本研究成果可提供本所後續相關研究及臺灣港務公司及各分公司在港灣工程規劃、設計及施工之應用。

7

港區地震液化風險評估模式精進 (3/5)-高雄港模式精進

辦理時程
甘特圖
(WHEN)

工作項目	113年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1. 工作計畫書研擬/修訂	■	■										
2. 文獻回顧			■	■	■							
3. 蒐集與研析相關資料				■	■	■						
4. 探討液化潛勢評估方法						■	■	■				
5. 推估高雄港港區液化風險								■	■	■		
6. 召開專家學者座談會				※								
7. 辦理工作會議						※		※		※		
8. 撰寫期末報告書初稿										■	■	■
9. 辦理期末報告審查												■
10. 報告書修訂/簽陳印製												■
預定進度累計百分比	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	100%
預定查核點	1. 113.4.30前召開專家學者座談會 2. 113.6.30、8.31、10.31前辦理工作會議 3. 113.11.30前完成期末報告初稿 4. 113.12.15前完成期末報告審查 5. 113.12.31前完成報告書修訂/簽陳印製 6. 114.2.28前完成報告書出版											

8

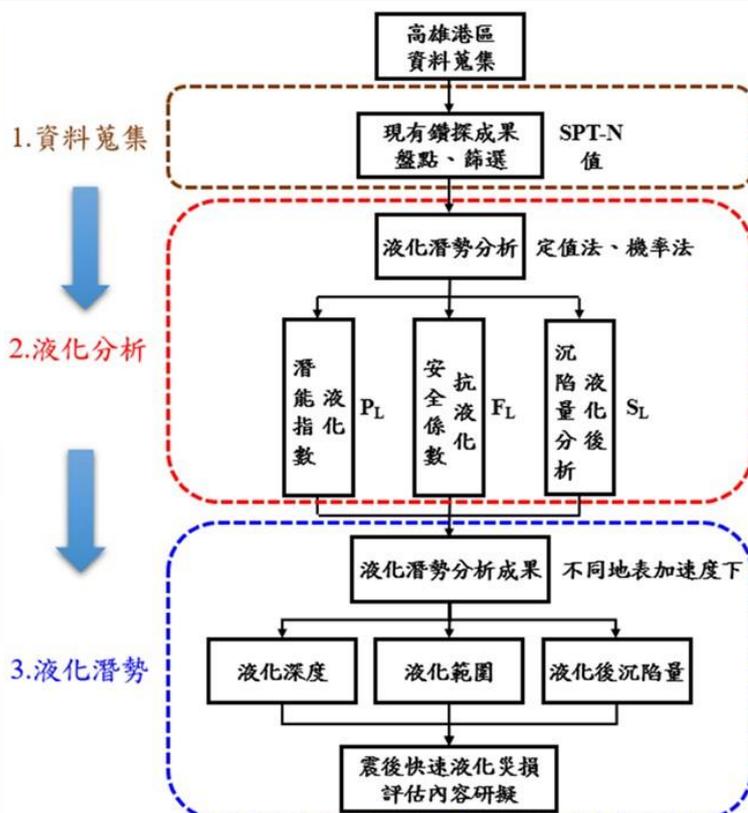
港區地震液化風險評估模式精進 (3/5)-高雄港模式精進

人力分配

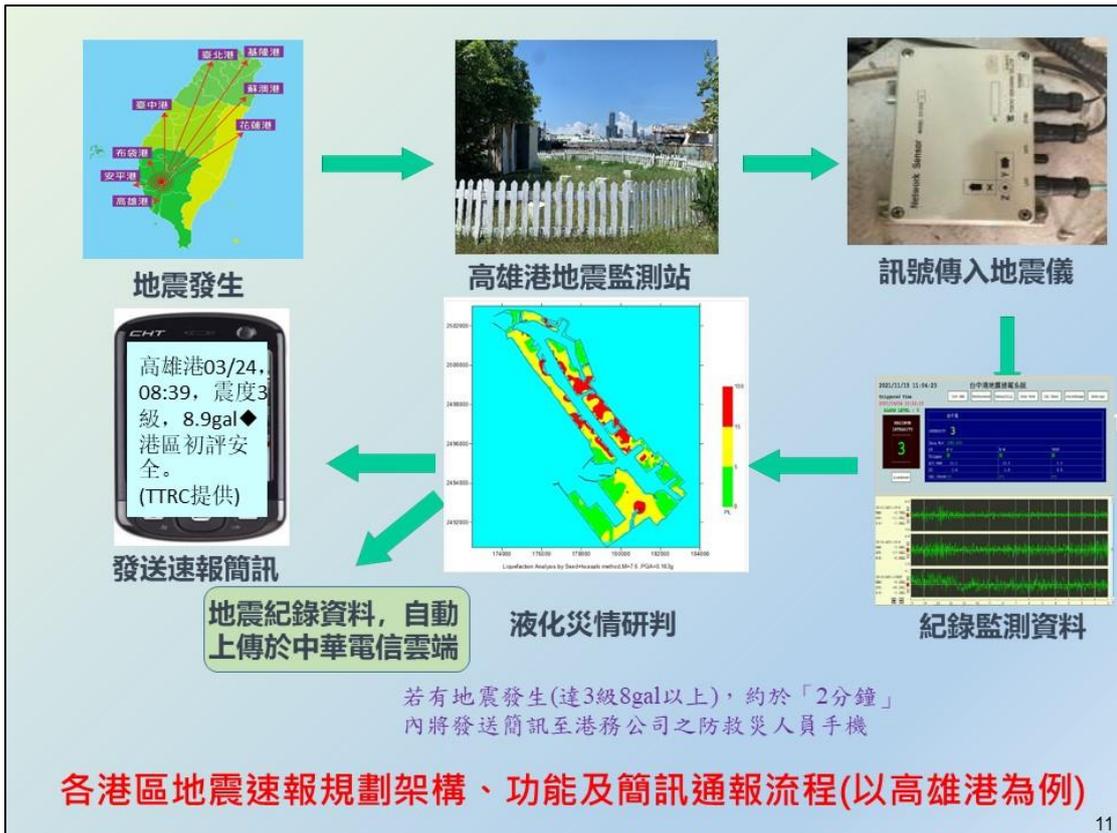
類別	姓名/職稱	主要工作內容
計畫主管	蔡立宏/主任 柯正龍/副主任 賴瑞應/科長	督導計畫執行
計畫主持人	曾文傑/副研究員	1.文獻蒐集、彙整 2.蒐集建立地質鑽探資料 3.探討液化潛勢評估分析，並推估液化風險與撰寫報告
研究人員	賴俊呈/助理研究員	協助蒐集資料與分析

9

工作流程圖



10



三、土壤液化文獻回顧及分析方法

12

土壤液化文獻回顧

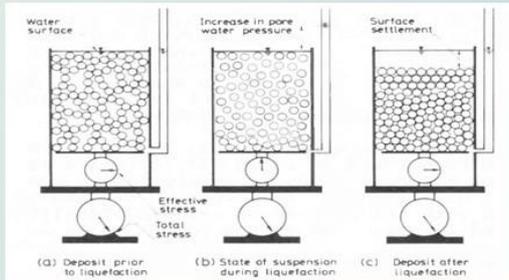
Principal of Effective Stress:

$$\sigma' = \sigma - u$$

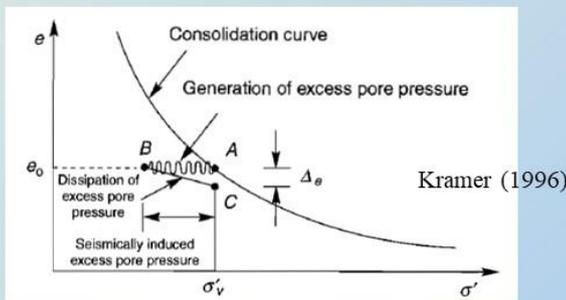
土壤液化

Key component: Pore Pressure Generation

土壤液化機制 Ishihara (1985)



2016年美濃地震台南民宅災損



土壤液化文獻回顧

88年 921集集地震台中港1至4A 號碼頭震害



土壤液化後作業區積砂狀況



碼頭法線偏移情形

土壤液化文獻回顧

20220323 臺東縣長濱鄉受生芮氏規模6.7的地震引發土壤液化現象



玉里大橋下小規模液化噴砂現象

玉里舊鐵橋北側，小規模液化裂隙與噴砂

資料來源:中央地質調查所20220323長濱地震地質調查報告

2024.04.03花蓮規模7.2地震花蓮港設施損壞情形



#25 碼頭下陷約50~70公分

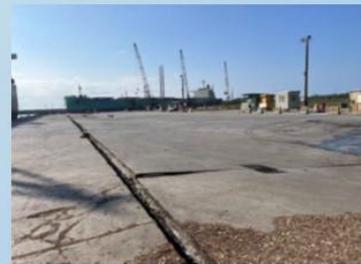


#20~#21碼頭背填
開裂約5~15公分

◆ 依據港務公司初步評估在
#24碼頭與#22碼頭背填部位
等處疑似有土壤液化現象
(後續需再現勘評估確認)



#19~#20碼頭背填開裂，
輸送帶基礎沉陷



#24碼頭背填開
裂約12~15公分

資料來源:港務公司提供

土壤液化文獻回顧

✓ 土壤液化潛能安全評估

- 土壤液化評估需考量實際土層之抗液化強度
- 且需考量地震發生之規模與各地實際發生之震度，依據建築設計規範，土層液化與否，由抗液化安全係數FL值決定之，其定義如下：

$$F_L = \frac{CRR}{CSR}$$

- 其中CRR為土層抗液化剪力強度比，可依各液化潛能評估方法進行計算，或以室內試驗方法進行求取
- 而CSR為地震引致土層之平均反覆剪應力比，依Ishihara(1993)之定義：

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \times \gamma_d$$

- A為尖峰水平地表加速度
- g為重力加速度
- σ_{v0} 與 σ_{v0}' 分別為垂直覆土總應力與有效應力
- γ_d 為深度折減因子

17

以SPT-N為指標之NCEER法 F_L 、深度、範圍

- 基於Seed et al. (1985)之基本架構。
- 歷經1997年與2001年兩個版本，採迴歸方式所得。
- 偏向保守側(中、高液化潛勢面積大)。

x為 $(N_1)_{60,cs}$

➤ Loading:

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \times \gamma_d$$

➤ Resistance:

$$CRR_{7.5} = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4}$$

$$\gamma_d = \frac{(1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2)}$$

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF$$

➤ FS: $F_L = \frac{CRR}{CSR}$

18

以SPT-N為指標之HBF法

F_L 、深度、範圍

- 基於Seed et al. (1985)之基本架構。
- 本土化之液化評估法(三百多筆集集地震案例)。

➤ Loading:

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \times \gamma_d$$

$$\gamma_d = \begin{cases} 1.0 - 0.01z & (z \leq 10m) \\ 1.2 - 0.03z & (10m < z \leq 20m) \end{cases}$$

➤ Resistance:

$$CRR_{7.5} = 0.08 + \frac{0.0035 \times (N_1)_{60cs}}{1 - (N_1)_{60cs} / 39}$$

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF$$

➤ FS: $F_L = \frac{CRR}{CSR}$

19

鑽孔液化機率PL加權說明

綜合Seed et al. (1985)分析資料庫與1984年後300筆資料

➤ 液化機率 PL (Cetin et al., 2004):

考量SPT-N值、地震規模、反覆剪應力比、覆土應力與細粒料含量

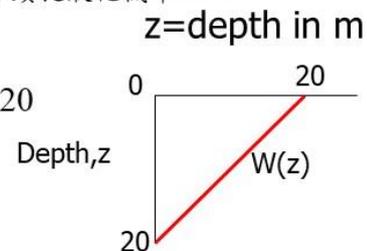
$$PL = \Phi\left(-\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR_{eq}) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right) + 0.05 \cdot FC + 16.85\right)}{2.70}\right) \quad 0\% \leq PL \leq 100\%$$

Φ : Standard cumulative normal distribution function

- 依Cetin法計算所得PL僅為單一深度結果。
- 參考Iwasaki(1982)以深度作為加權因子，計算鑽孔液化機率PL。

$$\text{鑽孔液化PL} = \frac{\int_0^{20} PL(z)w(z)dz}{\int_0^{20} w(z)dz} \quad 0 \leq z \leq 20$$

$$w(z) = 20 - z \quad 0 \leq w(z) \leq 20$$



20

Iwasaki 液化危害度分析指標

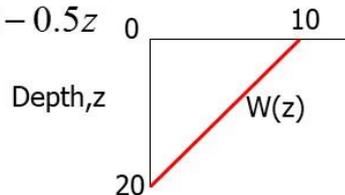
- Proposed by Iwasaki (1982), considering the thickness of liquefied area
- Liquefaction Potential Index, P_L

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad 0 \leq P_L \leq 100$$

$$z = \text{depth in m} \quad 0 \leq z \leq 20$$

$$F(z) = 1 - FS(z) \quad 0 \leq F(z) \leq 1$$

$$w(z) = 10 - 0.5z$$



各鑽孔液化危害度

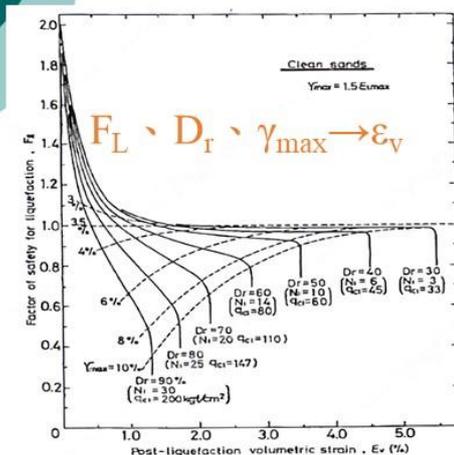
P_L	category
0	Very low risk
$0 < P_L \leq 5$	Low risk
$5 < P_L \leq 15$	High risk
$P_L > 15$	Very high risk

$P_L > 15 \rightarrow$ 嚴重液化

21

自由場受震後體積應變之沉陷量推估 (Ishihara and Yoshimine, 1992)

➤ 震陷量評估經驗圖 (需查圖)



✓ 震陷量推估流程:

1. 依據 SPT-N 值計算土層相對密度 D_r (%)，採 Meyerhof(1957) 提出之經驗公式：

$$D_r = 16 \sqrt{(N_1)_{78}} = 14 \sqrt{(N_1)_{60}}$$

2. 求得之抗液化安全係數 F_L 。
3. 計算地震力引致最大剪應變 γ_{max} ，採紀雲曜 (1997) 之迴歸方程式：

$$\gamma_{max} = 0.5 \times (0.5714 F_L - b_2 - \sqrt{(b_2 - 0.5714 F_L - 4b_1 b_2)}) / b_1 \leq 8\%$$

4. 計算分層體積應變 ϵ_v ，採採紀雲曜 (1997) 之迴歸方程式：

$$\epsilon_v = (-1.131 \times \log D_r + 2.347) \gamma_{max}$$

➔ 壓縮量 $S = \sum_{\text{layer}=1}^{20m} H_i \epsilon_{v,i}$

22

篩選前SPT鑽探資料分佈位置



資料來源	原始資料
地工資料庫 (深度至少達10m)	879孔
港務公司 鑽探報告	335孔
Total	1214孔

1. 相對缺乏SPT鑽探資料位置:

- 洲際一期貨櫃中心
- 洲際二期物流倉儲區
- 台灣國際造船公司
- 中國鋼鐵公司
(鄰近#94-#99碼頭)
- 台電大林發電廠
&
台灣中油公司

2. 高雄港洲際貨櫃中心第二期工程計畫...

25

資料篩選流程(1/3)



資料來源	原始資料
地工資料庫 (深度至少達10m)	713孔
港務公司 鑽探報告	329孔
Total	1042孔

• Criteria :

參考彭振聲等人(2018)鑽孔平面分佈採每平方公里達4孔為原則。

• Reference:

彭振聲等人(2018), 「HBF、NJRA、SEED、T&Y等四種土壤液化分析方法應用於臺北市之比較及探討」, 土木水利, Vol.45(4), pp.52-58。



26

資料篩選流程(2/3)

- Criteria :
參考彭振聲等人(2018)鑽孔平面
分佈採每平方公里達4孔為原則。

網格編號(Grid No)



網格內SPT鑽孔數量



27

資料篩選流程(3/3)

鑽探資料篩選條件表(彭振聲等, 2018)

項目	條件描述
深度	鑽孔深度需 > 15m, 才視為有效鑽孔參與分析
SPT-N	1. N 值須完備且間隔大致規律, 若漏缺則視情況酌予修復或遮除 2. 20 公尺深度內之 N 值必須都有值, 若有空值則該井錄將遮除 3. 若該井 30 公尺內最後一筆資料之 N 已大於 50, 則設定該深度至 30 公尺皆以最後一筆 N 值作為代表值
FC	沒有輸入 FC 值資訊的鑽孔視情況酌予修復 (依該深度上下相同土壤分類之數值予以填補) 或遮除
γ_t	1. γ_t 範圍超乎正常區間, 視情況酌予修復或遮除 2. 如 γ_t 為空值則內定 $\gamma_t = 1.8 \text{ t/m}^3$ 3. 如 $\gamma_t > 3 \text{ t/m}^3$ 者, 該井錄將遮除
USCS	1. USCS 分類欄位資料型態不合、漏缺、或明顯錯誤酌予修復或遮除 2. USCS 分類欄位漏缺部分, 以下列判斷式的予修復: • IF FC < 50 and N < 50 then USCS = "SM" • IF FC < 50 and N ≥ 50 then USCS = "GM" • IF FC ≥ 50 and PI < 7 then USCS = "ML" • IF FC ≥ 50 and PI > 7 then USCS = "CL"
PI	1. 配合 USCS 分類檢核 PI 值欄位是否合理或有漏缺 (人工判斷) 2. 檢核 PI 值未填被誤判成 0 或砂質土有高 PI 值等明顯錯誤
座標	以計畫為單位檢核該批鑽孔資料是否有 67-97 座標偏移 (人工判斷)
區位	1. 鑽孔非屬山區、臺地、水中之鑽孔 (人工判斷) 2. 由數值地形模型產製 6% 坡度圖以及 20 m 等高線, 用以檢核鑽孔位置是否屬於平原區域

- Rating → 單一鑽孔品質/重要性排序。
- 前期計畫(111年度)資料篩選條件：
 - 鑽探深度 ≥ 10m, 且高程大於 0。
(著重陸域SPT鑽探資料)
 - 避開棧橋式碼頭位置。
 - 具有座標資訊。
 - 具有FC值 (Silt + Clay, %)。
 - SPT值施作間隔為固定規律, 指定深度內皆有N值。
- 部分網格需進行人工評估與挑選。²⁸

採用之鑽孔資料位置與孔數



- Criteria : 參考彭振聲等人(2018)鑽孔平面分佈採每平方公里達4孔為原則。

資料來源	本計畫使用資料筆數
港研中心土工資料庫	713 孔 697 孔
港務公司鑽探報告	196 孔 189 孔
合計	886 孔

比對刪除“土工資料庫”重複、無鑽孔資料孔號與洲際二期物流倉儲區資料

液化評估程式

國震中心液化評估程式(需手動操作)

$$A = 0.4 S_{DS} g$$

$$A = 0.4 S_{MS} g$$

依據建築物耐震設計規範：液化評估應分別檢核 **中小度地震**、**設計地震** 與 **最大考量地震**

$$A = \frac{0.4 S_{DS}}{4.2} g$$

$$A = 0.4 S_{DS} g$$

$$A = 0.4 S_{MS} g$$

建構自動化分析程序



臺灣規範反應譜查詢介面(國家地震中心)

(<https://seaport.ncree.org/sederes/>)

31

高雄港輸入分析參數說明

地震規模

不同等級地震下各地區建議之土壤液化潛能評估地震規模

縣、市	中小震度之地震規模	設計震度之地震規模	最大考量震度之地震規模
基隆市、新北市、台北市、宜蘭縣市、花蓮縣市、台東縣市	7.1	7.3	7.5
桃園市、台中市、彰化縣市、南投縣市、雲林縣、嘉義縣市、台南市、高雄市	6.9	7.1	7.3
新竹縣市、苗栗縣市、屏東縣市	6.7	6.9	7.1
澎湖縣、金門地區、馬祖地區	6.5	6.7	6.9

分析地表加速度:

$$\text{中小地震: } A = \frac{0.4S_{DS}}{4.2} g \cong 0.05 g$$

$$\text{設計地震: } A = 0.4S_{DS} g = 0.20 g$$

$$\text{最大考量地震: } A = 0.4S_{MS} g = 0.28 g$$

2. 液化評估與檢核
土壤液化與否，由抗液化安全係數 F_L 值決定之。 F_L 值小於 1.0 時，即判定該土層為液化土層。 F_L 依下式計算：

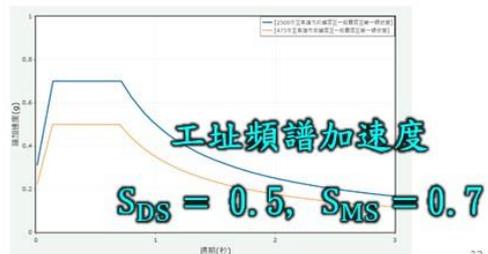
$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (11-1)$$

CRR：土層之抗液化剪力強度比。

CSR：地震引起土層之平均反覆剪應力比或尖峰剪應力比。

其中 CRR 與 CSR 之計算方法，可依據本條文之解說辦理。

3. 應分別檢核中小震地震(此時，一般工址與近斷層工址之地表水平加速度 $A = \frac{0.4S_{DS}}{4.2} g$ ，臺北盆地之地表加速度 $A = \frac{0.4S_{DS}}{3.5} g$)與設計地震(此時，地表加速度 $A = 0.4S_{DS} g$)。原則上僅針對用途係數 $I=1.5$ 之建築物，才須檢核最大考量地震(此時，地表加速度 $A = 0.4S_{MS} g$)作用時土壤發生液化之影響。



32

空間數值內插方法 (IDW法)

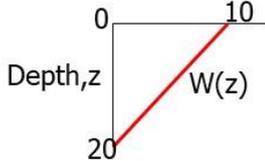
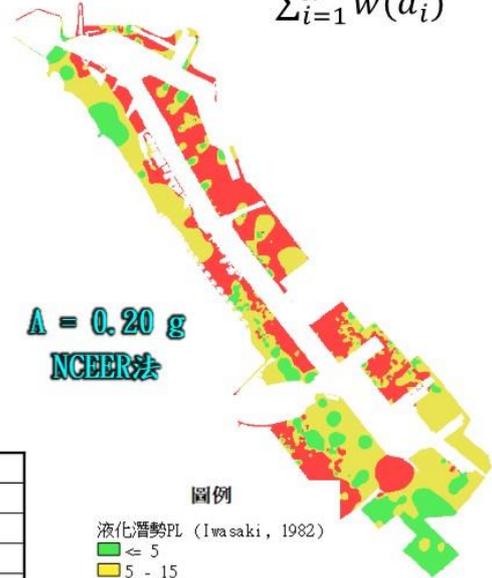
距離反比加權法(Inverse Distance Weighting, IDW)

→利用鄰近已知點的數值加權，推估目前位置的變數值。

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N w(d_i)z_i}{\sum_{i=1}^N w(d_i)}$$

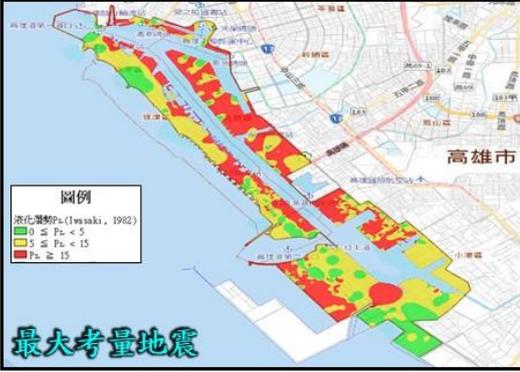
▶ 液化潛能 P_L 計算成果

Tag_Key	Project	PL	S	T	U	V
KH001	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	4.26	5.54		
KH002	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	0.49	0.48		
KH003	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	2.77	4.74		
KH004	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	1.56	3.57		
KH005	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	2.36	3.85		
KH006	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	1.91	3.56		
KH007	建於大空穴充填砂質黏土質地層工程	0.00	0.31	1.25		
KH008	海軍工作船停泊地地質調查工程	0.00	10.14	11.63		
KH009	海軍工作船停泊地地質調查工程	0.00	18.65	22.81		
KH012	海軍工作船停泊地地質調查工程	0.00	22.14	26.41		
KH016	海軍工作船停泊地地質調查工程	0.00	22.26	26.46		
KH017	海軍工作船停泊地地質調查工程	0.00	19.30	23.42		
KH022	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	13.86	17.15		
KH023	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	11.58	14.16		
KH024	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	5.58	7.24		
KH025	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	9.84	9.49		
KH026	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	22.65	26.21		
KH027	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	29.31	33.63		
KH028	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	2.81	3.14		
KH029	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	18.55	22.20		
KH030	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	32.56	34.16		
KH031	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	16.26	17.52		
KH032	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	31.85	35.66		
KH033	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	17.03	19.46		
KH034	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	24.40	27.58		
KH035	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	4.86	5.52		
KH036	高雄港第五貨櫃中心建築工程(第二階段地質調查)	0.00	3.78	5.52		



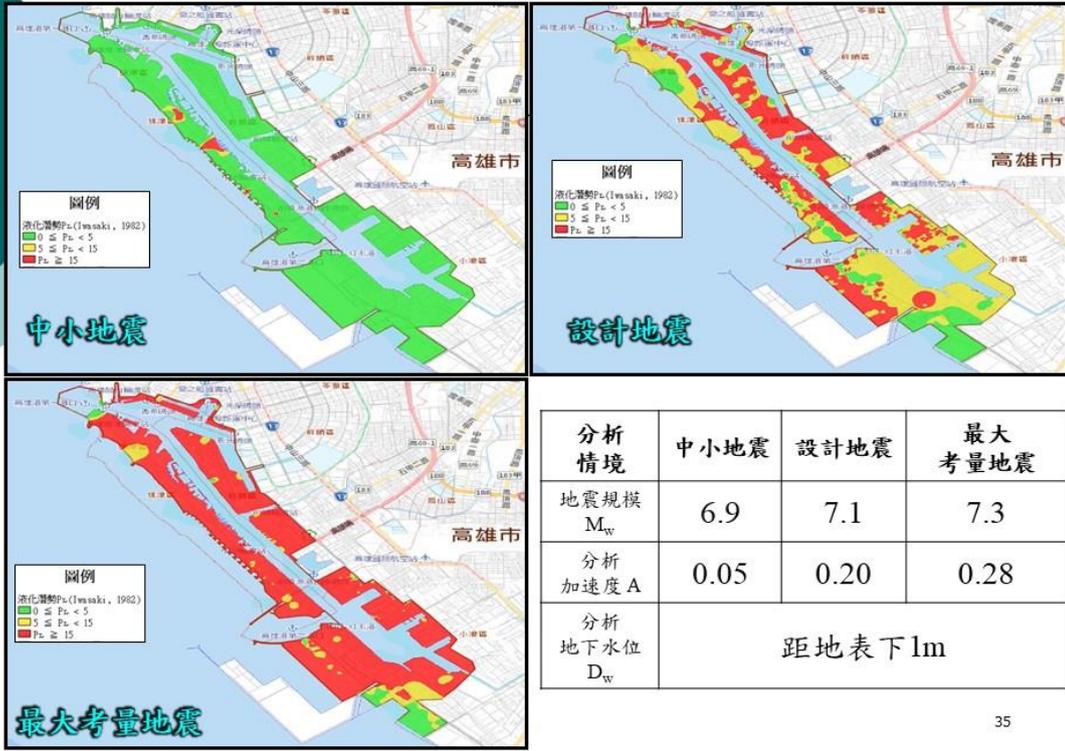
P_L	category
0	Very low risk
$0 < P_L \leq 5$	Low risk
$5 < P_L \leq 15$	High risk
$P_L > 15$	Very high risk

不同地震情境下液化潛勢比較(NCEER法)



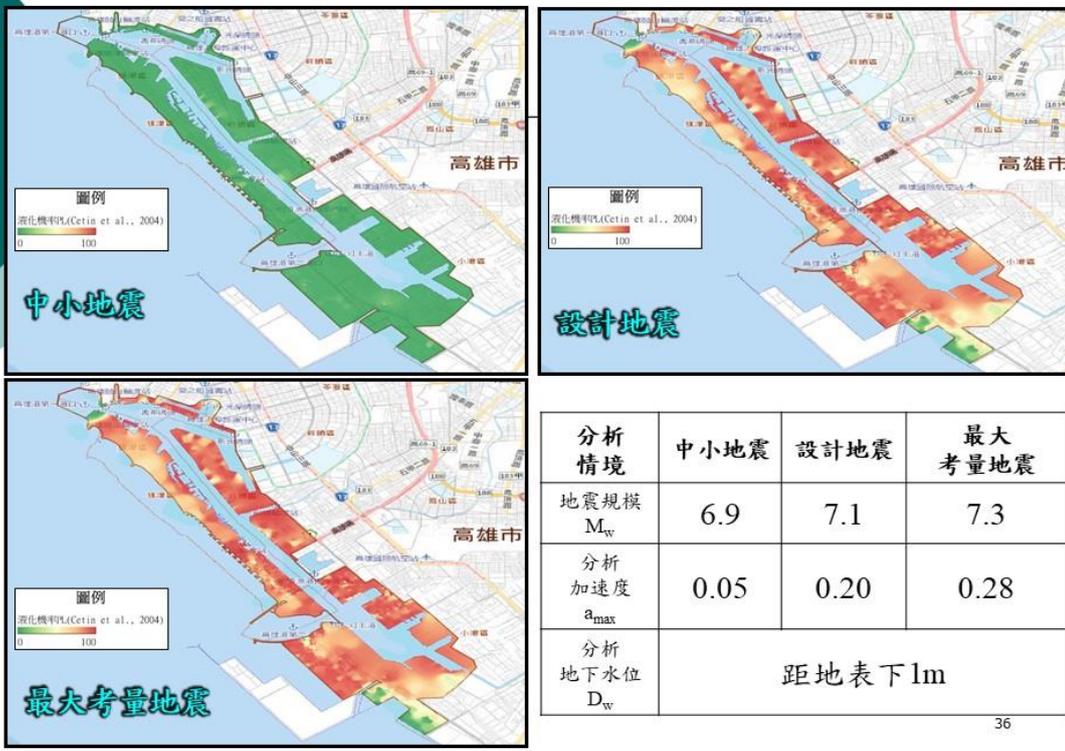
分析情境	中小地震	設計地震	最大考量地震
地震規模 M_w	6.9	7.1	7.3
分析加速度 A	0.05	0.20	0.28
分析地下水位 D_w	距地表下 1m		

不同地震情境下液化潛勢比較(HBF法)



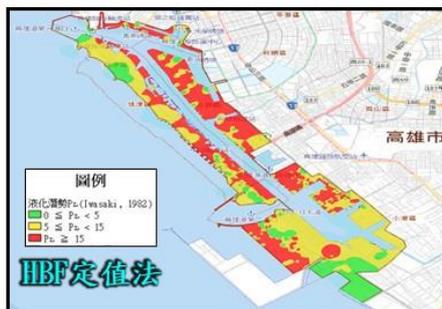
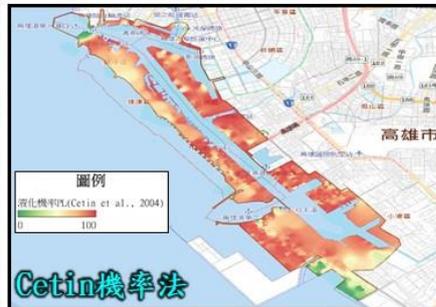
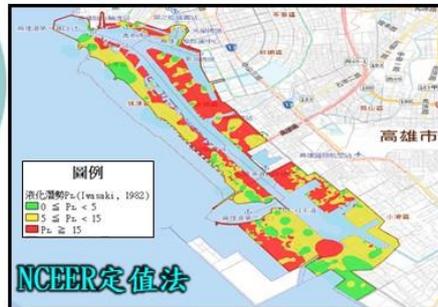
35

不同地震情境下液化機率PL比較(Cetin法)



36

定值法與機率法液化潛勢比較 (以設計地震情境進行探討)



分析情境	中小地震	設計地震	最大考量地震
地震規模 M_w	6.9	7.1	7.3
分析加速度 a_{max}	0.05	0.20	0.28
分析地下水位 D_w	距地表下 1m		

37

五、高雄港震陷潛勢分布

38

不同地震情境下震陷潛勢分布(NCEER法)



分析情境	中小地震	設計地震	最大考量地震
地震規模 M_w	6.9	7.1	7.3
分析加速度 A	0.05	0.20	0.28
分析地下水位 D_w	距地表下 1m		

39

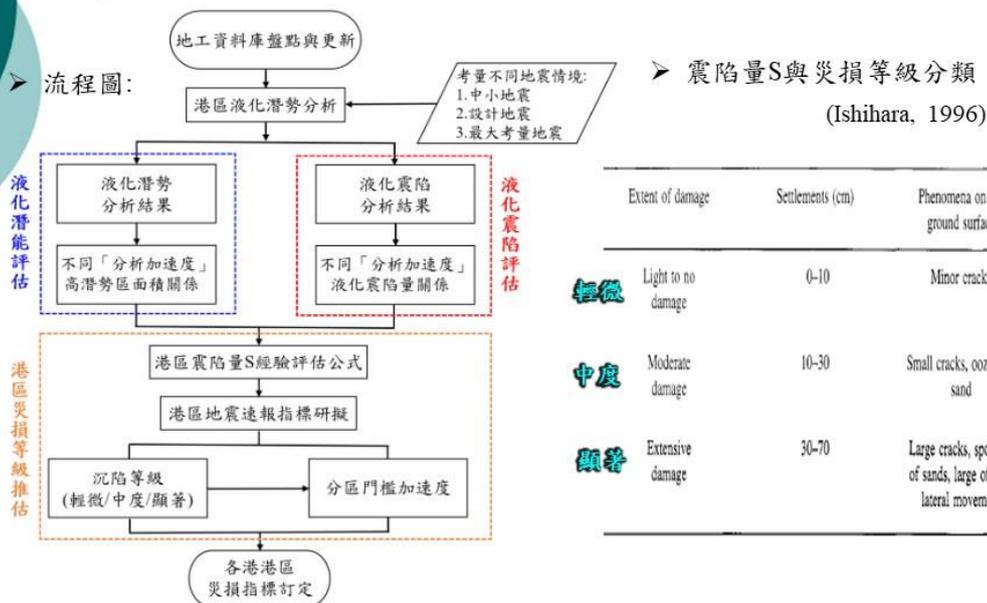
不同地震情境下震陷潛勢分布(HBF法)



分析情境	中小地震	設計地震	最大考量地震
地震規模 M_w	6.9	7.1	7.3
分析加速度 A	0.05	0.20	0.28
分析地下水位 D_w	距地表下 1m		

40

分區、門檻加速度、高潛勢區面積、震陷量推估 地震災損指標訂定流程圖



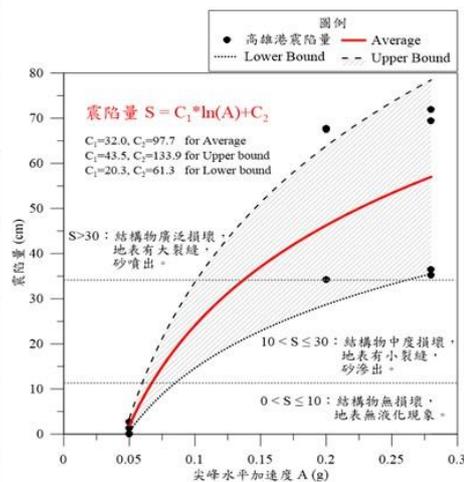
41

高雄港震陷量S經驗評估公式建立

➤ 不同地震情境評估震陷量範圍與分布占比

✓ 高雄港震陷量經驗公式：

簡易評估法	地震情境	地震規模 M_w	尖峰水平加速度 A (g)	震陷量範圍與港區分布面積占比		
				低	中	高
HBF法	中小地震	6.9	0.05	0~0.1 cm (99.4%)	0.1~0.2 cm (0.3%)	0.2 cm以上 (0.3%)
	設計地震	7.1	0.20	0~34.2 cm (35.8%)	34.2~67.5 cm (55.7%)	67.5 cm以上 (8.4%)
	最大考量地震	7.3	0.28	0~36.5 cm (16.3%)	36.5~71.9 cm (71.8%)	71.9 cm以上 (11.9%)
NCEER法	中小地震	6.9	0.05	0~1.3 cm (95.7%)	1.3~2.7 cm (2.5%)	2.7 cm以上 (1.8%)
	設計地震	7.1	0.20	0~34.3 cm (49.5%)	34.3~67.7 cm (43.7%)	67.7 cm以上 (6.8%)
	最大考量地震	7.3	0.28	0~35.2 cm (42.0%)	35.2~69.4 cm (51.0%)	69.4 cm以上 (7.0%)

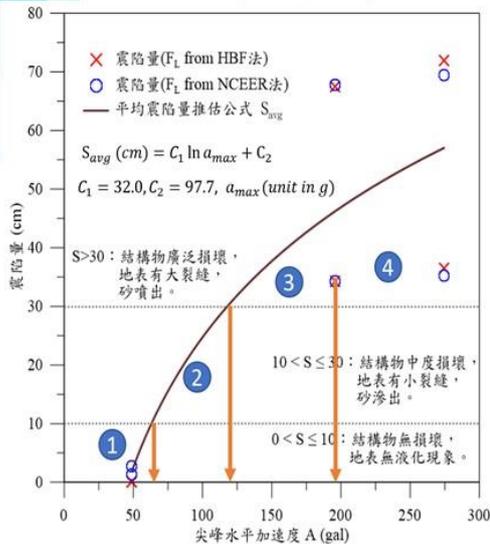


42

高雄港震後快速液化災損評估研擬成果

✓ 高雄港液化震陷評估成果:

PHASE:



- ① 0-65 gal,高雄港災況初評: 港區碼頭應該安全。(TIPC提供)
- ② 65-120 gal,高雄港災況初評: 6-7、27、40-43、49-51、56-59、66-69、76-77、118-119號碼頭，與洲際二期S01-S05地表可能有小裂縫，請派員巡查。(TIPC提供)
- ③ 120-196 gal,高雄港災況初評: 港區多座碼頭後線地表可能有較大面積之顯著裂縫，請派員巡查。(TIPC提供)
- ④ 196 gal以上,高雄港災況初評: 港區可能有全面性液化現象，應注意碼頭穩定與後線沉陷變化，請派員巡查。(TIPC提供)

43

六、結論與建議

44

➤ 結論：

- 彙整完成蒐集、建置高雄港地質鑽探資料，包括：運技中心地工資料庫879孔、港務公司鑽探報告335孔，共計1214孔，並盤點、篩選可用資料共886孔地質鑽探資料。
- 研究以HBF法與NCEER法進行高雄港液化潛勢分析，兩方法潛勢分布相近，惟HBF法液化潛能 P_L 較高。
- 比較定值法與機率法液化潛勢分析成果，在相同地震情境下，高風險位置相近，可提供評估災損位置參考。
- 設計地震與最大考量地震情境下，高雄港區自由場震陷量變化範圍約為0~100 cm。
- 以分區門檻加速度設定，計算對應震陷量，搭配高雄港現地地震監測站，可作為災損評估簡訊傳送內容之憑依。
- 依據中央氣象署所制訂新震度級數的計算流程，完成修改各港區8個監測站之既有地震即時速報軟體及更新布袋港之三向度網路型地表地震儀1臺。

➤ 建議：

- ✓ 評估建物地震受剪之沉陷量，需考量基礎、建物基地大小與樓板載重等因素，後續可持續往此方向精進。

45

