

113-017-7D56
MOTC-IOT-112- H1CA001f

港區地震液化風險評估模式 精進(2/5)-臺北港模式精進



交通部運輸研究所

中華民國 113 年 3 月

113-017-7D56
MOTC-IOT-112- H1CA001f

港區地震液化風險評估模式 精進(2/5)-臺北港模式精進

著 者：曾文傑、賴俊呈

交通部運輸研究所

中華民國 113 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. (2/5)：臺北港模式精進 / 曾文傑，賴俊呈著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運輸研究所，民 113.03
面；公分
ISBN 978-986-531-556-6(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

113001262

港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

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 113 年 3 月

印 刷 者：綠凌興業社

版(刷)次冊數：初版一刷 52 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：1011300165

ISBN：978-986-531-556-6(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(2/5)-臺北港模式精進

交通部運輸研究所

GPN : 1011300165

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(2/5)-臺北港模式精進			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-556-6 (平裝)	政府出版品統一編號 1011300165	運輸研究所出版品編號 113-017-7D56	計畫編號 MOTC-IOT-112-H1CA001f
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 參與人員： 聯絡電話：04-26587172 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 112 年 1 月 至 112 年 12 月
關鍵詞：土壤液化、液化潛勢評估、震後沉陷量			
摘要： 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。 本計畫前期(111 年度)已完成臺中港地震液化風險評估模式及分析，112 年度以臺北港為研究對象，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與機率液化潛勢評估法，包括以 SPT-N 為指標之 NCEER 法、國家地震工程研究中心 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及液化範圍、深度與港區沉陷值，並即時通知相關管理人員進行巡查與檢測。 研究成果效益與應用： 1.完成增加地工資料庫於臺北港之可用鑽探資料至 148 孔。 2.完成符合國內耐震設計規範之液化評估法，進行臺北港港區全面性液化潛勢評估。 3.完成推估臺北港港區不同等級地震發生之液化風險。 提供政府單位應用情形： 1. 提供臺北港港區地震安全評估相關資訊，做為臺灣港務公司及基隆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
113 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 (2/5)-Refinement of Taipei Port Model			
ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-531-556-6 (pbk)	1011300165	113-017-7D56	MOTC-IOT-112-H1CA001f
DIDIVISION: Transportation Technology Research Center DIDIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Chieh Tseng PROJECT STAFF: Chun-Cheng Lai PROJECT TECHNICIAN: PHONE: +886-4-26587172 FAX: +886-4-26564418			PROJECT PERIOD FROM January 2023 TO December 2023
KEY WORDS: SOIL LIQUEFACTION; LIQUEFACTION ANALYSIS; POST-LIQUEFACTION SETTLEMENT			
Abstract: 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. 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. Research Outcome Benefits and Applications: 1. Completion of the addition of geotechnical database usable drilling data to 148 boreholes at Taipei Port. 2. Completion of liquefaction potential assessment for Taipei Port's harbor area using methods compliant with domestic seismic design specifications. 3. Completion of estimating liquefaction risks in Taipei Port's harbor area for various levels of seismic activity. Government Agencies' Utilization Scenarios: 1. Providing seismic safety assessment information for Taipei Port's harbor area as a reference for engineering maintenance personnel of Taiwan Ports Corporation and Keelung 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.			
PUBLICATION DATE	NUMBER OF PAGES	PRICE	
Mar 2024	150	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(2/5)-臺北港模式精進

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 臺北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 以定值法進行臺北港液化潛勢分析.....	3-11
3.2.1 VBA 液化分析模組驗證.....	3-11
3.2.2 SPT-N 簡易評估法液化潛勢分析成果.....	3-14
3.3 Cetin 機率法分析成果.....	3-18
3.4 臺北港受震液化潛勢分析說明.....	3-21
第四章 臺北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 臺北港震陷量潛勢分布.....	4-5
4.3 不同分析加速度 a_{max} 之震陷量推估.....	4-9
第五章 震後快速液化災損評估訊息研擬.....	5-1
5.1 臺北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 高雄港地震速報精進.....	6-8
6.2.2 更新臺北港速報簡訊內容.....	6-10
6.2.3 地震速報資料介接.....	6-10
第七章 結論與建議.....	7-1
7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-3
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 112 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	2-2
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
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 臺北港整體規劃及未來發展 110 年現況圖	3-2
圖 3.2 臺北港鄰近區域液化潛勢圖資	3-3
圖 3.3 國家地震工程研究中心臺灣規範反應譜查詢介面	3-5
圖 3.4 地工資料庫臺北港港區 74 孔 SPT 鑽探位置圖	3-7
圖 3.5 臺北港港區不同來源之 SPT 鑽探資料分布情況	3-8
圖 3.6 臺北港港區分析範圍與 SPT 鑽探分布密度圖	3-11
圖 3.7 國家地震工程研究中心開發之 HBF 法液化評估程式	3-12
圖 3.8 VBA 液化分析模組成果驗證(1/3)	3-13
圖 3.9 VBA 液化分析模組成果驗證(2/3)	3-13
圖 3.10 VBA 液化分析模組成果驗證(3/3)	3-14

圖 3.11 中小地震下臺北港港區液化潛勢圖(HBF 法).....	3-15
圖 3.12 設計地震下臺北港港區液化潛勢圖(HBF 法).....	3-16
圖 3.13 最大考量地震下臺北港港區液化潛勢圖(HBF 法).....	3-16
圖 3.14 中小地震下臺北港港區液化潛勢圖(NCEER 法).....	3-17
圖 3.15 設計地震下臺北港港區液化潛勢圖(NCEER 法).....	3-17
圖 3.16 最大考量地震下臺北港港區液化潛勢圖(NCEER 法).....	3-18
圖 3.17 中小地震下臺北港港區液化機率分布圖(Cetin 法).....	3-19
圖 3.18 設計地震下臺北港港區液化機率分布圖(Cetin 法).....	3-20
圖 3.19 最大考量地震下臺北港港區液化機率分布圖(Cetin 法).....	3-20
圖 3.20 不同 SPT-N 簡易評估法於臺北港高潛勢區面積佔比差異 ..	3-22
圖 3.21 臺北港高潛勢區面積佔比與不同尖峰水平加速度關係	3-23
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 SPT 單孔震陷量計算成果(鑽孔名稱：TP040, NCEER 法)....	4-5
圖 4.3 中小地震下臺北港港區震陷潛勢圖(HBF 法).....	4-6
圖 4.4 設計地震下臺北港港區震陷潛勢圖(HBF 法).....	4-6
圖 4.5 最大考量地震下臺北港港區震陷潛勢圖(HBF 法).....	4-7
圖 4.6 中小地震下臺北港港區震陷潛勢圖(NCEER 法).....	4-7
圖 4.7 設計地震下臺北港港區震陷潛勢圖(NCEER 法).....	4-8
圖 4.8 最大考量地震下臺北港港區震陷潛勢圖(NCEER 法).....	4-8
圖 4.9 臺北港不同分析加速度 a_{max} 之震陷量 S 經驗評估公式	4-11
圖 5.1 臺北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 臺北港地震速報簡訊分階門檻加速度訂定說明.....	5-3

圖 5.4 中小地震下臺北港可能發生震陷位置示意圖.....	5-4
圖 5.5 設計地震下臺北港可能發生震陷位置示意圖.....	5-4
圖 6.1 高雄港舊地震儀(CV373 型)拆除示意圖.....	6-9
圖 6.2 高雄港 CV374 型地震儀更新安裝示意圖	6-9
圖 6.3 港區資料夾.....	6-11
圖 6.4 各港資料夾.....	6-11
圖 6.5 自動上傳地震檔案至雲端.....	6-12

表 目 錄

表 1-1 歷年(90-111 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	3-5
表 3-2 臺北港港區不同分析情境之地震規模與分析加速度	3-6
表 3-3 臺北港港區 SPT 鑽探資料來源與數量統計	3-7
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).....	3-9
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)....	3-10
表 3-6 臺北港不同 SPT-N 簡易評估法液化潛勢區佔比	3-22
表 4-1 震陷量 S 與沉陷等級分類	4-2
表 4-2 臺北港不同地震情境評估震陷量範圍與分布占比	4-10
表 5-1 臺北港地震速報簡訊內容一覽表	5-4
表 6-1 各港區 112 年傳送的地震速報簡訊統計表	6-7

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中央地質調查所（以下簡稱地調所）2021 年新發布之活動斷層分布圖^[2]（如圖 1.1），另地調所新增初鄉斷層、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 年度以臺中港為研究對象進行港區地震液化風險評估，以 311 筆更新之 SPT 鑽探資料做為分析資料庫，由 SPT-N 法分析液化潛勢成果顯示，當尖峰水平加速度(Peak Horizontal Acceleration, PHA)

達 0.28 g 時，臺中港港區陸域約有 80%面積處於高潛勢區，而最大考量地震時(PHA=0.36g)，則高潛勢區面積占比達 90%以上。

本(112)年度蒐集臺北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。

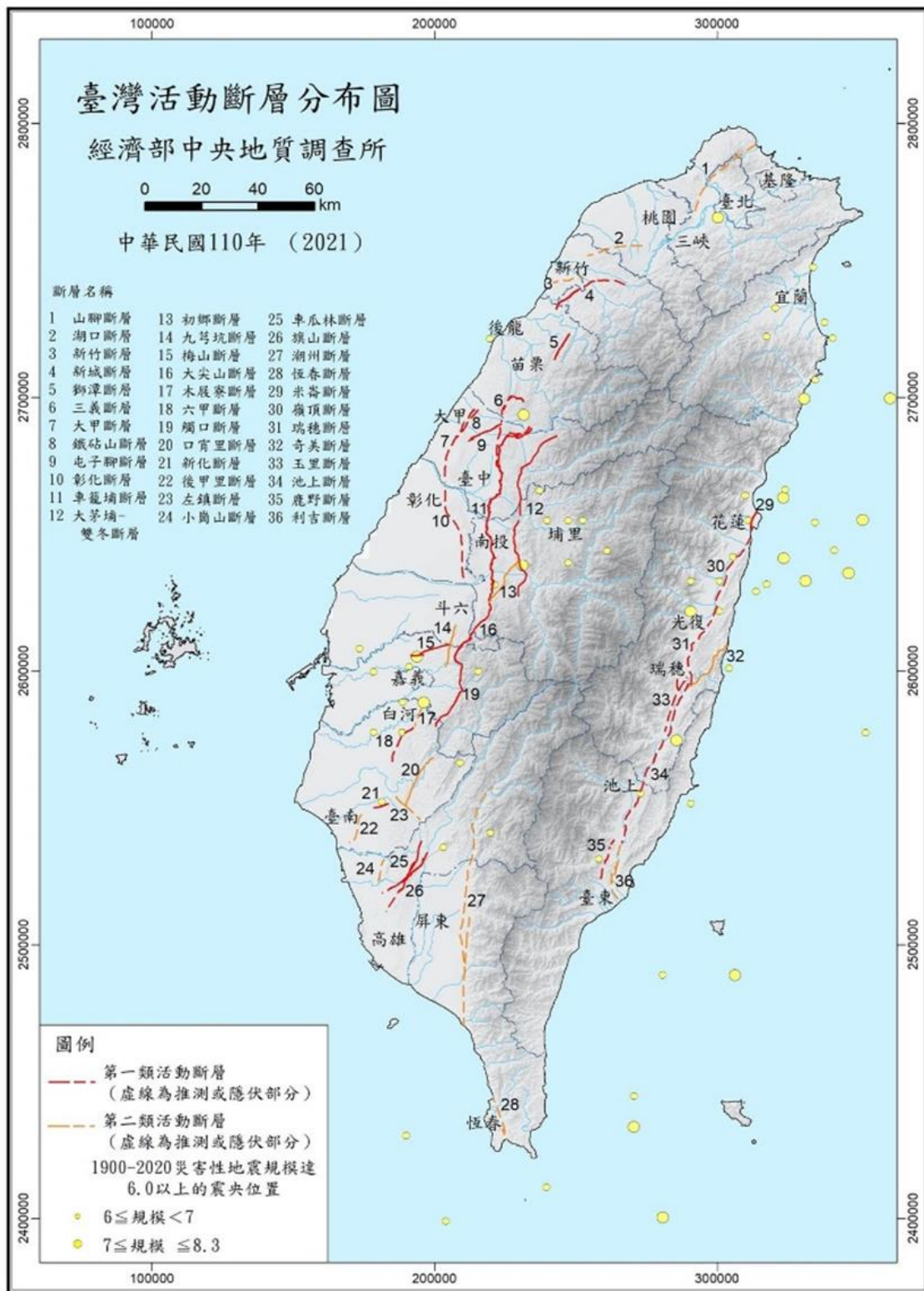


圖 1.1 2021 年版臺灣活動斷層分布圖⁽²⁾

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，針對臺北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，提供港務公司及基隆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、建立臺北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，瞭解臺北港港區不同等級地震發生之液化風險。

1.3 研究方法

本計畫針對臺北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^[3] 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。

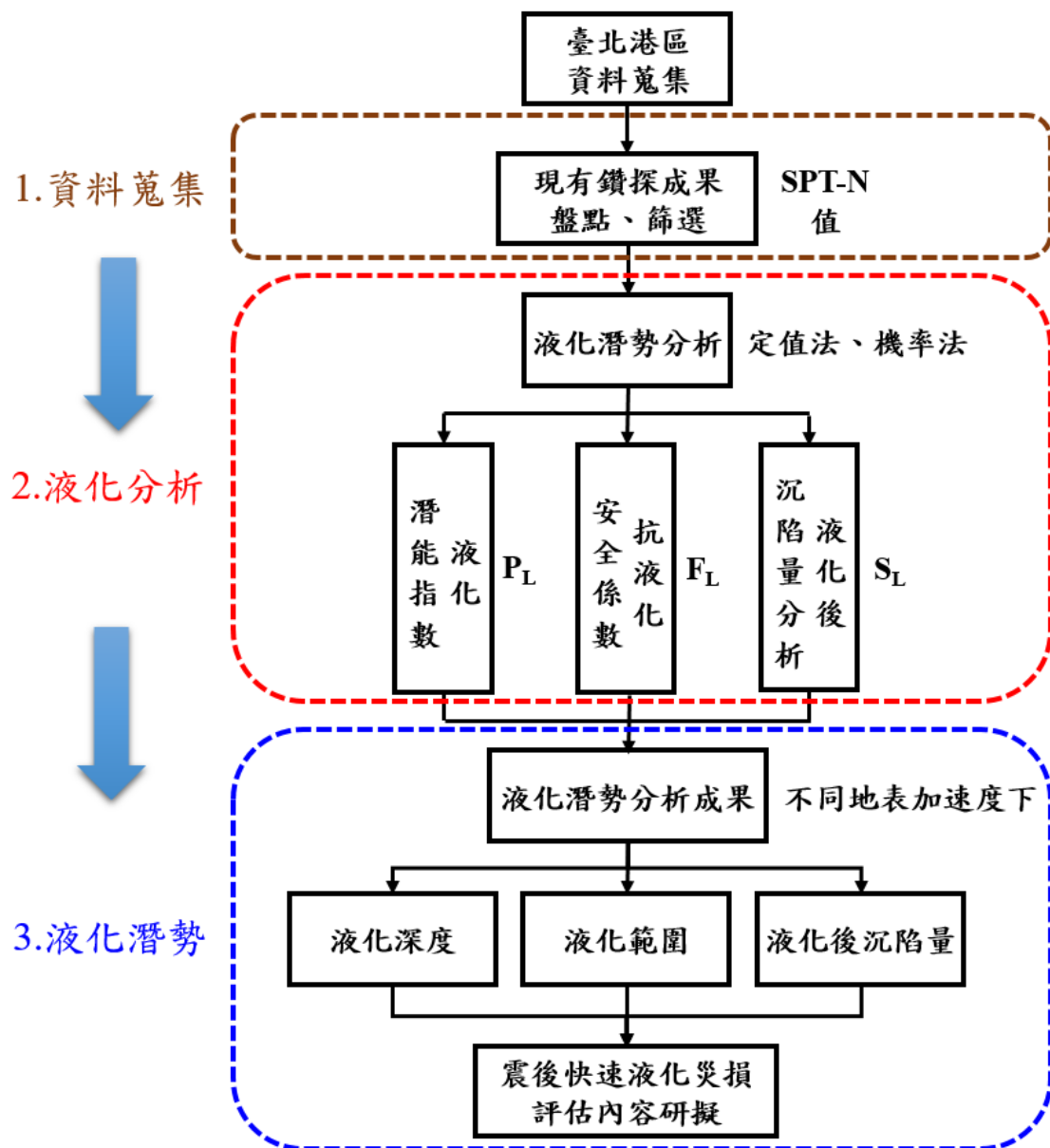


圖 1.2 研究流程圖

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，以供後續探討臺北港液化潛勢評估分析應用。

2. 蒐集與研析相關資料

訪談港務公司基隆港務分公司，蒐集近年來臺北港港區新建工程地質鑽探資料，予以彙整研析，以供後續於推估臺北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，以提供後續臺北港港區地震液化潛勢評估分析之應用。

4. 推估臺北港港區液化風險

以臺北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，進而推估臺北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) 完成臺北港港區新建工程地質鑽探資料蒐集與擴充。
- (2) 完成臺北港港區液化潛勢評估分析。
- (3) 完成推估臺北港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

2.應用

(1)提供臺北港港區地震安全評估相關資訊，可做為港務公司及基隆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系統。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(90-111)地震監測成果發展歷程，簡述如表 1-1 所示。

表 1-1 歷年(90-111 年) 地震監測發展歷程

年度	研究重要歷程	成果效益
90-97	● 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。	● 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

		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 $A_{max}=0.07g$。 ● 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	● 98-99 年臺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	● 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	● 108-110 年港區震	● 維護各港區地表地震災況速報系統

	災速報系統維護及地層下陷調查分析研究。	(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。 ● 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	● 港區地震液化風險評估模式精進(1/5)-臺中港模式精進。	● 完成臺中港 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 135 孔，港務公司鑽探報告可用資料為 155 孔，地調所之地質資料庫可用 21 孔，共計 311 孔鑽探資料。 ● 研究以 HBF 法與 NCEER 法進行臺中港液化潛勢分析，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 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。 ● 本研究採用 Ishihara and Yoshimine (1992)自由場震陷評估方法，進行臺

		中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 0~1 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 (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)。 ● 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，成果可供不同加速度於臺中港簡易分區災損評估簡訊傳送內容之依據。 ● 維護各港區地表地震災況速報系統(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。 ● 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。
--	--	--

第二章 文獻回顧

臺灣四面臨海，港口為國家重要物資進出通道，又身處歐亞板塊交界，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，當地震來時容易產生土壤液化，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，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)^[5]，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

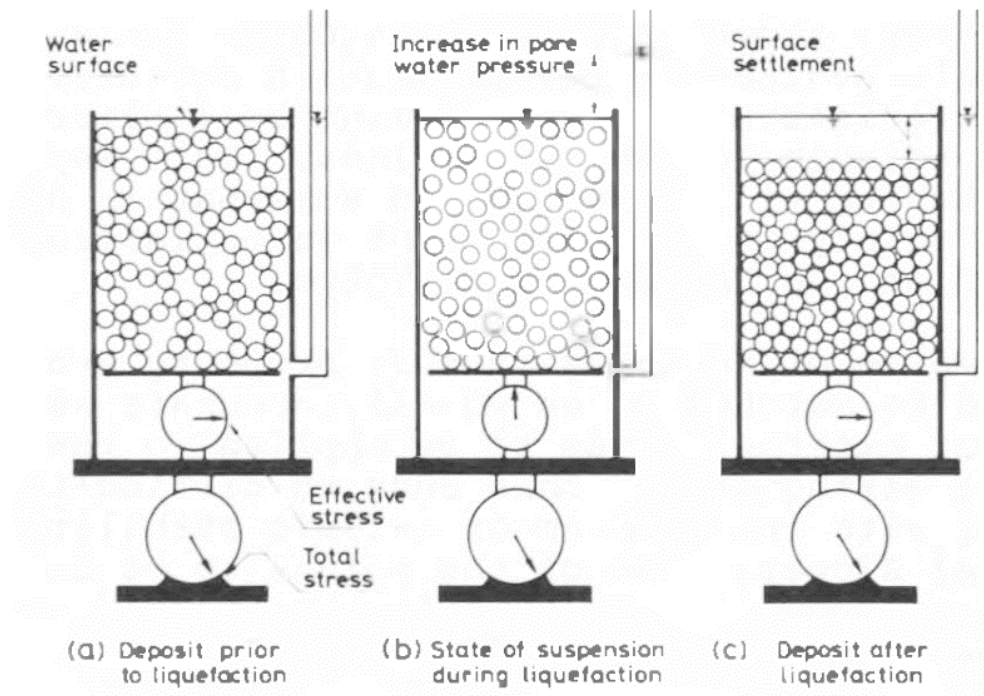


圖 2.1 液化致使土壤顆粒沉積狀態改變示意圖^[24]



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]

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 年新潟地震案例，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。

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，其上方覆蓋的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，其定義如下：

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

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：

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

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 $\text{CRR}_{7.5}$ 係為乾淨砂之抗液化剪力強度比，其公式如式 2.4：

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

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。

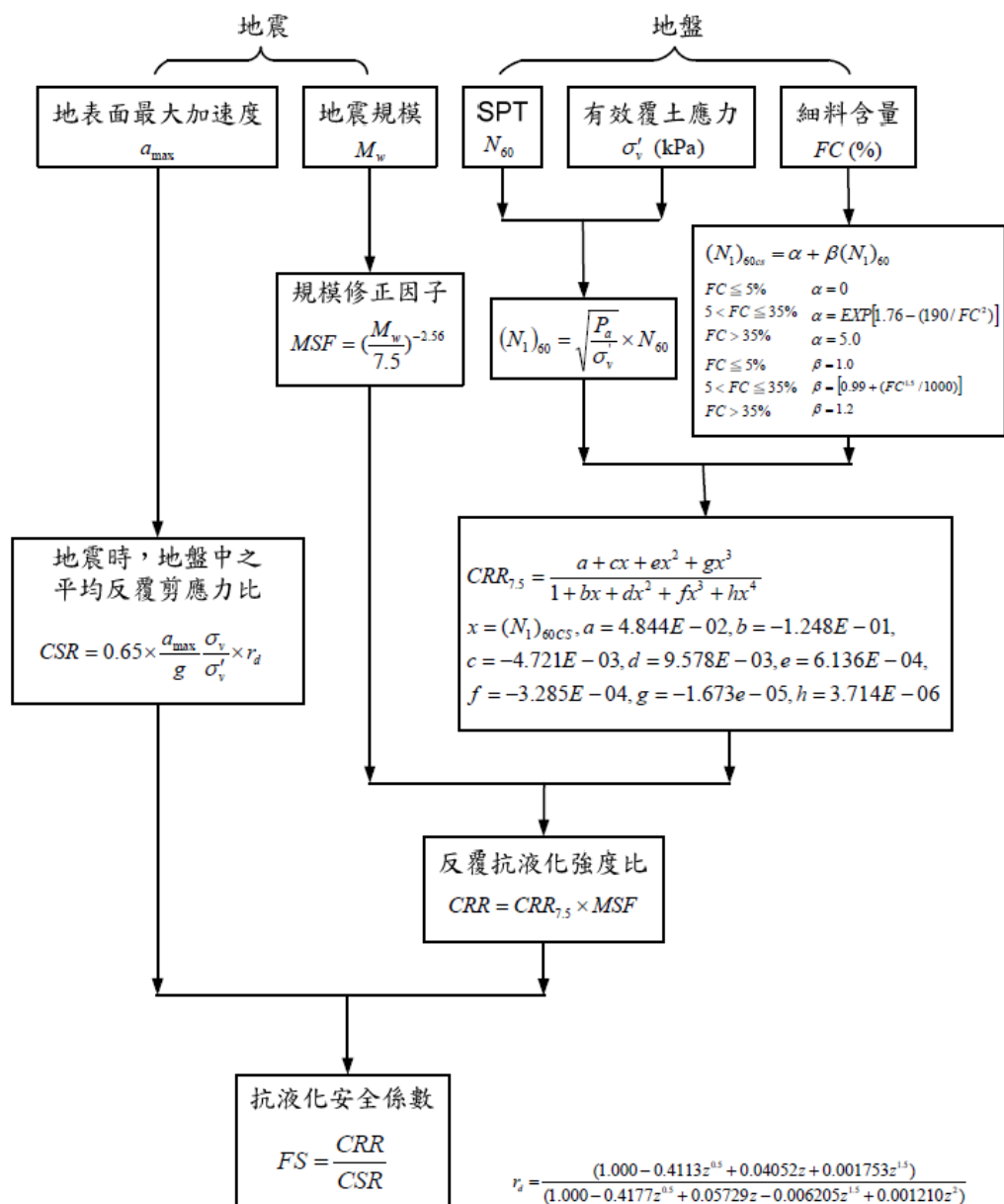


圖 2.4 NCEER 法(2001)液化評估法之計算流程圖^[21]

2. HBF 法

本方法係參考 Seed et al. (1985)^[34]發展簡易評估法之基本架構，利用地震時現地土壤發生液化與非液化之案例資料，用以界定土壤之抗液化強度。發展 HBF 評估法所用案例資料，除包含世界各國案例三百多筆(Cetin et al., 2000)^[36]外，更增加國內 1999 年集集地震案例三百多筆，迴歸分析時，採用雙曲線函數(hyperbolic

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)^[3]。

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。

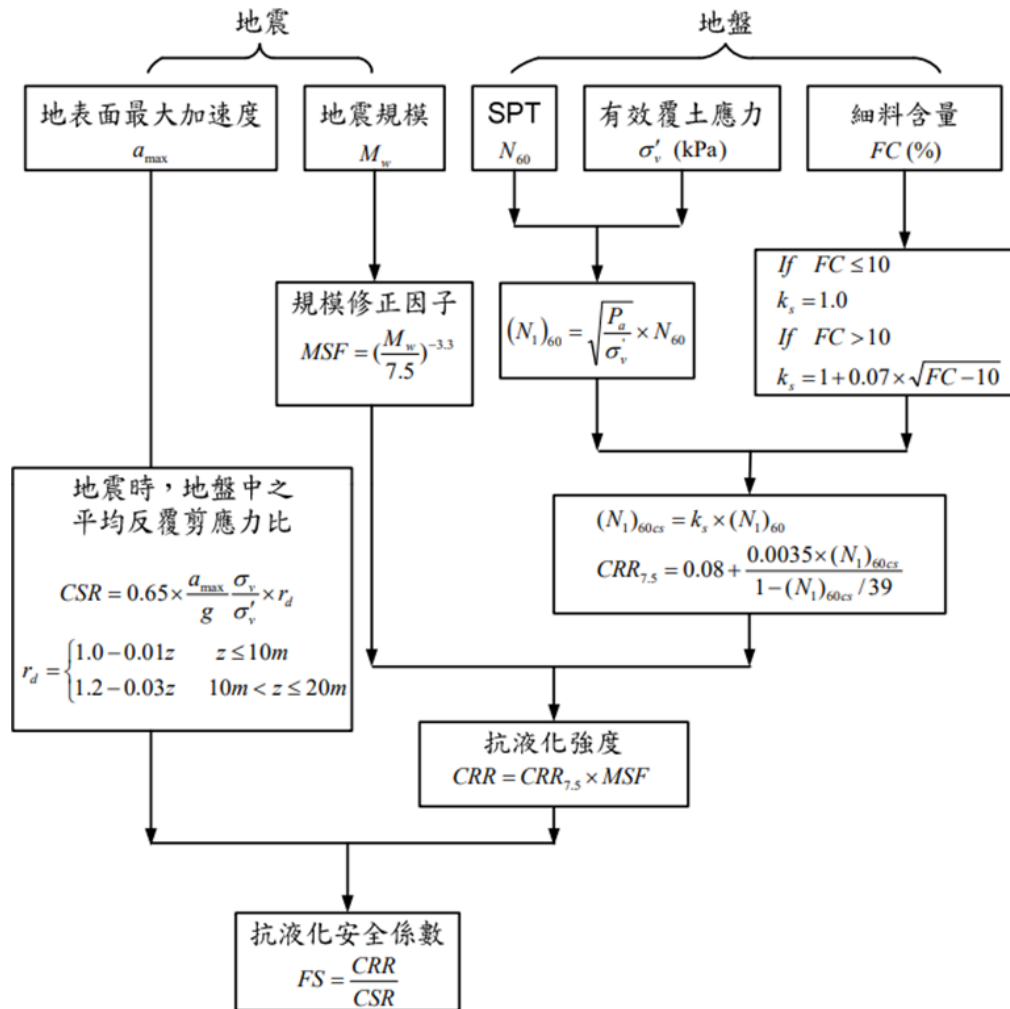


圖 2.5 雙曲線函數(HBF)液化評估法之計算流程圖^[36]

3. Tokimatsu 與 Yoshimi 簡易經驗法

本法為東京工業大學 Tokimatsu 與 Yoshimi 教授於 1983 年根據日本過去 10 次地震約 70 個地區案例，與世界各國約 20 個發生液化與非液化地區案例所提出，此法略經修改後，已納入日本建築學會與原子能委會之設計規範中。本簡易經驗法於土壤抗液化強度評估上，主要依據現地冰凍法取得之不擾動試體土樣與傳統試體土樣，進行試驗室反覆三軸試驗，求出砂性土壤於不同相對密度

($Dr=50\sim85\%$)，在反覆振動作用 15 次下，產生雙向剪應變振幅分別為 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 作為代表符號，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：

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

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：

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

其中 Φ^{-1} 為常態累積分布之反函數，需考量式 4.6 計算之液化機率 PL，相較於 NCEER 法與 HBF 法，式 4.7 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($P_L > 15$)，作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 系統與地調所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。

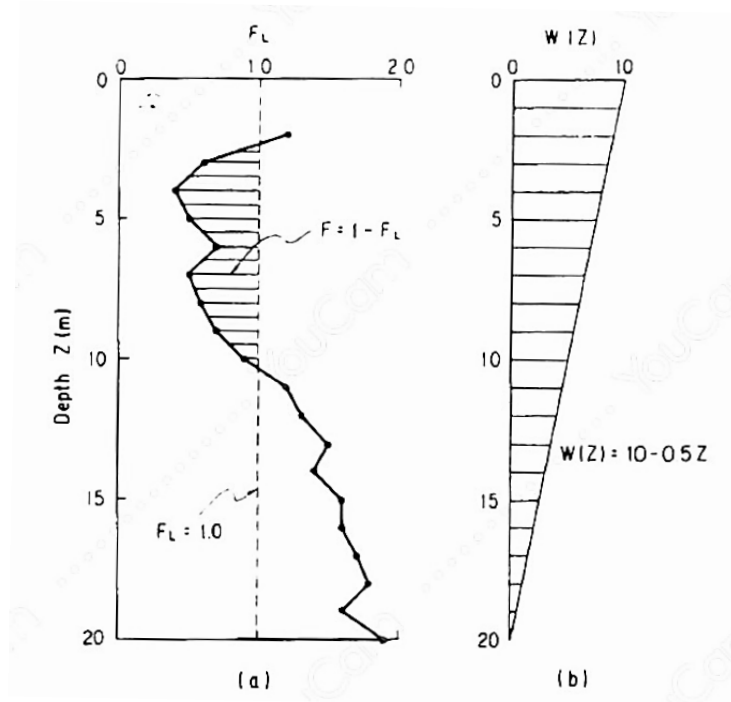


圖 2.6 液化潛能指數 PL 計算說明^[25]

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。

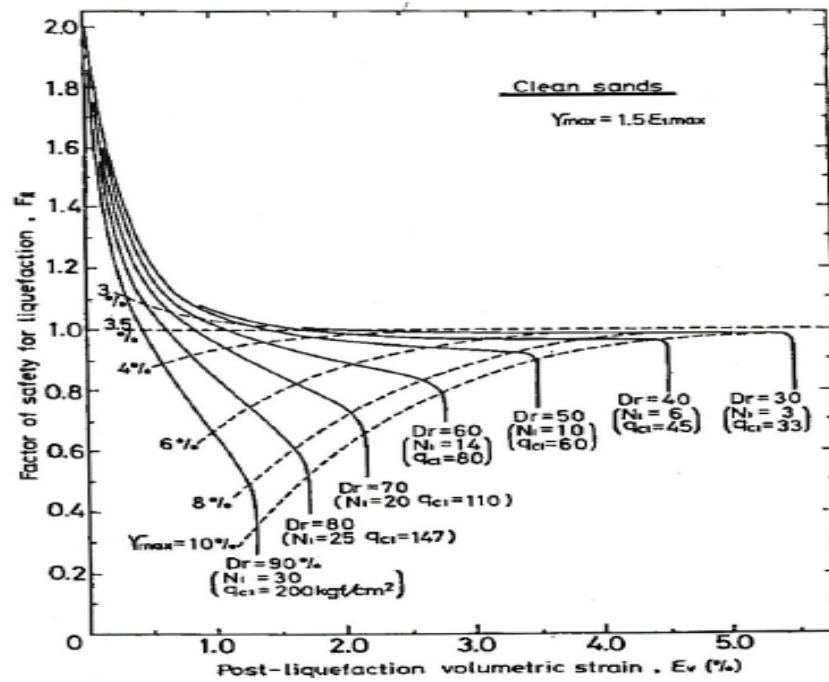
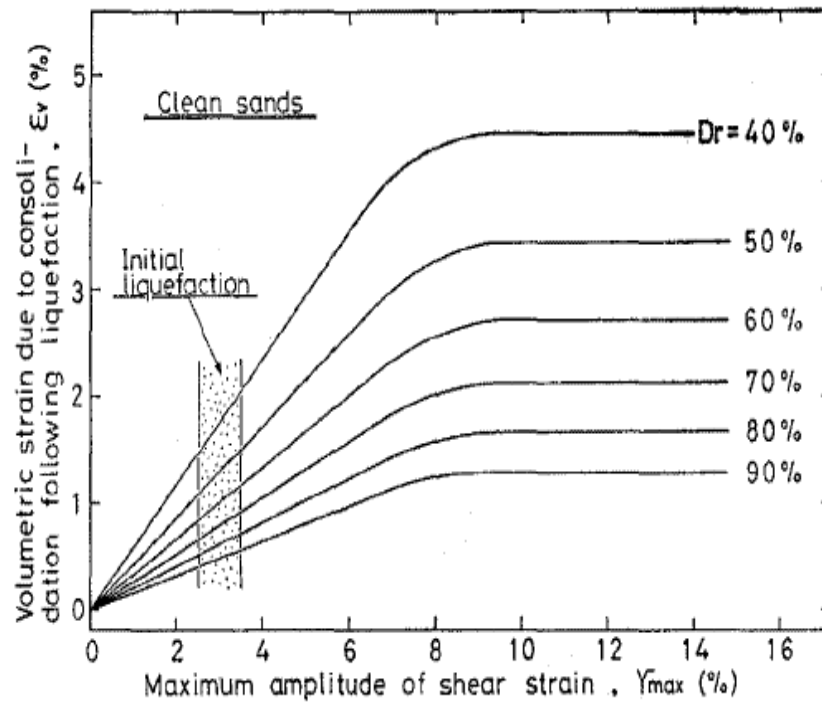


圖 2.7 液化後體積應變、最大剪應變與抗液化安全係數關係^[37]

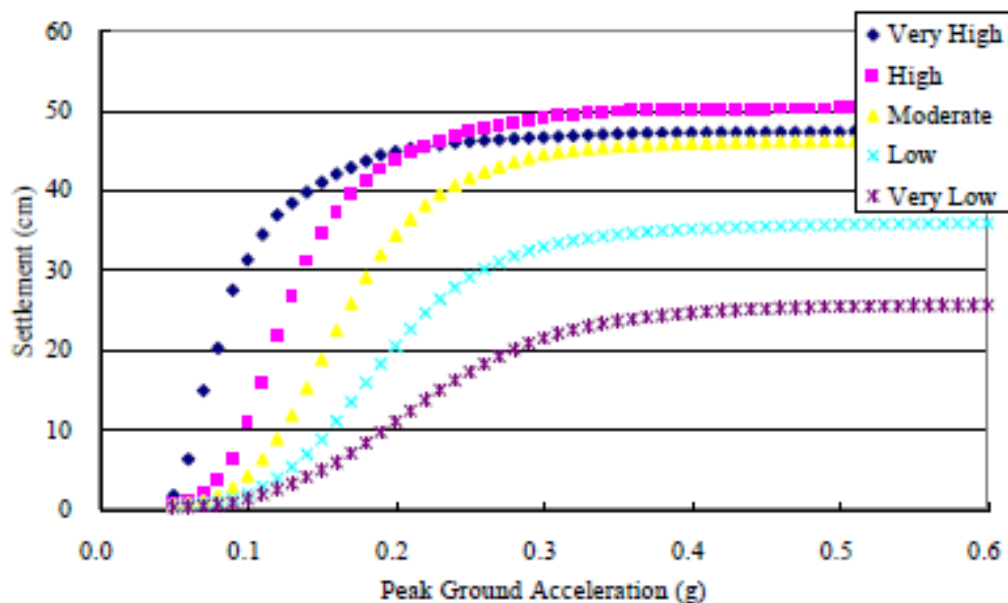


圖 2.8 不同液化敏感類別液化後沉陷量隨 PGA 之變化情形^[10]

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]

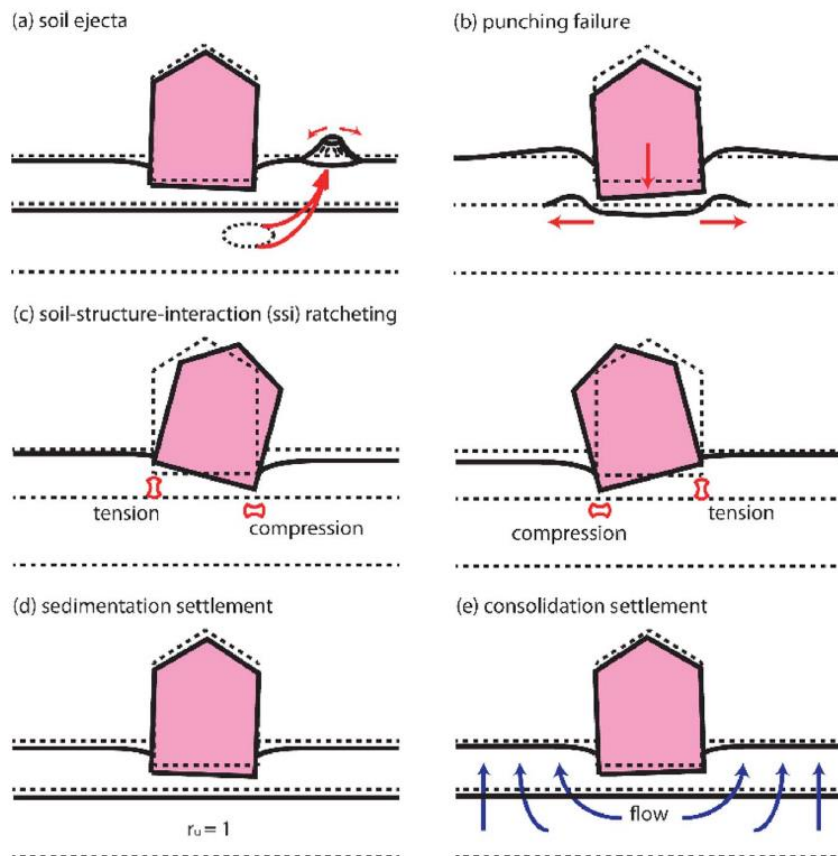


圖 2.10 液化後引致建築物位移機制示意圖 [21]

第三章 臺北港港區液化潛勢分析

臺北港屬新北市八里區訊塘村濱海地區，位處於淡水河入海口西南岸，港區總面積為 3,091 公頃，水域面積 2,632 公頃，陸地面積 459 公頃(如圖 3.1 所示)。對外交通目前以聯外道路與中山路及省道台 15 線相連接，往南接西部濱海快速道路，可直達苗栗、臺中，往北可連接八里、淡水、五股地區道路及國道 1 號高速公路，或經關渡大橋跨河至淡水、北投等地，構成綿密優良路網。

臺北港附近地層除抽砂回填層之外，上層為現代沖積層，其下為更新世大南灣層。現代沖積層主要由泥、粉土、砂及礫石組成，主要分布於臺灣海峽沿岸及紅水仙溪河古。大南灣層為一平緩海象沉積岩層，出露於林口臺地西北側，主要由細粒砂岩、粉砂岩、頁岩和泥岩互層所組成，於岩層中常夾有礫石凸鏡體或不規則團塊，岩層厚度約數十公分至數公尺之間，層面發育不佳；新鮮露頭呈淡灰色至淡青灰色，岩層膠結差，易碎裂且顆粒易分離為砂、粉砂及泥土。本區地層屬於第四紀，地質構造較單純，地層位態皆十分平緩或彼此以不整合接觸，依林口地區地質圖所切剖面，可發現大南灣層之下為觀音山層，主要由砂岩及泥岩互層所組層，上部夾礫岩層，距離本基地最近的斷層為金山—新莊斷層，位於基地東南側約 8 公里。

若鄰近斷層發生錯動，對於臺北港此類疏鬆軟弱之沖積土層及水力抽砂回填之海埔新生地，極易產生液化災害，如 1999 年 921 地震時，臺中港區量測到最大 PGA 約為 0.16 g，其中以 1 至 4A 碼頭受損最為嚴重，沉箱碼頭最大外移 1.7 m，道路因液化發生噴砂，導致鋪面崩裂與凹陷等災害，本所運技中心(1999)^[2]依調查指出結果嚴重破壞區域多為水力回填區。而曾發生液化地區，若無妥善之地盤改良或合適之基礎型式，在面臨顯著地震事件時，則容易再次產生液化現象，屬高風險地區(Chang et al., 2011;吳毓泰，2017；羅宇軒等人，2020)^[11]。

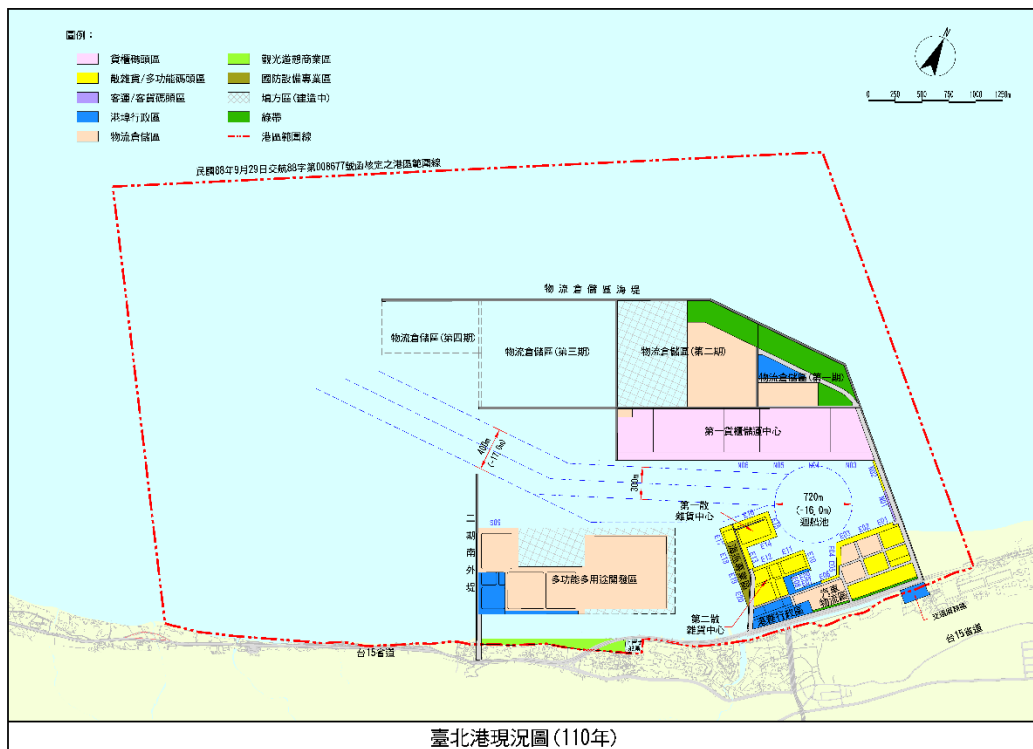


圖 3.1 臺北港整體規劃及未來發展 110 年現況圖(港務公司提供)

近年因 2016 年 2 月 6 日美濃地震造成臺南地區嚴重土壤液化災情，立法院於同年 4 月 13 日修正公布災害防救法第 2 條，明定土壤液化為天然災害範圍，賦予法源依據，土壤液化潛勢依據土質鑽探孔的密度，大致可分為「初級」、「中級」與「高級」三個層次。初級圖資主要作為大面積國土規劃、重大公共工程選址參考，但不得直接引用於工程規劃或設計，其比例尺約為 25,000 分之一；中級精度之土壤液化潛勢圖資，則作為都市防災、都市更新規劃的應用，比例尺約為 3,000 分之一；高級精度則視開發單位需求，依規範進行細部地質探查與評估，供設計分析使用。液化潛勢等級可分為三個潛勢等級：低潛勢(綠色)代表地基可能無影響或者輕微影響、中潛勢(黃色)代表地基可能有輕微至中度影響、高潛勢(紅色)代表地基可能有中度至嚴重影響。

圖 3.2 為地調所公布鄰近臺北港之土壤液化潛勢圖資，可發現臺北港區並無相關分析資料，對於臺北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，建構臺北港完整液化潛勢分析成果，以作為第五章震後快速液化災損評估訊息研擬之依據，以下就臺北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：

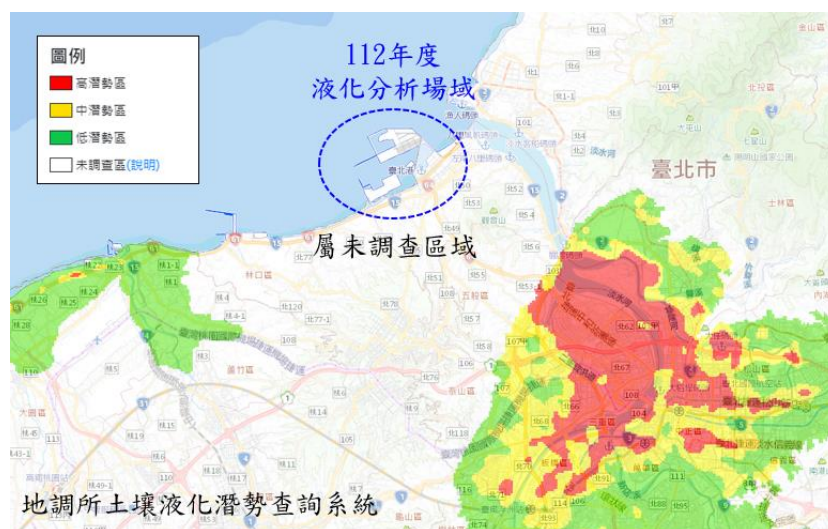


圖 3.2 臺北港鄰近區域液化潛勢圖資(改繪自地調所)

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)^[3]、NCEER 法(Youd et al., 2001)^[21]與日本道路協會法(JRA, 1996)^[7]，本研究係以 HBF 法與 NCEER 法進行定值法液化分析，另外以 Cetin 機率法進行臺北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，建議使用之地震規模 M_w ，臺北港位處新北市，因此後續分析中，分別以 7.1、7.3 與 7.5，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 2.2 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)，後續分析中主要以新北市八里區之震區水平譜加速度係數進行液化分析，後續分析中之尖峰水平地表加速度 a_{max} ，分別以 0.06 g、0.24 g 與 0.32 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。

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

TaiwanBuildingCode

Alpha Version 1.0 = 臺灣地區工址水平加速度反應譜查詢 = NAR Labs 國家實驗研究院 國家地震工程研究中心

Step1: 決定震區水平譜加速度係數

選擇工址位置
 縣市: 新北市 | 鄉鎮市區: 八里區 | 里: 訊塘里

震區水平譜加速度係數
 設計地震力 (回歸期475年): S_D^D N.C., S_1^D N.C.
 最大考量地震力 (回歸期2500年): S_S^M N.C., S_1^M N.C.

Step2: 決定近斷層調整因子

選擇近斷層
 鄰近之第一類活動斷層: []
 請於左表點選欲分析之斷層名稱，並輸入工址與斷層之間最短距離: [] 公里 [查詢]

近斷層調整因子
 設計地震力 (回歸期475年): N_A N.C., N_V N.C.
 最大考量地震力 (回歸期2500年): N_A N.C., N_V N.C.

Step3: 決定工址放大係數

選擇地盤分類
 工址地盤分類: 臺北盆地微分區-臺北2區
 (若不知請輸入土層平均剪力波速 V_{s30} [] m/s)

工址放大係數
 設計地震力 (回歸期475年): F_a N.C., F_v N.C.
 最大考量地震力 (回歸期2500年): F_a N.C., F_v N.C.

Step4: 計算工址水平譜加速度係數

工址水平譜加速度係數
 設計地震力 (回歸期475年): S_{DS} 0.6, S_{D1} 0.78, T_0^D 1.3
 最大考量地震力 (回歸期2500年): S_{MS} 0.8, S_{M1} 1.04, T_0^M 1.3

Step5: 繪製反應譜圖

加速度反應譜圖
 選取耐震設計目標: ☒ 設計地震力, ☐ 最大考量地震力
 選擇反應譜圖型: [圖型選擇]
 設定座標屬性: 週期間距: 0.01, X-linear, Y-linear, 圖型不重疊

繪製反應譜, 清除全部反應譜, 儲存反應譜數值, 儲存反應譜圖, 放大圖型查詢

1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Spectral Acceleration, S_a (g)

工址頻譜加速度
 $S_{DS} = 0.6, S_{MS} = 0.8$

Period, T (sec.)
0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 4

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 臺北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	7.1	7.3	7.5
分析 加速度 a_{max}	0.06	0.24	0.32

運技中心地工資料庫之 SPT 鑽探資料數量為 72 孔(如圖 3.4)^[13]，為完整進行臺北港港區土壤液化安全評估，本計畫彙整港務公司提供之歷年工程相關鑽探資料 152 孔，為進行土壤液化分析，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。

經過相關 SPT 鑽探資料篩選，運技中心之地工資料庫的可用資料筆數為 42 孔，港務公司提供之鑽探報告，其可用資料為 106 孔，因此，本計畫於 SPT 簡化分析法中，以共計 148 孔鑽探資料進行後續分析，其地理空間之分布如圖 3.5。



圖 3.4 地工資料庫臺北港港區 74 孔 SPT 鑽探位置圖^[13]

表 3-3 臺北港港區 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
運技中心 地工資料庫	72 孔	42 孔
港務公司 鑽探報告	155 孔	106 孔
可用資料筆數		148 孔



圖 3.5 臺北港港區不同來源之 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)，72 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)，完整建置臺北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 為臺北港港區 SPT 鑽探資料密度圖，可發現本研究以 700 公尺直徑範圍進行核密度估計(kernel density estimation)時，採用 148 孔之 SPT 鑽探資料大致可良好涵蓋臺北港陸域面積，圖中淺藍色代表為 0.38 平方公里之範圍內包含至少 3 筆或以上之 SPT 鑽探資料。依照目前地調所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二孔鑽探為原則；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一孔鑽探為原則」。由上可知，目前臺北港區 SPT 鑽探資料之空間分布大部分可滿足鑽探配置需求。

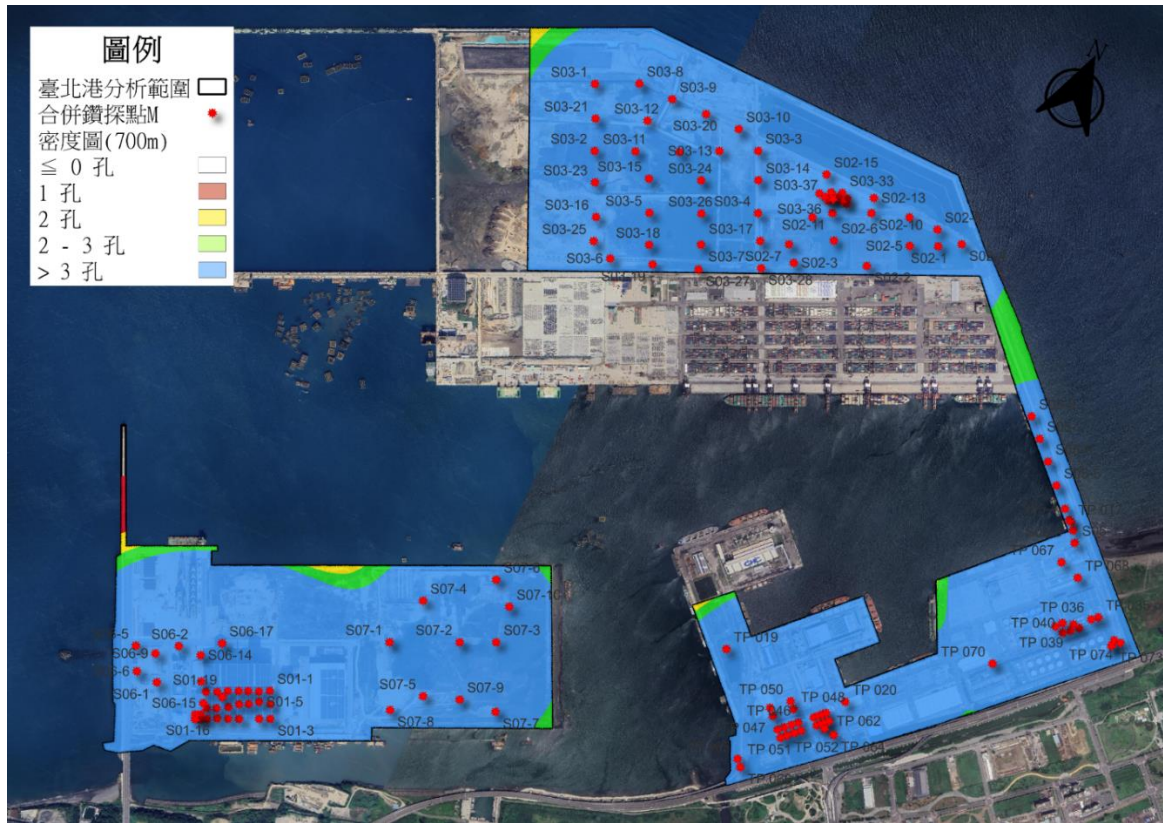


圖 3.6 臺北港港區分析範圍與 SPT 鑽探分布密度圖

3.2 以定值法進行臺北港液化潛勢分析

3.2.1 VBA 液化分析模組驗證

考量採用 SPT 鑽探資料高達 148 筆，為提高分析效率與降低人為分析出錯機率，本計畫以 Excel 之 VBA 程式為基礎，開發 SPT-N 簡易評估法之自動化分析模組，包含 HBF 法與 NCEER 法，並依分析成果計算各鑽孔液化潛勢指數 P_L ，相關模組以於 111 年度臺中港液化分析完成開發。為驗證自行開發之分析模組，本年度同樣以國家地震中心開

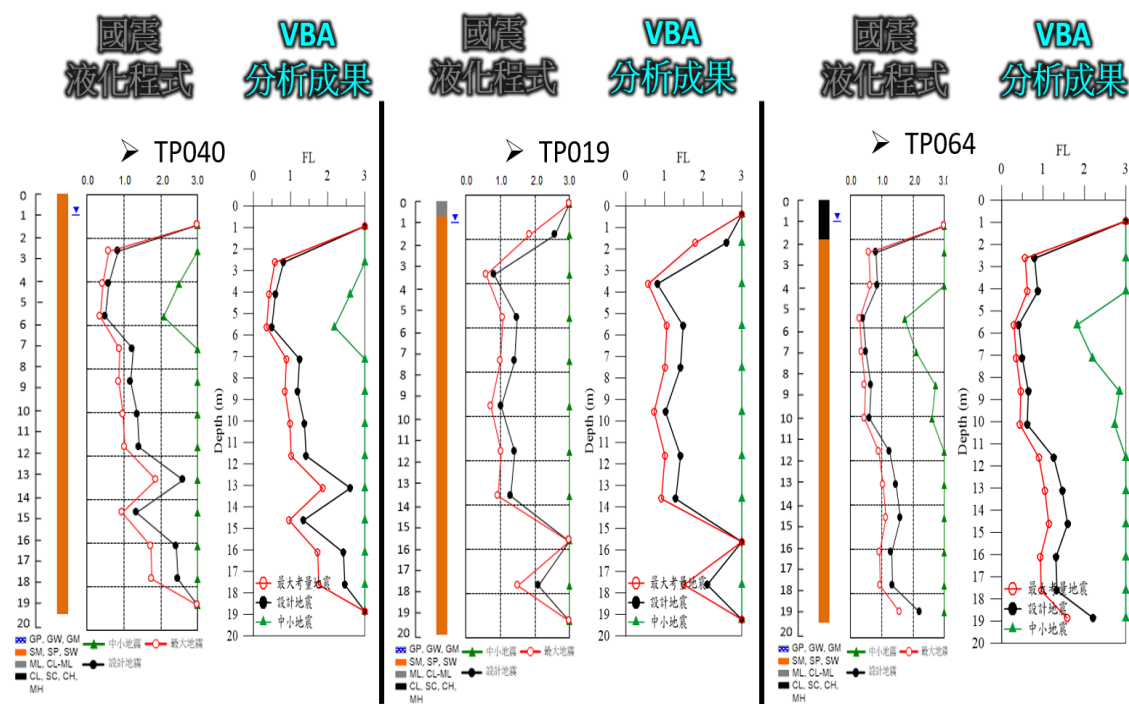


圖 3.8 VBA 液化分析模組成果驗證(1/3)

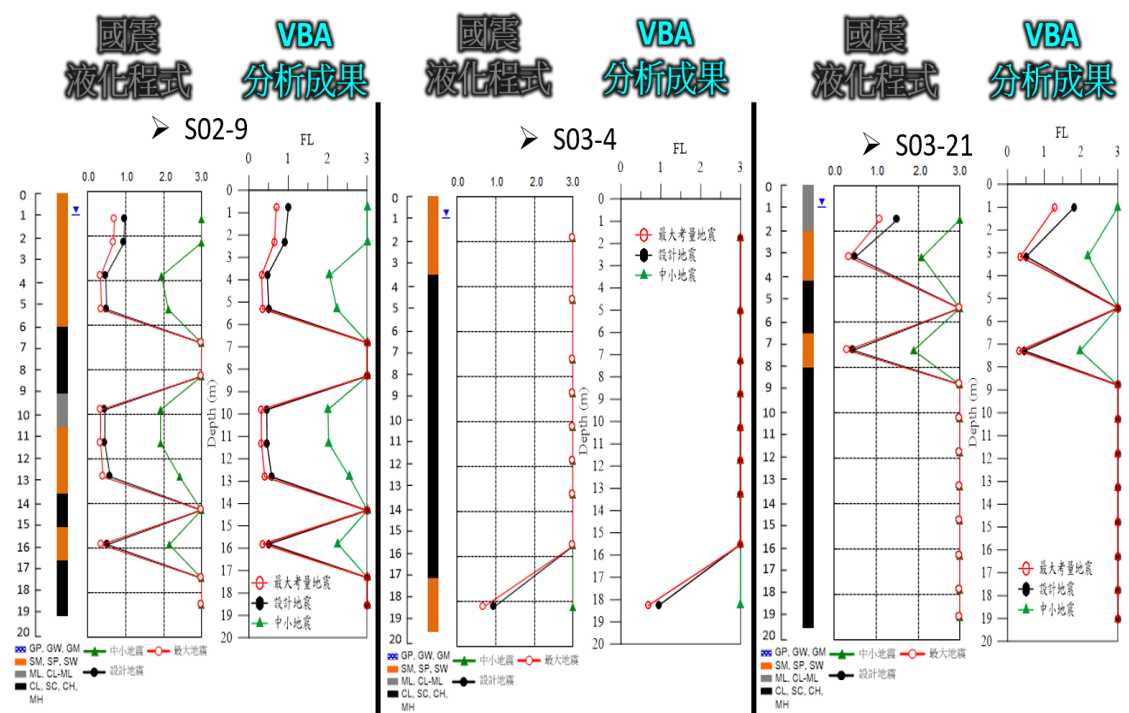


圖 3.9 VBA 液化分析模組成果驗證(2/3)

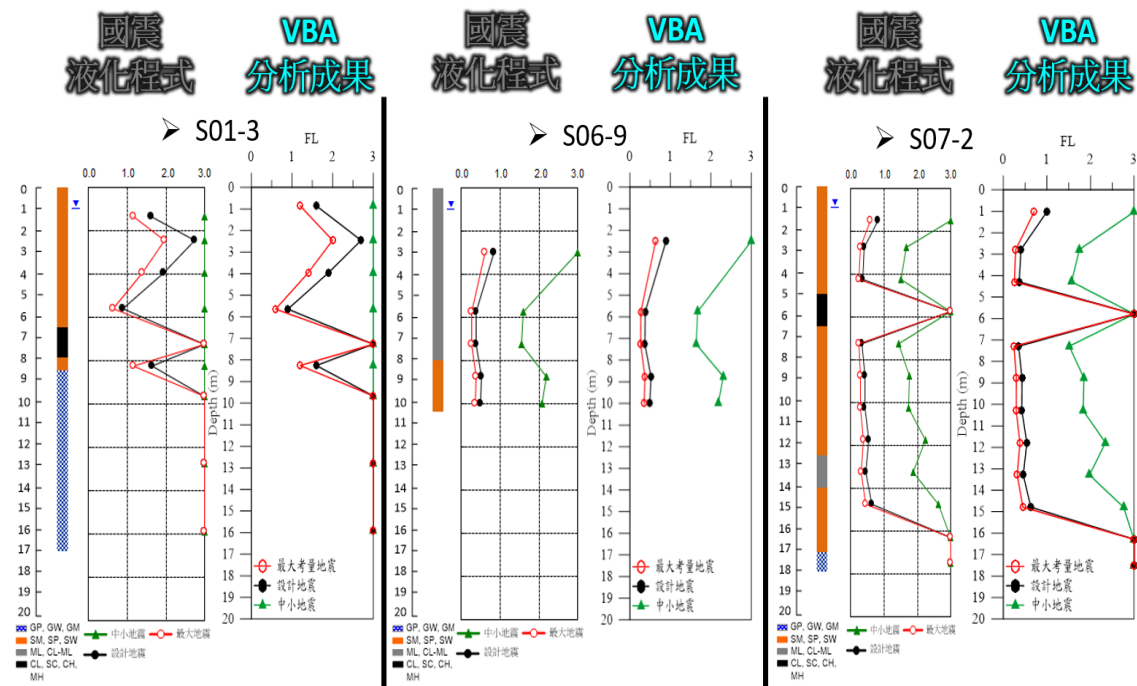


圖 3.10 VBA 液化分析模組成果驗證(3/3)

3.2.2 SPT-N 簡易評估法液化潛勢分析成果

本計畫分別以 NCEER(2001)^[21]與黃俊鴻等人(2012)^[3]提出之本土化 SPT-N 簡易評估法進行臺北港區液化分析。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 ，空間內插方式呈現臺北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，可整合臺北港區安全評估圖資，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，用於內插臺中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 3.11 至圖 3.13。

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 3.14 至圖 3.16。由不同液化潛勢圖資可發現，兩方法在臺北港區評估之低、中與高潛勢區分布位置大致相同，在中小地震規模下($a_{\max}=0.06\text{ g}$)，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($a_{\max}=0.24\text{ g}$)，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($a_{\max}=0.32\text{ g}$)，臺北港陸域液化風險等級同屬嚴重液化。

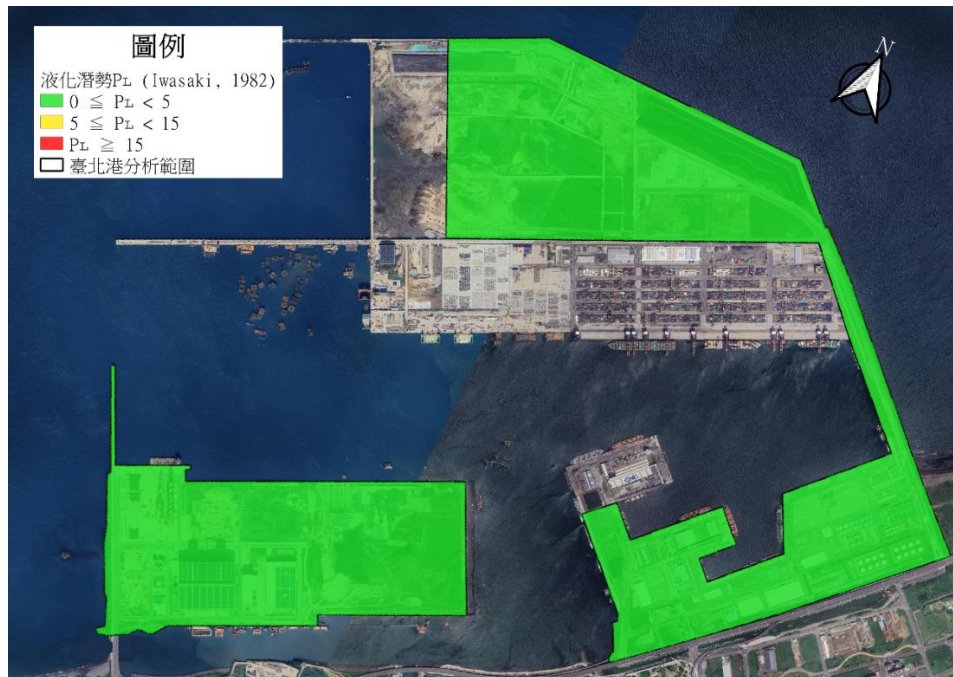


圖 3.11 中小地震下臺北港港區液化潛勢圖(HBF 法)

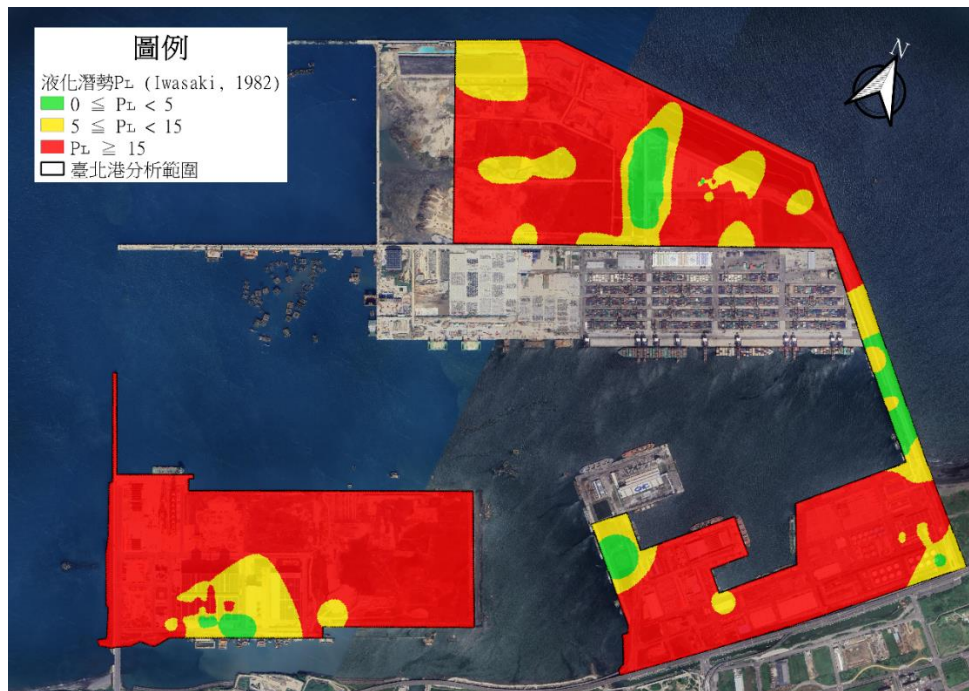


圖 3.12 設計地震下臺北港港區液化潛勢圖(HBF 法)

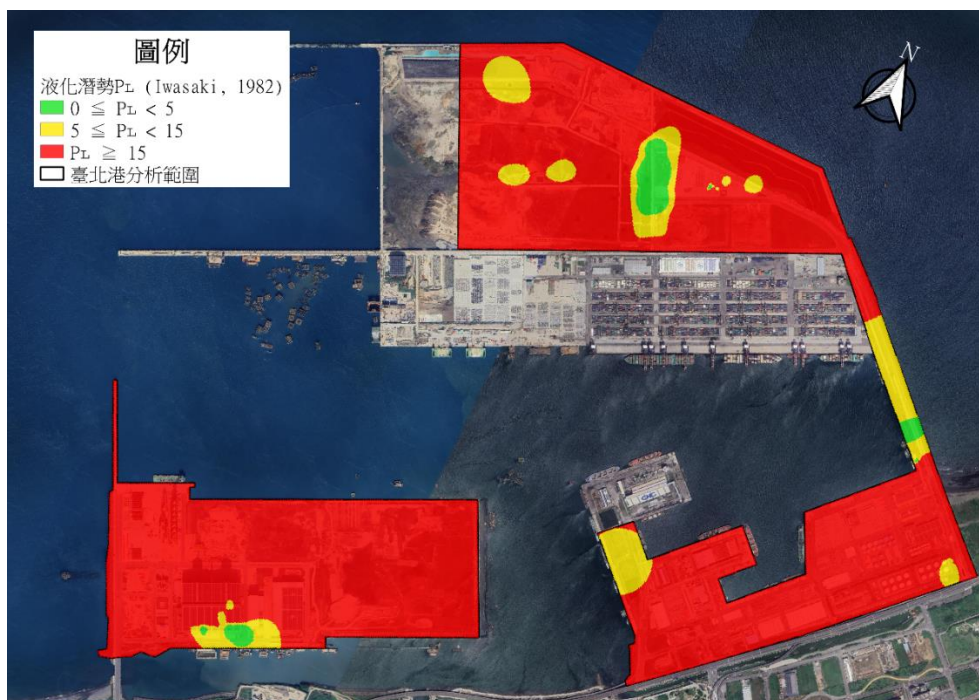


圖 3.13 最大考量地震下臺北港港區液化潛勢圖(HBF 法)

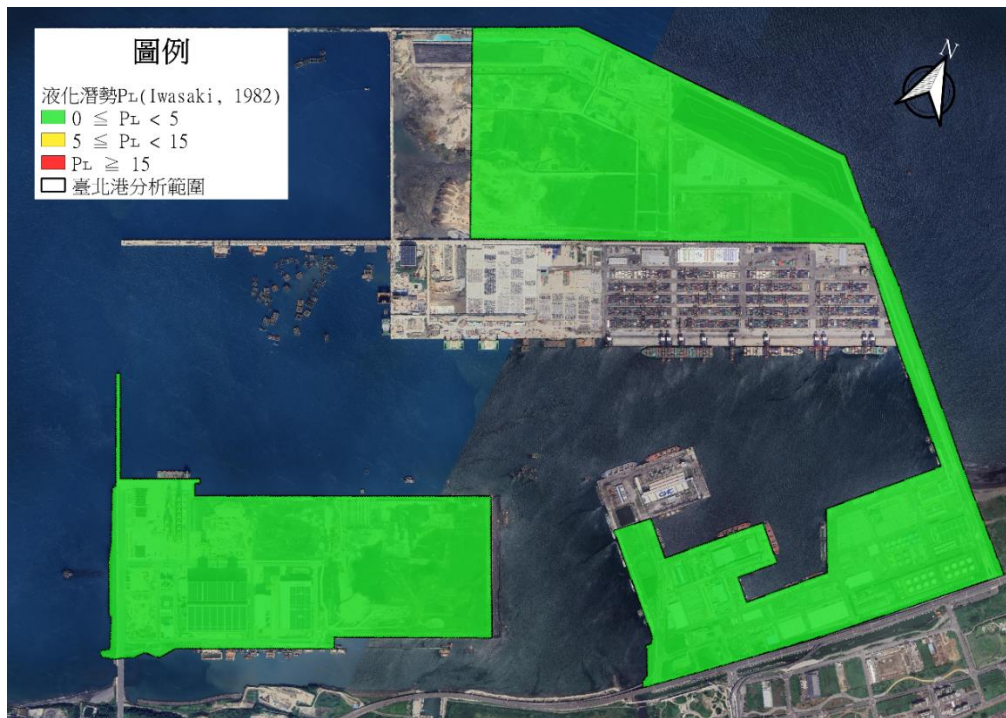


圖 3.14 中小地震下臺北港港區液化潛勢圖(NCEER 法)

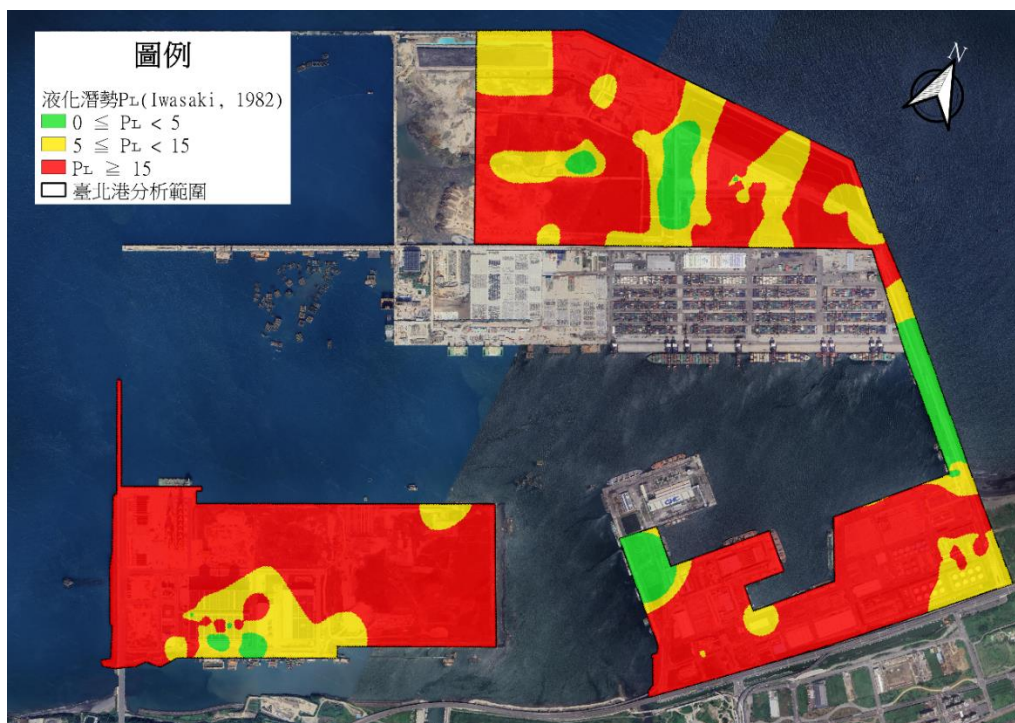


圖 3.15 設計地震下臺北港港區液化潛勢圖(NCEER 法)

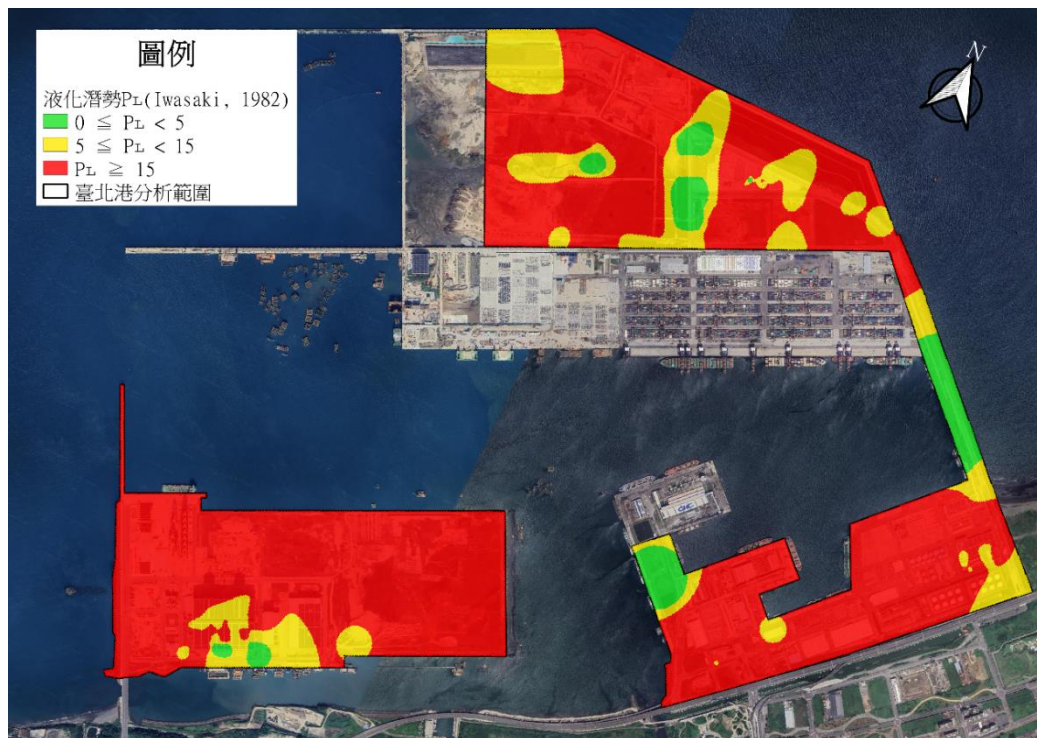


圖 3.16 最大考量地震下臺北港港區液化潛勢圖(NCEER 法)

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臺北港液化潛勢分布。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，計算臺北港區內 148 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，臺北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 3.17 至圖 3.19 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 說明在特定情境下臺北港區陸域各位置是否有機會產生液化災害。



圖 3.17 中小地震下臺北港港區液化機率分布圖(Cetin 法)

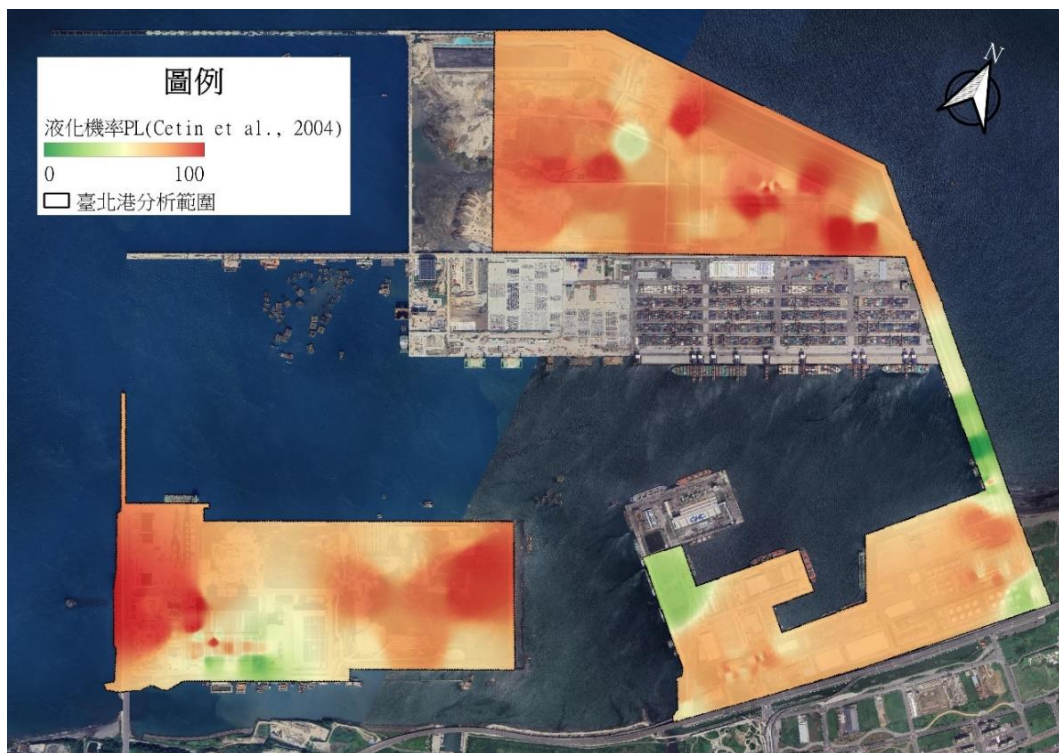


圖 3.18 設計地震下臺北港港區液化機率分布圖(Cetin 法)

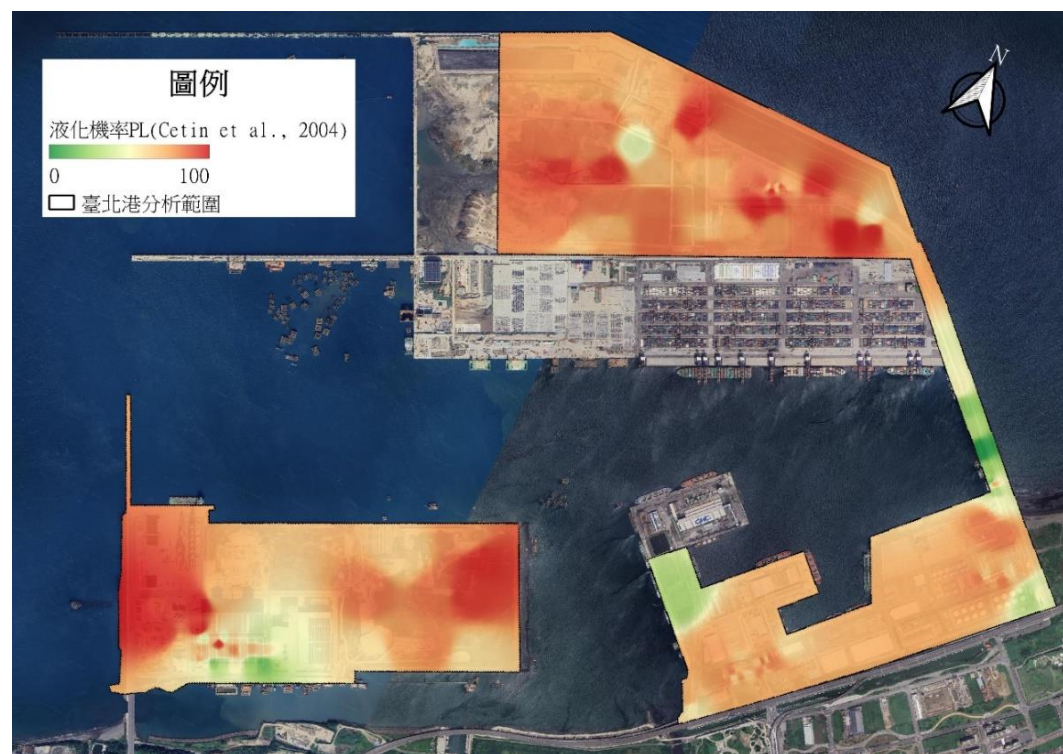


圖 3.19 最大考量地震下臺北港港區液化機率分布圖(Cetin 法)

3.4 臺北港受震液化潛勢分析說明

本所(2004)曾進行臺北港液化安全評估，其分析方法、目的與成果應用標的皆異，液化分析方法採賴聖耀(2002)^{[14][15]}之 SPT-N 法，並計算液化潛勢指數 PL(Iwasaki et al., 1982)，惟該分析結果已明顯與臺北港現況不符，臺北港經多年開發，以新增倉儲區與南碼頭區等功能區段。另外賴聖耀(2002)^{[14][15]}之 SPT-N 方法屬於機率(probabilistic)方式來評估土壤液化風險，如 Ku and Juang(2012)^[40]與 Kayen et al. (2013)^[41]皆屬於機率法(probabilistic method)，而現行耐震設計規範則主要採定值法(deterministic method)進行液化評估，土層是否液化，由評估之抗液化安全係數 F_L 值決定，兩方法架構有較大之差異，因此有必要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。透過不同地震情境之液化潛勢評估，可提供臺北港區不同尖峰水平加速度 a_{max} 之液化潛勢變化，成果可作為後續震後快速液化災損評估訊息研擬之依憑，並整合港區現地地震測站進行即時預警。

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 3.20 所示，以臺北港區陸域約 459 公頃來說，當尖峰水平加速度 a_{max} 達 0.24 g 時，臺北港區陸域約有 70%左右的面積處於高潛勢區，而最大考量地震時($a_{max}=0.32$ g)，則高潛勢區面積占比，分別為 90%與 79%。以不同地震情境之尖峰水平加速度 a_{max} 與臺北港高潛勢區佔比進行線性迴歸時，其成果如圖 3.21 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。

表 3-6 臺北港不同 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)	面積佔比 (%)		
				低潛勢區	中潛勢區	高潛勢區
HBF 法	中小地震	7.1	0.06	100.0	0.0	0.0
	設計地震	7.3	0.24	4.8	16.8	78.4
	最大考量地震	7.5	0.32	2.0	7.7	90.3
NCEER 法	中小地震	7.1	0.06	100.0	0.0	0.0
	設計地震	7.3	0.24	6.2	22.2	71.6
	最大考量地震	7.5	0.32	5.1	15.9	79.0

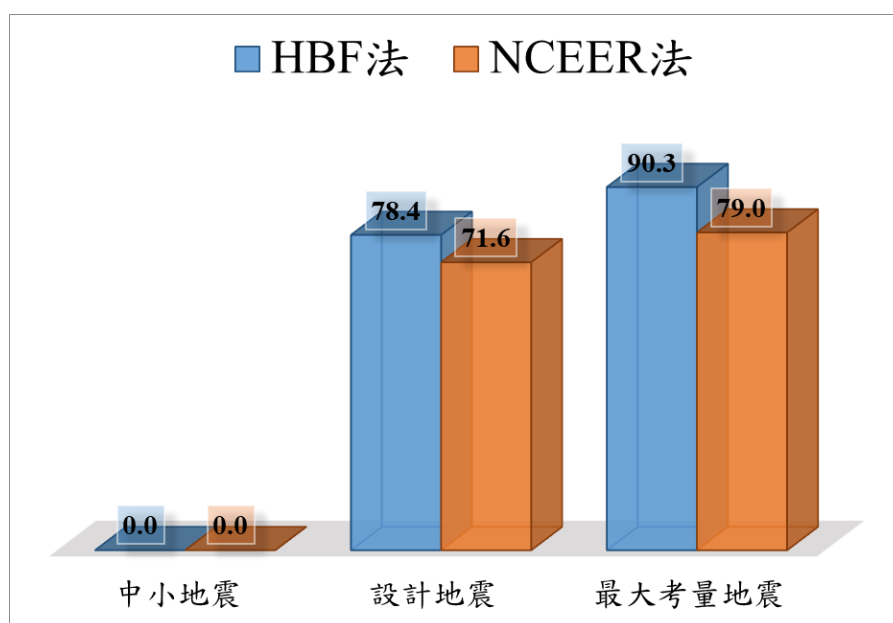


圖 3.20 不同 SPT-N 簡易評估法於臺北港高潛勢區面積佔比差異

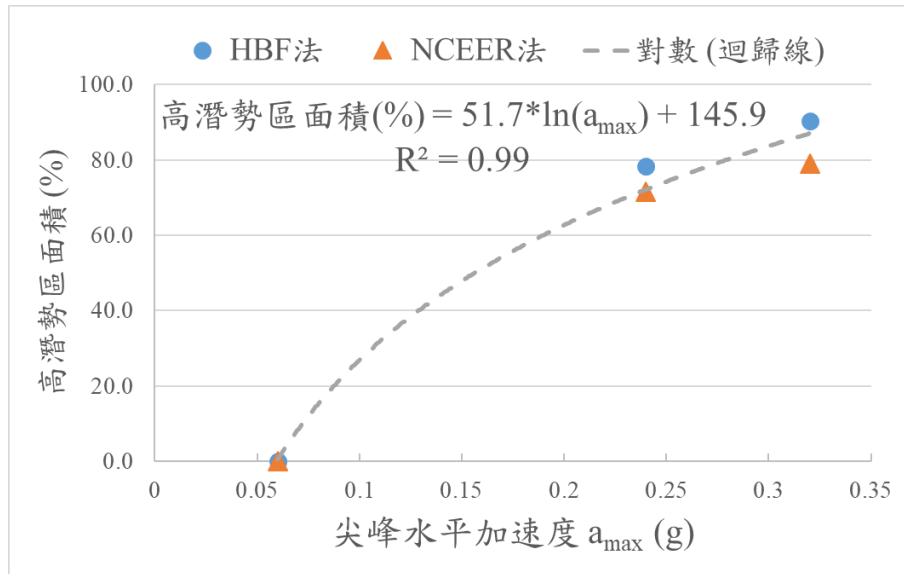


圖 3.21 臺北港高潛勢區面積佔比與不同尖峰水平加速度關係

第四章 臺北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，若臺北港遭遇如尖峰水平加速度 0.16 g 之地震時，估計於臺北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。

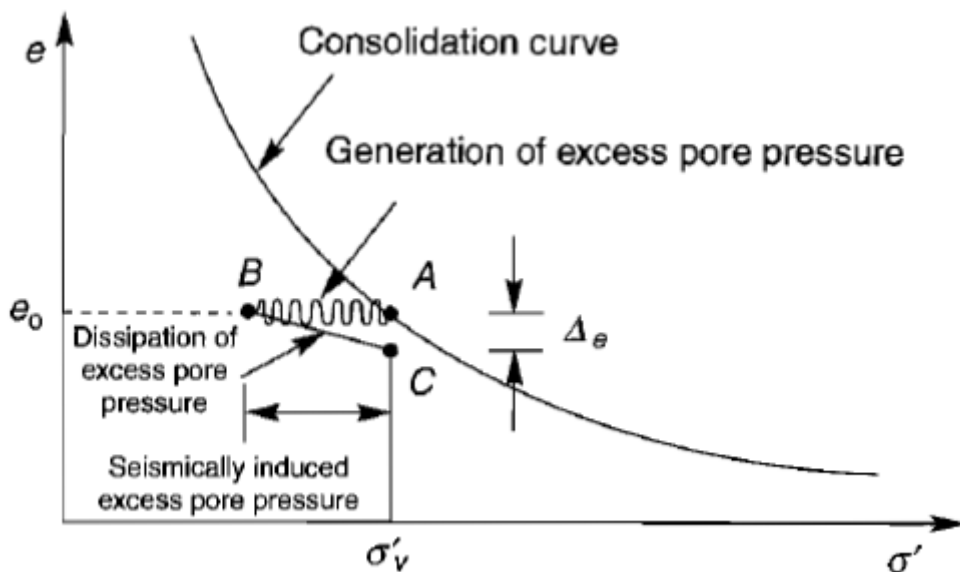


圖 4.1 地震致使超額孔隙水壓力激發後土層消散壓密沉陷^[32]

Ishihara(1996)^[42]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) ^[43]；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 。以下就臺北港震陷量評估方法、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 $\gamma_{\max}$ 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 $\gamma_{\max}$ ，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 148 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，單孔震陷量評估成果，如圖 4.2 所示。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)，震陷量 S 對應中小地震、設計地震與最大考量地震，分別為 0 cm、19.6 cm 與 22.8 cm。

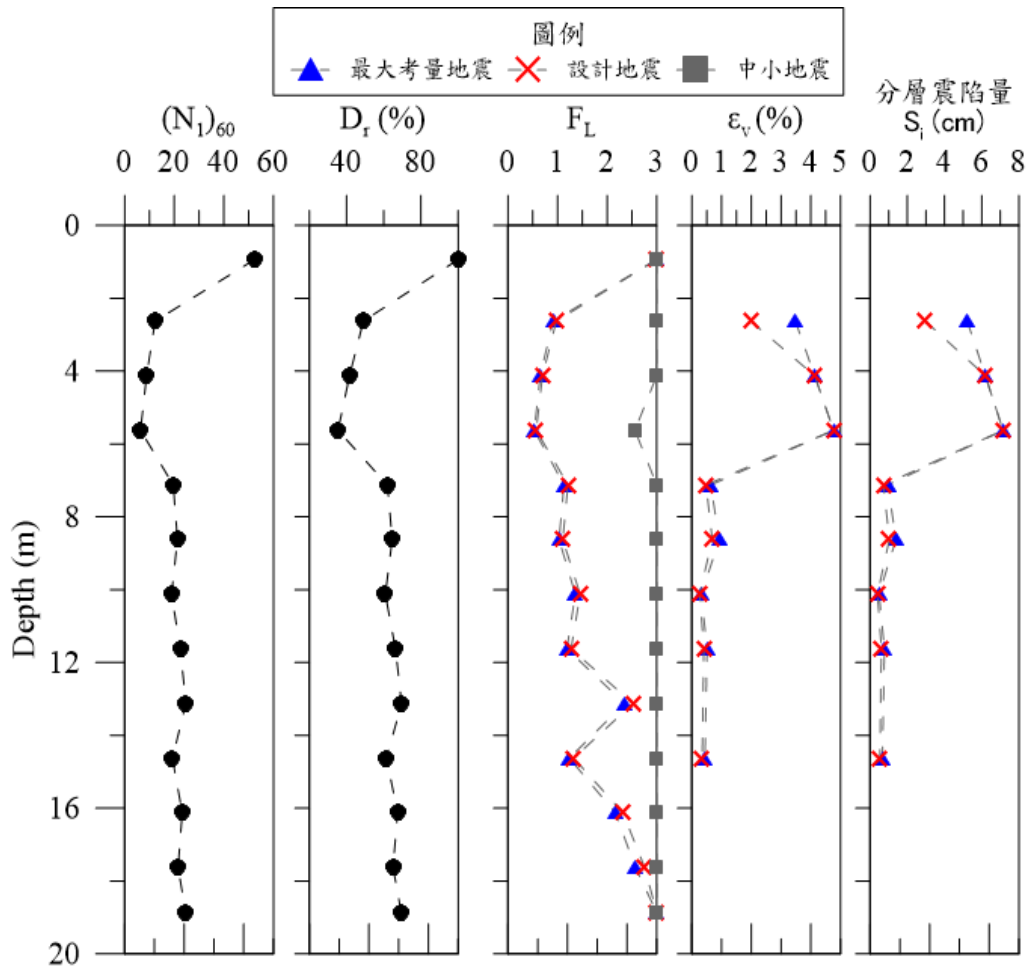


圖 4.2 SPT 單孔震陷量計算成果(鑽孔名稱：TP040, NCEER 法)

4.2 臺北港震陷量潛勢分布

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 4.3 至圖 4.8，可提供不同地震情境下臺北港受震引致沉陷量分布。在中小地震下($a_{\max}=0.06\text{ g}$)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 0.24 g 與 0.32 g)，則震陷量 S 有明顯上升之趨勢，且以臺北港南碼頭區右側與倉儲區海埔新生地區段尤其嚴重，可達高度災損等級(extensive damage)。

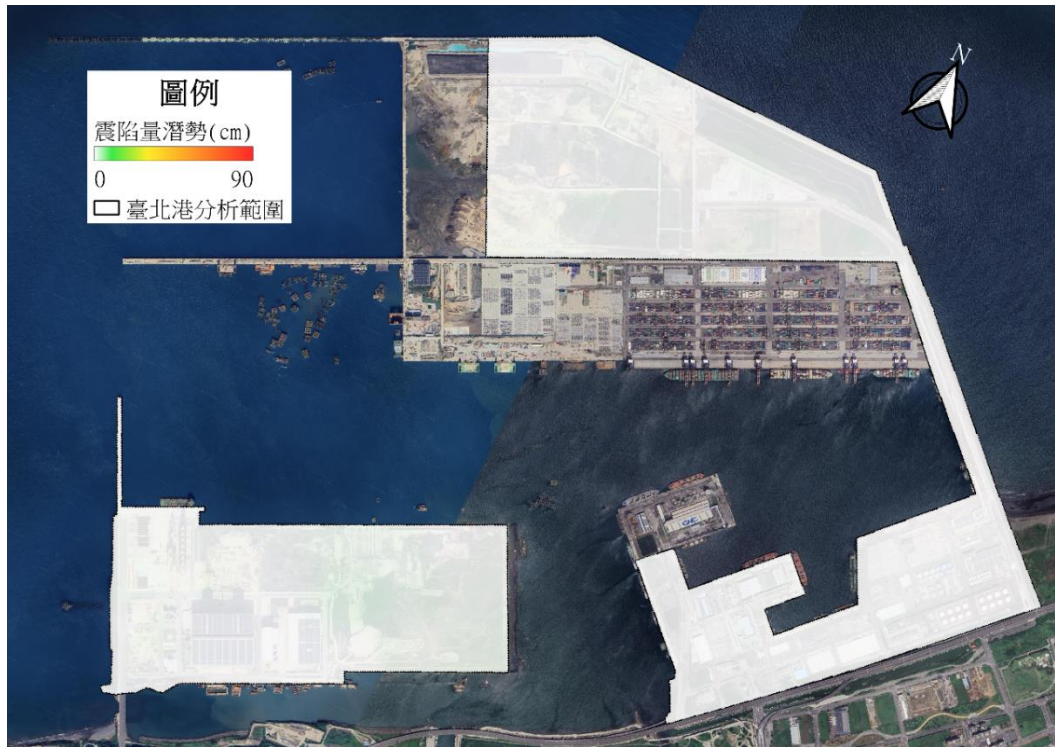


圖 4.3 中小地震下臺北港港區震陷潛勢圖(HBF 法)

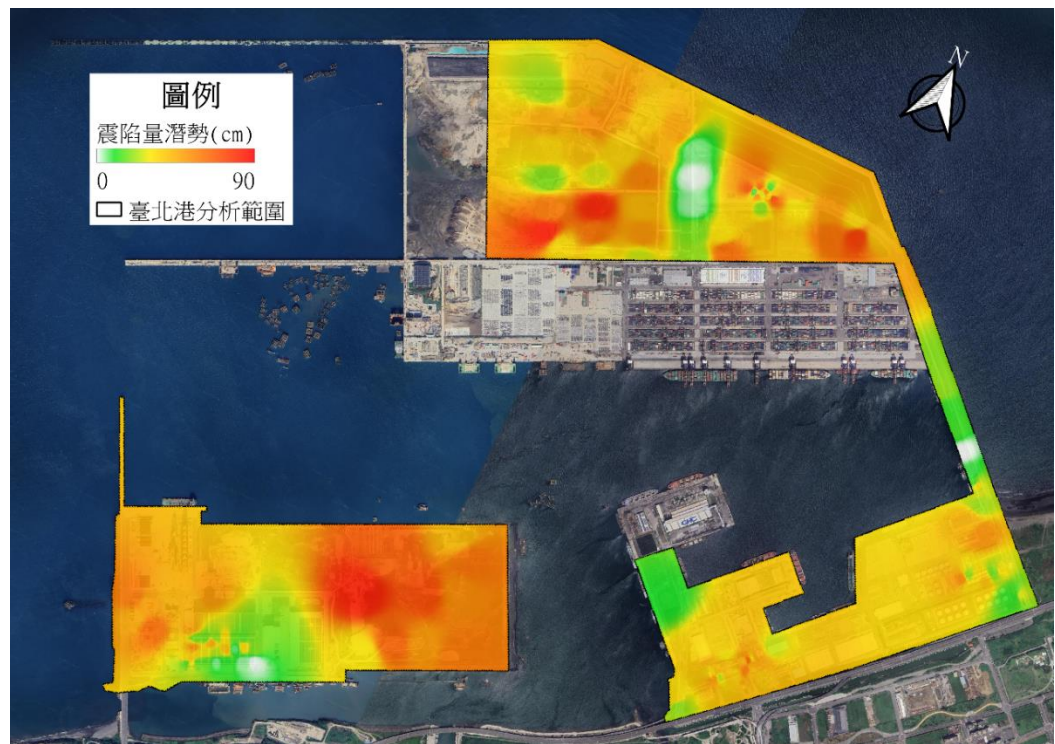


圖 4.4 設計地震下臺北港港區震陷潛勢圖(HBF 法)

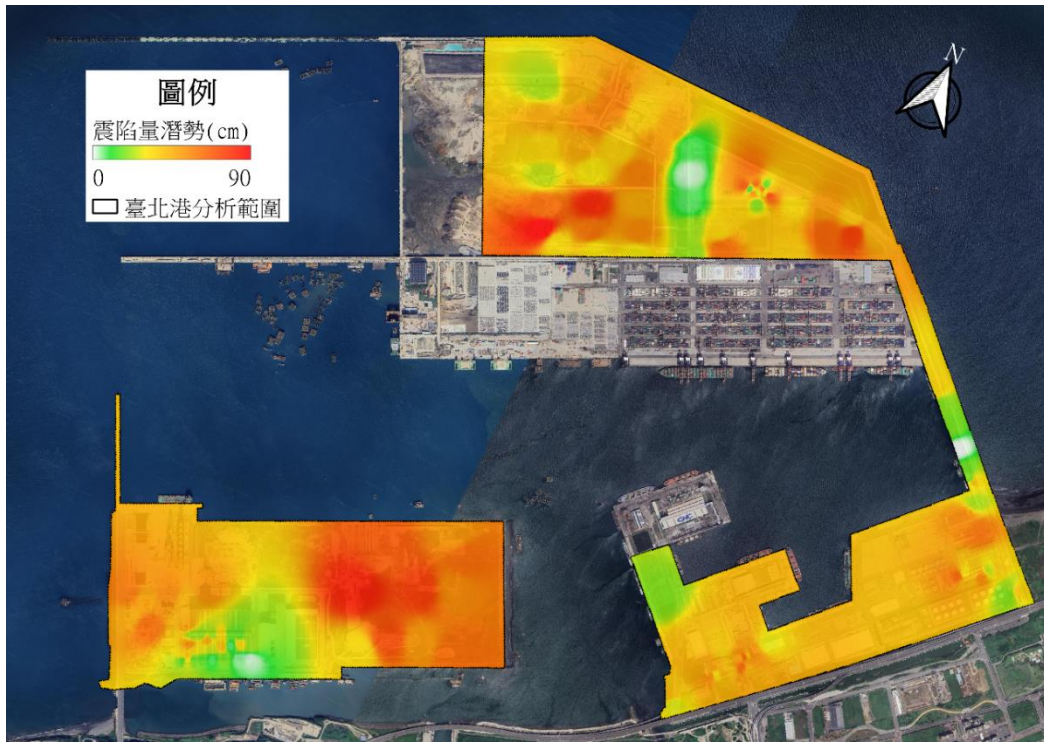


圖 4.5 最大考量地震下臺北港港區震陷潛勢圖(HBF 法)

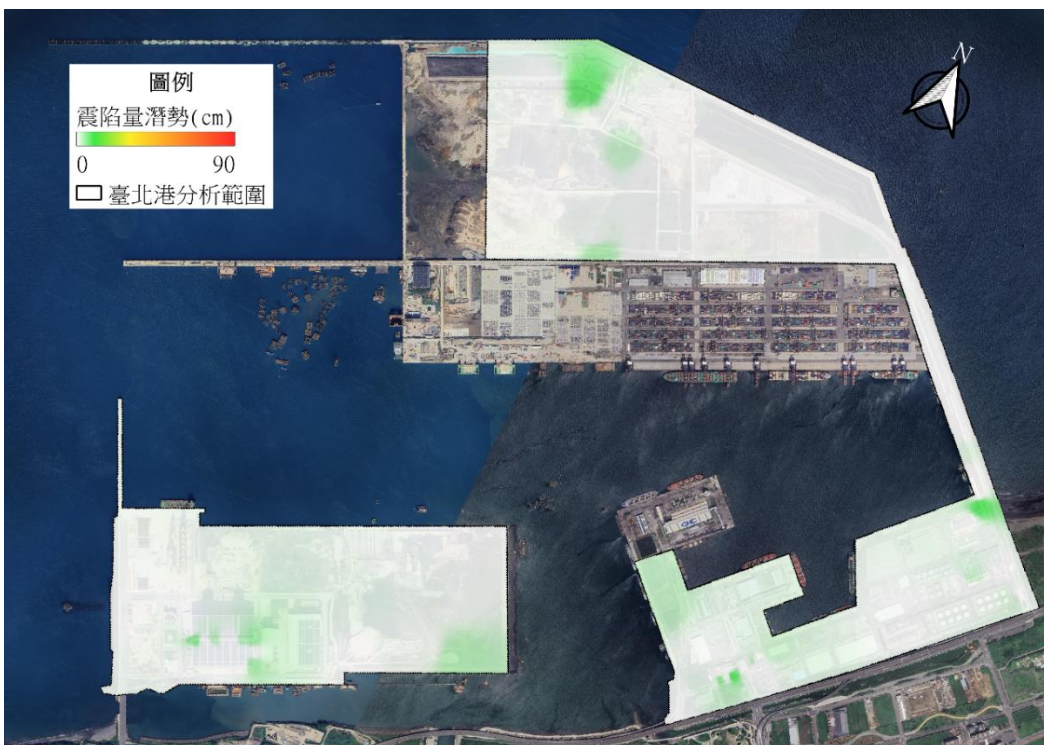


圖 4.6 中小地震下臺北港港區震陷潛勢圖(NCEER 法)

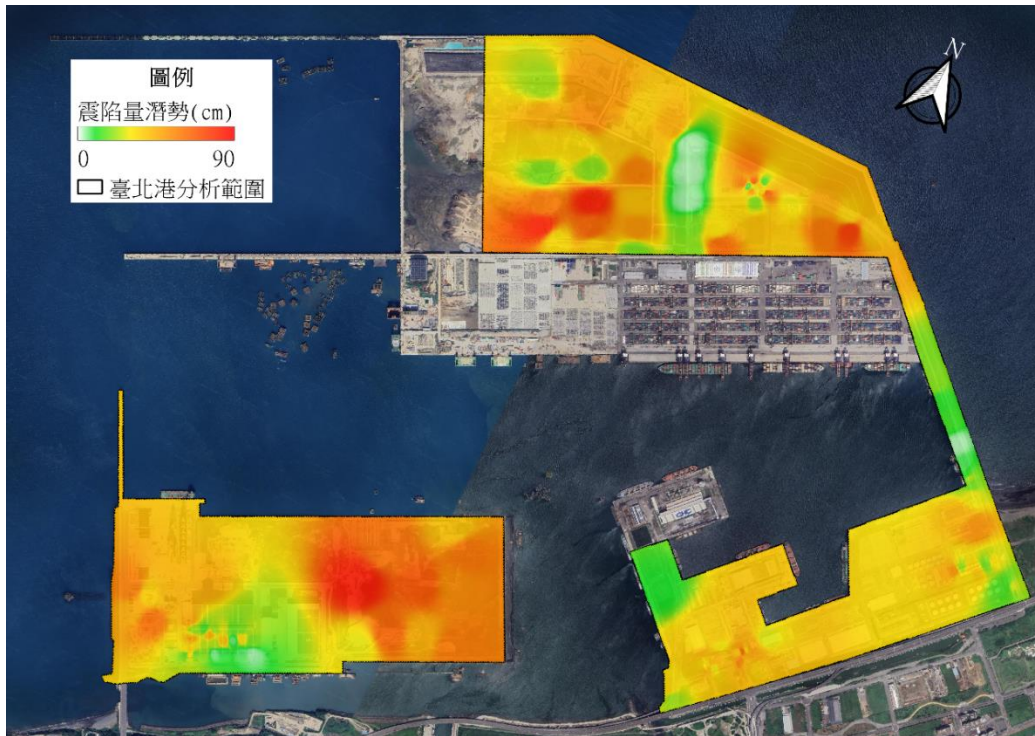


圖 4.7 設計地震下臺北港港區震陷潛勢圖(NCEER 法)

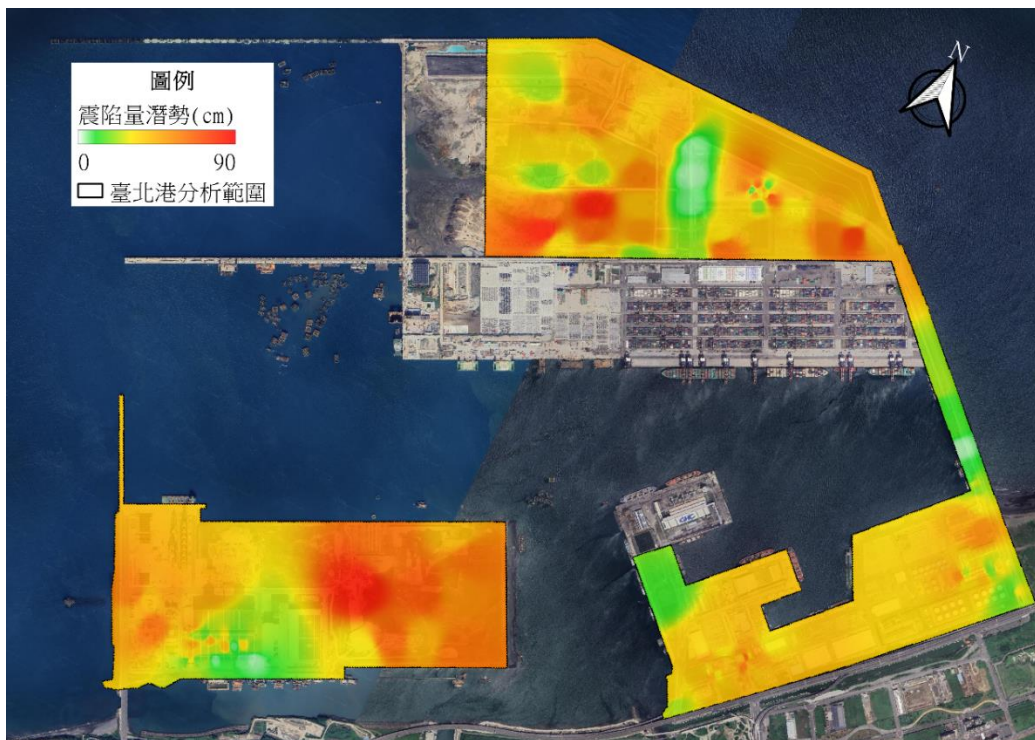


圖 4.8 最大考量地震下臺北港港區震陷潛勢圖(NCEER 法)

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，為完整探討臺北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，臺北港港區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)。

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，其上限值差異接近 10 倍。為提供未來臺北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、中與高震陷量 3 個部分，嘗試以具代表性之震陷變化範圍，做為震陷量評估公式之基礎數據點。

臺北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，臺北港港區不同位置於中小地震下，其震陷量主要集中於 0~0.2 cm 區段，約佔分部面積之 84.8%，設計地震下，則要集中於 27.3~54.6 cm 區段，約佔分部面積之 64.7%，最大考量地震之震陷量集中於 29.6~59.1 cm，約佔 69.4%；而 NCEER 法，中小地震下，其震陷量主要集中於 0~2.5 cm 區段，約佔分部面積之 96.9%，設計地震下，則要集中於 27.3~54.7 cm 區段，約佔分部面積之 65.4%，最大考量地震之震陷量集中於 27.4~54.8 cm，約佔 65.8%。透過上述方法，可降低部分 SPT 鑽探成果較離散之影響，此 2 種分析方法於不同

分析加速度下的震陷量變化範圍與佔比相近。

圖 4.9 為臺北港不同分析加速度 $a_{\max}$ 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，臺北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 臺北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	7.1	0.06	0~0.2 cm (84.8%)	0.2~0.5 cm (12.7%)	0.5 cm 以上 (2.6%)
	設計地震	7.3	0.24	0~27.3 cm (16.9%)	27.3~54.6 cm (64.7%)	54.6 cm 以上 (18.4%)
	最大考量地震	7.5	0.32	0~29.6 cm (15.3%)	29.6~59.1 cm (69.4%)	59.1 cm 以上 (15.3%)
NCEER 法	中小地震	7.1	0.06	0~2.5 cm (96.9%)	2.5~5.0 cm (3.1%)	5.0 cm 以上 (1.0%)
	設計地震	7.3	0.24	0~27.3 cm (17.3%)	27.3~54.7 cm (65.4%)	54.7 cm 以上 (17.3%)
	最大考量地震	7.5	0.32	0~27.4 cm (16.4%)	27.4~54.8 cm (65.8%)	54.8 cm 以上 (17.8%)

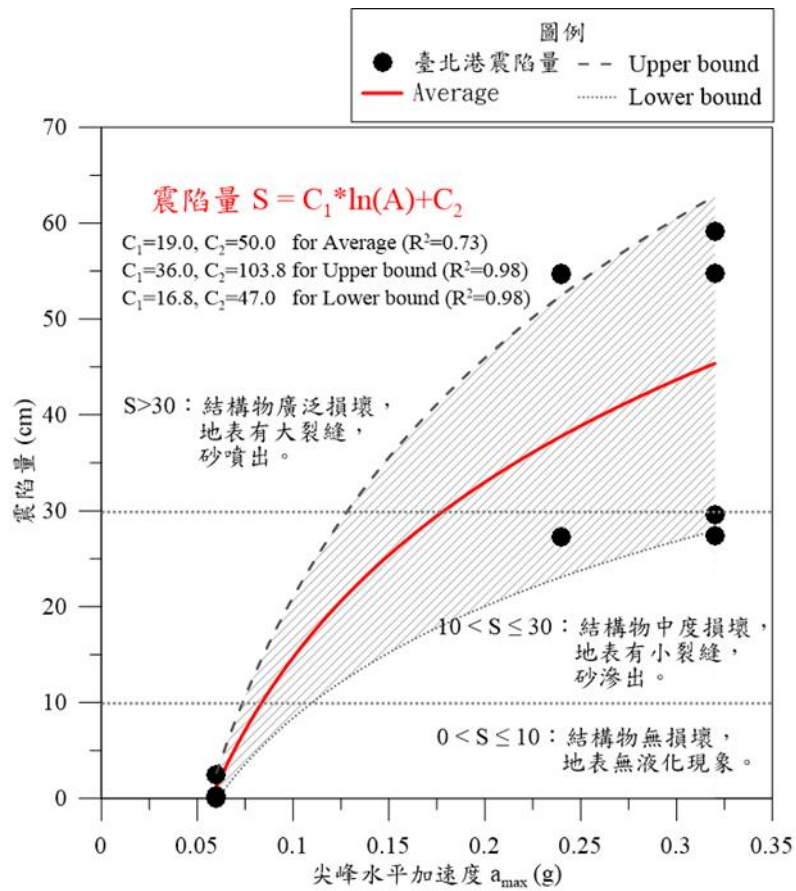


圖 4.9 臺北港不同分析加速度 a_{max} 之震陷量 S 經驗評估公式

第五章 震後快速液化災損評估訊息研擬

5.1 臺北港港區分區災損指標訂定

臺北港港區災損指標訂定流程如圖 5.1 所示，更新之 148 孔 SPT 鑽探資料作為基本資料庫，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，臺北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，本研究參考目前臺北港現況(如圖 3.1 所示)之劃分，包含行政區、南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。

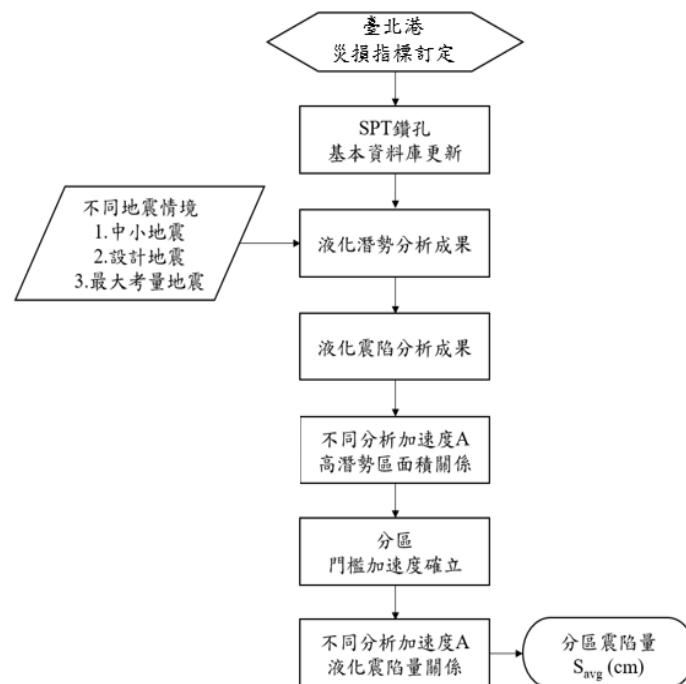


圖 5.1 臺北港港區災損指標訂定流程圖

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，臺北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。

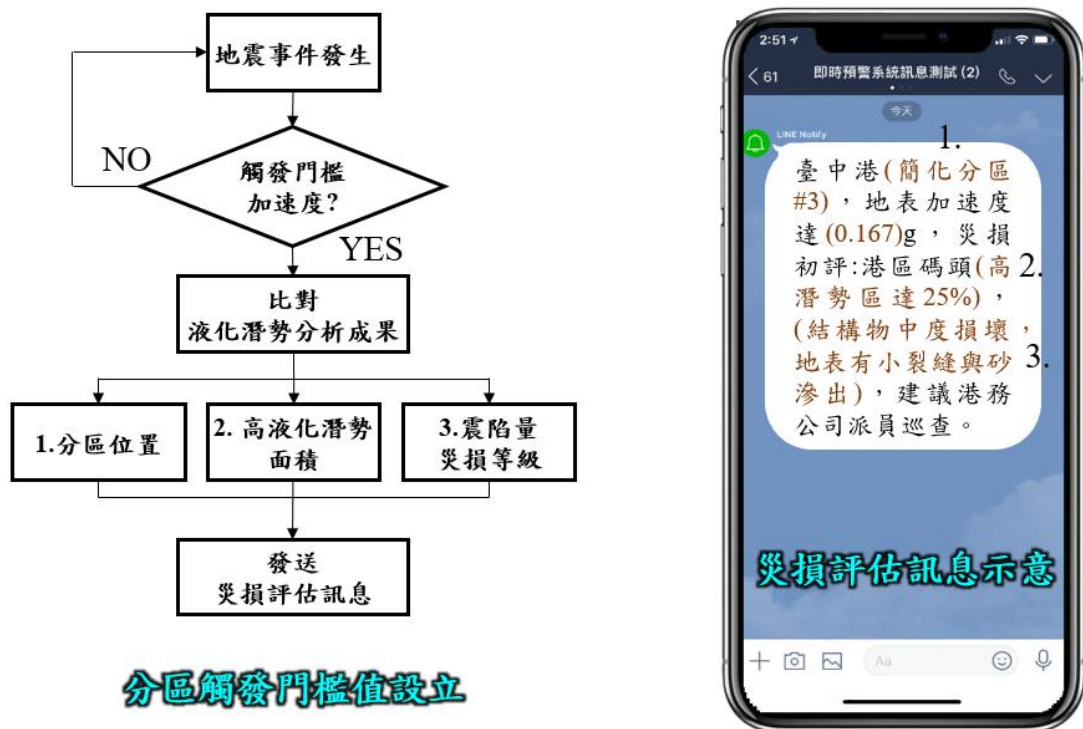


圖 5.2 震後快速液化災損評估訊息發布流程與示意(以臺中港為例)^[16]

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，包含臺北港、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，本年度進行臺北港液化分析，可作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 為臺北港於

不同分析加速度之震陷量變化，為通盤考量臺北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。

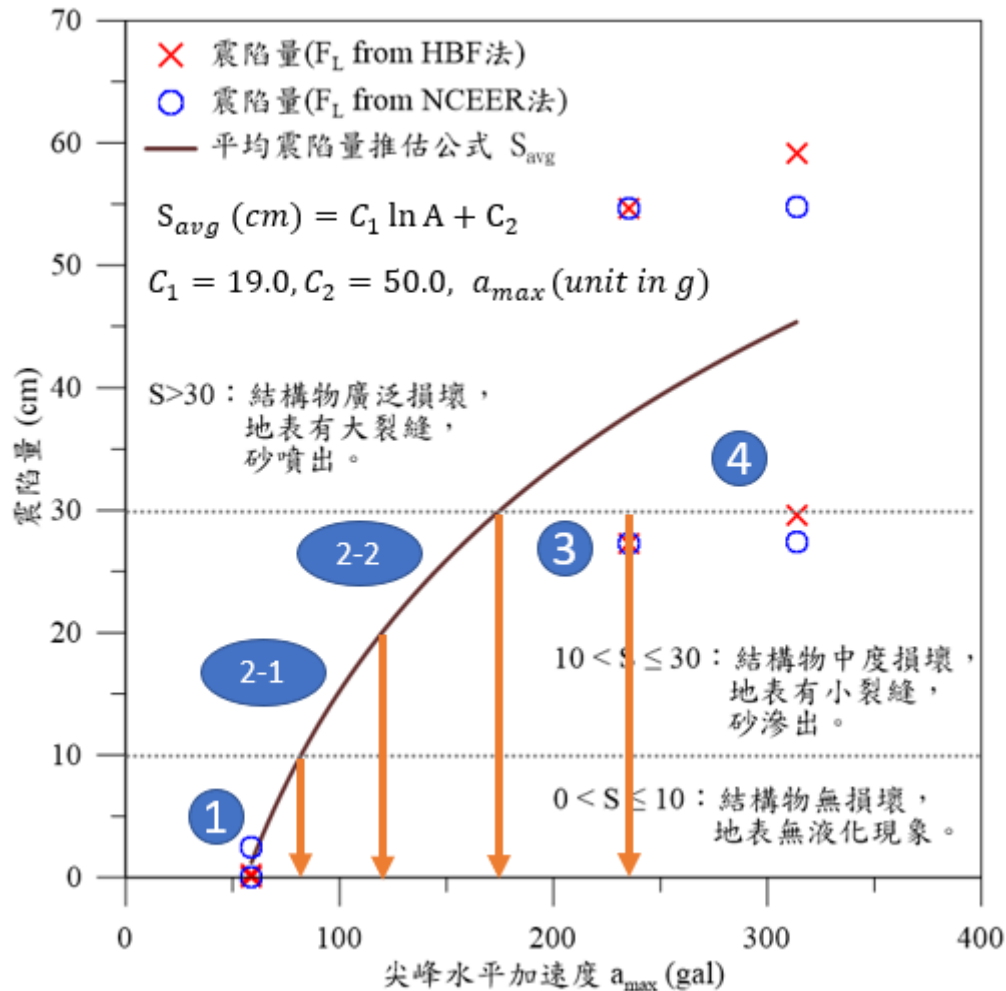


圖 5.3 臺北港地震速報簡訊分階門檻加速度訂定說明

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作為代表，即以 81 gal 作為第 1 階段之門檻加速度；接著以震陷量 S 為 30 cm 之交點作為第 2 與第 3 階段之劃分，即 174 gal，考量中小地震情境較接近 10 cm 之震陷量變化，因此以 120gal 作為分界點，細分為 2-1 與 2-2，而 2-2 則接近設計地震之狀態，其可能沉陷位置如圖 5.4 與圖 5.5；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 234 gal 做為第 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。相關門檻加速度與地震速報簡訊內容，彙整如表 5-1。

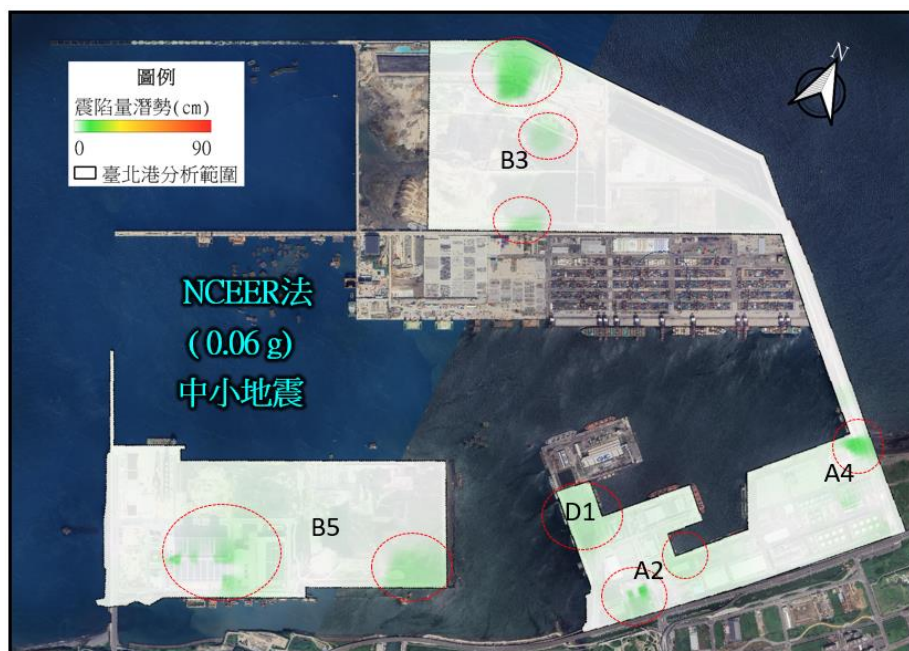


圖 5.4 中小地震下臺北港可能發生震陷位置示意圖

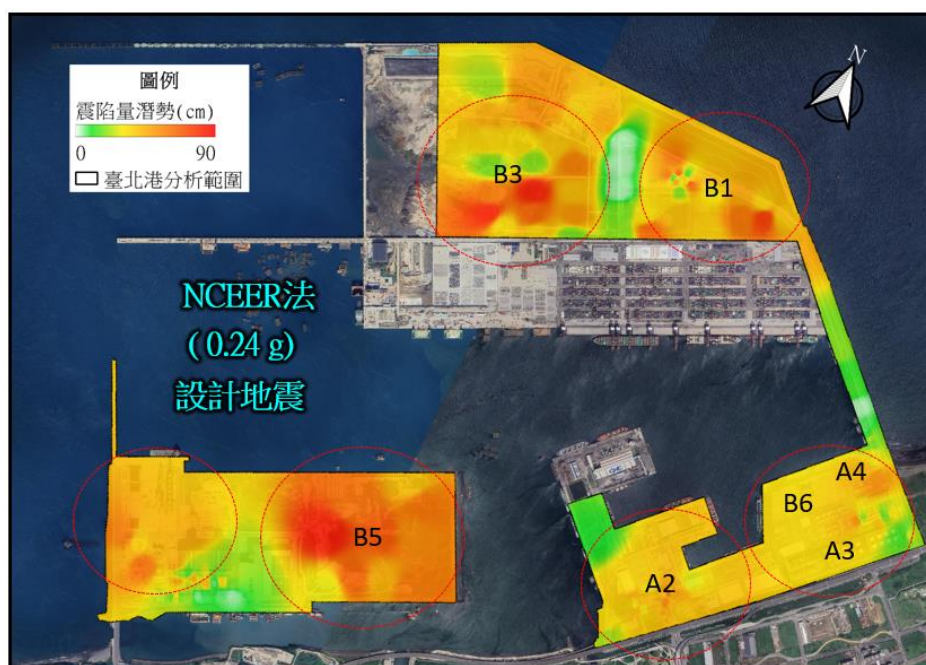


圖 5.5 設計地震下臺北港可能發生震陷位置示意圖

表 5-1 臺北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 - 81	臺北港災況初評：港區碼頭應該安全。(TIPC 提供)
2-1	82 - 120	臺北港災況初評：E1、E7、E8、E13、E18、S1 號碼頭，S7、S8 碼頭後線多功能區、N7 碼頭後線第二期倉儲區地表可能有輕微裂縫，請派員巡查(TIPC 提供)
2-2	121 - 174	臺北港災況初評：E1-E12、E20、S1-S6、S8-S9 號碼頭，與 N3-N5 第一期倉儲區、N7-N8 碼頭後線第二期倉儲區地表可能有小裂縫，請派員巡查。(TIPC 提供)
3	175 - 234	臺北港災況初評：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	235 以上	臺北港災況初評：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)

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，相較於原有設定值，其成果可更貼近於實際臺北港港區土層之液化危害度分析成果，本(112)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，臺北港港區於地震後之快速液化災損評估分析成果。

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，自民國 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之「海氣象監測及預警技術精進計畫(111~115 年)」代辦計畫內「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(112)年將原設置於各港區地表地震速報監測站，共 8 臺工業級電腦全部更新，並更新高雄港之地震速報儀 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；另外，也蒐集臺北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、更新臺北港地震速報簡訊內容。本章就 112 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；另由於各港區地震監測站內之工業級電腦近年來陸續故障報修，以及高雄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，今年全部予以更新，以使各港區地震監測站能正常運作。112 年度維護成果綜整如下：

1. 臺北港

(1)地點：臺北港入口右側花圃。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.本監測站 112 年 5 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- c.臺北港地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，共測得 2 級地震強度 2 次，震源大部份來至小區域或蘇澳外海地區。
- d.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.本監測站 112 年 6 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。

- c.臺中港地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，共測得 2 級地震強度 3 次，3 級地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 4 次，震源大部份來至小區域或東部外海地區。
- d.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.本監測站 112 年 5 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- c.本監測站 112 年 07 月 10 日遠端連線，發現現場地震儀有異常觸發情形，經查現場進行水溝整治震動影響，立即將簡訊功能關閉。於 112 年 07 月 17 日重新開啟，功能測試恢復正常運作。
- d.蘇澳港地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，共測得 2 級地震強度 9 次，3 級地震強度 4 次，4 級地震強度 1 次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 14 次，蘇澳港震源大部份來至蘇澳外海地區。
- e.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.本監測站 112 年 6 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- c.安平港地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，總共發布 2 級地震速報簡訊 3 次，震源大部份來至小區域或花東外海地區。
- d.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圃。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.本監測站 112 年 3 月，更新地表地震儀及電腦各 1 臺，且安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。

c.高雄港地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，共測得 2 級地震強度 2 次，震源大部份來至小區域或臺東外海地區。

d.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. 本監測站 112 年 05 月 04 日遠端無法連線電腦，經查中華電信路由器當機，於 112 年 05 月 08 日至現地重開電腦後連線正常。檢查地震儀及電腦正常運作。

c. 本監測站 112 年 6 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，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 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，共測得 2 級地震強度 4 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 6 次，震源大部份來至小區域或花東外海地區。

e.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.本監測站 112 年 5 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- c. 112 年 8 月 25 日遠端連線檢查，發現航管中心辦公室外之自由場地震儀無法連線，於 112 年 8 月 31 日，前往現場檢查地震儀，經查現場無電源，通報港務公司處理，恢復電源後檢查一切皆能正常運作。
- d.基隆港地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，總共發布 2 級地震速報簡訊 1 次，震源大部份來至小區域或花東外海地區。
- e.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.本監測站 112 年 6 月，更新電腦 1 臺及安裝防毒軟體，並連線功能測試，皆能正常運作。
- c.地表地震監測紀錄於 112 年 01 月 01 日至 11 月 09 日止，共測得 2 級地震強度 16 次，3 級地震強度 5 次，4 級地震強度 1

次，總共發布 2 級以上地震速報簡訊 22 次，震源大部份來至小區域或東部外海地區。

d.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。

各港區傳送的地震速報簡訊種類，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），彙整今年(112 年)截至 11 月 09 日止，各港區傳送的地震速報簡訊，總計 55 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 112 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 (2.5~8.0gal)	3 級 (8.0~25gal)	4 級 (25~80gal)	5 級 (80~250gal)	
臺北港	2	0	0		2
臺中港	3	1	0		4
蘇澳港	9	4	1		14
安平港	3	0	0		3
高雄港	2	0	0		2
布袋港	4	1	1		6
基隆港	1	0	0		1
花蓮港	16	5	1	1(101 gal)	23
總計	40	11	3	1	55

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圃之地震監測設備，本所遂將上述監測設備遷移至行政大樓右側花圃內^[17,18]；再於 111 年初安平港營運處通知本所，請本所另覓適當場域遷移原置放於該港 8 號碼頭地震監測設備，本所遂將上述監測設備遷移至安平港營運處大樓地下室，以確保地震速報能正確運作；今(112)年初安平港營運處再通知本所，該營運處大樓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，並測試所有功能皆可正常運作；另為各港區現地地表地震儀設備之速報軟體運作能順利進行，今(112)年各港區監測站電腦全部汰舊換新，並更新高雄港地表地震儀 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；亦針對臺北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，以更新臺北港地震速報簡訊內容。今(112)年度地震速報精進分述於後：

6.2.1 高雄港地震速報精進

本所運技中心於 98 年建置安裝高雄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，當年高雄港務局提供港勤中心附近花圃，供本所安裝地表地震儀，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。

由於本所設置於高雄港監測站之三向度網路型地表地震儀，年久需汰舊換新，今(112)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。高雄港地震監測設備拆除、更新安裝及測試敘述如下：

1. 112 年 3 月 30 日進行舊地震儀拆除工作，如圖 6.1 所示，隨即將新地震儀依舊地震儀方位進行安裝，如圖 6.2 所示。



圖 6.1 高雄港舊地震儀(CV373 型)拆除示意圖



圖 6.2 高雄港 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。

6.2.2 更新臺北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(112)年特別針對臺北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，以更新臺北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(112)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 3 次(4/17、6/14 及 11/16)，並依據港務公司提供各港之橋梁地震觸發門檻值，增設橋梁地震簡訊之傳送，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。

6.2.3 地震速報資料介接

本所運技中心於 101 年整合各港區地震監控資訊於本所港灣環境資訊網中展示，港灣環境資訊系統於接收地震資料之相關資訊，以自動/手動的方式將接收之地震資料匯入至本所海情中心的資料庫中，並且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，提供地震發生時之網頁訊息告知及歷史地震資訊查詢等功能。自民國 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之「海氣象監測及預警技術精進計畫(111~115 年)」代辦計畫內「港區地震速報精進與維護」計畫繼續運作。112 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代辦之「港灣構造物維護管理資訊系統」、「商港海氣象資訊系統」及本所「港灣環境資訊網」等系統，透過雲端介接去下載各港區相關地震速報資料使用，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 6.3 所示
- 3. 對應各港資料夾，如圖 6.4 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 6.5 所示。



圖 6.3 港區資料夾



圖 6.4 各港資料夾



圖 6.5 自動上傳地震檔案至雲端

第七章 結論與建議

臺北港為北臺灣航運門戶，依據港務公司簡介，臺北港位處新北市八里區，於民國 82 年進行開闢，東距北部基隆港約 34 海浬，南距臺中港約 87 海浬，屬人工港口，臺北港區範圍約為基隆港五倍，港區用地全以填海造地方式取得，碼頭數量為 38 座(如圖 3.1 所示)，近年來整體貨量正逐年提升，並持續興建各項港埠設施，以配合港埠發展趨勢及國家經濟政策，逐漸發展成為臺灣北部區域具有遠洋貨櫃航線條件、加值物流中心、海空聯運及綠能環保等功能之港埠，據以成為北部貨櫃/物集散之新據點，其重要性不可言喻。本所曾進行臺北港港區土壤液化潛勢評估(2004)，以 SPT 與 CPT 試驗數據進行液害危害度及震陷潛勢等相關分析，彙整臺北港港區 74 孔 SPT 鑽探資料並繪製其空間上相對位置(如圖 3.4 所示)。

本年度計畫著眼於建立臺北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，探討臺北港不同區段液化機率分布，提出臺北港不同分析加速度 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：臺北港港區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、臺北港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

本年度計畫執行成果摘要如下：

1. 本年度對臺北港 SPT-N 鑽孔資料進行完整盤點，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，增加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，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。以 SPT-N 法液化潛勢成果顯示，臺北港區陸域約 459 公頃，當尖峰水平加速度 a_{max} 達 0.24 g 時，臺中港區陸域約有 70% 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。
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 PL 說明在特定情境下，臺北港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，本研究基於 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)。
5. 為提供未來臺北港港區快速震陷量評估使用，本研究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，建構臺北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，可做為災損評估分析之依據。
6. 本(112)年度更新各港區工業級電腦共 8 臺及高雄港之地震速報儀 1 臺；另外，也蒐集臺北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，並更新臺北港地震速報簡訊內容，完成各港區地震速報精進。

7. 震後快速液化災損評估訊息內容，以簡易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，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憑依。

7.2 建議

針對本計畫提出下列建議：

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，建議後續以各商港設計潮位與築港高程進行分析地下水位參數考量，可更貼近實際港區設計參數。
2. 相較臺中港 311 孔分析數量，臺北港僅有 148 孔分析資料，建議可持續蒐集更新鑽孔資料，精進分析成果。另外 112 年度引入之機率法可做為另一種可能產生液化災損之評估指標，可與定值法分析成果互補。
3. 計畫震後沉陷量估算主要考量自由場受震所產生體積應變，而 Macedo and Bray (2018) 提出建物應考量受震時基礎與承載地層受剪之沉陷量，建議後續可整合建物相關資訊，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臺北港之可用鑽探資料至 148 孔。
2. 完成符合國內耐震設計規範之液化評估法，進行臺北港港區全面性液化潛勢評估。
3. 完成推估臺北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. 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)」, 交通部運輸研究所, 2003。
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. 羅宇軒、彭錦法、周忠仁、陳威宏 (2020),「彰化縣土壤液化潛勢分析及中級圖資製作探討」, 第 18 屆大地工程研討會, 屏東墾丁。

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)」, 港灣技術研究中心研究報告。
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)」, 港灣技術研究中心研究報告。
16. 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」, 交通部運輸研究所, 2023。
17. 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」, 交通部運輸研究所, 2021。
18. 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」, 交通部運輸研究所, 2022。
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. Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Thompson, E. M., Seed, R. B., Cetin, K. O., Kiureghian, A. D., Tanaka, Y. and Tokimatsu, K. (2013). “Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, pp. 407-419.
42. Ishihara, K. (1996). “Soil behaviour in earthquake geotechnics.” Oxford Univ Pr, ISBN:0-19-856224-1.
43. Bray, J. D. and Macedo, J. (2017). “Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, pp.215-231.
44. 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.

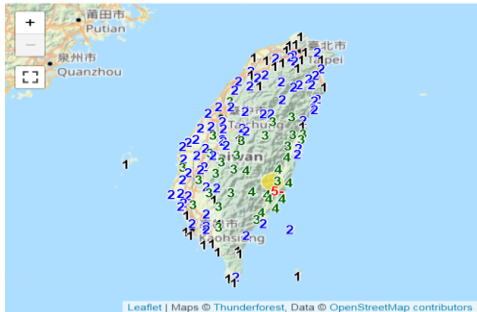
附錄一

112 年各港區地震資料比對

1.臺北港

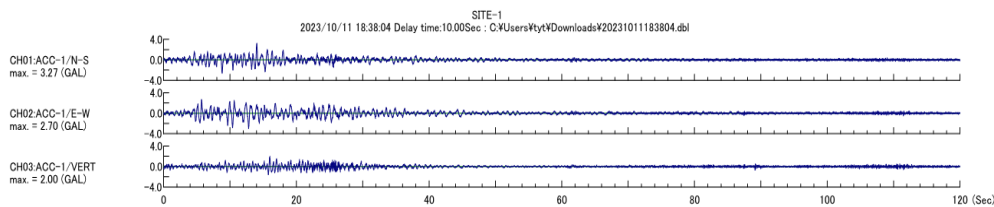
氣象局

第070號 10月11日18時36分 規模 5.8 花蓮縣政府南南西方 88.2 公里 (位於花蓮縣卓溪鄉)



第070號
發震時間：112年10月11日 18時36分57秒
震央位置：北緯 23.27 ° 東經 121.24 °
地震深度：14.5 公里
芮氏規模：5.8
相對位置： 花蓮縣政府南南西方 88.2 公里 (位於花蓮縣卓溪鄉)

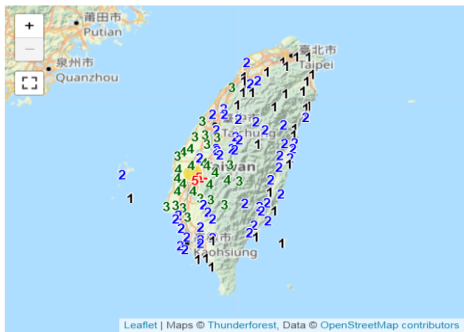
速報



2.臺中港

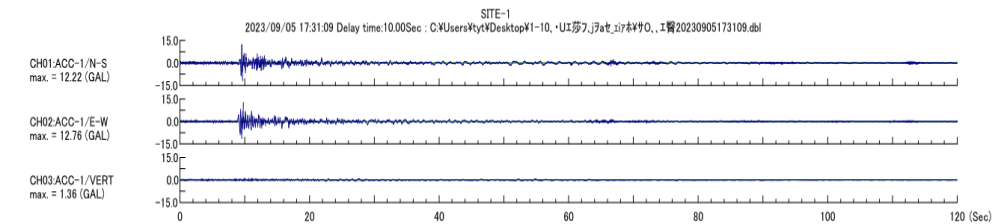
氣象局

第065號 9月5日17時30分 規模 5.5 嘉義縣政府東北方 13.2 公里 (位於嘉義縣新港鄉)



第065號
發震時間：112年9月5日 17時30分41秒
震央位置：北緯 23.53 ° 東經 120.39 °
地震深度：8.5 公里
芮氏規模：5.5
相對位置： 嘉義縣政府東北方 13.2 公里 (位於嘉義縣新港鄉)

速報



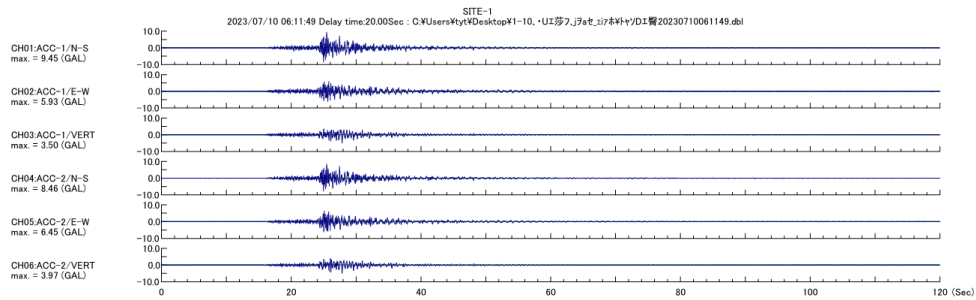
3.蘇澳港

氣象局

第051號 7月10日6時11分 規模 5.3 花蓮縣政府西北西方 12.8 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)



速報



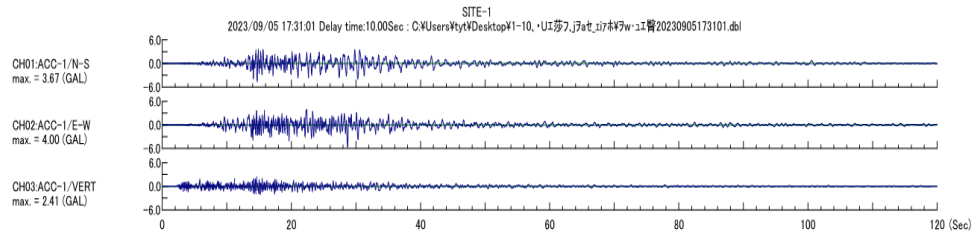
4.安平港

氣象局

第065號 9月5日17時30分 規模 5.5 嘉義縣政府東北方 13.2 公里 (位於嘉義縣新港鄉)



速報



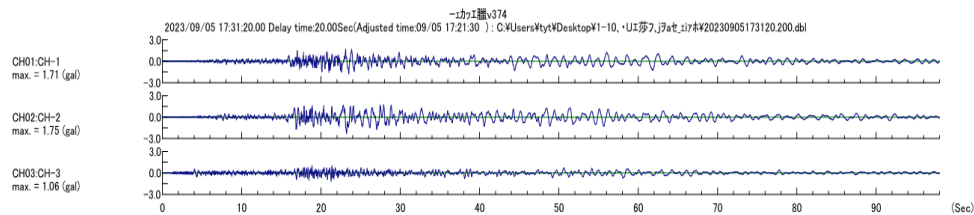
5.高雄港

氣象局

第065號 9月5日17時30分 規模 5.5 嘉義縣政府東北方 13.2 公里 (位於嘉義縣新港鄉)



速報



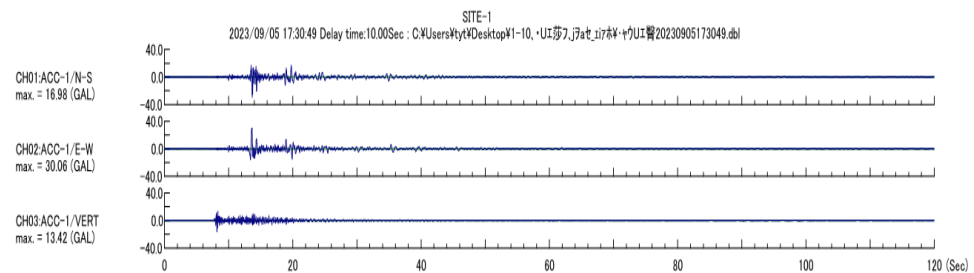
6.布袋港

氣象局

第065號 9月5日17時30分 規模 5.5 嘉義縣政府東北方 13.2 公里 (位於嘉義縣新港鄉)



速報

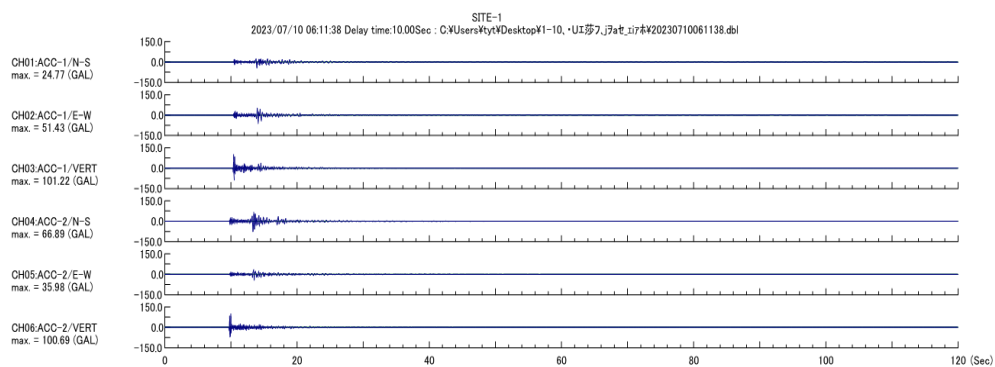


7.花蓮港
氣象局

第051號 7月10日6時11分 規模 5.3 花蓮縣政府西北西方 12.8 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)



速報

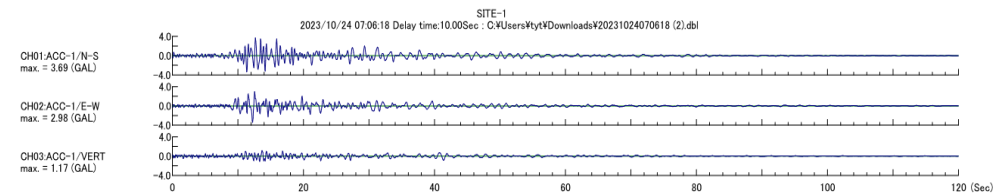


8.基隆港
氣象局

第076號 10月24日7時5分 規模 6.2 花蓮縣政府東方 102.2 公里 (位於臺灣東部海域)



速報



附錄二

專家學者座談會會議紀錄

交通部運輸研究所臺灣技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所臺灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：112 年 4 月 24 日(星期一) 下午 2 時

參、地點：本所臺灣技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：賴俊呈

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

一、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(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

1. 鼎型塊排列方式亦會影響沖刷深度，建議可探討。
2. 是否有設置現場水位及流速監測設備？
3. 本工法設置於橋墩 P24L 有淤積之效果，保護成效如何量化？

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

1. 透地雷達 AI 辨識，需要大量資料進行訓練、測試。
2. 目前深度學習以 CNN 為主，故可做圖像識別。
3. 若要即時識別，建議需建置雲端運算。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異辨識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 邊坡多尺度主要針對那些圖像？將會影響其適用性、實務應用。
2. 邊坡影像是以處理前/後為基準資料進行學習？

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 本計畫以碳鋼金屬於大氣曝露下做腐蝕關聯性探討，如何應用於鋼筋混凝土及鋼構。
 2. 腐蝕劣化因子如何回饋至實務構件？
- (五) 港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業
- 港區為地上物、水中物如何即時回饋、即時影像？
- (六) 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進
- 港區大多為回填土層，是否有相關監測如水位計、地下土壤含水量及土壤層次監測。

二、 謝委員明志

港研中心一科 112 年 6 項自辦計畫，在計畫書裡每個計畫的緣起、目的、研究範圍、利害關係人、工作內容及作業時程，都有詳實的描述，是一份架構完整，描述清晰的計畫書。

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析
- 本計畫是橋梁沖刷數值模型建置分析，分 4 年執行，是個循序漸進的計畫，規劃完整，且計畫完成後產出之三維水理分析模型具有實用性。
- (二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討
- 本計畫是透地雷達應用於省道巡查及 AI 辨識應用，為未來合作計畫的先期研究，藉此可先打下後續研究需求，更能明確知道目的及預期成效。
- (三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討
- 本計畫是空拍影像、深度學習在邊坡地貌變異判識之應用，符合交通部年度施政重點，引進新興科技，值得鼓勵。
- (四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

腐蝕環境與碳鋼金屬關聯性，為本土環境資料的調查，全臺灣只有港研中心有這類資料庫的建置，應持續推動。

(五) 港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

本計畫是港灣構造物巡查檢測作業精進，也引入新興科技，應用於巡檢及風險判識，是個值得鼓勵的研究業務。

(六) 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

本計畫是港區地震液化風險評估模式精進，針對臺北港進行評估，除了進行地工資料庫更新，也新增了這幾年國內外的液化分析方法，應會更加精確的推估，值得持續推動。

三、 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 (2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

本計畫成果產出之技術指引具有實用性，另地工織布之耐久性為何？

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

本計畫期待可擴及使用範圍至省道以外道路。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

本計畫之利害關係人建議增列各縣市政府。

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

本計畫建議其成果提供交通部技監室辦理橋梁相關設計規範訂定之參考。

四、 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 (2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 本計畫是多年期的計畫，在第 1 年的計畫即與高公局中區分局大甲工務段密切的配合，在國道 3 號大甲溪橋現場設置鼎型塊織布橋基保護工法，目前已初步驗證有效減緩向下冲刷作用，尚待長期性觀測及超大豪雨事件來驗證，大甲工務段會持續配合本計畫。
2. 建議本計畫能擬訂鼎型塊織布橋基保護工法現場佈設的標準作業程序，讓現場佈設時有所依循。

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

無論省道或者是國道都是線型的，都有一定的長度，標的物很大，所以建議目標要收斂，比如說在行車舒適度不佳的路段做試驗，要收斂調查，這樣對道路主管機關來說會更有幫助。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探 (2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 無論是省道或是國道尚需注意路權以外的邊坡，路權外的邊坡產生變異(開發行為)間接影響到省道或國道的邊坡，因為邊坡是一體的，不會說崩塌到國道的路權內就不崩塌，所以建議本計畫需把路權外的邊坡狀況納入探討。
2. 另大甲工務段轄區亦有邊坡場址，例如：後龍至苑裡路段，可提供本計畫做為探討的標的，或是若需要相關空拍圖資進行分析和訓練，也可洽詢大甲工務段提供、合作。

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

大甲工務段所轄管國道是最靠近海邊，若是本計畫有需要到大甲工務段的轄區來設置觀測站(點)，大甲工務段樂意配合。

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

附錄三

第 1 次工作會議紀要

112 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

時間：112 年 6 月 28 日(星期三)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所港灣技術研究中心 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(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 三維數值水理分析及文獻蒐集情形說明。
2. 本年度試驗區 UAV 第 1 次地形觀測辦理情形說明。
3. FLOW 3D 教育訓練辦理情形，及三維數值模型初步建置情形說明。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

1. 蒐集並研析交通部公路總局(研究對象)省道養護巡查作業相關規定、柔性路面鋪面損壞分類、現象及原因。
2. 透地雷達應用於「地下埋設物及不明物體調查」、「地下水位深度及含水量變化探測」及「人工智慧辨識透地雷達訊號圖像」相關研究之文獻回顧。
3. 112 年 3 月 21 日訪談交通部公路總局陳進發總工程司，瞭解研究對象在政策面上對本計畫的看法及提供相關意見。

4. 112 年 5 月 24 日訪談交通部公路總局第一區養護工程處陳俊堯處長，瞭解研究對象在管理面上對本計畫的看法及提供相關意見。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探
(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 蒐集彙整國內外 AI 應用於邊坡之相關文獻。

2. 辦理本案專家學者訪談。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗，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 111 年第 4 季、全年與 112 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. 精進及擴充臺灣腐蝕環境分類資訊系統資料庫，完成 111 年度大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗資料綜整分析並繪製等位圖，並將相關資料擴增於「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫，並公開於本中心網站供外界查詢。

3. 完成撰寫及出版「2022 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。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 彙整港區各型式碼頭的巡檢項目。

2. 彙整與探討碼頭常見的劣化項目。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 彙整液化評估法相關文獻。

2. 蒐集臺灣港務股份有限公司於臺北港近 10 年新建工程所增加之地質鑽探資料。

3. 蒐集經濟部中央地質調查所於臺北港之地質鑽探資料。

4. 初步完成臺北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(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 討論文獻所提數模參數敏感性分析，其背景條件與本計畫之差異及適用性。
2. 討論渠槽試驗除規劃使用 GoPro 縮時攝影外，可增加其它監測設備，如流速計。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探

1. 討論訪談透地雷達領域之業界專家，蒐集業界對於本計畫執行及 AI 智慧化判識應用之看法。
2. 討論後續於「AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像可行性探討」章節中，如何蒐集 AI 訓練之相關資料及建立 AI 訓練資料庫。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 討論邊坡原始資料取得、資料處理方法及 AI 模型建置於後續的實務應用。
2. 討論 AI 監督式學習、非監督式學習及半監督式學習優缺點。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 討論工業區碳鋼金屬腐蝕與二氧化硫關聯性。
2. 討論金屬腐蝕與腐蝕因子關聯性相關文獻。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 討論碼頭維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。
2. 討論各港之碼頭構件劣化項目。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 討論土壤液化評估相關方法。

2. 討論地質鑽探資料盤點、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(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

(一)試驗區 UAV 觀測航拍活動於今年度 4 月初獲民航局申請許可，申請期間一次為 3 個月，迄今即將到期，請提醒委外廠商儘早再提出下一段申請，以避免下次豪大雨事件後，無法進場航拍觀測，影響計畫執行。

(二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理。

二、透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

本計畫係為後續合作研究計畫的先期研究，需確認應用單位的需求、想法且要能落地應用。

三、多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

(一)建議依專家訪談提供之意見，於本計畫探討未來何種邊坡型式或破壞類型應用 AI 介入判識較具可行性和實務應用性，以利後續再以此為基礎進行深入探究。

(二)若時間允許建議可針對公路總局及轄下工程處、工務段、高速公路局和相關利害關係人等皆安排進行訪談，藉以瞭解實務需求和後續研究著力點，達以終為始之目的。

四、112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

(一)建議找出金屬腐蝕與大氣腐蝕因子氯鹽、二氧化硫間的關聯性。

(二)後續建立碳鋼金屬與環境因子迴歸模式時，建議說明模式中各環境因子對金屬腐蝕的影響是否符合腐蝕理論。

五、港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

- (一)建議統計並分類各型式碼頭構件的劣化項目，瞭解碼頭常見的損壞構件，提供後續碼頭維護的參考數據。
- (二)建議彙整各港區特別巡查的構造物遭撞損的意外事故資料與劣化項目。

六、港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

- (一)今年針對臺北港進行液化評估，除進行地工資料庫更新，也建議運用近年來國內、外的液化分析方法，推估臺北港液化範圍及深度，提供地震速報之應用。
- (二)請於第 2 次工作報告時，呈現今年新增臺北港區的地質鑽探資料，其新、舊資料之分佈區域，以利瞭解其分佈是否能滿足臺北港區液化評估之需求。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

貳、時間：112 年 6 月 28 日(星期三) 上午 9 時

參、地點：本所港灣技術研究中心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
本所港灣技術研究中心第一科	研究員 研究員 副研究員 研究員 研究員 副研究員 助理研究員	謝幼屏 胡哲了 黃子遠 曾文傑 張道光 鄭登鍵 賴俊星 王浩翔 顏碩香
本所港灣技術研究中心第二科	科長	李信賴
本所港灣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

112 年 8 月工作會議紀要

採購/自辦案件編號：

會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

時間：112 年 8 月 28 日(星期一)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所港灣技術研究中心 2 樓簡報室

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(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 112 年度前 3 季現場試驗觀測結果說明。

2. 三維數值模型建置情形。

3. 後續工作項目說明。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

1. 探討透地雷達如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查及其可行性。

2. 訪談交通部公路總局(以下簡稱公路總局)第二區養護工程處彰化工務段陳禎康段長及中華大學土木工程系林鎮華助理教授之摘要說明。

3. 後續工作項目說明。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探

(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 探討邊坡破壞類型及遙測技術適用性。
2. 彙整公路邊坡維管機制與訪談公路邊坡維管單位。
3. 後續工作項目說明。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

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。
2. 進行碳鋼金屬腐蝕關聯性統計分析。
3. 後續工作項目說明。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 檢討碼頭設施維護管理制度與構件劣化標準。
2. 新興科技行動應用程式應用於碼頭巡檢作業。
3. 後續工作項目說明。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 建置臺北港地質鑽探資料，並盤點、篩選可用資料共 148 筆地質鑽探資料。
2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。
3. 後續工作項目說明。

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(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

1. 討論三維數值分析結果，提供橋梁維管單位應用之方式。
2. 補充三維數值模型建置之模型尺寸及穩定沖刷時間說明。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探

1. 討論透地雷達可以檢測探查之道路下潛在損壞因素，除了孔

洞外，尚可檢測探查路基問題、回填材料問題、地下水及滲漏水等問題。

2. 討論不同廠牌透地雷達檢測後所輸出的訊號圖像，對於後續 AI 智慧化辨識的影響。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探
(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 討論訪談公路邊坡之實務單位看法及需求。
2. 討論後續 AI 切入實務應用之方向及目標。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 討論以迴歸分析法進行碳鋼金屬腐蝕與環境因子關聯性分析過程中的相關考量。
2. 討論教育訓練辦理方式，以及在網站上展示的腐蝕成果。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施
巡查檢測作業

1. 有關維護管理制度定期檢測與詳細檢測的探討。
2. 討論行動應用程式應用在碼頭巡檢作業。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 討論土壤液化評估相關方法。
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(2/4)-橋基沖刷
數值模型建置與分析

- (一)請儘速辦理部務會報相關資料簽報作業，另創新提案請妥為準備以爭取佳績。
- (二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理。

二、透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

- (一)透地雷達可以檢測探查道路下潛在損壞因素不只有孔洞，建議

可以針對公路養護手冊所列的柔性鋪面損壞樣態進行探討，探討透地雷達檢測切入的可行性。

- (二)本計畫研究對象是公路總局，主要應用對象是道路主管機關，建議可以將研究成果投稿至公路相關的期刊。

三、多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

- (一)過去訪談多針對公路總局，亦可針對交通部高速公路局進行訪談，藉以瞭解實務需求和應用遙測技術於邊坡巡查之機制。
- (二)本研究可針對不同尺度空拍影像後續如何結合 AI 應用之方向進行整理探討和適用性分類。

四、112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

- (一)在建立碳鋼金屬與環境因子迴歸模式的分析過程中，若模式配適度不佳，可考慮同時納入氯鹽、二氧化硫，或採用分季資料分析等不同方法來改善模式。
- (二)進行迴歸模式校正時，可補充說明變數轉換、模式轉換的理由依據。

五、港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

後續請再探討新興科技應用於碼頭巡檢作業之設施構件劣化度判定標準之適用性，並增加與比較新興科技之應用案例。

六、港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

- (一)請使用最新的臺北港配置現況圖資，以利後續臺北港液化風險評估分析。
- (二)下次工作會議請補充液化風險評估 Cetin 機率法，以利瞭解機率分析與定值分析之差異處。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：112 年 8 月 28 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所港灣技術研究中心2樓簡報室

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
本所港灣技術研究中心	副主任	柯正光
本所港灣技術研究中心第一科	研究員 研究員 助理研究員 副研究員 副研究員 研究員 研究員	曾文榮 胡曉了 賴俊星 鄭唯鍵 黃育瑞 張道光 謝必昇
本所港灣技術研究中心第二科	科長	李俊穎
本所港灣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

112 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 112 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：112 年 10 月 27 日(星期五)下午 2 時至 5 時

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(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 112 年度前 3 季現場試驗觀測結果。

2. 三維數值模型建置情形-矩形樁基礎+鼎型塊，矩形樁基礎+鼎型塊+織布。

3. 階段性成果應用。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

1. 透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查可行性及落地應用對策。

2. 應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像的可行性。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 公路邊坡維管機制與流程彙整。

2. 公路邊坡結合 AI 之加值應用。

3. 空拍影像處理技術。

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 112 年第 1~3 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作。

2. 碳鋼金屬腐蝕關聯性統計分析。

(五) 港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 依維護管理制度執行碼頭巡檢作業時所遭遇之問題。

2. 新興科技行動應用程式與水下無人載具應用於碼頭巡檢作業。

(六) 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 臺北港不同地震情境下液化潛勢分析。

2. 臺北港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布。

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(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

1. 織布具透水性，建議可將織布分離成幾小塊來模擬透水性。

2. 數值軟體雖無對應之保護工模組可應用，但利用土中應力增加方式來近似模擬，其模擬結果與試驗結果接近，說明具有其可行性，後續可再諮詢相關專家。

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初探

1. 透地雷達檢測省道柔性鋪面於經常性或重複性損壞路段之成因，相較採用現場直接開挖方式有其優勢。

2. 應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，在市售商業軟體及客製化專案研發方式之區別。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探

(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 訪談公路邊坡之實務單位看法及後續切入方向。
2. 後續年度工作內容及目標。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 碳鋼金屬腐蝕與腐蝕因子關聯模式建立後的模式說明、應用與推廣。
2. 探討臺灣不同環境下金屬腐蝕差異性的方法。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 碼頭巡檢作業時所遭遇問題。
2. 應用新興科技強化港灣構造物之巡查與檢測作業。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 臺北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(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

(一)國道 3 號大甲溪橋橋墩 UAV 航拍勞務案，若 11 月中旬時無預期之颱風消息，可於 11 月下旬著手辦理相關結案驗收事宜，以利主計年度結算作業執行。

(二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理，並如期完成提交期末報告初稿。

二、透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

(一)透地雷達檢測省道柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因具有一定的成效及優點，因此應用於省道養護巡查的「特別檢查」是具可行的且符合交通部公路局之需求。

(二)應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，目前在臺灣市面上有相關的商

業軟體可使用，但選擇性不多，也有依使用者需求進行客製化專案研發的方式，若要應用 AI 辨識道路下潛在損壞因素，則使用客製化專案研發的方式較為合適。

(三)本計畫為後續合作計畫的先期計畫，故對於後續合作計畫時程、內容等需詳加規劃考量，俾利能落地應用。

三、多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

(一)針對空拍影像之處理方法應考量不同尺度載具及其搭載儀器間的區別，並對本案欲蒐集之公路邊坡影像進行適用性探討。

(二)經處理之邊坡空拍影像如何挑選適當之 AI 深度學習模型進行訓練，以獲得較佳的結果，係本研究之精隨所在，建議於期末報告中強化敘述。

(三)今年度已針對交通部公路局和交通部高速公路局進行實務單位訪談，建議後續可依實務單位意見延續相關研究課題，以配合實務需求並結合現行邊坡巡檢之機制。

四、112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

後續研究可分區進行關聯性統計分析，探討臺灣各地區不同大氣環境、不同污染特性區域間的腐蝕差異性。

五、港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

請加強新興科技應用於碼頭的檢測與維護管理作業的精進說明，並請掌握時效撰寫研究成果報告。

六、港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估臺北港區之分區地震沉陷量，俾提供更新臺北港地震簡訊災況初評內容。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：112 年 10 月 27 日(星期五) 下午 2 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 助理研究員	黃子謙 謝少屏 張道光 曾文傑 胡哲文 賴俊呈
本所運輸技術研究中心第二科	副研究員	李俊穎
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(2/5)- 臺北港模式精進」

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)研究架構完整，採用之液化潛能與液化引致沉陷量評估法均具公信力，成果豐富，對港區防災具參考價值。	感謝委員肯定
(二)本研究液化潛能評估係依據耐震設計規範之規定設定尖峰地表加速度，但若基於災害風險評估與防治之角度，或可考慮另加入特定斷層發生特定規模地震之情境(如山腳斷層，可參考災害防救科技中心與國家地震工程研究中心之研究成果)。	目前本計畫主要依據規範建議之中小地震、設計地震與最大考量地震 3 種情境進行相關液化分析。若考慮加入特定斷層發生特定規模地震之情境，其工作將觸發液化之成因探討，並非本計畫規劃進行方向。
(三)分析時假設地下水位位於地下 1m 處，請加強說明假設依據，以及此假設是否屬保守。	因港區地下水受潮汐影響，地下水位數值無法仰賴監測成果進行分析，本計畫主要以地下水位 1m 應用於液化分析中，屬高地下水位狀況，依有效應力觀點($\sigma' = \sigma - u$)，分析成果應偏保守。後續計畫將考慮加入港區地下水位進行分析，以符合港區設計情境。
(四)部分文獻編號似有誤植(如 2-17 頁之圖 2.9 文獻年代為 2000 年，較早於該圖呈現之日本東北地震發生年份 2011 年)，請再檢查。	感謝委員指正，已修正參考文獻 Ashford et al. (2011)之年份。
(五)112 年甫公告之基礎構造物設計規範建議兩種液化引致沉陷量評估法，本研究目前	依統計觀點，為摒除港區部分 SPT 鑽探資料偏高與不具代表

採用其中一種(Ishihara and Yoshimine, 1992)，或可考慮兼採另一種(Tokimatsu and Seed, 1987)並比較之。	性的情境，因此採用低、中、高震陷量，探討港區具代表性震陷量值。而 HBF 與 NCEER 法震陷量分析差值，係液化評估方法差別導致(對於同一鑽孔相同深度，SPT-N 值相同)，無法直接以相同震陷量進行比較。
(六)圖 4.9 若有資料點部分重疊情況，可嘗試調整資料點大小以改善呈現效果，或者以文字說明所涵蓋點數；採用之震陷量公式型式若有參考依據建議列上。	感謝委員建議，已調整圖中數據點大小(參閱圖 4.9)。另外震陷量公式採用之迴歸方程式係依分析數據點分佈決定，以自然對數函數可取得較佳之 R^2 值。
二、 林炳森委員	
(一)港區地震後沈陷量評估成果豐碩，配合分階門檻加速度訂定速報簡訊依據，在工程實務上具有參考值，應持續進行。	感謝委員肯定
(二)本研究需修訂部份如下： 1. 英文摘要之研究成果效益與應用第 1. 項內容，建議重新翻譯。 2. P. 3-1 臺北港應改為新北市。 3. P. 4-11，圖 4-9，應列出 R^2 。	1. 已依委員建議，重新翻譯英文摘要。 2. 已依委員意見進行修改。 3. 感謝委員建議，已增列 R^2 值。
(三)p. 6-8，除高雄、臺北港外，還有哪些港？	明(113)年預計進行高雄港液化風險評估模式精進，另外也會精進布袋港地震速報設備。
(四)p. 7-1 結論，應列出精進之成果。	已依委員建議，增列精進之成果。
三、 謝明志委員：	
(一)本研究針對臺北港收集歷年來現地 SPT 資料，並利用不同液化分析模組推算港區液化潛能及地震下陷量，是份實務與理論兼具的研究報告。	感謝委員肯定
(二)本研究比對過去中心的相關研究，除了	感謝委員肯定，將持續新增各

新增加的回填新生地分析範圍外，並新增 106 孔的鑽孔 SPT 試驗資料更符合目前現地狀況，可供港務單位做為防災及相關規劃參考。	港鑽孔資料，以達符合臺灣港務公司需求。
(三)本研究以 VBA 開發的分析模組與國震中心開發的分析模組，在輸入相同的鑽孔 SPT 資料下，所得每一深度的 PL 值一致，顯示兩邊所撰寫的 HBF 分析程式完全一致，也表示本研究的模組確實可用。	感謝委員肯定
(四)本研究較中心過去的液化分析，新增大量的新生地資料收集，進行地震影響評估，可更準確的提供港區地震速報訊息，供臺灣港務公司於強震後做為緊急應變參考使用。	感謝委員肯定，將持續提供更準確的港區地震速報訊息，供臺灣港務公司參考應用。
四、 李俊穎副研究員	
(一)文獻回顧內建議放入港灣技術研究中心前期地震速報相關研究。	中心前期地震速報相關研究，於報告書第 1-7 頁表 1-1 已羅列完整成果。
(二)今年度將地震速報接收的資料放在中華電信雲端上提供本所及港務公司系統介接使用值得肯定，建議持續精進上傳資料的準確性。	感謝委員肯定，將持續精進上傳資料的準確性。
(三)地震速報已提供簡易資訊外，後續可再考量透過連接方式，提供更完整監測數據或分析圖資。	地震速報設備的功能為發送簡訊，目前地震速報接收資料已放在中華電信雲端上，提供本所及港務公司系統介接，未來將考量其他系統透過連接方式，提供更完整監測數據或分析圖資。
(四)臺北港部分作業區因鑽孔無詳細報告排除於分析中，建議未來可與港務公司商量增加缺少區域鑽孔資料。	目前臺灣港務公司已提供臺北港所有鑽孔資料，未來將增加新鑽孔資料，以達符合臺灣港務公司需求。

五、 蔣敏玲副研究員	
(一)報告中有時用「台」(如頁 1-1、3-1 等)有時用「臺」,另部分用詞「港研中心」(頁 1-7...、6-1、6-8 等)請修改。	已依委員意見進行修改。
(二)「海氣象及應變即時系統」已更名為「商港海氣象資訊系統」(如頁 6-1)報告書提及該系統請修改。	已依委員意見進行修改。

附錄七
期末報告簡報資料



112年度自辦計畫

港區地震液化風險評估模式精進(2/5) -臺北港模式精進 期末簡報



報告人: 曾文傑



112年12月 21 日

1

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 → 臺北港液化潛勢分析成果
- 五 → 臺北港震陷潛勢分布
- 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

第6案：港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

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年完成臺中港區地震液化風險評估模式精進，112年(今年)基於去年研究成果，針對臺北港新建工程所增加之地質鑽探資料，持續進行臺北港區地震液化風險評估模式精進。
- ✓ 推估臺北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臺北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基隆港務分公司，防救災與工程維管單位人員。

4

二、研究項目與內容

5

第6案：港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

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，以及蒐集建立臺北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。
- ✓ **推估臺北港港區液化風險**
 - 以臺北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，進而推估臺北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**拜會臺灣港務公司基隆港務分公司、經濟部中央地質調查所**，蒐集、盤點、篩選港區內具代表性之可用地質鑽探資料，並建立臺北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。
- ✓ 以臺北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，進而推估臺北港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

6

第6案：港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

預期成果、
效益及
應用

✓ 預期成果(效益)

- 完成蒐集建立臺北港港區新建工程地質鑽探資料。
- 完成臺北港港區液化潛勢評估分析。
- 完成推估臺北港港區針對不同等級地震發生之液化風險。

✓ 應用

- 提供臺北港港區地震安全評估相關資訊，可做為臺灣港務公司及基隆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。
- 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

第6案：港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

辦理時程
甘特圖
(WHEN)

工作項目	112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.推估臺北港港區液化風險												
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. 112.4.30前召開專家學者座談會 2. 112.6.30、8.31、10.31前辦理工作會議 3. 112.11.30前完成期末報告初稿 4. 112.12.15前完成期末報告審查 5. 112.12.31前完成報告書修訂/簽陳印製 6. 113.2.28前完成報告書出版											

8

第6案：港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

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

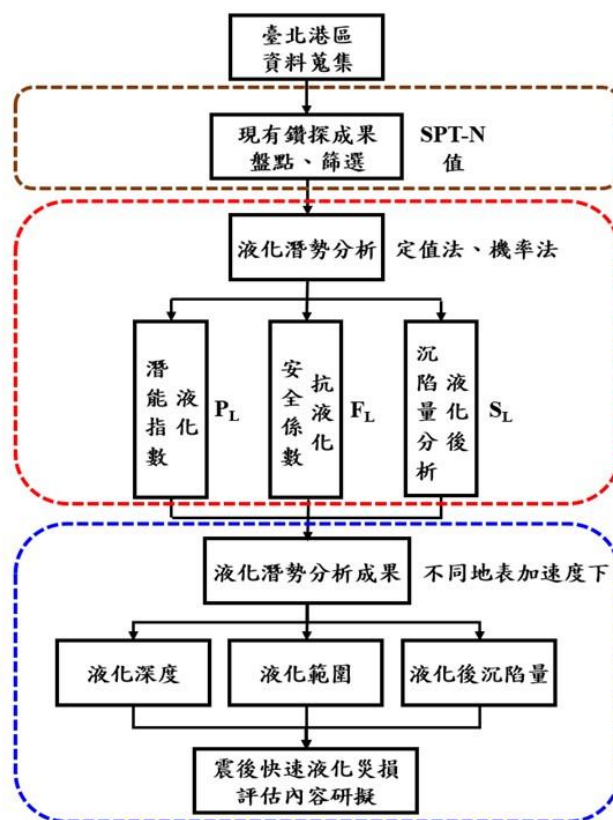
9

工作流程圖

1. 資料蒐集

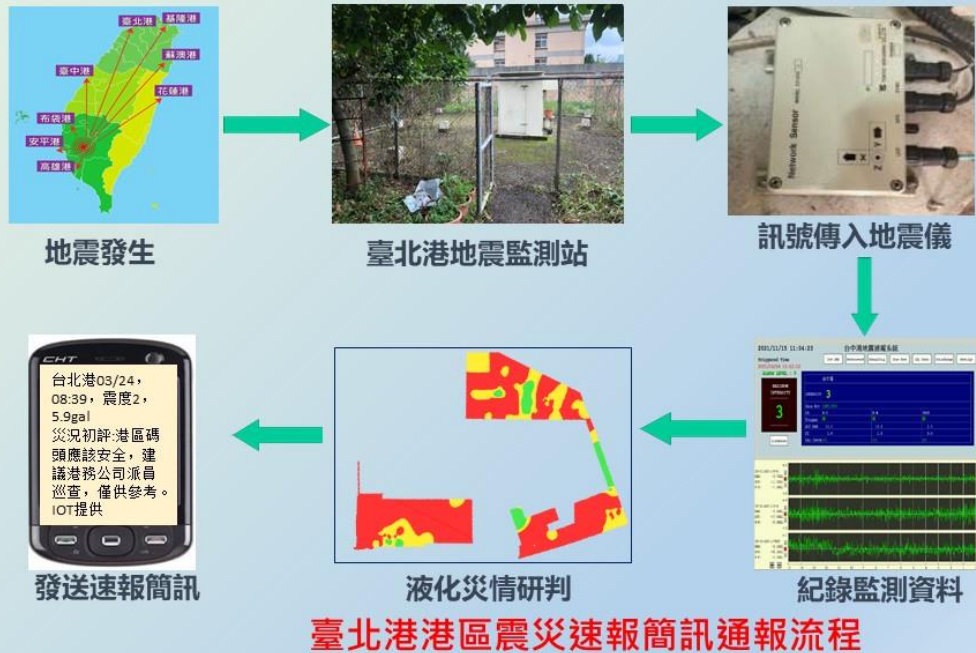
2. 液化分析

3. 液化潛勢



10

第6案：港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進



11

三、土壤液化文獻回顧 及分析方法

12

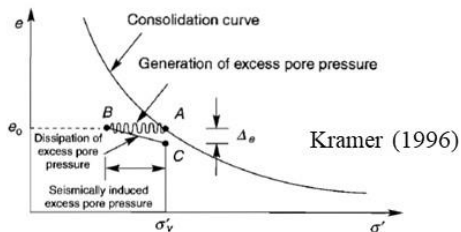
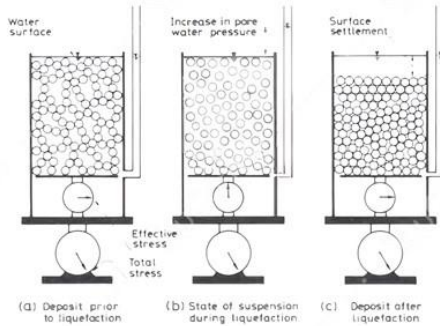
土壤液化

Principal of Effective Stress:

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

Key component: Pore Pressure Generation

土壤液化機制 Ishihara (1985)



Kramer (1996)

2016年美濃地震台南民宅災損



13

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

14

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)。
- HBF法之液化潛勢分布趨勢與其他三者最為一致。

➤ 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: $F_L = \frac{CRR}{CSR}$

15

以SPT-N為指標之Cetin機率法

- 綜合Seed et al. (1985)分析資料庫與1984年後300筆資料
- 採機率式液化評估分析可就重要性與經濟性選擇適當評估
- 同時進行定值(deterministic)與機率(probabilistic)分析

➤ 液化機率 PL: 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

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

➤ 阻抗 Resistance:

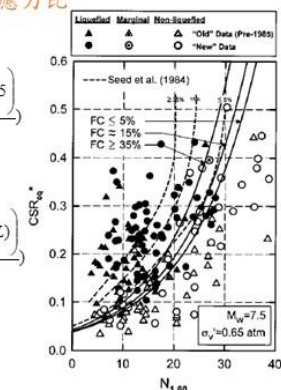
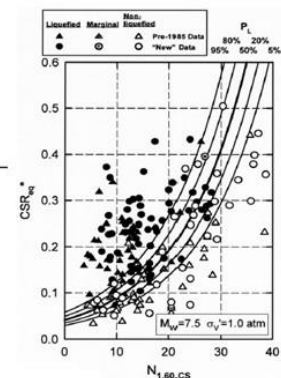
$$CRR = \exp\left(\frac{N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.05 \cdot FC + 16.85 + 2.70 \cdot \Phi^{-1}(PL)}{13.32}\right)$$

FC: 細粒料含量百分比

$\Phi^{-1}(0.15) = -1.03643$

P_L : 液化機率(=0.15)

M_w : 地震規模



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 =depth in m $0 \leq z \leq 20$

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

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

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

17

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：

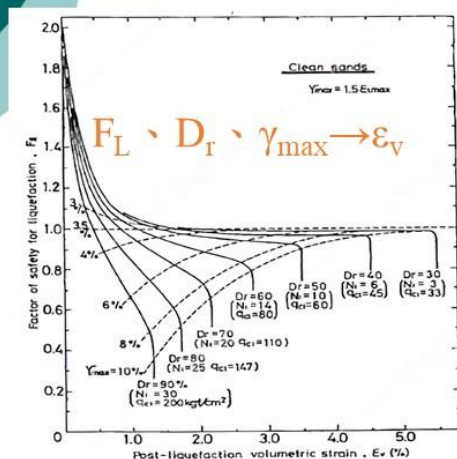
$$D_r = 16\sqrt{(N_1)_{78}} = 14\sqrt{(N_1)_{60}}$$

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 $\gamma_{\max}$ ，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 ，採紀雲曜(1997)之迴歸方程式：

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



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

18

四、臺北港液化潛勢分析成果

19

臺北港現況

➤ 臺北港配置圖(臺灣港務公司110年版本)



20

不同臺北港圖資與現況說明

- Google Map



- 臺灣通用電子地圖(內政部國土測繪中心)



- Google衛星
(圖資更新年份：2023年)



挑選Google衛星
作為後續分析底圖

21

臺北港現有液化分析成果

可能鑽孔資料來源：
1. 港研中心地工資料庫
2. 港務公司文獻報告
3. 地調所地質資料庫

- 台北港區74孔SPT鑽探資料位置圖(運研所，2004)

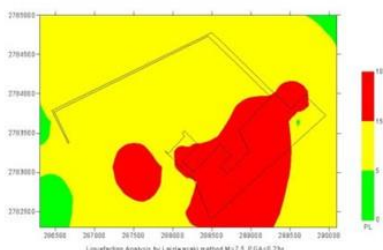


圖 7-7 台北港區地震引致土壤液化之危害度 ($M_w=7.5, A_{max}=0.23g$)
類(2002)安全係數法+Iwasaki(1982)深度加權法

- 臺北港規畫專業分區有所變化
- 原地工資料庫鑽探資料待更新
- 111年度臺中港液化潛勢與沉陷量分析架構進行雙指標評估分析

液化潛勢+沉陷量

22

分析範圍與補充SPT鑽探資料盤點



<112年度-補充資料>

S01: C-新北市八里區下厝子段下厝子小段557等4筆地號V2

S02: 臺北港倉儲區第一期公共工程

S03: 臺北港物流倉儲區第二-1期公共設施工程及公共建築工程陸上地質鑽探調查

S05: 臺北港北1及北2碼頭(含登船廊道)新建工程

S06: 臺北港南碼頭A填區新生地地質改良工程

S07: 臺北港南碼頭C填區公共設施暨永久護岸工程地質鑽探

參考前期計畫(111年度)資料篩選條件：

1. 鑽探深度 $\geq 10\text{m}$ ，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。
3. 具有座標資訊。
4. 具有FC值 (Silt + Clay, %)。
5. SPT值施作間隔為固定規律，指定深度內皆有N值。

資料來源	原始資料	初步盤點資料
港研中心地工資料庫	72 孔	42 孔
港務公司鑽探報告	152 孔	118 孔
合計		160 孔

23

S05: 臺北港北1及北2碼頭(含登船廊道)新建工程

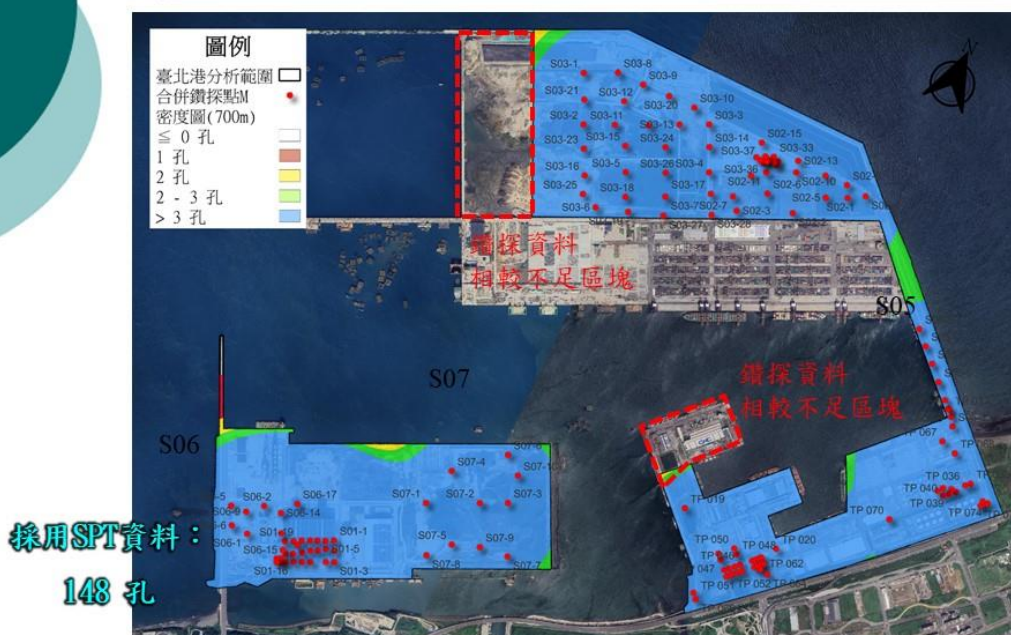
S06: 臺北港南碼頭A填區新生地地質改良工程

S07: 臺北港南碼頭C填區公共設施暨永久護岸工程地質鑽探

因部分孔位無詳細鑽探報告檔，排除於後續分析中

臺北港區鑽探熱點圖

排除S01-9、S05、S06與S07部分鑽孔，共12孔

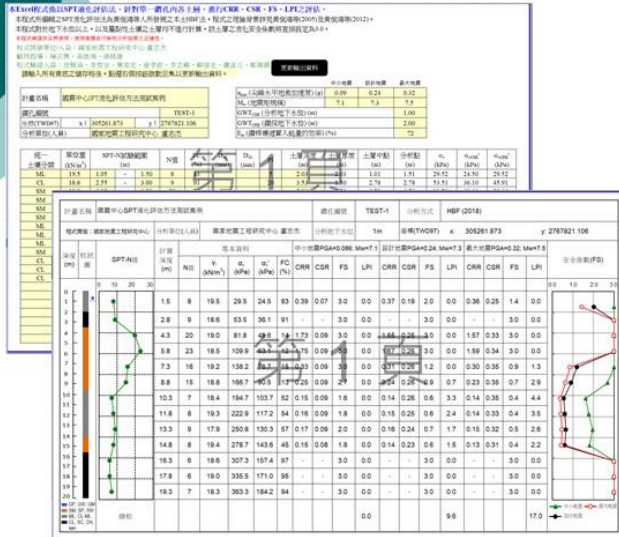


液化評估程式

資料來源	本計畫使用資料筆數
港研中心地工資料庫	42 孔
港務公司鑽探報告	106 孔
合計	148 孔

148 孔

國震中心液化評估程式(需手動操作)



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**

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

$$\text{設計地震：} A = 0.4S_{DS} g$$

$$\text{最大考量地震：} A = 0.4S_{MS} g$$

建構自動化分析程序



25

臺灣規範反應譜查詢介面(國家地震中心)

Alpha Version 1.0 = 臺灣地區工址水平加速度反應譜查詢 =

Step1: 決定震區水平譜加速度係數

選擇工址位置: 縣市 [新北市] 鄉鎮市區 [八里區] 里 [訊塘里]

震區水平譜加速度係數: 設計地震力 (回歸期475年) S_{DS} [N.C.] S_{D1} [N.C.] 最大考量地震力 (回歸期2500年) S_{MS} [N.C.] S_{M1} [N.C.]

Step2: 決定近斷層調整因子

選擇近斷層: 鄰近第一類活動斷層 請於左表點選欲分析之斷層名稱, 並輸入工址與斷層之間最短距離: [] 公里 [查詢]

近斷層調整因子: 設計地震力 (回歸期475年) N_A [N.C.] N_V [N.C.] 最大考量地震力 (回歸期2500年) N_A [N.C.] N_V [N.C.]

Step3: 決定工址放大係數

選擇地盤分類: 工址地盤分類 [臺北盆地微分區-臺北2區] (若不知請輸入土層平均剪力波速 V_{s30} [] m/s)

工址放大係數: 設計地震力 (回歸期475年) F_a [N.C.] F_v [N.C.] 最大考量地震力 (回歸期2500年) F_a [N.C.] F_v [N.C.]

Step4: 計算工址水平譜加速度係數

工址水平譜加速度係數: 設計地震力 (回歸期475年) S_{DS} [0.6] S_{D1} [0.78] T_0^* [1.3] 最大考量地震力 (回歸期2500年) S_{MS} [0.8] S_{M1} [1.04] T_0^* [1.3]

Step5: 繪製反應譜圖

加速度反應譜圖: 選擇反應譜圖型 [] 設定座標屬性 [週期間距: 0.01 X-linear, Y-linear 圖型不重疊]

繪製反應譜圖: [繪製反應譜圖] [清除全部反應譜圖] [儲存反應譜圖值] [儲存反應譜圖] [放大圖型查詢]

工址頻譜加速度: $S_{DS} = 0.6, S_{MS} = 0.8$

Spectral Acceleration, S_a (g) vs Period, T (sec.)

11

臺北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:

$$\text{中小地震: } A = \frac{0.4S_{DS}}{4.2} g \cong 0.06 g$$

$$\text{設計地震: } A = 0.4S_{DS} g = 0.24 g$$

$$\text{最大考量地震: } A = 0.4S_{MS} g = 0.32 g$$

2. 液化評估與檢核

土層液化與否，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：

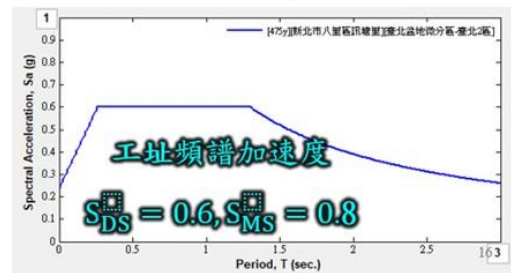
$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (11-1)$$

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。



27

以國震中心HBF法液化分析程式

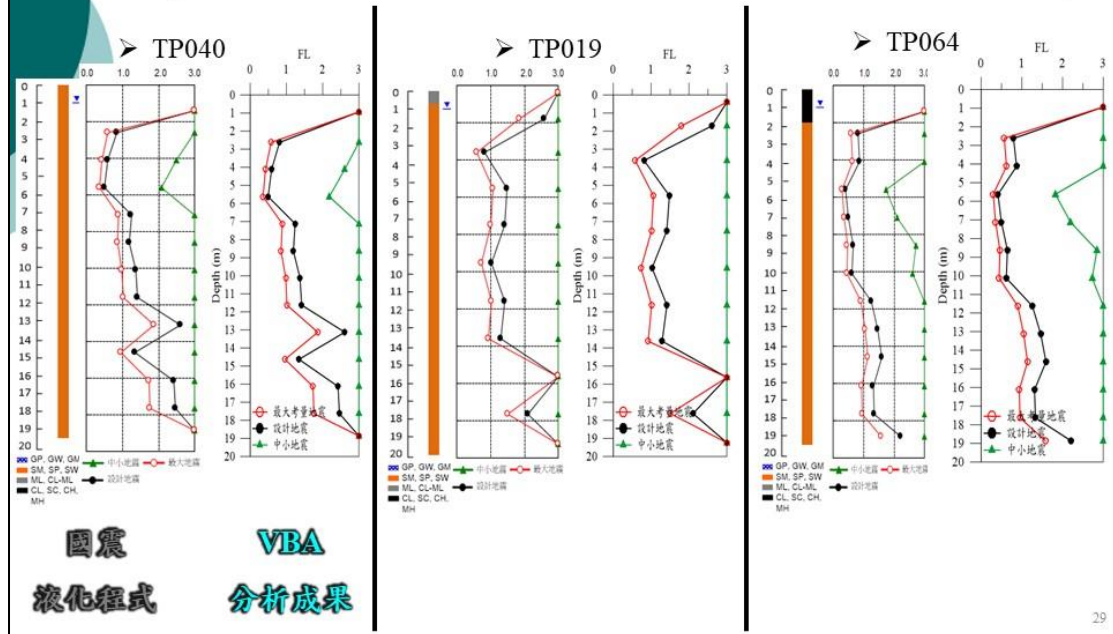
與前期(111年度)計畫開發之VBA程式進行比較

HBF法安全係數FS抽測比較(1/6)



28

HBF法安全係數FS抽測比較(2/6)



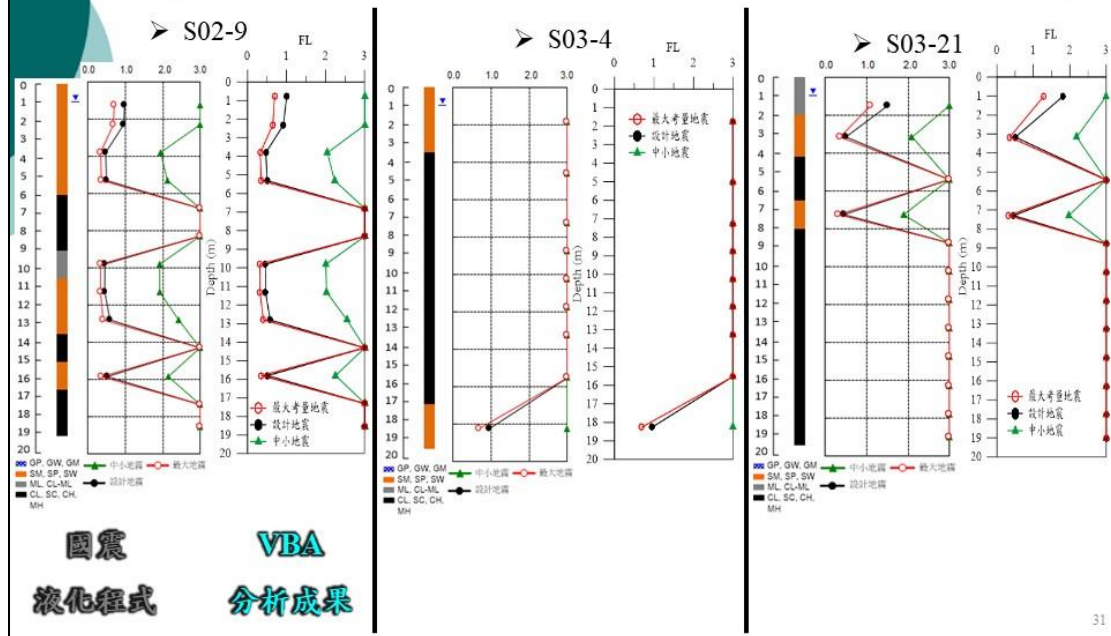
29

HBF法安全係數FS抽測比較(3/6)



30

HBF法安全係數FS抽測比較(4/6)



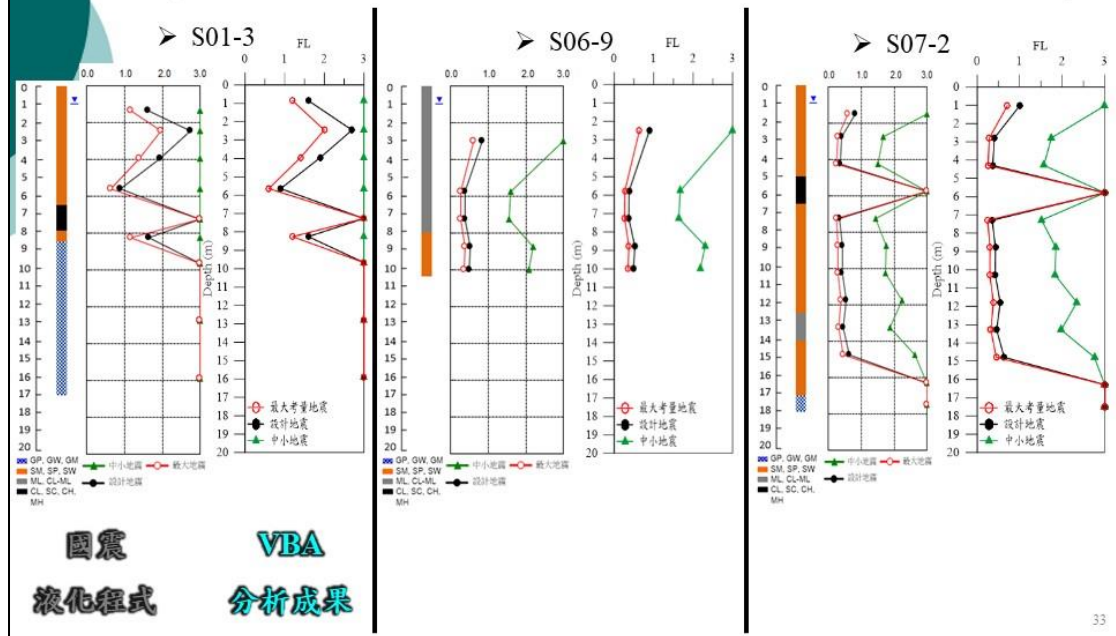
31

HBF法安全係數FS抽測比較(5/6)



32

HBF法安全係數FS抽測比較(6/6)



空間數值內插方法 (IDW法)

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

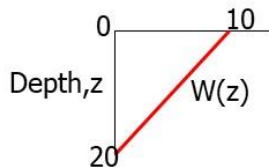
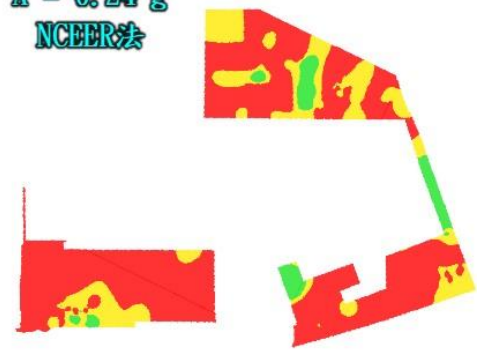
→利用鄰近已知點的數值加權，推估目前位置的變數值。

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

► 液化潛能 P_L 計算成果

Project	P_L	Category
1. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
2. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
3. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
4. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
5. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
6. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
7. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
8. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
9. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
10. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
11. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
12. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
13. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
14. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
15. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
16. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
17. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
18. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
19. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
20. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
21. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
22. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk
23. 台北港外港防波堤工程	0.00000000	Very low risk

$A = 0.24 g$
NCEER法



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

圖例

液化潛勢 P_L (Iwasaki, 1982)

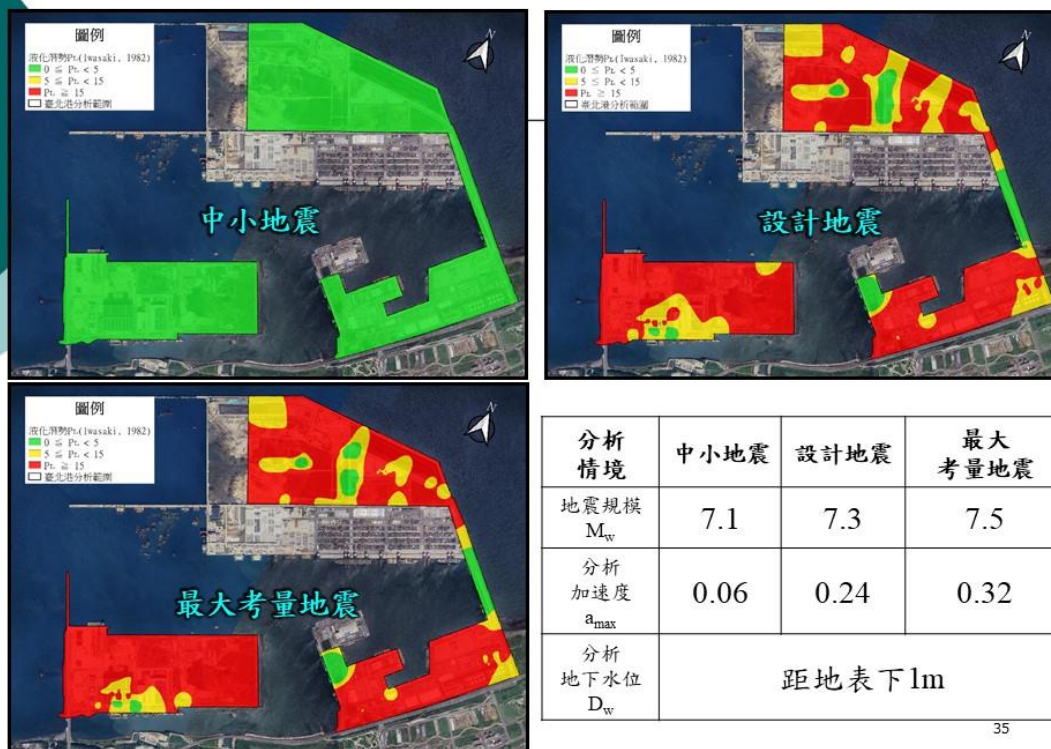
≤ 5

5 - 15

> 15

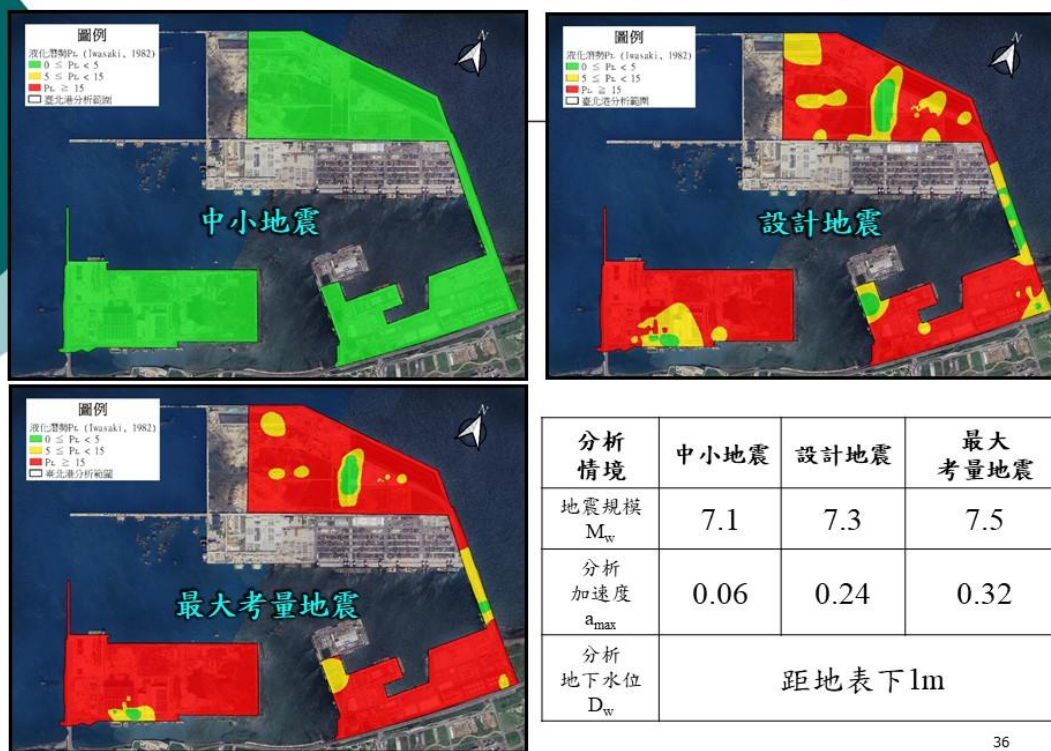
台北港分析範圍

不同地震情境下液化潛勢比較(NCEER法)



35

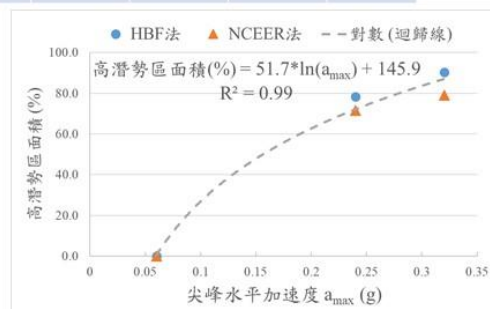
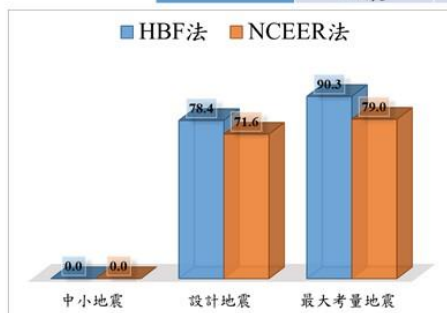
不同地震情境下液化潛勢比較(HBF法)



36

臺北港定值法液化潛勢區面積佔比

簡易 評估法	地震情境	地震 規模 M_w	尖峰 水平 加速度 $A(g)$	面積佔比(%)		
				低潛勢 區	中潛勢 區	高潛勢 區
HBF 法	中小地震	7.1	0.06	100.0	0.0	0.0
	設計地震	7.3	0.24	4.8	16.8	78.4
	最大考量 地震	7.5	0.32	2.0	7.7	90.3
NCEER 法	中小地震	7.1	0.06	100.0	0.0	0.0
	設計地震	7.3	0.24	6.2	22.2	71.6
	最大考量 地震	7.5	0.32	5.1	15.9	79.0



37

鑽孔液化機率PL加權說明

Φ : Standard cumulative normal distribution function

► 液化機率 PL (Cetin et al., 2004):

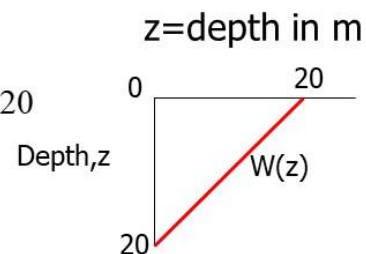
考量SPT-N值、地震規模、反覆剪應力比、覆土應力與細粒料含量

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

- 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。

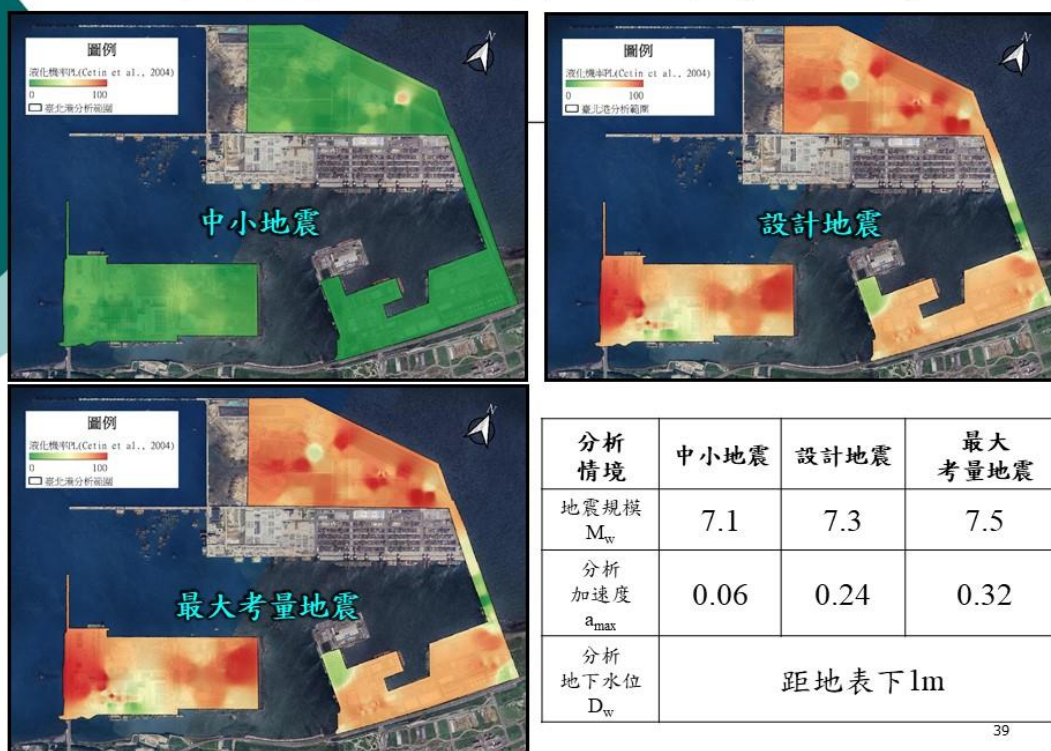
$$\text{鑽孔液化PL} = \frac{\int_0^{20} PL(z)w(z)dz}{\int_0^{20} w(z)dz} \quad 0 \leq z \leq 20$$

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

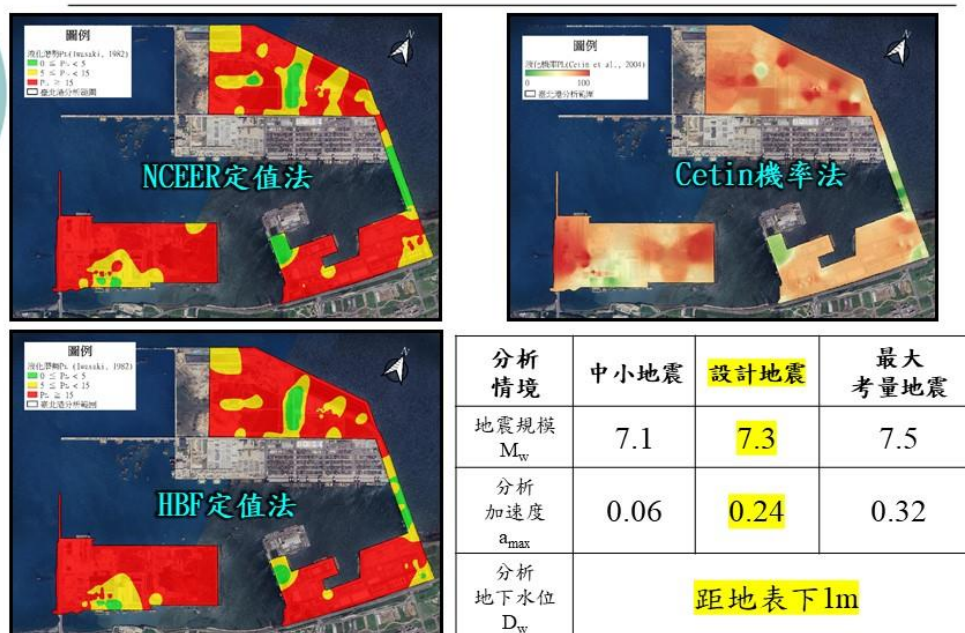


38

不同地震情境下液化機率PL比較(Cetin法)



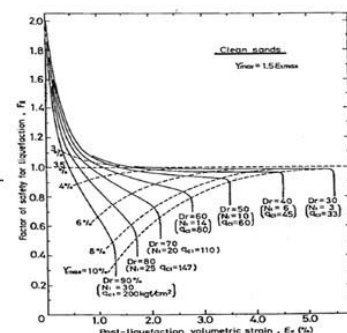
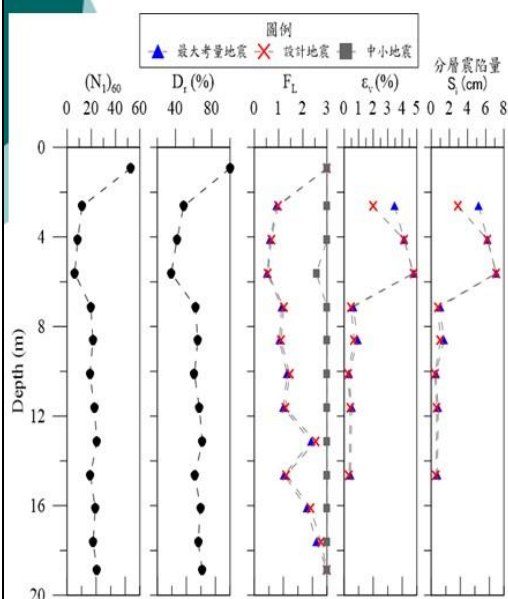
定值法與機率法液化潛勢比較 (以設計地震情境進行探討)



五、臺北港震陷潛勢分布

41

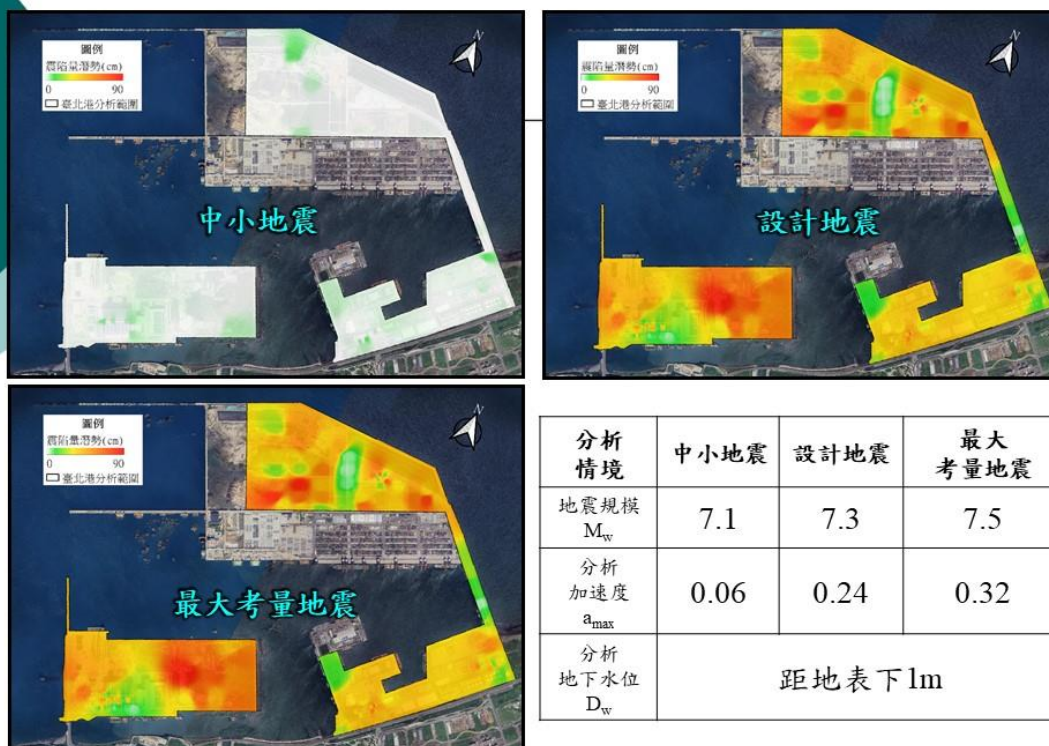
SPT鑽孔震陷量計算成果 (鑽孔名稱：TP040, NCEER法)



- 震陷量計算僅考量自由場受震產生之體積應變。
- 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。
- 震陷量 S 對應中小地震、設計地震與最大考量地震，分別為0.0 cm、19.6 cm與22.8 cm。

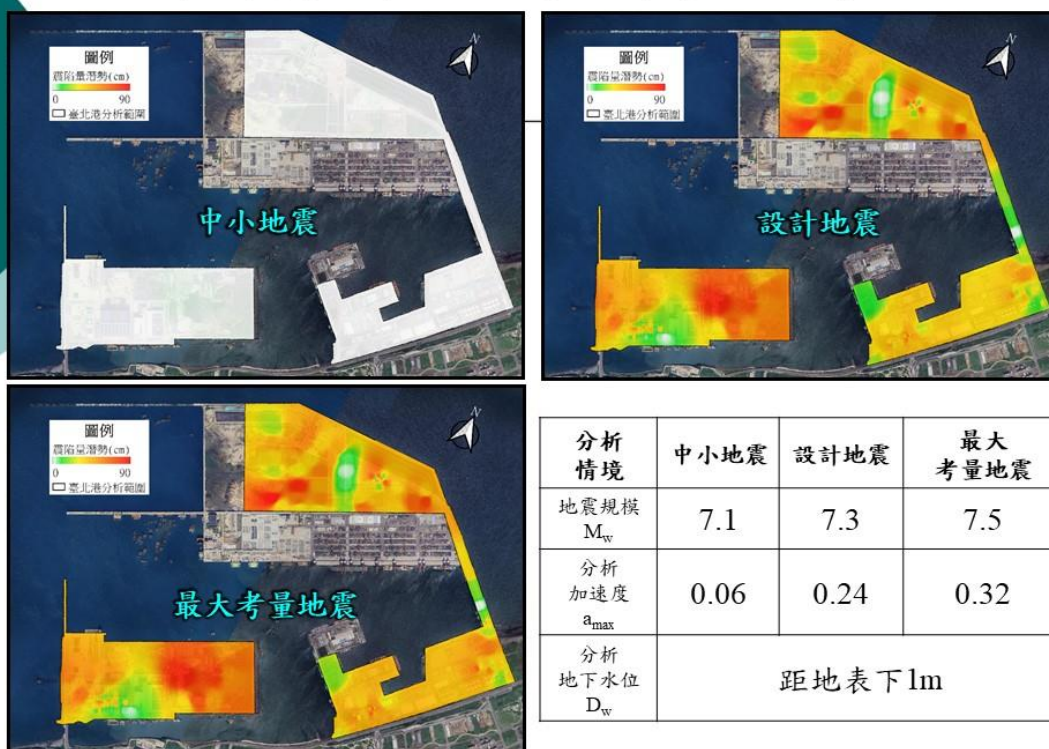
42

不同地震情境下震陷潛勢分布(NCEER法)



43

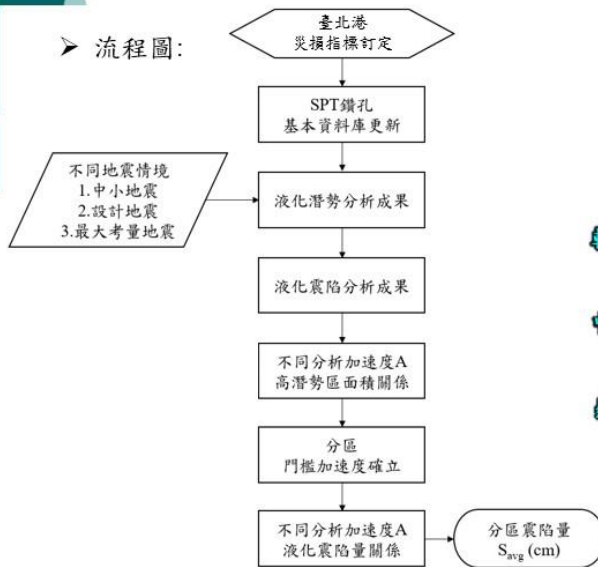
不同地震情境下震陷潛勢分布(HBF法)



44

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

➤ 流程圖：



➤ 震陷量S與災損等級分類
(Ishihara, 1996)

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

45

震後快速液化災損評估訊息

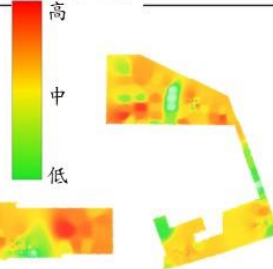
地震加速度歷時



震陷量評估方法：Ishihara and Yoshimine (1992)



震陷量潛勢



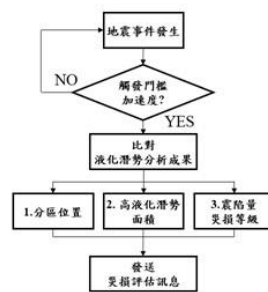
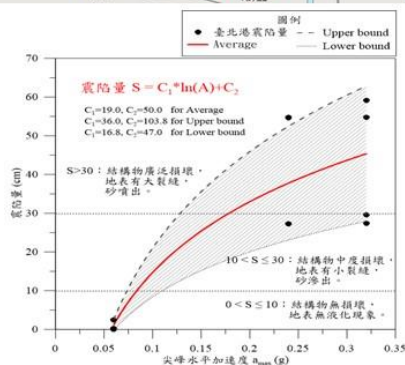
SPT-N簡易評估法

NCEER法

 $\Delta = 0.06g$ 中小地震

$\Delta = 0.24g$ 設計地震

$\Delta = 0.32g$ 最大考量地震



分區門檻值確立

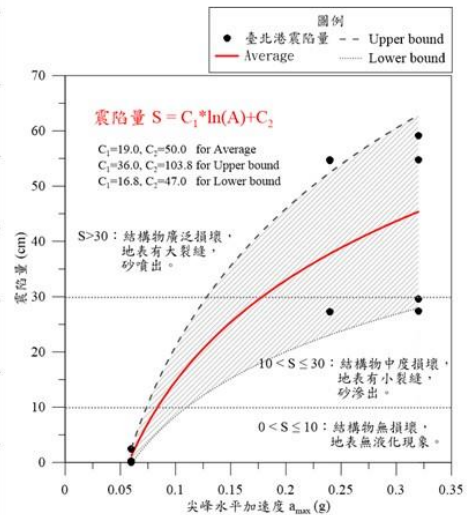
46

臺北港震陷量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

✓ 臺北港震陷量經驗公式:

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	7.1	0.06	0~0.2 cm (84.8%)	0.2~0.5 cm (12.7%)	0.5 cm以上 (2.6%)
	設計地震	7.3	0.24	0~27.3 cm (16.9%)	27.3~54.6 cm (64.7%)	54.6 cm以上 (18.4%)
	最大考量地震	7.5	0.32	0~29.6 cm (15.3%)	29.6~59.1 cm (69.4%)	59.1 cm以上 (15.3%)
NCEER法	中小地震	7.1	0.06	0~2.5 cm (96.9%)	2.5~5.0 cm (3.1%)	5.0 cm以上 (1.0%)
	設計地震	7.3	0.24	0~27.3 cm (17.3%)	27.3~54.7 cm (65.4%)	54.7 cm以上 (17.3%)
	最大考量地震	7.5	0.32	0~27.4 cm (16.4%)	27.4~54.8 cm (65.8%)	54.8 cm以上 (17.8%)

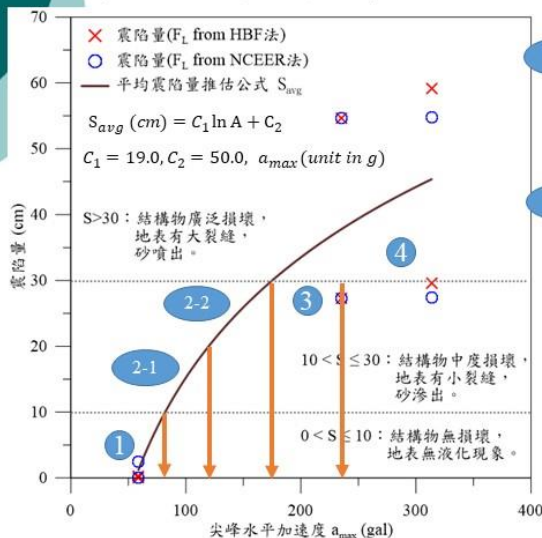


47

臺北港震後快速液化災損評估研擬成果

PHASE:

✓ 臺北港液化震陷評估成果:



1 0-81 gal, 臺北港災況初評: 港區碼頭應該安全。(TIPC提供)

2-1 82-120 gal, 臺北港災況初評: E1、E7、E8、E13、E18、S1號碼頭，S7、S8碼頭後線多功能區、N7碼頭後線第二期倉儲區地表可能有輕微裂縫，請派員巡查。(TIPC提供)

2-2 121-174 gal, 臺北港災況初評: E1-E12、E20、S1-S6、S8-S9號碼頭，與N3-N5第一期倉儲區、N7-N8碼頭後線第二期倉儲區地表可能有小裂縫，請派員巡查。(TIPC提供)

3 175-234 gal, 臺北港災況初評: 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)

4 235 gal以上, 臺北港災況初評: 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)

48



六、結論與建議

49

港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

結論：

- 彙整港研中心地工資料庫、港務公司鑽探報告，更新SPT鑽孔數至148孔。
- 研究以HBF法與NCEER法進行臺北港液化潛勢分析，兩方法潛勢分布相近，惟HBF法液化潛能PL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，港區自由場震陷量變化範圍約為0~90 cm。
- 以分區門檻加速度設定，計算對應震陷量，搭配現地地震監測站，可作為災損評估簡訊傳送內容之憑依。

50

港區地震液化風險評估模式精進 (2/5)-臺北港模式精進

建議

- 相較臺中港311孔分析數量，臺北港僅有148孔分析資料，建議可持續蒐集更新鑽孔資料，精進分析成果。機率法可作為另一種液化潛勢評估指標，與定值法分析成果互補。
- 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。

51

簡 報 結 束
敬 請 指 導

52