臺中港區地震液化風險評估模式之精進-以 HBF 法 及 NCEER 法評估

曾文傑¹ 賴俊呈²

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心研究員 ²交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

摘要

本研究延續交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)前期「港灣地區地震監測與土壤液化潛能評 估之研究」成果,針對臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)管轄之臺中港區,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。

以更新的 311 孔鑽探資料,針對臺中港區進行液化風險評估以及精進液化分析方法,於原 有液化評估法中,加入我國建築物耐震設計規範及國際間採用之液化評估方法;包括以 SPT-N 為指標之 NCEER 法及國家地震研究中心(以下簡稱國震中心)之 HBF 法。所得成果係臺中港腹 地以不同地震規模下的最大水平地表加速度分析液化危害度(液化潛能指數 P_L),可提供地震後 快速評估液化災損及液化範圍之依據。

一、前言

1.1 研究緣起與目的

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)及因液化引發承載力破壞(bearing capacity failure)、地表沈陷 (subsurface settlement)、側潰(lateral soreading)及沉箱式基礎位移等災害,相關案例,如 1995 年 Kobe 地震後港區液化(JGS, 1996)^[10]、1999 年土耳其 Kocaeli 地震後臨海區液化(Bray and Sancio, 2006)^[11]與 1999 年 921 地震後臺中港區 1 至 4A 號碼頭液化沉陷^[1]等。臺中港港區地層構造多為 沖積土層與海埔新生地,在強烈地震作用下,可能再度發生液化現象,造成港灣設施、房屋與 地下管線等基礎設施,發生沉陷、傾倒、側潰等災損。

爰此,本研究延續運研所前期「港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估之研究」成果,針對 臺中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,透過探討國內、 外液化評估方法,瞭解臺中港區在不同地震規模下可能之液化風險,提供港務公司及臺中港務分公司於港埠設施維護管理之應用參考。

1.2 研究方法

本研究針對臺中港區進行液化潛勢分析,分別使用以 SPT-N 為指標之 NCEER 法^[12]及國震中心 HBF 法^[2],針對近年所蒐集之地工資料,重新分析在不同地震規模下液化土層發生深度與範圍,輔助港務公司防災管理人員,啓動相關巡查與檢視,整體研究方法,如圖1流程圖所示。



二、土壤液化評估相關文獻回顧

本節就國內外相關之液化評估方法敘述如下:

2.1 土壤液化安全評估

土壤液化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,除需考慮土壤本身之抗液化能力外,亦需考慮地震發生之規模 與各地實際發生之震度,依據「建築物耐震設計規範及解說」,土層是否液化,由抗液化安全係 數 FL值決定之,其定義如公式(1)所示:

 $F_L = \frac{CRR}{CSR}....(1)$

式中 CRR(Cyclic Resistance Ratio)為土層抗液化剪力強度比,除可依各液化評估方法進行估算 外,亦可透過室內試驗方法求得,而 CSR(Cyclic Stress Ratio)為地震引致土層之平均反覆剪應 力比,其計算如公式(2):

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{\nu_0}}{\sigma'_{\nu_0}} \times \gamma_d....(2)$$

式中A為最大水平地表加速度,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 a 為地震時 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。

2.2 土壤液化評估方式[3]

現有之土壤液化評估方法眾多,大致上可分為解析法(理論或數值分析)及簡易分析法(經驗 或半經驗公式)兩種。基於液化評估之解析法,通常須透過複雜的電腦程式進行運算,因此工程 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分,第一部分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 CSR, 第二部分則是估計土層之抗液化強度(以反覆剪應力比表示)CRR,可由後述兩種方式取得,1.室 內試驗法:取現地不擾動土樣於室內進行動態強度試驗直接求得、2.現地經驗法: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經驗曲線。 SPT-N 法為目前工程界評估液化最常使用的方法,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 值外,另藉由劈管取樣所得之 土樣進行物理試驗,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,多以 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 被使用的方法有 NCCER 法、HBF 法、Tokimatsu 與 Yoshimi 簡易經驗法、日本道路橋協會簡 易經驗法及 Liao 液化機率分析方法,本研究使用方法係為 NCCER 法、HBF 法,其說明如下:

 NCEER 法: NCEER 法源自 Seed et al. (1985)^[14]提出之簡易評估法,歷經 1997 年(Youd and Idriss,1997)^[15]與2001年(Youd et al.,2001)^[12]兩個版本,於美國國家地震工程研究中心(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 簡易經驗評估法係為 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,Youd et al. (1997)將 Seed et al. (1985)之圖解法進行迴歸加以公式化,以便撰寫計算方程式,該分析流程再經美國 土壤液化專家於研討會中討論後,由 Youd 等人(2001)整理後提出。NCEER 法(2001)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所示。抗液化安全係 數 F_L,分別估算 CSR 與 CRR 評估土層是否液化,其中γa係為地震時剪應力沿地層深度方 向之折減係數,其計算如公式(3):

$$\gamma_d = \frac{(1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1 - 0.4177z^{0.5} + 0.0572z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^{1.5})}....(3)$$

式中 z 為深度,單位為公尺(m),其餘參數皆屬迴歸係數。而 CRR7.5 係在地震規模 7.5 時土 層之抗液化剪力強度比,其計算如公式(4):

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

式中 x 為考慮土壤細粒料含量影響之修正 N 值(N₁)_{60,es}= α + β (N₁)₆₀,其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 F_L 值之計算,並配 合 Iwasaki et al. (1982)^[13]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 P_L 值。



圖 2 NCEER 法(2001)液化評估法之分析流程圖^[7]

2. HBF法:本方法係參考 Seed et al. (1985)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 300 多筆(Cetin et al., 2000)^[16]外,更增加國內 1999 年 921 地震案例 300 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)^[2]。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 公尺以内,且位於地下水位以下之飽和土層。

(2) 塑性指數 Ip 小於 7 之土層。

當抗液化安全係數 FL值小於 1.0 時,即判定該土層可能液化。整體分析流程如圖 3 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, 其中地震時剪應力沿地層深度方向之折減係數計算如公式(5):

 $\gamma_d = \begin{cases} 1.0-0.01z & (z \le 10m) \\ 1.2-0.03z & (10m < z \le 20m) \end{cases}$ (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,CRR 計算如公式(6):

 $CRR = CRR_{7.5} \times MSF.....(6)$

式中 CRR7.5 係在地震規模 7.5 時土層之抗液化剪力強度比,其計算如公式(7):

$$CRR_{7.5} = 0.08 + \frac{0.0035 \times (N_1)_{60cs}}{1 - \frac{(N_1)_{60cs}}{39}}.$$
(7)

式中(N1)60cs為考慮土壤細粒料含量影響之修正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)考量 20 公尺內深度範圍之液化潛能分析,計算液化潛能指數 PL 值。



圖 3 雙曲線函數(HBF)液化評估法之分析流程圖^[7]

2.3 土壤液化風險評估

Iwasaki et al. (1982)考量土層深度對液化之影響,提出以土層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 P_L(liquefaction potential index)來表示土壤液化潛勢,圖4為P_L之計算說明示意圖,P_L計算如公式(8):

 $P_L = \int_0^{20} F(z) W(z) dz....(8)$

式中 F(z)為特定深度抗液化安全係數 FL與安全係數 1.0 之差值,其計算如公式(9); W(z)為深度 修正因子,其計算如公式(10):

 $F(z) = 1 - F_L(z)$(9)

W(z) = 0.5(20 - z)....(10)

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)比較多個液化與非液化場址之液化潛能指數 PL值,歸納出 PL=15 時,為大部分液化與非液化場址之分界線,因此,提出 3 個液化風險等級,分別為輕微液化 $(0 \le P_L \le 5)$ 、中度液化 $(5 \le P_L \le 15)$ 與嚴重液化 $(P_L > 15)$,做為土壤液化風險評估之依據,但液化潛能指數與液化發生機率之物理意義並不相同,目前國震中心提出之 TELES 系統與中央地調所進行之全國液化潛勢圖調查,皆採用 Iwasaki et al. (1982)之液化潛能指數 PL來區分液化風險程度。



圖 4 液化潛能指數 PL計算說明^[13]

三、臺中港區液化潛勢分析

臺中港區地質多屬疏鬆軟弱之沖積土層及水力抽砂回填之海埔新生地,目前共配置 14 個 專業區(如圖 5 所示),1999 年 921 大地震時,臺中港區量測到 PGA 約為 0.16g,依據運研所震 後於臺中港區進行災況調查,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,導致舖面崩裂與凹陷等災害,震後港區多處受損,依調查結果顯示,嚴重 破壞區域多為水力回填區^{[1]。}

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」3 個等級。初級圖資主要做為大面 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 1/25,000; 中級圖資之土壤液化潛勢,則做為都市防災、都市更新規劃的應用,比例尺約為 1/3,000;高級 圖資則視開發單位需求,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 分為三個等級,分別為: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 5 臺中港區各專業區配置圖_(資料來源:臺灣港務股份有限公司網頁)

圖 6 為中央地調所公布鄰近臺中港區之土壤液化潛勢圖資,可發現港區大部分屬於中、高 潛勢區,可說明此區域受震產生災損之風險極高,而對於臺中港此類重要公共設施,其圖資精 確度與後續應用仍有待精進。因此本研究已完整蒐集之 SPT 鑽探試驗資料,進行不同地震規模 情境之液化分析,建構臺中港區完整液化潛勢分析成果,做為港務公司評估液化災損之依據, 以下就臺中港區液化分析參數、資料分布與不同方法之液化分析成果,依序進行說明:



圖 6 臺中港區液化潛勢圖資(資料來源:中央地調所)

3.1 液化分析參數與資料說明

依據內政部營建署(2022)^[7]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 FL值,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-qc 法及 Vs 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)、 NCEER 法(Youd et al., 2001)與日本道路協會法(JRA, 1996)^[8],爰本研究之液化分析係參循規範 以 HBF 法與 NCEER 法進行。

建築物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進行評估。表1為該規範於不同縣市於土壤液化潛能評估中,建議使用之地震規模(Mw),臺中港位處臺中市梧棲區,因此後續分析分別以6.9、7.1與7.3之Mw,搭配中小地震、設計地震與最大考量地震進行地震規模修正因子之計算。另於抗液化安全係數FL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)。不同地震規模情境,最大水平地表加速度A應就分析工址之設計地震頻譜進行計算,其計算如公式(11)~(13):

$A = \frac{0.4S_{DS}}{4.2}g$ (for 中小地震)	(11)
$A = 0.4S_{DS}g$ (for 設計地震)	(12)
A = 0.4 <i>S_{MS}g</i> (for 最大考量地震)	(13)

其中 S_{DS}與 S_{MS}為工址水平譜加速度係數,可由國震中心開發之臺灣規範反應譜查詢介面中查 詢(如圖 7),後續主要以臺中市梧棲區之震區水平譜加速度係數進行液化分析,於分析中之最大 水平地表加速度 A,分別以 0.07g、0.28g 與 0.36g,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 2 所示。

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、屛東縣	6.7	6.9	7.1
澎湖縣、金門地區、馬祖地區	6.5	6.7	6.9

表1 不同縣市土壤液化分析建議之地震規模(資料來源:營建署·2022)



圖 7 國家地震中心臺灣規範反應譜查詢介面

表 2 臺中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	最大地震考量
地震規模 Mw	6.9	7.1	7.3
分析加速度 A	0.07	0.28	0.36

截至 112 年 3 月運研所地工資料庫之 SPT 鑽探資料數量為 168 孔,為完整進行臺中港區土 壞液化安全評估,本研究彙整港務公司提供歷年工程相關鑽探報告 134 份與中央地調所地質資 料庫(Geo2010)32 孔,鑽探資料來源與數量統計,如表 3 所示。為進行土壤液化分析,相關 SPT-N 試驗資料須符合以下條件:

1. SPT 試驗資料之鑽探深度需 ≥10 m。

2. 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。

- 由於簡化分析法係以乾淨砂做為基本資料庫,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)。
- 4. SPT 值施作間隔為固定規律,指定分析深度內皆有 N 值。

表 3 臺中港區 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
運研所 地工資料庫	168 孔	135 孔
港務 公司 鑽探報告	134 孔	135 孔
地調所地質資料庫	32 孔	21 孔
可用資料筆數		311 孔

依據上述條件,篩選出相關 SPT 鑽探可用資料,共計 311 孔鑽探資料,包括:運研所之地 工資料庫 135 孔,港務公司提供之鑽探報告 155 孔,中央地調所之地質資料庫 21 孔,其地理空 間之分布,如圖 8 所示。



圖 8 臺中港區不同來源之 SPT 鑽探資料分布情況

圖9為臺中港區 SPT 鑽探資料密度圖,本研究發現以2公里直徑範圍進行核密度估計(kernel density estimation)時,採用 311 孔之 SPT 鑽探資料大致可涵蓋臺中港陸域面積,圖中淺藍色代 表為 3.144 km²之範圍內包含至少4孔或以上之 SPT 鑽探資料。依照中央地調所 111 年修正之 土壤液化調查與風險評估計畫執行作業要點:「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4孔/km²鑽探為原則;非都市計畫範圍以2孔/km²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4km²鑽探1孔為原則」。由上可知,臺中港 區 SPT 鑽探資料之空間分布以港區中段部分可滿足鑽探配置需求,惟北側低度開發區與南側 電力專業區、工業專業區(I)較顯不足。



圖 9 臺中港區 SPT 鑽探資料密度圖

3.2 以 SPT-N 值進行臺中港區液化潛勢分析

本研究採用 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,可整合臺中港區安全評估圖資,以供後續應用。另港區 不同點位液化潛能指數 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做為權重參數,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能 指數 P_L 。

黃俊鴻等人(2012)提出之本土化 SPT-N 簡易評估法進行臺中港區液化分析,HBF 法分析 流程請參考圖 3,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,可計算土層抗液化安全係數 FL隨深度變化。研究搭配 Iwasaki et al.(1982) 提出之深度加權方法計算各 SPT 鑽孔之液化潛能指數 PL,空間內插方式呈現臺中港區不同分 析情境之液化潛勢圖資,以不同地震情境之地震規模 Mw 與最大水平地表加速度值 A(表 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,如圖 10 至圖 12。

本研究另外以國際常採用 NCEER 法進行臺中港區液化分析,其分析流程請參考圖 2, NCEER 法與 HBF 法差異主要在於抗液化剪力強度比 CRR 之基本資料庫不同與 CSR 中地震時 剪應力沿地層深度方向之折減係數計算方式不同。以 NCEER 法所完成的液化潛勢圖資成果如 圖 13 至圖 15。由不同液化潛勢圖資可發現,兩方法在臺中港區評估之低、中與高潛勢區分布 位置大致相同,在中小地震規模下(A=0.07g),港區陸域大部分屬於低潛勢區 (0≤PL≤5),其 液化風險等級屬輕微液化;在設計地震規模下(A=0.28g),港區陸域大部分則轉變為高潛勢區 (PL>15),其液化風險等級屬嚴重液化;而最大考量地震下(A=0.36g),臺中港陸域液化風險等 級同屬嚴重液化。



圖 10 中小地震下臺中港區液化潛勢圖(HBF 法)



圖 11 設計地震下臺中港區液化潛勢圖(HBF 法)



圖 12 最大考量地震下臺中港區液化潛勢圖(HBF法)



圖 13 中小地震下臺中港區液化潛勢圖(NCEER 法)



圖 14 設計地震下臺中港區液化潛勢圖(NCEER 法)



圖 15 最大考量地震下臺中港區液化潛勢圖(NCEER 法)

3.3 臺中港區受震液化潛勢分析說明

臺中港區曾進行多次液化安全評估,其分析方法、目的與成果應用皆異,圖16 至圖18 分 別為使用運研所地工資料庫之液化分析模組完成之液化潛勢圖資,液化分析方法採賴聖耀(2002) ^[9]之 SPT-N 法,並計算液化潛能指數 PL(Iwasaki et al., 1982),地震情境基本分析參數同表 2 不 同地震規模與分析加速度之設定,進行中小地震、設計地震與最大考量地震的液化潛勢分析。 比較 3.2 節成果可發現,當設定地震情境為設計地震時,港區陸域大部分屬中潛勢區,而北側 低度開發區甚至為低潛勢區,其成果與更新後之評估模式相異,成果偏向不保守。

而賴聖耀(2002)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)^[17]與 Kayen et al. (2013)^[18]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 FL 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,以下就更新液化評估模式之原因進行歸納:

- 因 2016 年美濃地震致使臺南地區產生嚴重液化災害,災害防救法第2條已明定土壤液化屬 天然災害範圍,建議臺灣各商港應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。
- 提高基本資料庫數量,以精進分析精確度。原運研所地工資料庫液化分析模組採用 SPT-N 鑽 探孔數為135孔,且集中於港區中間區段,盤點運研所資料庫、港務公司相關工程鑽探報告 與中央地調所地質資料庫後,提升臺中港 SPT-N 鑽探資料庫孔數至 311 孔。
- 3. 臺中港於 1999 年 921 地震時,測得最大水平地表加速度約 0.16g,港區於多處碼頭產生液化、 下陷、噴砂,導致舖面崩裂與凹陷等災害,而原分析模式於設計地震情境時(A=0.28g),陸域 大部分區域之評估成果仍屬中潛勢區,其成果較不保守。
- 透過不同地震情境之液化潛勢評估,可提供臺中港區不同最大水平地表加速度 A 之液化潛勢
 變化,成果可做為後續震後快速液化災損評估之依據。



圖 17 賴聖耀(2002)SPT-N 法於設計地震下臺中港區液化潛勢圖







圖 18 賴聖耀(2002)SPT-N 法於最大考量地震下臺中港區液化潛勢圖

綜合上述,重要商港有再次進行液化安全評估之必要,表6為歸納 3.2 節液化潛勢成果, 比較不同地震情境下,低、中與高潛勢區之面積佔比變化。如圖 19 所示,以臺中港區陸域約 2,903 公頃來說,當最大水平地表加速度 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=0.36 g),則高潛勢區面積佔比達 90%以上。以不同地震情境之最 大水平地表加速度 A 與臺中港高潛勢區佔比進行線性迴歸時,其成果如圖 20 所示,其判定係數 (coefficient of determination, R²)高達 0.99,可供地震災損面積評估使用。

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	6.9	0.07	100.0	0.0	0.0
	設計地震	7.1	0.28	1.6	13.9	84.5
	最大考量地震	7.3	0.36	0.5	1.9	97.6
NCEER 法	中小地震	6.9	0.07	98.8	1.2	0.0
	設計地震	7.1	0.28	0.6	18.1	81.3
	最大考量地震	7.3	0.36	0.5	8.3	91.2

表 6 臺中港區不同 SPT-N 簡易評估法液化潛勢區佔比



● HBF法 ▲ NCEER法 - - 對數 (迴歸線) 100.0 高潛勢區(%) = 58.4*ln(A) + 155.5 R² = 0.99



圖 20 臺中港區高潛勢區面積佔比與不同最大水平地表加速度關係

四、結論

臺中港為中臺灣航運門戶,依據港務公司簡介,臺中港目前擁有 58 座已營運碼頭,水域面 積約為 8,382 公頃,陸域面積約為 2,903 公頃,配置 14 個專業區,供能源、電力、鋼鐵、石化、 倉儲、物流、港埠服務與觀光遊憩等特定用途產業進駐,近年更做為風電產業專區與液化天然 氣專用港口,其重要性不可言喻。臺中港區曾進行多次液化安全評估(臺中港務局,改制為臺中 港務分公司,1982;國家地震中心,2001;運研所港灣研究技術中心,改制為運輸技術研究中 心,1999 及 2004 等)^{[1][4][5][6]},其分析完成年代距今約為 40 至 20 年前左右,不同報告分析鑽 探孔數約為 72 至 135 孔,其分析方法、目的與應用區域皆異,因此有再次進行全面性液化安全 評估之必要。

本研究透過蒐集、建立臺中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 簡易評估法,依中小地震、設計地震與最大考量地震情境進行評估,探討不同 分析指標之液化潛勢差異,提出臺中港不同最大水平地表加速度A之高潛勢區面積經驗評估公 式,成果可供港區智慧化災損評估使用。

參考文獻

- 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。
- 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。
- 4. 賴聖耀、謝明志、蘇吉立、陳志芳 (2003),「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。
- 4. 臺中港務局 (1982),「臺中港土壤液化研究」,研究報告。
- 5. 國家地震中心 (2001),「臺中縣液化潛能評估」,研究報告。
- 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。
- 7. 營建署 (2022),「建築物耐震設計規範及解說」,建築法規,內政部。
- 8. 日本道路協會 JRA(1996),「道路橋示方書,同解說,V 耐震設計篇」。
- 9. 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。
- 10.JGS. (1996). "Soils and Foundations -Special issue on geotechnical aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake." Japanese Soc. Geotech. Eng.
- 11.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.
- 12.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.
- 13.Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K. (1982). "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes." Proceedings of conference on soil dynamics & EQ engineering, pp. 925-939.
- 14.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.
- 15.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.
- 16.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 histroies for SPT-based in situ liquefaction potential evaluation." PEER Report No. UCB/GT-2000/09, Pacific Earthquake Engineering Research, Berkeley, CA.
- 17.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.
- 18.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.