

# 高雄港液化潛能與震後自由場震陷量評估

曾文傑<sup>1</sup> 黃烟宏<sup>2</sup> 周仕勳<sup>3</sup> 賴瑞應<sup>4</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

<sup>2</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

<sup>3</sup>義守大學土木工程學系助理教授

<sup>4</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心研究員兼科長

## 摘要

本研究係蒐集高雄港區近年新建工程所增加之地質鑽探資料，並透過基於 SPT-N 值發展之 HBF 法及 NCEER 法進行港區液化潛能及震陷量分析，以利瞭解高雄港陸域範圍在不同地震情境下之土壤液化潛能與震陷量。本研究共採用 886 孔地質鑽探資料進行高雄港區土壤液化分析，分析結果顯示 2 種方法於不同地震規模作用下之土壤液化潛能分布相近，港區震陷量明顯隨著地震規模增加而漸增。本研究另依 HBF 法及 NCEER 法分析結果，彙整不同地震尖峰水平加速度下之高潛勢區面積比例及震陷量，可供港務單位於地震後快速評估高雄港區內可能的震陷變形行為及災損面積。

## 一、前言

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。各碼頭興建時多以水力抽砂進行碼頭後線回填，在地震力作用下極可能產生土壤液化現象，造成碼頭產生承载力破壞(Bearing Capacity Failure)、地表沉陷(Subsurface Settlement)、側潰(Lateral Spreading)及基礎位移等災害，導致港區無法正常運作，營運功能大受影響。

交通部運輸研究所(以下簡稱本所)自 111 年起為瞭解臺灣各重大港區之土壤液化潛能，遂陸續更新臺中港及臺北港周邊地質鑽探資料庫，並以該資料庫進行土壤液化潛能分析，提供港務單位地震防災應用。113 年係蒐集高雄港區近年新建工程所增加之地質鑽探資料，透過基於 SPT-N 值發展之 NCEER 法及雙曲線函數(Hyperbolic Function, HBF)液化評估法進行港區液化潛能分析及震陷量評估，以利瞭解高雄港區於不同等級地震發生下之土壤液化風險，提供高雄港務分公司做為港埠工程建設及設施維護管理之應用參考。

## 二、土壤液化潛能評估

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，土壤內部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。土層發生土

壤液化現象可能致使不同程度之沉陷或側向位移等現象，使液化土層上承載之構造物或地下管線發生差異沉陷、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，例如，集集大地震、甲仙地震、美濃地震、0403 花蓮地震等。

土壤液化潛能分析目的在於評估土層受地震力作用下抵抗土壤液化之能力，土層液化與否，由抗液化安全係數  $F_L$  決定，其定義如下：

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

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求取；CSR 為地震引致土層之平均反覆剪應力比，依 Ishihara (1993) 之定義：

$$CSR = 0.65 \times \frac{a}{g} \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \times \gamma_d \quad (2)$$

式中  $a$  代表尖峰水平地表加速度，依據「建築物耐震設計規範與解說」規定應檢核中小度地震、設計地震與最大考量地震時之不同地表加速度值。本研究採用之高雄港區不同考量地震下之地震規模與分析加速度，如表 1 所示； $g$  代表重力加速度； $\sigma_{vo}$  與  $\sigma'_{vo}$  分別為垂直覆土總應力與有效應力； $\gamma_d$  代表深度折減因子，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。

**表 1 高雄港區不同分析情境之地震規模與分析加速度**

分析情境	中小度地震	設計地震	最大考量地震
地震規模 $M_w$	6.9	7.1	7.3
分析加速度 $a_{max}$ (g)	0.05	0.20	0.28

## 2.1 SPT-N 液化潛能評估法

現有之土壤液化潛能分析評估方法眾多，可區分為室內試驗法與簡易評估法 2 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，各種液化評估法都有其發展背景、基本資料庫及限制條件等。基於 SPT-N 的簡易液化潛能評估法為目前工程界最常使用的土壤液化評估方法，依據我國「建築物基礎構造設計規範」指出，臺、美、日常用的液化評估法有雙曲線函數液化評估法(黃俊鴻等人, 2012)、NCEER 法(Youd et al., 2001)、日本建築學會法(AIJ, 2001)與日本道路協會法(JRA, 1996)等 4 種方法，本研究係採用 HBF 法及 NCEER 法進行高雄港陸域範圍土壤液化潛能評估。

1. HBF 法：本方法為國內黃俊鴻教授研究團隊之研究成果，該方法係參考 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。該方法採用的資料除包含世界各國三百多筆案例外，更增加國內 1999 年集集地震三百多筆案例，迴歸分析時採用雙曲線函數表示土壤之抗液化強度，故 HBF 法為包含

本土地震資料之液化評估法，可用以評估地表面下 20 公尺以內之地下水水位以下飽和土層(含塑性指數  $I_p$  小於 7 之土層)，整體計算流程，如圖 1 所示。

2. NCEER 法：本法源自 Seed et al. (1985)提出之簡易評估法，歷經 1997 年(Youd and Idriss, 1997)與 2001 年(Youd et al., 2001)2 個版本，經美國 NCEER 研討會後，歸納各學者討論之彙整版本，因此通稱 NCEER 法。Seed 簡易經驗評估法早年蒐集全球地震規模( $M_w$ )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)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。

## 2.2 土壤液化風險評估方法

地盤中某些土層發生液化現象時，其整體損害程度隨液化土層之深度、厚度及液化程度而定，目前工程實務上較常使用的整體地盤損害評估指標有 3 種，即相對厚度、液化潛能指數(Liquefaction Potential Index,  $P_L$ )及液化後地盤沉陷量，本研究主要採用液化潛能指數  $P_L$  及液化後地盤沉陷量進行土壤液化後損壞評估。

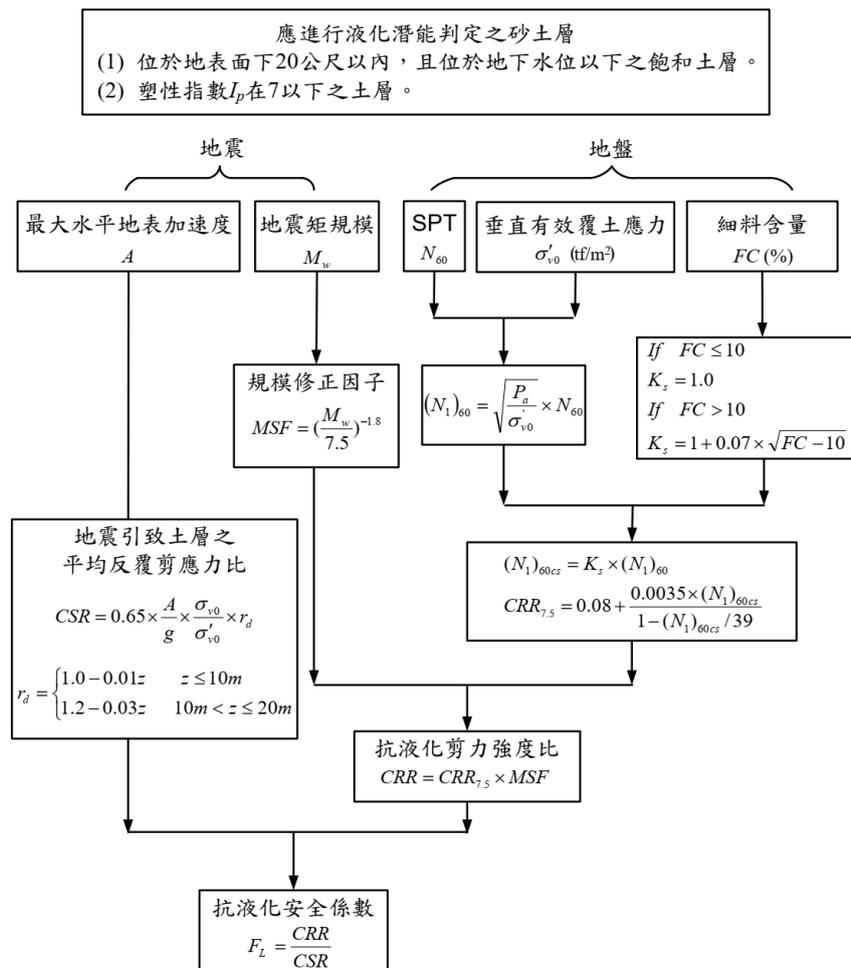


圖 1 雙曲線函數(HBF)液化評估法之計算流程圖

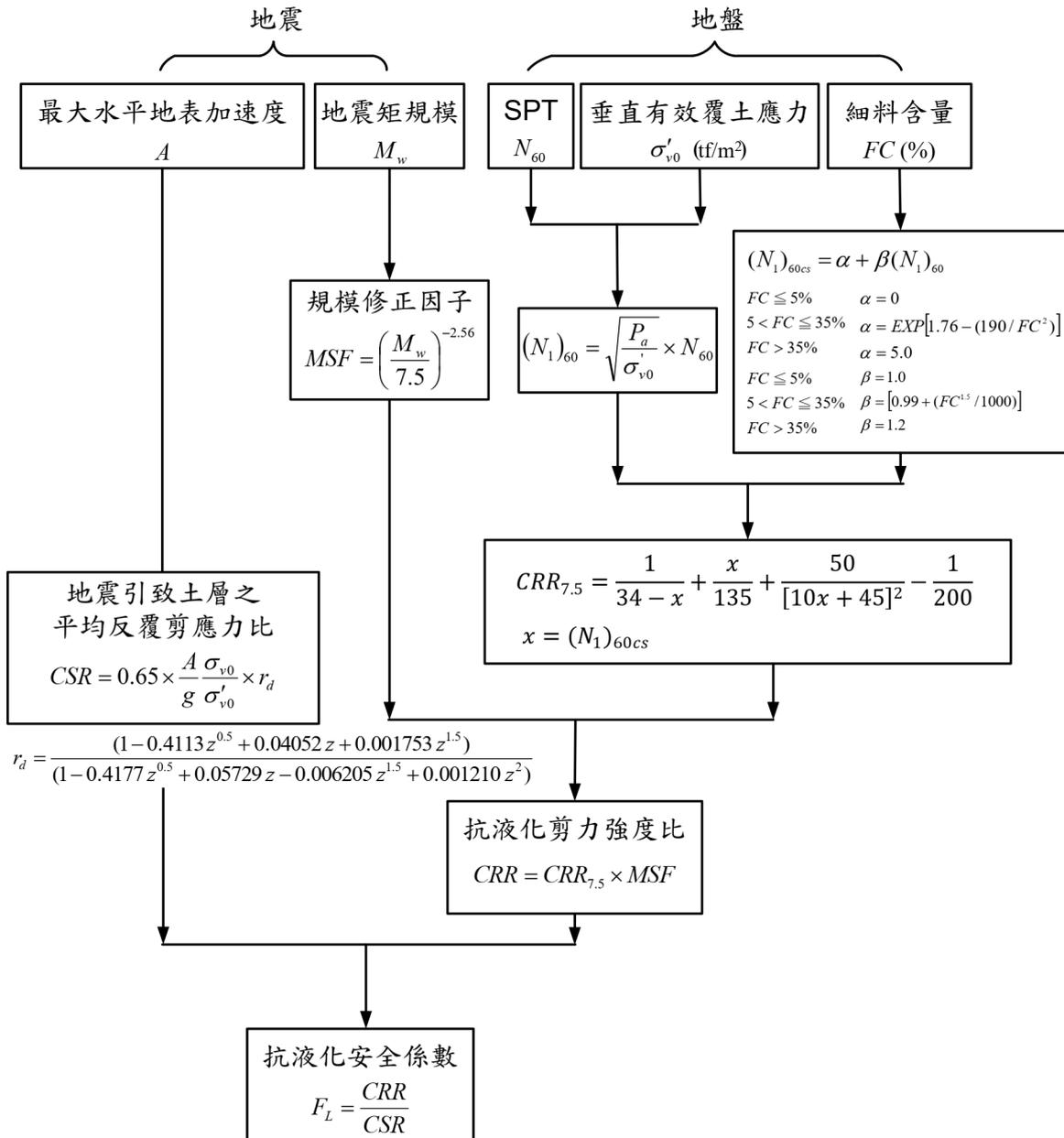


圖 2 NCEER 法(2001)液化評估法之計算流程圖

### 2.2.1 土壤液化潛能指數 $P_L$

Iwasaki et al. (1982)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  $P_L$  來表示土壤液化潛能， $P_L$  計算公式如下：

$$P_L = \int_0^{20} F(z) W(z) dz \quad (3)$$

$$F(z) = 1 - F_L(z) \quad (4)$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (5)$$

式中  $F(z)$  為液化程度係數，介於 0~1 之間， $W(z)$  為深度權重係數。Iwasaki et al. (1982) 根據日本地震案例，歸納出  $P_L=15$  時為大部分液化與非液化場址之分界線，並提出 3 個地盤液化之損害程度等級，分別為輕微液化( $P_L \leq 5$ )、中度液化( $5 < P_L \leq 15$ )與嚴重液化( $P_L > 15$ )，做為土壤液化風險評估之依據。

## 2.2.2 震後自由場震陷量評估方法

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，此現象造成地表面下降(即地層下陷)，而此時的沉陷量定義為震陷量(Post-Liquefaction Settlement,  $S$ )。液化引起之建築物沉陷主要可分為(1)受剪力作用引致之地表變形( $D_s$ )、(2)產生體積應變引致之地表變形( $D_v$ )及(3)噴砂後產生之地表變形( $D_e$ )共 3 類。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，需以現場量測成果為準；而液化時土層因建築物受剪力作用產生之地表變形( $D_s$ )，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，本研究震陷量( $S$ )評估，僅考量產生體積應變引致之地表變形( $D_v$ )。

Ishihara and Yoshimine (1992) 根據試驗室飽和乾淨砂土之液化試驗建立體積應變、地震力引致最大剪應變、SPT-N 值與抗液化安全係數之關係圖表，藉以求得液化土層之體積應變( $\epsilon_{v,i}$ )，再乘以土層厚度( $H_i$ )，即可求出該土層之液化後沉陷量( $S_i$ )。若有多層液化土層時，整體地盤之累加總沉陷可由下式計算：

$$S = \sum S_i = \sum \epsilon_{v,i} \times H_i \quad (6)$$

計算所得的液化沉陷量，依 Ishihara(1996) 提出之地盤液化損害程度劃分為以下三級：

1. 輕至無損壞：沉陷量小於 10cm，地表僅有微小裂痕。
2. 中度損壞：沉陷量介於 10~30cm，地表有小裂縫及砂滲出等現象。
3. 廣泛損壞：沉陷量介於 30~70cm，地表有大裂縫、砂噴出或地盤流動等現象。

由於 Ishihara and Yoshimine (1992) 屬圖解法，不易大量計算使用，紀雲曜(1997)基於 Ishihara and Yoshimine (1992) 試驗成果提出迴歸分析方程式，用以計算最大剪應變( $\gamma_{max}$ )與體積應變( $\epsilon_v$ )之大小。以下為震陷量( $S$ )之計算流程：

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，如下式：

$$D_r = 16\sqrt{(N_1)_{78}} = 14\sqrt{(N_1)_{60}} \quad (7)$$

2. 使用 HBF 法或 NCEER 法求得土壤抗液化安全係數  $F_L$ 。
3. 採紀雲曜(1997)提出之迴歸方程式，計算地震力引致最大剪應變  $\gamma_{max}$

$$\gamma_{max} = \frac{0.5(0.5714F_L - b_2 - \sqrt{b_2^2 - 0.5714F_L - 4b_1b_2})}{b_1} \leq 8\% \quad (8)$$

$$b_1 = (-7.3825 - 2.1981D_r + 0.1124D_r^2 - 0.0018D_r^3) \times 10^{-4} \quad (9)$$

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

$$b_3 = 2 - 12.25b_1 - 3.5b_2 \quad (11)$$

4. 採紀雲曜(1997)提出之迴歸方程式，計算分層體積應變  $\varepsilon_v$

$$\varepsilon_v = (-1.131 \times \log D_r + 2.347)\gamma_{max} \quad (12)$$

5. 計算分層沉陷量  $S_i$ ，並加總為震陷量  $S$ ，如式(6)所式。

### 三、高雄港液化潛能分析與損害評估

依照經濟部地質調查及礦業管理中心(以下簡稱地礦中心)公布鄰近高雄港土壤液化潛勢圖資(如圖 3 所示)，可發現高雄港部分區域並無液化潛勢分析資訊，因地礦中心之液化潛勢圖資系統係以高雄市為分析單元，其採用的地質鑽探資料未必全符合高雄港之地層現況。爰此，針對高雄港此類重要公共設施，進行詳細之土壤液化潛能分析有其必要性。

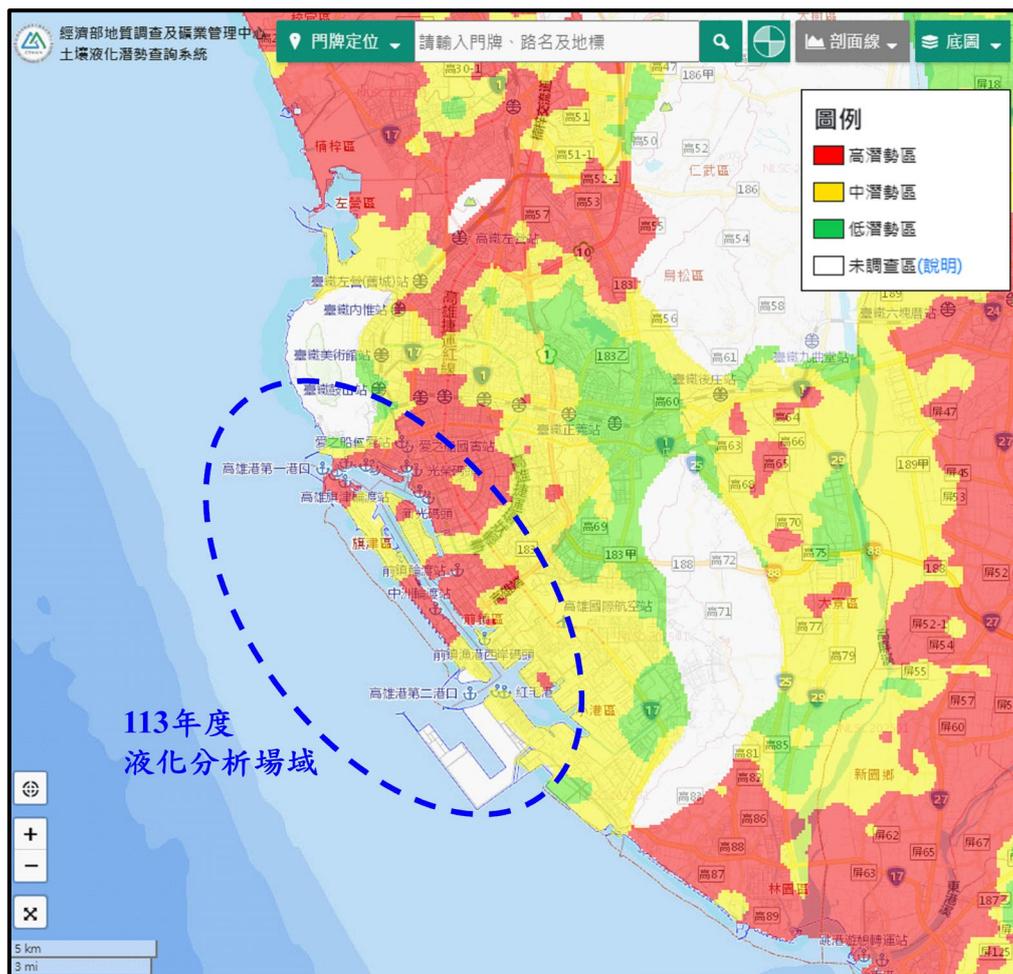


圖 3 高雄港鄰近區域液化潛勢圖資(改繪自地礦中心)

### 3.1 液化分析基本參數與資料說明

本所地工資料庫原已收納 879 孔高雄港陸域位置之地質鑽探資料，本研究為完整進行高雄港區土壤液化安全評估，另新增高雄港務分公司歷年之工程相關鑽探報告資料 335 孔，經盤點篩選後，本所地工資料庫可用地質鑽探資料計 697 孔，高雄港務分公司近年工程鑽探資料採用 189 孔。爰此，本研究後續合計使用 886 孔地質鑽探資料進行高雄港區土壤液化潛能評估，鑽探孔位，如圖 4 所示。



圖 4 高雄港區可用 SPT 鑽探孔位分布情況(本研究繪製)

### 3.2 高雄港液化潛能分析結果與討論

圖 5 至圖 7 分別為採用 HBF 法及 NCEER 法分析高雄港區於中小度地震、設計地震及最大考量地震下之土壤液化潛勢圖，彙整之低、中與高潛勢區之面積佔比，如表 2 所示。基本上，2 種分析方法的結果有相似的趨勢，即在較大地震力作用下，高雄港區的中、高潛勢區液化範圍 ( $P_L \geq 15$ ) 逐漸增加，惟在最大考量地震下，2 個分析方法在中、高潛勢區面積範圍比例有所不同。依 HBF 法分析結果顯示高雄港區中、高潛勢區面積範圍約分別為 8.8% 及 86.6%，NCEER 法分析結果顯示中、高潛勢區面積範圍約分別為 41% 及 45.3%。其 2 種方法分析結果的差異可能是因為 HBF 方法有考量本土之粉質砂土案例，造成在相同分析加速度下，HBF 方法偏保守，即高潛勢區面積較高。

圖 8 為高雄港區高潛勢區面積佔比與不同尖峰水平加速度之迴歸關係(扣除 HBF 法於  $a_{max}$  為 0.28g 之數據點)，其判定係數(Coefficient of Determination,  $R^2$ )高達 0.99，其結果顯示高度液化潛勢區域面積與地震造成的尖峰水平加速度呈現相關性，故該經驗公式可供後續地震災損面積評估使用。目前 HBF 法及 NCEER 法皆為本國「建築物基礎構造設計規範」採用之方法，雖 HBF 法加入國內 921 地震案例，但也無法說明其更適用於高雄港。



圖 5 中小度地震下高雄港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

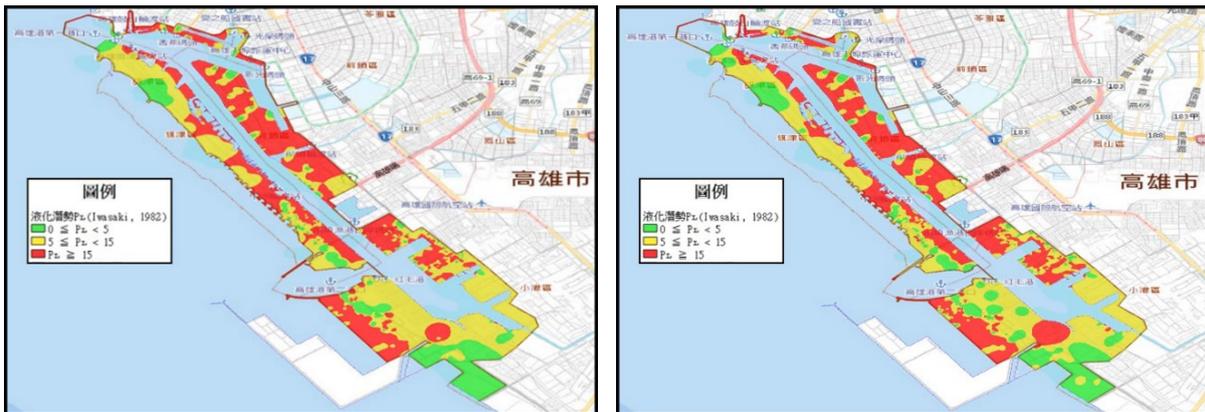


圖 6 設計地震下高雄港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

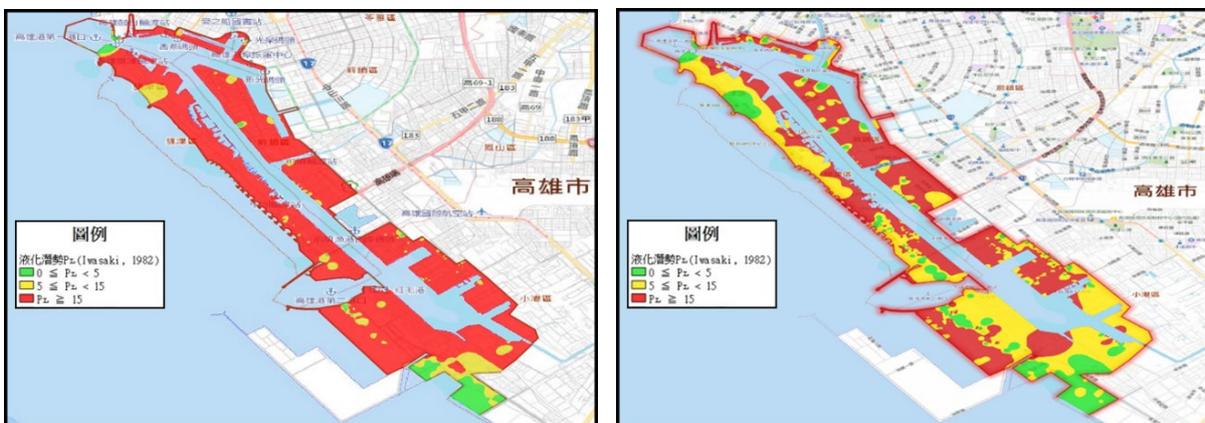


圖 7 最大考量地震下高雄港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

表 2 高雄港區 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 <sub>w</sub>	尖峰水平加速 度 a <sub>max</sub> (g)	液化潛勢面積比(%)		
				低潛勢區	中潛勢區	高潛勢區
HBF 法	中小度地震	6.9	0.05	98.0	0.9	1.1
	設計地震	7.1	0.20	15.9	45.3	38.8
	最大考量地震	7.3	0.28	4.7	8.8	86.6
NCEER 法	中小度地震	6.9	0.05	99.8	0.2	0.0
	設計地震	7.1	0.20	18.2	44.0	37.8
	最大考量地震	7.3	0.28	13.7	41.0	45.3

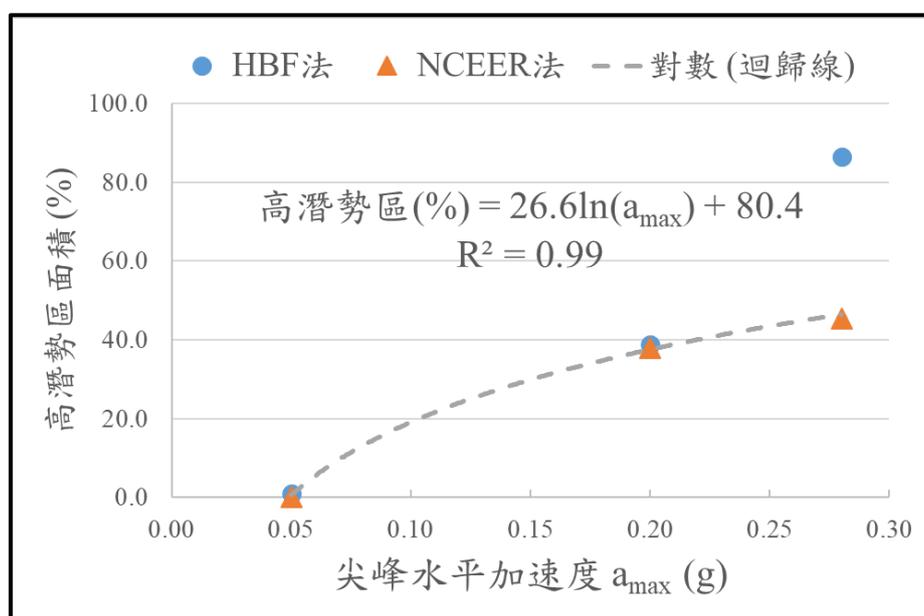


圖 8 高雄港區高潛勢區面積佔比與不同尖峰水平加速度關係

### 3.3 高雄港區地震後沉陷量評估

圖 9 至圖 11 為高雄港區在不同地震規模作用下引致之震陷潛勢圖，在中小度地震作用下，採用 HBF 法及 NCEER 法評估之震陷量變化範圍分別為 0~0.2cm 與 0~4.0cm；設計地震作用下，採用 HBF 法及 NCEER 法評估之震陷量變化範圍分別為 0.8~100.9cm 與 0.9~101.1cm；最大考量地震作用下，採用 HBF 法及 NCEER 法評估之震陷量變化範圍分別為 1.2~107.2cm 與 1.0~103.6cm。高雄港區於不同地震規模作用下，採用 HBF 法及 NCEER 法評估之震陷量結果相近，在中小度地震作用下，土壤液化後之震陷量不明顯，屬輕度損壞等級，而在設計地震及最大考量地震作用時，港區震陷量有明顯上升之趨勢，達到廣泛損壞等級之範圍明顯隨著地震力規模增加而漸增。

為提供未來高雄港區快速震陷量評估使用，本研究採用 3 分法將震陷量分為低、中與高 3 個部分，分離相較離散之震陷量數據點，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。高雄港區在不同地震規模作用下，評估震陷量與面積分布佔比成果，彙整如表 3 所示。依據 HBF 法分析結果，高雄港區於中小度地震作用下之震陷量主要集中於 0~0.1cm 區段，

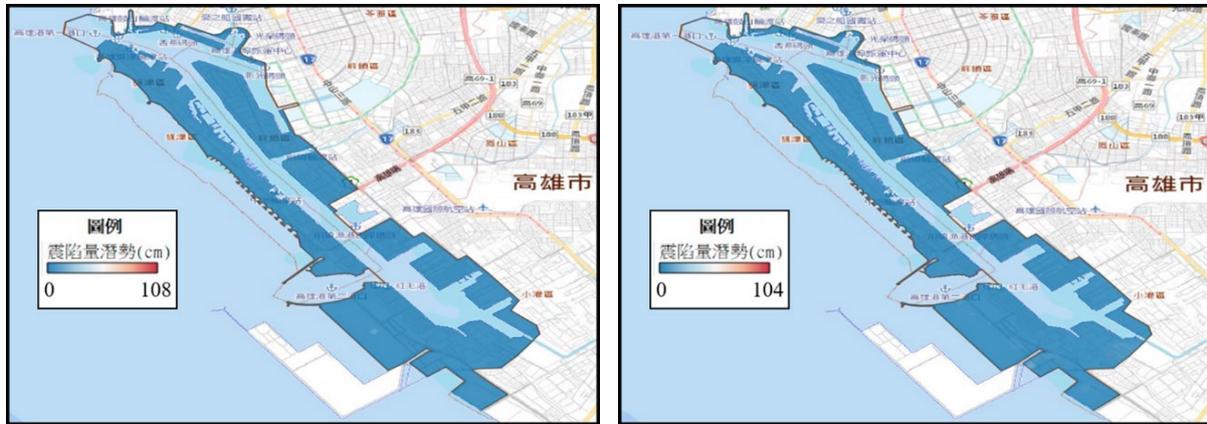


圖 9 中小度地震下高雄港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)



圖 10 設計地震下高雄港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

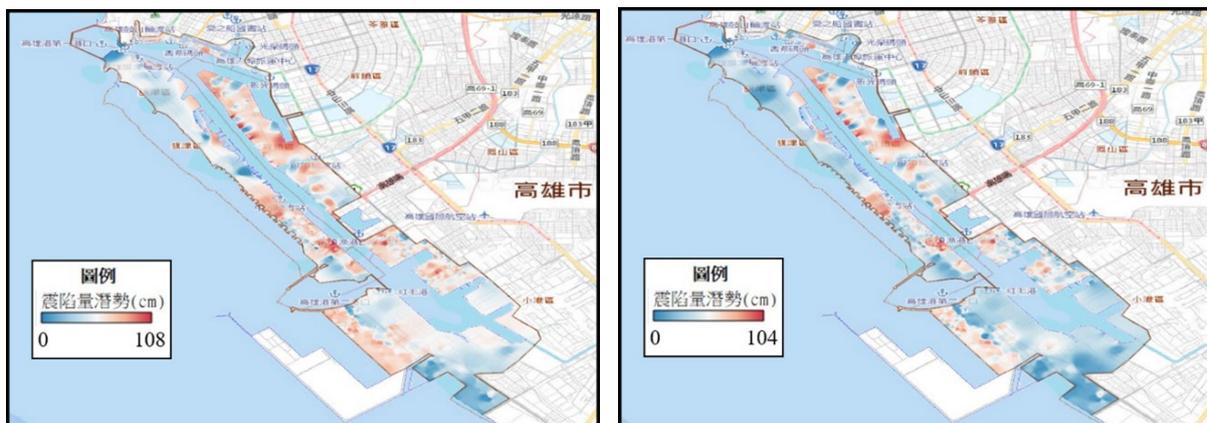


圖 11 最大考量地震下高雄港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

約佔分布面積之 99.4%；設計地震作用下之震陷量則集中於 34.2~67.5cm 區段，約佔分布面積之 55.7%，最大考量地震之震陷量集中於 36.5~71.9cm，約佔分布面積 71.8%；而 NCEER 法，中小

度地震下，其震陷量主要集中於 0~1.3cm 區段，約佔分布面積之 95.7%，設計地震下，則要集中於 34.3~67.7cm 區段，約佔分布面積之 43.7%，最大考量地震之震陷量集中於 35.2~69.4cm，約佔分布面積 51.0%。由於高雄港區採用 HBF 法及 NCEER 法評估後的震陷量結果相近，故依 3 分法區分為低、中、高震陷量的分區界線也相近，而依表 3 顯示 2 個分析方法於不同分析加速度下的震陷量面積佔比也相近。

表 3 高雄港區不同地震規模作用下之震陷量範圍與分布佔比

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)	震陷量與港區分布面積佔比		
				低	中	高
HBF 法	中小度地震	6.9	0.05	0~0.1 cm (99.4%)	0.1~0.2 cm (0.3%)	0.2 cm 以上 (0.3%)
	設計地震	7.1	0.20	0~34.2 cm (35.8%)	34.2~67.5 cm (55.7%)	67.5 cm 以上 (8.4%)
	最大考量地震	7.3	0.28	0~36.5 cm (16.3%)	36.5~71.9 cm (71.8%)	71.9 cm 以上 (11.9%)
NCEER 法	中小度地震	6.9	0.05	0~1.3 cm (95.7%)	1.3~2.7 cm (2.5%)	2.7 cm 以上 (1.8%)
	設計地震	7.1	0.20	0~34.3 cm (49.5%)	34.3~67.7 cm (43.7%)	67.7 cm 以上 (6.8%)
	最大考量地震	7.3	0.28	0~35.2 cm (42.0%)	35.2~69.4 cm (51.0%)	69.4 cm 以上 (7.0%)

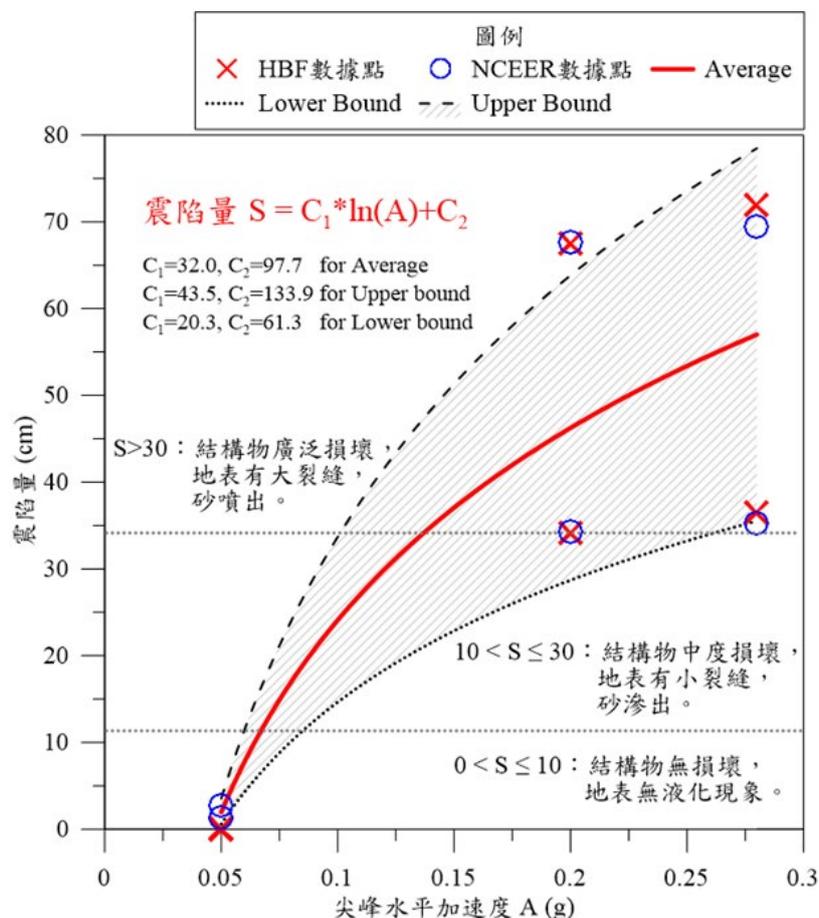


圖 12 高雄港區不同尖峰水平加速度與震陷量之評估關係圖

圖 12 為高雄港區不同地震尖峰水平加速度與震陷量之評估關係圖，圖中提供震陷量的上限、平均及下限等 3 種經驗迴歸公式，後續可做為地震後快速評估高雄港區發生土壤液化之震陷量範圍，以利港務單位進行相關維護措施之參考。上述迴歸經驗公式說明如下：

$$S = C_1 * \ln(A) + C_2 \quad (13)$$

式中  $A$  代表尖峰水平加速度，以重力加速度  $g$  ( $980\text{cm/s}^2$ ) 表示； $S$  代表震陷量，單位為  $\text{cm}$ ； $C_1$  與  $C_2$  參數經由震陷潛勢分析迴歸求得，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)時，採  $C_1=36.0$ 、 $C_2=103.8$ ；求取震陷量下限(Lower Bound)時，採  $C_1=16.8$ 、 $C_2=47.0$ 。

#### 四、結論

本研究主要利用基於 SPT-N 值的 HBF 法及 NCEER 法，探討高雄港區遭遇不同地震規模作用力下之港區土壤液化分布範圍與地表震陷量，本研究在本所原有資料庫可用於土壤液化潛能分析之 697 孔地質鑽探資料基礎上，再新增高雄港務分公司歷年工程相關鑽探資料 189 孔後，合計採用 886 孔鑽探資料進行高雄港區之土壤液化潛能分析。本研究主要的成果說明如下：

1. 由本所原本可用於土壤液化潛能分析之 697 孔地質鑽探資料增加至 886 孔鑽探資料，有助於提升高雄港區土壤液化潛能分析之精度。
2. 以 HBF 法與 NCEER 法進行高雄港液化潛能分析，2 種分析方法於不同地震規模作用下之土壤液化潛勢分布相近，惟 HBF 法在相同分析加速度下，其分析之液化潛能  $P_L$  較高(高液化潛勢面積範圍較大)，可能是因為 HBF 方法有考量本土之粉質砂土案例，造成在相同分析加速度下，HBF 方法偏保守。
3. 採用 HBF 法及 NCEER 法評估後的震陷量結果相近，在中小度地震作用下，土壤液化後之震陷量不明顯，屬輕度損壞等級，而在設計地震及最大考量地震作用時，港區震陷量有明顯上升之趨勢，達廣泛損壞等級之範圍明顯隨著地震力規模增加而漸增。
4. 建立高雄港區不同地震尖峰水平加速度下之高潛勢區面積比例及震陷量經驗評估公式，可供港務單位於地震後快速評估高雄港區內可能的災損面積及震陷量範圍。

#### 參考文獻

1. 內政部國土管理署 (2023)，建築物基礎構造設計規範。
2. 內政部國土管理署 (2024)，建築物耐震設計規範及解說。
3. 紀雲曜 (1997)，高雄縣永安沿海地區沖積層下陷及其潛勢評估方法之研究，國立成功大學博士論文。
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，133，

77-86 頁。

5. Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. AA Balkema Publishers.
6. Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-415.
7. Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford University Press.
8. Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173-188.
9. Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. I. (1982). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. In Proceedings of Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference, 925-939.
10. Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
11. Macedo, J., & Bray J. D. (2018). Key trends in liquefaction-induced building settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), 04018076.
12. Youd, T. L., & Idriss, I. M. (1997). Proceeding of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
13. Youd, T. L., & Idriss, I. M. (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), 817-833.