

# 安平港及花蓮港港區液化潛能與震後自由場震陷量評估

曾文傑<sup>1</sup> 黃焜宏<sup>2</sup> 周仕勳<sup>3</sup> 張文忠<sup>4</sup> 賴瑞應<sup>5</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>成功大學土木工程學系 教授  
<sup>5</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心 科長

## 摘要

本研究係蒐集安平港及花蓮港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 值之 HBF 法及 NCEER 法進行港區液化潛能及震陷量分析，以利瞭解港區陸域範圍在不同地震情境下之土壤液化潛能與震陷量。本研究於安平港及花蓮港分別採用 193 孔及 36 孔地質鑽探資料進行港區土壤液化分析，分析結果顯示 2 種液化潛能評估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。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安平港及花蓮港港區內震陷變形行為及災損面積。因花蓮港港區地質含有礫石層，可能影響基於 SPT-N 值之液化潛能評估法之評估結果，另以 Kayen 法驗證花蓮港港區抗液化安全係數剖面，分析結果顯示，Kayen 法與 NCEER 法抗液化安全係數剖面相近，建議臺灣港務有限公司在未來的防災規劃中，可針對花蓮港各碼頭後線進行補充試驗調查，以利強化花蓮港港區地震災損預測和防範的能力。

## 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。臺灣西部多屬砂岸地形，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，此類地質及施工方式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。花蓮縣分別於 2018 年 2 月 6 日與 2024 年 4 月 3 日發生芮氏規模 6.26 與 7.2 之地震，對花蓮港多處碼頭後線造成災損狀況，圖 1 為 2018 年 0206 地震後 25 號碼頭後線沉陷及 2024 年 0403 地震後 22 號碼頭後線地面開裂狀況。

由於 111 年頒佈之「建築物耐震設計規範及解說」針對土壤液化評估方法已新增國際慣用基於標準灌入試驗(Standard Penetration Test, SPT)N 值(SPT-N)之美國國家地震工程研究中心



(a)



(b)

圖 1 (a)2018 年 0206 地震後花蓮港 25 號碼頭後線沉陷狀況(摘自許尚逸等人，2018)；  
(b)花蓮港 22 號碼頭後線地面開裂狀況(臺灣港務公司提供)

(National Center for Earthquake Engineering Research, NCEER)液化潛能評估法及我國自行發展之雙曲線函數(Hyperbolic Function, HBF)液化潛能評估法，因此，交通部運輸研究所運輸技術研究中心(以下簡稱本中心)自 111 年起即陸續更新臺灣各港區範圍地工資料庫之鑽探資料，並依現行耐震設計規範建議之評估方式，採用 NCEER 法及 HBF 法進行臺灣各港區範圍之土壤液化潛能評估，以 Ishihara and Yoshimine (1992)建議之程序，推估地震後港區液化範圍與震陷值，以利提供港務單位地震防災應用。目前已陸續完成臺中港、臺北港、高雄港、安平港及花蓮港等港區之液化潛勢評估模式精進，餘基隆港、蘇澳港及布袋港等港區，預計 115 年完成。

## 二、土壤液化潛能評估

臺灣位於地震頻繁地區，歷史上已有多次因地震引起土壤液化現象之紀錄，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，導致土壤顆粒懸浮於水中並喪失剪力強度。土層發生土壤液化現象可能造成不同程度之沉陷或側向位移等現象，因而導致上部構造物或地下管線發生差異沉陷、上浮、側傾或倒塌。

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。本研究安平港及花蓮港港區採用不同分析情境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。

**表 1 安平港及花蓮港港區不同分析情境之地震規模與分析加速度**

分析標的	分析情境	中小地震	設計地震	最大考量地震
安平港	地震規模 $M_w$	6.9	7.1	7.3
	分析加速度 $a_{max}$ (g)	0.07	0.28	0.36
花蓮港	地震規模 $M_w$	7.1	7.3	7.5
	分析加速度 $a_{max}$ (g)	0.11	0.45	0.52

## 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，如標準貫入試驗 N 值(SPT-N)法、圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)法及剪力波速法等，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，其中基於 SPT-N 的簡易液化潛能評估法為國內工程界最常使用的土壤液化評估方法。本研究主要採用 HBF 法與 NCEER 法進行安平港及花蓮港港區之土壤液化潛能評估，另因花蓮港地質含有礫石層，可能影響基於 SPT-N 值之液化潛能評估法之評估結果，爰另採用基於剪力波速剖面之 Kayen 法評估花蓮港港區抗液化安全係數剖面，以利驗證 SPT-N 法之液化潛能評估成果。以上 3 種液化潛能評估法說明如下：

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，採用資料除包含世界各國 300 多筆案例外，更增加國內 1999 年集集地震 300 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 2 所示。
2. NCEER 法：本法源自 Seed 等人(1985)提出之簡易評估法，歷經 1997 年(Youd and Idriss, 1997)與 2001 年(Youd 等人, 2001)2 個版本，經美國國家地震工程研究中心(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，為工程師較為常用之液化評估方法，其計算流程如圖 3 所示。

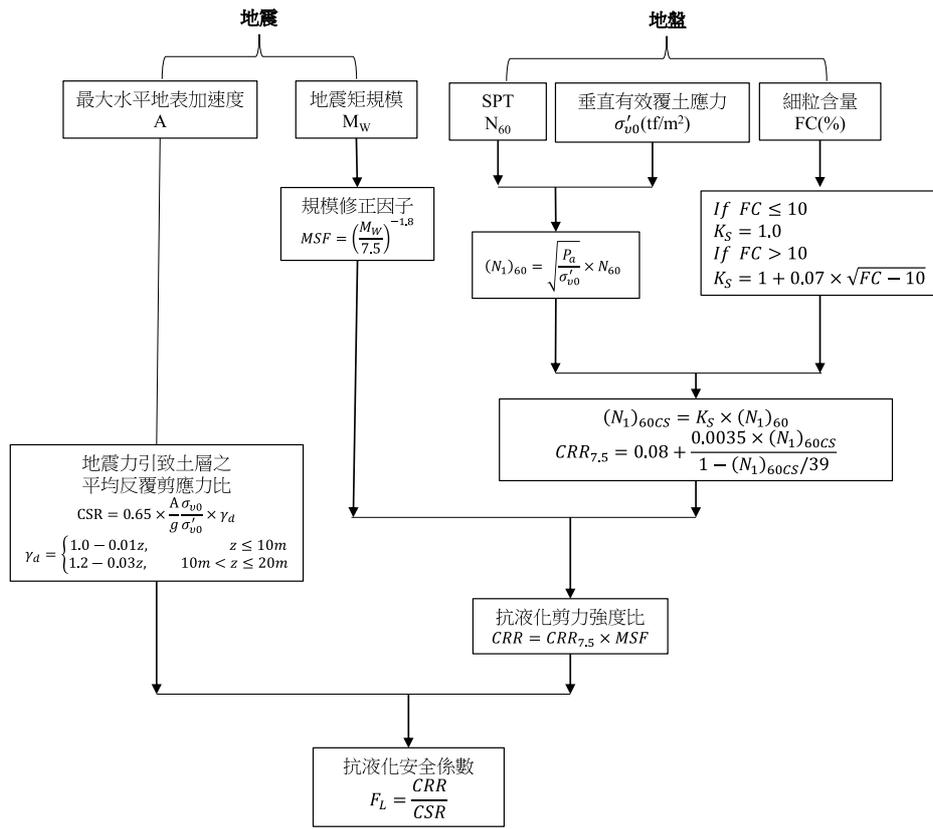


圖 2 雙曲線函數(HBF)液化評估法之計算流程圖

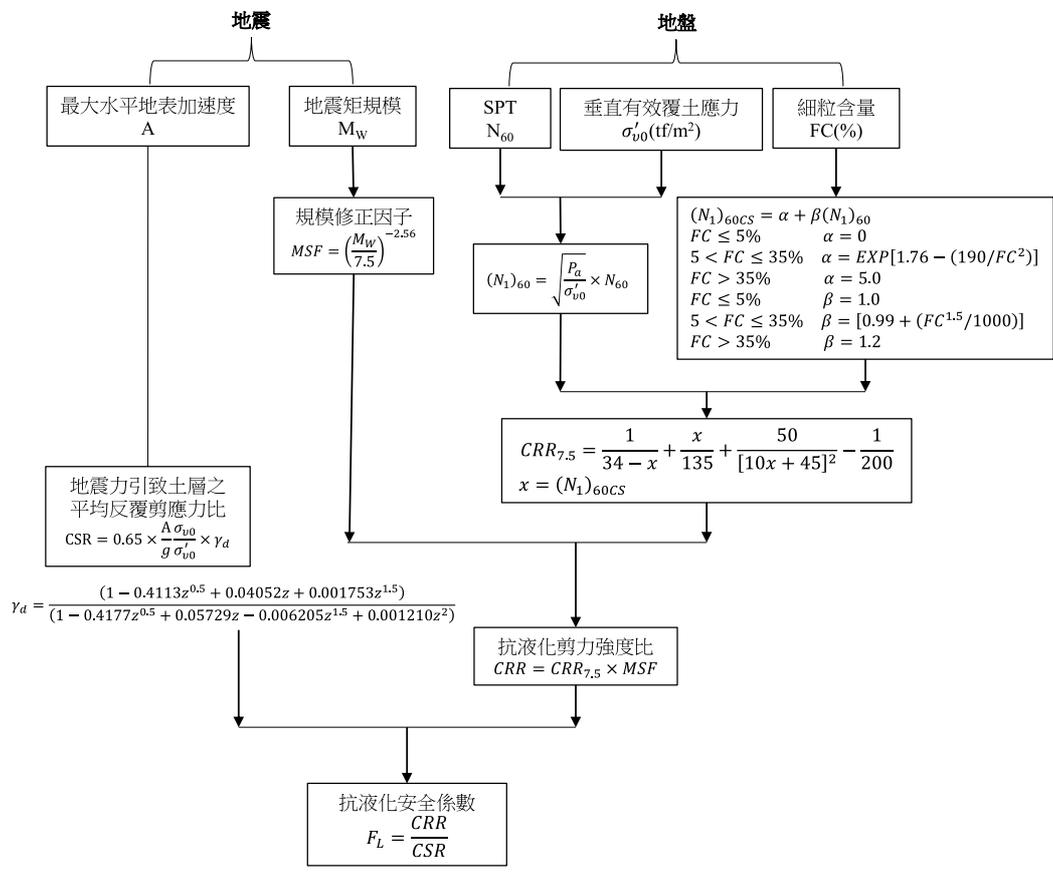


圖 3 NCEER(2001)液化評估法之計算流程圖

3. **Kayen 剪力波速法**：傳統上液化潛能評估多採用基於 SPT 或 CPT 發展之評估方式，透過實測的動力阻抗，推估土壤抗液化能力，然而在某些地區(例如難以採樣或有礫石層)難以進行 SPT 或 CPT 施作，因此發展了以剪力波速(Shear Wave Velocity,  $V_s$ )為基礎的替代評估法。**Kayen 等人(2013)**綜合美國、中國、日本、希臘與臺灣共 422 處案例，發展以剪力波速為指標的經驗式液化評估法，該方法屬於不須貫穿土層之非破壞檢測方法，可以補充 SPT 或 CPT 難以施測之情況，並提供定值(deterministic)與採用機率(probabilistic)方式來評估土壤液化風險。另由於剪力波速之大小直接與可能液化砂土層之相對密度有高度正相關係，可避免土壤類型之影響，故以剪力波速為指標之液化潛勢評估方法具有高度潛力，其計算流程如圖 4 所示。

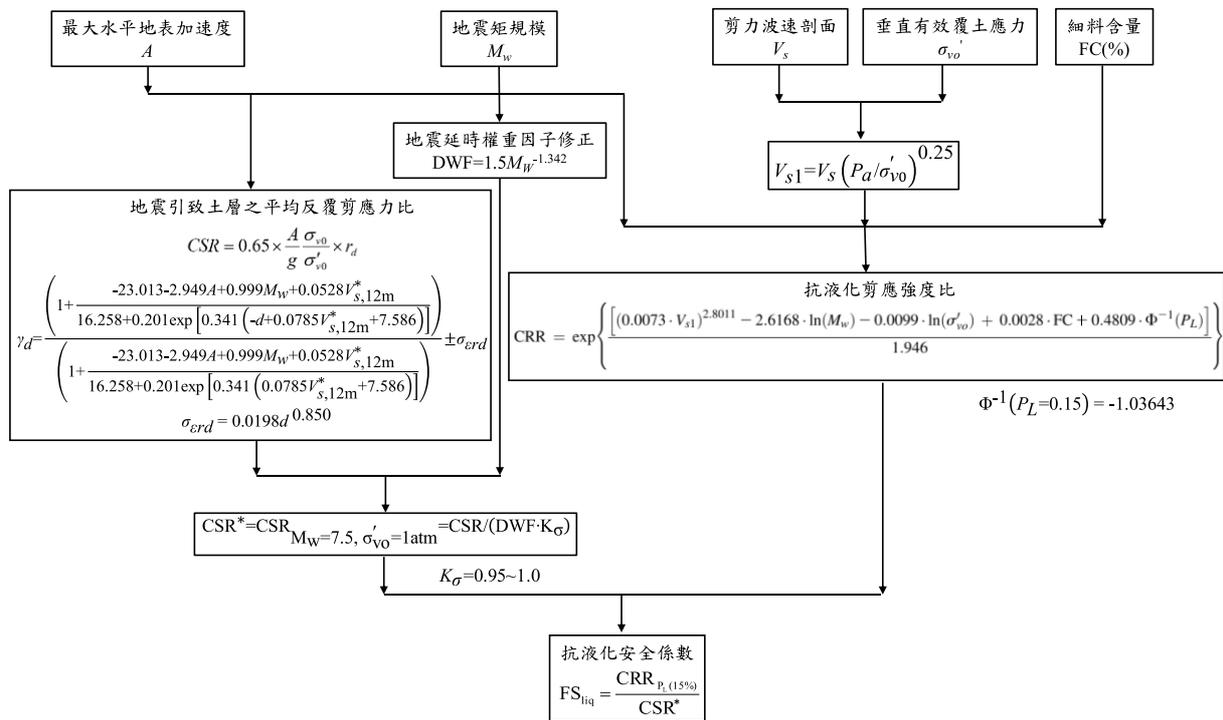


圖 4 Kayen(2013)剪力波速液化評估法之計算流程圖

## 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，本研究主要採用土壤液化潛能指數及液化後地盤沉陷量進行土壤液化後損壞評估。

### 2.2.1 土壤液化潛能指數

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，以土壤液化潛能指數( $P_L$ )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， $z$  為地表下深度(單位：公尺)。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( $\varepsilon_{v,i}$ )，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量可由下式計算：

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

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 3 級：

1. 輕至無損壞：沉陷量介於 0~10cm，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( $\varepsilon_v$ )。以下為震陷量( $S$ )之計算流程：

1. 依據 Meyerhof(1957) 經驗公式計算土層相對密度  $D_r(\%)$ ，如下式：

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

$$(N_1)_{60} = \sqrt{P_a/\sigma'_v} \times N_{60} \leq 1.7N_{60} \quad (8)$$

上式中 $(N_1)_{60}$ 代表經有效覆土壓力 $(\sigma'_v)$ 修正後鑽桿傳遞貫入能量比 60%時之 N 值， $P_a$ 為標準大氣壓力，取  $10.2\text{tf/m}^2$ ； $N_{60}$ 為鑽桿傳遞貫入能量比 60%時之標準貫入試驗 N 值。

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)迴歸方程式，計算地震力引致最大剪應變  $\gamma_{max}$

$$\gamma_{max} = \frac{0.5714F_L - b_2 - \sqrt{(b_2 - 0.5714F_L)^2 - 4b_1b_3}}{2b_1} \leq 8\% \quad (8)$$

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

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

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

上式之  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  為相對密度相關之迴歸係數。

4. 採紀雲曜(1997)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、安平港及花蓮港液化潛能分析與損害評估

#### 3.1 資料蒐集及篩選原則

本研究篩選本中心地工資料庫既有鑽探資料，並蒐集臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)提供之歷年工程相關鑽探報告資料，經評估可用於安平港及花蓮港土壤液化潛能分析之鑽孔資料分別為 193 孔及 36 孔，鑽探孔位分布情況如圖 5 及圖 6 所示，因目前蒐集之花蓮港鑽探資料均集中於 17 至 25 號碼頭，爰本研究分析花蓮港液化潛能部分，僅呈現該港 17 至 25 號碼頭之結果。相關 SPT 鑽孔資料之篩選原則如下：

1. SPT 試驗資料之鑽探深度需大於 10m，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，以供後續地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)進行空間內插使用。
4. 由於簡易評估法係以乾淨砂做為基本資料庫，液化分析時，需修正細粒料含量，因此，鑽探資料應包含細料含量(即粉土+黏土之比例)。
5. SPT 值施作間隔為固定規律，指定分析深度內皆有 N 值。



圖 5 安平港港區可用 SPT 鑽探孔位分布情況



圖 6 花蓮港港區可用 SPT 鑽探孔位分布情況

### 3.2 土壤液化潛能分析結果與討論

圖 7 至圖 12 為安平港及花蓮港採用 HBF 法及 NCEER 法分析港區於中小度地震、設計地震及最大考量地震下之土壤液化潛勢圖。基本上，2 種分析方法的結果有相似的趨勢，在較大地震力作用下，港區的中潛勢區及高潛勢區液化範圍逐漸增加。在中小地震規模下，港區陸域大部分屬於低潛勢區，其液化風險等級屬輕微液化；在設計地震及最大考量地震規模下，港區陸域大部分則轉變為中至高潛勢區，其液化風險等級屬中度至嚴重液化。HBF 法及 NCEER 法於安平港評估之低、中與高潛勢區分布位置大致相同，於花蓮港的液化潛能分析，則可能因鑽孔數量過少且分布不均，故 NCEER 法於設計地震及最大考量地震時之中及高潛勢區範圍均高於 HBF 法之分析結果。

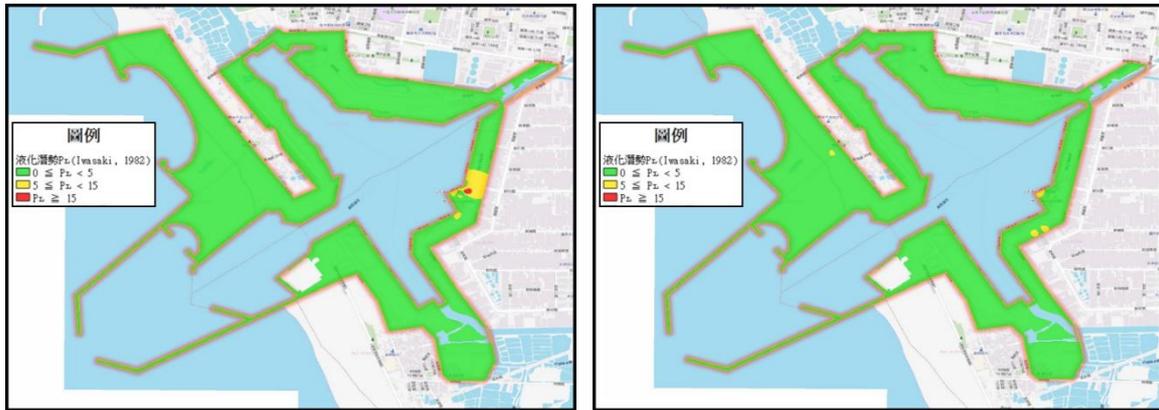


圖 7 中小度地震下安平港港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

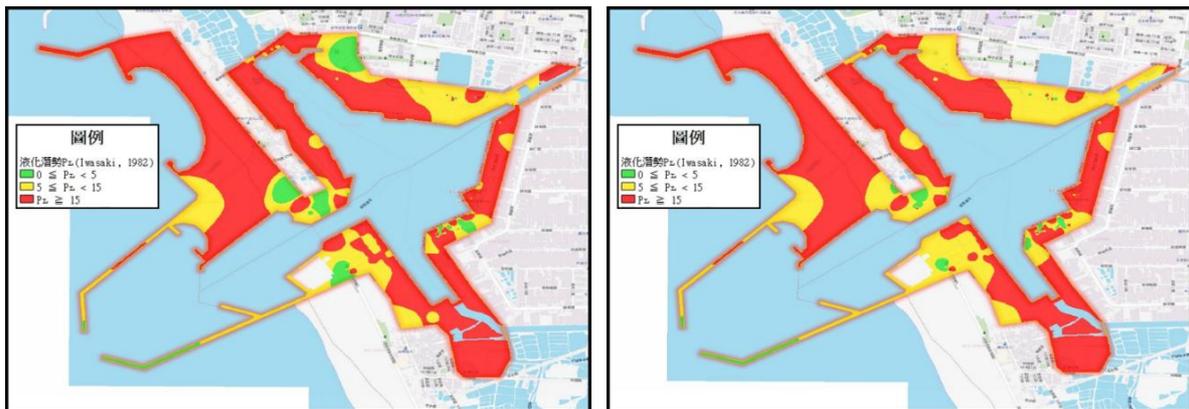


圖 8 設計地震下安平港港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

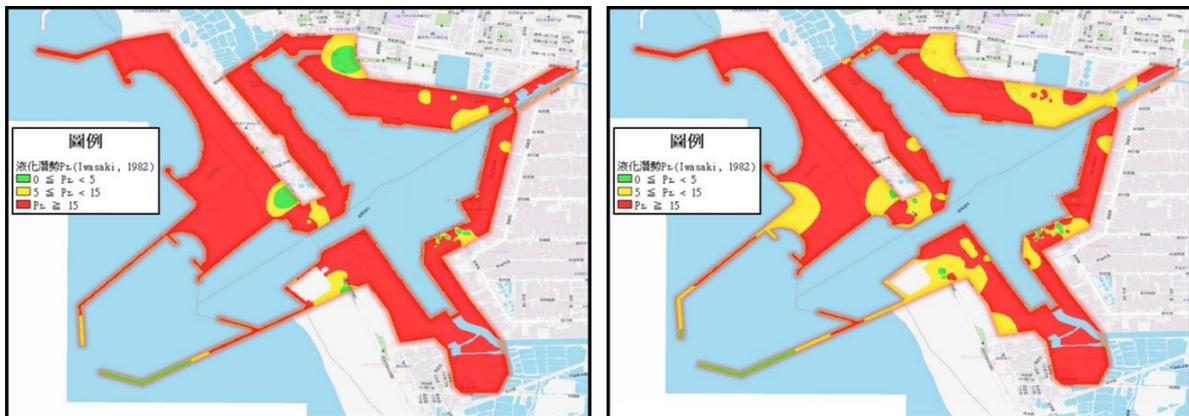


圖 9 最大考量地震下安平港港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)



圖 10 中小度地震下花蓮港港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)



圖 11 設計地震下花蓮港港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)



圖 12 最大考量地震下花蓮港港區液化潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

另花蓮港現場鑽探與場址調查成果皆顯示，於監測站鄰近 25 號碼頭後線區域之礫石土 (gravelly soil) 土層厚度超過 20m，於深度 5~13m 之礫石含量為 30~59%，其土壤分類雖主要為粉土質砂土(SM)，但因仍具有一定礫石含量，故該礫石含量可能會影響 SPT-N 值之量測結果，造成以 SPT-N 值為指標之土壤液化潛勢評估結果，無法完全反應花蓮港液化現況。因此，本研究另使用成功大學土木系張文忠教授研究團隊於花蓮港以多通道表面波譜法(Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW)建立之剪力波速剖面分析結果，以 Kayen(2013)剪力波速法進行花蓮港 25 號碼頭之土壤液化潛能評估並驗證本次 SPT-N 值試驗之液化潛能評估結果，該 MASW 現場測線配置詳如圖 13 所示。經評估，各測線採 Kayen(2013)剪力波速法評估之抗液化安全係數值與基於 SPT-N 值之評估結果相近，本文僅以測線編號 Hua02 為例說明分析結果。

圖 14 為 MASW 測線編號 Hua02 與鄰近鑽孔(原地工資料庫 SPT 鑽探資料編號 HL1502、港務公司補充鑽探資料編號 S15)分別採用 Kayen 剪力波速法及 NCEER 法評估之抗液化安全係數剖面比對結果。在相同的設計地震情境下，NCEER 法與 Kayen 法分析所得安全係數剖面趨勢大致一致，尤其以 HL1502 鑽孔之分析成果與 Kayen 法分析結果更相似，且當深度大於 4.0 公尺後，抗液化安全係數小於 1.0。



圖 13 花蓮港 25 號碼頭後線 MASW 測線配置圖

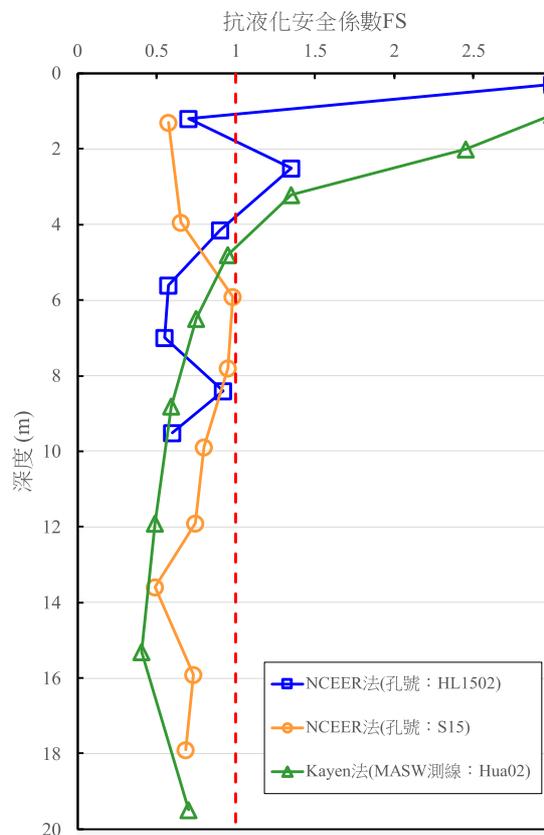


圖 14 花蓮港港區之 NCEER 法及 Kayen 法抗液化安全係數剖面比對結果

### 3.3 港區地震後沉陷量評估

圖 15 至圖 17 為安平港港區在不同地震規模作用下引致之震陷潛勢圖，於中小地震情境下，評估震陷量之變化範圍約為 0~11.5cm(HBF 法)與 0~16.1cm(NCEER 法)；設計地震下，港區震陷量變化範圍分別為 0~83.1cm(HBF 法)與 0~78.5cm(NCEER 法)；最大考量地震下，震陷量變化範圍分別為 0~85.2cm(HBF 法)與 0~82.2cm(NCEER 法)。安平港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大致相近，震陷量隨分析加速度  $a_{max}$  增加而增加，在 3 種地震情境下，震陷量變化之上、下限並無明顯差異。

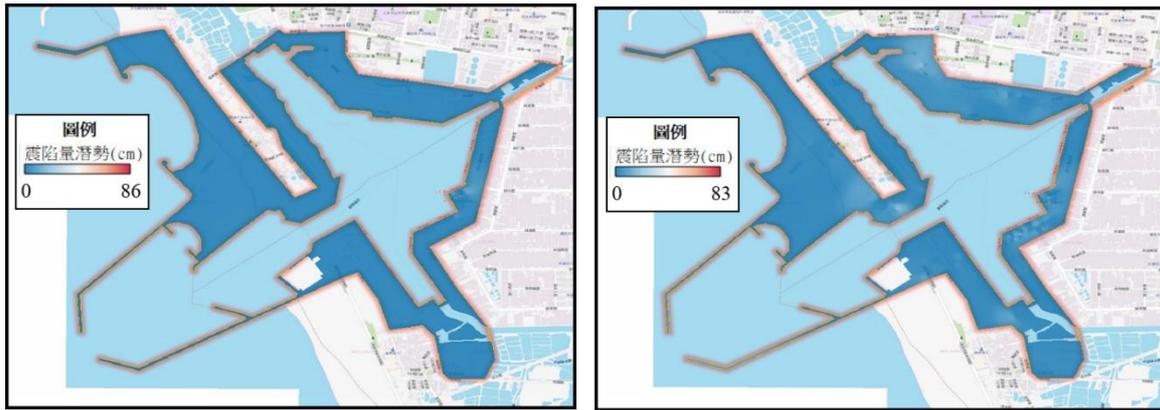


圖 15 中小度地震下安平港港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

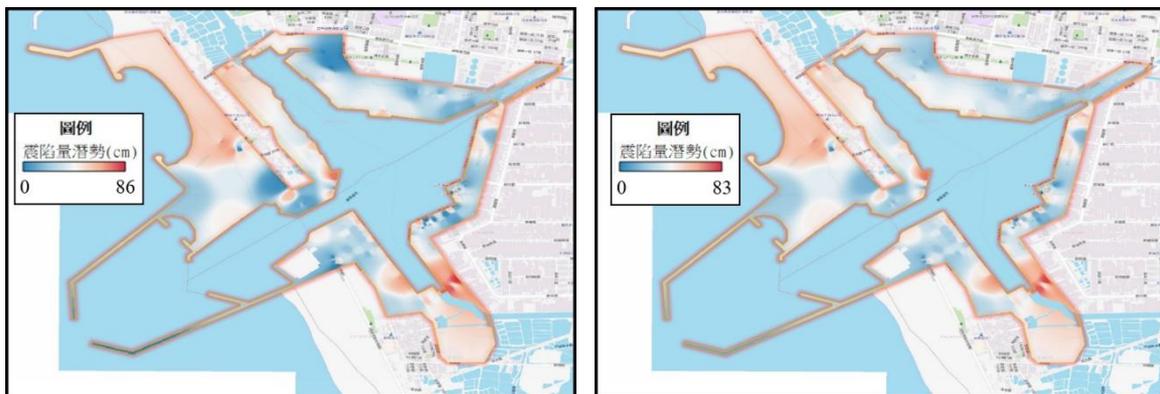


圖 16 設計地震下安平港港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

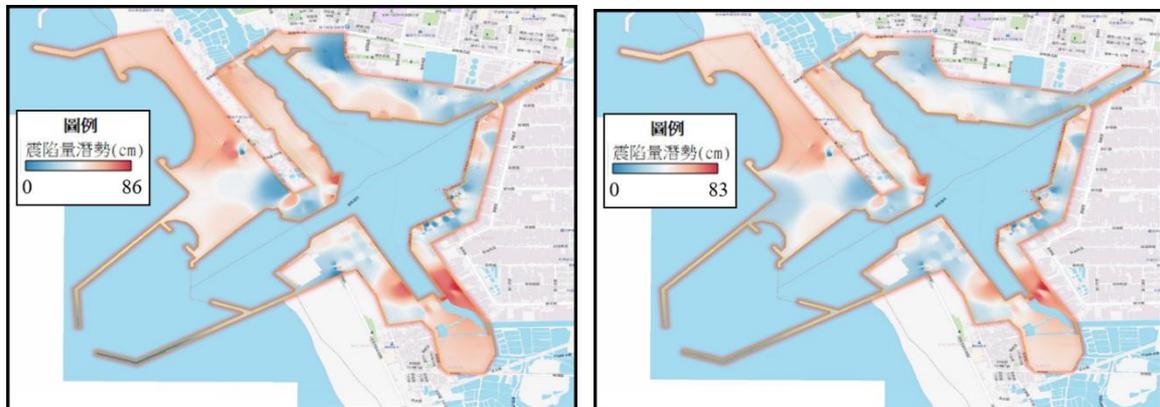


圖 17 最大考量地震下安平港港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

圖 18 至圖 20 為花蓮港港區在不同地震規模作用下引致之震陷潛勢圖，於中小地震情境下，評估震陷量之區震陷量變化範圍約為 0~1.1cm(HBF 法)與 0~0.9cm(NCEER 法)；設計地震下，港區震陷量變化範圍分別為 0~41.1cm(HBF 法)與 0~9cm(NCEER 法)；最大考量地震下，震陷量變化範圍分別為 0~42cm(HBF 法)與 0~42.9cm(NCEER 法)。花蓮港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，結果大致相近，震陷量隨分析加速度  $a_{max}$  增加，在中小地震與最大考量地震下，震陷量變化之上、下限並無太大差異，而設計地震規模下，HBF 法評估之結果較為保守，其評估之震陷量範圍高於 NCEER 法之評估結果。



圖 18 中小度地震下花蓮港港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)



圖 19 設計地震下花蓮港港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)



圖 20 最大考量地震下花蓮港港區震陷潛勢圖(左：HBF 法；右：NCEER 法)

為提供未來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，安平港及花蓮港港區於不同地震規模作用下之震陷量範圍與港區分布面積佔比，結果彙整如表 2 及表 3 所示。以安平港而言，HBF 法於中小地震下之震陷量主要集中於 0~3.8cm 區段，約佔分部面積 99.0%，設計地震下之震陷量集中於 27.7~55.4cm 區段，約佔分部面積 63.5%，最大考量地震之震陷量集中於 28.4~56.8cm，約佔 65.4%；NCEER 法於中小地震下之震陷量主要集中於 0~5.4cm 區段，約佔分部面積 91.1%，設計地震下之震陷量集中於 26.2~52.4cm 區段，

約佔分部面積 69.0%，最大考量地震之震陷量集中於 27.4~54.8 cm，約佔分部面積 71.1%。花蓮港分析結果顯示大部分數值分佈於 3 分法之低震陷量區段，在 0.45-0.52g 分析加速度下，大部分面積震陷量 S 仍小於 10cm，且 23 至 25 號碼頭位置相對有較大的沉陷量。由於本次研究蒐集的鑽孔數量僅 36 孔，大部分均集中於 17 至 25 號碼頭區段，並且使用基於 SPT-N 值之液化評估法可能因受到花蓮港既有地質存在礫石之影響，因此，導致花蓮港港區評估之沉陷量集中於低沉陷量區段。

**表 2 安平港港區不同地震規模作用下之震陷量範圍與港區分布面積佔比**

評估方法	地震情境	地震規模	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	0.07	0~3.8 cm (99.0%)	3.8~7.6 cm (0.9%)	7.6 cm 以上 (0.2%)
	設計地震	7.1	0.28	0~27.7 cm (27.1%)	27.7~55.4 cm (63.5%)	55.4 cm 以上 (9.4%)
	最大考量 地震	7.3	0.36	0~28.4 cm (15.2%)	28.4~56.8 cm (65.4%)	56.8 cm 以上 (19.4%)
NCEER 法	中小度地震	6.9	0.07	0~5.4 cm (91.1%)	5.4~10.7 cm (7.9%)	10.7 cm 以上 (1.0%)
	設計地震	7.1	0.28	0~26.2 cm (21.3%)	26.2~52.4 cm (69.0%)	52.4 cm 以上 (9.7%)
	最大考量 地震	7.3	0.36	0~27.4 cm (19.5%)	27.4~54.8 cm (71.1%)	54.8 cm 以上 (9.4%)

**表 3 花蓮港港區不同地震規模作用下之震陷量範圍與港區分布面積佔比**

評估方法	地震情境	地震規模	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	7.1	0.11	0~0.4 cm (94.6%)	0.4~0.7 cm (3.7%)	0.7 cm 以上 (1.8%)
	設計地震	7.3	0.45	0~13.7 cm (85.9%)	13.7~27.4 cm (11.9%)	27.4 cm 以上 (2.2%)
	最大考量 地震	7.5	0.52	0~14.0 cm (85.4%)	14.0~28.0 cm (12.3%)	28.0 cm 以上 (2.2%)
NCEER 法	中小度地震	7.1	0.11	0~0.3 cm (74.4%)	0.3~0.6 cm (24.1%)	0.6 cm 以上 (1.5%)
	設計地震	7.3	0.45	0~3.0 cm (50.3%)	3.0~6.0 cm (3.4%)	6.0 cm 以上 (46.3%)
	最大考量 地震	7.5	0.52	0~14.3 cm (43.5%)	14.3~28.6 cm (52.0%)	28.6 cm 以上 (4.5%)

圖 21 及圖 22 分別為安平港及花蓮港港區不同地震尖峰水平加速度與震陷量之評估關係，採用具代表性之震陷變化範圍進行迴歸分析，可供不同地震加速度下之快速評估平均震陷量與上、下限範圍，後續可做為地震後快速評估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。上述迴歸經驗公式定義如下：

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

式中  $A$  代表尖峰水平加速度，以重力加速度  $g$  (980cm/s<sup>2</sup>)表示； $S$  代表震陷量，單位為 cm； $C_1$  與  $C_2$  參數經由震陷潛勢分析迴歸求得。以安平港而言，當求取平均(Average)震陷量時，參數  $C_1=25.3$ 、 $C_2=69.9$ ，求取震陷量上限(Upper Bound)時，參數  $C_1=33.8$ 、 $C_2=95.5$ ，求取震陷量下限(Lower Bound)

時，參數  $C_1=16.4$ 、 $C_2=44.0$ 。花蓮港港區則可能因受到鑽孔數量過少且不平均及地質組成特性等影響，目前分析成果呈現不同分析情境下，震陷量大部分小於 10cm 以下。

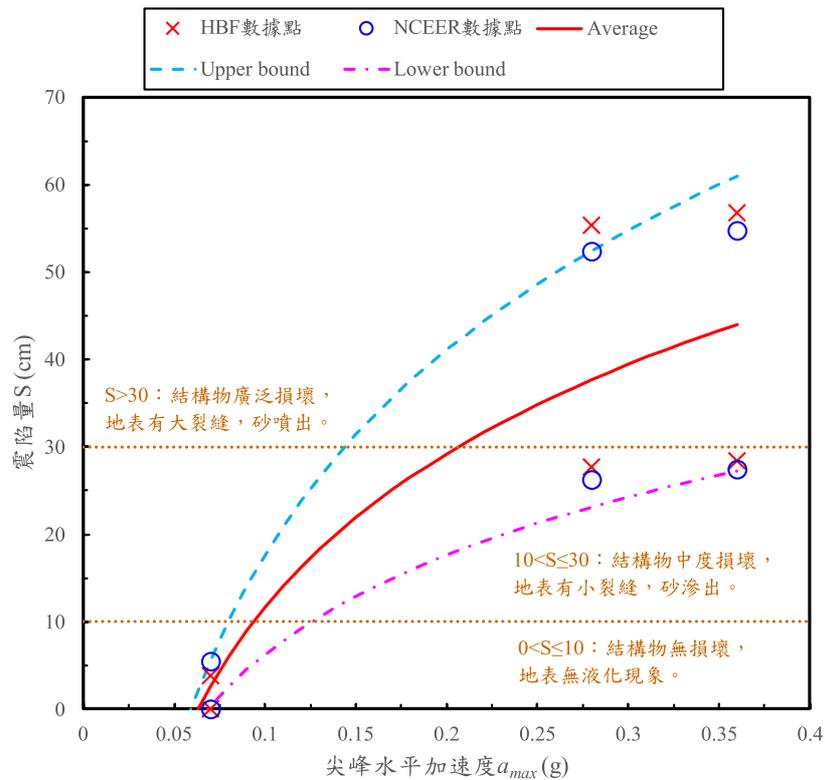


圖 21 安平港港區不同尖峰水平加速度與震陷量之評估關係

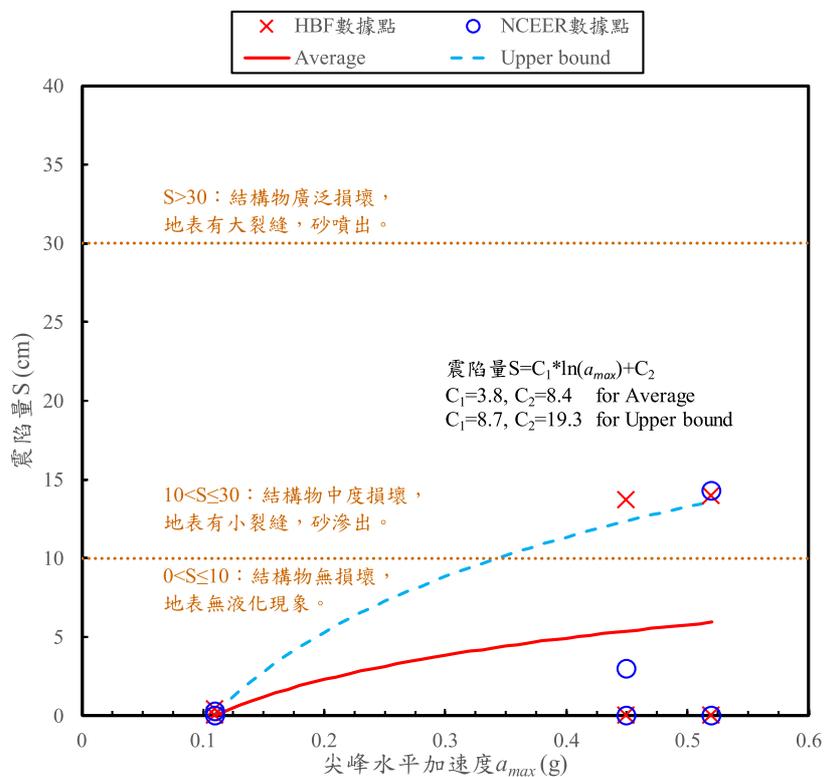


圖 22 花蓮港港區不同尖峰水平加速度與震陷量之評估關係

## 四、結論

本研究蒐集並篩選本中心既有地工資料庫及安平港與花蓮港近新建年工程之地質鑽探資料，主要利用基於 SPT-N 值的 HBF 法及 NCEER 法，探討安平港及花蓮港港區遭遇不同地震規模作用力下之土壤液化分布範圍與地表震陷量，主要成果說明如下：

1. HBF 法及 NCEER 法於安平港評估之低、中與高潛勢區分布位置大致相同，於花蓮港的液化潛能分析，則可能因鑽孔數量過少且分布不均，故 NCEER 法於設計地震及最大考量地震之中、高潛勢區範圍均大於 HBF 法之分析結果。
2. 使用 HBF 法及 NCEER 法評估安平港震陷量之結果相近，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；花蓮港港區在中小地震與最大考量地震時，HBF 法與 NCEER 法評估震陷量變化之上、下限無太大差異，而在設計地震規模下，HBF 法評估之結果較為保守，其評估之震陷量高於 NCEER 法之評估結果。
3. 為提供未來港區快速評估震陷量使用，本研究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，建構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，可做為安平港及花蓮港港區災損評估分析之依據。
4. 考量花蓮港可用鑽探孔位偏少且分佈位置不平均，基於 SPT-N 值之液化潛能分析結果在部分區域的精確性可能不足，因此限制了預測的準確性和全面性，故本研究另以 MASW 剪力波速剖面資料採 Kayen(2013)剪力波速法評估花蓮港土壤液化潛能評估，分析結果顯示 Kayen 法與 NCEER 法抗液化安全係數剖面相近，爰本次進行花蓮港土壤液化潛能評估之結果應尚屬合理。
5. 花蓮港港區現況存在有效鑽孔數不足的問題，然依 0403 地震實際災損來看，22 至 25 號碼頭均有因土壤液化造成之災害，因此建議港務公司在未來的防災規劃中，可參考 Kayen(2013)評估法，以淺層剪力波速做為分析指標，並針對花蓮港各碼頭後線進行補充試驗，以利強化花蓮港港區地震災損預測和防範的能力。

## 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. 許尚逸、楊炫智、盧志杰、黃郁惟、劉佳泓、柯永彥、黃俊鴻 (2018), 0206 地震花蓮港震陷與土壤液化勘查, 地工技術, 156, 65-76 頁。
  6. 盧之偉、林郁峰、黃柏宇、Minh-Tam Doan、溫修程、徐文信、蔡嘉榮、Nozomu Yoshida (2024), 0403 地震花蓮港區勘災紀實, 土木水利學刊, 51(4), 12-23 頁。
  7. 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.
  8. Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-415.
  9. Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford University Press.
  10. Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173-188.
  11. 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.
  12. 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, 407-419.
  13. Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.
  14. Macedo, J., & Bray J. D. (2018). Key trends in liquefaction-induced building settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), 04018076.
  15. 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.
  16. 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.