

港灣構造物耐震性能設計架構之研究(3/4)

A Study on Performance-Based Seismic Design Framework of Port Structures (3/4)

主管單位：²交通部運輸研究所港灣技術研究中心

顧承宇¹

張景鐘¹

曾韋繇¹

賴瑞應²

Ku, Cheng-Yu Chang, Ching-Chung Tseng, Wei-Fan Lai, Jui-Ying

陳明鈺¹

余孟勳¹

Chen, Ming-Yu

Yu, Meng-Hsun

¹國立臺灣海洋大學河海工程學系(所)

摘要

本研究主要針對板樁式碼頭耐震性能設計案例進行研究，依據前期之研究成果，建立板樁式碼頭之耐震性能設計程序，而後經由設計示範例規劃，訂定適當且具代表性的設計條件，以進行板樁碼頭的耐震性能設計案例實作。另外再針對前述各項研究結果來探討目前建議之性能設計法的適宜性，最後依過去兩年期所得之研究成果，探討現行碼頭設計基準之研修。本研究成果可以提昇國內產官學研界之相關設計與研究水準，以因應技術發展及國際化之需求。

關鍵詞：耐震設計、性能設計、板樁式碼頭

Abstract

The study presents the performance-based seismic design case studies for the sheet pile wharf. Based on the results of previous studies, the process of the performance-based seismic design for the sheet pile wharf is established. Through the design planning and the appropriate design conditions, the case study of the sheet pile wharf was conducted. In addition, the feasibility of the performance-based seismic design for the sheet pile wharf is investigated. Finally, the revision of Standards for Harbor Structure Design is initiated. It is expected that the research result can be used to improve domestic design and to catch up with the international design growing trend.

Keywords : seismic design, performance-based design, sheet-pile wharf.

一、前言

本研究藉由港灣技術研究中心與其委託單位過去合作之研究成果，將港灣構造物耐震性能設計之流程以板樁式碼頭作為設計示範案例，並針對其過程與結果提出性能設計法之適宜性與建議。最後，以現有之港灣構造物設計示範例，如重力式碼頭、棧橋式碼頭及板樁式碼頭之研究成果，作為現行規範研修方向之依據。

耐震性能設計法(seismic performance-based seismic design)是以控制構造物在地震力作用下之破壞程度為標的，該方法之基本理念在強調構造物在強烈地震力作用下之非線性變形行為，注重構造物及附屬設施之耐震性能，並以構造物整個生命週期之耐震性能和經濟性(包括設計費、建造費、維護費及可能之損失和修復費用)為主要設計目標，以保證構造物能在各種不同規模的地震力作用下，其耐震性能可滿足業主與國家社會的各種安全、經濟、文化與歷史需求，此法為現今結構耐震設計規範所遵循之方向。

以往耐震設計規範係要求構造物設計須滿足「小震不壞」、「中震可修」、「大震不倒」的原則，因而耐震設計規範採用構造物之重要性係數來間接表達其預期性能，該耐震要求僅定性地隱含在傳統的強度設計法中，並未明確地加以量化，然而性能設計法則要求以直接且透明之參數來表達構造物之破壞狀態或性能，使設計者、業主及使用者等能充分瞭解未來在不同等級地震作用時，構造物可能產生的損失程度及破壞狀況與使用性。性能設計法同時考量結構整體、構件與附屬設施在不同等級的地震危害下之多等級耐震性能目標(performance objectives)，並將構造物在某一設計地震危害下被期望具有的耐震性能加以量化，以建立容許限制值(即性能標準performance criteria)，如此構造物之耐震性能即可採用「在各等級設計地震作用下分析構造物之內力、變形、能量或其他破壞指標 \leq 性能可接受標準」的方式進行檢核。

二、板樁式碼頭設計流程

整體耐震性能設計流程包括第一階段設計與第二階段驗證，第一階段設計首先需將結構物之性能水準定性規定及性能目標，依照各碼頭重要度予以建立。參考國際航海協會(PIANC, 2001)，性能水準定性規定、各碼頭重要度及性能目標，分別如表1、表2、表3所示。其次則需依場址的土壤特性，包括地質、地形、活動斷層等因素來評估場址施工之可能性，若不可行，則需經由地盤改良、變更設計基礎或場址遷移等方式進行調整，以保證場址滿足性能設計之要求。

細部尺寸之初步設計則需先確定結構物之形狀、尺寸、基礎及材料，並可依較低等級地震力作用之分析法檢核以供初步尺寸建立。而後開始進行第二階段驗證，即地震反應參數之計算與分析，其中關於板樁式碼頭的驗證分析法，參照碼頭所需之耐震性能目標，並依其不同地震等級與碼頭重要程度之下，選擇簡化分析、簡化動力分析及動力分析等三種方法進行板樁式碼頭的耐震能力評估，如表4所示。且各驗證分析法使用之時機，如表5所示。

經分析後需將其結果依據國際航海協會所提出之板樁式碼頭性能可接受標準進行檢核，如表 6 所示。若分析之結果滿足性能可接受標準，即耐震性能設計完成；若否，則需變更設計直至分析結果滿足耐震性能可接受標準之規定。

表1 耐震性能水準定性規定之建議

損壞等級	使用性	修復性	安全性
第 I 等級	功能正常	不需修復	結構保持彈性
第 II 等級	短期功能喪失	可快速修復	損壞輕微
第 III 等級	長期功能喪失	修復非常困難	結構不倒維持生命安全(未超過韌性容量)
第 IV 等級	無法恢復營運	須拆除重建	結構崩塌(超過韌性容量)

表2 各碼頭重要度等級之特性

等級	碼頭之特性
特定	明顯具有 A 級結構物之特性 1 至 3 項之情形者
A	1. 結構物在遭受地震災害時，將有可能造成多數人命及財產之損失者。 2. 負有震災後復建工作之重要任務者。 3. 儲存有害或危險物品之結構物，在遭受地震災害時，可能造成人命或財產之重大損失者。 4. 結構物在遭受地震災害時，對於相關區域之經濟與社會活動將造成重大影響者。 5. 結構物在遭受地震災害時，其復舊作業經預測將相當困難者。
B	凡不屬於特定、A 級、C 級者
C	特定及 A 級以外之小規模結構物復舊作業容易者。

表3 建議之碼頭所對應的耐震性能目標

性能等級 地震等級	第 I 級	第 II 級	第 III 級	第 IV 級
	等級 I (中度地震)	A 級 B 級	C 級	—
等級 II (475 年回歸期地震)	特定級	A 級	B 級	C 級
等級 III (2500 年回歸期地震)	—	特定級	A 級	B 級

表4 板樁式碼頭結構之性能驗證分析法

		板樁式碼頭
簡化分析法		經驗公式或靜力分析法 (考量有或無土壤液化)
簡化動力分析法		滑動塊分析 利用簡化圖表的參數分析法
動力分析法	結構模擬	有限元素法或有限差分法 線性或非線性分析 二或三維分析
	土壤模擬	有限元素法或有限差分法 線性或非線性分析 二或三維分析

表5 各驗證分析法使用之時機

	等級 I 地震	等級 II 地震	等級 III 地震
特定級	—	動力分析	動力分析
A 級	簡化分析或簡化動力分析或動力分析	動力分析	動力分析
B 級	簡化分析或簡化動力分析或動力分析	簡化動力分析或動力分析	簡化動力分析或動力分析
C 級	簡化分析或簡化動力分析或動力分析	簡化分析或簡化動力分析或動力分析	—

表6 板樁式碼頭性能可接受標準

參數		性能水準				
		第 I 級	第 II 級	第 III 級	第 IV 級	
殘餘變位	板樁變位	正規化水平位移 d/H	<1.5% 或 d<30cm	N/A	N/A	N/A
		向海側傾斜角	<3°	N/A	N/A	N/A
	岸肩變位	岸肩沉陷量	3~10 cm	N/A	N/A	N/A
		岸肩與後線陸地之沉陷差	30~70 cm	N/A	N/A	N/A
		向海側傾斜角	<2°~3°	N/A	N/A	N/A
最大反應下之應力或應變	基盤面以上板樁		彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限	塑性，不超過韌性容量或應變極限	塑性，超過韌性容量或應變極限
	基盤面以下板樁		彈性	彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限	塑性，超過韌性容量或應變極限
	拉桿		彈性	彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限	塑性，超過韌性容量或應變極限
	錨碇設施		彈性	彈性	塑性，不超過韌性容量或應變極限	塑性，超過韌性容量或應變極限

註：針對補強板樁比補強錨碇設施容易，即板樁較錨碇設施先降伏之機制。

H 為基盤面以上板樁之高度。

N/A 之原文註解為「Not Applicable」，由 INA 設計例可知實際設計時不予檢核。

三、研究成果

3.1 初步設計

本案例以B級碼頭為例，且碼頭採用錨碇式鋼板樁碼頭，並假設為雜貨之碼頭。碼頭規劃之標準斷面如圖1所示。碼頭單元靠海側為主鋼板樁，標準單元長為 22 m；陸側為一錨碇設施，單元長為 12 m；錨碇設施與主鋼板樁之距離為 30 m，錨碇拉桿(高耐索)置於碼頭表面下 1 m 深度。而板樁式碼頭設計參數如表7所示。另由規範查得設計地震之三等級地震力如表8所示。本研究之初步設計以簡化分析法進行設計。

表7 板樁式碼頭設計參數表

板樁埋入深度 D_{emb} (m)	5.9	海側土層高程 (m)	-15
海水單位重 r_w (tf/m ³)	1.03	殘留水位至樁底高 H_{sub} (m)	21.9
板樁深度高程 (m)	-20.9	殘留水位(m)	+1.07
碼頭超載重 w (tf/m ²)	1.5	板樁與土壤間之摩擦角 δ (deg)	15

表8 板樁式碼頭設計地震力

地震等級	計算公式 (PGA)	加速度(g)
等級 I	$0.4S_{DS} / 3.25$	0.068
等級 II	$0.4S_{DS}$	0.22
等級 III	$0.4S_{MS}$	0.28

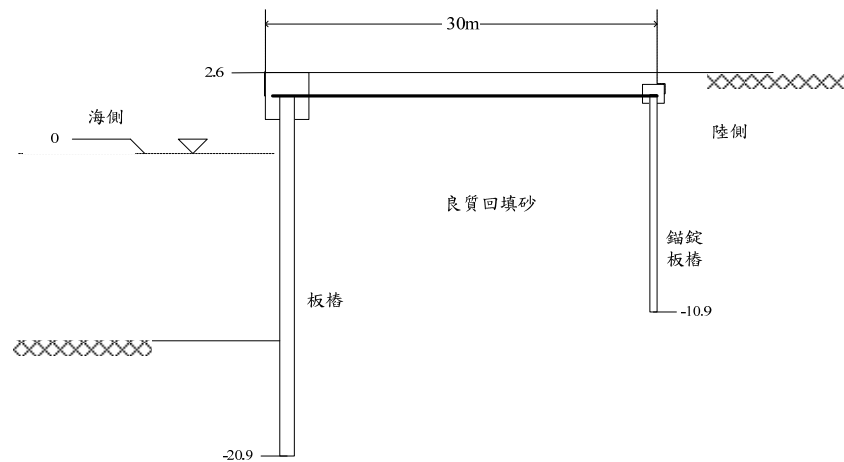


圖1 板樁式碼頭標準斷面示意圖

3.2 驗證分析

本研究於驗證分析時擬採用簡化分析檢核等級 I 地震之性能規定，以及採用滑動塊分析法檢核等級 II 地震之性能規定，而等級 III 地震之性能規定則採用動力分析法進行檢核。

3.2.1 等級 I 地震性能驗證檢核

板樁式碼頭之簡化分析方法，採用擬靜力分析方法，將結構物所承受的地震力簡化為施加於構造物側向的靜態慣性力，並將構造物與承載土體視為剛體，以檢核其穩

定性。

簡化分析法步驟簡述如下：

1. 給定設計震度係數 K_e 。
2. 計算殘留水位 $R.W.L.$ ：

$$R.W.L. = \frac{2}{3}(M.H.W.L. - M.L.W.L.) + M.L.W.L. \quad (1)$$

式中， $M.H.W.L.$ 為朔望平均高潮位； $M.L.W.L.$ 為朔望平均低潮位。

3. 計算地震時主動土壓力 $P_{AE,i}$

依 Mononobe-Okabe 之建議，作用於板樁牆體第 i 土層之動態主動土壓力 $P_{AE,i}$ 水平分量，可依下式計算：

$$P_{AE,i} = K_{AE,i} \cdot \left(\sum \gamma_i h_i + w_{OL} \right) \cdot \cos \delta \quad (2)$$

式中， γ_i 為第 i 土層土壤之單位重，如位於水面下，則取水中單位重 $\gamma'_i = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ； γ_w 為海水單位重，取為 $\gamma_w = 1.03 t/m^3$ ； h_i 為第 i 土層土壤之厚度； w_{OL} 為碼頭超載重 (t/m^2)，地震時取 $1.15 t/m^2$ ； δ 在板樁式碼頭中即板樁與土壤間之摩擦角(度)； $K_{AE,i}$ 為第 i 土層主動土壓力係數，計算如下：

$$K_{AE,i} = \frac{\cos^2(\phi_i - \theta)}{\cos \theta \cdot \cos(\theta + \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \cdot \sin(\phi_i - \theta)}{\cos(\theta + \delta)}} \right]^2} \quad (3)$$

式中， ϕ_i 為第 i 土層土壤之內摩擦角； θ 為地震合成角，殘留水位以上土層 $\theta = \tan^{-1} K_e$ ；殘留水位以下土層 $\theta = \tan^{-1} K'_e$ ； K'_e 為修正後的震度係數，

$$K'_e = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - 1} \cdot K_e。$$

4. 計算地震時被動土壓力 $P_{PE,i}$

被動土壓力計算與主動土壓力雷同，作用於板樁牆體第 i 土層之動態被動土壓力 $P_{PE,i}$ 水平分量，可依下式計算：

$$P_{PE,i} = K_{PE,i} \cdot \left(\sum \gamma_i h_i + w_{OL} \right) \cdot \cos \delta \quad (4)$$

式中，因板樁被動側位在海面下埋置部份，碼頭超載重 w_{OL} 取為 $0 t/m^2$ ； $K_{PE,i}$ 為被動土壓力係數，計算如下：

$$K_{PE,i} = \frac{\cos^2(\phi_i - \psi)}{\cos \psi \cdot \cos(\psi + \delta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \cdot \sin(\phi_i - \psi)}{\cos(\psi + \delta)}} \right]^2} \quad (5)$$

5. 計算地震時之動態水壓合力 P_{DW}

作用於板樁牆體之動態水壓力 P_{DW} ，依下式計算。

$$P_{DW} = \frac{7}{12} \cdot K_h \cdot \gamma_w \cdot H_w^2 \quad (6)$$

式中， H_w 為海水潮位深度(m)。因動態水壓力與潮位深度有關，故於分析過程須考量各相關設計潮位之動態水壓力。

6. 計算殘留水壓合力 P_{RW}

若碼頭海側之潮位高於碼頭陸側之殘留水位時，則無需考量殘留水壓力；而當海潮位低於殘留水位時，作用於板樁上之殘留水壓力 P_{RW} 可由下式計算：

$$P_{RW} = \gamma_w \cdot h_w \quad (7)$$

式中， h_w 為殘留水深(m)，即殘留水位與海潮位之差。另殘留水壓之合力 P_{RW} 如下：

$$P_{RW} = \frac{1}{2} \cdot p_{RW} \cdot h_w + p_{RW} (H_w + D_{emb}) \quad (8)$$

式中， D_{emb} 為板樁埋入深度(m)。因殘留水壓力亦與潮位深度有關，故於分析過程須考量各相關設計潮位所產生之殘留水壓力。

7. 檢核板樁貫入長度

分別計算影響結構穩定之相關作用力後，即可計算板樁貫入長度之安全係數。依規範規定板樁入土長度須滿足下式：

$$S.F. \leq \frac{M_p}{M_a} \quad (9)$$

式中， $S.F.$ 為貫入長度安全係數，平常時 1.5、地震時 1.2； M_p 為被動土壓力對拉桿裝設點之抵抗力矩； M_a 為主動土壓、動態水壓及殘留水壓等對拉桿裝設點之驅動力矩；動態水壓與殘留水壓取合力矩最大時之潮位即可。

8. 計算耐震安全係數 F_s

依前述步驟反推臨界穩定狀態(板樁貫入長度安全係數為 1)對應之地震係數即為構造物最大可承受之地震係數 K_l ，其與設計震度係數 K_e 之比值即為耐震安全係數。

本研究依上述步驟求得 $S.F.$ 為 1.22， F_s 為 1.72，故碼頭在等級 I 地震作用下，其安全係數大於 1，即表示碼頭未發生破壞，可滿足性能可接受標準與耐震性能要求。

3.2.2 等級 II 地震性能驗證檢核

板樁式碼頭係運用滑動塊體法於結構之耐震能力檢核評估。參考 Seed 與 Whitman 之研究，以 K_{AE} 與 K_{PE} 分別表示地震時之主動土與被動土之動態土壓力係數，地震時極限錨碇反力為 T_e ，以 K_A 與 K_P 表示常時之主動土與被動土之靜態土壓力係數，常時之極限錨碇反力為 T_s ，Towhata 與 Islam 得到如下關係式：

$$K_{AE} = K_A + \Delta K_{AE} = K_A + \frac{3}{4} K_h \quad (10)$$

$$K_{PE} = K_P + \Delta K_{PE} = K_P - \frac{17}{8} K_h \quad (11)$$

$$T_e = T_s \cdot \frac{K_{PE} - K_{AE}}{K_P - K_A} \quad (12)$$

採用壁體與背填土壤合為一體作剛體運動之假設，得到臨界滑動之水平地震係數 K_t 如下：

$$K_t = \frac{a \tan \alpha_{AE} - b + \tan(\phi - \alpha_{AE})(1 + b \tan \alpha_{AE})}{1 + c \tan \alpha_{AE}} \quad (13)$$

其中，

$$a = \frac{mT_s + P_p + 1/2 \gamma_w (H_w + D_{emb})^2 + \Delta U_p}{W_m} \quad (14)$$

$$b = \frac{1/2 \gamma_w (H_w + D_{emb})^2 \tan \phi + \Delta U_A \sin \alpha_{AE}}{W_m} \tan \psi \quad (15)$$

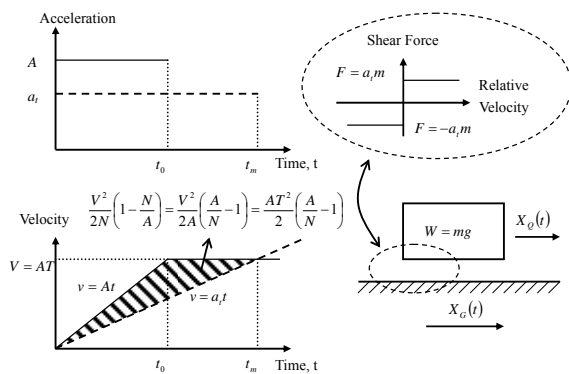
$$c = \frac{1}{W_m} \left[\frac{23mnT_s}{8(K_p - K_A)} + \frac{17P_p \gamma_{sat}}{8K_p \gamma'} + \frac{7}{12} \gamma_w H_w^2 \right] \quad (16)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \left[\gamma_{sat} (H_w + D_{emb})^2 + \gamma_{wet} (H - H_w)(H + 2D_{emb} + H_w) \right] \quad (17)$$

其中，當錨碇完全有效時 $m=1$ ，無效時 $m=0$ ； P_p 為靜態被動土壓力， ΔU_A 與 ΔU_p 分別為主動土與被動土因反覆剪力所產生之附加孔隙水壓；當錨碇部分在地下水位(假設為海平面)以上時， $n=1$ ，若完全淹沒於水中時， $n = \gamma_{sat} / \gamma' = \gamma_{sat} / (\gamma_{sat} - \gamma_w)$ ， γ_w 與 γ_{sat} 分別為海水與飽和土壤之單位體積重量； α_{AE} 為主動破壞面與水平面之夾角， H 、 H_w 與 D_{emb} 分別為板樁基盤面以上總長度、基盤面以上水深與板樁在土中埋設之長度。

在得到臨界滑動震度係數 K_t 後，便可利用滑動塊分析進行分析，滑動塊體分析法的精神是將結構主體視為可滑動之剛體，地震力為作用於結構基礎之地震加速度歷時，主要分析土工結構受地震超出抗滑能力時的反應，以及計算地震所引致總滑移量。土層破壞面之產生係由板樁後方產生主動土壓破壞，其破壞時之破壞面所決定，故滑動塊體之定義於本研究中係指為沿破壞面所產生之楔型塊體。為了評估板樁式碼頭結構物受地震作用之滑移量，根據 Newmark 提出的簡易滑動塊體法來分析剛性塊體在於水平地表運動過程期間所導致的總滑移量。如圖 2 所示，假設質量 m 的塊體為剛體，放置於水平表面上，而滑動面的力學行為與彈塑性模式相符合；當地震發生時，塊體之水平方向慣性力由滑動面之抗剪力來維持塊體的動態平衡，所以塊體之運動狀態與滑動面所提供的抗剪力有關。

當地震發生時，假設地表位移歷時為 $X_G(t)$ ，塊體位移歷時為 $X_Q(t)$ ，塊體因受慣性力作用而有向外滑動之趨勢，並由滑動面之抗剪力來維持塊體的動態平衡。當塊體未滑動時，塊體與地盤一起運動；當塊體之水平慣性力大於滑動面之極限抗剪力之瞬時，則塊體與地表之間會就有相對運動發生，此時之加速度稱為臨界滑動加速度 a_t ；而在滑動期間，若地盤與滑動塊體之相對速度減為零時，則滑動停止，塊體再次與地表一起運動。根據滑動面為彈塑性模式之假設，滑動期間之滑動塊體以等加速度 a_t 運動，因而將塊體與地表間之相對加速度積分二次則可求得塊體滑移量。



資料來源：Newmark, N. M, 1965

圖2 Newmark之滑動塊體分析法的觀念

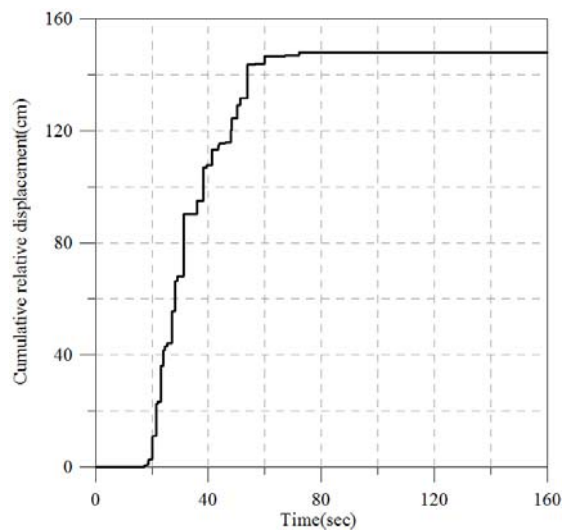


圖3 等級 II 地震所產生之永久位移

分析時以最保守之全液化土層為考量，其計算之臨界加速度為 0.022 g，而分析結果為產生 148 公分之永久位移，如圖 3 所示，而等級 II 之人造加速度歷時，如圖 4 所示。

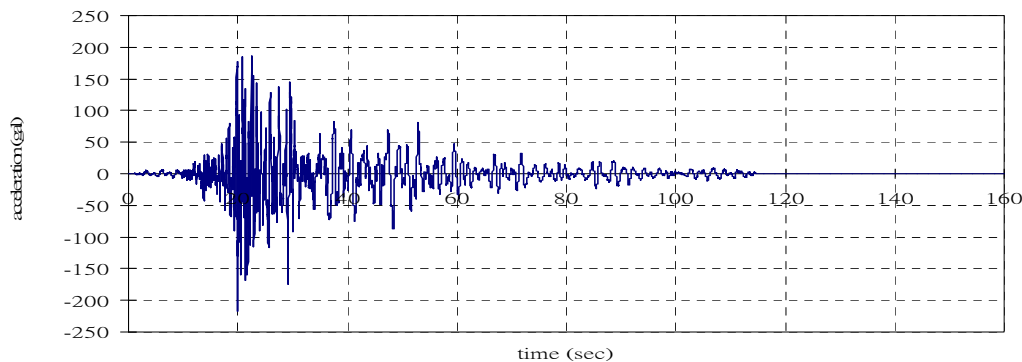


圖4 等級 II 地震之人造加速度歷時

3.2.3 等級 III 地震性能驗證檢核

板樁式碼頭的動力分析法，一般可採用有限元素(finite element method, FEM)或有限差分(finite difference method, FDM)等數值方法，模擬「板樁-背填材料」之結構土壤介面之滑動行為，並考慮超額孔隙水壓激發對碼頭穩定性及變位之影響，以及土層之非彈性行為，利用具代表性之實際地震記錄作為輸入運動，進行非線性動力歷時數值分析，探討在所考量地震等級下，板樁式碼頭結構之性能表現能否符合性能要求，以評估其耐震能力。

本研究採用之 FLAC 程式為美國 Itasca Consulting Group, Inc. 所發展，FLAC 為顯性(explicit)有限差分程式來處理二維平面應變之數值分析問題，以模擬土壤、岩石彈塑性或其他達降伏限度後成塑性流動的材料所組成的構造物行為，運算過程中是以「時間步長的型態」(time-stepping fashion)來求解網格中每一個節點的運動方程式，利用極

小之時階，達到節點或元素之力平衡，故可得整體系統之行為隨時間發展變化的過程。另外，FLAC 內含 Fish(FLACish) 程式可供使用者自行撰寫附加之子程式，以符合特殊材料及案例情況之需求。

以 FLAC 進行板樁式碼頭之動態數值模擬分析主要分為十大步驟：(一)建立網格；(二) 給予材料強度參數；(三)設定邊界條件；(四) 加入結構元素及界面元素並達重力平衡；(五) 施加海水之側向力；(六) 指定地下水位面；(七) 力學平衡；(八) 使用 Finn 模式；(九) 給予阻尼參數和動態邊界條件；(十) 施加地震力，並以等級Ⅲ地震之人造加速度歷時(如圖 5)輸入程式進行分析。

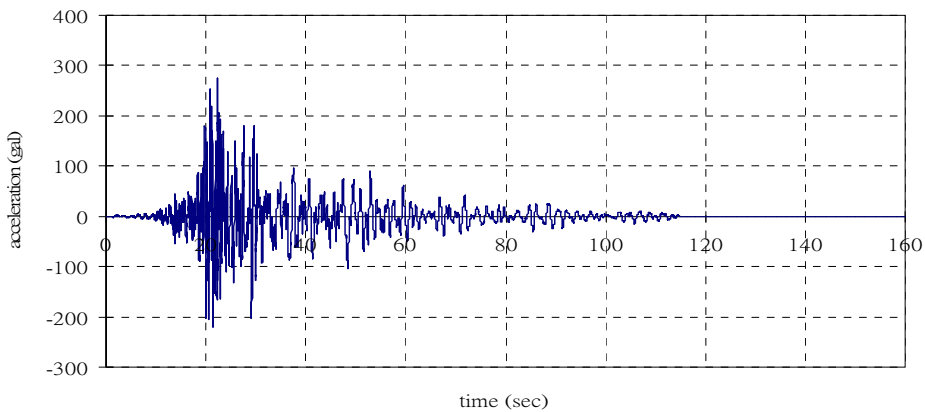


圖5 等級Ⅲ地震之人造加速度歷時

板樁式碼頭之分析模式，如圖 6 所示。分析網格劃分為 42×22 計 924 個差分網格，由土層及結構元素等構成，經上述之步驟進行分析並輸入所需之參數，所得之動力分析成果如圖 7 所示，最大水平位移量為 144 公分，鋼板樁最大彎矩為 3130000 牛頓-公尺大於降伏彎矩 3040710 牛頓-公尺，達塑性標準。而錨碇板樁最大彎矩為 1350000 牛頓-公尺大於降伏彎矩 816190 牛頓-公尺，已達塑性。而高耐索在地震加速度歷時 49.4 秒時有最大應力為 50.4 公噸已達容許拉力 50.4 公噸。此一分析結果符合第Ⅳ級性能等級規定，滿足性能要求。

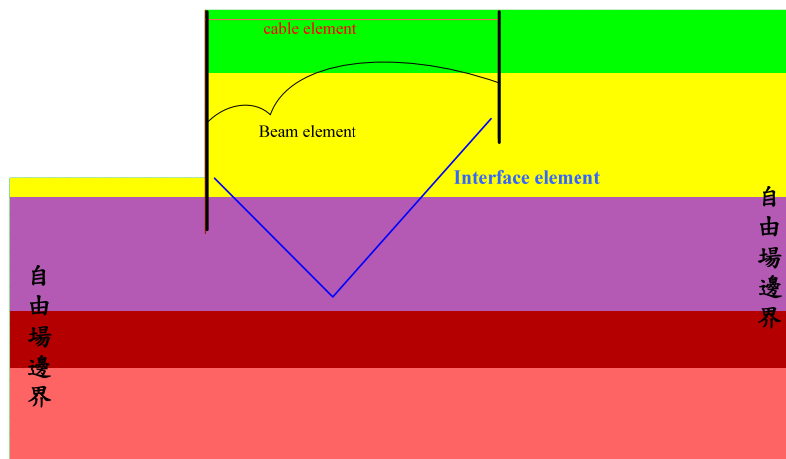


圖6 板樁式碼頭分析模式

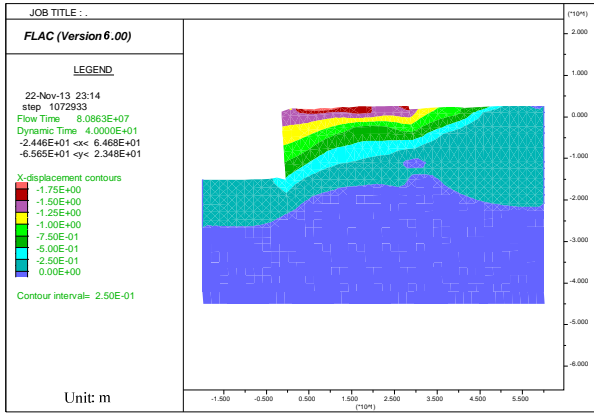


圖 7 板樁式碼頭等級III地震破壞水平位移

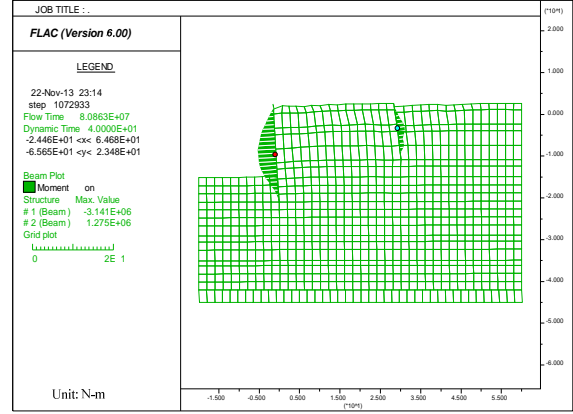


圖 8 板樁式碼頭等級III地震破壞彎矩圖

3.3 設計結果說明

等級 I 地震簡化分析法分析結果，碼頭安全係數大於 1，表示碼頭未發生破壞，且土壤無產生液化，不需進行維修並滿足功能正常之性能要求；等級 II 地震滑動塊分析檢核結果，其在可接受標準之位移量不予檢核，故無法準確得知是否滿足性能標準，但以動力分析法進行分析比對，其檢核結果滿足性能之要求；等級 III 地震動力分析檢核結果，錨碇設施已達到塑性之性能要求，惟以 FLAC 之分析之限制，難以判斷其是否超過韌性容量或應變極限，但就位移量之破壞結果可發現，結構物已嚴重毀損，應無法恢復營運作業。本研究之分析結果顯示，性能規定之驗證絕大部份滿足耐震性設計之建議可接受標準，惟對於殘留變位之量化資料於第 II 級、第 III 級、第 IV 級，建議仍須加以建立其量化資料。

四、板樁式碼頭之性能適宜性探討

本研究依據性能設計之步驟進行板樁式碼頭耐震性能案例設計，案例分析可順利完成分析，證實本研究所提之設計流程具可行性，若未來碼頭耐震性能設計規範採用此設計方式，設計單位參照相同的設計流程，應具可行性。但就現階段國際航海協會對板樁式碼頭訂定之性能可接受標準，位移檢核僅在性能等級 I 有明確的定量規定，雖此一訂定方式符合性能設計之精神，然而針對分析方法上卻存在其檢核之難處，故未來建議可作大量之實際案例破壞分析與整合，訂定出精確且適宜之可接受標準，以作為後續設計之參考依據。目前，本研究將滑動塊分析與非線性動力分析之分析結果進行比較，這樣的方式可提供設計者對於設計例之破壞行為的掌握。

另外，由表 9 可知，等級 II 地震之三組非線性歷時分析位移結果均較滑動塊體法所得結果低，換言之，滑動塊體法之分析結果應是較為保守；另單就結構構件之檢核的分析方法上，目前亦僅能以非線性動力分析之結果為檢核之依據。另外，此一分析結果之比較，尚可提供本研究設計案例在簡化動力分析時，其土層液化百分比的選定上作為參考依據。而在遭受同一等級地震力之情況下，其破壞位移量並非相同，此一現象顯示，雖然三組人造地震之尖峰加速度相同，但地震歷時波的特性隱含不同的能

量大小，因而有不同的分析結果產生。

表9 板樁碼頭設計例滑動塊與動力分析之位移反應比較

等級 II 地震	Newmark 滑動塊體法	動力分析	備註
碼頭面水平最大位移反應	148 cm	89 cm	錨碇樁已達塑性 鋼板樁已達塑性

五、碼頭現行設計基準之耐震設計規定探討與建議

民國八十六年部頒「港灣構造物設計基準」中第二篇設計條件內之第九章耐震設計，其主要內容為耐震目標、設計地震力與分析方法，耐震設計目標訂為至少承受工址 475 年回歸期之地震，故設計地震力以 475 年回歸期為主，以工址及用途係數調整不同重要度碼頭的設計地震力。剛性碼頭不得發生滑動、傾覆及結構強度與基礎承载力不足之破壞，非剛性碼頭容許塑性變形，但韌性比不得超過韌性容量。民國九十三年修訂「港灣構造物設計基準」中第二篇設計條件內之第十章耐震設計，耐震設計目標為「小震不壞、中震可修與大震不倒」，設計地震力考慮碼頭工址及碼頭用途，並分成「中小度地震、設計地震與最大考量地震」。

耐震設計從只考慮單一地震下的影響到「小震不壞、中震可修與大震不倒」，同一結構物在不同等級地震下能有不同程度的反應。而耐震性能設計則進一步考慮不同重要度結構物受震後的反應，並將其作性能分級檢核，性能分級考慮使用性、可修復性與安全性分為三個等級，使結構物性能有等級之分；在耐震性能設計的精神下，業主可以依照碼頭設計目標及預算選擇性能等級，使該碼頭具有使用性及經濟性。

過去數十年來，性能設計理念已是國際工程界研定技術規範的重要議題，發展至今，歐洲與日本皆以採用其精神與內涵，而現行「港灣構造物設計基準」在耐震性能設計之趨勢下，於碼頭設計基準第十章節耐震設計中，建議可調整與新增之內容方向為：(1)應加入耐震性能設計之架構、流程及可接受標準；(2)將地震力之分級名稱改成與上位基準「公共工程性能設計準則」中之分級名稱相同，統一使用之詞彙；(3)非剛性設計地震力調整成與公路橋梁耐震規範相同，並且將譜加速度係數表之內容調整使其與內政部地政司土地資料庫最新公布之行政區劃分吻合；(4)增加臺北微分區表及譜加速度係數公式；(5)非剛性構造物韌性設計中增加細長比與寬厚比的限制。

在耐震性能設計中需考慮碼頭重要度分類、地震等級以及性能等級，而設計分為兩階段：第一階段設計部分，需先進行選擇性能要求、構造物系統規劃及土壤液化評估；第二階段驗證部分，則需依照碼頭之重要度選擇分析方法，對第一階段設計之成果進行驗證，若通過檢核則完成設計，若不通過檢核，則回到第一階段設計進行修正，直到檢核通過為止。

六、結論與建議

6.1 結論

1. 板樁式碼頭對於其背填土的材料與特性之影響甚大，因此板樁式碼頭設計時，對於背填土材料之動力特性要求需特別注意，尤其是背填土材料發生液化之控制，係設計時之重要考量。
2. 初步設計以簡化分析法進行設計，此法亦為驗證檢核分析之方法，除可使初步假設之參數及尺寸的失敗機率降低，更可增加使用者對分析方法的熟悉度，對工程師在分析及檢核的過程中，亦大量減少選擇眾多分析方法之複雜程度。
3. 板樁式碼頭受三個等級地震作用，分別由簡化分析、簡化動力分析及動力分析之分析結果，其依照碼頭重要程度及地震震度在等級 I 之檢核可符合規定之性能要求，在等級 II 之檢核依適宜性探討所建議之採用重力式碼頭性能可接受標準為參考依據可符合規定之性能要求，而等級 III 之檢核結果亦可符合規定之性能要求。

6.2 建議

1. 板樁式碼頭之有效應力分析需輸入合理且適宜之參數，在調查、規劃、初步設計與詳細設計階段時，受限於分析參數之可取得性，對於分析結果可能會有影響，對於動力分析之參數決定，建議後續可做一系列之參數研究以建立更完善之參數選用原則，達到分析結果更具一致之代表性。
2. 碼頭之性能可接受標準沿用國際航海學會訂定之，而此一數據結果是否能完全適用於國內並適時反應其破壞行為，尚值得作進一步之探討，以期未來能制定一系列適用於本國之標準。

參考文獻

1. 日本港灣協會 (1999)，「港灣の施設の技術上の基準・同解説」，運輸省港灣局監修。
2. 日本財團法人沿岸技術研究中心 (2007)，「港灣構造物設計事例集」。
3. 交通部運輸研究所 (2005)，「港灣構造物設計基準修訂」。
4. 賴瑞應、張權、薛強、陳正忠、徐偉誌、石豐銘 (2011)，「港灣構造物耐震性能設計架構之研究(1/4)」，交通部運輸研究所。
5. 財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 (2009)，「公共工程性能設計準則之研究」，行政院公共工程委員會專案研究計畫。
6. 張荻薇、廖學瑞、丁金彪 (2011)，「2011 年東日本大震災-震後六個月-港灣及海岸」，臺灣世曦股份有限公司，臺北。
7. 許文豪 (2005)，「港灣碼頭結構物功能性耐震能力評估之研究」，國立臺灣海洋大學，河海工程學系，碩士論文。
8. 曾韋絲、顧承宇、賴瑞應 (2013)，「動力分析於板樁式碼頭耐震性能設計研究」，第 15 屆水下技術研討會論文集。
9. 賴瑞應、賴聖耀 (2004)，「地震引致板樁式碼頭之穩定性分析」，交通部運輸研究所。
10. 賴瑞應、張權、薛強、顧承宇、曾韋絲、徐偉誌、翁健煌、蔡勇賢 (2013)，「港灣構造物耐震性能設計架構之研究(2/4)」，交通部運輸研究所。

11. Itasca (2005), FLAC & FLAC3D- Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, User's Guide, Itasca Consulting Group, Inc, Minneapolis, U.S.A.
12. Newmark, N. M. (1965), Effect of Earthquake on Dam and Embankment, Geotechnique, Vol.15, No. 2, pp.139-159.
13. PIANC/International Navigation Association (2001), Seismic Design Guidelines for Port Structures, A.A Balkema Publishers.
14. Seed, H. B. and Whitman, R.V. (1970), Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads, ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, Ithaca, pp. 103-147.
15. Towhata, I. And Islam, S. (1987), Prediction of Lateral Movement of Anchored Bulkheads Induced by Seismic Liquefaction, Soils and Foundations 27(4): 137-147.
16. Whitman, R. V. and Liao, S. (1985), Seismic Design of Retaining Walls, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper GL-85-1.