



群樁基礎裸露橋梁於 近斷層地震作用 之振動台實驗與分析研究

劉光晏／國立成功大學土木工程學系 副教授

紀貞耀、呂依涵／中鼎工程顧問公司 工程師

蔡旻諺／中興工程顧問公司 工程師

陳家漢／國家地震工程研究中心地球科學與大地工程組 副研究員

張國鎮／國立臺灣大學土木工程學系 特聘教授

國內跨河橋梁之基礎型式多為群樁基礎，當基礎沖刷裸露後恐因樁體強度不足或承载力不足問題造成倒塌，更遑論位處斷層近域之橋梁恐無法承受斷層錯動之能量侵襲，其耐震安全令人擔憂。公路橋梁耐震設計規範中並無明文說明土壤彈簧應如何設定，工程實務中雖多參考日本道路橋示方書基礎構造編，或美國石油學會之規定，但仍無法確認美國與日本的經驗公式可否適用於臺灣近斷層區域。尤其土壤本身為與應變相依之高度非線性材料，且群樁基礎具有群樁效應，當輸入地震為具速度脈衝的近斷層地震，如基礎裸露將造成邊界條件劇烈變化，則樁－土－結構互制行為更顯複雜。本研究之目的在於透過振動台實驗結果，檢討近斷層作用下之樁－土－結構互制行為，觀察於不同裸露深度下各高層間基樁的反應與群樁效應，再藉由日本道路橋示方書土壤彈簧、美國石油學會之土壤彈簧，與本研究之等值線性土壤彈簧等，分別去模擬樁－土－結構互制行為，並與試驗結果比較，期望能透過數值模型預測其結構行為，並運用於工程實務上。

前言

臺灣位在歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊相交界處，因板塊相互擠壓，山脈呈現南北狹長，河川多為東西流向，因此南北向公路及鐵路等交通設施需要仰賴橋梁跨越河川，故橋梁在臺灣交通樞紐上極其重要。

根據經濟部中央地質調查所 2012 年公布之斷層資料，臺灣地區第一類活動斷層共有 20 條，第二類活動斷層共有 13 條，總計 33 條。若以第一類活動斷層兩側 10 公里範圍內通過之村里為近斷層影響範圍，則其影響人口數超過 860 萬人，超過總人口數三分之一，故無可避免有許多民生建設座落於離斷層較近之處，以橋梁

為例，橋梁為交通運輸重要途徑，連結兩地提供快速便利的服務。相對於建築結構，橋梁具有平面、線形、距離長等特性，在臺灣這塊年輕地質構造上，往往因斷層線散佈，橋梁建設必須面對跨越斷層或近斷層效應的問題。考慮到前述造成的沖刷裸露再加上近斷層效應之影響，可能會對橋梁之變形造成放大之影響，不僅造成結構之損壞，影響交通網絡之使用，造成民生經濟損失，更可能傷及使用者之安全，因此橋梁基礎受沖刷裸露後的耐震評估行為應為一重要探討之議題。

每逢秋夏常有颱風來襲並挾帶龐大雨量，引發河川水位急速暴漲，加上臺灣東西向屬於窄短型，地勢

擁有顯著之高程落差，因此河川流速偏高，造成大部分河川下游之橋梁基礎受到顯著之冲刷作用引發基礎裸露，當基礎裸露之橋梁受到地震侵襲時，將可能使橋梁發生顯著之相對位移，除了危機使用者安全性，亦會增加落橋及結構損毀之可能性，故群樁基礎受冲刷導致基礎裸露後之橋梁耐震性能引起諸多學者之研究及討論。

本研究之目的在於透過振動台實驗結果，檢討近斷層作用下之樁-土-結構互制行為，觀察於不同裸露深度下各高層間基樁的反應與群樁效應，日本道路橋示方書、日本鐵道構造物之土壤彈簧法、美國石油學會之土壤彈簧，與等值線性土壤彈簧法，分別去模擬樁-土-結構互制行為，並與試驗結果比較，期望能透過數值模型預測其結構行為，並運用於工程實務上。

土壤結構互制反應實驗與分析研究

單樁振動台實驗與分析

賴姿妤^[1]使用雙軸向剪力盒，進行單樁在四組不同裸露深度之樁基礎樁振動台實驗。實驗結果顯示隨著裸露深度增加，結構週期以及上部結構位移會隨之增加，樁身彎矩除了會增大，樁身之反曲點位置亦隨之改變，而其利用國內規範計算土壤勁度所得結構反應較佳，而彈簧數量越多，將會低估結構模型之週期及頂層位移。

國內許多學者對文獻^[1]之實驗進行分析與模擬。王修駿^[2]延續賴姿妤之實驗更進一步探討乾砂土壤與飽和土壤之樁土互制行為，其採用有限元素軟體 ANSYS 建構 3D 分析模型，並以等效線性方式模擬，利用 SHAKE91 並根據土壤之動態性質以及 Seed and Idriss^[3]提出之砂土剪應變與剪力模數之下界曲線，計算各層土壤折減後平均剪力模數。研究結果顯示在 FEM 模型採用阻尼比 5 % 較能掌握上部結構之反應，隨著裸露深度增加，樁身之彎矩需求將會提高，橋柱之彎矩需求將會降低，此種轉換機制可能會導致橋梁的破壞模式由橋柱轉移至樁身。劉光晏等人^[4]則建立等效線性土壤彈簧（TEL）來模擬樁土之互制之行為，分析軟體採用 SAP2000，並比較文獻^[1]之實驗成果。分析結果顯示此方法均能掌握不同裸露深度情形下之結構系統週期，並能有效預測實驗模型之上部結構歷時反應、基礎版歷時反應以及下部結構歷時反應。

群樁反覆側推實驗與分析

Wang 等人^[5]主要探討側向力增加對於 RC 樁帽基礎的破壞機制。其採用 2 × 3 高架 RC 樁帽基礎模型放置在 3.2 m × 1.6 m × 4.2 m 鋼框架土箱中進行反覆擬靜力試驗，試體分成裸露長度 80 cm 之 S608 試體及 140 cm 之 S614 試體。實驗結果顯示邊樁之樁頂會先降伏，第一個降伏點伴隨混凝土明顯裂縫，當進入極限狀態時，核心混凝土壓潰情形隨後才發生。第一個塑鉸在樁頂產生，隨後在土壤深度之 4 到 6 倍樁徑產生新的塑鉸，且外樁塑鉸位置比內樁還低。

鄧爵明^[6]採用單柱橋墩與 2 × 2 群樁基礎及第二代雙軸向剪力盒實驗盒進行一系列之反覆側推試驗，以探討群樁基礎於不同裸露深度下，受側向力作用之下的結構反應與其破壞機與位置。實驗模型以台南市深坑溪橋梁進行縮尺，實驗組別分別是土壤未裸露、土壤裸露 3 倍樁徑和土壤裸露 6 倍樁徑。實驗結果顯示，當砂土裸露深度越多，橋柱相對位移量隨之下降，基樁位移量隨之上升；三種不同裸露深度組別之破壞機制，第一個降伏點均發生在前排樁的頂部。隨著裸露深度的增加，土壤提供之消能面積減少，而遲滯迴圈之勁度也隨之下降。其也使用文獻^[4]提出之樁土之互制方法，分析結果顯示將砂土沉陷現象納入數值分析考慮因素，將頂部土壤彈簧適當移除，較能夠得到較佳之分析結果。

蔡旻諺^[7]主要探討等值線性土壤彈簧（TEL）模型適用性，並對文獻^[1]與文獻^[6]之實驗結果進行模擬分析，同時以日本道路橋示方書（JRA）^[8]、美國石油學會（API）^[9]之土壤彈簧法作為比較，分析結果顯示單樁在不同裸露深度下上部結構之位移與加速度，等值線性土壤彈簧^[4]均能有效擬合實驗反應，而 JRA 與 API 之土壤彈簧，在地震歷時主震區則會低估實驗反應，對於群樁冲刷裸露後受靜態荷載下之反應，樁頂與樁底會先降伏後，而等值線性彈簧能有效模擬後排樁身彎矩，但會低估前排樁在樁底位置。另比較側推曲線與實驗結果，API 土壤彈簧與等值線性土壤彈簧的側推反應與實驗結果之誤差相當小，而 JRA 在 6 倍裸露樁徑較能有效地模擬實驗結果。

群樁振動台實驗與分析

Liang 等人^[10]針對可液化砂土場地條件，採用 2 × 2 的低樁帽群樁系統進行振動台試驗。試驗顯示即使砂完全液化，中度緊密砂的加速度逐漸增加，並沒有減弱，在液化瞬間力矩接近最大值並保持定值直到振動

結束，同時最大力矩發生樁頭的位置。數值分析結果顯示，較大的樁距只會產生略大的樁彎矩，群樁效應在液化中的中度緊密砂並不顯著。隨著 EI 值的增加，彎矩變大；相反地，當 EI 低於門檻值時，力矩將減少。此外上部結構質量的增加會產生相當大的力矩。有限元素分析結果顯示，當土壤滲透率增加到臨界值時，較高的滲透率可以顯著延緩孔隙水壓 u_e 的累積，在低滲透性的砂液化時，力矩顯著增加。

Shang 等人^[11] 利用兩步法來預測樁支撐結構受到地震反應，第一步是進行地盤反應分析，為了獲得沖刷後地面加速度反應，第二步是在對樁基礎支撐結構（非線性溫克基礎）進行非線性歷時分析，並沿樁節點均勻輸入自由場之加速度反應。為了驗證此方法並進行振動台實驗。數值分析採用 OpenSees 分析，得到下列結論：振動台試驗的加速度反應和自由場中的數值分析的進行比較，模型表面層的加速度反應譜和分析數據在 0D 和 2D 的 SD 中都很好地匹配。樁-土-結構之動力特性表現出三階模態特性，其主要受上部結構振動，土層和樁帽的影響。由於縮短了與土壤相關的周期，因此沖刷延長了結構的主要周期，土壤性質和沖刷都會影響樁-土-結構的地震輸入，因此建議將沖刷自由場的地面加速度作為兩步法中非線性溫克基礎的地震輸入。該文使用了一種簡單的樁支撐結構模型，同時也選擇不同地震輸入作為討論，數值和實驗分析顯示，提出的兩步法能夠以合理的精度估算樁支撐結構的地震需求，並能夠解釋地震分析中的沖刷情景。

張榮泰^[12] 採用單柱橋墩與 2×2 群樁基礎及第二代雙軸向剪力盒實驗盒進行振動台實驗，以探討單柱式橋墩與群樁基礎於不同裸露深度下，觀察於不同裸露深度下各高層間基樁之彎矩與群樁效應。實驗組別分別是土壤未裸露、土壤裸露 3 倍樁徑、土壤裸露 6 倍樁徑以及土壤裸露 12 倍樁徑。實驗結果顯示群樁基礎橋柱模型之阻尼比絕大部分由土壤貢獻，隨著裸露深度增加而阻尼比並沒有顯著的變化、基本振動週期則延長，而基樁最大彎矩值與軸力值則隨之提升。數值分析方面其分別使用 SAP2000 與 OpenSees 並與國內相關公式以及 API 公式其進行土壤-結構互制行為之模擬，分析結果顯示使用 SAP2000 利用 API 公式進行土壤-結構互制行為之模擬與使用 OpenSees 建立存在彈性、塑性、間隙之土壤彈簧模型之模擬皆有不錯之分析結果。

振動台實驗規劃

本案例分析之振動台實驗資料與結果，出自紀貞耀^[13] 所進行之群樁基礎單柱結構及雙軸向剪力盒進行振動台實驗。採用國家地震工程研究中心台南實驗室的長衝程高速度地震模擬振動台，如圖 1 所示，能充分利用有限質量以提高彎矩及扭轉勁度，振動台共六個自由度，可有效重現近斷層地震。

本分析案例之試體設計可分為群樁基礎試體與橋柱試體，群樁基礎模型採用鋁材 T5-6063，元件包含底部轉接版、群樁、下基礎版，三者由焊接連接，如圖 2 所示。細部設計為群樁底部由一長 700 mm、寬 700 mm、厚 25 mm 之底部轉接版與樁底連接並採用螺栓且施加預力固鎖於剪力盒底部，樁為四支外徑 102 mm、內徑 95.6 mm、長 2,600 mm 支空心鋁管，樁頂與一長 500 mm、寬

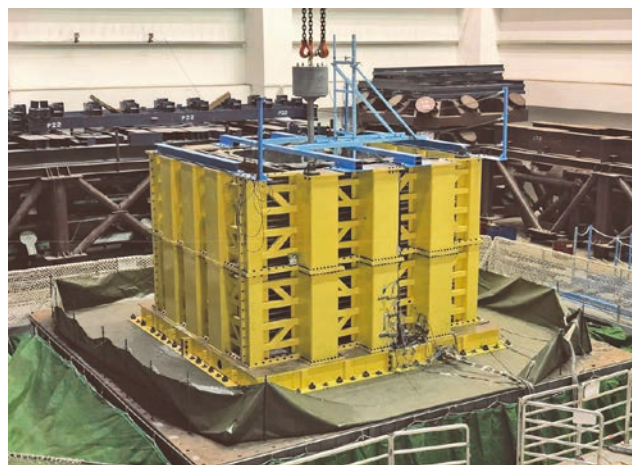


圖 1 長衝程高速度地震模擬振動台與實驗配置



圖 2 全模形設計圖與實體圖

500 mm、高 30 mm 之下基礎版連接。橋柱試體材料使用鋼材 A572，元件包含上基礎版、橋柱、質量塊接合版。橋柱試體底部是一長 500 mm、寬 500 mm、厚 30 mm 之上基礎版，此基礎版與群樁試體之下基礎版採用螺栓鎖固，而橋柱採用空心方形柱，長 100 mm、寬 100 mm、高 1,300 mm，橋柱頂上有一長 400 mm、寬 400 mm、厚 25 mm 之質量塊接合版，並在質量塊接合版上用螺栓鎖固一直徑 620 mm、高 500 mm、總重 1,185 kgf 之鋼板質量塊。另外為預防橋柱底不與頂部在實驗中先產生降伏破壞，於橋柱頂部與底部 100 mm 處皆分別焊上 8 片厚度 10 mm 之三角形加勁版增加側向勁度。

本分析案例為探討橋梁群樁基礎受到冲刷後受地震作用之反應，規劃群樁試體進行三組不同裸露深度之振動台實驗，分別為無裸露群樁（0D），三倍裸露樁徑（3D），及六倍裸露樁徑（6D），覆土深度依序為 2,625 mm、2,325 mm、2,025 mm。有關量測裝置，包括位移計、加速規、動態捕捉系統及應變計，詳細量測系統配置如圖 3 所示。

本研究試驗共採用三種代表性地震，分別是 1940 年美國 El Centro NS 地震、1999 年南投集集 TCU068

EW 近斷層地震，2016 年高雄美濃 CHY063 遠域地震，其加速度反應譜如圖 4 至圖 6 所示。另為了進一步對試體進行系統識別，亦在每階段輸入白噪音（White Noise），白噪頻率變化範圍為 0.3 ~ 30Hz，通過白噪音對實驗進行掃頻可以獲得樁-土-結構互制主要結構模態週期。其中對於 0D、3D、6D 試體輸入 El Centro、TCU068 及 CHY063 最大地表加速度分別為 0.1 g、0.2 g 以及 0.3 g，另對 6D 試體輸入 El Centro 地震，最大地表加速度 0.35 g，時間間隔為 1/512 秒。

實驗結果

材料試驗結果

本試驗研究之橋柱模型使用鋼材 A572，材料試驗結果顯示彈性模數為 205597 MPa，平均降伏應力為 417 MPa。群樁模型使用鋁合金 T5-6063，彈性模數為 57,682 MPa，平均降伏應力為 218 MPa。剪力盒中之試驗用砂選用越南石英砂，土壤顆粒比重為 2.658 g/cm³，最大乾單位重 $\gamma_{d, \max} = 1.805 \text{ g/cm}^3$ 、最小乾單位重 $\gamma_{d, \min} = 1.384 \text{ g/cm}^3$ 、50% 相對密度 $D_r = 50\%$ 之乾單位重為 1.567 g/cm³，由直剪試驗得內摩擦角為 31°。

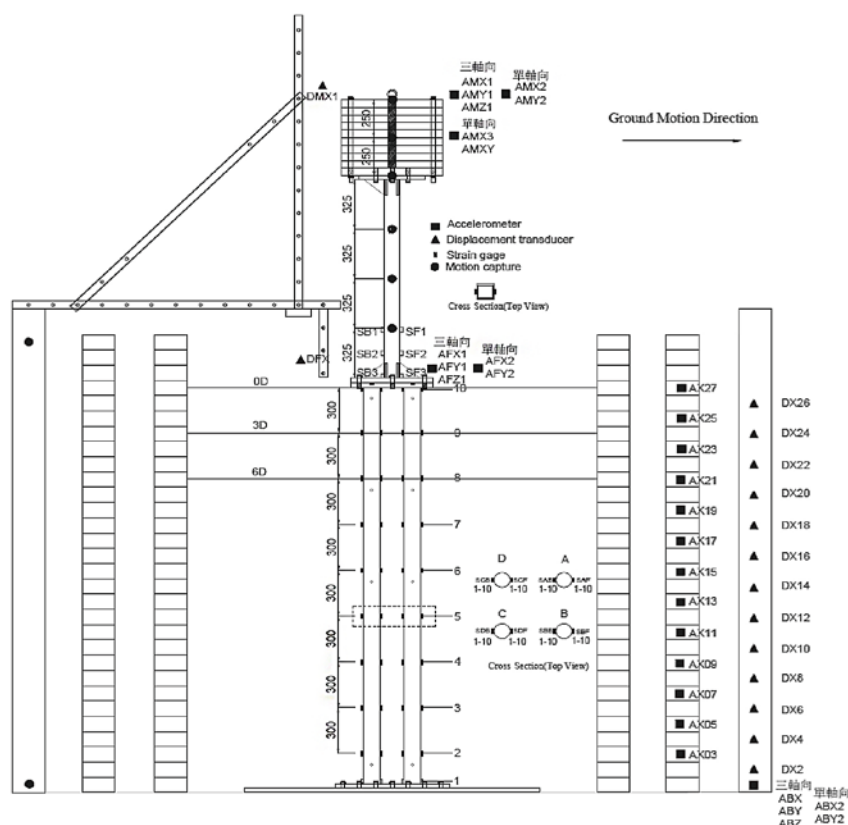


圖 3 感測器配置圖

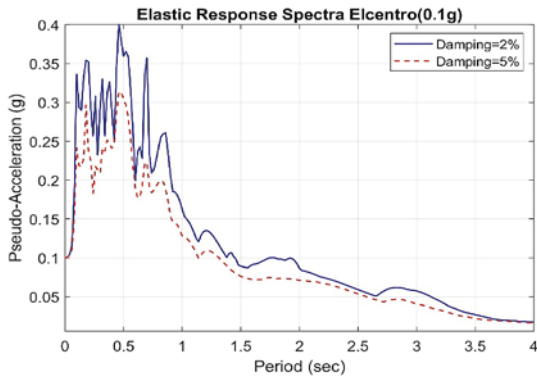


圖 4 El Centro (PGA=0.1 g) 阻尼比於 2% 與 5% 之加速度反應譜

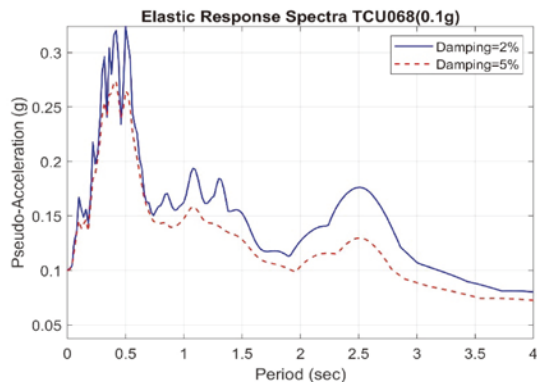


圖 5 TCU068 (PGA=0.1 g) 阻尼比於 2% 與 5% 之加速度反應譜

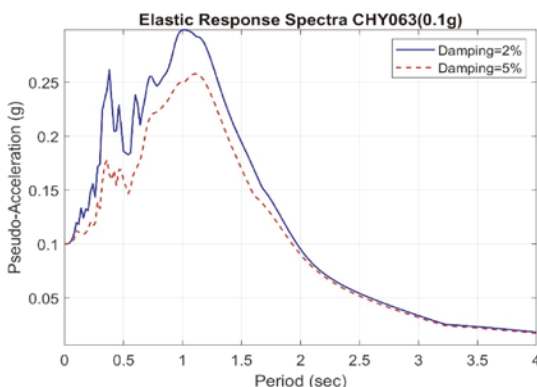


圖 6 CHY063 (PGA=0.1 g) 阻尼比於 2% 與 5% 之加速度反應譜

動力特性系統識別

在進行振動台實驗之前，進行敲擊試驗以對純結構模型試體進行系統識別，並藉由識別頻率，可進一步了解整體結構試體特性。群樁試體、群樁與橋柱試體、全模型結構試體之頻率識別結果，分別為 11.29 Hz、4.55 Hz、1.20 Hz。當模型埋置於剪力盒中，基樁為無裸露 (0D)、裸露三倍樁徑 (3D)、裸露六倍樁徑 (6D) 時，第一模態頻率分別為 2.57 Hz、2.42 Hz 及 2.19 Hz。結構阻尼比採用半功率法，在此識別中利用剪力盒底部當作加速度輸入，質量塊頂部當作加速度輸出，並利用反應變化求得轉換函數之系統阻尼比。

土壤剪力波速

本研究均假設整層土壤狀況為同一均質材料且土層簡化為單層，於剪力盒框架架設加速度規，在無裸露樁徑 (0D)、3 倍裸露樁徑 (3D) 及 6 倍裸露樁徑 (6D) 情況下，分別藉由砂土頂層框架於白噪音試驗中所量測到加速度歷時，相對於剪力盒框架底層之加速度歷時進行轉換函數。土壤剪力波速識別結果，0D、3D、6D 條件分別為 102 m/s、98 m/s，與 98 m/s。

頂層質量塊加速度反應

在試驗進行時，本研究於質量塊頂部以及中心位置，分別設置加速度規，兩者所量測加速度反應幾乎相同，因此本節僅針對質量塊頂部加速度規所量測的反應進行探討。

在地震 El Centro、近斷層地震 TCU068 及遠域地震 CHY063 地震歷時下，頂層最大加速度反應如表 1 所示。在無裸露樁徑 (0D)，在近斷層地震 TCU068 作用下，地表加速度為 0.1 g，頂層最大加速度為 0.32 g，當地表加速度為 0.2 g，頂層最大加速度反應達到 0.71 g，地表加速度為 0.3 g，頂層最大加速度達到 1.02 g，隨著地表加速度增加，頂層質量塊加速度反應也隨之增加，當地表加速度達到 0.2 g 以上，對於遠域地震 CHY063，其會隨則裸露深度增加，加速度反應則隨之減少，而在近斷層 TCU068 地震作用下，其裸露深度由三倍樁徑增加至六倍樁徑時，其加速度反應也隨之增加。

表 1 不同地震歷時下頂層質量塊之最大加速度值 (單位: gal)

PGA	Ground Motion	Test specimens		
		0D	3D	6D
0.1 g	CHY063	197.06	210.93	184.71
	TCU068	318.00	312.16	308.27
	El Centro	—	484.45	413.29
0.2 g	CHY063	522.50	474.23	429.68
	TCU068	698.66	590.55	658.83
	El Centro	871.21	926.43	800.74
0.3 g	CHY063	897.95	800.22	696.82
	TCU068	1031.93	960.35	1000.38
	El Centro	1333.81	1280.19	1066.93
0.35 g	CHY063			1185.34

頂層質量塊位移反應

在地震 El Centro、近斷層地震 TCU068 以及遠域地震 CHY063 地震歷時下，頂層最大位移反應如表 2 所示，在無裸露樁徑 (0D)，地震歷時為 CHY063 情況下，當地表加速度為 0.1 g，質量塊頂層最大位移為 15 mm，

表 2 不同地震歷時下頂層質量塊之最大位移 (單位:mm)

PGA	Ground Motion	Test specimens		
		0D	3D	6D
0.1 g	CHY063	15.33	14.50	13.70
	TCU068	23.90	23.35	26.59
	El Centro	—	36.12	39.29
0.2 g	CHY063	42.78	35.38	35.50
	TCU068	62.26	50.86	68.69
	El Centro	66.54	81.23	80.44
0.3 g	CHY063	76.06	61.41	61.55
	TCU068	110.92	102.04	114.83
	El Centro	119.90	125.12	119.04
0.35 g	CHY063			138.02

地表加速度為 0.2 g 時，頂層最大位移為 43 mm，而當地表加速度為 0.3 g 時，頂層最大位移為 76 mm，由此看出當地表加速度越大的時候，頂層位移也隨之增加，在近斷層地震 TCU068 作用下，質量塊的位移反應在六倍裸露樁徑為最大，次之為無裸露樁徑的情況。當地表加速度在 0.2 g 以上的時候，可發現在當裸露深度由 3D 增加至 6D 時，可發現在近斷層地震與遠域地震作用下，質量塊位移反應均增加。

樁基礎最大應變剖面反應

在不同裸露深度，當群樁受到地震反覆加載時，導致群樁受拉與受壓側改變，並可觀察到同排樁受拉側與受壓側之應變極值發生並不會發生在同一個高程，而大部分應變極值會出現在樁頂或 3 到 12 倍樁徑的位置，且隨著地表加速度增加，樁身之應變值均有增加。且在試驗結束後，群樁並未發生降伏破壞，為了比較前後排群樁在不同裸露深度下之反應，本研究以 TCU068 地震歷時組別為例，分別挑選 A 樁與 C 樁一側之應變計，如圖 7 至圖 12，分別在近斷層地震與遠域地震歷時下，隨著裸露深度增加，應變極值位置會往樁底方向移動。

分析與實驗值比較

分析模型設定

本分析案例實驗之模型採用日本構造計畫研究所之研發軟體 RESP-F3T 進行分析。群樁採用 Beam 元素建模，群樁底端採用固定端，基礎版與橋柱部分也採用 Beam 元素，群樁與基礎版之連接則採用 Rigid Beam，透過試誤法對勁度進行折減，又因 RESP-F3T 只能定義材料性質與斷面尺寸，不像 SAP2000 可以直接設定勁度折減，所以試誤出之建議值為材料楊氏模

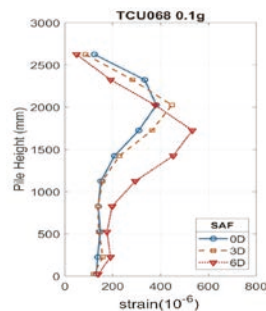


圖 7 SAF 最大應變剖面 (0.1 g)

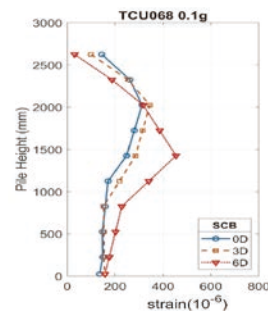


圖 8 SCB 最大應變剖面 (0.1 g)

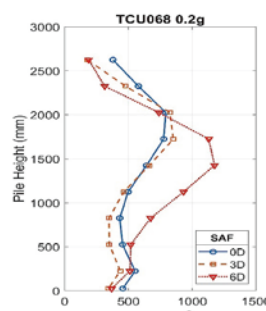


圖 9 SAF 最大應變剖面 (0.2 g)

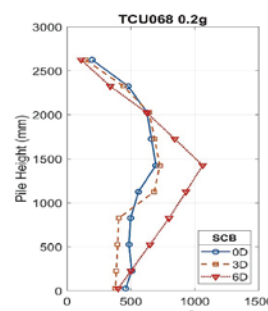


圖 10 SCB 最大應變剖面 (0.2 g)

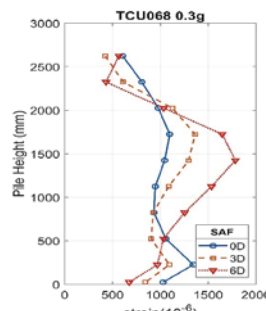


圖 11 SAF 最大應變剖面 (0.3 g)

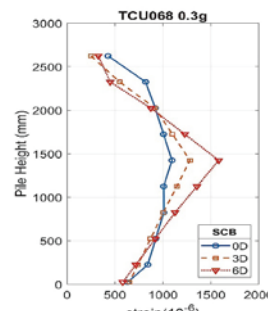


圖 12 SCB 最大應變剖面 (0.3 g)

數為 10^{16} ，斷面採用圓形斷面，直徑為 0.3 m。質量塊採用 Beam 元素，直接與橋柱頂端做連接。線性彈簧以 Support 元素建立，彈簧一端連接樁，另一端為固定端，並取一倍樁徑為間距。

另外在道路橋示方書中，運用到 k-shake 先進行土壤受地震力之模擬，土壤為對應到施加彈簧的位置和範圍，因此採用最上層與最下層為 5 cm，中間取一倍樁徑 10 cm 作為間隔，土壤阻尼比部分採用 5%，砂土應變與彈性模數比率之曲線採用 Seed and Idris^[3] 提出之砂土曲線。其中，上方曲線為高圍壓，下方曲線為低圍壓狀態，而因本實驗狀態之圍壓較小，故採用下方曲線。

k-shake 軟體須設定每層土壤參數，其中包含剪力波速，前人之分析是將土壤假設為單層進行識別，得出整體之平均剪力波速，但因參數的精細度不夠，因此參考道路橋示方書·同解說 耐震設計規範篇中砂質土的標準

灌入試驗 SPTN 的建議範圍 $N = 1 \sim 50$ ，並利用建議公式進行剪力波速之轉換。若 N 值為 0，則剪力波速採用 50 m/s，透過式與式可以得出砂質土剪力波速範圍在 40 m/s ~ 235.778 m/s。透過試誤法建議此實驗之剪力波速範圍採用 40 ~ 200 m/s，最上層為 40，往下遞增到 200。

$$V_{SDi} = c_v V_{si} \quad (1)$$

$$c_v = \begin{cases} 0.8 & (V_{si} < 300 \text{ m/s}) \\ 1 & (V_{si} \geq 300 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{si} = 80 N_i^{1/3} (1 \leq N_i \leq 50) \quad (3)$$

另外 3D 與 6D 的情況中，根據經驗是在 3D 和 6D 時採用與 0D 中對應同高度的土使用相同剪力波速，且上層土壤可以進行適當折減，而通過試誤後，在不超過剪力波速範圍之考量下，剪力波速仍建議採用 40 ~ 200 m/s，由上往下遞增。

有關日本道路橋示方書等價剛性土壤彈簧，首先使用 k-shake 得到各土層之剛性低下率 R ，接著將每一層土壤的剪力波速帶入得到最終收斂之各土層土壤剪力模數 G_D ，再依照該規範計算流程，計算出每一層土壤彈簧側向彈簧勁度 K_H ，並考慮群樁效應計算折減後之彈簧勁度 K_{HG} ，並施加在數值模型上。

有關日本道路橋示方書^[9]之非線性土壤彈簧，首先使用 k-shake 得到各土層之剪力與剪應變之遲滯迴圈圖，接著選取最大剪應變下之剪應力計算土壤剪力模數 G_D ，得到各層之水平地盤反力係數 k_H ，再參照該規範之計算流程得到每一層土壤彈簧之側向彈簧勁度，並考慮群樁效果補正係數 2/3，將計算之勁度施加在數值模型上。非線性 P-y 曲線採用 F3T 內的 Normal 模型模擬，考慮受壓與受拉，詳細定義如圖 13。

有關日本鐵道構造物等設計標準^[14]之非線性土壤彈簧，利用土壤實驗得到之標準貫入試驗 N 值，得到單樁水平地盤反力係數 k_h ，接著利用進行群樁之折減，進而得到群樁水平地盤反力係數 k_{hg} ，並施加在數值模型上。非線性 P-y 曲線採用 F3T 內的 Normal 模型模擬，同時考慮受壓與受拉，詳細定義如圖 13。

有關美國石油協會 (API)^[8]側向土壤彈簧，首先依照土壤之參數計算得每一層土壤彈簧側向極限承载力，再經由美國石油協會提出之半經驗公式模擬在受震砂土層下每層土壤彈簧的 p-y 曲線。非線性 p-y 曲線土壤彈簧遲滯行為模擬採用 Kinematic 模型進行模擬如圖 14 所示，考慮地震時載重方向之改變造成前後排樁之轉換，假設土壤受震時土壤均為受壓，因此沿著每根樁每 1 倍樁徑各擺放 2 個彈簧，參考圖 15 所示，並考慮群樁效應^[15]，乘上對應之折減因子。本研究根據實驗配置樁之心到心距離以及樁徑 B ，推算出前排樁之為 0.67，而後排樁則為 0.44。

本研究依照文獻^[4]提出以等效性模型模擬土壤結構互制行為。將土壤所需參數帶入公路橋梁耐震設計規範之補充研究^[16]建議公式，計算初始等值土壤彈，並以 SAP2000^[17]之 Link/Support 元素建立土壤彈簧，而土壤彈簧遲滯行為模擬則採用 Takeda 模型進行模擬如圖 16 所

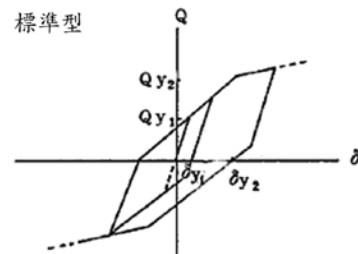


圖 13 F3T 內建非線性性能—Normal 標準型

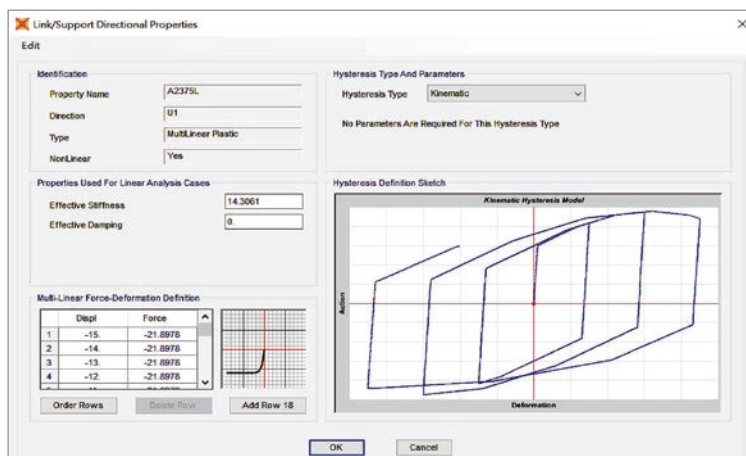


圖 14 SAP2000 土壤彈簧 LINK-Kinematic 模型

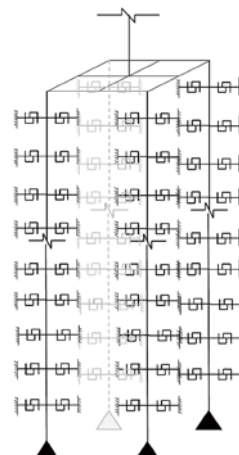


圖 15 基樁分析模型

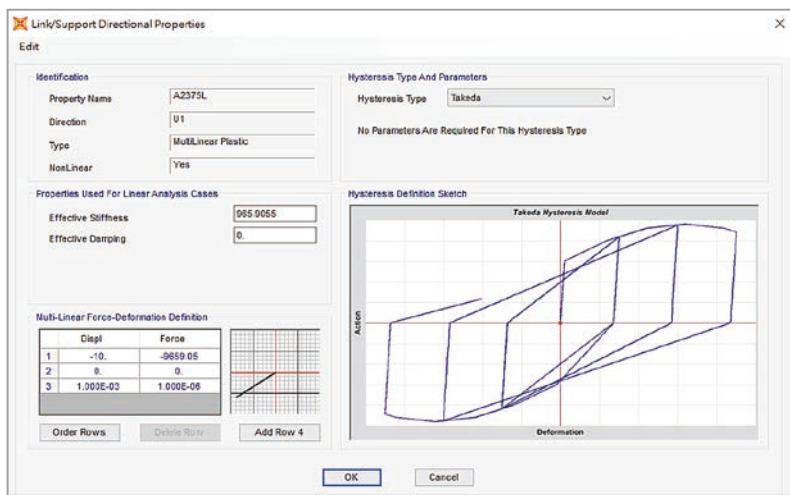


圖 16 SAP2000 土壤彈簧 LINK-Takeda 模型

示，同樣考慮地震時載重方向之改變造成前後排樁之轉換，假設土壤受震時土壤均為受壓，沿著每根樁每一倍樁徑各擺放 2 個彈簧，考慮群樁效應乘上對應之折減因子。本研究對前排樁不折減，而後排樁則採用 0.3 K（勁度），完成所有設定執行非線性動力歷時分析，求取每層土壤彈簧之剪應變，並依照 Seed and Idriss^[3] 提出剪力模數折減曲線將衰減後的剪力模數代入建立一組新的等值土壤彈簧，取代原本模型的等值土壤彈簧，再次進行非線性動力歷時分析，重複以上流程直到土壤彈簧收斂。

質量塊位移與加速度之分析與實驗比對

本研究以 TCU068 地震歷時，0.3 g 組別在 0D、3D、6D 為主進行分析值與實驗值比較。以 6D 為例，圖 17、圖 18 為使用日本規範的三種方法之分析結果。從歷時比較圖中可知，整體來說，道路橋等價剛性土壤彈簧所得之質量塊加速度反應有較佳結果，道路橋非線性彈簧在較大地震力與較大裸露深度時得到的趨勢結果較差，鐵道橋非線性的誤差在不同情況下皆大，而這三種方法在質量塊位移峰值上仍有低估的情況，尤以鐵道橋低估的誤差最大。圖 19 所示為樁身不同深度之應變比對結果，道路橋非線性彈簧所得結果與實驗較為接近，誤差最小。

圖 20 至圖 23 為 6D 之數值模型分析與實驗結果進行比較，樁底以固定端進行設定，並建立 API 土壤彈簧以及等值線性彈簧之數值模型進行模擬比較。API 土壤彈簧與等線性土壤彈簧均能有效抓取峰值反應，採用等值線性彈簧進行分析，無論峰值與波形，均有良好模擬結果且整體結果優於 API 土壤彈簧，但對於位移反應分析均有低估情形。圖 24 所示為樁身不同深度之應變比對結果，整體而言，API 土壤彈簧所得結果與實驗較為接近。

結論與建議

本研究首次採用國家地震工程研究中心台南實驗室之振動台，相較於台北實驗，此振動台能有效探究斷層錯動所引發之高速度脈衝現象對結構物真正的影響。本節藉由實驗與分析結果，進一步利用日本道路橋示方書與鐵道構造物規範之樁土互制方法進行比較。首先在日本規範提出之三種方法中，分析結果皆有低估反應之現象，但整體來說以日本道路橋示方書之非線性土壤彈簧法之分析結果與實驗結果較為擬合，較能有效反應出群樁裸露後之位移與加速度反應，次之則是日本道路橋示方書（JRA）之等價剛性土壤彈簧法，最後則是鐵道構造物非線性土壤彈簧法。本研究另依美國石油學會（API）土壤彈簧，及等值線性土壤彈簧分別去模擬樁－土－結構互制行為，並探討在近斷層作用下不同規範之土壤彈簧適用性。

1. 在不同地震作用下，以等值線性土壤彈簧進行分析相較於 API 土壤彈簧，其更能有效掌握結構之週期。
2. 本節分別使用 API 土壤彈簧以及等值線性彈簧之數值模型進行模擬比較，API 土壤彈簧與等線性土壤彈簧均能有效擬合質量塊加速度反應歷時以及峰值。而在近斷層 TCU068 地震作用下，兩者預測分析之質量塊位移均有低估情況。
3. 無論使用等值線性土壤彈簧或 API 土壤彈簧進行模擬，對於基礎版加速度預測分析反應均能獲取不錯的結果，而對於基礎版位移，均有低估實驗反應之情形。
4. 隨著裸露深度增加，無論使用 API 土壤彈簧或等值線性土壤彈簧，掌握群樁反應相對較差，尤其在近斷層作用下群樁反應模擬結果誤差更大。

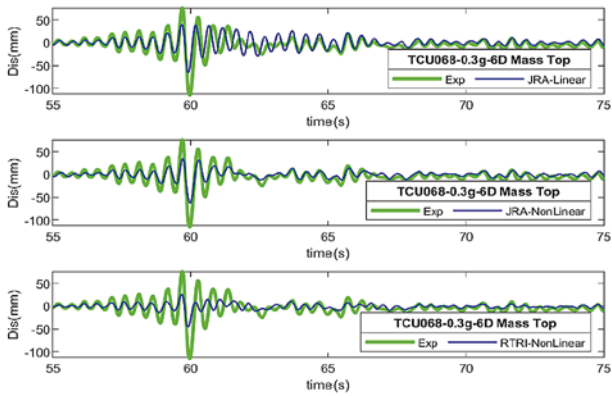


圖 17 TCU068-0.3g-6D 質量塊頂位移歷時—日本規範比較

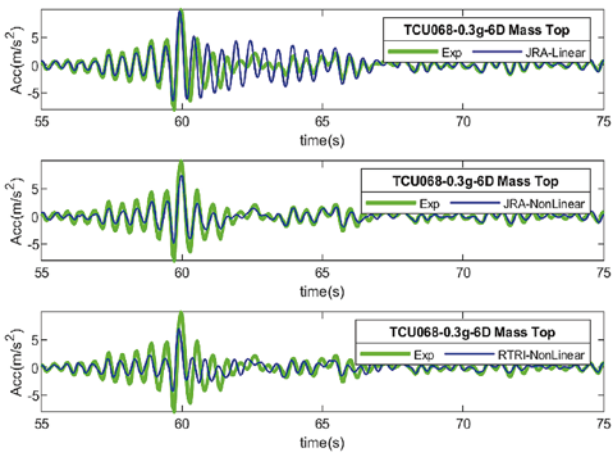


圖 18 TCU068-0.3g-6D 質量塊頂加速度歷時—日本規範比較

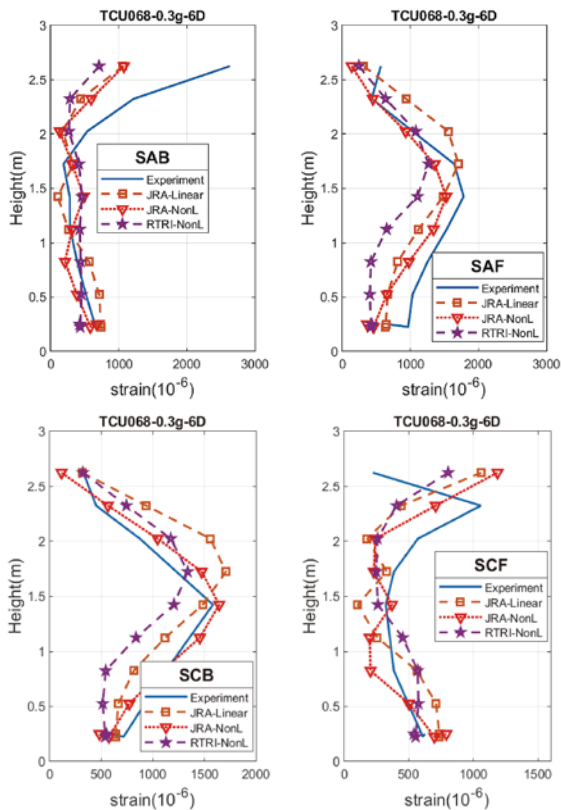


圖 19 TCU068-0.3g-6D 樁基礎最大應變比較—日本規範

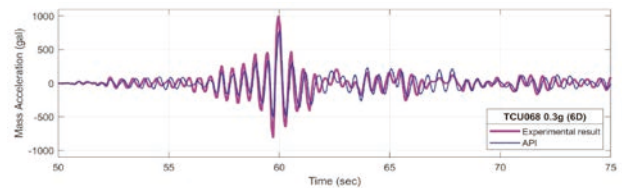


圖 20 TCU068-0.3g-6D 質量塊加速度歷時反應比較 (API)

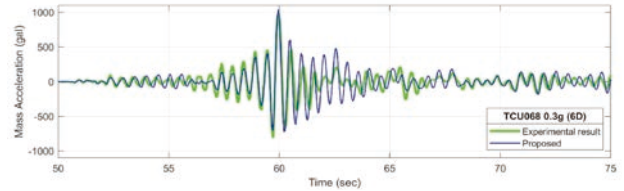


圖 21 TCU068-0.3g-6D 質量塊加速度歷時反應比較 (Proposed)

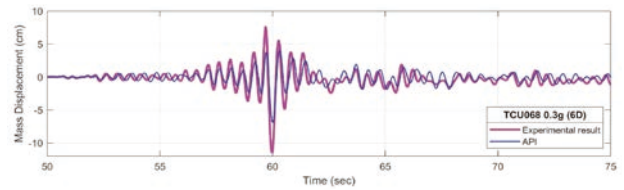


圖 22 TCU068-0.3g-6D 質量塊位移歷時反應比較 (API)

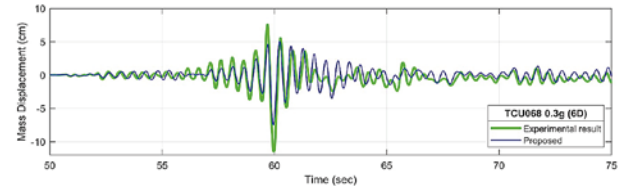


圖 23 TCU068-0.3g-6D 質量塊位移歷時反應比較 (Proposed)

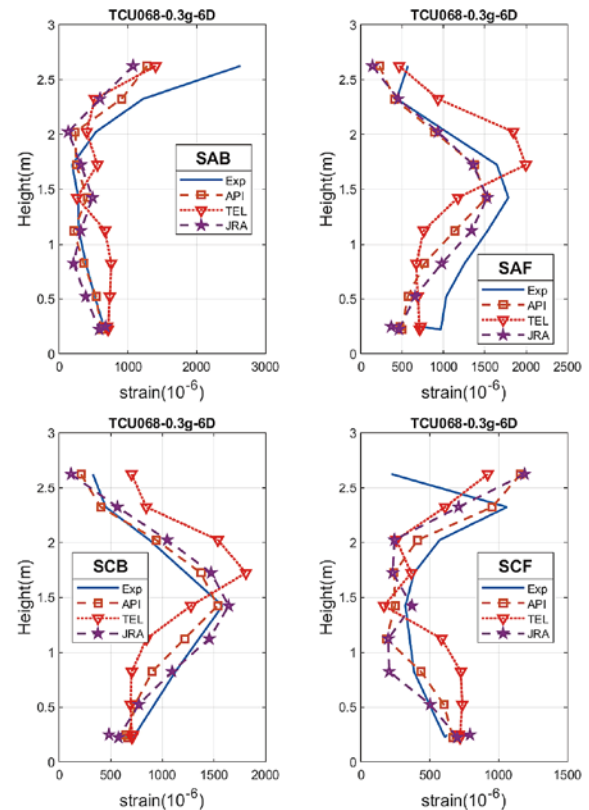


圖 24 TCU068-0.3g-6D 樁基礎最大應變比較—API、等值線性、道路橋非線性

誌謝

本研究得以順利完成，感謝科技部計畫「群樁基礎裸露橋梁受近斷層地震作用之實驗與分析研究（III）」，計畫編號：MOST107-2625-M002-012 之經費補助，以及國家地震工程研究中心台南實驗室之技術與人力支援，在此表示誠摯謝意。

參考文獻

1. 賴姿妤（2011），樁基礎冲刷橋梁模型之振動台試驗研究，台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
2. Shiou-Chun Wang, Kuang-Yen Liu, Chia-Han Chen, and Kuo-Chun Chang (2015, May). Experimental investigation on seismic behavior of scoured bridge pier with pile foundation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(6), 849-864.
3. Seed HB, Idriss IM. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
4. 劉光晏、陳正鴻、陳家漢、張國鎮（2017），樁基礎冲刷橋梁模型之振動台實驗與分析研究，*結構工程*，32(2)，108-130。
5. Xiaowei Wang, Aijun Ye, Zhongying He and Yu Shang. (2015). Quasi-Static Cyclic Testing of Elevated RC Pile-Cap Foundation for Bridge Structures. *American Society of Civil Engineers, Journal of Bridge Engineering*, 21(2).
6. 鄧爵明（2017），靜態側向反覆荷載下單柱式橋墩與群樁裸露基礎之研究，台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
7. 蔡旻諺（2018），應用等值線性土壤彈簧於基礎冲刷橋梁之實驗驗證，成功大學土木工程學系碩士論文。
8. American Petroleum Institute (API). (2000). Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-working stress design. RP 2A-WSD, Washington, DC.
9. 日本道路橋示方書・同解説下部構造篇，平成 29 年 11 月。
10. Tang Liang, Zhang Xiaoyu, Ling Xianzhang, Li Hui and Ju Nengpan. (2016). Experimental and numerical investigation on the dynamic response of pile group in liquefying ground. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15, 103-114.
11. Yu Shang, Alice Alipour, and Aijun Ye. (2018). Selection of Input Motion for Seismic Analysis of Scoured Pile-Supported Bridge with Simplified Models. *Journal of Structural Engineering*, 144(8).
12. 張榮泰（2018），群樁基礎裸露橋樑之振動台試驗研究，台灣科技大學營建工程系碩士論文。
13. 紀貞耀（2019），群樁基礎裸露橋梁於近斷層地震作用之振動台實驗與分析研究，國立成功大學土木工程系碩士論文。
14. 日本鐵道構造物等設計標準・同解説，基礎結構物篇，平成 24 年 1 月。
15. California Amendments to AASHTO LRFD Bridge Design Specifications - fourth edition, Page 10.84A.
16. 蔡益超、張荻薇、黃震興、周功台、張國鎮、宋裕祺（1997），公路橋梁耐震設計規範之補充研究，交通部台灣區國道新建工程局。
17. CSI Knowledge Base (2019). Pile lateral support base on P-y curves (Soil-structure interaction) <https://wiki.csiamerica.com/>

經營理念 誠信、創新、品質、服務



中興工程顧問

高技術、高實用、
高品質、高效率

中興工程顧問社係以提昇我國工程相關技術水準為宗旨之研發機構，
並經行政院國科會(科技部前身)評鑑為「科技研發機構」土木工程領域之優等單位
104年度獲中國工程師學會頒發「傑出事業機構獎」

專業服務：大地工程 水利工程 環境工程 資訊應用 交通運輸 防災科技 結構與耐震