

斜樁抵抗邊坡滑動的行為模擬分析

陳建元* 蔡其勳

摘要 樁基礎在台灣已經廣泛的使用於支承各種橋梁與高樓等重要結構物，而在現今隨著經濟發展，用地逐漸發展至山坡地時，基樁也逐漸用於邊坡的整治工程，作為阻止或減緩邊坡滑動的工法之一。而在承受側向荷載的群樁中，加入斜樁是常見的。本文使用 FLAC3D 程式，探討斜樁在承受土壤側向滑動的行為分析。首先使用前人模型試驗案例，對 FLAC3D 模擬進行驗證，而後分別對單樁與排樁在不同傾角的情形下分析其受力行為，並針對土層內有軟弱層進行模擬。模擬結果顯示，在土壤軟弱層側向滑動的條件下，樁身傾斜將使樁身側向位移與彎矩增加，軟弱層的存在會放大這些現象，排樁的彎矩也與單樁類似。因此，在土壤滑動下，當使用排樁時，傾角不論是-15 或是 15 度，斜樁都能使樁頂位移稍微減小；而彎矩分布會因斜樁的傾斜而增加。對於使用斜樁來抵抗邊坡滑動之影響則待進一步評估。

關鍵詞：斜樁、邊坡滑動、被動樁、FLAC3D。

Raked Pile Behavior Modeling for Analyzing Resistance of Slope Movement

Chien-Yuan Chen* Chi-Xun Tsai

ABSTRACT Pile foundation has been widely used in supporting various structures such as bridges and tall buildings in Taiwan. With the development of mountainous areas, pile foundation has been used to mitigate slope movement. Raked piles are commonly used in group piles subjected to lateral forces. In this study, we use the FLAC3D program to analyze the mechanical response of a raked pile subjected to lateral soil movement. In order to verify the correction of the FLAC3D simulation, we compare our findings with those from a published case study. The analysis of a single pile and a one row-pile in different dip angles subjected to lateral soil movement is modeled. Results of the analysis show that under the conditions of lateral slope movement, a raked pile causes the pile's lateral displacement and bending movement to increase. Use of a row raked pile can reduce the lateral displacement of the pile. Further study is required to evaluate the behavior of raked piles when subjected to lateral slope movement.

Key Words : Raked pile, slope movement, passive pile, FLAC3D.

一、前言

垂直基樁常需承受水平方向荷重，如地震、水力或風力作用，而垂直樁能承受的水平力較小，故會將樁傾斜將垂直承載力用以分擔水平荷載。是故傾斜樁常見於承受側向力較多之處，如橋墩、塔架、碼頭或邊坡擋土牆等。在近年，斜樁已逐漸用於整治邊坡，作為阻止或減輕邊坡滑動的方法之一。然而邊坡樁基礎與其他承受側向力的基樁行為不同，主要是因為邊坡基樁受力主要是由於土體滑動所造成。由於土體與基樁互制行為相當複雜，樁身受力與變形行為也無法準確掌握，到目前為止，邊坡基樁的研究仍持續在發展中。

樁基礎中若包含有斜樁時，其軸向承力之水平分量可用於分擔群樁基礎之側向作用力。圖 1 為斜樁承載的示意圖，側

向力主要來自兩個部份：1.軸向反力的水平分量。2.土壤帶來的水平阻力。

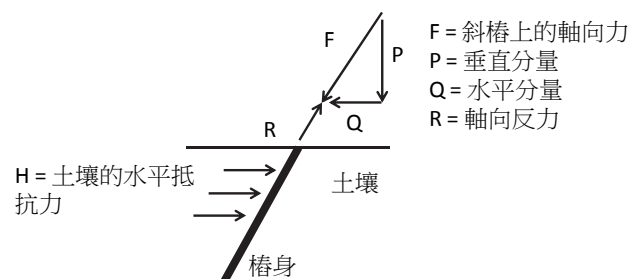


圖 1 斜樁承載示意圖 (Rajapakse, 2008)

Fig.1 Forces on a raked pile

在承受側向荷載的群樁中,加入斜樁是常見的。這概念主要來自結構分析,樁傾斜在側向荷載的方向,將使的水平撓曲減少,但當群樁受到地表運動(地震、沉降等)影響時,斜樁的存在可能造成一些不良的影響。Harn (2004) 針對人們質疑斜樁的表現,表示說即使位於地震帶,在一些條件下(如側向荷載很大或須與原斜樁基礎相容),比起使用垂直樁而需規劃一個防震措施,不如精心設計一個斜樁來的經濟又有效。

Poulos (2006) 使用邊界元素程式 EMPIG 分析後指出,當群樁受到垂直與側向荷載時,斜樁的存在可以提供一些好處,包括減少沉降、樁帽旋轉、樁的垂直荷載及樁頭力矩,特別是在減少水平位移。但也指出,當地表運動(如地表沉降、地震等)存在時,含有斜樁的群樁相對於垂直樁組可能會有些不利的影響,特別是樁體的旋轉與垂直運動可能會改變正負號與顯著增加數值的大小,同時斜樁上的所有荷載可能會增加。Deng et al. (2007) 使用有限元素軟體 SASSI 2000,針對斜樁在地震作用下的樁土作用進行分析,並與垂直樁組進行比較。結果顯示,由於水平地震運動的影響,使得斜樁承受的軸向力相較於垂直樁可以達到 5~8 倍;但是兩者的位移行為卻幾乎相同。基於上述理由,在其設計條件下,垂直樁組應是首選。這結果也與 Poulos (2006) 的分析結果相同。

Martin and Chen (2005) 使用 FLAC3D 程式用來評估因邊坡下方的軟弱土層或液化層導致基樁的側向破壞之反應。其分析包括,土壤滑動造成的動荷載作用於橋樁,與土壤位移的空間變化於單樁和群樁 (2x2) 之反應,並使用實際案例作模擬測試。分析結果證明 FLAC3D 能用於設計遭受土壤側向運動的樁基礎或用於邊坡的穩定性分析。Prabha and Boominathan (2010) 則對位於黏土層中的斜樁,利用模型試驗進行了靜態與循環的側向荷載試驗,分別檢視三種群樁組的配置 VB, BV, BB(圖 2)。並使用 3D 有限元素程式 ANSYS 對試驗條件進行數值分析,結果顯示,VB 配置相較於其他配置,具有最好的側向抗阻能力。

上述研究顯示,斜樁可以為樁組抵抗側向力帶來好處,但是在地表運動存在時,斜樁的使用必須謹慎評估。由於基樁設計是否滿足需求,需要進行現地試驗,然基樁試驗需要耗費大量人力物力,且模型實驗僅針對單一情況設計,可重複利用性低,所以數值模擬即成為一種替代方案。以阿里山公路為例,其長年有邊坡滑移問題,現在已有部份路段施作抗滑排樁的工

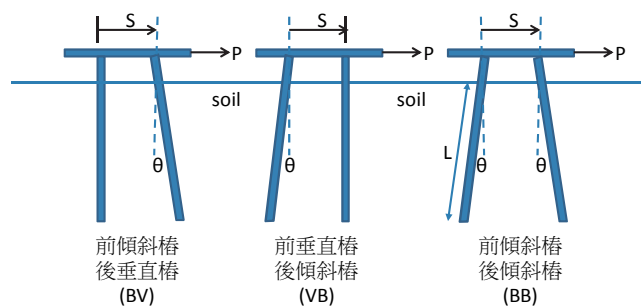


圖 2 三種類型斜樁的配置 (Prabha and Boominathan, 2010)

Fig.2 Scheme of three types of raked piles

程。本研究規劃以數值模擬的方式,分析探討斜樁於土壤滑動時,其基樁受力的行為模擬分析。

二、研究方法

本研究旨在探討土壤滑動對基樁行為的影響,以有限差分法程式 FLAC3D 對此問題進行數值模擬分析。首先針對研究文獻所做模型試驗結果進行測試,先驗證所使用數值模擬的正確性,再設計單一斜樁分別於斜角 0、5、10、15 度,在土壤滑動的條件下探討基樁的行為反應;而後將模型擴展到 1x3 之群樁,在同樣條件下分析觀察位於中心樁的受力行為。由於土壤與基樁間的互制行為十分複雜,本研究採用 Reese (1994) 的 p-y 曲線理論,考慮樁身與其周圍土壤間之力平衡關係 (equilibrium) 與變形諧和關係 (compatibility),可得樁身各節點之側向位移及彎矩值。由樁身周圍之不平衡土壓力,可產生一土壤反力,因此各深度的土壤,皆可找到一組代表土壤反應之 p-y 曲線。

1. 數值分析基本假設及條件

本研究主要針對斜樁承受側向力(邊坡滑動)的影響分析。研究中先設計單一斜樁承受側向載重,並將其結果與模型試驗結果 (Ranjan et al., 1980) 做比較,而後再擴大到群樁模擬。於單一斜樁(傾角 30 度)模擬中假設其為單一土層,且土體為完全飽和狀態,地下水位於地表面。在結構模型 (constitutive model) 上,樁體採用各向同性彈性模型 (elastic, isotropic model),表示材料為均勻的連續體,線性的應力應變行為。土體使用莫耳-庫倫模型 (Mohr-Coulomb model),即土壤遵循其破壞準則。表 1 為 Ranjan et al. (1980) 使用的樁土參數。基樁材質為鋁樁,樁周土壤為軟質黏土,並於樁頂承受一 24.5N 的水平力,分別檢視斜樁在+30(順時針)與-30(逆時針)度時,水平荷載與水平位移的關係。

2. 數值分析模型的建立

數值分析中,首要工作是先建立網格,而網格的使用多寡不僅影響分析的準確度,也會使分析時間有所增減,所以需要取得一個足夠準確度又有效率的網格數。圖 3 為依據 Ranjan 等人 (1980) 模型試驗建立的 FLAC3D 的網格。基樁使用的各向同性彈性模型則需要給予體積模數 (K) 與剪力模數 (G),所使用參數整理於表 2。根據 Trochanis (1991) 與 Lim et al. (1993) 的研究指出,於樁徑 0.5m 時,水平邊界約取 25 倍樁

表 1 Ranjan 試驗的材料參數 (Ranjan et al., 1980)

Table 1 Material parameters for the model test (Ranjan et al., 1980)

項目	參數						
	土壤	液性 限度	塑性 限度	稠度 指數	不排水 剪力強度	彈性 模數	單位重
	54%	25%	0.48	15.2kPa	600kPa	18kN/m ³	40%
樁身	直徑		鋁樁壁厚	樁掩埋深度			
	9.5mm		1mm	360mm			

徑或是 0.6 倍樁長，垂直向取 0.7 倍樁長，就可以避免邊界影響。在邊界束制上，限制 X 與 Y 方向的水平位移，下邊界 XYZ 方向皆固定，只有上邊界處於自由狀態，於模型確立後，施加重力荷載 (使用 9.8m/s^2) 讓數值模型靜力平衡以達到未受外力變形時的初始應力狀態。在岩石力學中，許多情況需要描述可以滑動和分離的平面，如岩土介質的解理面、斷層面或基礎與土壤的界面等。FLAC3D 提供了庫倫滑動或可剪拉的連結界面 (interface)，界面常用摩擦角、內聚力、法向剛度和剪切剛度等參數。根據 Potyondy (1961) 和 Acer (1982) 等人的研究顯示，樁土界面之間的摩擦角是影響摩擦樁承載性能的關鍵因素，界面摩擦角取周圍土壤的 0.6~0.7 倍是比較合適的。內聚力則根據一些工程實例的模擬研究的建議，預鑄樁界面內聚力取用相鄰土層之 0.5 倍左右，所使用參數如表 3。並設計土壤於兩邊界範圍內沿樁身位移，以模擬樁身受邊坡滑動土壤之影響。

3. 數值模型的正確性驗證

為了進行斜樁承受土壤側向滑動的模擬，首先必須對 FLAC3D 模擬的正確性進行驗證。Rajashree (2001) 於其研究中使用非線性有限差分模型，針對 Ranjan et al. (1980) 的模型試驗結果進行比對單樁承受側土運動的分析。本研究則根據其試驗，使用 FLAC3D 進行模擬，模型建立完成後，先於樁頂給予一 24.5N 側向力，利用內建的 FISH 語言逐步加載，監測樁周土壤的反力與樁頂位移，在模型達到平衡後，將其結果輸出與 Rajashree (2001) 研究進行套疊，結果如圖 4 所示。FLAC3D 結果大致介於兩人試驗之間，其中的差異可能是由於介面參數的選擇或網格使用所導致，在側向力 24.5N 時，FLAC3D 與 Ranjan 模型試驗結果具有較相似水平位移，趨勢也是相近的，因此 FLAC3D 對於斜樁的模擬是具有參考價值的。

三、結果與討論

1. 單樁承受土壤滑動的行為分析

為了簡化分析斜樁承受土壤側向滑動，本研究假設一個均勻分布的土壤其運動方向是沿著土層邊界的方向移動，如圖 5 所示。斜樁性質與使用參數如表 4。穩定與軟弱土塊都以彈性-完全塑性 (elasto-perfectly plastic) 的莫耳-庫倫 (Mohr-Coulomb Model) 材料建立模型。鋁樁長 12 公尺，直徑 1 公尺。使用粗糙的樁土界面 (正向 k_n 與剪切 k_s 勁度為 10^5 KN/m)。水位恆保持於地表面。自由場位移從外部邊界至中心為 10 公尺。土壤運動統一由地表面至軟弱層最底部，設計土壤運動於兩邊界範圍內沿樁身位移均為 6mm，以模擬樁身受土壤移動之影響。圖 6 為斜樁傾角 0、5、10、15 度時，其側向位移與彎矩的分布。模擬結果顯示，在土壤滑動 6mm 的條件下，斜樁將產生較大的側向位移，而隨著傾角增加雖然可以稍微減少位移，但是相對於垂直樁，位移幅度仍是相當大；樁身的最大彎矩皆發生在穩定層與軟弱層交界附近，而在傾角增加時，樁身承受的彎矩會增加。

表 2 FLAC3D 使用材料參數

Table 2 Material parameters used in FLAC3D

材料參數	體積模數 (MPa)	剪力模數 (MPa)	內聚力 (kPa)	內摩擦角 (°)	剪力膨脹角 (°)	卜松比
鋁樁	13900	10400	-	-	-	-
軟弱黏土層	0.3333	0.25	15.2	0	0	0.2

表 3 FLAC3D 界面使用參數

Table 3 Parameters used for the interface element in FLAC3D

材料參數	K_n (kN/m)	K_s (kN/m)	內聚力 (kPa)	摩擦角 (°)
界面	10^5	10^5	7.6	-

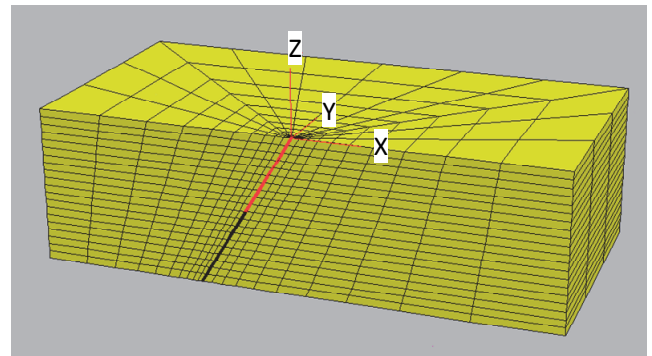


圖 3 FLAC3D 網格模型

Fig.3 Finite difference mesh for single raked pile analysis in FLAC3D

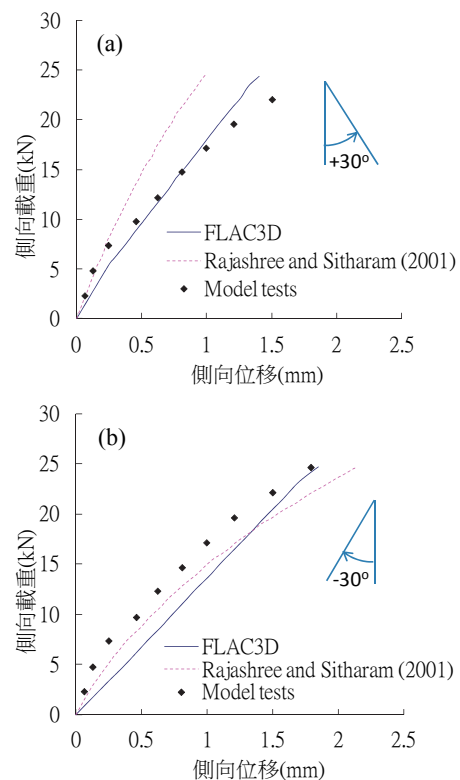


圖 4 斜樁傾角 30 度模型試驗與數值模擬結果之 p-y 曲線比較
Fig.4 Comparisons of the model test and numerical results of P-y curve for a raked pile with incline angle (a) +30° (b) -30°

2. 排樁承受土壤滑動的行為分析

本研究將上述單樁模型修改, 使用 1x3 的排樁, 樁距 3m 為 3 倍基樁直徑, 土層性質與材料參數皆相同, 於土壤移動 6mm 的條件下, 觀察中間樁的變化。圖 7 為排樁的有限差分模型。在傾角-15、0、15 度分別進行有軟弱層與無軟弱層的模擬, 並將其作比較。圖 8 為排樁在土壤滑動下的樁身位移與彎矩分布。模擬結果顯示, 當使用排樁時, 傾角不論是-15 或是 15 度, 斜樁都能使樁頂位移稍微減小; 而彎矩分布則與單樁情形相似, 都會因斜樁的使用而增加。

為了分析不同群樁在土壤滑動下的行為, 將上述之 1x3 的排樁模型擴展成 2x3 之群樁, 一樣在土壤水平移動 6mm 的情形下, 分別對垂直群樁與斜角 15 度的群樁進行分析, 比較中間樁的位移、彎矩變化。圖 9 為其 FLAC3D 有限差分模型。

圖 10 為群樁 0 度與傾斜 15 度有軟弱土層存在, 兩排中心樁的位移與彎矩比較, 可以看出前排樁(圖 9 右側排樁)的反應相對於後排(圖 9 左側排樁)對樁的行為影響程度較大, 故後續將以前排中心樁為代表與 1x3 群樁及單樁做比較。模擬結果整理於表 5 及表 6 便於比較斜樁與垂直樁的差異。表中影響程度定義為斜樁之反應(位移或彎矩)與垂直樁之差異值與原垂直樁的比值, 以百分比表示。由表 5 顯示, 單斜樁受土壤移動影響使得樁頭位移較單直樁大, 但隨著樁身傾斜角度的增加, 樁頭位移則逐漸減少, 反之, 樁身所受彎矩則隨樁身傾斜角度的增加而增加。表 6 中單排斜群樁在中間樁之樁頭位移則較垂直樁小。斜樁所受最大彎矩則較垂直樁大, 但-15 度斜樁所受最大彎矩則明顯小於 15 度斜樁。表 7 展示單樁與群樁的差異,

比較結果顯示, 受群樁效應的影響, 隨著樁頭數目及樁身傾斜的增加, 樁頭位移則逐漸減少, 但樁身所受最大彎矩則逐漸增加。圖 11 為垂直之單樁與 1x3、2x3 群樁的中間樁的樁身位移與彎矩比較; 圖 12 則為垂直之單樁與斜角 15 度的 1x3、2x3 群樁的中間樁樁身位移與彎矩比較情形。分析結果顯示與單樁及 1x3 排樁的模擬結果相似, 樁頂位移在使用斜樁時皆會減少, 而樁身彎矩則因斜樁使用而增大。

3. 軟弱層存在對斜樁行為的影響

為了觀察軟弱層的存在對斜樁受力的影響, 另外針對沒有軟弱層的情形設計了一組模擬, 參數使用皆與上述相同, 只有原軟弱層的內摩擦角改為非軟弱層的 30 度, 圖 13 為分析結果。比較有及無軟弱層的差異, 分別將各結果作比較(圖 14)。以下將模擬結果整理於表 5 及表 6 便於比較斜樁與垂直樁的差異。模擬結果顯示, 有軟弱層存在時, 單樁水平位移較無軟弱

表 4 基樁承受土壤滑動使用的材料參數

Table 4 Material parameters used for raked piles subjected to soil movement

參數	體積模數 (GPa)	剪力模數 (GPa)	內聚力 (kPa)	內摩擦角 (°)	剪力膨脹角 (°)	靜止土壓係數 (K ₀)	密度 (kg/m ³)
樁身	13.9	10.4	-	-	-	-	2500
移動層	0.2	0.1	0	30	0	1.0	2000
軟弱層	0.2	0.1	0	20	0	1.0	2000
穩定層	0.2	0.1	0	30	0	1.0	2000

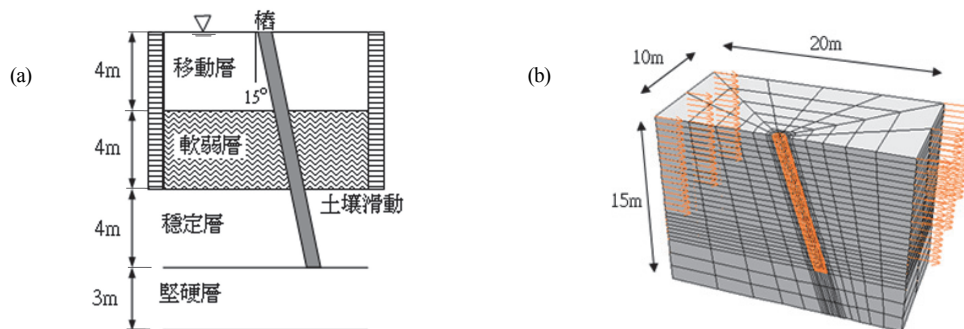


圖 5 斜樁承受側向土壤滑動模型(以傾角 15 度為例)(a) 土層剖面 (b) 有限差分網格

Fig.5 Numerical scheme for a raked pile subjected to lateral soil movement (incline angle 15°) (a)soil profile (b) finite difference mesh

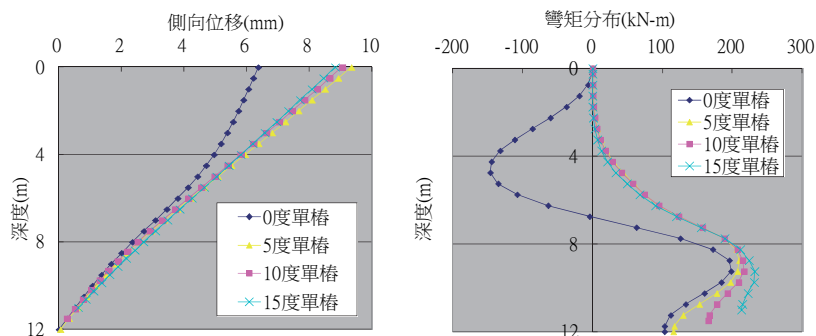


圖 6 土壤移動下單斜樁的 (a) 側向位移分布 (b) 彎矩分布

Fig.6 Soil movement-induced (a) lateral displacement (b) moment distribution along the raked pile shaft

層時會加大，而隨著斜樁角度的增加則會降低位移增加的幅度；在彎矩分布上也具有相似結果，軟弱層的存在亦會使得最大彎矩增加，但隨著樁身傾角的增加會使得樁身所受彎矩的影響程度較無軟弱層減小。

四、結 論

綜合本研究所分析之結果顯示，在單樁的情形下，使用斜樁將使樁身水平位移增加（傾角 5 度時約增加 46%），雖然隨著傾

角的增加可以減小位移（15 度時約減小 38%），卻會使得樁身彎矩增加 6%~17%，這意味著樁身將承受較大的應力。使用 1×3 群樁時，傾角不論是-15 或是 15 度，斜樁都能使樁頂位移減小大約 2~3%，然而彎矩卻會因樁的傾斜而增加 40%~190%。在 2×3 群樁中也具有相似的情況，斜樁使樁頂位用群樁能使樁頂位移減少，垂直樁的情況下，1×3 群樁能減少 4.7%的位移量，2×3 群樁減少 12.5%，而當使用 15 度斜樁時，1×3 更能減小 33.4%的位移，2×3 減少 43.5%，然而樁身彎矩卻也會依次增加，使用 2×3 群樁在傾角 0 度與 15 度時各會增

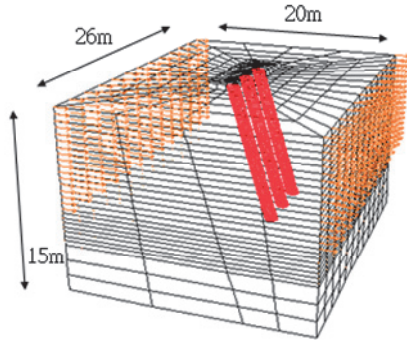


圖 7 排樁的有限差分模型

Fig.7 Finite difference mesh for one row of three-raked group piles

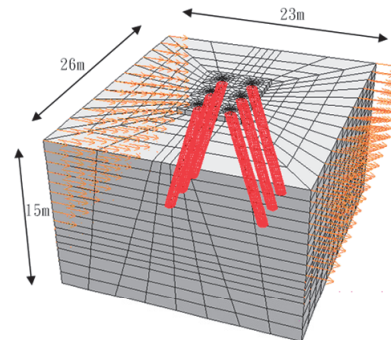


圖 9 傾斜群樁 (2×3) 的有限差分模型 (傾角 15 度)

Fig.9 Finite difference mesh for two rows of three-raked group piles

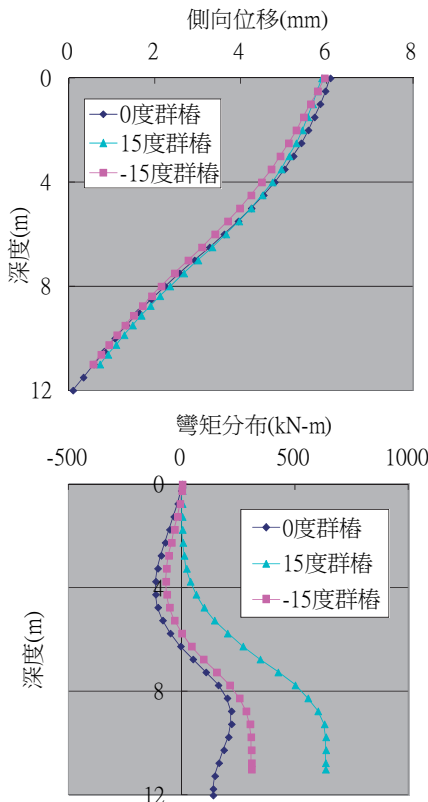


圖 8 土壤移動下中間排樁的 (a) 側向位移分布 (b) 彎矩分布 (15 度傾斜)

Fig.8 One row of raked pile subjected to soil movement for middle pile's (a) lateral displacement (b) moment distributions along the pile shaft (incline angle 15°)

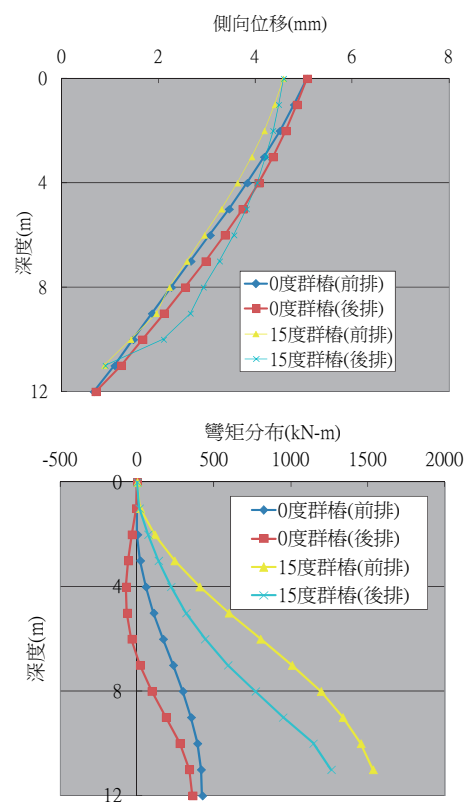


圖 10 垂直與 15 度傾斜 2×3 群樁受土壤移動行為之比較 (a) 樁身位移 (b) 樁身彎矩

Fig.10 Comparisons of vertical group piles' and 15° inclined 2×3 group piles' behaviors subjected to soil movement for (a) displacement (b) moment distributions along the pile shaft

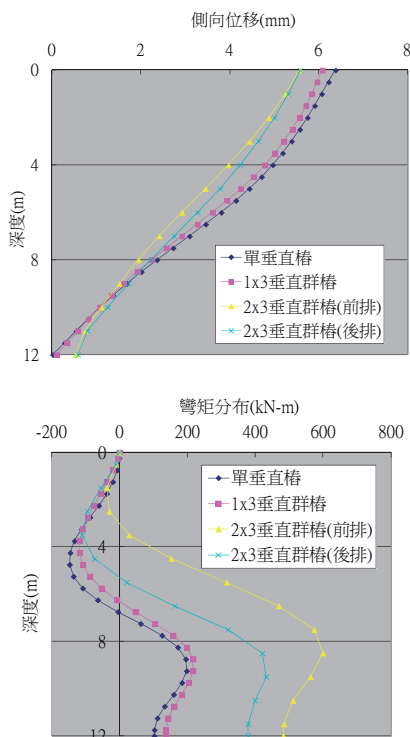


圖 11 垂直單樁與單排 (1×3) 及雙排 (2×3) 群樁受土壤移動行為之比較 (a) 樁身位移 (b) 樁身彎矩

Fig.11 Comparisons of a vertical pile's and group piles' (1x3 and 2x3) behaviors subjected to soil movement for (a) displacement (b) moment distributions along the pile shaft

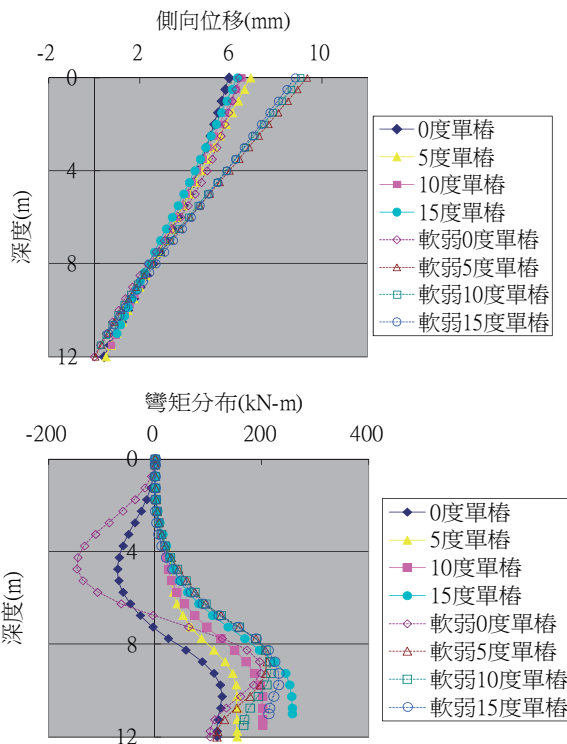


圖 13 有及無軟弱層的單樁位移與彎矩比較

Fig.13 Comparisons of a single pile's and a raked pile's behavior subjected to soil movement for (a) displacement (b) moment distributions along the pile shaft with and without weak layer

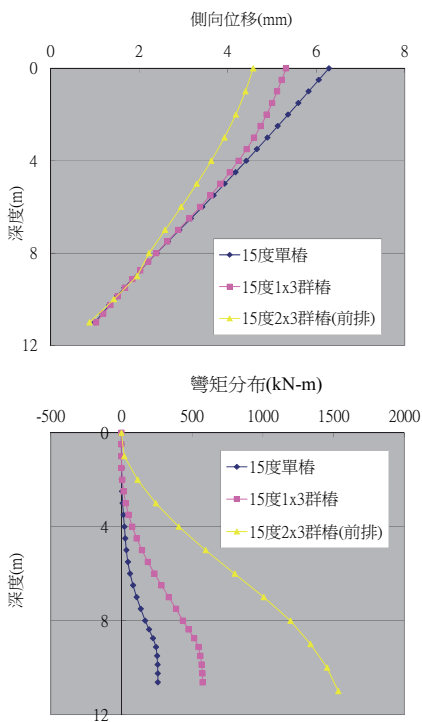


圖 12 單斜樁 (15度) 與傾斜群樁 (1×3 及 2×3) 受土壤移動行為的比較 (a) 樁身位移 (b) 樁身彎矩

Fig.12 Comparisons of a single 15° inclined pile's and inclined group piles' (1x3 and 2x3) behaviors subjected to soil movement for (a) displacement (b) moment distributions along the pile shaft

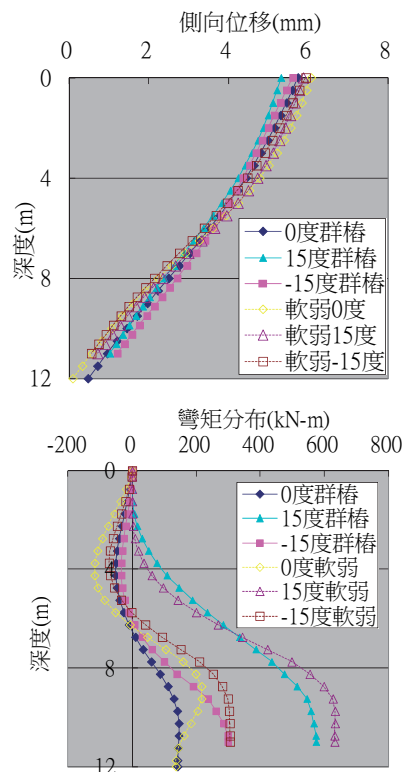


圖 14 有及無軟弱層排樁的位移與彎矩比較

Fig.14 Comparisons of one row of piles' behavior subjected to soil movement for (a) displacement (b) moment distributions along the pile shaft with and without weak layer

加樁身彎矩 2 倍與 7 倍。整體而言，群樁組成越多，能減少更多的位移，卻也使樁體承受應力增加。土壤強度對基樁穩定性有很大的影響，土層中含有軟弱層，不論單樁或排樁皆會使位移與彎矩增加（垂直樁位移約增加 5~7%、彎矩 50~60%）。因此，對於使用斜樁來抵抗邊坡滑動的影響則必須進一步的評估。此外，本研究使用文獻資料對 FLAC3D 於斜樁的模擬做驗證，後續能進行模型試驗，配合數值模擬之假設做比對，更能提高其合理性。

誌 謝

本研究承蒙國科會計劃編號 NSC 102-2221-E-415-008-MY3 的補助，作者在此深感謝意。

表 5 單斜樁與垂直單樁承受土壤移動行為數值模擬結果比較

Table 5 Comparisons of the numerical results of a vertical pile's and a raked pile's behavior subjected to soil movement with and without soft layer

單樁	無軟弱層				有軟弱層				
	傾角 (°)	0	5	10	15	0	5	10	15
樁頂位移 (mm)		5.93	6.87	6.49	6.29	6.38	9.35	9.06	8.83
影響程度 (%)		-	15.85	9.44	6.07	-	46.55	42.01	38.40
最大彎矩 (KN-m)		125	153	201	257	198	210	216	232
影響程度 (%)		-	22.40	60.80	105.60	-	6.06	9.09	17.17

表 6 群樁傾角與垂直群樁在無軟弱層承受土壤移動行為的差異

Table 6 Comparisons of the numerical results of vertical group piles' and raked group piles' behavior subjected to soil movement with and without soft layer

1x3群樁	無軟弱層			有軟弱層			
	傾角 (°)	0	-15	15	0	-15	15
中間樁樁頂位移 (mm)		5.75	5.62	5.32	6.08	5.94	5.78
影響程度 (%)		-	-2.26	-7.48	-	-2.30	-3.29
中間樁最大彎矩 (KN-m)		146	298	574	217	305	633
影響程度 (%)		-	104.1	293.15	-	40.55	191.71

表 7 使用單樁與群樁承受土壤移動行為的差異

Table 7 Comparisons of the numerical results of a vertical pile's and raked group piles' behavior subjected to soil movement

傾角	0度 (垂直)			15度			
	有軟弱層	單樁	1x3群樁	2x3群樁	單樁	1x3群樁	2x3群樁
樁頂位移 (mm)		6.38	6.08	5.58	8.83	5.88	4.99
影響程度 (%)		-	-4.70	-12.54	-	-33.41	-43.49
最大彎矩 (KN-m)		198	217	599	232	633	1797
影響程度 (%)		-	9.60	202.53	-	172.84	674.57

參考文獻

- [1] Acar, H., Yalcin, B., Durgunoglu, T., and Tumay, M.T. (1982). "Interface properties of sands." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(4), 648-654.
- [2] Harn, R.E. (2004). "Have batter piles gotten a bad rap in seismic zones? (or everything you wanted to know about batter piles but were afraid to ask)." *Ports 2004: Port Development in the Changing World*, Houston.
- [3] Lim, C.H., Chow, Y.K., and Karunaratne, G.P. (1993). "Negative skin friction on single piles in a layered half-space." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17(9), 625-645.
- [4] Martin, G.R., and Chen, C.Y. (2005). "Response of piles due to lateral slope movement." *Computers and Structures*, 83, 588-598.
- [5] Deng, N., Kulesza, R., and Ostadan, F. (2007). "Seismic soil-pile group interaction analysis of a battered pile group." *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, paper No.1733.
- [6] Potyondy, J.G. (1961). "Skin friction between various soils and construction materials." *Géotechnique*, 11(4), 339-353.
- [7] Poulos, H.G. (2006). "Raked piles-virtues and drawbacks." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 795-803.
- [8] Prabha, S.M., and Boominathan, A. (2010). "Static and cyclic lateral response of battered piles in clay." *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010)*, 28th June-1st July, Zurich, Switzerland. Edited by Linda Seward, CRC Press, 971-977.
- [9] Rajashree, S.S., and Sitharam, T.G. (2001). "Nonlinear finite-element modeling of batter piles under lateral load." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 604-612.
- [10] Reese, L.C. (1994). "Fundamental concepts of pile design and analysis-p-y curves of lateral loaded piles." *Pile Foundation, Sino-Geotechnics Research and Development Foundation*, 1-129.
- [11] Ranjan, G., Ramasamy, G., and Tyagi, R.P. (1980). "Lateral response of batter piles and pile bents in clay", *Indian Geotech. J.*, 10, 135-142.
- [12] Rajapakse, R. (2008). *Pile design and construction rules of thumb*, Butterworth-Heinemann, ISBN 0750687630, 444pp.
- [13] Trochanis, A., Bielak, J., and Christiano, P. (1991). "Simplified model for analysis of one or two piles." *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(3), 448-466.

2013 年 12 月 16 日 收稿

2014 年 02 月 10 日 修正

2014 年 03 月 31 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 12 月 31 日)