

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

土釘在砂土中之拉出行 為

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-032-004-

執行期間：93年08月01日至94年10月31日

執行單位：淡江大學土木工程研究所

計畫主持人：吳朝賢

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 1 月 12 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

土釘在砂土中之拉出行為

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC93 - 2211 - E - 032 - 004 -
執行期間： 93 年 8 月 1 日至 94 年 10 月 31 日

計畫主持人：吳朝賢
共同主持人：
計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學土木工程系

中 華 民 國 95 年 1 月 10 日

土釘在砂土中之拉出行為

關鍵詞：土釘、粗糙度、視摩擦係數、拉出。

摘 要

本研究為單根模型土釘在砂土中拉出行為的探討，研究參數包括土釘牙距、土釘直徑、砂土粒徑等；經試驗結果獲得：(1)當砂土平均粒徑小於土釘牙距時，尖峰、殘餘視摩擦係數隨螺紋牙距增大而增加，且顆粒越大，尖峰、殘餘值也越大；當砂土平均粒徑大於土釘牙距時，視摩擦係數則隨螺紋牙距之增加而增大，而殘餘視摩擦係數皆下降至某一範圍。(2)粗糙土釘隨直徑增大，視摩擦係數呈遞減的趨勢，但遞減的趨勢最後趨於平緩；殘餘視摩擦係數則隨不同粒徑之砂土而有固定的趨勢。(3)各試驗砂之拉出峰後殘餘行為皆不同：編號 9 矽砂隨位移增加而平滑下降，其拉出力殘餘值為尖峰值的 50% ~ 65%；編號 315 石英砂則有上下跳動之現象，其拉出力殘餘值為尖峰值的 70% ~ 80%；在編號 313 石英砂中的殘餘值趨向一定值(相差 6%以內)。

本研究透過一系列拉出試驗結果，配合定義之粗糙度與單一長度內螺紋數量，運用 Luo 之理論模式，歸納單釘視摩擦係數與粗糙度及螺紋數之關係。關係式分為平均砂土粒徑小於螺紋牙距(編號 9 矽砂、編號 315 石英砂)與大於螺紋牙距(編號 313 石英砂)兩種情況。預測值與試驗值相比，編號 9 矽砂相差 13%；編號 315 石英砂相差 6.1%；編號 313 石英砂則相差 17.2%。

ABSTRACT

Pullout behavior of model nail in a sand box under various conditions was investigated through a series of laboratory tests. The conclusions from the result of laboratory experiment are summarized: (1) When D_{50} of the sand is smaller than the screw length, peak and residual apparent friction coefficients at the soil-nail interface are increased with the increase of screw length. When D_{50} of the sand is larger than the screw length, the peak apparent friction coefficient increases with the increase of screw length, but the residual apparent friction coefficient decreased and reaches a constant value. (2) The increase of sand particle creates greater value of the peak apparent friction coefficient. Apparent friction coefficient at residual varies with the particle size of the tested sand. (3) The residual pullout resistance for nail pulled out from No 9 silica and No. 315 sands decreased to 50-60% and 70-80% of peak values, respectively. The residual resistance of nail in No.313 Quartz sand reaches a constant value for all sizes of nails. According to the results of laboratory experiment, roughness was defined to evaluate the peak apparent friction coefficient from nail and soil properties.

Two formulas are used for the D_{50} of sand is smaller and greater than screw length, respectively. The predicted values of silica sand are 13% greater than the

values of laboratory experiment, while the No.315 Quartz sand and No. 313 quartz sand are 6.1% and 17.2% greater than the tested values.

Key Words: Soil Nailing, Roughness, Apparent Frictional Coefficient, Pullout.

一、前言

土釘工法為現地土壤加勁工法之一，可提昇基礎開挖工程之施工效率並減低成本，將鋼棒置入地盤之預鑽孔洞中並加以灌漿，使與土壤結合為一體，並於開挖面配合鋼絲網噴凝土以提供土壤之束制力量，進而提升開挖之安全性，近年來此工法也逐漸使用於提高現地邊坡之穩定性。

土釘加勁效果與土釘、土壤間之握裹機制有極密切關係，拉出試驗為探討土釘握裹機制最直接方法之一，且土釘運用於砂質地盤最能彰顯其特性。由楊尚恆[1]之土釘拉出試驗研究可知，在同一相對密度的砂土中，土釘粗糙度對土釘於其中之拉出行為有極大的影響，表面光滑與粗糙的土釘其視摩擦係數之差異可達6倍之多；反觀長徑比和覆土壓力的影響幾可忽略。

二、研究目的

本研究將以室內土釘拉出試驗儀進行砂土中土釘之拉出試驗，透過試驗結果之回歸與分析，結合理論模式，建立足以描述單釘拉出行為之數學模式。主要的拉出試驗項目有：在三種不同粒徑的土壤中，以四種土釘直徑進行拉出試驗，土釘有光滑及粗糙表面，此粗糙表面係由三種不同牙距所形成。期能由數種土壤粒徑、土釘牙距及土釘直徑等組合之結果中，找出一泛用模式。

三、文獻探討

在土釘擋土結構中，土釘係藉由與土壤間的相對變形而發揮加勁效能，因此，土釘與土壤間的互制行為相當值得探討。以下回顧 Milligan 與 Tei[2]、Luo 等人[3]及楊尚恆[1]建議的理論模式，作為往後整理試驗結果的參考。

3.1 Milligan 與 Tei[2]之研究

Milligan 與 Tei[2]之實驗目的在於探討土釘直徑、土釘長度、土釘表面粗糙度以及土釘勁度等參數對土釘拉出阻抗的影響。試驗以一室內小型拉出儀進行，並使用三種不同粒徑的砂土。

該研究定義一摩擦係數 μ^* 為：

$$\mu^* = \frac{f}{\tan \phi} \quad (1)$$

其中 $f = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{mean}}$ ， σ_{mean} = 平均正向應力 = $\sigma_v \frac{(1+k_0)}{2}$ ， τ_{max} = 尖峰剪應力， ϕ = 土壤摩擦角， f = 視摩擦係數， k_0 = 靜止土壓力係數。

試驗結果顯示，剛性土釘的粗糙表面對尖峰拉出力造成極大的影響；而柔性土釘之破壞模式包含斷裂的情形。土釘埋設長度和覆土壓力對 μ^* 無明顯的影響。然而， μ^* 隨著砂土顆粒粒徑的不同而有變化。該實驗結果歸納整理如下：

1. 摩擦係數 μ^* 隨著土釘直徑增加而減少，但若直徑大於 20 mm 時則 μ^* 趨於定值

2. μ^* 與土壤膨脹性息息相關；假設砂土沒有膨脹角 ($\psi = 0^\circ$)，則可得到摩擦係數 $\mu^* = 1$ 。

由上述之結論, Milligan 與 Tei[2] 以一函數表示摩擦係數 μ^* 與各項參數之關係:

$$\mu^* = f\left(\frac{G}{\sigma_m}, \frac{h_s}{D}, \frac{\Delta h_s}{D}\right) = f\left(\frac{G}{\sigma_m}, \frac{D_{50}}{D}, \psi\right) \quad (2)$$

其中 G = 土壤剪力模數, h_s = 土釘周圍土壤剪力區厚度, Δh_s = 剪力區厚度變化量, D = 土釘直徑, D_{50} = 砂土顆粒平均粒徑, ψ = 砂土膨脹角。

3.2 Luo 等人[3]之研究

為歸納土釘於膨脹性砂土中拉出阻抗行為機制, Luo 等人[3]假設施加於土釘周圍之圍壓增量為土壤膨脹行為之函數, 建立土釘拉出阻抗機制之行為模式。由於土釘拉出阻抗是由粒狀土壤之膨脹性及土壤與土釘界面之相對行為所控制, 故將土釘表面之界面摩擦角理想化為顆粒與土釘界面之基本摩擦角及土釘粗糙面爬坡角之疊加, 表示如下:

$$\phi_i = \delta + i \quad (3)$$

其中 ϕ_i = 界面摩擦角, δ = 土壤與土釘之基本摩擦角, i = 上坡角。

為考量土壤顆粒間的相互作用而產生膨脹行為, 土壤內摩擦角 ϕ' 可以下式表示:

$$\phi' = \phi_{cv} + \psi \quad (4)$$

其中 ϕ_{cv} = 土壤定體積摩擦角。

此外, 假設砂土受剪時尖峰摩擦阻抗發生於最大膨脹角 ψ_{\max} 處, 同時土壤受剪膨脹時, 將產生反作用力回施於土釘周圍, 故使作用於土釘之有效平均正向應力增加, 示意如圖 1, 而增大後之平均正向應力 σ'_{mean} 如下:

$$\sigma'_{mean} = \frac{2Gu_{r0}}{r_0} + \sigma'_v \quad (5)$$

其中 u_{r0} = 土釘周圍土體於土釘拉出時之徑向膨脹量, r_0 = 土釘半徑, σ'_v = 有效覆土壓力。

重新整理上式, 可得尖峰拉出力之關係式如下:

$$T_{\max} = A\sigma'_{mean} \tan \phi = 2\pi r_0 l \tan \phi \left\{ \lambda \tan \left[3D_r \left[11.1 - \ln \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \sigma'_v \right) \right] - 3 \right] + \sigma'_v \right\} \quad (6)$$

其中 $\lambda = \frac{Gu_c}{r_0}$, l = 土釘埋置長度, u_c = 尖峰剪位移, D_r = 土壤相對密度。

3.3 楊尚恆[1]之研究

楊尚恆[1]以一大型土釘拉出試驗裝置, 進行直徑 9mm 模型土釘與土壤間握裹行為之探討。實驗目的除了探討單根土釘拉出過程之影響機制、建立拉出阻抗與粗糙度之關係外, 對於雙釘之間的互制效應, 也有詳細的探討。針對單釘部分實驗結果顯示粗糙度對於土釘拉出行為有顯著之影響, 視摩擦係數最大相差達 6 倍, 而土釘長徑比及覆土壓力對於土釘視摩擦係數則無顯著之影響。楊尚恆[1]

定義一粗糙度 R :

$$R = \frac{T_d}{D_{ex}} \quad (7)$$

其中 T_d = 土釘螺紋牙深, D_{ex} = 土釘外徑。

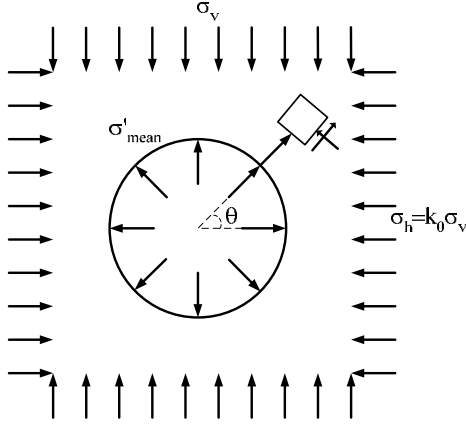


圖 1 土釘圍壓增加示意圖[3]

土釘拉出時,由於土釘表面的粗糙,造成土釘周圍粒狀土壤破壞面由土釘表面向外擴張,當視摩擦係數等於砂土尖峰摩擦角時,此時即為土釘周圍土壤之破壞半徑,其關係式如下:

$$\frac{T_{max}}{2\pi r l} = \sigma_{mean} \tan \phi_p \quad (8)$$

其中 T_{max} = 土釘尖峰拉出力, r = 土壤破壞半徑, l = 土釘埋設長度, ϕ_p = 土壤尖峰摩擦角。

經試驗結果整理歸納,可得到破壞半徑(r/r_0)與粗糙度 R 之關係:

$$\frac{r}{r_0} = 2.46 - 26.74R + 272.37R^2 \quad (9)$$

其中 r_0 = 土釘半徑(= $D_{ex}/2$)。

將上述關係式,配合施加於土釘破壞面上之平均正向應力和砂土三軸試驗回歸之圍壓與尖峰摩擦角關係式,可建立單釘尖峰拉出力 T_{max} :

$$T_{max} = \frac{(1+k_0)\sigma_v}{2} \tan \left\{ 30.81 + 13.38D_r - 4.15D_r \log \left[\frac{(1+k_0)\sigma_v}{2} / P_0 \right] \right\} \times 2\pi r_0 \left[2.46 - 26.74 \left(\frac{h \cos 30^\circ}{2r_0} \right) + 272.37 \left(\frac{h \cos 30^\circ}{2r_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

其中 P_a = 一大氣壓力 = 101.4 kPa, h = 牙距。

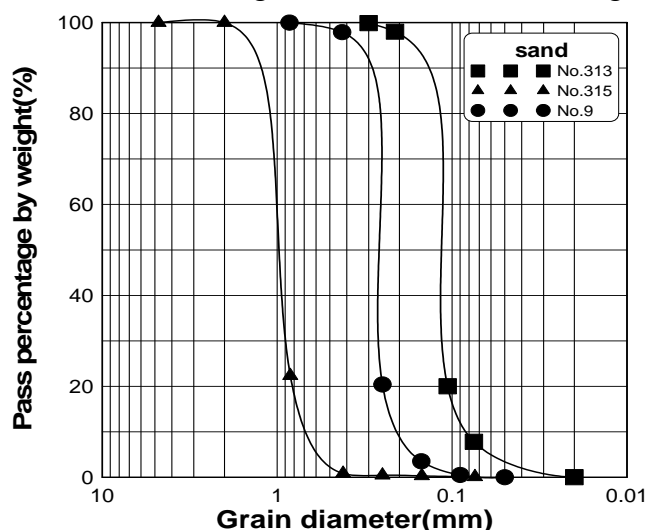
楊尚恆[1]分別將式(10)與 Luo 等人[3]的理論模式,與實驗結果比較。發現土釘直徑很小時, Luo 等人[3]對於土釘拉出力之預測值明顯高估。

四、研究方法

本文主要探討影響土釘於砂土中拉出行為之參數，包括砂土種類、土釘直徑、以及土釘螺紋牙距等三種，透過拉出試驗結果，分析此三種參數對拉出行為的影響，並歸納相互間之關係。

4.1 砂土性質

本研究採用三種不同粒徑的砂土，分別為編號 313 及 315 之石英砂及苗栗所產之 9 號砂砂，其顆粒形狀都屬次稜角狀，粒徑分佈曲線如圖 2，皆為不良級配之砂 (SP)。編號 313 之石英砂最大乾密度為 1.639 g/cm^3 ，最小乾密度為 1.438 g/cm^3 ；編號 315 石英砂最大乾密度為 1.6447 g/cm^3 ，最小乾密度為 1.449 ；而編號 9 之苗栗砂砂最大乾密度為 1.425 g/cm^3 ，最小乾密度為 1.4 g/cm^3 。



如前所述採用三種不同的砂土，分別為編號 313 石英砂、編號 315 石英砂，以及編號 9 砂砂，平均粒徑 D_{50} 分別為 0.97 mm、0.28 mm 及 0.13 mm。

砂土相對密度控制於 70%，為達到固定之相對密度，採用乾搗法，並依據砂土顆粒大小的不同，使用不同篩號的篩網實降，使砂土均勻地填入拉出盒內，填砂過程分為 16 層，每層 25 mm，並以版形夯實器輕搗使每層均達預定高度。

土釘拉出試驗設備如圖 3，主要功能如下：

1. 拉出盒

拉出盒為鋼板製成，長、寬、高分別為 60 cm × 80 cm × 40 cm。

2. 加壓氣囊

由剛性覆板及柔性橡膠兩部分構成，藉由橡皮氣囊將壓力均勻傳遞至土壤，透過調壓閥調整壓力以符合試驗需求。

3 動力機構

可提供拉出速率範圍由 0.01 mm/min 至 2 mm/min。

五、試驗結果與分析

5.1 土釘表面螺紋牙距對尖峰拉出力之影響

覆土壓力固定為 196 kPa，試驗結果顯示，土釘在三種試驗砂中之尖峰拉出力皆隨著牙距的增加而增大，此結果與楊尚恆[1]之研究趨勢相同。



圖 3 土釘拉出試驗設備

土釘拉出阻抗可由土釘表面與砂土之剪應力表示，圖 4 為直徑 9 mm 土釘於各試驗砂中之視摩擦係數與螺紋牙距之關係，由圖可見於各試驗砂中之視摩擦係數皆隨著牙距的增加而變大。土釘於各砂土中之尖峰視摩擦係數與螺紋牙距之關係可以雙直線表示，在 0.5 mm 牙距處各直線有轉折，在 9 號砂砂及 315 石英砂中初期(雙直線的第一段)斜率比第二段大；但土釘在 313 石英砂中當直徑較小時(9 mm 及 12 mm)其約略呈一直線；直徑較大時(16 mm 及 19 mm)之趨勢則與土釘在 9 號砂砂及 315 石英砂中相同。

編號 9 砂砂中，牙距由 0 mm 增加到 0.5 mm 時，摩擦阻抗之增量最大(視摩擦係數由 0.229 增加到 1.438，增幅達 6 倍)，而牙距由 0.5 mm 增加到 0.75 mm、0.75 mm 增加 1mm，其摩擦阻抗增量則明顯趨緩(分別 9%和 16.8%)。編號 315

之石英砂也有相同之情形；而編號 313 之石英砂，牙距由 0 mm 增加到 0.5 mm 之摩擦阻抗值增量雖仍為最大(增幅約為 3 倍)，但與前面兩種砂之阻抗增量相比，似乎有略小的情況。造成此種現象應與砂土平均粒徑和土釘牙距相對大小有關，此部分將於後續再作討論。

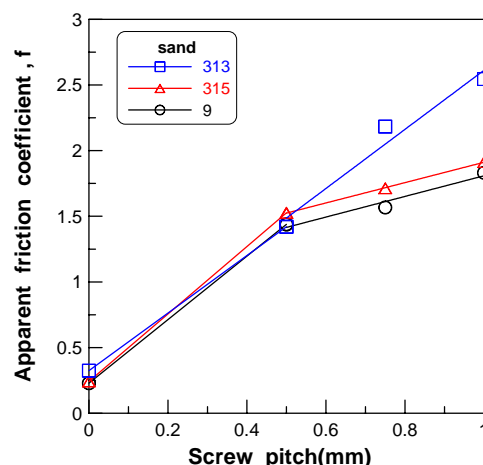


圖 4 直徑 9 mm 土釘螺紋牙距與視摩擦係數之關係

5.2 土釘直徑對尖峰拉出力之影響

土釘之拉出行為可能隨土釘直徑的改變而有所不同，隨著土釘直徑的增加，拉出力也隨著變大的趨勢是可以預期的，如圖 5。另針對四種不同直徑(9 mm、12 mm、16 mm、及 19 mm)的土釘以視摩擦係數 f 作探討，比較摩擦阻抗(即單位面積之摩擦抵抗力)與土釘直徑兩者之關係。

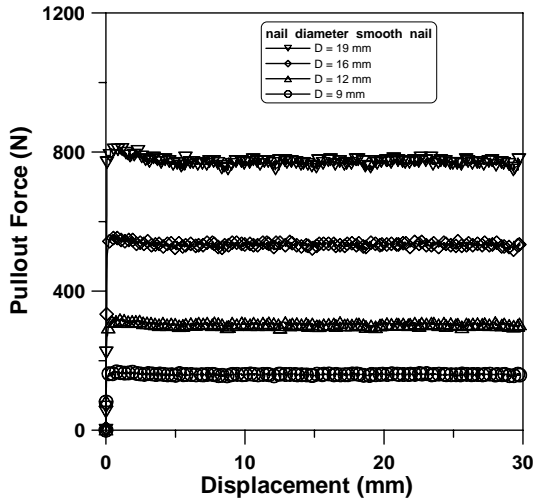
圖 6 為編號 9 砂砂中土釘直徑與視摩擦係數之關係。由圖可見，光滑土釘之視摩擦係數並無隨土釘直徑的增加而有顯著的變化，變化量在 4% 以內；粗糙土釘之視摩擦係數則隨土釘直徑增大而有下降的趨勢，且在初期，直徑 9mm 到 12 mm 時下降最多，最後則漸趨平緩；編號 313 及 315 號石英砂中也有相同之趨勢。

綜觀上述可知，光滑土釘之尖峰視摩擦係數受到土釘直徑的影響非常小；但在粗糙土釘部分，隨著土釘直徑增大，視摩擦係數呈遞減的趨勢，最後趨於平緩。此結論與 Milligan 與 Tei[2]之試驗結果相似，其試驗結果指出當土釘直徑增加時，摩擦係數 μ^* 減少，當直徑大於 20 mm 時 μ^* 可視為定值。

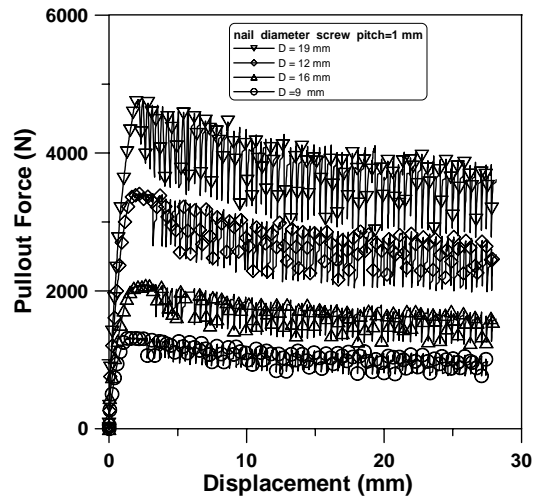
5.3 砂土平均粒徑對土釘拉出阻抗之影響

圖 7 為光滑土釘在不同平均粒徑之砂土中的摩擦係數變化情形。由於土釘表面光滑，對於砂土顆粒與螺紋間無互嵌因素之影響，由圖可見隨著砂土顆粒平均粒徑增加，摩擦係數漸趨上升。

圖 8 為牙距 0.5 mm 在不同砂土中之摩擦係數變化情形，圖中各直徑土釘之摩擦係數並無隨平均砂土粒徑增加而呈向上趨勢，在平均粒徑為 0.97 時反而下降。造成此現象的原因，主要由於土壤顆粒與螺紋牙距相對尺寸大小所造成；在螺紋牙距 0.5 mm，相對於編號 9 砂砂和編號 315 石英砂之平均粒徑(分別為 0.13 mm 和 0.28 mm)，大多數的顆粒都小於螺紋，因此圖形的前半段其視摩擦係數



(a)光滑



(b)牙距=1 mm

圖 5 編號 315 石英砂中土釘之拉出力-位移曲線

呈現升高趨勢。編號 313 石英砂則平均粒徑(0.97mm)遠大於螺紋牙距，因此大部分顆粒無法嵌入，此時少了顆粒與牙距間的互鎖力，因而摩擦係數下降。

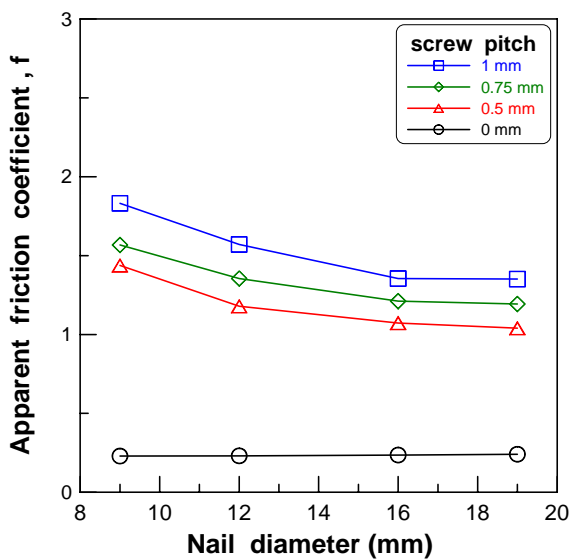


圖 6 編號 9 砂中土釘直徑與視摩擦係數之關係

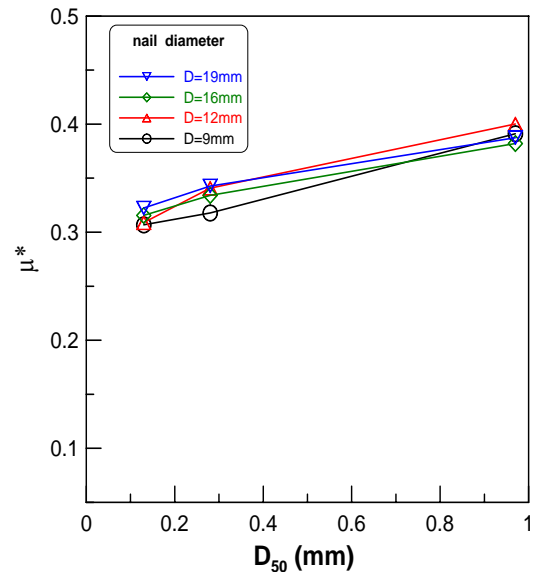


圖 7 光滑土釘於不同砂土平均粒徑與摩擦係數之關係

5.4 峰後殘餘現象

土釘於編號 9 之砂中拉出力-位移曲線，顯示拉出力達到尖峰值後即隨位移的增加而降低，並於約 20 mm 之拉出位移時達穩定之殘餘值。各曲線皆呈平順，大的牙距有較大之尖峰值及殘餘值。殘餘值為尖峰值的 50%~65%。

除光滑土釘外，在編號 315 石英砂中之拉出力-位移曲線於峰後呈明顯的滯動現象，殘餘值為尖峰值的 70%~80%，如圖 5(b)。土釘在 313 石英砂中之拉出力達到尖峰值前的趨勢與前者相同，惟大約於 15 mm 位移後，除光滑土釘外，不同牙距之土釘拉出力-位移曲線重疊。

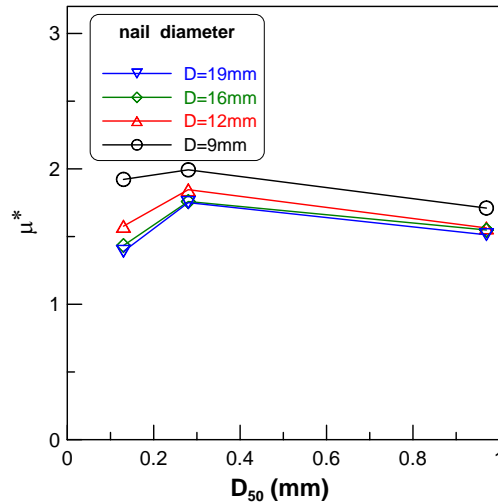


圖 8 牙距 0.5 mm 於不同砂土平均粒徑與摩擦係數之關係

5.5 參數探討與分析

本試驗將鋁管表面以加工螺紋之方式來模擬現地灌漿後漿體向土壤孔隙滲透所造成表面粗糙的現象。對於粗糙度的定義除考慮螺紋牙深與土釘尺寸兩者間的關係(T_d / D_{in} , $D_{in} = D_{ex} - 2T_d$)外，對於其他可能影響粗糙土釘拉出行為的因子，如土釘與周圍砂土顆粒相對大小關係，也加入 T_d / D_{50} 的討論。以下即探討 T_d / D_{in} 及 T_d / D_{50} 對視摩擦係數之影響。

1. T_d / D_{in} 對視摩擦係數之影響

除光滑土釘由於牙深、牙距為 0 mm，且 $T_d / D_{in} = 0$ ，無法看出 T_d / D_{in} 和尖峰剪應力之關係外，其他三種土釘之試驗結果可以直線方程式回歸 T_d / D_{in} 與視摩擦係數 f 之關係，如圖 9。因此可將 T_d / D_{in} 與 f 兩者當作一正比關係。

2. T_d / D_{50} 對視摩擦係數之影響

除光滑土釘外，其他三種土釘之 T_d / D_{50} 與視摩擦係數 f 之關係，可以對數方程式 $Y = AX^{0.0625} + B$ 回歸，如圖 10；因此，可將 $(T_d / D_{50})^{0.0625}$ 與 f 兩者當作一正比關係。

歸納上述二點，可知 (T_d / D_{in}) 及 $(T_d / D_{50})^{0.0625}$ 與粗糙度 R 成正比關係。所以，將粗糙度重新定義如下式：

$$R' = \left(\frac{T_d}{D_{in}} \right) \left(\frac{T_d}{D_{50}} \right)^{0.0625} \quad (11)$$

5.6 拉出阻抗數學模式之探討

Hong 等人[4]定義之粗糙度包含單位長度內螺紋數目，本研究也將此參數之影響納入分析，此參數定義為：

$$N = 1 / S_p \quad (12)$$

其中 S_p = 螺紋牙距

土釘於各試驗砂中視摩擦係數與 $R'N$ 之關係，以二次方程式回歸，得到下列

關係式：

編號 9 之矽砂：

$$f = 19(R'N) - 64(R'N)^2 + 0.25 \quad (13)$$

編號 315 之石英砂：

$$f = 26(R'N) - 116(R'N)^2 + 0.28 \quad (14)$$

編號 313 之石英砂：

$$f = 27(R'N) - 96(R'N)^2 + 0.35 \quad (15)$$

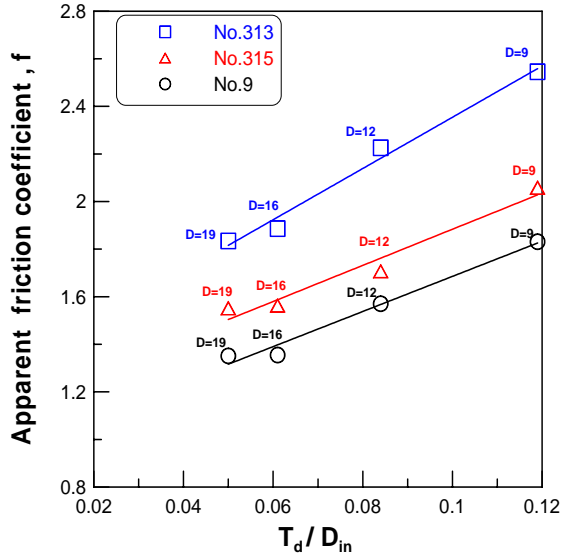


圖 9 牙距 1 mm、牙深 0.866 mm 之粗糙土釘中 T_d / D_{in} 與視摩擦係數之關係

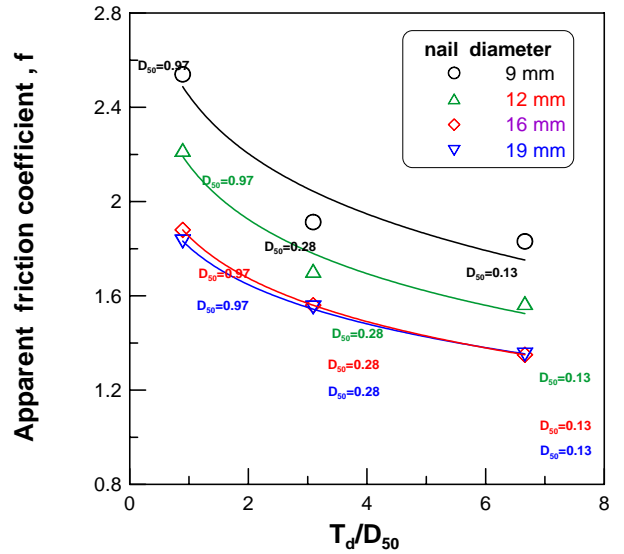


圖 10 牙距 1mm 牙深 0.866 mm 之粗糙土釘中 T_d / D_{50} 與視摩擦係數之關係

由式(13)、(14)與(15)可分別預測土釘最大拉出力，與試驗結果比較，編號 9 之矽砂其光滑土釘平均相差 6.6%，粗糙土釘平均相差 7.4%；編號 315 之石英砂光滑土釘平均相差 9.4%，粗糙土釘平均相差 7.2%；編號 313 之石英砂光滑土釘平均相差 8.6%，粗糙土釘平均相差 15.2%。

5.6.1 Luo 之理論模式

Luo 等人[3]針對土釘表面粗糙，除前述 3.2 節提到平均正向應力關係式之外，還可透過土釘拉出位移與土體膨脹角，計算土釘周圍土體於土釘拉出時之徑向膨脹量 u_{r0} ，如下：

$$u_{r0} = \frac{1}{2} u_c \tan \psi_{\max} \quad (16)$$

其中 u_c = 臨界剪位移，即土釘最大拉出力所需之位移。

經整理土釘在膨脹性砂土之視摩擦係數為：

$$f = \left(\frac{G u_c}{r_0} \tan \psi_{\max} + \sigma'_v \right) \cdot \frac{\tan \phi}{\sigma_{mean}} \quad (17)$$

5.6.2 試驗結果與理論模式之比較

為瞭解臨界剪位移 u_c 與粗糙度 R' 、單位長度內螺紋數目 N 之關係；且因對土釘直徑與拉出位移關係已有初步認知(直徑越大拉出位移越大)，因此討論過程排除土釘直徑之影響，即將臨界剪位移除以對應之土釘半徑(u_c / r_0)。

圖 11 為各試驗砂之($R'N$)與(u_c / r_0)之關係。由圖可見編號 9 矽砂與編號 315 石英砂之數據點兩者相當接近，可視為同一群組；而編號 313 石英砂之數據點明顯與其他兩種砂相距較遠，因此，本研究將($R'N$)與(u_c / r_0)之關係圖可分成兩部分，一部份為編號 9 矽砂與編號 315 石英砂，兩者平均粒徑都小於本試驗所使用之螺紋牙距。另一部份是編號 313 石英砂，其平均粒徑多數大於土釘牙距(牙距 1 mm 例外)。

針對顆粒小於土釘牙距之砂土，可獲得 $R'N$ 與 u_c / r_0 之關係為：

$$\frac{u_c}{r_0} = 1.035 \cdot (R'N) + 0.176 \quad (18)$$

將此關係式代入式(17)得到 $R'N$ 與 f 之關係式如下：

$$f = [(1.035 \cdot (R'N) + 0.176) \cdot G \cdot \tan \psi_{\max} + \sigma'_v] \cdot \frac{\tan \phi}{\sigma_{mean}} \quad (19)$$

對於顆粒大於土釘牙距之砂土(暫不考慮牙距為 1 mm 之四個數據點)，其 $R'N$ 與 u_c / r_0 之關係如下：

$$\frac{u_c}{r_0} = 1.65 \cdot (R'N) + 0.252 \quad (20)$$

將此關係式代入式(17)如下：

$$f = [(1.65 \cdot (R'N) + 0.252) \cdot G \cdot \tan \psi_{\max} + \sigma'_v] \cdot \frac{\tan \phi}{\sigma_{mean}} \quad (21)$$

再將剪力模數、膨脹角、有效覆土壓力、土壤尖峰摩擦角與平均正向應力帶入式(19)、(21)，便可求得土釘拉出視摩擦係數之理論值。其中膨脹角部分，由 Bolton[5]將 17 種不同粒徑大小之砂土整理得到之經驗式：

$$\psi_{\max} = 3I_R \quad (22)$$

其中 $I_R = D_r(10 - \ln p') - 1$ ， $p' = \frac{(\sigma_v + 2\sigma_h)}{3}$

依據式(22)編號 9、315、及 313 砂之膨脹角各為 7.96°、8°及 8.06°。

編號 9 矽砂之 f 理論值與試驗值的比較(圖 12)，在粗糙土釘部分，大部分差距百分比約 10%左右，但部分點理論值高於試驗值 25%以上，若將所有點相差的百分比平均，整體相差之百分比為 13%；在光滑土釘部分，理論值與試驗值兩者相差很大，主要因為式(19)與(21)適用於土釘表面粗糙之情況，無法預測光滑土釘，因此理論值與試驗值才會相距甚遠。

編號 315 石英砂之理論值與試驗值差百分比在 10%以下，整體相差之百分比為 6.1%，比起編號 9 矽砂更為準確(圖 13)。然而，編號 313 石英砂由於顆粒平均粒徑大於螺紋牙距，許多數據點相差到 40%以上(理論值高估)，整體相差

17.2%(圖 14)。

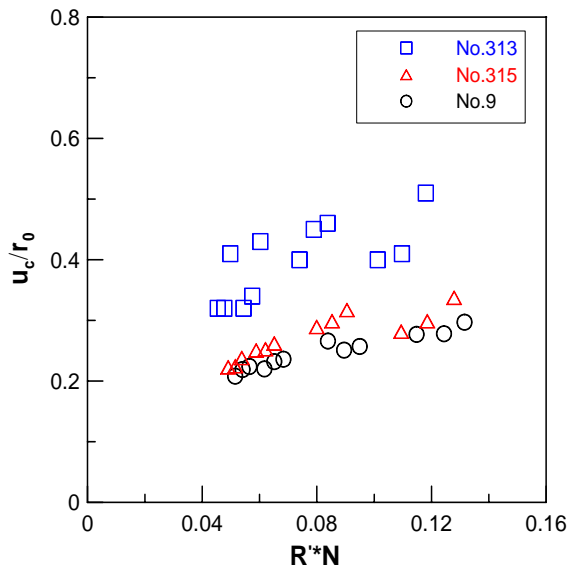


圖 11 各試驗砂($R \cdot N$)與(u_c / r_0)之關係

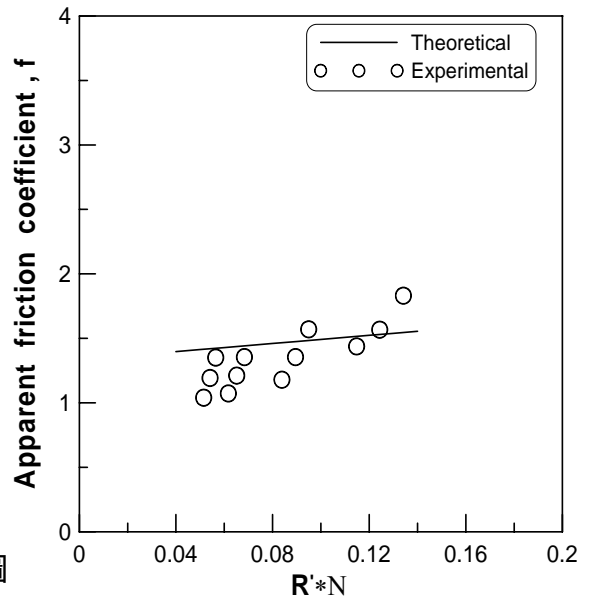


圖 12 編號 9 矽砂之理論值與試驗值的比較

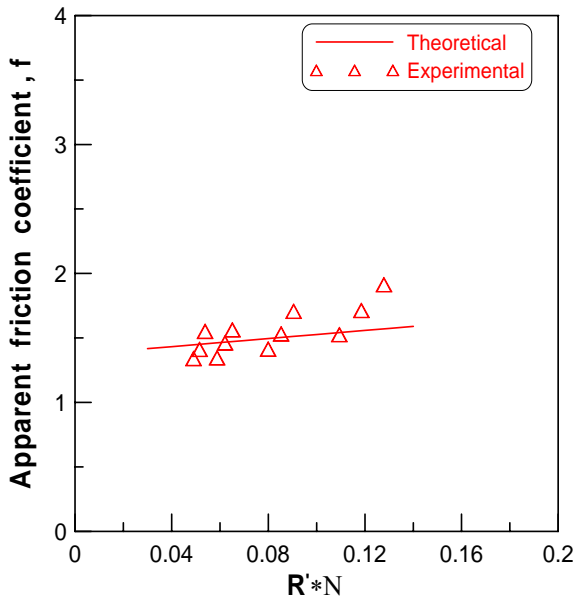


圖 13 編號 315 石英砂之理論值與試驗值的比較

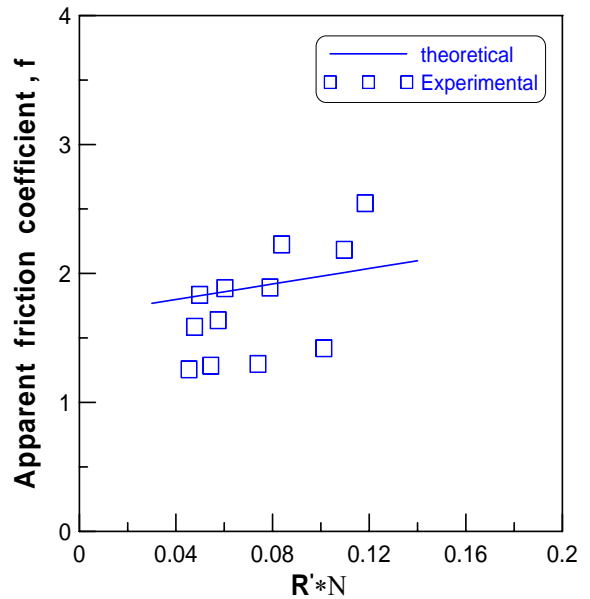


圖 14 編號 313 石英砂之理論值與試驗值的比較

另將試驗獲得之光滑土釘拉出力，計算界面摩擦角，編號 9 矽砂、編號 315 石英砂、編號 313 石英砂分別為 12° 、 13.2° 與 16.8° 。此與透過光滑鋁塊與砂之直剪試驗，求得試驗砂與鋁塊尖峰界面摩擦角 13.2° (編號 9 矽砂) 14.3° (編號 315 石英砂)與 17° (編號 313 石英砂)。兩者相比極為接近，亦可驗證試驗之精確性。

六、結論

經試驗結果，可得下列結論：

1. 光滑土釘之視摩擦係數受到土釘直徑的影響非常小，但粗糙土釘可發現隨著土釘直徑增大，視摩擦係數呈遞減的趨勢，最後趨於平緩；當螺紋牙距增加，視摩擦係數亦隨之增加。
2. 當砂土平均粒徑小於土釘牙距時，摩擦係數隨顆粒尺寸增大而提高。當牙距 0.5 mm、顆粒大小由 0.13 mm 增加至 0.97 mm(顆粒大於土釘牙距)，此時螺紋牙距將無法發揮良好的摩擦阻抗；當牙距 0.75 mm、顆粒大小由 0.13 mm 增加至 0.97 mm，雖然在 0.97 mm 的部分顆粒仍小於牙距，但此時摩擦係數所提供之阻抗增量將與完全嵌入時相近。
3. 在殘餘視摩擦係數部分，砂土平均粒徑小於牙距時，隨著粒徑變大殘餘視摩擦係數隨之變大。但在編號 313 石英砂($D_{50} = 0.97\text{mm}$)，無論土釘牙距是否大於砂土的平均粒徑，其殘餘值皆於一固定範圍內，造成此現象之原因與土壤顆粒尺寸、排列方式有關。編號 9 之矽砂峰後之殘餘值與實際現地施工狀況相似，隨著位移平滑下降，最後趨於定值，並無上下震動之現象，殘餘值為尖峰值的 50% ~ 65%；編號 315 之石英砂在峰後有極明顯之跳動現象，造成此現象之原因與土釘與砂土顆粒互鎖之滯動現象有關，其殘餘值為尖峰值的 70% ~ 80%。
4. 本文對於可能影響拉出行為之因素，除定義一粗糙度外，加上考量單位長度內螺紋數目，並配合 Luo 之理論式，歸納出單根土釘視摩擦係數與 R/N 之關係。對於砂土顆粒小於土釘牙距，此關係式與試驗值相差約 9.5%；而砂土顆粒大於土釘牙距，關係式與試驗值相差約 17.2%。然在光滑土釘部分，理論值與試驗值兩者相差很多，主因本文的理論式僅適用於土釘表面粗糙之情況，無法預測光滑土釘，因此理論值與試驗值相距甚遠。

參考文獻

- [1] 楊尚恒，「砂土層中土釘拉出之實驗研究」，碩士論文，私立淡江大學土木工程學系研究所 (2001)。
- [2] Milligan, G. W. E. and Tei, K., "The Pullout Resistance of Model Soil Nail," *Soil and Foundations*, Vol. 38, No. 2, pp. 179-190 (1998).
- [3] Luo, S. Q., Tan, S. A. and Yong, K. Y., "Pullout Resistance Mechanism of a Soil Nail Reinforcement in Dilative Soil," *Soil and Foundations*, Vol. 40, No. 1, pp. 47-56 (2000).
- [4] Hong, Y. S., Wu, C. S. and Yang, S. H., "Pullout Resistance of Single and Double Nails in a Model Sandbox," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 5, pp. 1039-1047 (2003).
- [5] Bolton, M. D., "The Strength and Dilatancy of Sands," *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78 (1986).

成果自評

本研究內容與原計畫相符，達成 85% 預期目標，時間及經費限制無法以更多粒徑土壤進行試驗；本研究結果將與進一步的試驗結果結合後整理投稿於學術期刊。