



電滲法運用於 地下鑽掘包泥問題之可行性探討

陸嘉／臺北市消防局整備應變科技士
簡紹琦／玄奘大學資訊管理學系教授
歐章煜／國立臺灣科技大學營建工程系教授
王傳宗／加興營造工程股份有限公司總經理
陳立憲／國立臺北科技大學土木系副教授

本研究乃以電滲法於國內首次嘗試解決地下鑽刀包泥問題，先由地下施工與包泥造成之工程影響作外業調查；再依多用於地盤改良之電滲工法之理論、機制，運用於地下機械鑽掘包泥解決方案之可行性探討。再行設計室內砂箱試驗，並簡化模擬地下鑽掘機包泥條件，由量測負極附近之含水量變化以評估包泥改善效果，並以抗剪扭力之阻抗大小作為檢核其增潤效應之指標，藉由不同電壓、電極棒材質、電滲時間、壓密壓力等變數，進行一系列試驗改良成效之探討。結果顯示，增潤改良效果在無壓密壓力狀況之電滲試驗下，以抗剪扭力 T 作為直接證據為檢視刀頭包泥之不排水剪力阻抗，試驗 T 值於5分鐘即有顯著反應，（抗剪扭力已降低26.4%）；而於最終60分鐘之電滲過程，抗剪扭力大幅降低 T_0 之56.8%；另外間接證據則計測刀頭包泥附近含水量，在電滲20分鐘即顯著增加約三成五（即含水量由40%增至54.13%）；且於最終60分鐘後，含水量增加約五成（由40%變為59.75%）。綜析由剪力阻抗大幅降低、含水量顯著增加之增潤效應可應用於機刀包泥之解決方案。最終本文並作外業調查，實地瞭解地下鑽掘機具之構造與其相關電機設備，初步提出結合電滲之設計構想與可行性芻議，俾供未來實際應用之佐參。

引言

綜觀地下鑽掘工程，在台灣地形特徵與複雜多變的地質狀況下施工，或多或少均遭遇到諸多掘削不力之工程困境，例如地層中卵礫石層夾埋黏土造成前方機頭包泥，導致進度落後、機頭摩耗增加以及其他工程災害，以管推工法的口徑較小，相對於大口徑的潛盾工法與TBM，排除困境的難度相對較高（人員難以進入機械中排除障礙），因此若能將機頭包泥之異況解決，使效能提高、減少工程災害，達到縮短工期、節省成本等等。

目前現地包泥障礙排除多為從外部加水稀釋黏土，改變作泥材比例、送排泥管互換等等，但是成效有限，仍然相當耗時，故本研究由前人的研究，電力滲透（以下簡稱電滲）於地盤改良，運用電滲之特性，將電滲應用於地下鑽掘機來解決包泥之異況。

文獻回顧

而本研究乃將地下鑽掘工程，與電滲加以結合，藉由電滲之原理，解決地下鑽掘機頭包泥異況，以提升地下鑽掘工程之效率與減少工地災害。本章以地下鑽掘工程之施工障礙、工地調查；與電滲理論、電滲應用，回顧之文獻依序說明如下。

地下鑽掘工程之施工異況

多變地質之施工環境下，卵礫石層異於一般沖積岩層與土層，其工程行為與特性較不易被施工者所瞭解，且機頭磨損較為嚴重，降低施工之效率；而夾埋黏土則容易造成包泥之異況，如圖1，因施工上所使用之鑽掘機頭大多為應付單一地質材料。有許多堅硬岩盤或是礫石層，其中含有剪裂破碎帶或是複合之地層，造成掘進困難，如廖銘洋^[4]，對於潛盾機於剪裂破碎帶掘進困難之原因分析。

地質改變

於岩盤區段，剪裂破碎帶屬於相對軟弱之區域，造成滾輪式切刃（Disk cutter）無法達到貫入破碎岩盤之作用，使得切刃轉盤扭矩負荷增加。

面盤取土孔遭黏土包覆

切刃面盤遭剪裂泥包覆，堵塞面板上之取土孔，造成開挖面之土碴無法進入土艙內，進而造成掘進速度減緩，切刃轉盤扭矩過高。

掘進速度緩慢、滾輪無法滾動造成重複磨耗

因掘進速度緩慢，形成切刃面盤與開挖面間重複研磨致耗時甚久，造成開挖面岩盤土質黏性化，使得切刃面盤超黏土包覆之情形更加嚴重，如圖 1。



圖 1 切刃面盤遭黏土包覆之情形與包泥造成切刃磨損 (廖銘洋^[4])

泥水濃度過高

剪裂泥溶解於泥水中，使得泥水輸送系統之泥水濃度及比重過高，二次泥水處理設備負荷量增加，並造成泥水處理耗時費工時，影響下一輪進之掘進時程。

電滲工法

電力滲透工法（Electro-Osmotic Treatment）最先運用於土木工程是應用在地盤改良上，所謂電滲地盤改良工法，是提高土壤之剪力強度來改良地盤性質。本研究利用電滲水分移至負極端之特性，與推進機作結合，如圖 2，來解決推進機包泥之問題。

電滲現象

由於黏土顆粒表面帶負電荷，黏土顆粒表面與孔隙溶液接觸時，負電荷會吸引溶液中之陽離子與極性分子，而形成電雙層並且於黏土表面與液體間產生電位差。正常情況下，黏土土壤電雙層之吸附水，難以用一般方法移除，但是藉由通電施加電位差能將電雙層吸附水中之擴散層加以移除，如圖 3，至於緊密層由於吸力非常大，則無法移除。當施加外電場於土層中，電雙層之陽離子受陰極吸引而帶著水化分子往陰極移動，此土壤中水分因電壓差而往負極端移動之行為，就稱之為電滲現象。

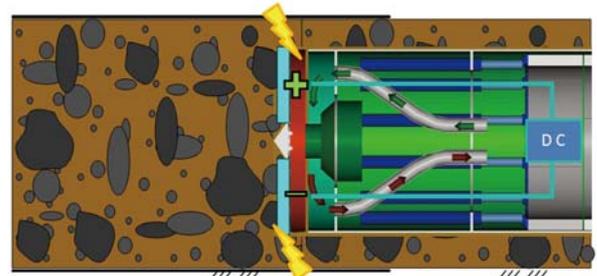


圖 2 電滲與推進機結合

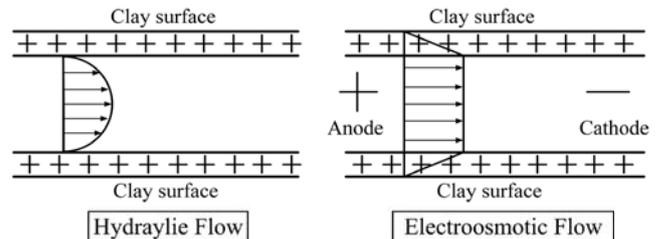


圖 3 施加電位差將電雙層吸附水中之擴散層加以移除 (改繪自簡紹琦, 2010)

電滲流量理論

假設土壤之孔隙半徑較電雙層之水層厚度大，而且帶正電之可移動離子集中於孔隙壁周圍，且將黏土孔隙視為一毛細管（capillary），在毛細管兩端施加一電場，而受到電場影響電雙層之陽離子受到負極端吸引而帶著水化分子往負極端移動，如圖 4 所示。

由於土壤間之孔隙半徑較大，如要驅動土壤上之電雙層水層，必需克服雙重水層與土壤顆粒間之摩擦力，才能造成水分移動，可得式 (1)：

$$\eta \frac{v}{b} = \sigma \frac{\Delta E}{\Delta L} \quad (1)$$

介面電位如式 (2)：

$$\zeta = \frac{\sigma \delta}{D} \quad (2)$$

藉由綜合上述兩式，可推得電滲水分移動之流速，如式 (3)：

$$v = \left[\frac{\zeta D}{\eta} \right] \frac{\Delta E}{\Delta L} \quad (3)$$

流經單一毛細管截面積為 a 時之流量，如式 (4)：

$$q_a = va = \left[\frac{\zeta D}{\eta} \right] \frac{\Delta E}{\Delta L} a \quad (4)$$

流經孔隙材料，孔隙率為 n ，截面積為 A 時之流量，如式 (5)：

$$q_A = \left[\frac{\zeta D}{\eta} \right] n \frac{\Delta E}{\Delta L} A \quad (5)$$

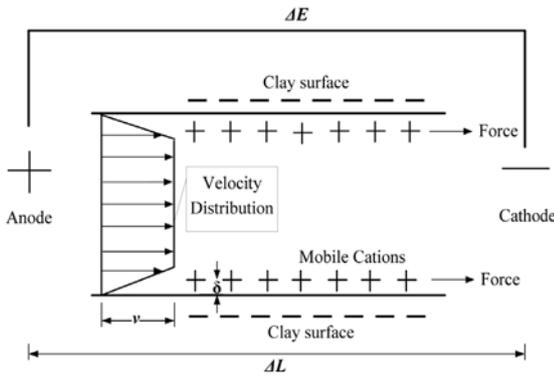


圖 4 電滲流量理論示意圖 (改繪自簡紹琦^[5])

其中, η : 流體之黏滯係數

v : 電滲流速

δ : 電雙層厚度

σ : 單位面積電荷

ΔE : 施加電位差

ΔL : 電極間距離

ζ : 界面電位

D : 相對介電常數

n : 孔隙率

q_a : 截面積為 a 之電滲流量

q_A : 截面積為 A 之電滲流量

A : 流路之截面積

而將上述式 (2.7) 以達西定律 (Dracy's law) 形式來表示為式 (6):

$$q_A = k_e i_e A \quad (6)$$

則電滲係數, 如式 (7):

$$k_e = \frac{\zeta D}{\eta} n \quad (7)$$

與水力滲透係數之關係, 如式 (8):

$$i_h = \frac{k_e}{k_h} i_e \quad (8)$$

其中, k_e : 電滲係數

i_e : 電力坡降

k_h : 水力滲透係數

i_h : 水力坡降

根據不同土壤種類進行一系列之電滲係數試驗, 由 Mitchell 將前人試驗成果整理成表, 得知的 k_h 隨著不同土壤種類而有顯著變化, 但是 k_e 並不會因為土壤種類改變而有太大差異, 其電滲係數 (k_e) 之範圍約為 1×10^{-5} 至 1×10^{-4} ($\text{cm}^2/(\text{sec}\cdot\text{V})$)。

電滲法改良工法適用之土壤種類

由上述得知電滲係數 k_e 與土壤種類、粒徑無相關, 大小約在 1×10^{-5} 至 1×10^{-4} ($\text{cm}^2/(\text{sec}\cdot\text{V})$) 之間, 變化範圍小。反觀水力滲透係數 k_h 隨著不同種類之土壤, 粒徑越小 k_h 越小, 而電滲時間較長時, 負孔隙水壓 $u = (k_e/k_h)\gamma_w \cdot V$, 因此顆粒越小之土壤 k_e/k_h 比值越大, 所產生之負孔隙水壓也越大, 故水力滲透係數 k_h 較小是有利電滲之排水, 如圖 5。

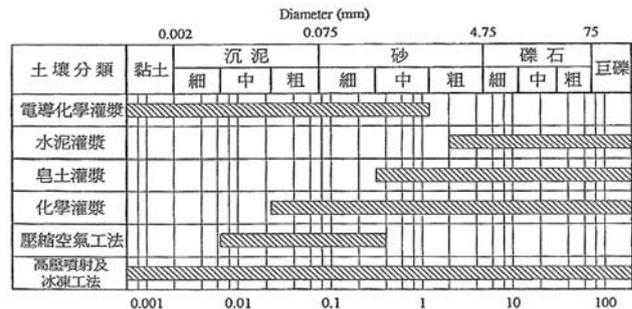


圖 5 各種地盤改良方式適用之土壤種類與粒徑範圍 (簡紹琦^[5])

包泥現地調查與室內砂箱試驗

進一步進行電滲改良地下鑽掘機機頭包泥異況為跨領域之結合, 計畫將電滲之電極端設置在鑽掘機之面盤刀頭上, 後方連接電源設備, 在發生包泥徵兆時, 於面盤施加電場, 使水分集中於刀頭上, 解決黏土包覆刀頭、面盤之問題, 電滲結合鑽掘機之構想概念圖, 如圖 6。且電滲行為機制較為複雜, 與解決地下鑽掘機包泥之潤滑行為不同, 差異比較如表 1 所示。因此, 為了釐清電滲對地下鑽掘機遇黏土包泥之潤滑的效果與其他影響因子, 判斷其可行性, 進行一系列試驗來探討。室內試驗設計是以現地地下鑽掘機應用結合為設計基礎, 相關儀器設備將模擬現地機械之材質及與機械結合作為考量, 相關考量如表 2。

表 1 電滲室內試驗差異之比較表

試驗比較	電滲應用地下鑽掘改良之室內試驗	電滲應用地盤改良之室內試驗
目的	解決地下鑽掘機械包泥	地盤改良
材料	土壤	高嶺土—模擬現地覆土壓力
方法	方法	於地下鑽掘機面盤刀頭設置負極端, 使水分集中於刀頭潤滑, 脫離黏土包覆。
	方法	利用電滲對土壤施加電場, 並且注入化學藥劑, 改良土壤強度。
量測	負極刀頭與土壤介面 (min)	兩電極端之間距 (max)
	排水路徑改良範圍	排水路徑
量測	直接抗剪扭力試驗	室內圓錐貫入試驗、含水量
監測	連續含水量追蹤	電流計、電壓計、水壓計

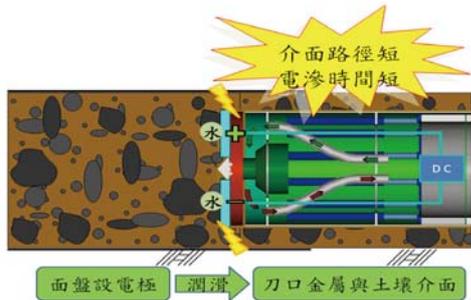


圖 6 電滲結合鑽掘機之構想概念圖

表 2 室內試驗設計考量

項目	試驗參數與資料	考量原因	
M1	土壤種類	高嶺土	夾理黏土是造成包泥之原因。且高嶺土電滲效果最為顯著，作為室內電滲行為分析。
	土壤壓力	0、1.1、2.2 kg/cm ²	模擬現地壓力，模擬覆土深度 0 公尺、5 公尺與 10 公尺。
	土壤含水量	40 %	由於推進時，大多工法會有泥漿、作泥材於推進面盤，故選擇較高之含水量。
M2	電源形式	直流電	較為穩定之電流，以及正負極端可以分別接面盤不同部位。
	電壓	30 V	試驗距離與推進機電極端設置距離約略相同，無電壓隨距離增大而增加負荷問題，故可用較高之電壓。
	電極棒材質	負極棒 — 鋼棒 正極棒 — 白金鈦棒	正極端為焊接在機頭面盤外圍，採用較耐腐蝕之白金鈦；負極端設置在刀頭上，刀頭材質多為鋼、鎢鋼，以及比較不同電極棒材質之差異。
	電極端距離	正極端與負極端間距 20 公分	約略為刀頭中心到周圍設置正極端之距離。
	電極棒尺寸	長 30 公分，直徑 1 公分，前端呈圓錐狀	圓錐狀電極棒為簡化模擬鑽掘機刀頭。
M3	潤滑試驗	扭力起子	直接證據，用來觀察電極棒脫離黏土，不排水扭力阻抗。
	監測	含水量	間接證據，監測電滲過程中電極棒周圍之水分變化。

試驗設備

本研究根據前人文獻與工地調查研究結果，發展電滲潤滑室內試驗，其考慮因素如下：(1) 以鋼棒作為負極棒，符合推進機刀頭材質，正極端則採用白金鈦棒與鋼棒比較耐腐蝕性與含水量之差異。(2) 運用直流電，維持負極端潤滑；正極端耐腐蝕。(3) 模擬現地應力狀態。(4) 實驗過程監測電極棒與土壤介面含水量變化。本試驗之儀器主要組成設備，配置如圖 7 所示。

在電滲試驗時，以間接法與直接法兩個部份判斷試驗結果，間接法是以土壤含水量作為水分變化之追蹤，直接法則是以抗剪扭力試驗作為試驗潤滑效果判定。土壤含水量之監測，隨著電滲時間增加，監測負極棒、正極棒周圍含水量之歷時紀錄，藉此來了解電滲行為之機制，找出水分變化曲線；抗剪扭力試驗則是以扭力變化反應改良後之差異，模擬鑽掘機刀頭扭轉情形。量測設備之介紹如下：

土壤含水量取樣

試驗中以監測土壤含水量來追蹤水分之改變，含水量之測量方法以劈管取樣，劈管尺寸為直徑 3.6 公分，高度為 7 公分，劈管取樣之土壤尺寸約為直徑 3.6 公分，厚度為 1 公分。

抗剪扭力試驗

試驗最後之效果評估以抗剪扭力試驗為評估方法，所使用之儀器為電子式扭力起子，型號為 DID 400，量測扭力範圍為 0.5 ~ 40.8 kg · cm，分辨率為 0.01 kg · cm，可選擇最大峰值與追蹤模式作為量測，精度為 ± 2.5%。

室內砂箱試驗結果與分析

本章將對電滲試驗中之含水量變化先作討論，以了解電滲之行為機制，再來對負極棒之抗剪扭力試驗結果作分析與討論，以了解負極棒界面潤滑之改良效果。

本研究試驗共施作 3 組電滲試驗，3 組試驗是為了探討電滲試驗之影響因子 — 壓密壓力與電壓，模擬不同覆土壓力與施加不同電壓，而每組當中不同記錄時間與不同取樣地點，是對於時間與距離兩個影響因子探討，以下將分別對這 3 組試驗結果作詳細說明與討論。試驗代號與取樣位置如圖 8、9 所示。

電滲試驗之含水量監測

首先在施加 30 V 電壓下，試驗中之第 1 組至第 3 組壓力為變數，目的是為了解壓密壓力大小對於電滲中水分移動之影響。且本研究之試驗負極棒為不排水，以潤滑為目標，故藉由此次試驗了解壓力對短時間之電滲影響。

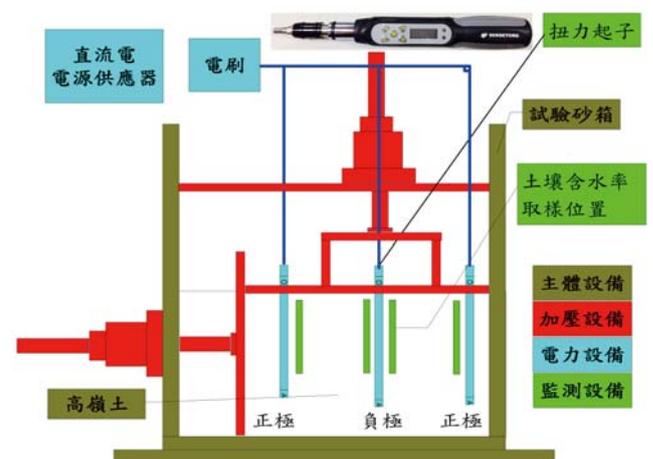


圖 7 電滲潤滑系統之整體配置圖

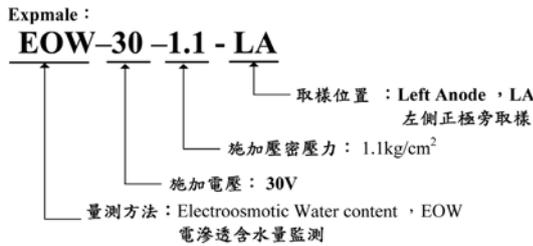


圖 8 本研究試驗代號

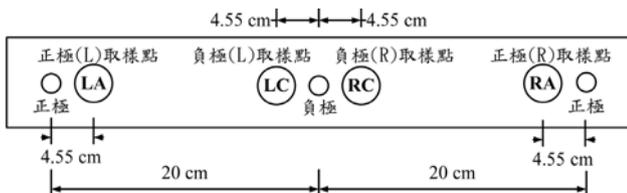


圖 9 室內砂箱試驗含水量取樣代號與相關位置

三組試驗所施加之壓力分別為 0 kg/cm^2 、 1.1 kg/cm^2 與 2.2 kg/cm^2 ，試驗總時間均為 60 分鐘，期間同時取樣土壤施作含水量試驗。

壓密壓力與電極材料對含水量變化之影響

了解不同壓力與不同電極材料對電滲水分移動之影響，在電壓 30 V 下施加之壓力分別為 0 kg/cm^2 、 1.1 kg/cm^2 與 2.2 kg/cm^2 ，且試驗中左側以鋼棒作為正極；右側以白金鈦棒作為正極，以下就針對不同壓密壓力與不同電極材料之試驗數據作探討，由圖 10 和圖 11，比較不同壓力與電極材料下之含水量差異。

由試驗可驗證施加越大之壓密壓力下，會使土壤之水力滲透係數 (k_h) 越低，負孔隙水壓 $u = (k_e/k_h) gw \cdot V$ ，因此土壤 (k_h) 越低而電滲透係數 k_e 接近為定值，使得 k_e/k_h 比值越大，所產生之負孔隙水壓也越大，造成含水量增加趨勢較為顯著。在電滲 20 分鐘即顯著增加約三成五（即含水量由 40% 增至 54.13%）；且於最終 60 分鐘後，含水量增加約五成（由 40% 變為 59.75%）。

由試驗可觀察整體含水量變化，負極棒左側之含水量高於負極棒右側，在室內試驗結果分析上，鋼棒之電滲效率較優於白金鈦棒，但在耐腐蝕特性上則是白金鈦優於鋼棒。

抗剪扭力試驗之效果評估

以施加不同壓密壓力作為試驗變數，目的是了解壓密壓力對於水分在負極棒介面集中潤滑之影響，潤滑之效果評斷是以抗剪扭力試驗作為量測，由試驗中之扭力變化，來探討試驗效果。

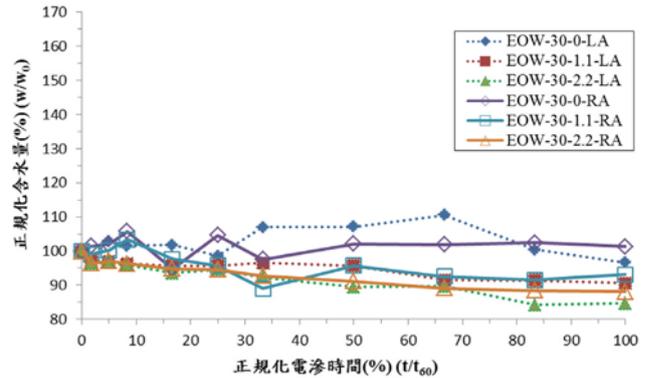


圖 10 兩側正極鋼棒周圍正規化之含水量與時間關係圖

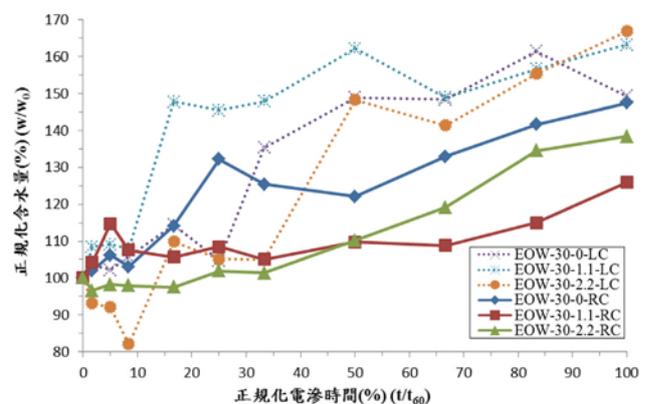


圖 11 負極棒兩側正規化之含水量與時間關係圖

由試驗結果比較，施加 30 V 電場，電滲時間 10 分鐘之後，3 組試驗之扭力值均趨於平緩。由試驗結果可知，施加之應力對短時間之扭力有較大影響，而電滲時間過了 10 ~ 15 分鐘扭力變化趨近平緩，因初期變化較大，故取前 20 分鐘之數據作為解析，如圖 12。

另將抗剪扭力與時間關係作正規化，可更容易觀察出抗剪扭力下降之趨勢，由圖 13 顯示，在電滲時間百分比 10 % 之前，抗剪扭力已大幅度降低了，後續其變化則較平緩。

結論

壓密壓力之影響

正極棒周圍之含水量並沒有因壓密壓力大小而有顯著變化；在負極棒周圍，有施加壓力之兩組試驗，含水量在電滲 10 分鐘時有顯著上升之趨勢，EOW-1.1-LC 上升原含水量 47.8%，EOW-2.2-LC 上升前次含水量 27.8%，無加壓試驗則是電滲約 20 分鐘時才有較顯著之上升，EOW-0-LC 上升原含水量 35.3%，由此可知，在適當之壓力下可加速水分之移動。

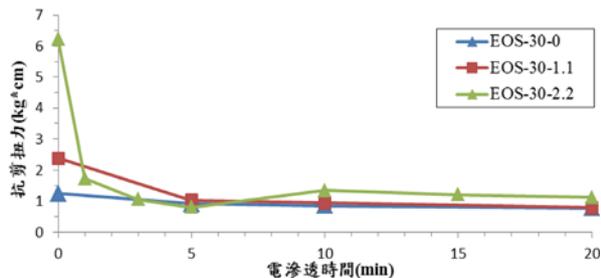


圖 12 不同壓密壓力之抗剪扭力與電滲時間關係 (20 分鐘內)

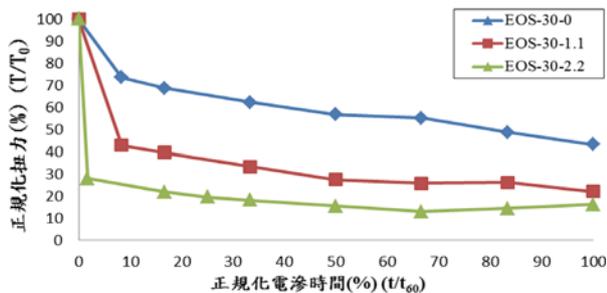


圖 13 正規化之抗剪扭力與電滲時間關係圖

電滲時間之影響

由試驗結果得知，負極棒左側之含水量在時間較短時，即有顯著上升之趨勢，EOW-0-LA 在 20 分鐘時含水量已從 40.7% 上升至 54.1%，EOW-1.1-LA 在 10 分鐘時含水量已從 41.4% 上升至 61.2%，EOW-2.2-LA 在 10 分鐘時含水量已從 30.3% 上升至 40.6%，在實際應用上，可在時間作縮減，達到最佳之時間—含水量效益。

剪力試驗之初始扭力因不同壓密壓力而不同，開始試驗後在電滲時間初期，扭力值已大幅度下降，在 20 分鐘後 3 組試驗之扭力值大小與變化，差異逐漸縮小，在試驗時間到達 60 分鐘時，3 組試驗之扭力值皆接近儀器最小讀數 0.5 kg·cm，潤滑效果在試驗最後呈現之結果，改良效果顯著，且所需時間短即有大幅度之改良效果。

建議

電滲時間

電滲時間，因應現場施工需求，需有效且短時間內排除障礙，可依照現場需求增大電壓，藉此縮短電滲時間，來達到相同之效果，但需考量現地供電設備與電壓造成機具之影響。

電極棒材質

因電滲機制，在正極棒部份會發生腐蝕，經由試驗測試鋼棒之腐蝕程度在電滲 60 分鐘後腐蝕重量百分比在 0.04 ~ 0.08%，腐蝕狀況並不嚴重，但考量實際應用

時，使用電滲排除包泥障礙總時數，可能較長，因從發進井至到達井期間，可能遭遇多次包泥，以及施工中無法輕易更換刀頭、維修面盤，可使用較耐腐蝕活性小之金屬焊接在面盤上，當作正極端，避免刀頭腐蝕。

電壓大小

雖然於室內砂箱試驗時，由抗剪扭力變化得知在較低電壓下仍有增潤效應，但是考量現地地質多變以及較多不確定性，可以適當增加電壓來達到所需之增潤效果。

鑽掘機應用

- 目前隧道施工中因地質調查範圍有限，隧道開挖為水平開挖，但是地質調查為垂直取樣，再加上台灣地質複雜多變，造成在選用機械設備上與隧道開挖之困難，在未來可由開挖時之推進力、扭矩及掘削速率之異變，來提早發現異況以及預先作對應與處理。
- 因包泥之狀況不只發生在面盤與刀頭，也會發生在二次破碎區與送排泥管口，如在往後施工中二次破碎區與送排泥管口之包泥狀況也嚴重影響工程，亦可將電滲法應用在其區域，來解決土壤黏附與堵塞之問題。
- 在鑽掘機結合上，因鑽掘機構造複雜，且因開挖行為而使機頭旋轉，造成電滲設備之電源連接刀頭電極棒上之電線無法直接連接，可在面盤與推機機身之介面，加入電刷之結構，以解決電線經過旋轉面之問題。
- 在解決正極端腐蝕方面，可將正極設置在鑽掘機後方，因沒有與土壤接觸，在沒有介質下，可減少腐蝕發生，在了解鑽掘機構造下，進行設計電極端。

參考文獻

1. 尤士明，電滲化學改良應用於砂質土壤之研究，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程系，台北，2009。
2. 田福助、吳溪煌，電化學—理論與應用，高立出版集團，2011。
3. 陳立憲，「台灣下水道推進工程及卵礫石層施工探討」，地下管線免開挖施工技術研討會，台中，2010。
4. 廖銘洋，「海下複層潛盾隧道之施工風險」，海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，第八屆，2009，第 C11-1 ~ C11-12 頁。
5. 簡紹琦，電滲化學灌漿地盤改良之研究，博士論文，國立台灣科技大學營建工程系，台北，2003。
6. Mitchell, J. K., *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons Inc., New York. 3rd ed., 2005, pp. 291-305.
7. Hollmann, F. S. and Thewes, M., "Assessment Method for Clay Clogging and Disintegration of Fines in Mechanised Tunnelling," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 37, 2013, pp. 96-106.
8. Heuser, M. and Spagnoli, G., "Electro-osmotic Flow In Clays and Its Potential for Reducing Clogging In Mechanical Tunnel Driving," *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, Vol. 71, 2012, pp. 721-733.