

技術短文

電動能地工合成材料(EKG)之應用

Applications of Electro-kinetic Geosynthetics

謝啟萬 吳政翰*

一、前言

結合傳統地工合成材料及電動能原理之電動能地工合成材料(Electro-kinetic Geosynthetics, EKG)已研發應市，此種新興材料改變地工合成材料扮演之角色，由被動改變為主動提供應用功效，除可提供傳統地工合成材料、排水、脫水、強化之功效外，因結合電動原理可提供材料基體內生物性、化學性或物理性之電滲透(Electro-osmosis)或電泳(Electrophoresis)等物理現象達到排水、強化、養護材料等功能，已廣泛應用於土木與環境工程外，亦已為水處理事業、採礦、食品及運動產業所採用，由於近年來全球面臨能源短缺、氣候快速變遷、環境汙染、水源短缺等議題衝擊下，如何降低成本、減少汙染、水再生利用、節能均為現今主管機關所關心之方向，無形中提供電動能地工合成材料推廣應用與研發最好之時機。本文介紹電動能地工合成材料(EKG)發展背景、原理，研究概況、設計概念與應用案例，本國紡織研發能量根基深厚，EKG未來可應用於本國軟弱土壤固化與強化、淤泥與污泥脫水、坡面穩定等用途，值得深入研究与推廣，進而本國地工合成材料產業亦可因應市場需求，後續推動研發EKG相關產品。

大部分地工合成材料於應用時多扮演被動角色，例如加勁材需有適當應變，方得以驅動張應力以達到加勁功能，排水材提供排水路徑，但未能導引流體流動。地工合成材料另外一種新用途已經引起產業界注意，此項用途中地工合成材料扮演主動角色，可主動引起基體內生物性、化學性或物理性變化，而得以提供多元化功能，例如可利用電滲透(Electro-osmosis)或電泳(Electrophoresis)等電動能現象與傳統地工合成

材料之濾水、排水、加勁等功能結合所衍生出電動能地工合成材料(EKG, Electro-kinetic Geosynthetics)之新興材料。

電動能地工合成材料(EKG)因可與多項技術與材料合併使用，可應用於土壤、污泥、淤泥、堆肥，提供脫水、排水、強化、養護等複合功能，可應用於水處理、礦業、土木及環境工程、食品及運動等產業。表一摘要電動能及地工合成材料之功能及功效對照表(Jones等人，2008)，電動能地工合成材料(EKG)各項電動能功能之參數、影響性及實務應用性質則摘要於表一及表二(Jones等人，2008)。

由表一顯示電動能及地工合成材料14種不同功能，結合不同功能可衍生出不同特殊特性電動能地工合成材料(EKG)，並可依其材料、組合方式、物理與化學特性、電子設定與控制方式、邊界條件而選用特定EKG，提供非傳統地工合成材料不同之功能。

表一 電動能地工合成材料(EKG)實務性應用功能 (Jones 等人，2008)

項目	功能	影響項目
電動能 (EK)	電滲透	水流、孔隙水壓變化、體積變化
	電泳	粒子移動、粒子轉向
	離子遷移	溶解質移動
	水解	氧氣及氮氣揮發、pH值變化
	加熱	電熱及土壤耐熱性
	氧化反應	土壤膠結、降低土壤塑性
	降低反應	吸取電金屬離子、氮氣揮發
地工合成材料 (G)	排水	水流及氣體流動
	加勁	抗張強度、平面勁度
	濾水	防止固體物流入水流中
	分離	加強及防止兩物相混
	儲存	固體物儲存
	薄膜	阻隔水流
	吸收	吸收液體

* 屏東科技大學土木工程系

表二 電動能地工合成材料(EKG)重要功能中之主要參數、影響性及實用性(Jones 等人, 2008)

電動能功能	參數	影響性	實務應用性
電滲透	流率 $Q=K_e V/L A$	排水及含水量	使水於細土中流動
電解	水壓 $U=(K_e/K_h)V/L$ $\Delta pH=f(I/A)$ $\Delta [O_2]=f(I/A)$ $\Delta [H_2]=f(I/A)$	壓密 改變酸鹼度 製造氧氣及氧化還原反應	可壓密土壤密實 可控制pH值 增進根系生長及土壤微生物活性
電動能硬化 電熱	pH、CEC、電極作用 $f=I^2R$ 、SHC及物質導電性	加強土壤及廢棄物 產生熱能	穩定坡面及礦渣 增加化學及生物活性

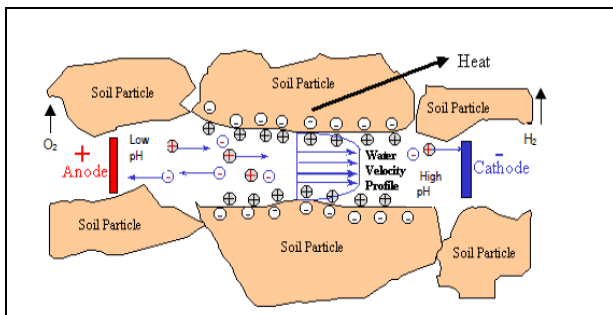
其中：

- K_e =電滲透透率(m^2/sv) K_h =透水性(m/s)
- σ =淤泥導電率 w =含水率
- V/L =潛能梯度(v/m) A =面積(m^2)
- I =電流量(A) T_s =淤泥導熱率
- $[O_2][H_2]$ =氣體濃度 CEC=陽離子交換能量
- f =函數

二、EKG研發背景與原理

為能提供有效能源及環境保護之需求，乃推動各組織建立環境保護法規；21世紀初部分國家立法不准許將流質廢棄物置入掩埋場，因此採用EKG可將汙泥或淤泥脫水後方得以將經處理過之廢棄物堆放於掩埋場中；採礦中產生之礦渣亦可採用EKG脫水減少運送及處理成本，降低氣候變化、減少礦渣液化之可能性。總而言之，許多案例已證實EKG有效降低廢棄物量、處理效能及增進軟弱土壤排水及固化等功效。

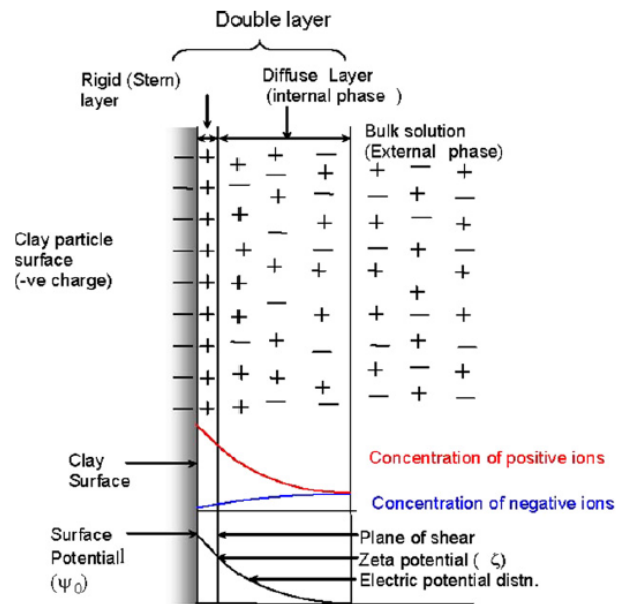
電動能為流動流體與電位能及帶電物質三者間之關係，其直接與施加之電壓有關，如圖一所示，施加直流電壓引起電滲透水由正極流向負極。



圖一 土壤中電滲透概念示意圖(Lamont-Black 等人, 2006)

2.1 電滲透流

當物質具備可接受電滲透之透水係數(K_e)，如材料間可保持有效電位差，電滲透則可發生，於許多材料如黏土、固體顆粒表面具備負電離子，土壤孔隙間水分因混合含正負電離子，其水分中之陽離子則會受材料表面負離子吸引，而於材料表面附著水分子形成一種邊界層(其內層為不動層Stern layer)及外部動層，此二層之界面之能量則被認定為Zeta能量(Zeta Potential)，如示圖二。



圖二 電雙層示意圖(Jones 等人, 2008)

Helmholz-Smoluchowski 理論 (1914) 為最廣泛引用描述電滲透現象之學況，該理論說明材料表面Stern layer具備負電電位梯度，可吸引水分子正極面，帶動材料間空隙水之流動，其流動之快慢由電能與水流阻抗二者之互制達到平衡(Shang, 1997)。一般邊界層水流為基本電滲透流，其發生於材料具備適當 K_e 時，電滲透流 Q_e 可依下式分析，

$$Q_e = K_e V/L.A \dots \dots \dots (1)$$

式中： $K_e = \frac{n \epsilon_w \zeta}{\mu}$ ，

n =孔隙率，

ϵ_w = 透水率，

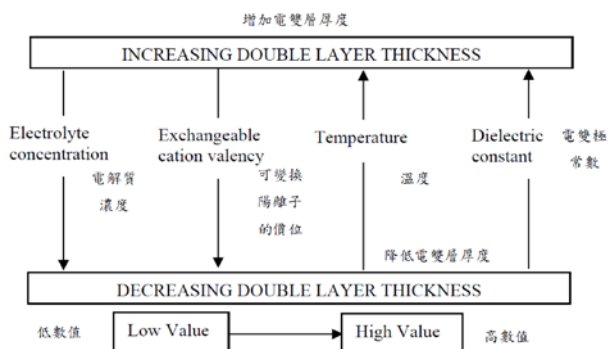
ζ = Zeta能量(V)，

μ = 黏滯係數(Ns/m^2)。

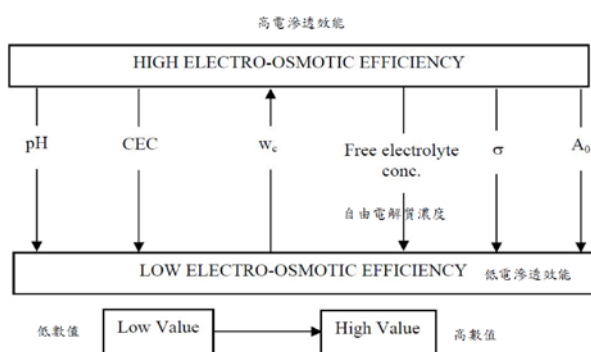
2.2 電滲透效能

電滲透效能定義為單位電滲透之水流量，其與 K_e 成正比，而與導電率成反比。礦物具備良好電滲透性成正比之因素包括高含水率(w_e)、黏土礦物含低陽離子交換容量(CEC)、低交換價陽離子、高表面電價密度及高表面積率、低導電率組合水(σ)、低鹽度、高pH值及單位孔隙體積、低表面積電價濃度(A_0)；影響電滲透效能之因素之相關性如示圖三及圖四。

如黏土礦物資訊不足時，可由粒徑分布曲線估算黏土含量，另不可因土壤未含黏土而認為不會具備電滲透流，文獻曾記錄石英粉末、岩石粉末、明礬淤泥、含腐植質污泥均可產生電滲透流。中國學者研究(Zhuang及Wang, 2007)顯示電滲透處理消耗能量與電極導電率(如與土壤相較比較低)有關，而與電阻與土壤/界面電導度成反比。



圖三 影響電雙層厚度因素(Pugh, 2002)



圖四 影響電滲透效能之土壤參數(Jones 等人, 2008)

2.3 EKG應用費用

費用可為採用電動能技術重要因素，此費用估算可能考量多項處理策略、外部需求費用，如運費、棄置費用等。McLoughlin (2005)及Huntley等人(2006)曾發表使用EKG技術處理污泥及礦渣之費用分析。

三、EKG材料發展

電動能地工合成材料結合地工合成材料排水、濾水及加勁等功能及電動能相關之電滲透、電熱及離子遷移等功能之複合材料，因應廣大應用範圍與功能之需求，因而衍生出許多不同之設計如示表三。部分功能與降低碳足跡與能源耗損及環境改善相關。為符合其應用之需求，其機電設計之需求包括如下各點：

1. 維持使用期間高電壓而不降壓，僅可能保持電流分布於EKG材料全部長度。
2. 儘可能增加導電表面與處理材料(如土壤或淤泥)之接觸面積。
3. EKG之導電材料最佳化而不降低電壓或接觸面積。

如需求可將正反電極互換。

表三 電動能地工合成材料具體功能對應表(Jones 等人, 2008)

電動能功能	地工合成材料功能				
	排水	加勁	濾水	分離	阻隔
電滲透	ePVD eMat eStrip Rekg ePD eFDC eBFP ePEP eFCB	REKG eSN eMat	ePVD Rekg ePD eBFP ePEP eFCB	eMat	eFCB
電泳	eBFP		ePVD		
離子遷移	ePVD	eSN	ePVD eBFP ePEP		
水電解作用	eMat eStrip			eMat	
加熱	eMat eStrip		eMat	eMat	
氧化反應	ePVD	eSN			
降低反應	eBFP		eBFP		eFCB

其中：ePVD=電動能垂直排水帶，
eMat=電動能蓆，
eStrip=電動能條帶，
ePD=電動能排水帶(水平向)，
REKG=加勁電動能合成材料，
eBFP=電動能濾水壓條帶，
ePEP=電動能濾水壓條板，
eFCB=電動能濾水袋，
eSN=電動能土釘。

依據設計電動能地工合成材料(EKG)須包括可導電材料、可濾水材料、可排水或排氣材料，其中部分導電材料需為耐腐蝕材質，但有些用途亦需導電材料為可腐蝕，常用可腐蝕材料以鋼與鋁材為主，其中鋁材因較輕且耗損率較高，使用較多，地工合成料則依需求可採不織布、織布或針織布，為提供良好排水及排氣功能，2D及3D塑膠射出成型之結構物亦常見使用，圖五所示為市面上販售之電動能地工合成材料(EKG)。



平板型電動能地工合成材料(Jones等人, 2008)



電動能地工濾水條帶及排水袋(Jones等人, 2008)

圖五 商用電動能

四、電動能地工合成材料之應用

目前從事電動能地工合成材料(EKG)研究與研發之國家包括美國、加拿大、英國、德國、瑞典、芬蘭、澳洲、中國、南非、泰國、新加坡、斯里蘭卡等國，其應用之產業除土木與環境工程外，亦包括水處理、採礦、園藝、食品及運動休閒產業，其應用功能包括脫水、組合、壓密、土堤穩定、土壤穩定、固化、環境保護、運動場維護等，於下介紹數個於土木與水利工程、環境工程與運動產業電動能地工合成材料應用研發相關之報導。

4.1 電滲透應用於材料固化與強化

近年來使用EKG固化具困難性土壤(材料)以解決施工問題、加速工程進度或提供較經濟基礎工程之替代方案。自從1949年至今已有多數文獻報導電動能增進土壤強度之案例(Casagrande, 1949等)，另有學者於施作過程中加入膠結及生物改良劑增進其效果(Mohomadelhassan 及 Shang, 2003, Shang等人, 2004)，由於使用金屬棒之耐用性及失去效能等因素，英國學者Jones等人(1996)乃將具導電功能地工合成材料概念用於改善電極之效能，已有數位學者執行EKG應用於強化土壤強度有效性之室內研究，由Mohomadelhassan 及 Shang(2003)研究結果顯示，ePVD外部地工合成材料中之礦纖維導電材料陽極電位損失情形較鋼質及鋁質導電材料明顯，電極材料陰極電位損失影響有限。

4.2 EKG固化海積黏土

新加坡學者(Chew等人, 2004)應用EKG及電滲透原理，固化及加強8公尺厚軟弱之海積黏土，經由13天EKG固化工法，可達到130日傳統固化工法之功效，此項現場研究又顯示EKG可降低此海積黏土之壓縮指數 C_v 及次壓密度及增進其 C_v ，並顯著強化其工程特性。

Lee等人(2007)分析以ePVD改良軟弱黏土之案例，並配合加載以加速改良效果，ePVD設置之間距約為1.5公尺，案例1經改良14天後土壤剪力強度增加100%，案例2土壤改良72天其強度增加200%，綜合此二案例結果相較分析，如果採用ePVD與PVD改良工法可使工期由3~4個月降低至1個月。

Chew等人(2004)研究顯示電動能垂直排水帶(ePVD)可應用於替代傳統垂直排水帶(PVD)於軟弱黏土排水，其排水速率約提升10倍，現地之應用案例ePVD採棋盤式佈設打設間距為1.2公尺，除ePVD外另以白鐵為金屬導電棒，耗電量約為14~28 kWhr/m³。

4.3 礦渣及廢棄物脫水

礦業中生產之礦渣常以人造之礦渣土壩圍堵堆置方式處理，此土壩及其所圍堵之礦渣乃為人造大型結構物之一，其穩定性及處理方式常為

主管機構所困擾，此種問題亦可發生於工業廢棄物與水處理事業單位處理之廢棄物，目前此類含高水量廢棄物多採用電動能濾水壓板(ePEP)處理量大且均勻穩定之礦渣及淤泥，而非經常性及非均勻性之廢棄物則以電動能濾水(eFCB)袋處理(Lawson, 2006)，現地淤泥湖則可用ePVD脫水固化。

圖六所示為借助傳統排水壓條帶及電滲透EKG共同處理過程以使淤泥體積減少39%，其固體含量達31%之案例(Thames Water Company, London)，由文獻資料顯示採用EKG固化淤泥可降低其成本約39%(McLoughkin, 2005)。



(a)經由傳統處理過程固體含量19%



(b)EKG處理過程降低體積39%，固體含量31%

圖六 EKG 處理淤泥脫水案例(Jones 等人, 2008)

Jones等人(2006)採用電動能排水帶(ePVD)應用於污泥池污泥固化之用，並採用棋盤式及六角型式佈設ePVD，其間距為0.9m，研究結果顯示六角形佈設方式較佳，可降低污泥體積達30%，並可降低污泥COD及BOD含量，正極及負極附近之土壤pH值分別趨近酸性及鹼性之趨

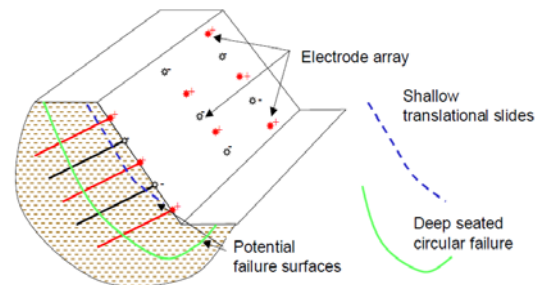
勢，當污泥固體比率增加後，其剪力強度增加，由案例分析其處理能量約為43 kWhr /m³，處理費用約£2.36/m³，折合每立方公尺處理費用約新台幣100元。

Lamont-Black等人(2006)研究採用電動能壓帶(ED Belt Press)技術加速污泥固化，採用之直流電壓介於15~30伏特，可增加處理泥餅厚度5~9mm，仍可顯著降低污泥含水量10%，由案例分析其處理所需能量約為19.5 kWhr/ton。

Leong等人(2006)研究顯示電動能排水帶(ePVD)亦可用加速焚化爐飛灰(IFA)脫水，經由ePVD處理可提升IFA剪力強度3~15 kpa，及降低其含水量20~35%，亦可降低重金屬濃度。

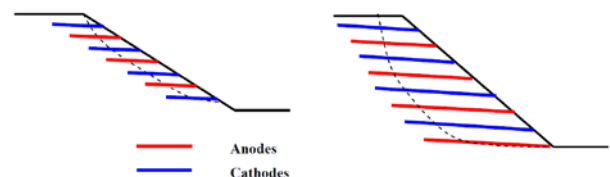
4.4 EKG穩定坡面及開挖面

降低孔隙水壓及增加土壤剪力強度為處理坡面穩定最有效之方法，採用電動能原理之EKG可快速施作於坡面上，與補強工法相較其施作速度亦較快，圖七所示為電滲透工法強化土坡之示意圖，此工法可降低空隙水壓、增進土壤有效強度，而達到降低坡面滑動之可能性，為一快速且可持久之修補工法(Jones等人, 2008)。



圖七 電滲透原理強化坡面穩定性示意圖(Jones 等人, 2008)

土釘結合EKG可應用改進土坡淺層與深層之穩定性，依據淺層與深層穩定之需求陰陽極土釘配置情形不太一致如示圖八，淺層穩定工法陽極需配置於坡址，反之防止深層滑動之案例可將陰極配置於最底層(Jones等人, 2008)。



圖八 電滲透 EKG 土釘淺層(左圖)與深層穩定工法陰陽極配置示意圖(Jones 等人, 2008)



圖九 未經 EKG 處理脫水礦渣中土釘於拉出時其周圍土壤發生液化現象(Jones 等人，2008)



(a)



(b)

圖十 經 EKG 處理脫水礦渣於土釘拉出時未發生液化現象(Jones 等人，2008)

結合電動能原理(EK)之土釘(eSN)亦為防止脫水礦渣或礦渣堆砌土堤之液化，圖九及圖十則顯示EKG土釘(eSN)改善礦渣液化之示意圖。

4.6 EKG應用於運動草皮

運動場草皮之排水、排氣、養分供給為其保持功能之重要項目，然傳統維護之方法常無法滿足長期與永續功能之情形，EKG可應用於運動草皮，增進其可靠度、功效性及永續性，表四摘要EKG之處理方式及對運動草皮之好處。圖十一顯示EKG配置方式，此項配置可提供根系較好氧氣供給，提高孔隙水壓之變化，以改進草皮表面耐摩擦強度及球反彈性，經由更換陰陽極配置可排除或增加草皮表面區之含水量，由應用案例分析每100m²之耗用能量約為0.45 kW。(Jones等人，2008)

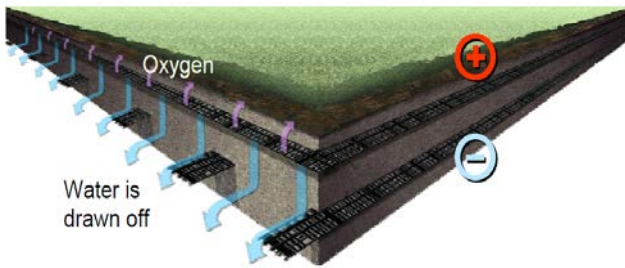
4.6 鹽份對電滲透影響

中國清華大學學者研究(Jones等人，2008)電滲透應用於含鹽份高領土脫水特性，研究結果顯示，高鹽份含量對含水高領土明顯可增加電流

及提高電效能，水中含鹽份可增進脫水效益，但當鹽份含量增加超過0.01%並無效益，過高鹽份試樣並無助電滲透功效。

表四 運動草皮常見問題及 EKG 處理機制與功效 (Jones 等人，2008)

問題	電動能處理過程	運動草皮表面功效
排水不良	電滲透陰極控制排水及含水量。	不會阻塞、土壤流失或失去功能；許可較高黏土含量，因而降低施肥及灌溉需求。
低氧氣含量	陽極產生氧氣，可降低水份。	根系可充滿氧氣，增加草皮健康性及摩擦性、均勻水分，增進草皮通氣性；增進草皮永續性。
過度壓實	交替陰陽極可提供孔隙水或降低水份。	水分均勻，避免大孔隙產生。
低營養份	可使用較高比例細顆粒土壤	可保存較多養份，增進草皮健康性，降低施肥與維護工作。
外界入侵	健康草皮提升抗外界入侵性	降低使用抗生素，降低維護成本。
低光源	健康草皮以應付低光源條件	草皮較健壯。



圖十一 EKG 草皮配置圖(Jones 等人，2008)

五、結論

傳統地工合成材料結合電動能原理之電動能地工合成材料(EKG)材料除可提供傳統應用功能外亦可提供主動式之應用功能，加速土壤脫水、壓密、排水、排氣、強化等功效，可應用於土木及環境工程外，亦可應用於食品業、水處理事業、礦業及運動產業。由於法規、氣候變遷、能源短缺、水再利用、資源回收利用等全球性議題共同作用下無形中增進EKG使用之良好時機，亦提供EKG研發與推廣應用良好之條件。

綜合應用案例採用ePVD應用於固化或脫水功能，其佈設間距約為0.9~1.5m，其使用直流電壓大致為15~30伏特，其所需能量約14~43 kWh/m³，處理經費每立方公尺約新台幣100元。

參考文獻

- Casagrande, L. (1949). "Electro osmosis in soils." *Geotechnique*, 1(3), p.159-177.
- Casagrande, L. (1983). "Stabilization of soils by electro osmosis: State of the art." *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 69, p.255-302.
- Chew, S.H., Karunaratne, G. P., Kuma, V.M., Lim, L.H., Toh, M.L., and Hee, A.M. (2004). "A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains." *Geotextiles and Geomembranes*, 22, p.17-35.
- Glendinning, S., Jones, C.J.F.P., Huntley, D.T., and Lamont-Black, J. (2006). "Dewatering of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics." 8th Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds), p.527-530, Millpress, Rotterdam.
- Hamir, R. B., Jones, C.J.F.P., and Clarke, B.G. (2001). "Electrically conductive geosynthetics for consolidation and reinforced soil." *Geotextiles and Geomembranes*, 19, p.455-482.
- Huntley, D., Lamont-Black, J., Glendinning, S., and Jones, C.J.F.P. (2006). "Economic models for the use of electrokinetic geosynthetics." 8th Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki(eds), p.543-546, Millpress, Rotterdam.
- Jones, C.J.F.P., Fakher, A., Hamir, R., and Nettleton I. M. (1996). "Geosynthetic materials with improved reinforcement capabilities." *Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka Kyushu, Japan 2*, 865-883.
- Jones, C.J.F.P., Glendinning, S., Huntley, D., and Lamont-Black, J. (2006). "Case history: In-situ dewatering of lagooned sewage sludge using Electrokinetic geosynthetics (EKG)." 8th Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki(eds), p.539-542, Millpress, Rotterdam.
- Jones, C.J.F.P., Lamont-Black, J., Glendinning, S., Bergado, D., Eng, T., Fourie, A., Hu, L., Pugh, C., Romantshuk, M., Simpanen, S., and Zhuang, Y-f (2008). "Recent research and applications in the use of electro-kinetic geosynthetics." *EuroGeo4 Keynote Paper*, 1-30.
- Jones, C.J.F.P., Lamont-Black, J., and Glendinning S. (2010). "Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications." *Geotextiles and Geomembranes*, 29, p.381-390.
- Lamont-Black, J., Huntley, D., Glendinning, S., and Jones, C.J.F.P. (2006). "The use of Electrokinetic geosynthetics (EKG) in enhanced performance of sports turf." 8th Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds), p.453-456, Millpress, Rotterdam.
- Lamont-Black, J., Huntley, D. T., Glendinning, S., and Jones, C. J. F. P. (2006). "Case history: the use of electrokinetic geosynthetics (EKG) in belt press dewatering." 8th Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds), p.535-538, Millpress, Rotterdam.
- Lawson, C. R. (2006). "Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering." *Geosynthetics*, J. Kuwano & J. Koseki (eds), 9-48, Millpress, Rotterdam.
- Lee, E.C., Neoh, C.A., and Douglas, R.S. (2007). "Performance of electrically conductive vertical (wick) drains in treatment of soft clay." *Geosynthetics 2007 Conference*, p.217-224.
- Leong, T.P., Chew, S.H., Karunaratne, G. P., and Teo, T.H. (2006). "New generation of Electrically Conductive Vertical Drains for treatment of Singapore waste materials." 8th Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds), 457-460, Millpress, Rotterdam.
- McLoughlin, P.W. (2005). "Belt filter press-face or fiction?" 10th European Biosolids and Biowaste Conference, Wakefield UK, paper 45, Aqua Enviro.

- Mohamedelhassan, E., and Shang, J.Q.(2003). " Electrokinetic generated pore fluid and ionic transport in an offshore calcareous soil." *Canadian Geotechnical Journal*, 40, p1185-1199.
- Pugh, R. C. (2002). " The application of electrokinetic geosynthetic materials to uses in the construction industry. " PhD Thesis, Newcastle University, p.277.
- Shang, J. Q., Mohamedelhassan, E., and Ismail M. (2004). " Electro chemical cementation of offshore calcareous soil. " *Canadian Geotechnical Journal*, 41, p.877-893.
- Shang, J. Q. (1997). "Electrokinetic dewatering of clay slurries as engineered soil covers." *Canadian Geotechnical Journal*, **34** (1), p117-133.
- Su, J.Q., Wang, Z., Ge, R.H., and Wang, H.Y. (2004). "A test about the application of electrokinetic geosynthetics on consolidation drains." *GeoAsia 2004 Conference* , p.762-770.
- Zhuang, Y-f, Wang, Z., and Chen, L. (2006). " Model test study on soft clay slope reinforced with electro-kinetic geosynthetics." *8th Int. Con. on Geosynthetics*, J. Kuwano & J. Koseki (eds), p.531-534, Millpress, Rotterdam.
- Zhuang, Y-f, and Wang, Z. (2007). " Interface electric resistance of electro osmotic consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. " ASCE, 133, (12), p.1617-1621.