

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

TDR 在液化潛能分析上之應用

Use of TDR in Accessing the Liquefaction Potential

計畫編號：NSC 90-2611-E-009-004

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：林志平 國立交通大學土木工程系

計畫參與人員：湯士弘 國立交通大學土木工程系

一、中文摘要

土壤之現地孔隙率與其液化潛能有密切的關係，而液化後之穩定分析之主要工作為決定現地土壤不排水極限剪力強度，而不排水極限剪力強度完全取決於土壤種類與現地孔隙率，與土壤之結構及受力前現地有效應力無關。由於砂土取樣不易，目前欠缺可靠的現地試驗方法量測現地土壤孔隙率。此外，砂土中之細粒料包括粉土與不同礦物成分之粘土，因此細粒料之定義不明確，且細粒料與土壤結構對液化潛能之影響也未能於現場試驗中有效決定。本計畫之目標專注於利用時域反射法開發一能夠結合 CPT 之現地試驗方法，用以量測土壤之現地孔隙率，並同時量測土壤之電學性質研判土壤結構特性與細料含量的影響，為液化潛能分析與液化產生後之沈陷與穩定分析提供較完整之資料。

本計畫為整合型研究計畫『集集地震土壤液化總評估研究』其中之一子計畫，上年度已完成(1)電學性質量測系統之建立、(2)時域反射圓錐貫入器之設計、與(3)量測效能與空間靈敏度之研究。本年度預計完成之工作項目包括(1)TDR Cone 量測電學性質之方法、(2)電學性質與土壤性質之關連性、與(3)模擬現地貫入試驗。本報告簡述本計畫之執行成果。

關鍵詞：土壤液化、時域反射法、導電度、介電度

Abstract

Void ratio and effective confinement of a soil in situ closely relate to its liquefaction potential; while the post-liquefaction stability

analysis depends mainly on the undrained steady-state strength that is a function only of the void ratio in situ. Because of the difficulty and cost of obtaining undisturbed samples in a sand deposit, currently there is no economical and reliable field technique for accurate evaluation of the void ratio. Furthermore, fine materials in sand include silt and clay of different mineralogy. The definition of fine content in sand is not well defined. In addition, the effect of fine materials and soil structure on liquefaction potential cannot be determined effectively in field tests. The main objectives of this project are to use Time Domain Reflectometry to develop an in situ testing method combined with CPT to measure in situ void ratio and estimate fine content and soil structure. This new testing technique will provide more complete data for liquefaction potential analysis and post-liquefaction settlement and stability analysis.

This project is a sub-project of a multi-year collaborated research on "Evaluation of Soil Liquefaction during Chi Chi Earthquake". The work accomplished last year includes (1) development of a TDR system to measure electrical properties of soils; (2) development of a TDR cone device; and (3) study of the measurement efficiency and spatial sensitivity. The work planned for this year includes (1) measurement of electrical properties using TDR cone; (2) relationship between soil physical properties and electrical properties; (3) laboratory simulation of cone penetration. This report briefly describes the study result of this year.

Keywords: Soil Liquefaction, Time Domain Reflectometry, Electrical Conductivity,

二、計畫緣由與目的

台灣西部海岸地區之地質多屬細砂與沈泥質細砂組成之沖積土層，在強烈地震作用下，沖積土層地下水位較淺時，極易發生液化而造成災害。集集地震期間中西部地區有明顯液化之跡象，並導致附近結構物之破壞，使得土壤液化再度引起重視。地震引起之土壤液化在工程上兩個重要的問題包括液化之誘發條件與液化產生後之沈陷與穩定問題。

土壤液化之誘發條件常由地震引起之剪應力與土壤之液化剪力強度 (cyclic softening strength) 之比值來決定，土壤之液化剪力強度與土壤之相對密度、土壤之組構、細料含量有關。而決定砂土液化剪力強度最可靠的方法是鑽取非擾動土樣進行動力三軸試驗，但砂土之非擾動土樣之取樣不易且非常昂貴。目前常用於決定土壤液化剪力強度的方法係利用現地試驗包括標準貫入試驗 (SPT) 與圓錐貫入試驗 (CPT) 之結果所發展出來的經驗公式或曲線。而 CPT 相較於 SPT 具有許多的優點，包括較經濟、試驗步驟簡單且標準化、高解析度可偵測土壤隨深度之連續變化及薄層液化潛能區存在之可能。土壤液化後是否會發生流動性破壞 (Flow Failure) 與土壤的相對密度有關。土壤液化發生後所產生之沈陷量則取決於土壤之相對密度與最大剪力應變，最大剪力應變可由分析土壤液化誘發之安全係數估計，而相對密度之估計則常利用 SPT 與 CPT 之經驗公式。液化後之穩定分析之主要工作為決定現地土壤不排水極限剪力強度 (Undrained Steady-state Strength)，而不排水極限剪力強度完全取決於土壤種類與現地孔隙率，與土壤之結構及受力前現地有效應力無關。由於砂土取樣不易，目前欠缺可靠的現地試驗方法量測現地土壤孔隙率。

目前利用 SPT 與 CPT 評估土壤液化之經驗方法可能有一個主要的問題：SPT N 值 (或 CPT qc 值) 與砂土組構及細料含量之間的關係仍是未知。在發展 SPT N 值 (或 CPT qc 值) 與液化剪力強度之間的經驗關

係時並沒有考慮土壤因沈積過程之不同組構及砂土中細料含量的影響。而 SPT (或 CPT) 同時被用來單獨估計相對密度及液化剪力強度，而液化剪力強度是相對密度、砂土組構、細粒含量的函數。因此目前的評估方法不夠周全且欠缺一致性。此外，砂土中之細粒料包括粉土與不同礦物成分之粘土，因此細粒料之定義不明確，且細粒料與土壤結構對液化潛能之影響也未能於現場試驗中有效決定。本子計畫之目的在於利用時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 開發一能夠結合 CPT 之現地試驗方法，用以量測土壤之現地孔隙率，並同時量測土壤之電學性質估計土壤組構特性與細粒料含量的影響，為液化潛能分析與液化產生後之沈陷與穩定分析提供較完整之資料。本年度預計完成之工作項目包括 (1) TDR Cone 量測電學性質之方法、(2) 電學性質與土壤性質之關連性、與 (3) 模擬現地貫入試驗。

三、結果與討論

TDR Cone 量測電學性質之方法

本研究上年度已購置時域反射儀，並完成 TDR 圓錐貫入感測器之設計，研究不同設計方式之量測效能與空間影響範圍。本年度依據上年度之研究成果製作 TDR 圓錐貫入感測器之原型，並改良其接頭方式，使得到較佳之波形。TDR 圓錐貫入感測器與傳統圓錐貫入裝置結合，成為傳統圓錐貫入裝置其中之桿件，如圖一所示，配合傳統圓錐貫入裝置試驗程序與設備即可實施本發明，貫入材料後利用感測器之開放電場 (如圖二所示)，量測該電場範圍內材料而得一時間域之波形，典型量測波形如圖三所示；

使用 TDR 圓錐貫入感測器量測材料，可得一時間域之波形，經由走時分析 (travel time analysis) 可以求得一整體有效介電度 (equivalent effective dielectric constant)：

$$K_{a,eff} = \left(\frac{2L}{ct} \right)^2 \quad (1)$$

其中 L 為時域反射儀圓錐貫入裝置之導體長度， c (2.998×10^8 m/sec) 為光速， t (sec) 為電磁波進入材料位置處至裝置導體終端反射所需時間。由於時域反射儀圓錐貫入裝置的電場並非封閉式，材料之一定範圍以及裝置本身是覆蓋於該開放式電場中，因此量測得的整體有效介電度包含材料之介電度以及裝置本身之介電度；材料與裝置本身介電度在整體有效介電度內所佔權重可表示為為：

$$(K_{a,eff})^n = a(K_{a,material})^n + b(K_{a,probe})^n \quad (2)$$

因為裝置的介電度為一定，因此可將式(2)最右項合併成一項：

$$(K_{a,eff})^n = a(K_{a,material})^n + b' \quad (3)$$

式(3)中的 a 、 b' 、 n 稱為時域反射儀圓錐貫入裝置的標定係數；利用目前實驗室中量測介電度極可靠之一對多軸量測探頭 (Multi-Rod Probe, MRP) 量測材料介電度，並作為該材料介電度真值；再以時域反射儀圓錐貫入裝置量得同材料之整體有效介電度，據此分別量測空氣、乙醇、丁醇、水等四種液體，進行線性回歸，可標定得式(3)中的 a 、 b' 、 n ；因此整理式(3)得：

$$(K_{a,material})^n = \frac{(K_{a,eff})^n - b'}{a} \quad (4)$$

最後合併式(1)與式(4)可得：

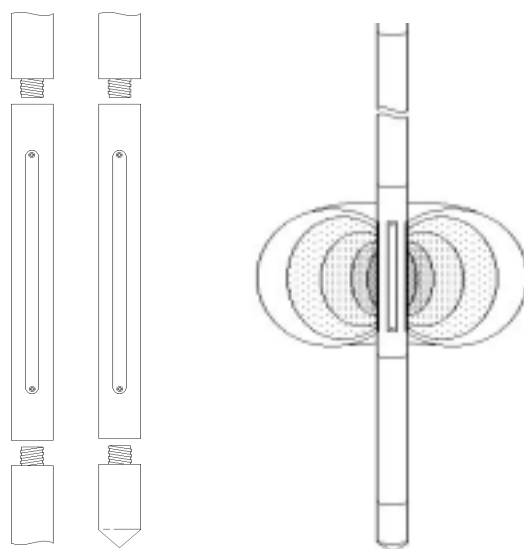
$$K_{a,material} = f(a, b', L, t) = \left(\frac{\left(\frac{2L}{ct} \right)^{2n} - b'}{a} \right)^{1/n} \quad (5)$$

利用標定得到的參數與式(5)，即可將量測一材料得到的整體有效介電度轉換成該材料真正的介電度值。

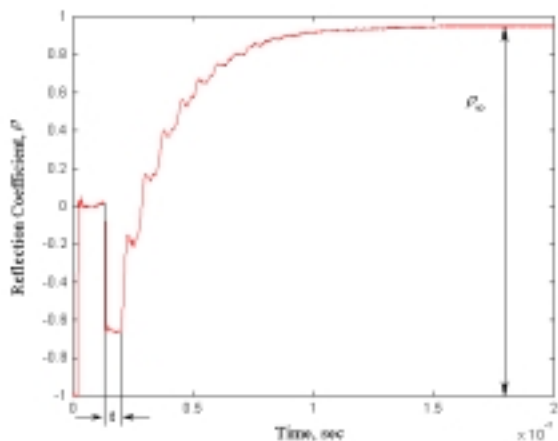
使用本發明量測材料亦可量得該材料之導電度 σ_{dc} ；如第三圖所示，導電度為時域反射波形最終穩態值之倒數的函數，可表示為：

$$\sigma_{dc} = f\left(\frac{1}{\rho_{\infty}}\right) = \alpha + \frac{\beta}{\rho_{\infty}} \quad (6)$$

利用時域反射儀圓錐貫入裝置量測不同導電度液體材料，獲得該波形之最終穩態值，再利用傳統導電度計量得同一材料導電度真值，標定該 α 、 β ，如此可利用時域反射圓錐貫入裝置所量測波形之最終穩態值計算所量測材料之導電度。此外，除了利用分析走時曲線量測視介電度外，目前正研究利用頻譜分析量測介電頻譜，但其系統標定較為複雜，且由於圓柱體之影響，整體介電頻譜與材料之介電頻譜必須尋求方法加以分離。



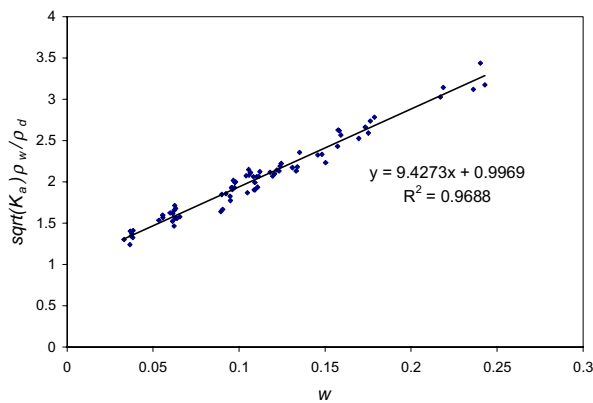
圖一 (a)連結傳統 CPT 圓錐貫入裝置桿件或錐尖之側視圖；(b)貫入後量測電場範圍之側視圖。



圖三 典型包含量測材料相關電學性質之反射波形

電學性質與土壤性質之關連性

介電頻譜受到土壤種類、含水量、及土壤密度等之影響。在高頻時之介電性質為土壤之體積含水量所控制，與土壤種類無關，使得視介電常數成為量測土壤含水量的有效方法[2]。如圖二所示，視介電度經由土壤乾密度之正規化後與土壤含水量成線性關係。若土壤為飽和狀態，則可直接由視介電度求得孔隙比。導電度與含水量之關連性類似介電度，但因不同的土壤此關係不同。傳統感測器所得之結果顯示，導電度與低頻之介電度包含土壤種類、及微觀結構之訊息，但其量化分析仍須進一步之研究，若能配合 TDR 圓錐貫入感測器量測介電頻譜，對於土壤物理種類及微觀結構之研究將有很大的助益。

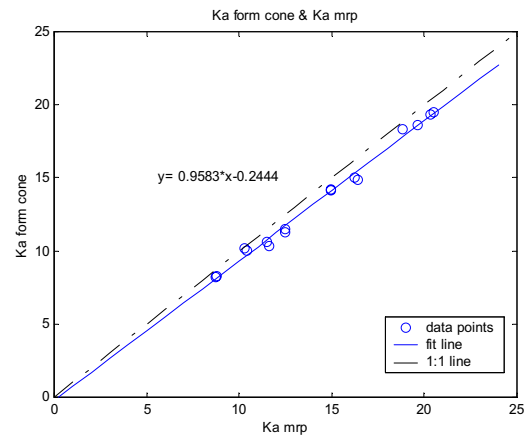


圖四 視介電度與土壤含水量之關係

模擬現地貫入試驗

現有與圓錐貫入試驗結合之試驗裝置皆有感測影響範圍與土壤擾動之疑慮，但很少於量測方法中明述。為測試 TDR 圓錐貫入感測器並研究圓錐貫入所產生之土壤擾動對其量測之影響，於試驗室進行模擬現地之貫入試驗並利用 MRP 探測器輔助表土之非擾動量測。圖五比較 TDR 圓錐貫入感測器與 MRP 所量測到之介電度，結果顯示若土壤因擾動而產生剪漲，TDR 圓錐貫入感測器所量測到之介電度會因密度減少而降低，反之，若土壤因擾動而減縮，則介電度則因密度增加而增加。試驗結果顯示，貫入擾動對介電度之影響並不大，但對導電度之影響較顯著。由於土壤之剪

漲與減縮受到孔隙比與現地應力之影響，因此不容易預估擾動可能造成之影響。後續研究應規範擾動所造成之誤差或針對擾動問題改良感測器之感測範圍。



圖五 圓錐貫入對介電度量測之影響

四、計畫成果自評

本研究上已達成預期目標，研發過程中亦發掘新的問題，這些問題對於後續之研發亦極具意義。本研究之成果對於地質調查及土壤污染調查具有高度的應用價值，在電學性質之研究已完成 1 篇學術論文被國際期刊接受[2]，TDR 圓錐貫入感測器正申請專利中[3]，其研究成果也將於近期投稿至國際期刊。

五、參考文獻

- [1] Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes," *Geotechnique*, Vol. 43, No. 3, pp. 351-415.
- [2] Lin, C-P, Drnevich, V.P., Feng, W., and Deschamps, R.J. (2000), "TDR for Compaction Quality Control," *Geotechnical Special Publication No.108*.p. 15-34.
- [3] Lin, C-P (2002), "Frequency Domain versus Traveltime analyses of TDR Waveforms for Soil Moisture Measurements," *Soil Sci. Soc. Am. J.* in press.
- [4] 林志平、周家榮、湯士弘 (民國 91 年)，"時域反射圓錐貫入裝置，專利申請。

