



# TDR 在液化潛能分析上之應用

## Use of TDR in Accessing the Liquefaction Potential

計畫編號：89-2218-E-009-100

執行期限：89 年 08 月至 90 年 07 月

主持人：林志平 國立交通大學土木工程系 助理教授

一、中文摘要（關鍵詞：土壤液化、時域反射法、導電度、介電度）

傳統常用於評估土壤是否有液化潛能之現地試驗包括標準貫入試驗（SPT）與圓錐貫入試驗（CPT），SPT（或 CPT）同時被用來獨立估計相對密度、及液化剪力強度，而液化剪力強度是相對密度、砂土組構、細料含量的函數。因此目前的評估方法不夠周全且欠缺一致性。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。本子計畫為整合型研究計畫『集集地震土壤液化總評估研究』其中子計畫之一，本子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組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。本年度預計完成之工作項目包括（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。本報告簡述本計畫之執行成果。

英文摘要（keywords：Soil Liquefaction, Time Domain Reflectometry, Electrical Conductivity, Dielectric Permittivity）

The in situ testing techniques that are commonly used to evaluate the potential of liquefaction for a construction site are standard penetration test

(SPT) and cone penetration test (CPT). The results of SPT (or CPT) are used to correlate with relative density alone as well as the cyclic strength of sand deposit, which is a combined effect of relative density, soil structure, and fine content. Therefore, current SPT (or CPT) method does not take into account the effect of soil structure and fine content and lack of consistency. 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. The main objectives set for this 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. This report briefly describes the status of the research.

## 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。國內外在這些方面之研究頗多，亦有顯著之具體成效 (Ishihara 1993)。

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、土壤之結構、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  $q_c$  值) 與砂土結構及細料含量之間的關係仍是未知。在發展 SPT  $N$  值 (或 CPT  $q_c$  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結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、砂土結構、細料含量的函數。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結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。結合其他計畫之研究結果改進或提出新的，適用於台灣地區砂土液化潛能分析之程序與方法。本計畫在第一年內擬從事之主要研究項目包括：

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。
3. 量測效能與空間靈敏度之研究。

## 三、計畫執行狀況

### 電學性質量測系統之建立。

目前已購置一時域反射儀，時域反射儀 (Time Domain Reflectometer, 亦簡稱為 TDR) 由電磁脈衝製波器、通訊電纜、及視波器組合而成，由製波器發射一電磁脈衝經由同軸電纜進入感測器，並由視波器紀錄由於電纜阻抗不連續所造成之反射，藉此反射訊號，可量測材料之電學性質。圖一顯示時域反射儀接一同軸感測器，此同軸感測器可用以量測及研究土壤具有不同細粒含量之電學性質，由此量測系統所量測到之 TDR 波形可經由頻譜分析計算感測器內部材料之導電度 (conductivity) 及介電頻譜 (dielectric spectrum, 介電度隨頻率之變化) (Lin, 2001)。材料之電導度可利用 Giese and Tiemann (1975) 之電磁波理論由波形之穩態反應直接求得，介電頻譜可經由量測訊號之系統分析求得，將反射訊號之富立葉轉換除以脈衝產生器之入射訊號可得 TDR 量測系統之系統函數 (System function,  $S$ ) 之量測值，此量測值必須等於量測系統之理論系統函數，理論系統函數為纜線阻抗、纜線傳遞常數、纜線長度、與邊界條件之函數。經由解在不同頻率下之系統非線性函數可以得到不同頻率之介電度，如此可以得到介質之介電頻譜。圖二顯示實際量測土

壤之實部介電頻譜，虛線表示不同密度之粉質細砂（含水量  $w=6.7\%$ ），實線為不同密度之低塑性粘土（含水量  $w=10.3\%$ ）。在 100 MHz 與 1GHz 之間，砂土之介電頻譜接近常數，粘土之介電頻譜則展現明顯之頻散現象。顯然，TDR 訊號及其相對應之介電頻譜除了含水量之外更隱藏了土壤種類及土壤結構之訊息，電學性質與土壤物性間之量化關係有待更進一步之試驗與推導。

#### 時域反射圓錐貫入器之設計。

現有之時域反射探測器僅適用於表面土壤之量測，不適用於量測深度大於 1m 之深層土壤。為了開發一結合圓錐貫入試驗之時域反射探測器，本研究嘗試採用多根金屬條之方式在一圓柱桿件表面形成傳輸導線，可安裝在 CPT 圓錐之上。目前已完成數種不同形式之表面配置（如表一），進行 TDR 圓錐貫入器試驗模型之測試。以 Probe 6 試驗模型為例（如圖三），以銅片包覆於 PVC 管上（直徑模擬現有 CPT 直徑）作為 TDR 之探測器，一端以 BNC 接頭接於 TDR 量測儀器上。

#### 量測效能與空間靈敏度之研究。

由於 TDR 圓錐貫入器為一中空裝置，其斷面電磁場之影響範圍包含內部之空氣與圓柱體外側之介質。因此，TDR 圓錐貫入器量測到的波傳速度為空氣與圓柱體外側材料之『整體有效波傳速度』；所量測到的介電常數為空氣與圓柱體外側材料之『整體有效介電常數』。為了比較不同配置之 TDR 圓錐貫入器所量測到之整體有效波傳速度，將不同之 TDR 圓錐貫入器置於大水槽中，量測探測器沒於水中之反射波形（如圖四）並計算其整體有效波傳速度。若定義 TDR 圓錐貫入器之量測效能為整體有效波傳速度與圓柱體外側材料之波傳速度之比值，表一顯示不同探測器設計之量測效能。結果顯示，各個 TDR 探測器之量測效能並未有太大的差異，但由圖六之波形顯示，不同設計造成探測器之電學阻抗有明顯的差異，其中以探測器 Cpt 6 之電學阻抗最低，波形之反射點也較易辨別。

除了比較不同設計之量測效能外，為了探討探測器之電磁場於圓柱體外之空間靈敏度，進行一系列之試驗。試驗方法係將不同之 TDR 圓錐貫入器置於注滿水之 1.5、2、2.5、3 英吋的 PVC 管內，量測探測器沒於水中之反射波形並計算

其整體有效介電常數。這樣的量測方式使得圓柱體外之材料介質不全為水，因此，整體有效介電常數將隨著蓄水之 PVC 管尺寸縮小而變小（因為 PVC 管外之介質為空氣）。圖五顯示不同圓錐貫入器之空間累積影響權重，以兩條金屬片布設之探測器（Cpt 1、2、3、4）影響範圍較遠，但對所有探測器而言，50% 左右之權重皆集中於距圓柱體外側 1.0 cm 內。綜合上述，最後選擇以 Cpt 1 及 Cpt 6 之形式進行原型（Prototype）之設計與製作，以 Cpt 6 為例，其原型如圖六所示。

#### 四、參考文獻

Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes," Geotechnique, Vol. 43, No. 3, pp. 351-415.

Lin, C-P (2001), "Measurement of Dielectric Spectrum with a Non-uniform TDR System," Submitted to Water Resources Research (SCI, EI).

Giese, K. and Tiemann, R. (1975), "Determination of the Complex Permittivity from Thin-Sample Time Domain Reflectometry: Improved Analysis of the Step Response Wave form," Adv. Mol. Relax. Processes, Vol. 7, pp. 45-59.

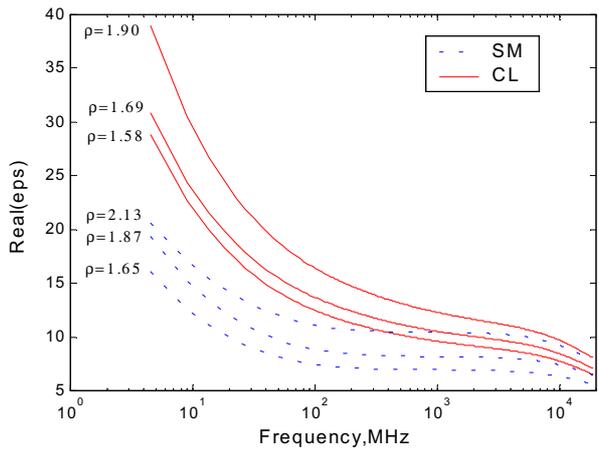
#### 五、圖表

表一 不同 TDR 探測器之導線配置與其量測效能

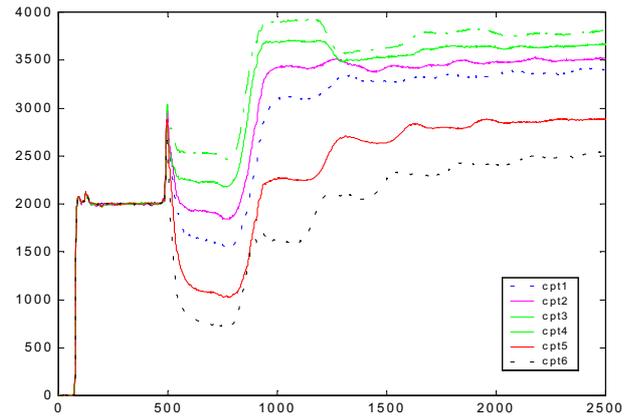
Probe 編號	Cpt1	Cpt2	Cpt3	Cpt4	Cpt5	Cpt6
寬 (mm)	20	10	3	0.5	20	20
長 (mm)	200	200	200	200	200	200
厚 (mm)	0.3	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3
銅片條數 (條)	2	2	2	2	3	4
量測效能 (%)	74.5	76.8	74.8	73.0	76.8	73.9



圖一 TDR 電學性質量測系統。

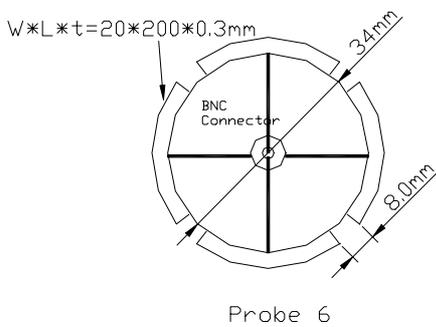


圖二 土壤之介電頻譜。



圖四 同樣長度之不同探測器所測得之 TDR 波形。

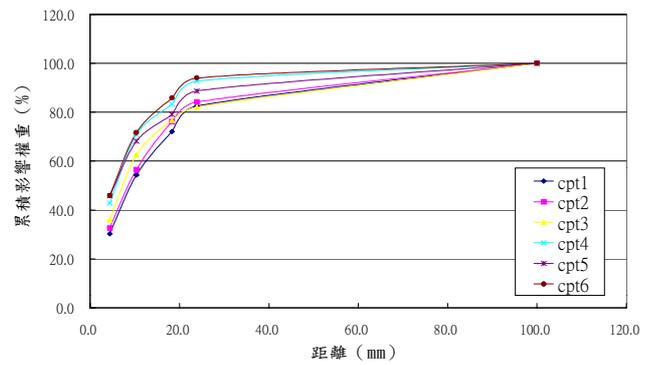
(a)  
上視圖



(b)  
相片



圖三 TDR 圓錐貫入儀試驗模型。



圖五 各種探測器之空間影響範圍累積權重。



圖六 TDR 圓錐貫入器之設計簡圖。