

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

TDR 方法(ASTM D6780)在碾壓土壤含水量與乾密度
量測適用性之評估



Evaluation of the Accuracy of Water Content and Dry Density Measurement
in Compacted Soil by TDR Technology(ASTM D6780)

研究生：張子奕

指導教授：林志平 博士

中華民國九十九年六月

TDR 方法(ASTM D6780)在碾壓土壤含水量與
乾密度量測適用性之評估

Evaluation of the Accuracy of Water Content and Dry Density Measurement in
Compacted Soil by TDR Technology (ASTM D6780)

研究生：張子奕

Student: Tsu-Yi Chang

指導教授：林志平 博士

Advisor: Dr. Chih-Ping Lin



A Thesis
Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Civil Engineering

June 2010
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

TDR 方法(ASTM D6780)在碾壓土壤含水量與乾密度量測 適用性之評估

學生：張子奕

指導教授：林志平 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

土壤填方之含水量與密度控制對碾壓土壤工程影響甚鉅，ASTM 規範近幾年推出非放射性土壤含水量與密度量測之時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) ASTM D6780。然而此規範之現地評估與可能潛在問題尚未有文獻探討，本研究之主要目的即是針對規範之試驗方式進行測試，了解其量測準確度並加以改善。

ASTM D6780 現地含水量與乾密度量測法中提出兩種試驗方法：單步驟法與雙步驟法，本研究以模型試驗與現地試驗進行量測分析，並搭配著砂錐法與烘乾法檢驗比較結果。根據本研究成果顯示兩方法在含水量之量測準確度可達 1%~2%，然而乾密度量測誤差超過預期。誤差分析結果顯示，在單步驟法上具有理論上之缺陷；雙步驟法主要誤差來源為現地感測器貫入擾動。針對貫入擾動之改善上，本研究提出短期與長期之兩種改善策略：短期上，在 TDR 其含水量量測可達需求之結果下，提出 TDR 法與砂錐法聯用可提升乾密度準確度至 2%；而長期上以感測器之重新設計為主，共有三種方案：減少貫入鋼釘數、縮小貫入鋼釘尺寸以及改採貫入式感測器，根據測試結果，由施作性、耐久性以及穩定性進行評估，以改採 4 根式直徑 6mm 感測鋼釘者最佳，目前可將乾密度誤差提升至 3%。最後並更具本研究經驗提出後續改進之研究方向。

關鍵字：碾壓土壤、時域反射法(TDR)、含水量量測、乾密度量測

Evaluation of the Accuracy of Water Content and Dry Density
Measurement in Compacted Soil by TDR Technology (ASTM D6780)

Student : Tsu-Yi Chang

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

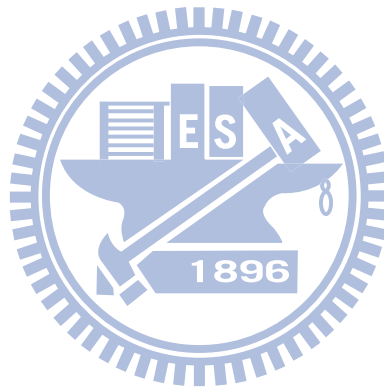
Abstract

The quality control of gravimetric water content and dry density are important to compacted soils. ASTM recently included the non-nuclear Time Domain Reflectometry (TDR) method (ASTM D6780) for field measurements of water content and dry density. But its performance has not been extensively evaluated in the field. The main objective of this study is to evaluate and improve the accuracy of ASTM D6780.

ASTM D6780 includes two methods, the one step method and the two step method. Both methods were experimentally evaluated in a physical model (in laboratory) and in the field, and compared with dry sand cone method and oven dry water content. Results show that water content accuracy of both methods reaches 1%~2%, but in the dry density measurement is much less accurate than expected. The poor performance of ASTM D6780 one step method was attributed to the flaw in its theoretical derivation. The unsatisfactory performance of ASTM D6780 two step method is found mainly due to penetration disturbance in the field measurements using the MRP rods, resulting inconsistency in the calibration relation between TDR measurement in the mold and insitu TDR measurement using MRP. Two counter measures were proposed. In the short term, a procedure combining TDR and sand cone measurements was proposed to verified to have accuracy dry density measurement better than 2%. In the long term, several modifications to the ASTM D6780 two step method were proposed, including reducing MRP rods to 2, reducing diameter of MRP rods, and replacing MRP with a TDR cone penetrometer

probe. All modifications improve the measurement accuracy of dry density to about 3%, with 2-rod MRP being less stable. The reduced 6mm-diameter 4-rod MRP probe was currently suggested because it is not only accurate, but also durable and easy to operate. Future improvements were also suggested based on the experiences of this study for future studies.

Keywords: Compacted Soil, Time Domain Reflectometry (TDR), Water Content Measurement, Dry Density Measurement



致謝

本論文得以順利完成，承蒙指導教授林志平博士於研究所兩年的求學期間悉心指導，給予學生在論文研究以及專業知識上的諸多指導，使學生得以突破研究瓶頸並獲得學識上的精進，此外，於求學態度與待人處世方面亦給予學生許多啟發，使我在研究所的求學期間更加的成長、茁壯，在此致上最誠摯的謝意。

求學期間，承蒙廖志中教授、潘以文教授、黃安斌教授、方永壽教授與單信瑜教授於學識上的指導，在此致上萬分謝意。口試期間，馮正一教授、廖志中教授與湯士弘教授給予本論文許多寶貴的意見與建議，使本文得以更加完善，在此表示由衷的感謝。

研究期間，幸蒙志忠、俊宏、柏林、文欽、偉晉、浚生、謝玉、哲毅、永政與智棟等學長的協助，尤其是志忠與俊宏學長的諸多幫助，實在感激不盡。同門同學玉紋與儒錚於研究上的協助，以及其他研究所期間同甘共苦的大地組同學們，真的很高興能認識你們這群朋友。還要感謝裕祥、學弟士輝、王凱、逸倫與新進學弟在實驗上的幫助，使每個實驗得以如期順利完成，以此謝文獻上致意。在學期間，感謝系足的錦輝、前昱與系足學弟終於讓我打到一次大土盃，更在聯賽期間狂電不少對手奪下四強的好成績，跨越不同國籍以球會友，足球場上就後會有期。

最後要感謝還是你們這些網友群們，特別是星晴、江小琴、品欣、宗師、彥齊、宮鈺、阿楓、RK、圈、比比、阿好、小苑、嵐魚兒、小櫻、七七、糖糖與球球，四年的網路遊戲成就彼此最深友誼，碩班兩年生活一路上有你們的鼓勵與支持。最後更要感謝培育我長大的父母與祖父母以及從小陪我打鬧到大的妹妹，這二十幾年來如果沒有家人的支持就沒有今天的我。謹以此文獻給我最愛的大家，謝謝你們。

目錄

| | |
|----------------------------------|------|
| 中文摘要..... | i |
| Abstract..... | ii |
| 致謝..... | iv |
| 目錄..... | v |
| 圖目錄..... | viii |
| 表目錄..... | xiii |
| 一、前言..... | 1 |
| 1.1 研究動機..... | 1 |
| 1.2 研究目的..... | 2 |
| 二、文獻回顧..... | 3 |
| 2.1 土壤電學性質與含水特性、乾密度之關係..... | 3 |
| 2.1.1 土壤與介電性質關係..... | 3 |
| 2.1.2 土壤與導電度關係..... | 8 |
| 2.2 ASTM D6780 TDR 量測技術介紹..... | 17 |
| 2.2.1 碾壓土壤電學性質量測：時域反射法(TDR)..... | 17 |
| 2.2.2 ASTM TDR 實驗儀器..... | 19 |
| 2.2.3 TDR 視介電度量測分析..... | 21 |
| 2.2.4 TDR 導電度量測分析..... | 23 |

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 2.2.5 | ASTM D6780 雙步驟法 | 24 |
| 2.2.6 | ASTM D6780 單步驟法 | 28 |
| 2.2.7 | 雙步驟法與單步驟法參數標定 | 30 |
| 三、 | 研究方法 | 33 |
| 3.1 | 研究問題與研究流程 | 33 |
| 3.2 | ASTM D6780 室內試驗規畫 | 34 |
| 3.2.1 | 試驗土樣 | 34 |
| 3.2.2 | 試驗儀器 | 39 |
| 3.3 | ASTM D6780 量測準確度評估試驗規畫 | 40 |
| 3.3.1 | ASTM D6780 現地實驗儀器與實驗步驟 | 40 |
| 3.3.2 | 模型試驗夯模儀器設計 | 46 |
| 3.3.3 | 模型試驗規畫 | 48 |
| 3.3.4 | 現地試驗場址 | 49 |
| 四、 | 試驗結果與討論 | 51 |
| 4.1 | TDR 量測系統率定 | 51 |
| 4.1.1 | 土壤室內率定結果 | 51 |
| 4.1.2 | 導電度率定結果 | 54 |
| 4.2 | ASTM D6780 量測準確度試驗成果 | 57 |
| 4.2.1 | 模型試驗結果 | 57 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 4.2.2 現地試驗結果 | 61 |
| 4.3 現地量測誤差來源探討與現地感測器改善方案 | 67 |
| 4.3.1 單步驟法問題探討 | 67 |
| 4.3.2 雙步驟法誤差來源探討：感測鋼棒長度之影響 | 69 |
| 4.3.3 雙步驟法誤差來源探討：感測器型式差異之影響 | 71 |
| 4.3.4 雙步驟法誤差來源探討：貫入擾動影響 | 72 |
| 4.3.5 TDR 現地含水量與乾密度量測改善方案 | 74 |
| 4.3.6 TDR 法與砂錐法聯用改善成效 | 79 |
| 4.3.7 現地改感測器改善成效 | 80 |
| 五、結論與建議 | 91 |
| 5.1 結論 | 91 |
| 5.2 建議 | 93 |
| 參考文獻 | 95 |



圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 2-1 正規化之視介電常數與重量含水量關係圖(Lin, 1999)..... | 4 |
| 圖 2-2 土壤種類對正規化之視介電常數與重量含水量關係之影響 (Lin, 1999) | 5 |
| 圖 2-3 不同含水量與不同乾密度與介電頻譜之關係(Lin, 2003) | 7 |
| 圖 2-4 不同土壤之介電頻譜(Chung and Lin, 2009) | 8 |
| 圖 2-5 電流於多孔隙介質中三種主要傳導路徑 (修改自 Sauer, 1955) | 9 |
| 圖 2-6 土壤組構模型 (改繪自 Klein and Santamarina, 2003) | 12 |
| 圖 2-7 土壤組構模型(Mojid et al., 2007)..... | 13 |
| 圖 2-8 不同土壤種類其 $(\sqrt{\sigma_{dc}-c}) \rho_w / \rho_d$ 與 w 之關係(Lin,1999) | 16 |
| 圖 2-9 TDR 量測系統示意圖 | 18 |
| 圖 2-10 TDR 感測器型式: a) 同軸式; b) 多棒式; c) 貫入式 (Lin et al., 2006) | 19 |
| 圖 2-11 TDR 標定量測儀器 | 20 |
| 圖 2-12 介電度量測試驗用之 TDR 同軸感測器 | 21 |
| 圖 2-13 典型 TDR 量測波形 | 22 |
| 圖 2-14 TDR 視介電度走時分析法示意圖(Lin, 2003)..... | 23 |
| 圖 2-15 TDR 現地含水量與密度量測訊號..... | 25 |
| 圖 2-16 TDR 感測器現場安置示範圖 | 26 |

| | | |
|--------------|--|----|
| 圖 2- 17 | TDR 感測器現場安置示範圖 | 27 |
| 圖 2- 18 a, b | 參數標定說明圖(例)..... | 31 |
| 圖 2- 19 c, d | 參數標定說明圖(例)..... | 32 |
| 圖 2- 20 f, g | 參數標定說明圖(例)..... | 32 |
| 圖 3- 1 | 研究流程圖 | 33 |
| 圖 3- 2 | 寶山第二水庫粉質砂土之粒徑分佈曲線..... | 35 |
| 圖 3- 3 | 寶山第二水庫粉質砂土之夯實曲線 | 35 |
| 圖 3- 4 | 高嶺土之粒徑分佈曲線 | 36 |
| 圖 3- 5 | 高嶺土之夯實曲線..... | 37 |
| 圖 3- 6 | 湖山土之粒徑分佈曲線 | 38 |
| 圖 3- 7 | 湖山土之夯實曲線..... | 38 |
| 圖 3- 10 | TDR 量測系統實體圖 | 39 |
| 圖 3- 11 | TDR 量測系統架構圖 | 40 |
| 圖 3- 12 | TDR 量測儀控軟體：ASTM D6780 含水量與乾密度量測分析 | 40 |
| 圖 3- 13 | ASTM D6780 實驗儀器設計圖與感測器轉接蓋實體圖 | 41 |
| 圖 3- 14 | 現地實驗儀器 | 42 |
| 圖 3- 15 | 現地實驗同軸感測器 | 42 |
| 圖 3- 16 | 雙步驟法試驗流程 | 43 |

| | |
|--|----|
| 圖 3- 17 夯實模設計構想圖 | 46 |
| 圖 3- 18 夯實模實體圖 | 47 |
| 圖 3- 19 湖山水庫現地量測評估位置 | 50 |
| 圖 4- 1 來回走時切線法分析(以湖山壩土，含水量 13%為例)..... | 51 |
| 圖 4- 2 正規化介電常數與含水量之關係..... | 52 |
| 圖 4- 3 土壤種類可能造成之含水量誤差程度 | 54 |
| 圖 4- 4 正規化導電度與含水量之關係 | 55 |
| 圖 4- 5 導電度與介電常數之關係..... | 56 |
| 圖 4- 6 建立之量測系統與室內傳統方法結果比對評估試驗情形： | |
| a) 試體準備完成；b) TDR 量測；c)砂錐法量測..... | 58 |
| 圖 4- 7 夯實模中含水量均勻性..... | 59 |
| 圖 4- 8 室內評估含水量之比較結果..... | 59 |
| 圖 4- 9 室內評估乾密度之比較結果 | 60 |
| 圖 4- 10 模型試驗：MRP 感測器與同軸感測器探討分析 | 61 |
| 圖 4- 11 現場試驗含水量比對結果(以各自標定參數分析)..... | 62 |
| 圖 4- 12 現地乾密度比對結果(以各自標定參數分析)..... | 63 |
| 圖 4- 13 現地含水量比對結果(以全分析標定參數分析)..... | 64 |
| 圖 4- 14 現地乾密度比對結果(以全分析標定參數分析)..... | 65 |
| 圖 4- 15 現地土壤介電度與含水量關係圖 | 66 |

| | |
|---|----|
| 圖 4- 16 現地釘子貫入土後之情形..... | 67 |
| 圖 4- 17 感測鋼棒長度與視介電度之關係..... | 70 |
| 圖 4- 18 湖山土 22 公分感測鋼棒與 11.5 公分感測鋼棒視介電度量測 差異比較..... | 71 |
| 圖 4- 19 感測器型式差異之影響..... | 72 |
| 圖 4- 20 兩次 TDR 現地多棒式與同軸式感測器之介電性質差異..... | 73 |
| 圖 4- 21 TDR 法與砂錐法聯用之實驗儀器..... | 75 |
| 圖 4- 22 TDR 法與砂錐法試驗流程..... | 75 |
| 圖 4- 23 現地 TDR 感測器改善-減少感測鋼棒數試驗規劃..... | 77 |
| 圖 4- 24 TDR 感測器設計圖：MRP 感測器由 10mm 改成 8mm、6mm | 77 |
| 圖 4- 25 貫入式感測器設計圖與實體圖..... | 78 |
| 圖 4- 26 砂錐法與 TDR 法聯用量測密度(各自標定參數分析)比對結果 | 79 |
| 圖 4- 27 現地 TDR 量測誤差來源探討-貫入擾動影響試驗情形..... | 80 |
| 圖 4- 28 現地 TDR 量測誤差來源探討-貫入擾動影響試驗結果..... | 81 |
| 圖 4- 29 二根感測棒感測器轉接蓋..... | 82 |
| 圖 4- 30 以新製二跟式感測器轉接蓋減少鋼釘數評估試驗規劃..... | 82 |
| 圖 4- 31 減少鋼棒現地試驗情況..... | 83 |
| 圖 4- 32 減少鋼棒感測器試驗評估成果..... | 84 |

| | |
|------------------------------|----|
| 圖 4- 33 不同尺寸鋼釘在現地試驗情況..... | 85 |
| 圖 4- 34 縮小鋼釘尺寸現地試驗成果..... | 86 |
| 圖 4- 35 貫入式感測器現地試驗情況..... | 86 |
| 圖 4- 36 貫入式感測器現地試驗成果..... | 87 |
| 圖 4- 37 現地感測器改善－含水量比對結果..... | 88 |
| 圖 4- 38 現地感測器改善－乾密度比對結果..... | 89 |



表目錄

| | |
|-----------------------------------|----|
| 表 2-1 不同特性土樣迴歸參數結果(Lin,1999)..... | 15 |
| 表 3-1 新建量測系統與傳統砂錐法比較試驗規劃..... | 48 |
| 表 4-1 試驗土壤之 ASTM D6780 標定參數..... | 57 |



一、前言

1.1 研究動機

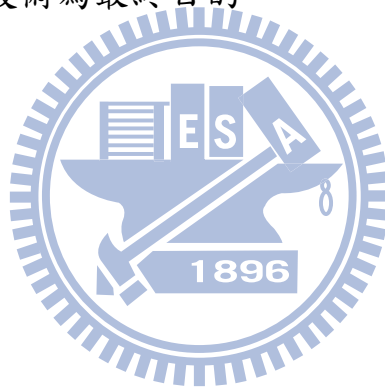
近幾年國內有不少擋土結構與水壩工程正在進行與規畫中，這些大範圍土壤填方之含水量與密度控制土壩、土堤及擋土結構完工後之水密性與強度，如填方土壤夯實之含水量不當或夯實度不足，可能會造成工程結構上弱面帶之形成，亦可能造成填方塌陷、堤防淘空及擋土結構破壞等造成人民生命財產上威脅的重大工程案件。因此，土壤夯實品質對於大壩填築成果之影響甚鉅，營建過程中嚴謹且全面的含水量與乾密度檢測工作對其安全極為重要。

目前國內主要採用烘乾法及砂錐法決定含水量與工地密度，這些方法相對比較耗時，無法立即得到重要之指標數據，常影響工程進度，且檢查點可能無法具完全代表性。有鑑於此，國外普遍採用可於現場即時檢測的核子密度與含水量儀器，但這類儀器有輻射污染之虞，人員訓練及器材管理程序繁瑣，國內一直未能推廣。

為可快速且準確進行品質管控制之目的，近幾年國際上積極發展非核子方法之量測儀器，國內實有必要評估這些新興方法，發展實務可行的填方土壤檢測技術，希望能有效取代砂錐法、烘乾法、快控法與核子方法以提昇國內大壩、土堤及擋土結構之檢驗品質及效率。

1.2 研究目的

在眾多新興非核子式之現地含水量與乾密度量測方法裡，時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 具有極大潛力，ASTM D6780 中已規範採用 TDR 法進行現地含水量與乾密度之試驗分析步驟，然而此試驗之現地量測成效與可能潛在問題尚未有文獻進行探討，因此，本研究針對 ASTM D6780 所規範之試驗方式進行測試，透過實測資料了解此技術之量測準確度，而後由理論與實驗資料進行誤差來源分析與探討，最末將針對誤差來源之探討結果進行量測改善，以期改善現有 TDR 量測技術之準確性，並以將此技術提升為可替代核子密度儀之非核子量測技術為最終目的。



二、文獻回顧

2.1 土壤電學性質與含水特性、乾密度之關係

2.1.1 土壤與介電性質關係

Topp et al.(1980)由時域反射儀(Time Domain Reflectometry, TDR)實驗結果提出土壤之視介電常數與土壤之體積含水量(volumetric water content)可以以三次式進行描述：

$$\theta = -5.3 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \dots\dots\dots (2- 1)$$

其中， θ 為土壤體積含水量，表示每單位體積土壤中所含之水的體積； K_a 為視介電常數(apparent dielectric constant)，此常數 Topp et al.(1980)將定義為光速 V_c 與電磁波在土壤中傳遞速度 V_{sl} 比值之平方，可寫作

$$K_a = \left(\frac{V_c}{V_{sl}} \right)^2 \dots\dots\dots (2- 2)$$

，式中 K_a 可由 TDR 量測之波形獲得(詳細量測與分析方式請參閱 2.2 節內容)。在此式中，Topp et al.(1980)並未考慮不同土壤所可能造成的差異，亦未考量乾密度差異所可能造成的誤差。

Ledieu et al.(1986)提出一更為簡易之二次式描述視介電常數與土壤體積含水量之關係：

$$\sqrt{K_a} = a_L + b_L \theta \dots\dots\dots (2- 3)$$

其中， a_L 以及 b_L 為標定參數。此式於標定時所獲得之迴歸線性值雖較採用(2- 1)式為低，但其較易於使用(Lin, 1999)，且考慮不同土壤種

類所可能造成之差異，需透過對不同土壤之標定以獲得土壤視介電度與體積含水量之關係。Siddiqui and Drnevich(1995)進一步考量土壤乾密度所可能造成的影響，利用土壤乾密度 ρ_d 將視介電常數進行正規化後，以其對土壤重量含水量 w 之關係進行描述：

$$\frac{\sqrt{K_a} \rho_w}{\rho_d} = a + bw \dots\dots\dots (2-4)$$

其中， a 以及 b 為標定參數， ρ_w 為水之密度。不論此些研究(Topp et al., 1980; Ledieu et al., 1986; Siddiqui and Drnevich, 1995)採用何種經驗式進行視介電度與含水量之關係描述，其皆顯示對於同一土壤，當重量含水量增加時，視介電常數將隨之增加(如圖 2- 1 所示)。

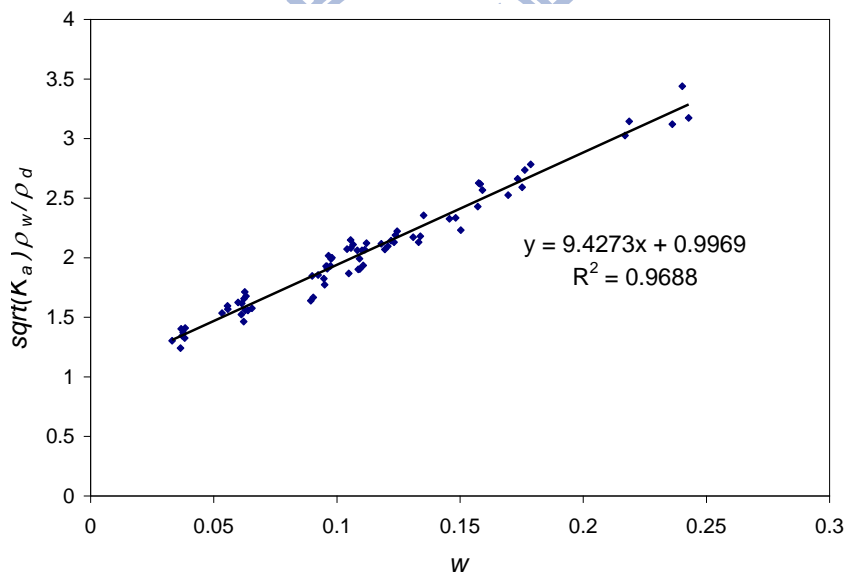


圖 2-1 正規化之視介電常數與重量含水量關係圖(Lin, 1999)

為了解土壤種類對於(2- 4)式中 a , b 參數之影響，Lin(1999)採用三種不同黏土含量之土樣進行試驗，如圖 2- 2 所示，圖中 M5 之黏土含量最高，M3 次之，M1 最低，採用(2- 4)式迴歸之結果顯示，不同黏土含量之土樣其迴歸結果約略平行，主要差異在於 a 參數的變化，且隨著黏土含量之增加，正規化之視介電度也有提高之情形，而此結

果亦再次說明土壤種類對於視介電度與其含水量之關係具有影響性。

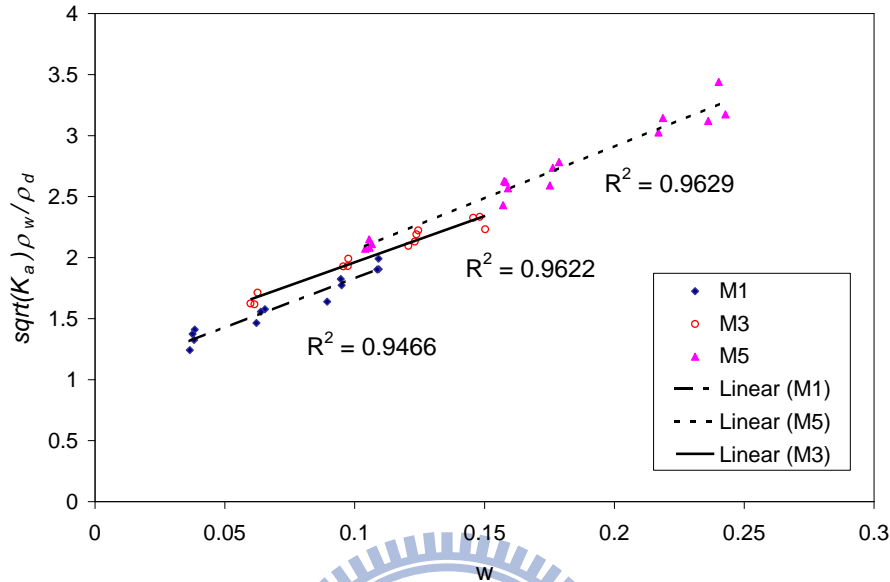


圖 2-2 土壤種類對正規化之視介電常數與重量含水量關係之影響(Lin, 1999)

然而，實際含水之溼土壤之介電性質與頻率相關，應以頻率域之描述較為恰當。Dobson et al.(1985)與 Heimovaara et al.(1994) 提出一混合模型(mixing model)用以描述具頻散現象的土壤介電性質，其模型認為濕土之介電度與土顆粒、自由水(free water)、束限水(bond water)以及空氣四種材料有關，將其以土壤物理參數表示，其數學式可表示為(Lin, 2003)

$$\varepsilon_m^\alpha = \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \varepsilon_s^\alpha + (\theta - \delta A_s \rho_d) \varepsilon_{fw}^\alpha + \delta A_s \rho_d \varepsilon_{bw}^\alpha + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} - \theta \right) \varepsilon_{air}^\alpha \dots (2-5)$$

其中， ε_m 、 ε_s 、 ε_{fw} 、 ε_{bw} 以及 ε_{air} 分別是與頻率相關之土體總介電度、土顆粒介電度、自由水介電度、束限水介電度以及空氣介電度； δ 為

束制水厚度； A_s 為顆粒比表面積(specific surface area of soil)； θ 為體積含水量； ρ_d 為土體乾密度； ρ_s 為平均土顆粒密度； α 為迴歸係數。

相較於(2- 4)式之純迴歸關係式，(2- 5)式之混合模型更加具有理論背景且亦更為廣泛適用，(2- 4)式可說是(2- 5)式的一個特例情形，倘若將 α 訂為 0.5，並將視介電度 K_a 視為某頻率之 ϵ_m ，則(2- 5)式可化為

$$\sqrt{K_a} = \left(\frac{\rho_d}{\rho_s}\right)\sqrt{\epsilon_s} + (\theta - \delta A_s \rho_d)\sqrt{\epsilon_{fw}} + \delta A_s \rho_d \sqrt{\epsilon_{bw}} + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} - \theta\right)\sqrt{\epsilon_{air}} \quad (2- 6)$$

在(2- 6)式中，對於單純材料之介電係數 ϵ_s 、 ϵ_{fw} 、 ϵ_{bw} 以及 ϵ_{air} 可視為常數，另忽略土壤種類可能造成的誤差(即將 δ 、 A_s 以及 ρ_s 視為常數)，則(2- 6)式更可簡化為

$$\sqrt{K_a} = a^* \rho_d + b^* \theta + c^* \dots\dots\dots (2- 7)$$

其中， a^* 、 b^* 以及 c^* 為常數。又

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_w} \omega \dots\dots\dots (2- 8)$$

將其代入(2- 7)式，整理可得

$$\frac{(\sqrt{K_a} - c^*)\rho_w}{\rho_d} = a^* + b^* \omega \dots\dots\dots (2- 9)$$

如此，可得與(2- 4)式相近之(2- 9)式，而此兩者之最大差別是在於 c^* 存在與否。根據 Lin(1999)由實驗數據採用兩者進行迴歸之結果所做之結論顯示， c^* (此值一般為 1)之採用與否對迴歸所得影響不大，

可予忽略。

Lin(2003)利用此一混合模型，模擬在同一土壤中，不同含水量與不同乾密度與介電常數之關係，如圖 2-3 所示，不同含水量將造成土壤之介電頻譜有不同的兩個帶狀，而在此結果中，對同一乾密度而言，於任一頻率下，介電常數與含水量之變化亦顯示出隨含水量的增加，而介電常數增加的情形。此外，在圖中亦可觀察出，在同一含水量下，隨著乾密度的增加，介電常數亦為增加的現象，與多數學者之觀察相符(Dirksen and Dasberg, 1993; Jacobsen and Schjonning, 1993)。

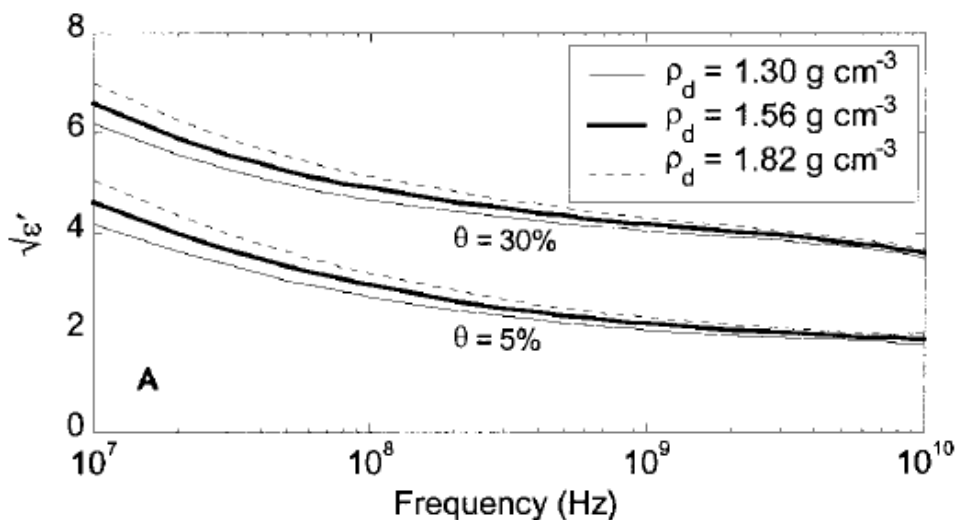


圖 2-3 不同含水量與不同乾密度與介電頻譜之關係(Lin, 2003)

在混合模型(2- 5)式中，對於土壤之物理性質有顆粒比表面積 A_s 之影響因子，不同土壤可將其視為是具有不同顆粒尺寸組成之土壤綜合體，則對於不同土壤便可採用 A_s 之不同進行模擬。Lin(2003)透過混合模型對此一特性進行模擬探討，利用不同的顆粒比表面積模擬不同的土壤種類，其結果如圖 2-4 所示，結果顯示在低頻段(約 $<1\text{GHz}$)，隨著細粒料(A_s 較大者顆粒較小)含量的增加，介電常數有增加的情況，然而在高頻段(約 $>1\text{GHz}$)，其行為恰為相反，其將隨著細粒料(A_s

較大者顆粒較小)含量的增加，而在介電常數上有降低的情形。在低頻處之介電常數主要受土壤組構之影響，而在高頻處之介電常數主要受反應土壤中水之特性。視介電度為位於低頻側某特定但未知之頻率下的介電常數，以此進行土壤性質之了解易受土壤種類與土壤組構之影響，而使其在(2-4)式中之標定參數受土壤種類影響而有不同。圖2-4中提供一重要訊息，在頻率500MHz到1GHz之間，不同土壤的介電常數變化不大，較不受土壤組構與種類之影響，有潛力做為含水量量測之最佳頻段(Lin, 2003)。

綜合以上文獻，土壤與介電度的影響參數除了含水量、乾密度與土壤種類(比表面積)有相關，在土壤介電度分析上不同頻率也將影響著土壤介電分析之數據。

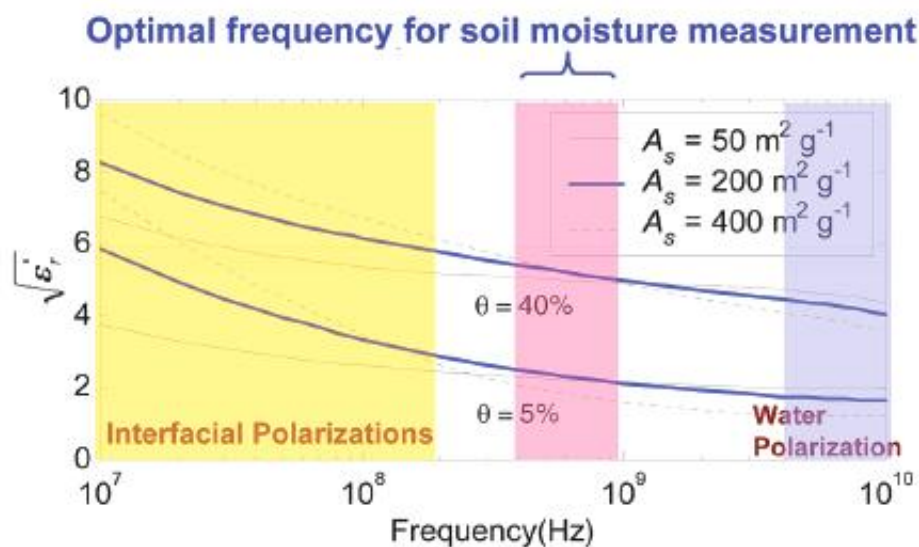


圖 2-4 不同土壤之介電頻譜(Chung and Lin, 2009)

2.1.2 土壤與導電度關係

土壤電學性質研究上有眾多學者提土壤導電度的各種看法，一般而言導電度(Conductivity)符號表是為 EC，亦有諸多學者使用 σ 來表

是導電度並運用在導電度土壤性質公式之推導。Sauer (1955) 提出電流在非均質的多孔隙介質中傳導時，其傳導的路徑可分為下列三種(如圖 2-5 所示)；路徑 1 為顆粒與孔隙水所組成，路徑 2 為孔隙液體所組成，路徑 3 則為顆粒與顆粒所組成，但因為土壤顆粒與顆粒間之接觸面積太小，對於整體的導電度影響極微，因此路徑 3 通常可忽略不計(Arulanandan and Smith, 1973)，以路徑 1 與路徑 2 為電流的主要傳導路徑。

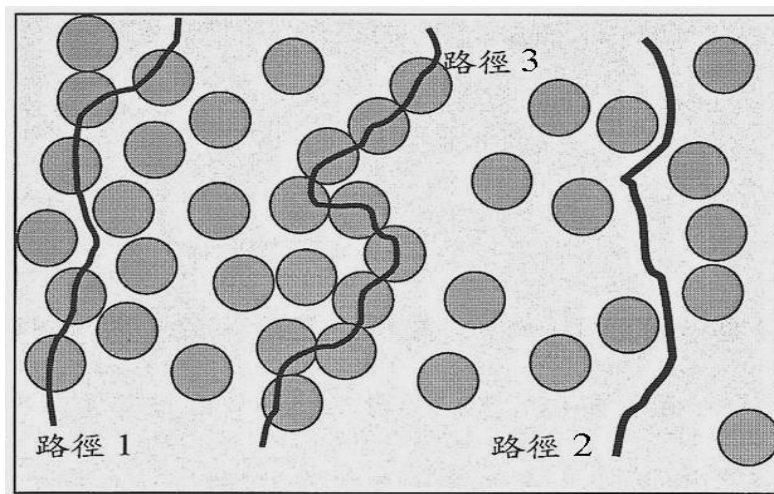


圖 2-5 電流於多孔隙介質中三種主要傳導路徑 (修改自 Sauer, 1955)

在不同之土壤中，因為細粒料含量的不同也將對其導電路徑有不同之影響，對於無細粒料的砂土與礫石而言，其傳導路徑以孔隙水為主 (Jackson, 1973)，而對含較多細粒料之岩石、砂土以及黏土，其導電路徑則是以孔隙水以及黏土礦物的表面電荷為主(Rhodes et. Al, 1976；Urish, 1981)。土壤之導電度除了受傳導路徑影響外，亦受孔隙率、飽和度、孔隙液體導電度、土壤種類、土壤電雙層、土壤乾密度及溫度等其他因子所影響，Archie (1942) 對於飽和狀態下的岩石與砂礫石的電阻率與孔隙率、孔隙水電阻率之間的關係，提出一簡單的經驗公式如下：

$$R_{sat} = a_r R_w n^{-m_r} \dots\dots\dots (2- 10)$$

其中， R_{sat} 為總體電阻率 (ohm-m)； R_w 為孔隙液體電阻率； n 為孔隙率； a_r 、 m_r 則為待定係數，與孔隙形狀與內含的細粒料含量及膠結程度有關。

電阻率的倒數即為導電度 (S/m)，Shan 與 Singh(2005)以導電度的觀點，提出了較為廣義的 Archie's law(generalized Archie's law)：

$$EC = c_r EC_w \theta^{m_r} \dots\dots\dots (2- 11)$$

其中 EC 為導電度； EC_w 為孔隙液體之導電度； c_r 、 m_r 為待定參數，與土壤種類有關； θ 為體積含水量。此式可將其進一步整理為

$$\frac{EC}{EC_w} = \frac{1}{F} = c_r \theta^{m_r} \dots\dots\dots (2- 12)$$

式中 F 將其定義為結構因子 (Formation Factor)。由(2- 11)式可知導電度與體積含水量約略呈正比關係。

因廣義的 Archie's law 是採用岩石之試體所得到之導電度與含水量關係，Shan and Singh (2005) 為探討之適用性，整理過去文獻所使用多種土樣的實驗結果，並配合四種截然不同特性的土壤樣本，進行 $1/F$ 與 θ 的率定，求取不同土壤特性下的 c_r 、 m_r 值。其結果中指出，在砂土與礫石的土壤中， c_r 值約等於 1；而 m_r 值約介於 1.5~2.0；在靈敏性的黏土中， c_r 值通常大於 1，而 m_r 值則介於 1.36~3.5 左右。此外，文中引述相關文獻 (Williams and Hoey, 1987; Rhoades, 1989; Durlesser and Stanjek, 1997; Worthington, 1993; Auerswald et al., 2001)，認為粘土含量 (CL) 與 c_r 、 m_r 值有某種程度的相關性，當 $CL \geq 5\%$ ， $c_r = 0.6CL^{0.55}$ ， $m_r = 0.92CL^{0.2}$ ；當 $CL < 5\%$ ， $c_r \approx 1.45$ ， $m_r \approx 1.25$ 。

由此可知， c_r 、 m_r 值隨不同種類土壤有某種程度的變異性存在。

Klein 和 Santamarina (2003) 嘗試將土壤組構簡化，假設土壤組構是由飽合狀態無限長平板顆粒相互平行所組成(如圖 2- 6 所示， t_w 為孔隙水厚度， t_p 為土壤顆粒厚度， t_d 為土壤電雙層厚度)，並且考慮土壤中電雙層的導電度，提出了總體導電度為土壤顆粒導電度、土壤孔隙溶液導電度及土壤電雙層導電度所組成的混合模型，則此土壤之總體導電度可表示為

$$EC = \frac{EC_p + EC_w e + \lambda_d A_s \frac{\gamma_p}{g}}{1 + e} \dots\dots\dots (2- 13)$$

其中， EC_p 為土壤顆粒導電度， EC_w 為土壤孔隙液體導電度， A_s 為土壤比表面積， g 是比重， γ_p 為土壤顆粒單位重， e 孔隙比。若假設孔隙液體導電度遠大於土壤顆粒導電度，且土壤顆粒表面積極小時，(2- 13)式可改寫為

$$EC = EC_w \frac{e}{1 + e} \dots\dots\dots (2- 14)$$

由此結果可知，對於粗顆粒之土壤而言，在飽和狀態下其導電特性將主控於孔隙間之液體的導電度。

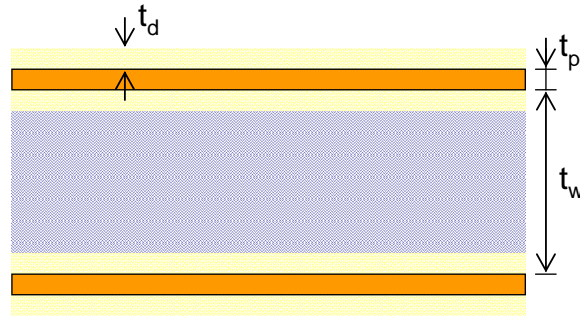


圖 2-6 土壤結構模型 (改繪自 Klein and Santamarina, 2003)

Mojid et al.(2007)在 Klein and Santamarina(2003)的無限長平板顆粒模型之概念下，將土壤顆粒、空氣、孔隙中自由的水體和黏土的吸附水層所組成之結構假設為如圖 2-7 所示之有限平板組合，假定其彼此間以並聯方式連結，則其總體導電度可表示為

$$EC = T(\theta \times EC_w + \theta_d \times EC_d) \dots\dots\dots (2- 15)$$

其中， $T = \frac{l}{le}$ ，定義為傳輸係數； θ 為體積含水量； θ_d 為黏土的吸附水層體積與土體體積比。(2- 15)式之結果與(2- 14)式所傳達之訊息相似，其皆表示土體之導電度與孔隙間之液體的導電度相關，且與其體積含水量成正比，而除此之外，(2- 15)式更進一步說明當有細顆粒存在時，吸附水將造成導電度的增加，且與吸附水之體積比成正比。

前述之土壤導電度行為中，其使用之微觀參數(如 A_s 與 θ_d)並不易於現場獲得，Feng et al.,(1999)及 Lin(1999)以土壤重量含水量以及乾密度與導電度關係的觀點，提出導電度與含水量之率定關係可表示為

$$\sqrt{EC} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw \dots\dots\dots (2- 16)$$

其中， ρ_d 為土壤乾密度； ρ_w 為水之密度； c 、 d 為待定參數。此示顯

示出，隨著重量含水量的增加，導電度有增加的情形，而當乾密度增加時，其導電度將下降。

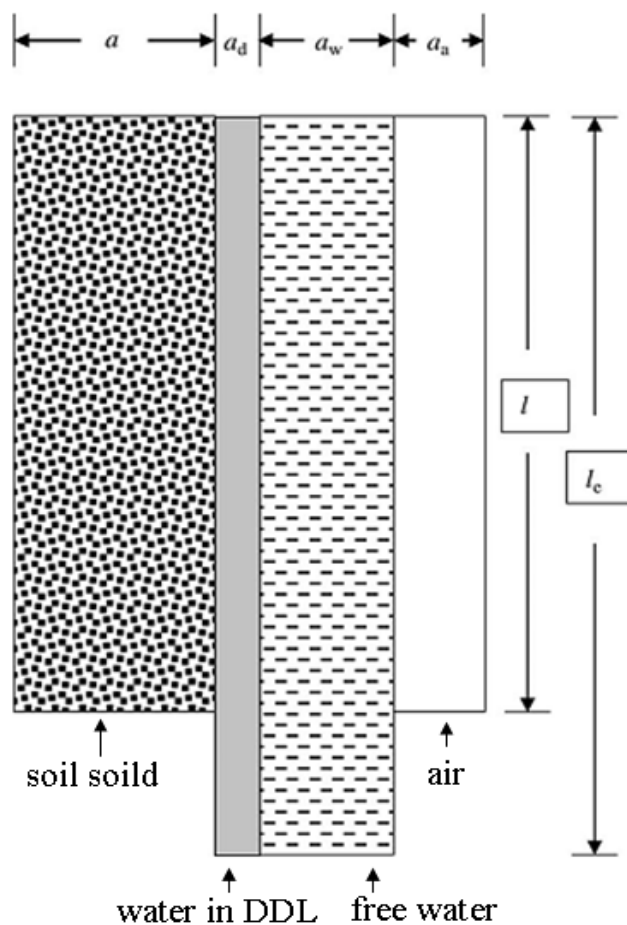


圖 2-7 土壤結構模型(Mojid et al., 2007)

根據上述導電度與含水量經驗式或經由假設模型所推導出之關係式可觀察出，導電度與含水量關係之描述有二次多項式、一次多項式或者指數型式，導電度與含水量間皆具有正相關，只是因為所考慮的參數或假設的模型不同而造成描述上有所差異，其根本上可以兩種基本數學型式進行描述。

第一種是為指數型式，其通式為

$$EC = a_{uni} EC_w \theta^{m_{uni}} \dots\dots\dots (2-17)$$

其中， a_{uni} 及 m_{uni} 為標定參數。此種型式可用於描述 Archie (1942)、Shan and Singh (2005)、Klein and Santamarina (2003)所提出之關係式。Shan and Singh (2005)所提出之經驗式與(2- 17)式相同：Archie(1942)因假設為飽和狀態下的岩石與砂礫石的電阻率，因此其所提出之經驗式為(2- 17)式之飽和狀態(即 $\theta=1$)；Klein and Santamarina (2003)所提之理論式，經過簡化過後即為(2- 17)式中 a_{uni} 及 m_{uni} 等於 1 且體積含水量為飽和狀態的結果。

第二種是為多項式型式，其通式為

$$EC = a_p \theta_w^2 + b_p \theta_w + c_p \theta_d^2 + d_p \theta_d + e_p \dots \dots \dots (2- 18)$$

其中， a_p, b_p, c_p, d_p, e_p 為標定參數。Feng et al.(1999)、Lin(1999)以及 Mojid , Rose and Wyseure(2007)屬於此種型式。Mojid , Rose and Wyseure(2007)於理論式之模型中有考量土壤電雙層之導電度影響，其所提出之關係式為(2- 18)式中 $a_p = 0, c_p = 0, e_p = 0$ 之情形；而 Feng et al.(1999)與 Lin(1999)所提出之關係式中以乾密度與重量含水量表示，將其改以體積含水量表示，該式為

$$\sqrt{EC} = c \frac{\rho_d}{\rho_w} + d\theta \dots \dots \dots (2- 19)$$

將等式兩側平方

$$EC = \left(c \frac{\rho_d}{\rho_w} \right)^2 + 2cd \frac{\rho_d}{\rho_w} \theta + d^2 \theta^2 \dots \dots \dots (2- 20)$$

則其關係式是(2- 18)式中 $a_p = d^2, b_p = 2cd \frac{\rho_d}{\rho_w}, c_p = 0, d_p = 0, e_p = \left(c \frac{\rho_d}{\rho_w} \right)^2$ 的

情形。

Lin(1999)以導電度的觀點，提出導電度與含水量之關係如式

$$\sqrt{\sigma_{dc}} = c + [a(A_{es}) + bw]\rho_d \dots\dots\dots (2- 21)$$

式中 a、b、c 為待定參數，a 與土壤表面積及土壤單位重有關；b 與含水量與土壤單位重相關；c 與含水量及土壤種類有關。而由(2- 21)式中可知導電度 σ 與含水量 ω 呈正比關係。此外 Lin (1999) 為探討(2- 21)式的適用性，整理過去文獻中所使用多種土樣的試驗結果($\rho_d = 1.32 \sim 1.44 \text{ g/cm}^3$)，如圖 2- 8 所示，其迴歸所得之參數如表 2- 1 所示。

由得到之迴歸參數可知 c 值隨土壤種類不同而有某種程度之變異性；a 與 B 值則隨土壤單位重不同而有一定範圍之差異，另其迴歸值 R^2 皆大於 0.95 顯示出良好的迴歸關係。

表 2- 1 不同特性土樣迴歸參數結果(Lin,1999)

| Soil Type | c | a | B | R^2 |
|-----------|---------|--------|--------|-------|
| M1 | -0.1102 | 0.0746 | 0.7932 | 0.979 |
| M2 | -0.1235 | 0.0955 | 0.7778 | 0.952 |
| M3 | -0.1595 | 0.1340 | 0.6281 | 0.954 |
| M4 | -0.2169 | 0.1514 | 0.8873 | 0.949 |
| M5 | -0.1317 | 0.1310 | 0.7234 | 0.976 |

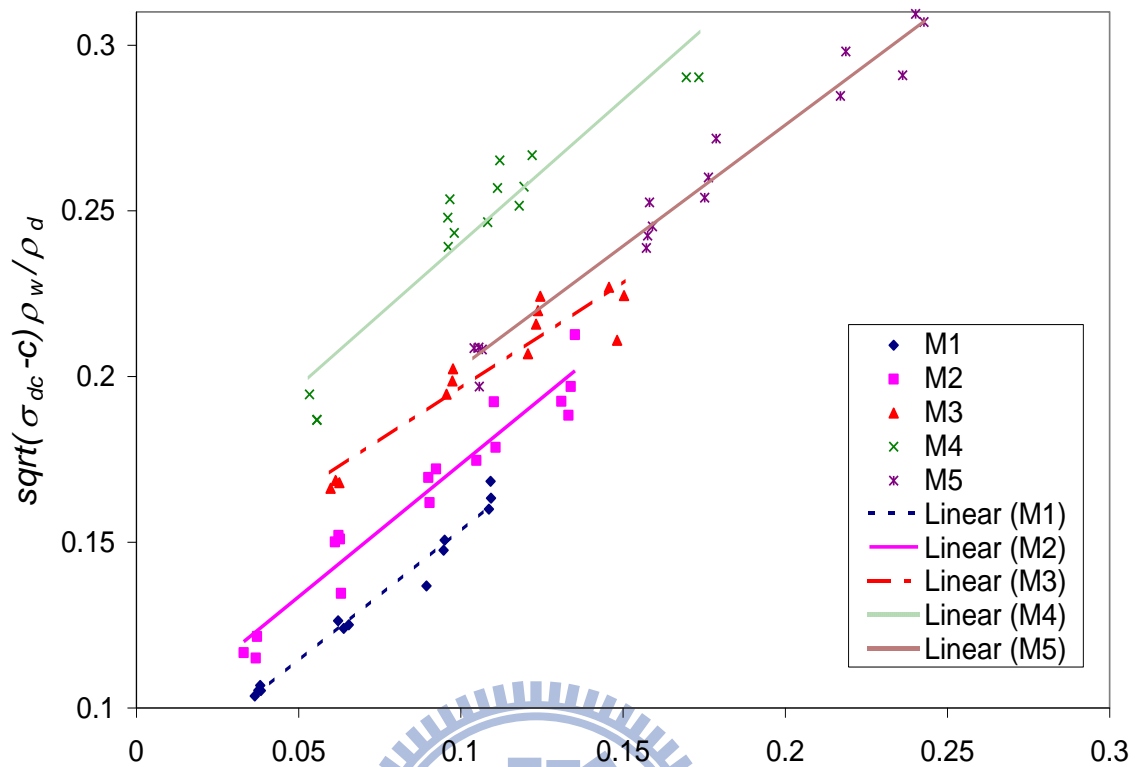


圖 2-8 不同土壤種類其 $(\sqrt{\sigma_{dc}-c}) \rho_w / \rho_d$ 與 w 之關係(Lin,1999)

根據上述導電度與含水量經驗式或經由假設模型所推導出理論式與經驗式可觀察出，導電度與含水量、乾密度間皆具有正相關，綜合上述結果得其他影響參數有孔隙水導電度、自由水含水量、土壤顆粒導電度、吸附水層導電度、吸附水層含水量、滲流路徑、土壤種類等等參數。

2.2 ASTM D6780 TDR 量測技術介紹

2.2.1 碾壓土壤電學性質量測：時域反射法(TDR)

時域反射法 (Time Domain Reflectometry)，簡稱 TDR，是一種使用電磁波進行監測、探查的方法。其基本原理類似於雷達，由脈衝電磁波製造器產生一脈衝電磁波進入同軸電纜，再由示波器紀錄因電纜阻抗不連續所造成電磁波反射的訊號。電纜阻抗則是由電纜之斷面幾何與電纜正、負極間絕緣介質所決定，因此，時域反射法利用傳輸通路上之阻抗 (Impedance) 不連續所造成之反射脈衝電壓改變，紀錄傳輸通路上之介質電學性質變化，或其通路之斷面幾何變形。

時域反射儀(time domain reflectometer, TDR，如圖 2-9 所示)主要由階躍脈衝產生器(step pulse generator)、取樣器(sampler)與示波器(oscilloscope)組成，其基本原理與雷達相同，由階躍脈衝產生器發射一電磁波進入同軸纜線(coaxial cable)及感測器(sensor)所組成電磁波傳輸系統(transmission line system)，由取樣器記錄感測器內阻抗(impedance)不連續所造成反射並顯示於示波器。感測器可為同軸纜線延伸，同時作為訊號傳輸與感測之用，感測器設計主要將感測內材料電學變化轉換成傳輸阻抗變化，如此可藉由反射訊號得知材料電學特性。

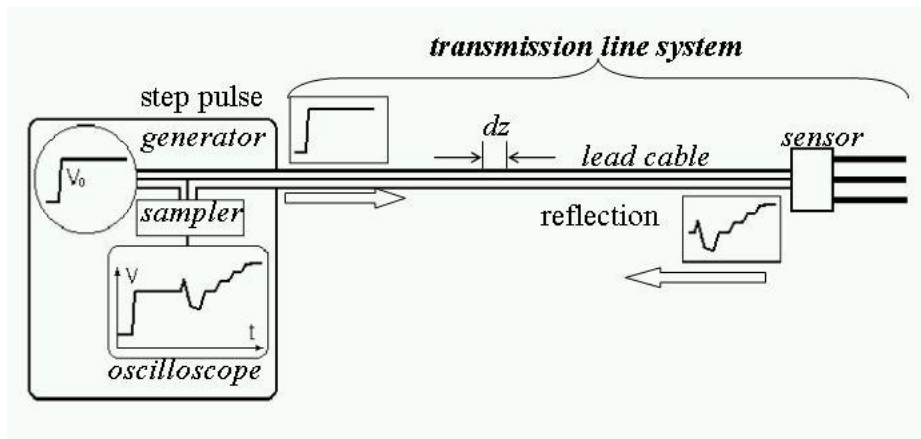


圖 2-9 TDR 量測系統示意圖

利用不同感測器設計與分析方法，TDR 技術可量測不同物理量，依其分析原理可分為界面型、變形型、介電分析型。

界面型式：利用定位 TDR 反射訊號量測例如水位監測(空氣與水界面) (Dowding, et al., 1996)、位移監測 (Lin and Tang, 2005)、沖刷監測 (Yankielun and Zabilansky, 1999)。

變形型式：已知傳輸線組抗由纜線斷面幾何控制，若將纜線埋設於邊坡岩石或土體中，利用傳輸線變形與否監測岩石或土體邊坡位移 (Dowding, 1988; Lin et al., 2009)。

介電分析型式：將待測材料置入幾何固定的感測器內，利用反射訊號走時分析推估與含水量、乾密度相關的視介電度 (Lin et al., 2000)；或利用反射波形穩態值計算材料導電度 (electrical conductivity, EC) (Robinson et al. 2003; Lin, 2003; Lin et al., 2007)。

在介電分析型式之應用上，用於與量測土壤接觸之 TDR 感測器基本有三種常見類型：同軸式 (coaxial)、多棒式 (multiple rod) 以及貫入式 (penetrometer)，不同型式的感測器在空間上有不同的電磁分佈，因而有不同的感測範圍。同軸式感測器如圖 2- 10a 所示，中間的電極棒

被外圍環狀的金屬環所圍繞，其感應區域侷限於內外導體之間；多棒式的感測器如圖 2- 10b 所示，中間的電極棒被外圍均勻分佈的電極棒圍繞，其感應區域大部份在內外電極棒之間，但對於電極棒所包圍區域外的土壤亦具有感應能力；而貫入式之感測器如 c 所示，其僅採用兩支電極棒，中間以非導體填充絕緣，其電磁波向兩側逸散，兩極之電磁波波場並不形成封閉的空間範圍。不同的感測器類型因上述之不同電磁波波場分佈特性以及其幾何形狀差異之而有其不同的適用情形，一般而言，同軸式感測器較常見用於室內試驗，而多棒式以及貫入式較常見用於現地試驗之用。

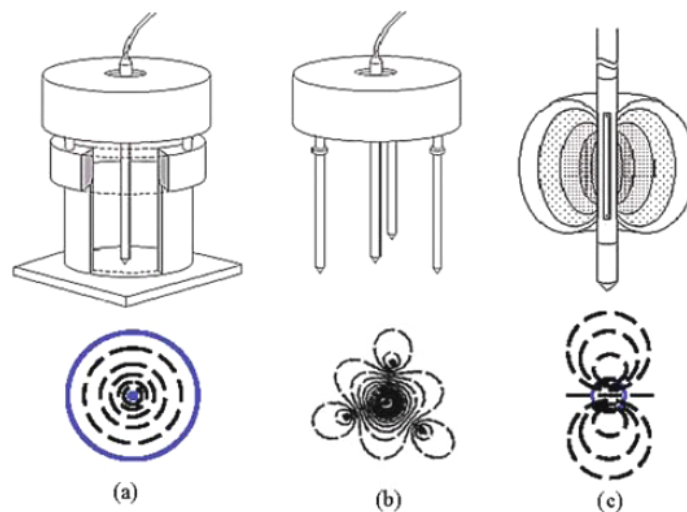


圖 2- 10 TDR 感測器型式: a) 同軸式；b) 多棒式；c) 貫入式
(Lin et al., 2006)

2.2.2 ASTM TDR 實驗儀器

TDR 之標準夯實試驗量測儀器試驗儀器如圖 2- 11 所示，而其中之感測器，於此使用同軸型式之標準夯實模進行，而在夯模中央於量測時將貫入短鋼釘做為內導體，在內外導體成型後於模頂套上鋼套環並置上 TDR 感測器轉接蓋即完成一組 TDR 同軸感測器，感測器完成

圖如圖 2- 12 所示。根據 ASTM D698 室內實驗規範，其使用之圓柱金屬模：直徑 4 英吋、高 4.58 英吋，並附德爾林底板及延伸套環；而其標準夯實試驗儀器主要有圓柱金屬模與標準式夯錘。標準式夯錘：直徑 2 英吋重 5.5lb，夯錘附外套管，以控制 12 英吋落距。



圖 2- 11 TDR 標定量測儀器



圖 2-12 介電度量測試驗用之 TDR 同軸感測器

2.2.3 TDR 視介電度量測分析

TDR 所得之典型反射波形如圖 2-13 所示，在 t_{cable} 處為電磁波自感測器在空氣與土壤的交界面的反射，當經過 t_0 的時間後，可得到電磁波自感測器尾端所反射回之訊號，若已知感測器在土中之長度為 L ， t_0 即為電磁波的來回走時，由此便可得到電磁波在土中之波速，再將其與光速相比，則其視介電常數 Ka 可以下式獲得：

$$Ka = \left(\frac{V_c t_0}{2L} \right)^2 \dots\dots\dots (2-22)$$

其中， V_c 為光速， L 為感測器與土壤接觸的長度。

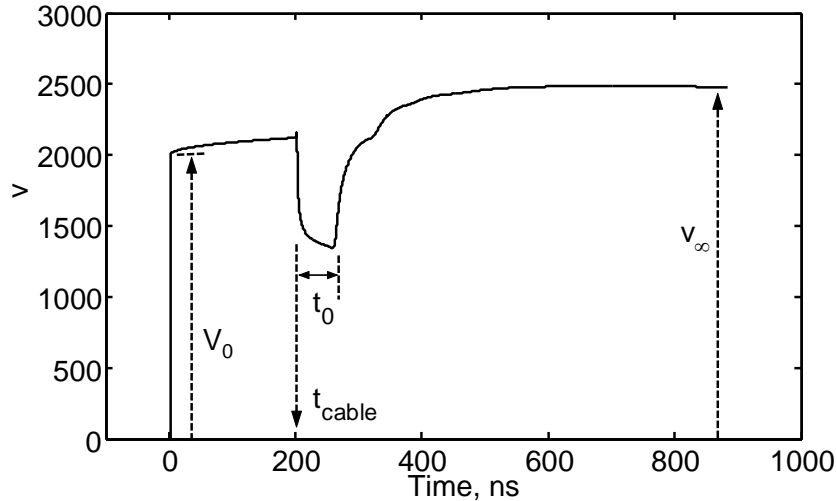


圖 2-13 典型 TDR 量測波形

電磁波來回走時 t_0 的計算是於時間域上進行，其主要是需決定感測器進入土壤界面之 t_{cable} 位置以及感測器終點之位置的時間差。 t_{cable} 位置之決定時，因感測器與土壤之阻抗有明顯差異，波形在其進入土壤之位置會有明顯下降，因此可以波形之最大正反射處做為 t_{cable} (如圖 2-14 所示)，而在決定感測器終點位置時，較常見者可採用雙切線法 (dual tangent method, Topp et al., 1980) 以及單切線法 (Baker and Allmaras, 1990)。雙切線法之做法是以 TDR 量測波形之上升段前的區域極小值兩側的切線相交會處做為感測器終點 (如圖 2-14 點 a 處所示)，此方法中之切線於 TDR 上升段側可以其最大斜率處之切線定之，而在另一側之切線位置便不易有明確的定義 (Chung and Lin, 2009)。單切線法為解決此一問題以增加分析自動化之目標，其採用 TDR 波形上升段側最大斜率處之切線與 TDR 波形上升段前之區域極小值處的水平切線交會點做為感測器終點 (如圖 2-14 點 b 處所示)。

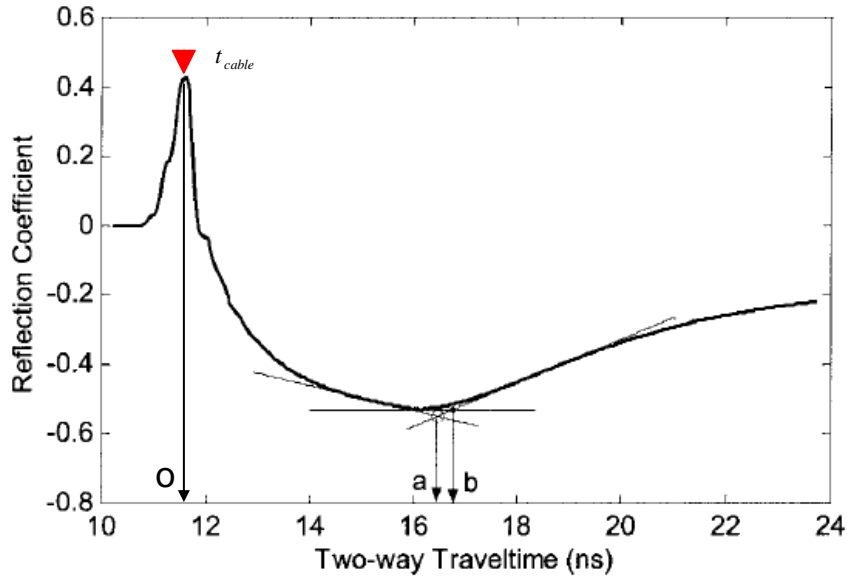


圖 2- 14 TDR 視介電度走時分析法示意圖(Lin, 2003)

2.2.4 TDR 導電度量測分析

由圖 2- 13 之 TDR 訊號波形以時間域分析除可獲得土壤之視介電常數外，還可由 TDR 訊號之初始電壓 V_0 以及穩態電壓 V_f 獲得土壤之導電度 (bulk electrical conductivity, EC)，其關係式為 (Giese and Tiemann, 1975)

$$EC = K_p \left(\frac{2V_0}{V_\infty} - 1 \right) \dots\dots\dots (2- 23)$$

其中， K_p 為感測器形狀參數，與感測器之幾何形狀有關； V_0 為 TDR 訊號之初始電壓(如圖 2- 13 所示)； V_∞ 為 TDR 訊號之穩態電壓。對於同軸感測器， K_p 可以下式計算之：

$$K_p = \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi L_{insitu} R_s} \dots\dots\dots (2- 24)$$

其中， d_o 為同軸感測器外導體之內徑； d_i 為內導體之外徑； L_{insitu} 為感測器在土表面以下之長度； R_s 為 TDR 脈衝波產生器的內部特徵阻抗。

2.2.5 ASTM D6780 雙步驟法

TDR 透過將可容電磁波在其中傳遞之感測器與土壤相接合，藉由分析傳遞於感測器中電磁波脈衝於的反射波形，可得到電磁波於土壤中的電磁波速，該電磁波速較真空中之電磁波速為慢，減慢的程度與土壤中之含水量有關，因此透過兩者之比值(介電常數)可推得土壤中之含水量。

學者 Topp et al.(1980)由實驗結果提出土壤之視介電常數與土壤之體積含水量關係，其中提到 K_a 為視介電常數，該常數由 TDR 所得之波形求得。TDR 所得之典型反射波形如圖 2-15 所示，在 t_{cable} 處為電磁波自感測器在空氣與土壤的交界面的反射，當經過 t_0 的時間後，可得到電磁波自感測器尾端所反射回之訊號，若已知感測器在土中之長度為 L ， t_0 即為電磁波的來回走時，由此便可得到電磁波在土中之波速，再將其與光速相比，則其視介電常數 K_a (apparent dielectric constant)可以(2-22)式獲得。

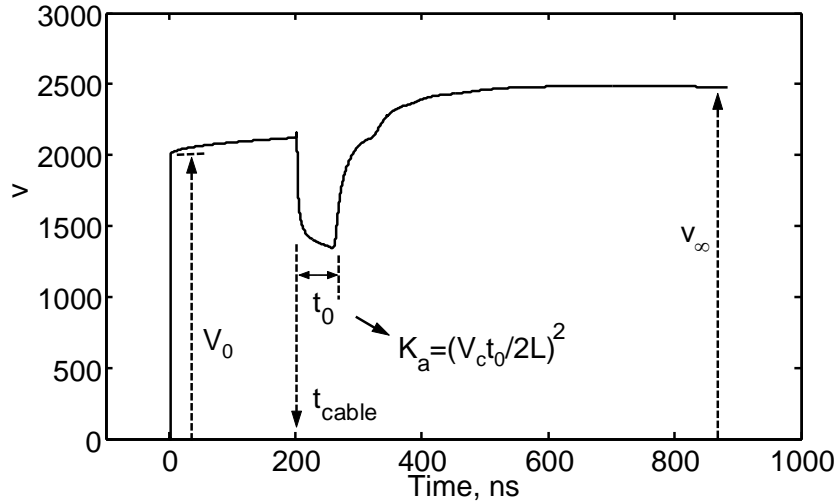


圖 2-15 TDR 現地含水量與密度量測訊號

Siddiqui and Drnevich(1995)利用土壤乾密度 ρ_d 對視介電常數進行正規化後，以其對土壤重量含水量 w 之關係進行描述：

$$\frac{\sqrt{K_a \rho_w}}{\rho_d} = a + bw \dots\dots\dots (2-25)$$

其中， a 以及 b 為標定參數， ρ_w 為水之密度。因(2-25)式含有土壤乾密度，無法直接於現場使用獲得重量含水量。若有一相同重量含水量之相同土壤土樣，已知其 a, b 標定參數、濕密度 ρ_t 且利用 TDR 量測得其視介電常數為 K_{a2} ，則利用(2-25)式可得

$$\frac{\sqrt{K_{a2} \rho_w}}{\rho_{d2}} = a + bw \dots\dots\dots (2-26)$$

其中， ρ_{d2} 為土樣乾密度，又

$$\rho_{d2} = \frac{\rho_t}{1+w} \dots\dots\dots (2-27)$$

聯立解(2-25)式、(2-26)式以及(2-27)式可得

$$\omega = \frac{\sqrt{K_{a2}} - \frac{a\rho_t}{\rho_w}}{\frac{b\rho_t}{\rho_w} - \sqrt{K_{a2}}} \dots\dots\dots (2-28)$$

$$\rho_d = \frac{\sqrt{K_a}}{\sqrt{K_{a2}}} \times \frac{\rho_t}{1+w} \dots\dots\dots (2-29)$$

同時得到現地土壤之重量含水量以及乾密度。此作法成為 ASTM D6780 中使用 TDR 進行含水量以及乾密度量測之雙步驟法(procedure A)理論基礎。

雙步驟法現地實際量測時，將 TDR 感測器貫入現地土壤中，如圖 2- 16 所示，使用同軸纜線將 TDR 感測器與 TDR 主機連接後，打出電磁脈衝紀錄反射波形，使用(2- 22)式計算視介電常數 K_{afield} 。接著將現地感測器所圍起之土壤以適當工具取起，置入特定模具之中，略為夯實使土壤均勻分佈於模具後將 TDR 感測器貫入模具中，進行 TDR 訊號量測(如圖 2- 17a 所示)，採用(2- 22)式分析可得模具中之視介電常數 K_{amold} 。另外將模具含土樣進行秤重(如圖 2- 17b 所示)，進行模具中土壤之濕密度 $\rho_{t,mold}$ 量測。

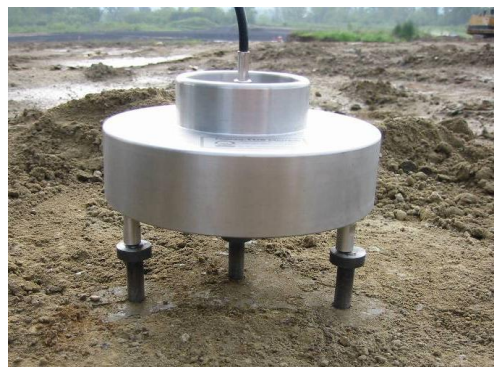
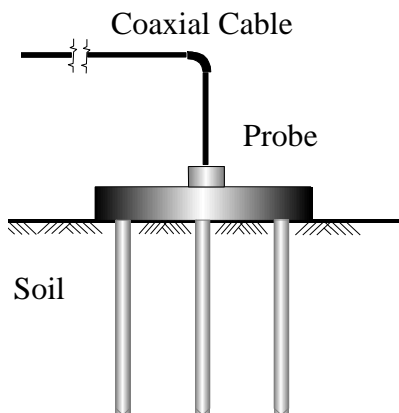


圖 2- 16 TDR 感測器現場安置示範圖

a)



b)



圖 2- 17 TDR 感測器現場安置示範圖

於量測 TDR 的同時，使用溫度計量測土壤之溫度，利用(2- 30) 式對 Ka_{field} 進行溫度修正，使其修正為 $20^{\circ}C$ 之值：

$$Ka_{mold,20^{\circ}C} = Ka_{mold,T^{\circ}C} \times TCF \dots\dots\dots (2- 30)$$

其中， $TCF = 0.97 + 0.0015T^{\circ}C$

for 無凝聚力土壤 $4^{\circ}C \leq T^{\circ}C \leq 40^{\circ}C$

$$= 1.10 - 0.005T^{\circ}C$$

for 凝聚力土壤 $4^{\circ}C \leq T^{\circ}C \leq 40^{\circ}C$

第二步驟可求得取樣土壤於模具內的體積含水量與濕密度，進而得到與現地相同的重量含水量 ω_{field}

$$\omega_{field} = \omega_{mold} = \frac{\sqrt{Ka_{mold,20^{\circ}C}} - \frac{a\rho_{t,mold}}{\rho_w}}{\frac{b\rho_{t,mold}}{\rho_w} - \sqrt{Ka_{mold,20^{\circ}C}}} \times 100 \dots\dots\dots (2- 31)$$

其中， ρ_w 為水之密度(1000kg/m^3)， a 與 b 為土壤標定常數。由第一步驟之視介電度與第二步驟之重量含水量，可求得現地乾密度 $\rho_{d,field}$

$$\rho_{d,field} = \frac{\sqrt{Ka_{field}}}{\sqrt{Ka_{mold}}} \times \frac{\rho_{t,mold}}{1 + \frac{\omega_{mold}}{100}} \dots\dots\dots (2-32)$$

2.2.6 ASTM D6780 單步驟法

由圖 2-15 之 TDR 典型訊號波形除可獲得土壤之視介電常數外，還可由 TDR 訊號之初始電壓 V_0 以及穩態電壓 V_f 獲得土壤之導電度 (bulk electrical conductivity, σ_{dc})，其關係式為(Giese and Tiemann, 1975)

$$\sigma_{dc} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{2V_0}{V_f} - 1 \right) \dots\dots\dots (2-33)$$

其中， C_p 為感測器參數， V_0 為 TDR 訊號之初始電壓(如圖 2-15 所示)， V_f 為 TDR 訊號之穩態電壓。根據多位學者(White et al., 1994; Feng et al., 1999; Lin, 1999; Hilhorst, 1998)研究顯示，土壤之重量含水量與其導電度相關，其關係可以經驗式進行描述

$$\sqrt{\sigma_{dc}} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + d\omega \dots\dots\dots (2-34)$$

若聯立求解(2-25)式以及(2-34)式可得

$$\omega = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{\sigma_{dc}}}{b\sqrt{\sigma_{dc}} - d\sqrt{K_a}} \dots\dots\dots (2-35)$$

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{\sigma_{dc}}}{ad - cb} \rho_w \dots\dots\dots (2-36)$$

如此似乎可不需採用額外之土樣獲得訊息即可求得現地含水量以及乾密度。然而，事實上若直接採用此一計算式，其誤差將過大而無法提供滿足對於含水量以及乾密度的控制需求 (Yu and Drnevich, 2004)，而造成誤差過大之因素在於土壤導電度與其孔隙水導電度相關，室內標定用之水樣與現場不符時將成為主要的誤差來源，因此需另尋解決之道。

在(2-25)式以及(2-34)式中皆有土壤重量含水量 w 項，將(2-25)式整理後代入(2-34)式中之 w 可得：

$$\sqrt{\sigma_{dc}} = \frac{b \cdot c - a \cdot d \frac{\rho_d}{\rho_w} + \frac{d}{b} \sqrt{K_a}}{b} \dots\dots\dots (2-37)$$

可令

$$f = \frac{b \cdot c - a \cdot d \frac{\rho_d}{\rho_w}}{b} \dots\dots\dots (2-38)$$

$$g = \frac{d}{b} \dots\dots\dots (2-39)$$

則(2-23)式可改寫為

$$\sqrt{\sigma_{dc}} = f + g\sqrt{K_a} \dots\dots\dots (2-40)$$

Yu and Drnevich(2004)認為透過室內實驗對(2-40)式進行 f 以及 g 的標定可以使得現場土壤與室內標定孔隙水導電度不同所造成之誤差大為降低，將其用於(2-35)式以及(2-36)式中即可獲得有效的含水

量以及乾密度結果，此作法即為 ASTM D6780 中使用 TDR 進行含水量以及乾密度量測之單步驟法(procedure B)理論基礎。

單步驟法現地施測與雙步驟法相似，唯一差別即為省去使用同軸夯模量測之步驟，將 TDR 感測器貫入現地土壤中，如圖 2- 16 所示，使用同軸纜線將 TDR 感測器與 TDR 主機連接後，打出電磁脈衝紀錄反射波形。可得 TDR 現場量測所得之典型反射波形如圖 2- 15 所示，而後使用(2- 22)式計算視介電常數 Ka_{field} ，再採以(2- 30)式進行溫度修正，獲得修正後視介電常數 $Ka_{field, 20^{\circ}C}$ ，則現地含水量 ω_{field}

$$\omega_{field} = \frac{c\sqrt{Ka_{field, 20^{\circ}C}} - a\sqrt{EC_{adj}}}{b\sqrt{EC_{adj}} - d\sqrt{Ka_{field, 20^{\circ}C}}} \dots\dots\dots (2- 41)$$

其中，

$$EC_{adj} = \left(f + g\sqrt{Ka_{field, 20^{\circ}C}} \right) \dots\dots\dots (2- 42)$$

a、b、c、d、f、g 為標定常數。而現地乾密度 $\rho_{d,field}$

$$\rho_{d,field} = \frac{d\sqrt{Ka_{field, 20^{\circ}C}} - b\sqrt{EC_{adj}}}{ad - cb} \dots\dots\dots (2- 43)$$

2.2.7 雙步驟法與單步驟法參數標定

採用上述 TDR 技術進行現地含水量及乾密度量測需進行參數標定之工作，若依照雙步驟法進行，僅需參數 a,b，若依照單步驟法進行，則須 a,b,c,d,f,g 六個參數。各參數之標定方法如下：

- (1). 採取現場土樣使其足夠五組試體量(約 20 公斤)。

(2). 使現場土樣風乾後敲碎過四號篩，調配土樣成五組不同含水量，且該五組含水量可涵蓋最佳含水量以及現場預計含水量。

(3). 依照上述說明利用 TDR 量測各組之視介電度 $K_{a,mold}$ 以及導電度 EC_{mold} ，並利用烘乾秤重法量取含水量以及乾密度 ρ_d 。

A、參數 a, b

(4). 將各試體所得之結果如圖 2- 18 繪出，水平軸是為重量含水量，垂直軸是為 $\sqrt{K_{a,mold}} \rho_w / \rho_d$ (其中， ρ_w 為水的密度， 1000kg/m^3)，將其進行線性迴歸後，該迴歸線於垂直軸上之截距即為 a 參數，其斜率即為 b 參數。

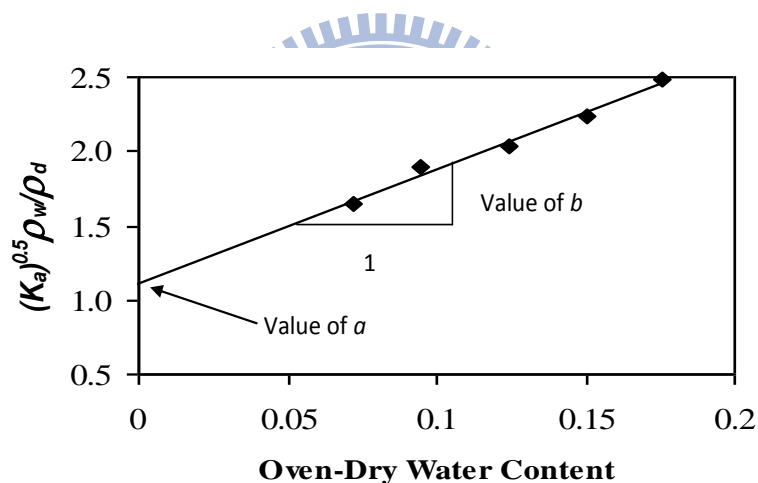


圖 2- 18 a, b 參數標定說明圖(例)

B、參數 c, d

(5) 將各試體所得之結果如圖 2- 19 繪出，水平軸是為重量含水量，垂直軸是為 $\sqrt{EC_{mold}} \rho_w / \rho_d$ (其中， ρ_w 為水的密度， 1000kg/m^3)，將其進行線性迴歸後，該迴歸線於垂直軸上之截距即為 c 參數，其斜率即為 d 參數。

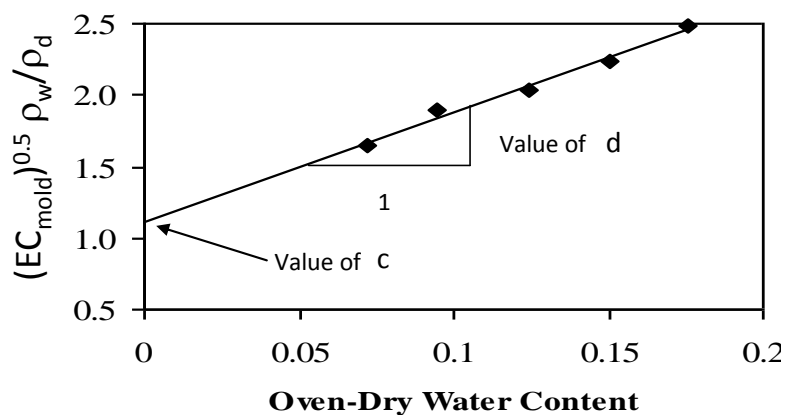


圖 2-19 c, d 參數標定說明圖(例)

C、參數 f, g

(6) 將各試體所得之結果如圖 2-20 繪出，水平軸是為 $\sqrt{K_{a,mold}}$ ，垂直軸是為 $\sqrt{EC_{mold}}$ ，將其進行線性迴歸後，該迴歸線於垂直軸上之截距即為 f 參數，其斜率即為 g 參數。

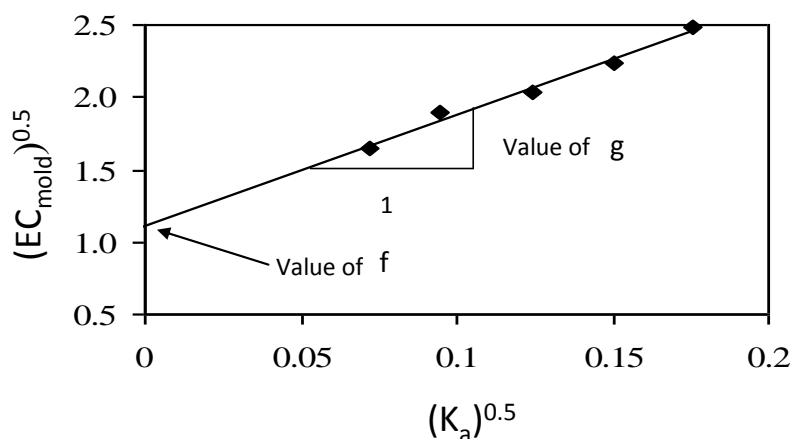


圖 2-20 f, g 參數標定說明圖(例)

根據 ASTM D6780 之描述，以上述之 TDR 量測技術所獲得之含水量與乾密度較適用於土壤粒徑大於 19mm 的重量百分比小於或等於 30% 之非凍結土壤，對於有機質含量較高之有機土或高塑性之黏土所產生之誤差較高。

三、研究方法

3.1 研究問題與研究流程

根據第二章文獻回顧顯示，利用土壤電學性質之 TDR 技術確實具有極佳之潛力成為可替代核子密度儀之量測技術，惟實際上 ASTM D6780 量測技術之量測準確度與誤差來源並不明瞭，本研究將對其進行評估與驗證並探討其誤差來源及可能之改善方案。

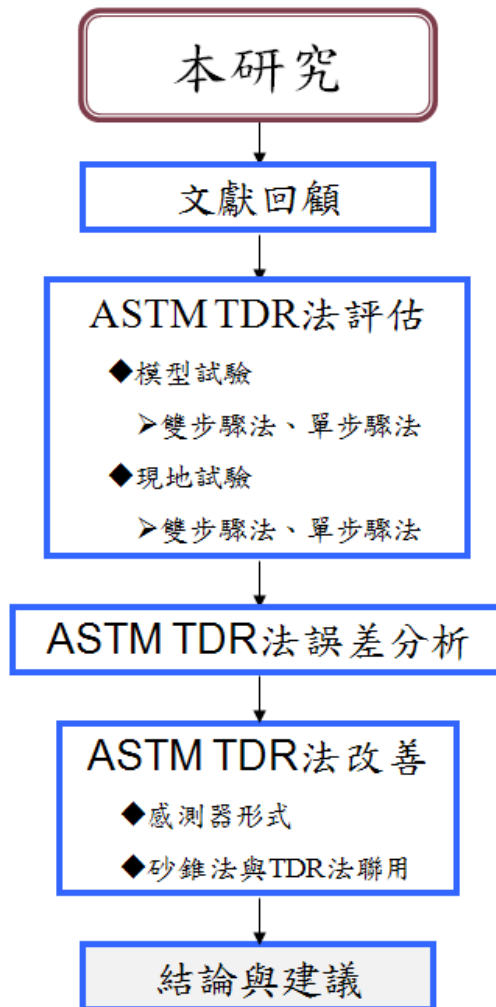


圖 3-1 研究流程圖

本研究之研究方法流程如圖 3-1 所示，研究中在介紹 ASTM TDR 法前，將先對於土壤電學性質之行為進行文獻回顧，以便提供足夠之

相關原理對現有技術進行問題評析，根據文獻回顧進行雙步驟法與單步驟法之現地試驗與模擬現地的模型試驗，待實驗結果分析完成後進行誤差來源探討，而後檢討可能之改善方法確定可進一步探討之研究主題，並提出 ASTM D6780 改善方案，最後提出結論與建議。

3.2 ASTM D6780 室內試驗規畫

3.2.1 試驗土樣

為了解不同土壤所可能造成之介電特性的差異，擬進行兩種不同特性土壤之探討，考量本研究將於湖山水庫進行現場量測比對，所將進行量測的土壤將有可能是為心層與殼層用土，因此為可使所發展之量測技術可適用於此兩種不同特性的土壤，擬採用與其相類似之土壤進行，經挑選後採用新竹寶山第二水庫粉質砂土、高嶺土以及現地的湖山水庫主壩土進行探討，其土壤性質說明如下：

1. 寶山第二水庫粉質砂土(寶二土)

寶山第二水庫粉質砂土是新竹寶山第二水庫庫區砂岩將其碾碎成粉質砂土後使用(後續以寶二砂土稱之)，其比重為 2.63，粒徑分佈曲線由篩分析試驗得知結果如圖 3-2 所示，根據粒徑分佈曲線可以得知 200 號篩通過百分率介於 5 至 12 之間， D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60} 分別為 0.080、0.170、0.205，均勻系數 C_u 為 2.56，級配系數 C_c 為 1.76，根據統一土壤分類法，本土壤為不良級配砂(SP)；再針對本砂土細粒部分進行阿太堡試驗得到液性限度(LL)為 29、塑性指數(PI)為 6，根據篩分析試驗與阿太堡之試驗結果，本實驗砂土土樣為統一土壤分類法分類中粉土質不良級配砂(SP-SM)。

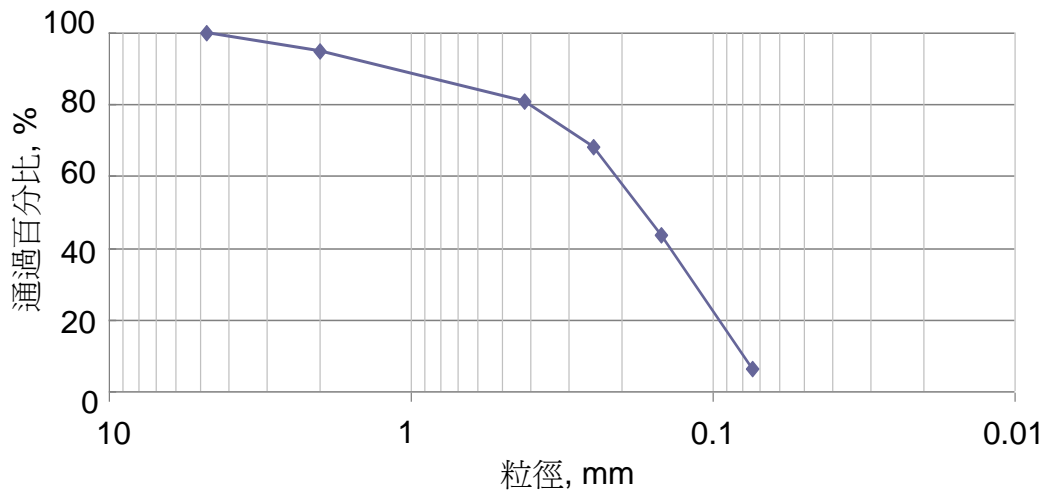


圖 3-2 寶山第二水庫粉質砂土之粒徑分佈曲線

此外，採用五組不同含水量將寶二砂土試體進行標準夯實試驗，所得之夯實曲線如圖 3-3 所示，由圖中可知試驗用寶二砂土最佳含水量 $OMC=13\%$ ，最大乾單位重 γ_{dmax} 為 17.3kN/m^3 。

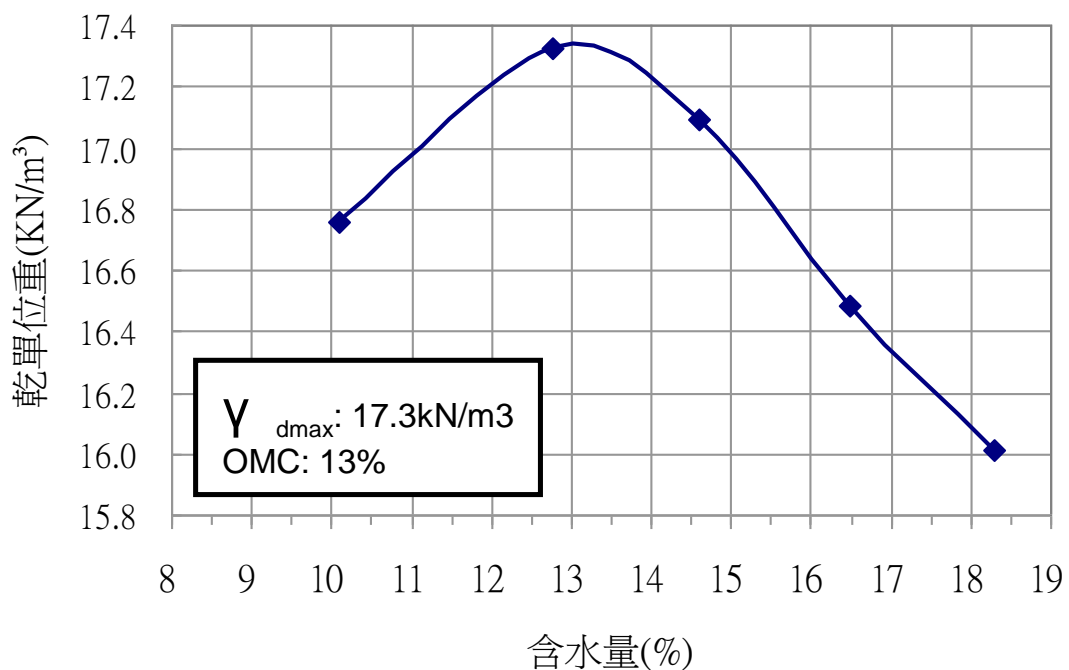


圖 3-3 寶山第二水庫粉質砂土之夯實曲線

2. 高嶺土

高嶺土為含水之鋁矽酸鹽礦物，多由長石、雲母或其他鋁矽酸鹽類礦物，經熱水的變化風化而來。本研究中所使用之高嶺土其粒徑分佈如圖 3-4 所示，其通過#200 號篩(0.075mm)者佔約 98%，通過#200 號篩者使用雷射粒徑分析儀進行分析，粒徑主要分佈於 0.003 至 0.04 公釐之間， D_{50} 為 0.006 公釐。由阿太堡試驗所得到之高嶺土液性限度 (LL) 及塑性限度 (PL) 分別為 48.2 與 29.4，採用統一土壤分類法，其分類為低塑性之黏土(CL)。

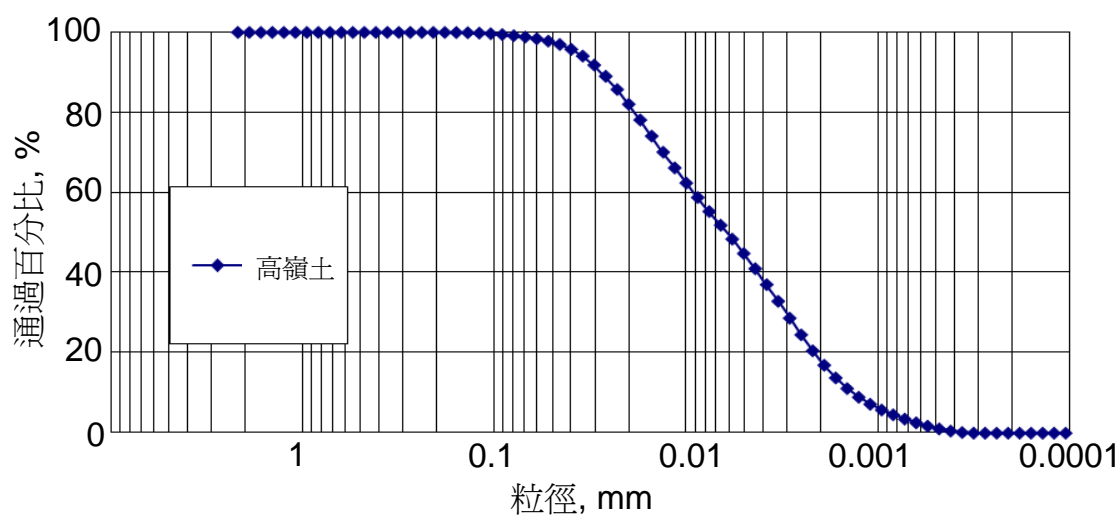


圖 3-4 高嶺土之粒徑分佈曲線

此外，採用六組不同含水量將高嶺土試體進行標準夯實試驗，所得之夯實曲線如圖 3-5 所示，由圖中可知試驗用高嶺土最佳含水量 $OMC=28.3\%$ ，最大乾單位重 γ_{dmax} 為 $13.4kN/m^3$ 。

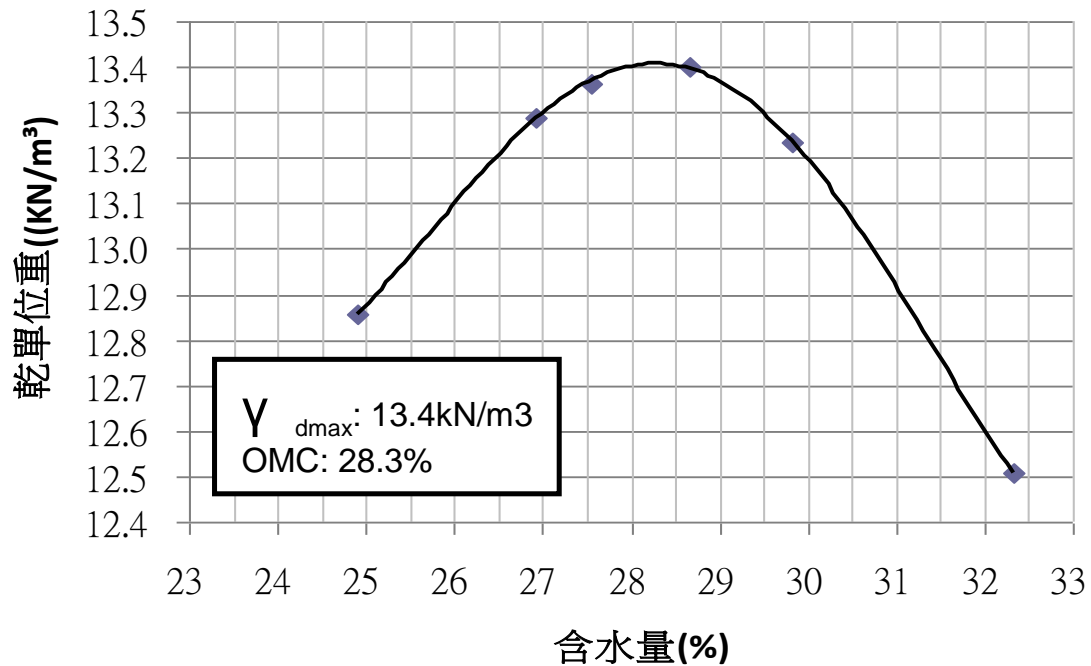


圖 3-5 高嶺土之夯實曲線

3. 湖山土(湖山水庫主壩土)

本研究中所使用湖山土在湖山水庫築擋水壩處取回之土樣(後續以湖山壩土稱之)，土質偏砂偶夾有泥岩碎屑，其比重為 2.69，其粒徑分佈如圖 3-6 所示，其通過#200 號篩(0.075mm)者佔約 18%，通過#200 號篩者使用雷射粒徑分析儀進行分析。根據篩分析與粒徑分析結果粒徑分布曲線過， D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60} 分別為 0.002、0.146、0.47，均勻系數 C_u 為 23.5，級配系數 C_c 為 2.27，根據統一土壤分類法，此外由阿太堡試驗所得到之高嶺土液性限度 (LL) 及塑性限度 (PL) 分別為 22 與 16，採用統一土壤分類法，其分類為砂質粉土質黏土 (SC-SM)。

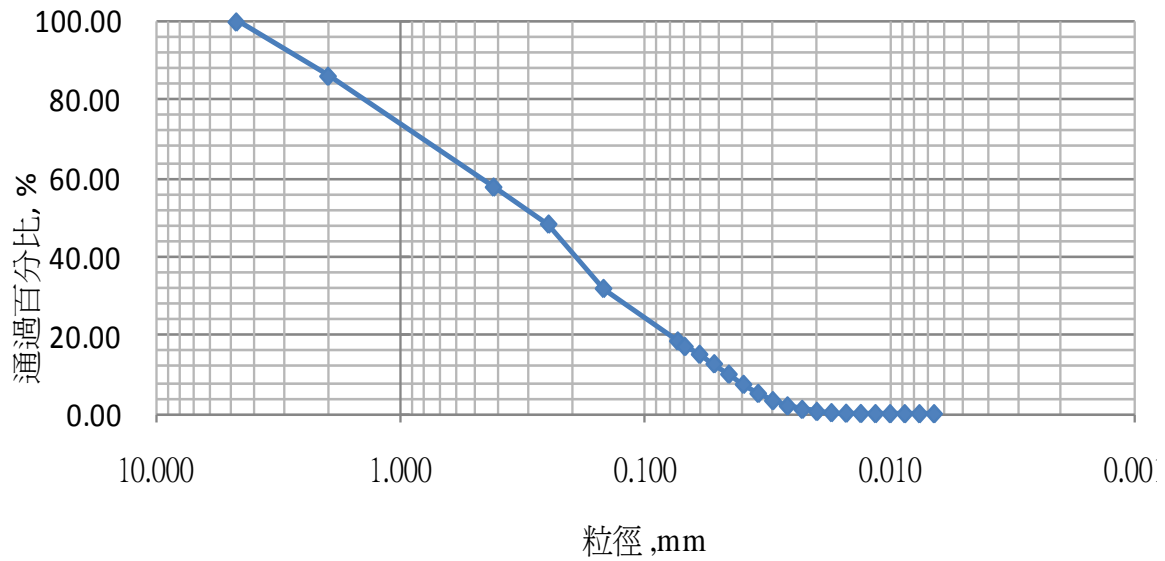


圖 3-6 湖山土之粒徑分佈曲線

此外，採用五組不同含水量將湖山土試體進行標準夯實試驗，所得之夯實曲線如圖 3-7 所示，由圖中可知試驗用湖山土最佳含水量 $OMC=13.4\%$ ，最大乾單位重 γ_{dmax} 為 17.82kN/m^3 。

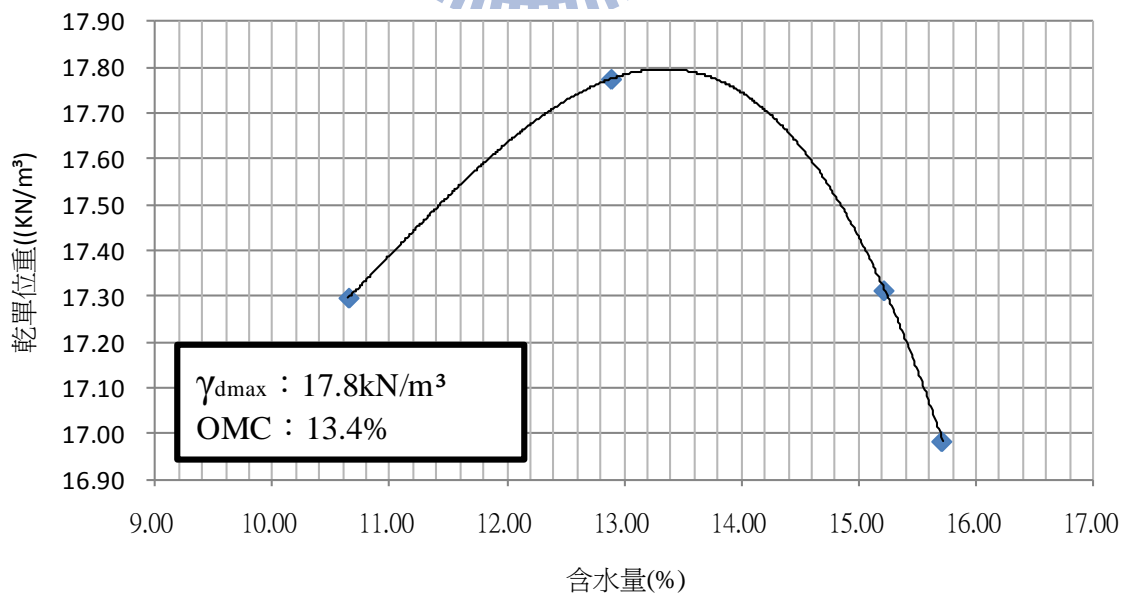


圖 3-7 湖山土之夯實曲線

3.2.2 試驗儀器

本研究所使用的量測儀器是採用 TDR 量測系統，其可概括分為五個部分，分別是 1.感測器，2.時域反射儀(TDR)，3.資料擷取器(datalogger)，4.資料儲存器(storage)，5.電源供應系統(power supply)。於進行量測系統建置時，將選擇適當現地使用且較為穩定之產品將其進行整合，各儀器元件於整合中之相互關係如圖 3- 9 所示。TDR 量測主機採用美國 Campbell 公司所生產的 TDR100 (如圖 3- 8 所示)，並搭配具有嵌入式系統之資料擷取器，資料擷取器內控制軟體使用 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)來進行波形擷取與分析(如圖 3- 10 所示)。

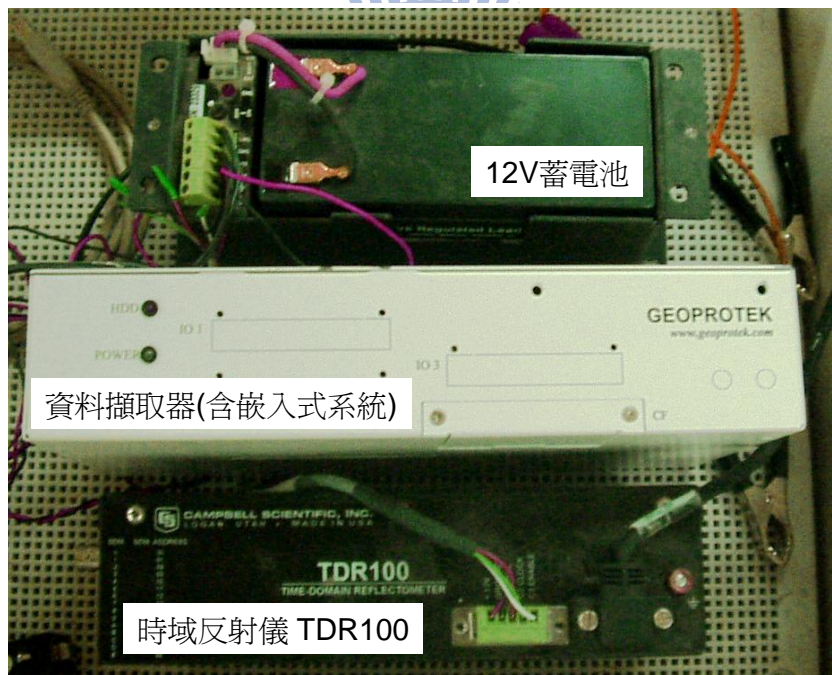


圖 3- 8 TDR 量測系統實體圖

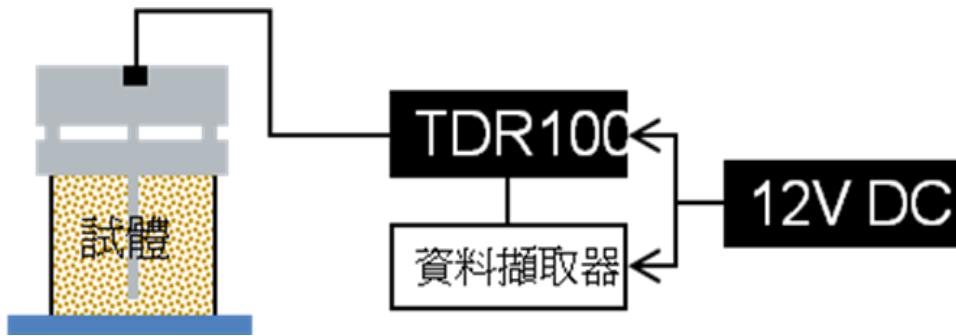


圖 3- 9 TDR 量測系統架構圖

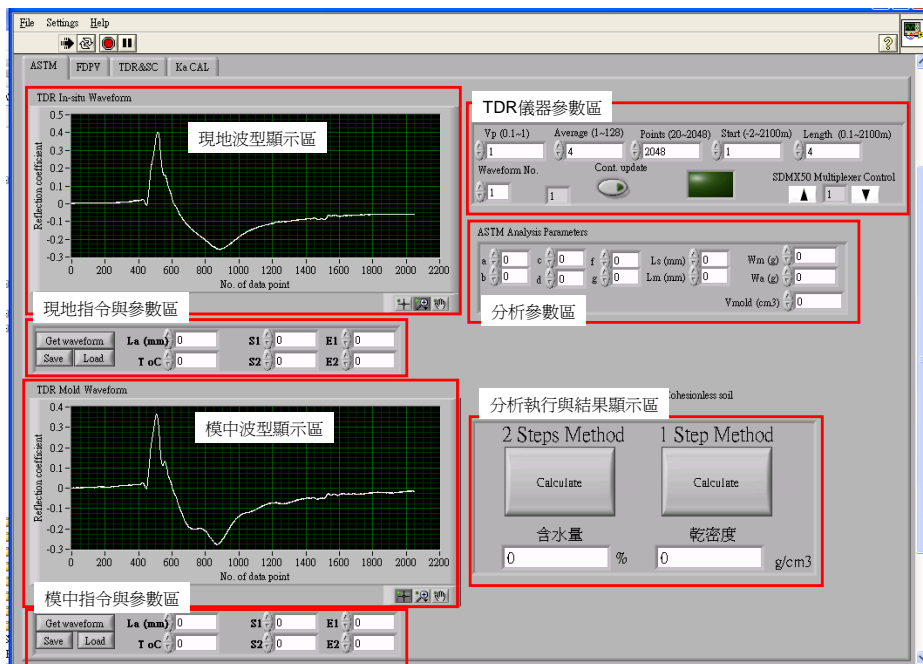


圖 3- 10 TDR 量測儀控軟體：ASTM D6780 含水量與乾密度量測分析

3.3 ASTM D6780 量測準確度評估試驗規畫

3.3.1 ASTM D6780 現地實驗儀器與實驗步驟

TDR 之標準夯實試驗量測儀器試驗儀器如圖 3- 12 所示，而其中同軸型式之感測器，在均勻夯實後，在夯模中央於量測時將貫入長鋼釘(249mm)做為內導體，在內外導體成型後於模頂套上鋼套環並置上 TDR 感測器轉接蓋即完成一組現地 TDR 同軸感測器，感測器完成圖

如圖 3- 13 所示。多棒式(MRP)感測器則為四根鋼釘，首先使用現地 MRP 模具放置在平整地面上，再將四根鋼釘貫入地底，將模具拆除後，將 TDR 感測器轉接蓋放上四根鋼釘上，即完成一組現地 MRP 感測器。

根據 ASTM D698 現地實驗規範，其使用之圓柱金屬模：直徑 4 英吋、高 9.168 英吋，並附德爾林底板及延伸套環，其 ASTM D6780 現地實驗感測器其他細部尺寸如圖 3- 11 所示之說明；而其夯錘使用標準夯實試驗儀器夯錘，主要有圓柱金屬模與標準式夯錘。標準式夯錘：直徑 2 英吋重 5.5lb，夯錘附外套管，以控制 12 英吋落距。現地試驗所使用 ASTM TDR 量測系統與 3.2.2 小節介紹之 TDR 量測系統相同。

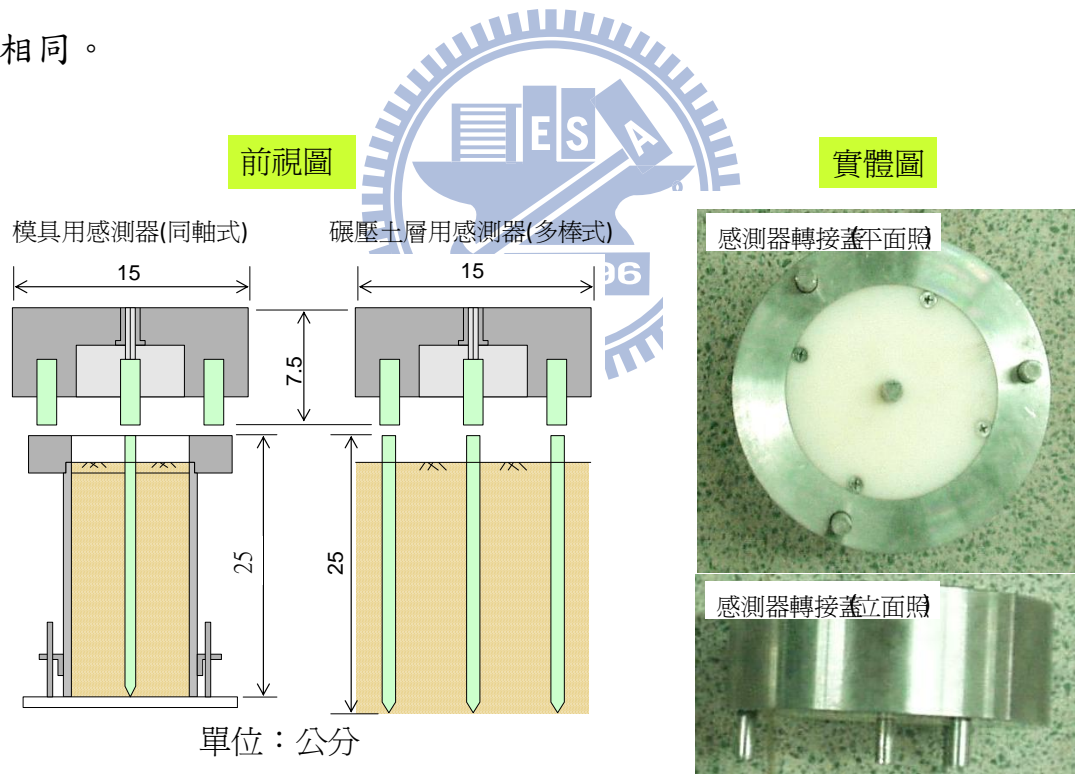


圖 3- 11 ASTM D6780 實驗儀器設計圖與感測器轉接蓋實體圖



圖 3- 12 現地實驗儀器



圖 3- 13 現地實驗同軸感測器

ASTM D6780 現地實驗有雙步驟法與單步驟法，其雙步驟法試驗流程如圖 3- 14，此外，量測雙步驟法的同時，即可進行單步驟法分析，因此現地試驗規畫皆以雙步驟法試驗流程來進行

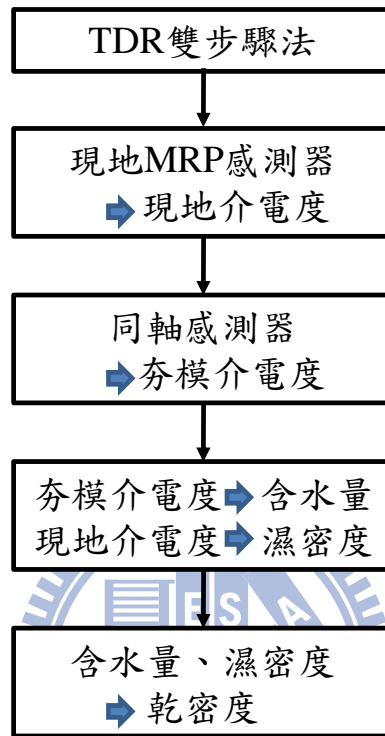


圖 3- 14 雙步驟法試驗流程

雙步驟法是分成兩個階段，分別為現地 MRP 量測與同軸量測，採用不同的感測器分別對現地與夯模內土壤量測視介電度，透過分析可以得現地含水量與乾密度，其試驗步驟如下：

MRP 感測器量測：

- (1) 先將地上刮平，並以水準尺檢查地面平整性。
- (2) 將現地 MRP 模具放置平整地面，並將四根鋼釘打入地裡，打鋼釘時需先釘入外圍三支鋼釘後，再將中間的鋼釘貫入。
- (3) 確定四根鋼釘平整後將 TDR 感測器轉接蓋放上四根鋼釘

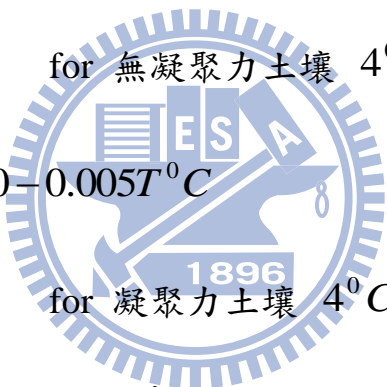
上，置上 TDR 感測器轉接蓋，確定四根鋼釘接觸良好後，使用 50 歐姆之延長纜線將 TDR 感測器轉接蓋與 TDR100 連接。

(4) 進行 TDR 波形擷取，每一次量測皆收錄 3 次以做為平均值，將 TDR 感測器轉接蓋提起後量測鋼釘長度後以單切線法(詳見 2.1.2 說明)，量測波形以(2- 22)式進行現地視介電 Ka_{field} 分析。

(5) 量測現地溫度 T_{field} ，進行 Ka_{field} 溫度修正為 $Ka_{field,20^{\circ}C}$

$$Ka_{field,20^{\circ}C} = Ka_{field} \times TCF \dots\dots\dots(3- 1)$$

其中， $TCF = 0.97 + 0.0015T^{\circ}C$



for 無凝聚力土壤 $4^{\circ}C \leq T^{\circ}C \leq 40^{\circ}C$

$$TCF = 1.10 - 0.005T^{\circ}C$$

for 凝聚力土壤 $4^{\circ}C \leq T^{\circ}C \leq 40^{\circ}C$

(6) 使用拔釘器將 MRP 四支鋼釘拔起，拔起後開始挖除 MRP 量測範圍內的土壤。

同軸感測器量測：

(7) 進行同軸感測器土樣裝填前先試體模稱重 W_m ，將挖出的土壤置入現地同軸夯實模，為使其均勻，分五次將土裝入模中，每次採用標準夯實錘進行 10 次夯實，待刮修平土樣表面使其與模頂齊平後，將土壤及夯實模秤重之，紀錄為夯實模內土壤重量 W_t ，則同軸感測器中土樣之濕密度 $\rho_{t,mold}$ 為

$$\rho_{t,mold} = \frac{W_t - W_m}{V} \dots\dots\dots(3-2)$$

其中， V 為土樣體積，約為 $1/30\text{ft}^3(1903.9\text{cm}^3)$ 。

(8) 將德爾林導蓋扣上夯模頂部，使用銅錘將長鋼釘仔細貫入試體(需避免貫入過程的晃動使短鋼釘與土樣間產生空隙)，務使長鋼釘頂端與德爾林導蓋表面平行後，再將德爾林導蓋取出。

(9) 把鋼套環套上夯模，再置上 TDR 感測器轉接蓋，確定中央導體與長鋼釘接觸良好後，使用 50 歐姆之延長纜線將 TDR 感測器轉接蓋與 TDR100 連接。

(10) 進行 TDR 波形擷取，每一次量測皆收錄 3 次以做為平均值，將 TDR 感測器轉接蓋提起後量測鋼釘長度後以單切線法(詳見 2.1.2 說明)，量測波形以(2-22)式進行現地視介電 Ka_{mold} 分析。

(11) 測現地溫度 T_{mold} ，以(3-1)式進行 Ka_{mold} 溫度修正為 $Ka_{mold,20^\circ C}$ ，則現地之乾密度 $\rho_{d,field}$ 與含水量 ω_{field} 為

$$\omega_{field} = \omega_{mold} = \frac{\sqrt{Ka_{mold,20^\circ C}} - \frac{a\rho_{t,mold}}{\rho_w}}{\frac{b\rho_{t,mold}}{\rho_w} - \sqrt{Ka_{mold,20^\circ C}}} \times 100 \dots\dots\dots(3-3)$$

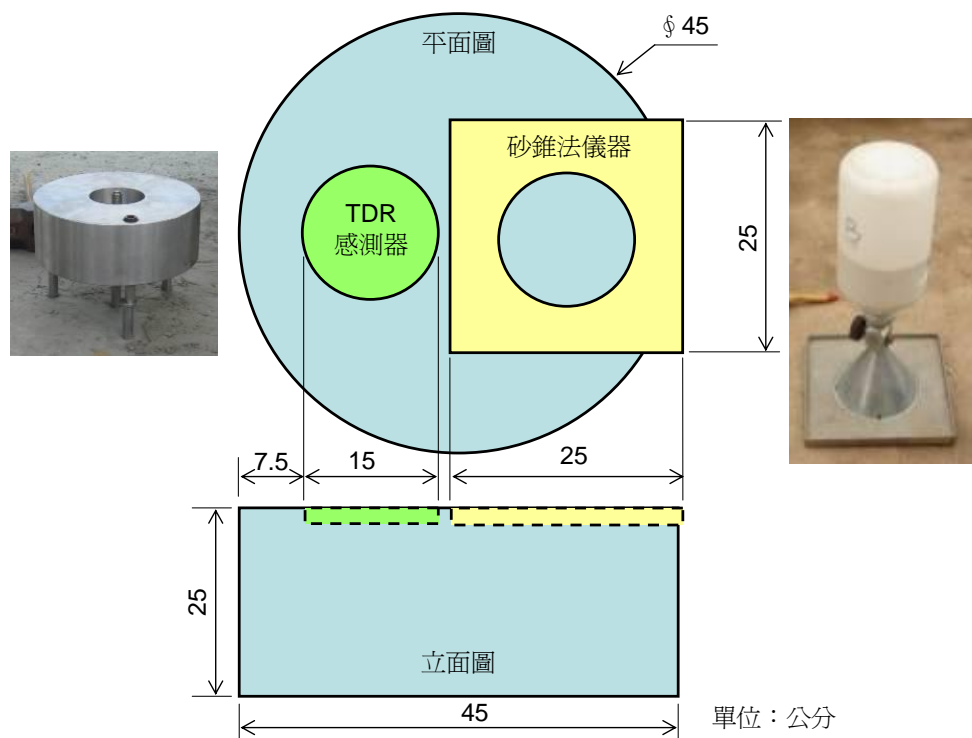
$$\rho_{d,field} = \frac{\sqrt{Ka_{field,20^\circ C}}}{\sqrt{Ka_{mold,20^\circ C}}} \times \frac{\rho_{d,mold}}{1 + \frac{\omega_{mold}}{100}} \dots\dots\dots(3-4)$$

其中， a, b 為標定參數。

3.3.2 模型試驗夯模儀器設計

為使 ASTM D6780 進行室內實驗並進行比對，需建立一可供評估試驗之用的夯實模型系統，其將包括有夯實模、夯實錘以及夯實層厚與夯實次數。模型系統建立之考量，分別說明如下：

夯實模：於夯實模的建立上需決定其形狀與尺寸。在形狀上以可使其便利進行夯實作業，且可較為均勻施作為主，一般是採用圓形斷面；其次，在尺寸上，需考量試驗過程中所將會採用到的各種試驗儀器的大小，以及儀器量測的取樣空間，就本研究而言，將採用傳統之砂錐法做為比較基準，而後與 TDR 量測系統做比較，因此在長寬尺寸上將考量至少可容納砂錐法的底盤而在深度上，將視設計所得之感測器其有效感測深度，以及使用砂錐法時所需取樣的深度而決定，但此高度上限應是現場碾壓夯實每層之厚度使用規定。



根據上述考量，夯實模之設計構想如圖 3- 15 所示，採用圓柱形夯實模，其外壁鋼模材料製作：在尺寸上，砂錐法儀器之底盤為 25 公分見方，而 TDR 感測器(如圖 3- 15)之尺寸是為 15 公分直徑，再加上兩者儀器間所需之空間，將夯實模橫斷面之直徑設為 45 公分，又一般現場進行碾壓夯實作業時，其每層夯實厚度約為 25 公分厚，因此將夯實模高度設為 25 公分。完成後之實體圖如圖 3- 16 所示。



圖 3- 16 夯實模實體圖

夯實鏈、夯實層厚與夯實次數：此三項之控制是為控制土體每單位體積中所受到的能量大小，以 ASTM D698 之標準夯實試驗而言，其控制土體每單位體積中所受到的能量是為 $600\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ，本夯實模型之系統以此一值之 $10/9$ 進行控制而調整夯實鏈、夯實厚度與夯實次數。以前述規劃之夯實模(如圖 3- 15 所示)，初步訂定夯實鏈重量為 8 公斤，夯鏈直徑為 10 公分，夯實鏈落距為 30 公分，夯實後土樣總厚 25 公分，分 5 層夯實，每層夯實 225 次，由此夯實能量之結果將與標準夯實之 $10/9$ 能量相近。

3.3.3 模型試驗規畫

為了解建立起之 TDR 含水量與密度量測系統於量測上之表現能力，將先行於室內以其與傳統之砂錐法量測結果進行比較，TDR 感測器與砂錐法儀器之擺放如圖 3- 15 所示，兩者相鄰施作，而在施作時將先進行 TDR 之量測，在取出 TDR 量測範圍之土樣前便進行砂錐法之試驗，以避免挖掘的過程影響後續砂錐施作的正確性。比對評估之試驗規劃如表 3- 1 所示。在測試中，利用前述之室內夯實系統，預計採用高嶺土、寶二砂以及湖山壩上游擋水壩用土，初步規劃將各控制二組夯實含水量。

表 3- 1 新建量測系統與傳統砂錐法比較試驗規劃

| 代號 | 土樣 | 含水量 | 量測方法 |
|-----|-----|-----|-------------------|
| K-1 | 高嶺土 | 25% | * ASTM D6780 |
| K-2 | | 28% | |
| B-1 | 寶二砂 | 12% | - ASTM D6780 雙步驟法 |
| B-2 | | 14% | - ASTM D6780 單步驟法 |
| H-1 | 湖山壩 | 12% | * 砂錐法與烘乾法 |
| H-2 | | 14% | |

於每一組土樣之量測中，將同時收錄多次結果，以便進行統計分析，此外，對於由新建量測系統所收錄之 TDR 訊號亦將以 ASTM D6780 procedure A 雙步驟法與 procedure B 單步驟法的分析方法進行分析，即可將其結果用以驗證 ASTM D6780 可行性與否。

3.3.4 現地試驗場址

湖山水庫位於雲林縣，其雲林縣位於濁水溪下游南岸，因濁水溪豐枯懸殊，且大多為農業灌溉所用，故雲林縣自來水每日用水 24 萬噸，全部來自地下水，且圳路下游末端之農業灌溉及沿海之養殖用水亦大部分抽取地下水供應，致使雲林地區之地下水年超抽量高達 2 億噸以上，造成雲林縣大部份地區地層下陷，局部地區下陷量甚至超過 2 公尺，且仍持續沉陷中。另近年來台灣高鐵雲林站所在之土庫鎮及元長鄉下陷速率亦增至平均每年 9.5 公分，如未能設法遏止或減緩，將嚴重威脅高速鐵路行車安全。有鑑於此經濟部水利署經多年規劃並經方案比較後，計畫於斗六丘陵西麓闢建湖山水庫，由清水溪引入豐水期餘水蓄存，以提供枯水期供水。

目前以湖山水庫上游擋水壩之工程做為現地量測評估之地點，共進行三次現地量測評估作業，第一次現地量測評估(2009.9.14)地點與第四次現地量測評估(2010.09.29)在於湖南壩之上游擋水壩處(如圖 3-17 所示)，第二次(2009.10.12)及第三次(2009.11.15)現地量測評估地點位於湖山主壩上游擋水壩處，兩處所用之夯實材料皆以現地土壤為主，土質偏砂偶夾有泥岩碎屑。現場量測以 ASTM D6780 TDR 雙步驟法與 ASTM D6780 TDR 單步驟法進行試驗評估。

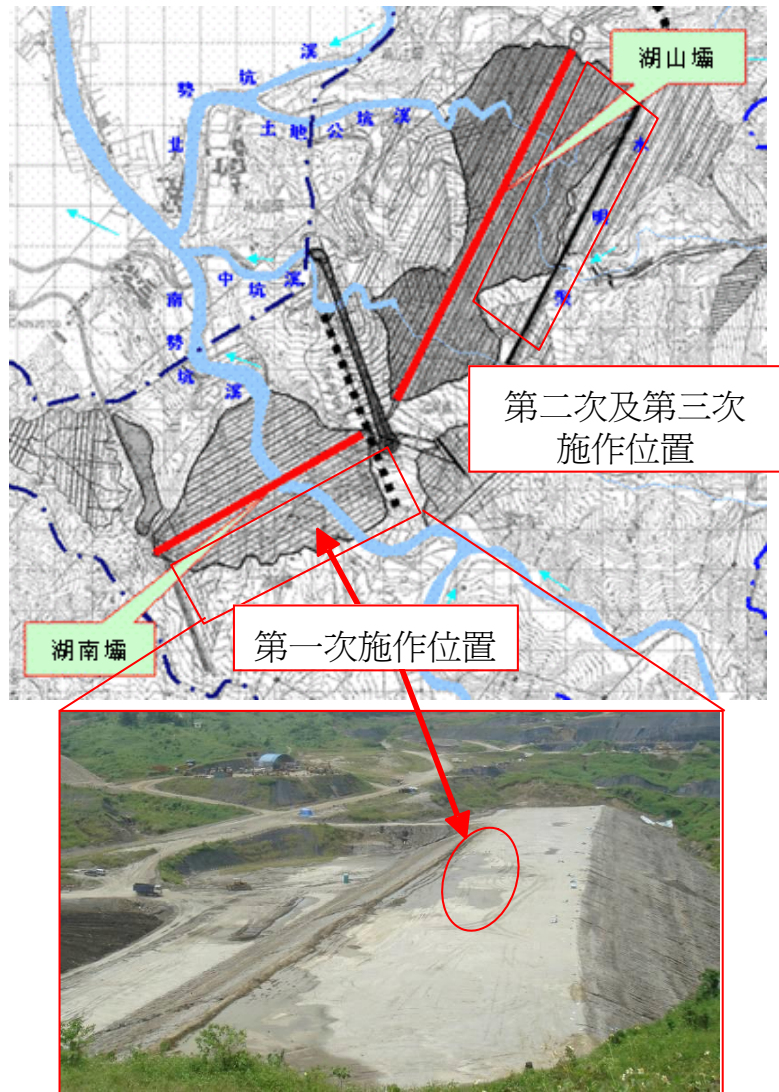


圖 3-17 湖山水庫現地量測評估位置

四、試驗結果與討論

4.1 TDR 量測系統率定

4.1.1 土壤室內率定結果

TDR 量測系統標定除採用規劃之寶二砂以及高嶺土外，為提供後續室內模型試驗及現地評估分析之用，將湖山壩及湖南壩上游擋水壩用土(後續以湖山壩土及湖南壩土表示之)進行試驗，並加以綜合比較。資料之收錄採用之擷取時間間隔為 1.3×10^{-11} 秒，共擷取 2048 點，於資料之分析上採 ASTM D6780 中視介電常數之分析法，以(2- 22)式計算，而該式中之來回走時 t_0 是以單切線法進行計算。單切線法(如圖 4- 1 所示)是以一水平線與 TDR 訊號之最低點相切，而後再找出與該低點之後最大斜率處相切的切線，兩個切線的交叉點即為走時終點，而走時起點即為訊號初期正反射最大處。

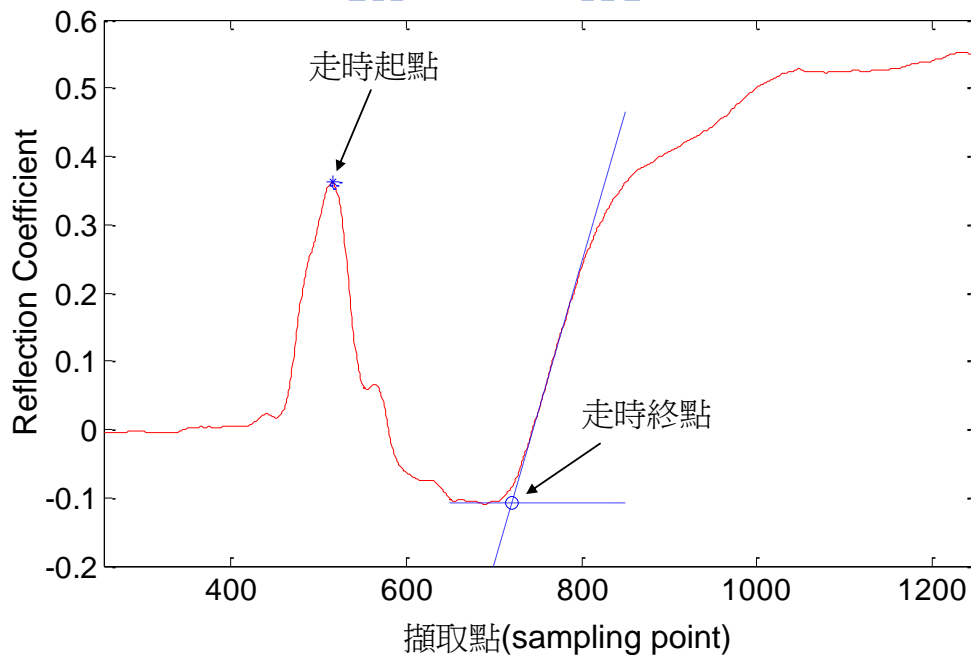


圖 4- 1 來回走時切線法分析(以湖山壩土，含水量 13% 為例)

由四種土樣所得之 \sqrt{Ka} 值以(2- 25)式對 \sqrt{Ka} 進行正規化後其與含水量之關係如圖 4- 2 所示，當重量含水量增加時，正規化之介電常數亦隨之增加，與文獻所得之觀察相同，且其具有良好之線性關係，將此四種土樣資料進行線性迴歸，可得寶二砂之 a 值為 1.09，b 值為 8.58；湖南壩用土之 a 值為 1.10，b 值為 8.97；湖山壩用土之 a 值為 0.82，b 值為 10.08；而高嶺土之 a 值為 1.60，b 值為 8.20；若將四種土樣資料一併進行迴歸分析，可得其 a 值為 0.80，b 值為 11.03。由此圖中可發現，其介電性質受土壤種樣影響而有不同之線性結果，然而其間主要之差異是發生於線性關係的平移(亦即 a 值)，四者 a 值的變化不大，皆在 1 附近。

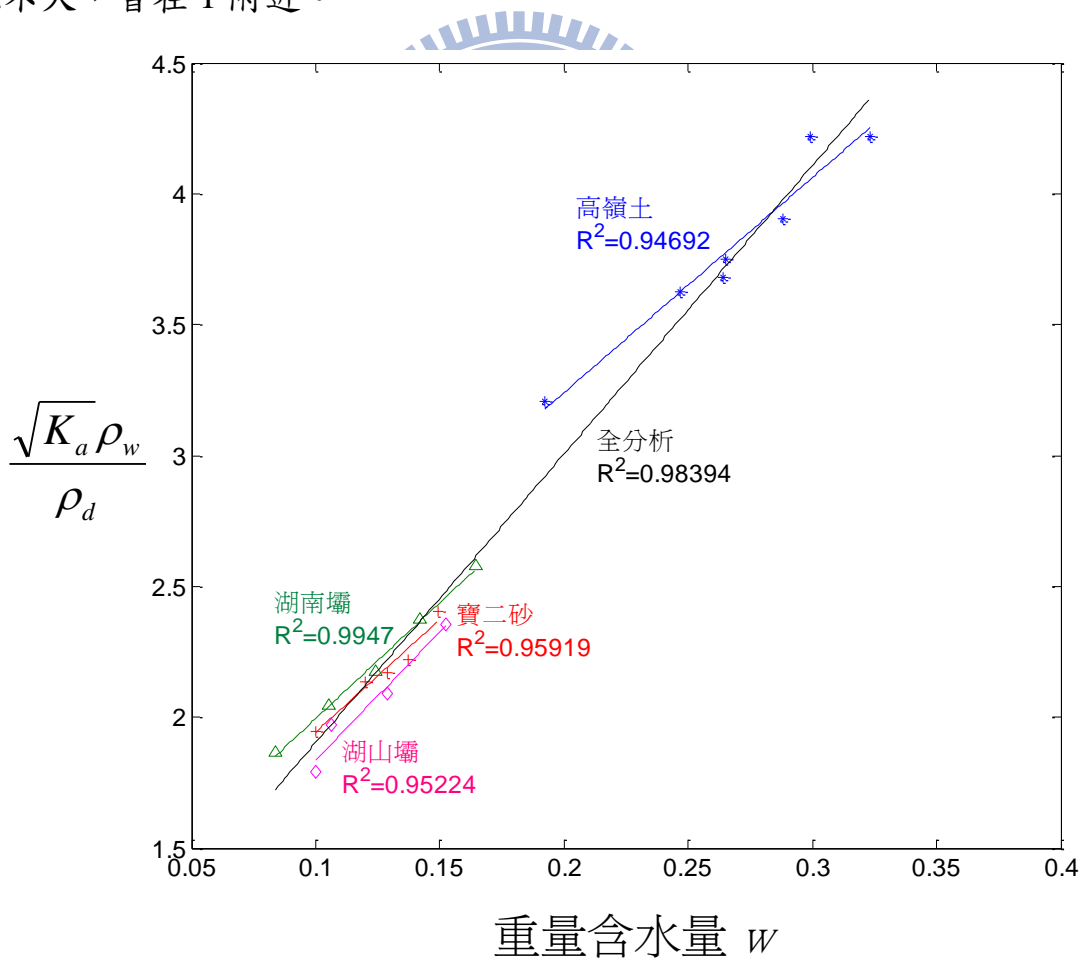


圖 4- 2 正規化介電常數與含水量之關係

為了解採用不同土壤之迴歸參數進行含水量分析所可能造成之誤差程度，將寶二砂以及高嶺土在各含水量下所得之視介電度，分別以寶二砂、高嶺土以及寶二砂與高嶺土綜合迴歸分析所得之標定參數進行體積含水量之量測計算，此中之標定參數分別以不同學者所提之介電度與含水量關係進行，分析所得之誤差分析結果如圖 4-3 所示，圖中顯示，採用由不考慮土壤種類以及乾密度用(2-25)式所進行分析，若採用相同之土壤進行量測，其所得之體積含水量可達 1% 之準確度，但若標定土壤與現地量測之土壤存在有差異時，其誤差最大至少可達 8%，此誤差之程度已無法滿足現地品管之需求。然而，由採用共同迴歸之參數進行分析時，因使用之參數已同時考量不同土壤種類之可能影響範圍，可將土壤種類造成之誤差影響大幅降低至 2% 的程度，此一結果顯示，在進行具有土樣不確定因素存在之量測時，應可採用綜合迴歸之參數以降低其可能因土壤種類差異而造成的誤差程度，另一方面，此結果亦顯示，尋求一較不受土壤種類影響之分析方法之必要性。

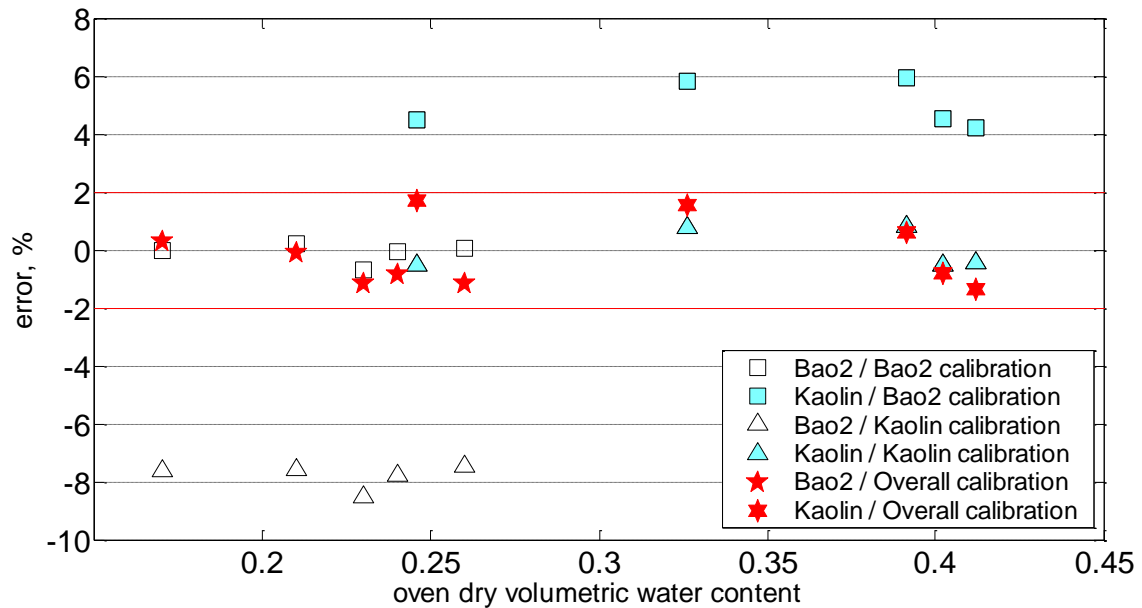


圖 4-3 土壤種類可能造成之含水量誤差程度

4.1.2 導電度率定結果

在介電性質分析之外，將前述四種土壤實驗之訊號以(2-33)式進行導電度計算，以(2-34)式將導電度正規化後，其與含水量之關係如圖 4-4 所示，隨著含水量的增加，正規化之導電度亦有增加的情形，根據 Yu and Drnevich(2004)，其間具有線性關係，將其進行線性迴歸後，可得(2-34)式中之 c、d 值：寶二砂之 c 值為 -0.0399，d 值為 0.8011；湖南壩用土之 c 值為 0.0634，d 值為 0.346；湖山壩用土之 c 值為 -0.0296，d 值為 0.6893；而高嶺土之 c 值為 -0.0119，d 值為 0.5992；若將四種土樣資料一併進行迴歸分析，可得其 c 值為 0.0109，d 值為 0.5171。整體而言，在本實驗中其之間的線性關係並非十分良好，與 Yu and Drnevich(2004)所得之良好線性結果不同，需進一步了解造成此差異的原因，而不同土樣間的 c、d 值差異顯著，這點將造成在使

用 ASTM D6780 單步驟法時，必需針對量測土壤進行標定，以便可有較佳的量測結果。

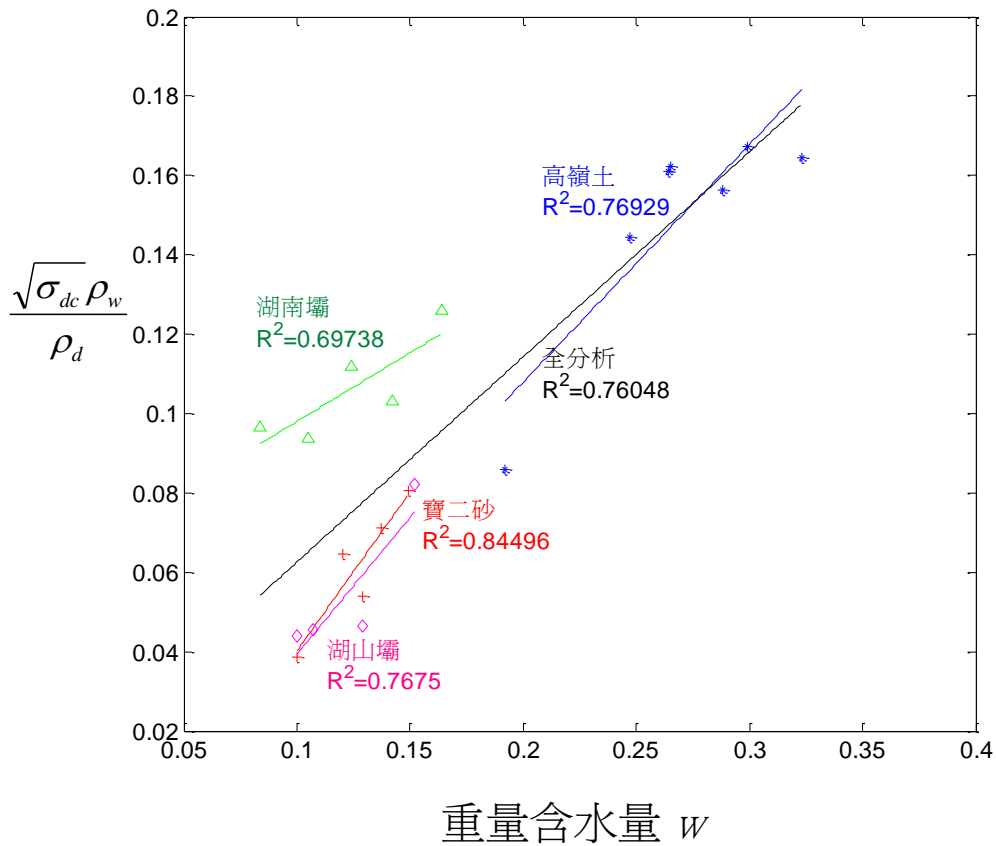


圖 4-4 正規化導電度與含水量之關係

進一步將所獲得之介電常數與導電度進行關係觀察，其關係如圖 4-5 所示，橫軸為介電常數平方根，垂直軸為導電度平方根，在介電常數增加的情形下，也都伴隨著導電度的增加，根據 Yu and Drnevich(2004)，兩者具有線性關係，可以以(2-40)式進行描述，則可得寶二砂之 f 值為-0.2123，g 值為 0.0843；湖山壩用土之 f 值為-0.1342，g 值為 0.0633；湖南壩用土之 f 值為 0.0464，g 值為 0.0361；而高嶺土之 f 值為-0.1808，g 值為 0.0755；若將四種土樣資料一併進行迴歸分析，可得其 f 值為-0.0963，g 值為 0.0598，整體所得線性不佳，與 Yu and Drnevich(2004)所得之線性結果不同，造成結果不同之

原因尚需進一步探討，然而不同土樣的不同 f 、 g 值再次說明採用 ASTM D6780 單步驟法所需針對每種量測土樣進行標定的問題。

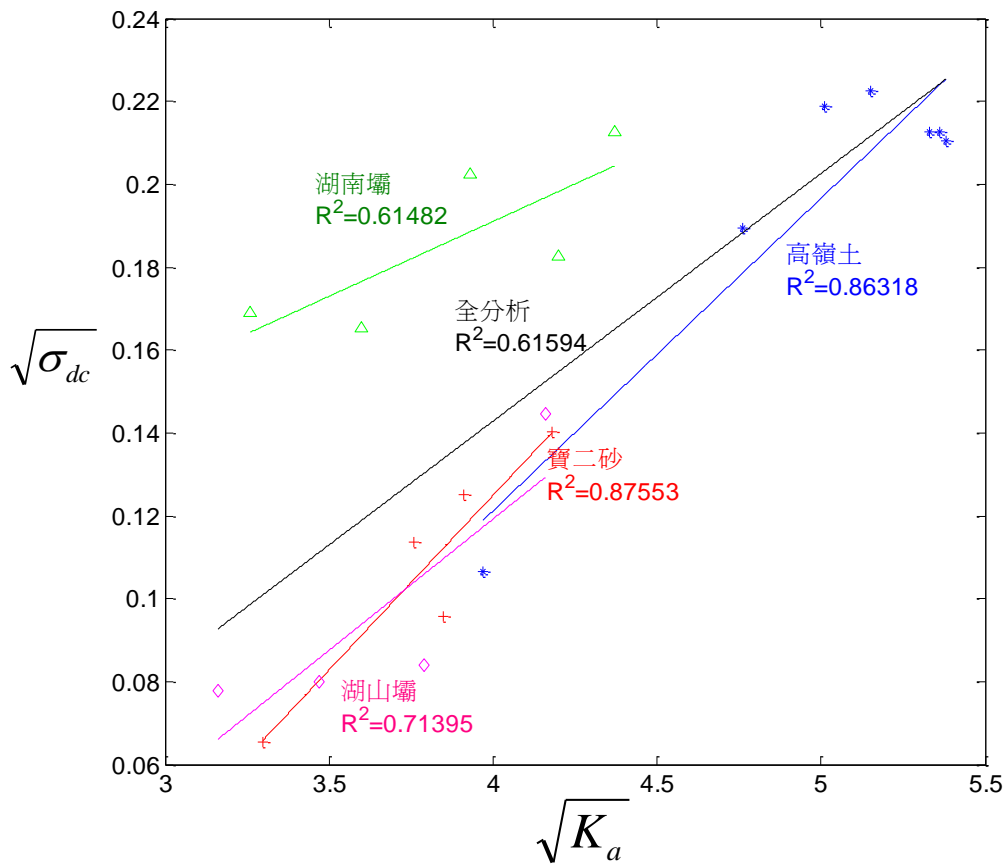


圖 4-5 導電度與介電常數之關係

上述所得四種土壤之 a 、 b 、 c 、 d 、 f 以及 g 的標定結果整理如表 4-1 所示，在進行 c 、 d 、 f 、 g 的計算中，除可知採用 ASTM D6780 單步驟法在不同土壤需個別標定的問題外，採用規範中導電度計算 ((2-35) 式) 所得之結果，無法與含水量以及介電度有良好的線性結果，即使在單步驟法理論基礎無缺陷的情況下，此問題將使其有較大的誤差，更遑論在其理論基礎上即有待議之處。

表 4-1 試驗土壤之 ASTM D6780 標定參數

| | a | b | c | d | f | g |
|-----|------|-------|---------|--------|---------|--------|
| 寶二砂 | 1.09 | 8.58 | -0.0399 | 0.8011 | -0.2123 | 0.0843 |
| 湖山壩 | 0.82 | 10.08 | -0.0296 | 0.6892 | -0.1342 | 0.0633 |
| 湖南壩 | 1.10 | 8.97 | 0.0634 | 0.3463 | 0.0464 | 0.0361 |
| 高嶺土 | 1.60 | 8.20 | -0.0119 | 0.5992 | -0.1808 | 0.0755 |
| 全分析 | 0.80 | 11.03 | 0.0109 | 0.5171 | -0.0963 | 0.0598 |

4.2 ASTM D6780 量測準確度試驗成果

4.2.1 模型試驗結果

室內比對評估試驗共進行 6 組，試驗之情形如圖 4- 6 所示(以高嶺土為例)，TDR 感測器距夯實模最近距離為 7.5 公分(如圖 4- 6b 所示)，經測試，此一距離對於量測已影響不明顯，而為使 TDR 感測器距夯實模有一定距離，砂錐之底盤有部份在夯實模外圍(如圖 4- 6c 所示)，但不影響砂錐下方土樣之挖掘。為將因挖掘土樣所可能造成之土壤密度改變降至最小，於施作上之順序是先行將 TDR 之釘子釘入土中量測後，將影響砂錐施作的三根釘子取出(未有挖掘之動作)，而後開始進行砂錐法之量測，待砂錐法量測完畢再繼續取出 TDR 處之土樣進行 TDR 模內之量測。

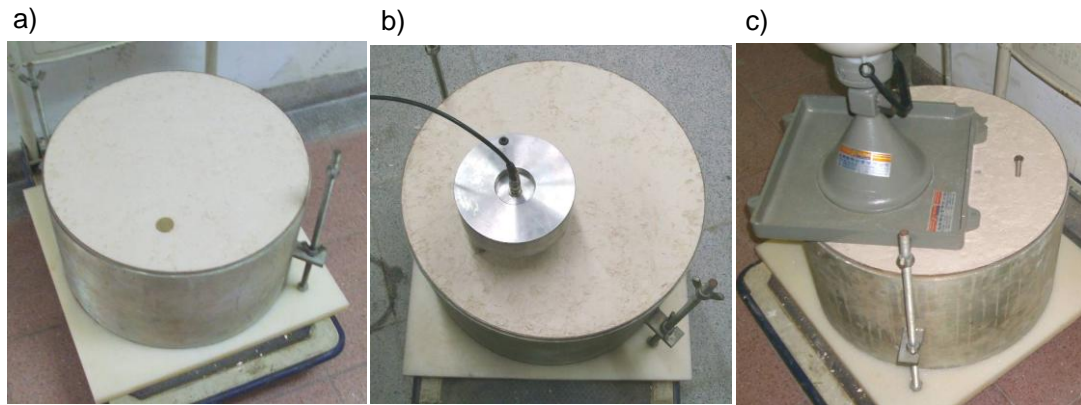


圖 4-6 建立之量測系統與室內傳統方法結果比對評估試驗情形：

a) 試體準備完成；b) TDR 量測；c)砂錐法量測

施作完畢之試體，在夯實模中均勻取 18 處進行含水量量測，結果如圖 4-7 所示(以高嶺土為例)，平均含水量為 25.7%，整體含水量之差異在 0.5% 以內，均勻度良好。

採用 ASTM D6780 TDR 法之雙步驟法、單步驟法，其試驗評估試驗結果如圖 4-8 及圖 4-9 所示。圖 4-8 之為含水量之比較結果，在比對上，TDR 之含水量結果與於 TDR 量測處所取出之含水量相比，而砂錐法是與大夯模所得之平均含水量相比，結果顯示，TDR 雙步驟法量測所得之含水量大都在誤差 1% 以內，僅有在高嶺土中之結果誤差在 1%-2% 間；而 TDR 單步驟法之結果與雙步驟法相當，主要亦是於高嶺土中有較大的誤差；而砂錐法與大夯模之整體結果比較，含水量誤差皆在 1% 以內。

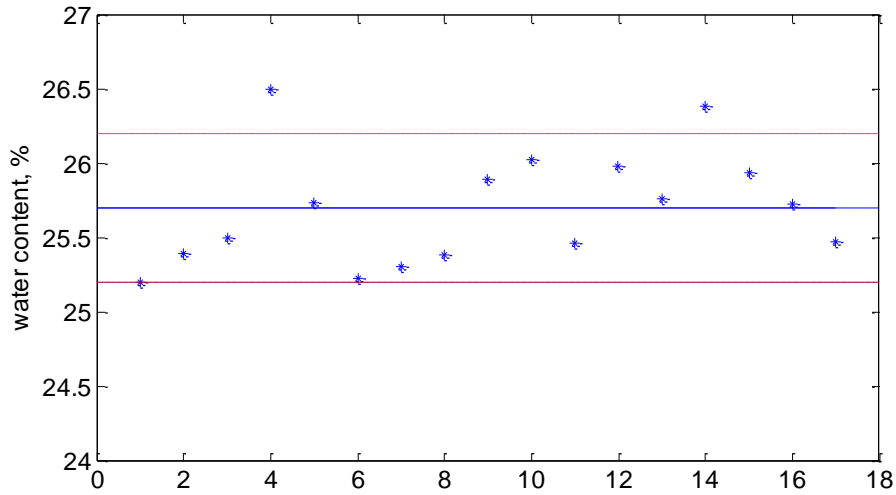


圖 4-7 夯實模中含水量均勻性

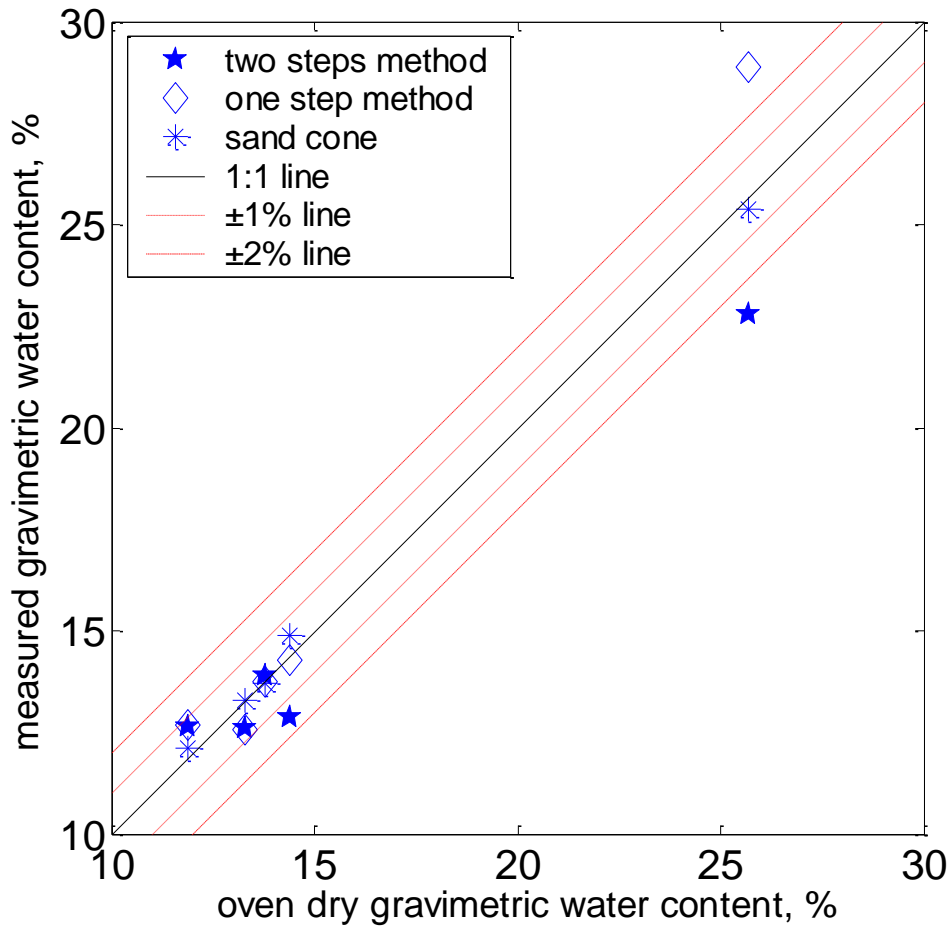


圖 4-8 室內評估含水量之比較結果

圖 4-9 為室內評估之乾密度比對結果，在比對上，TDR 所獲得之乾密度是與由大夯模之濕密度以及 TDR 量測處之含水量所得之乾

密度進行比較，而砂錐法是與大夯模之乾密度進行比較，比較結果顯示，TDR 雙步驟法誤差為 5%，TDR 單步驟法誤差大多在 5% 以內，在高嶺土部份誤差較大，約為 10%。推測單步驟法在高嶺土中之表現會較差的可能原因是因為，導電度易受到土壤組構改變而有所影響，單步驟法中因有採用導電度之參數做為計算因子，因而在土壤組構較易變化之高嶺土中影響較為明顯。

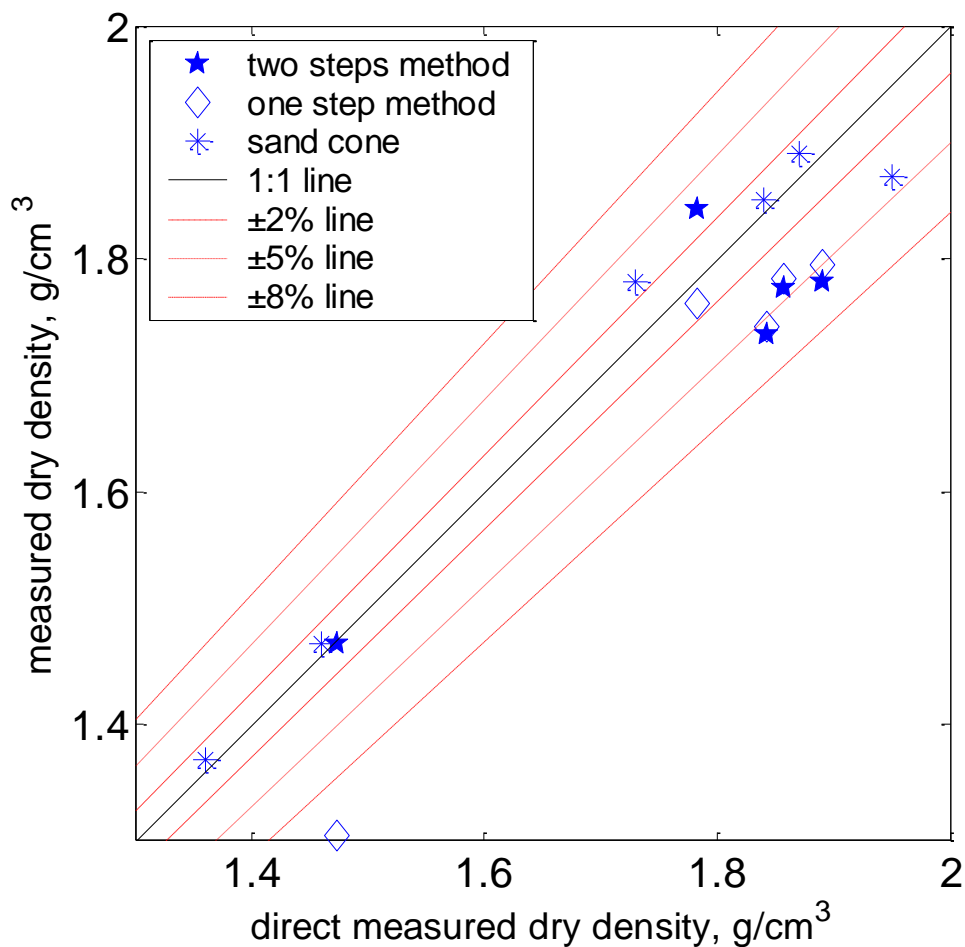


圖 4-9 室內評估乾密度之比較結果

由此結果，初步認為以砂錐法進行含水量以及乾密度量測有其代表性，而在利用 TDR 量測技術上，TDR 雙步驟法之表現較單步驟法之表現更為理想。

將模型試驗 MRP 感測器量測與同軸感測器量測之介電度與含水量關係進行比較(其中模型試驗土之乾密度以模型試驗直接濕密度與平均含水量之結果計算)，其分析結果如圖 4- 10 所示，MRP 感測器與同軸感測器介電量測正規化後並未一致在同一條回歸線上，這可能為致使現地 MRP 感測器量測土壤乾密度上造成誤差會影響其量測準確度，惟模型試驗樣本數較少，並不能看出一致的趨勢是會造成低估乾密度或是高估乾密度，將以現地實驗結果評估其趨勢。

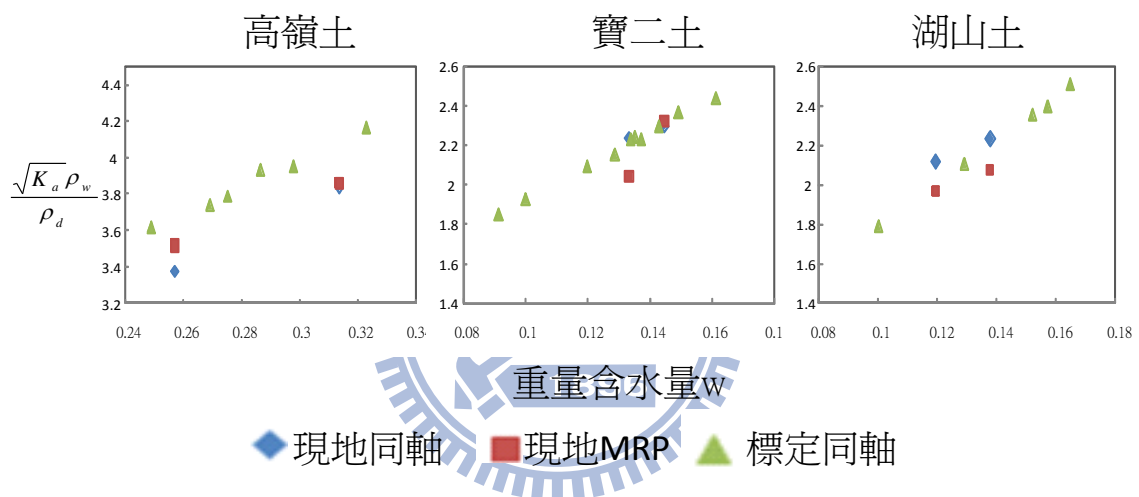


圖 4- 10 模型試驗：MRP 感測器與同軸感測器探討分析

4.2.2 現地試驗結果

現場進行含水量及乾密度量測與砂錐法之比對，是以 ASTM 雙步驟法、ASTM 單步驟法，其分析中所需之標定參數是以湖南壩上游擋水壩以及湖山壩上游擋水壩之用土標定之結果(如表 4- 1 所示)，結果比對如圖 4- 11 及圖 4- 12 所示。圖 4- 11 為含水量之比較結果，橫軸為採用烘乾稱重法所得之含水量，垂直軸為使用 TDR 量測所得之含水量，結果顯示採用雙步驟法之結果誤差都在 2% 之內，而單步驟法所得之結果偶有在誤差 2% 以外。

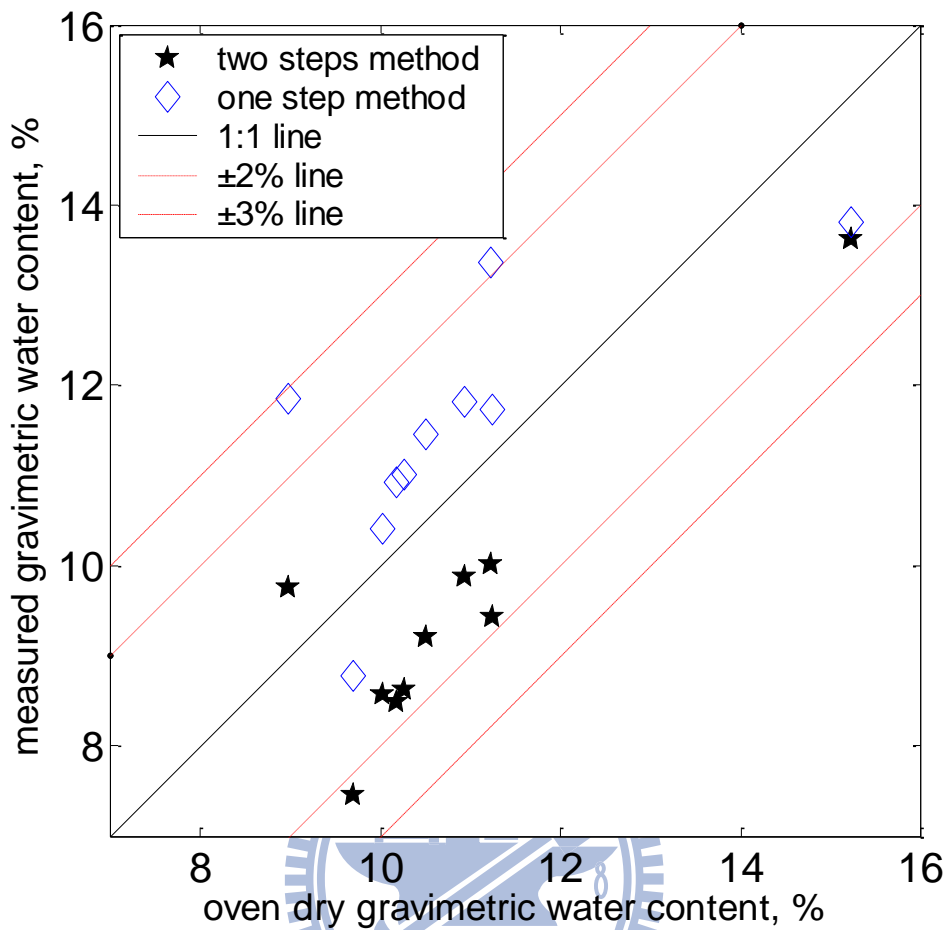


圖 4- 11 現場試驗含水量比對結果(以各自標定參數分析)

圖 4- 12 為乾密度比對之結果，橫軸為砂錐法所得之乾密度，垂直軸為使用單步驟法、雙步驟法，比對結果顯示使用 TDR 技術所獲得之乾密度普遍較砂錐法所得為低，雙步驟法所得之結果的誤差在 8% 以內，單步驟法所得之結果除第一次試驗之結果誤差在 5% 以內外，誤差皆大於 10%。

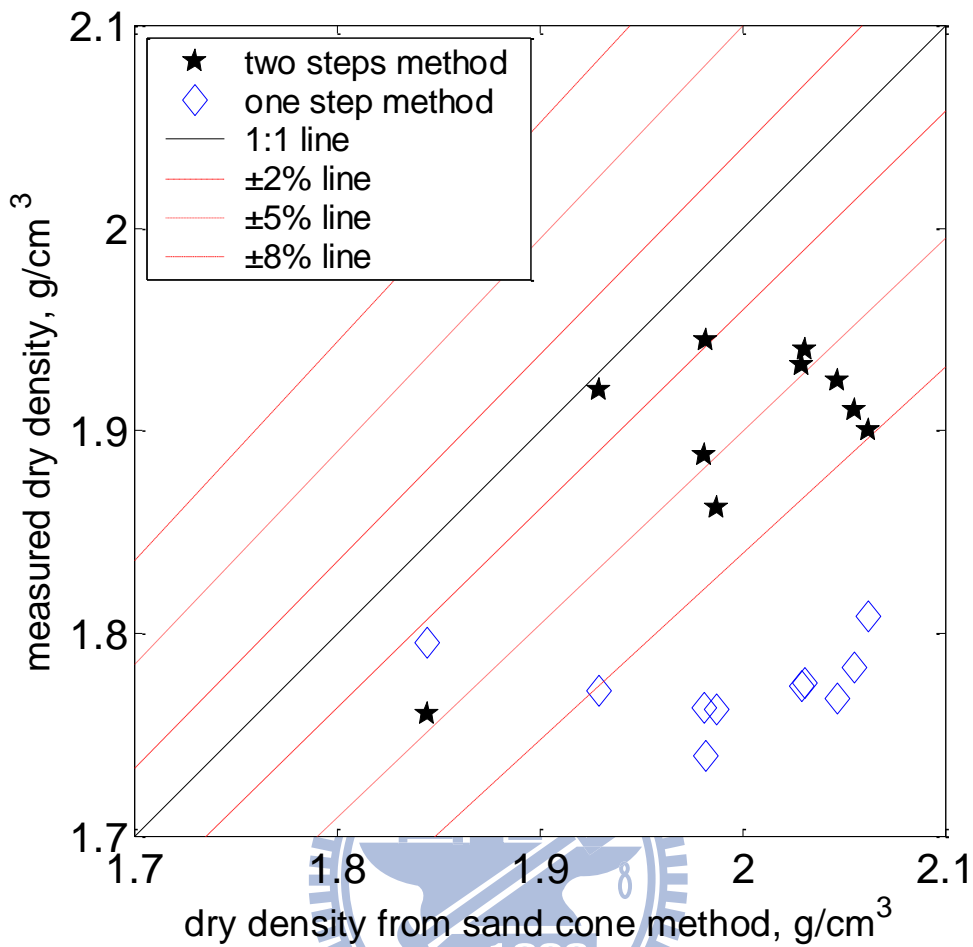


圖 4-12 現地乾密度比對結果(以各自標定參數分析)

整體而言，雙步驟法在含水量量測之表現符合室內比對結果，然而在乾密度之表現上與室內評估結果相去較大，初步推測可能是由於自借土區取回之標定土樣與現場土樣有所差異，而根據室內實驗之結果顯示，當有可能有土壤種類差異之影響時，可採用綜合迴歸分析之參數進行分析，以降低其因土壤種類差異造成的誤差，因此，在此以表 4-1 中之全分析參數再次分析現場資料，資料結果如圖 4-13 以及圖 4-14 所示。

圖 4-13 為含水量之量測比對結果，結果顯示，採用全分析之參數進行分析所得之含水量準確度確實可有效的提升，雙步驟法含水量之量測準確度可達 1%，而單步驟法含水量之準確度亦可在 2% 以內

(大部份在 1%)，然而，圖 4-14 之乾密度結果顯示，即使在含水量之量測上有如此高的準確度，乾密度準確度的提升卻十分有限，甚至是沒有提升的效果，此結果顯示，現場評估中之乾密度量測誤差來源非僅是標定土樣差異所造成，量測現地介電度時因四根鋼釘貫入所造成土壤之壓縮、膨脹等現象也將造成影響。

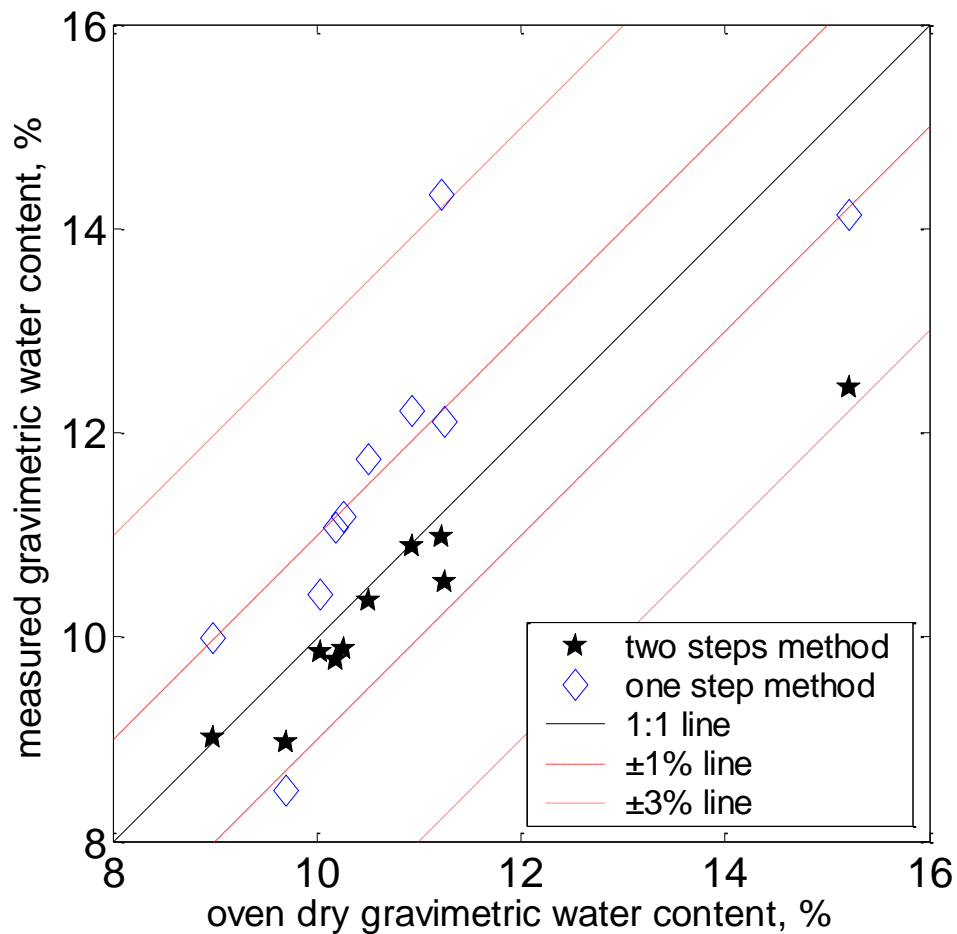


圖 4-13 現地含水量比對結果(以全分析標定參數分析)

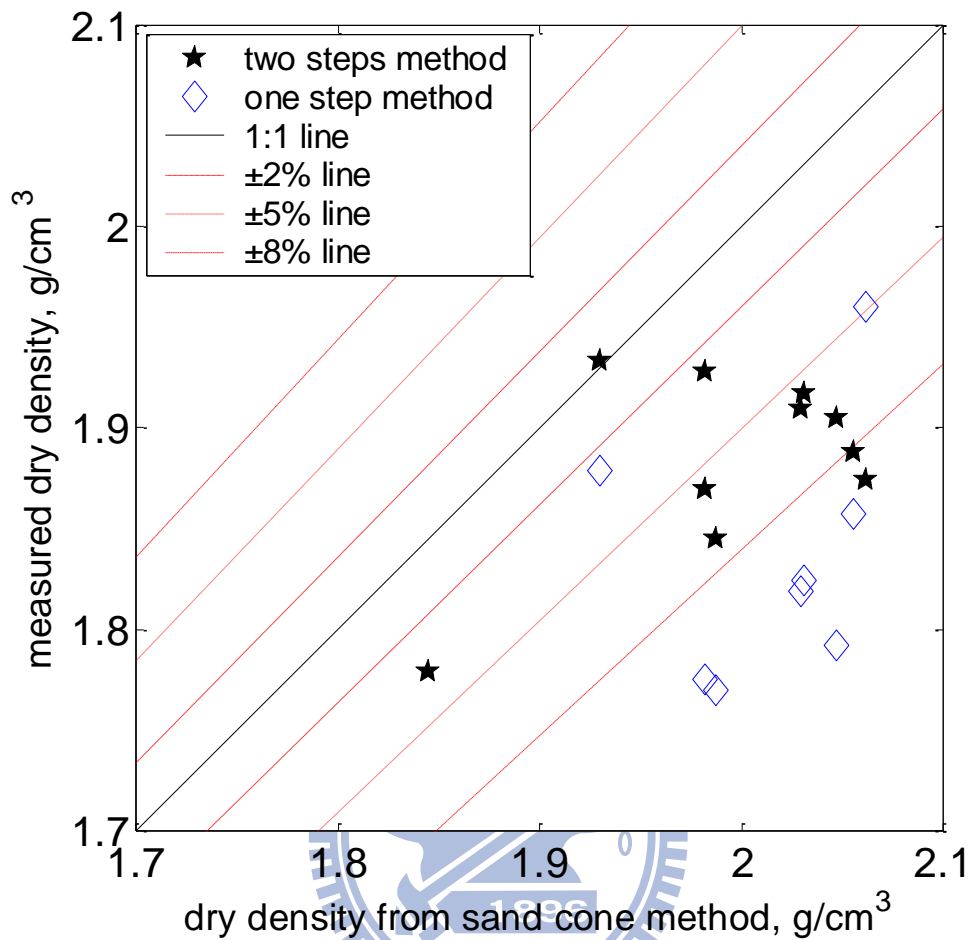


圖 4-14 現地乾密度比對結果(以全分析標定參數分析)

由雙步驟法計算乾密度之(2-32)式可知，乾密度之計算除需模中之量測外尚需現地之介電度量測值，模中量測結果之誤差來源已了解，因此主要問題應是在現地土壤之介電度量測上，為此針對有較多資料之湖山壩土進行誤差來源之探討。

將現地土以及現地模中土之介電度與含水量關係進行比較(其中現地土之乾密度以砂錐法結果計算)，比較結果如圖 4-15 所示，湖山壩現場之模中土含水量與介電度之資料位於湖山壩標定土之上方，較接近全分析之迴歸線，此資料所得之迴歸參數是為現地土壤介電度與含水量之關係參數(因為模中之環境以及乾密度及含水量是為控制較

好的已知值，因此其結果較具可信度)，然而，在現地土壤中所量測得之介電度較模中土之值為低，根據室內實驗之結果顯示，同種土樣之介電度與含水量的關係一致，乾密度改變之影響已在正規化過程中消除，因此，兩者介電度之差異應是造成乾密度量測誤差的主因。

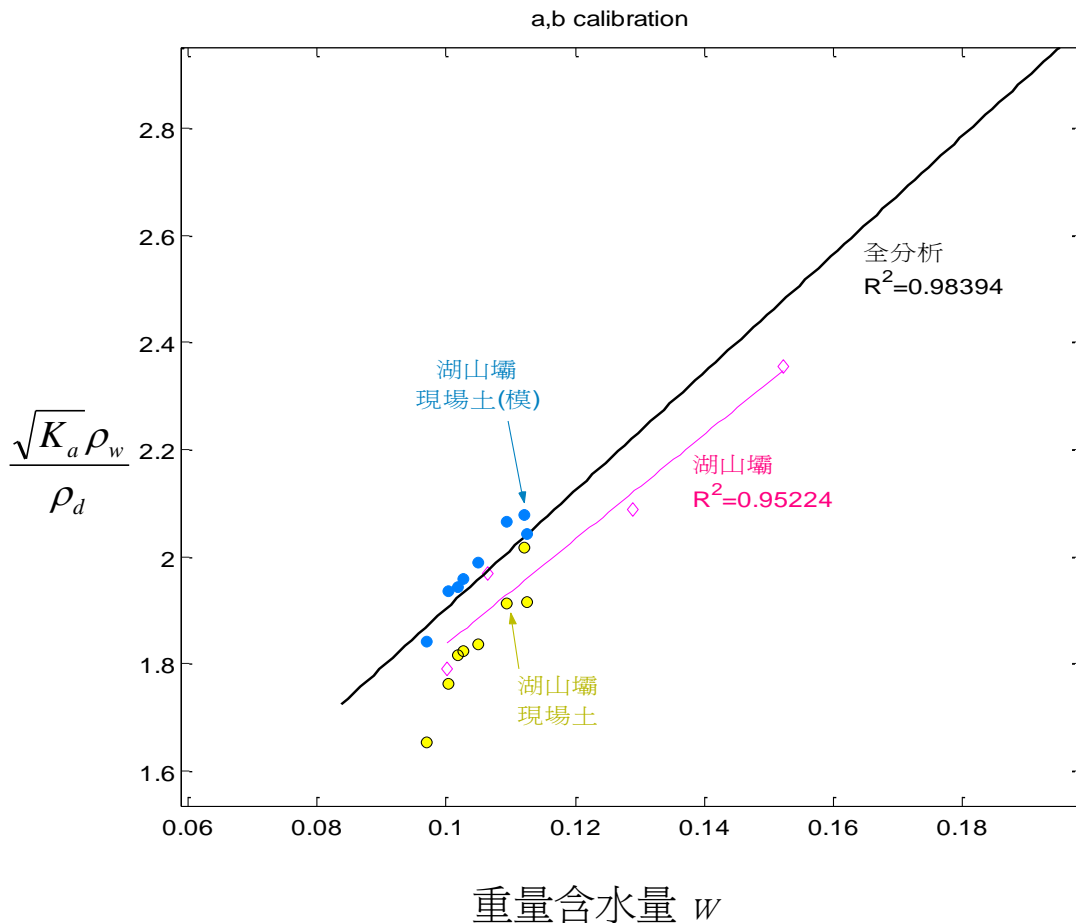


圖 4-15 現地土壤介電度與含水量關係圖

於量測施作過程中，貫入釘子是會造成局部之乾密度增加，此外，將四根釘子皆貫入土中後，在四個釘子與釘子間會有裂隙產生(如圖 4-16 所示)，此些裂隙的產生將使得釘子周圍出現有空氣，這些空氣的存在將降低土壤含水量以及乾密度(尤其是中間釘子的四周，亦為 TDR 感測空間靈敏度最高的所在)，而使得所獲得之含水量及乾密度皆有偏低之情形，與所得之介電度現象相符。若為降低此裂隙發生

之可能性，勢必對現地感測器進行重新設計。就目前未排除其誤差來源的情形下，現場之評估結果顯示 TDR 雙步驟法更優於 TDR 單步驟法。



圖 4-16 現地釘子貫入土後之情形

4.3 現地量測誤差來源探討與現地感測器改善方案

4.3.1 單步驟法問題探討

單步驟法在方法論上導入導電度而解決需透過較耗費時間人力之濕密度量測，但在實際計算上，由 2.1.2 節之介紹中可見，其導電度 EC 是由室內標定之 f, g 常數以及現場測得之 Ka 獲得，與現場獨立測得之導電度無關(現場導電度可由 V_o 獲得)。在其理論推導中(Yu and Drenvich, 2004)， f 與 g 兩者並非獨立之參數，其與其它四個標定參數 a, b, c, d 以及土壤乾密度 ρ_d 有關，其關係式為

$$f = \frac{b \cdot c - a \cdot d}{b} \frac{\rho_d}{\rho_w} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$g = \frac{d}{b} \dots\dots\dots (4-2)$$

其中， ρ_w 為水的密度， a 與 b 參數與現場土壤種類以及孔隙水介電度有關， c 參數與土顆粒之導電度相關，而 d 與土壤孔隙水導電度相關。Yu and Drenvich(2004)假設 f 為常數，與現地土壤乾密度及孔隙水特性無關，但按 (4-1) 式，此假設只有在率定試驗取得標定參數 a, b, c, d 時，試體乾密度與孔隙水特性與現地相同方成立，然而，在其所推導之(4-1)式以及(4-2)式中已明確說明 d 參數將對 f 與 g 造成影響，且 d 參數對土壤孔隙水的導電度變化極靈敏，若標定用水與現場夯實碾壓用之水不同，其將影響 f 與 g 常數甚大，即使在標定時採用與現場碾壓夯實相同之水，其尚有 ρ_d 需解決。由(4-1)式中可見， f 與 ρ_d 相關，現場碾壓之土壤的 ρ_d 值必定與室內標定時有所差距，而使得現場實際之 f 值與室內標定者不同，且 ρ_d 為利用此一量測技術欲解決之物理量，但在這裡卻利用與待求物理量相關之參數計算待求物理量，有其根本上的矛盾存在。

單步驟法之成立是在於假定現場之 EC 參數與室內標定之 EC 參數相同，但由前述可知，此一假設有其理論上的矛盾，因此，對此方法應再進一步探討其可行性。

而在雙步驟法之誤差來源探討上，經檢討後認為可能造成其量測誤差之可能來源有三：其一為標定與現場量測用感測器鋼釘長度不同的差異，其二是為現場同軸感測器與多棒式感測器型式不同所造成之差異，最末則是可能造成現地同軸感測器與多棒式感測器所得之正規化

介電度行為差異的貫入擾動，在此將分別於以下三個小節中進行探討說明。

4.3.2 雙步驟法誤差來源探討：感測鋼棒長度之影響

為了解感測鋼棒長度之影響，使用數值模擬以及實測資料進行探討，數值模擬方式是採用通用 TDR 波傳模型(Lin and Tang, 2007)進行模擬，而土壤之介電頻譜是採用混合模型模擬，模擬使用之參數主要是設定土壤之比表面積為 $200\text{m}^2/\text{g}$ ，含水量 25%，乾密度 $1.56\text{g}/\text{cm}^3$ ，比重 2.7，其餘參數採用 Lin(2003)所提供之參考值設定，模擬時改變感測鋼棒之長度，並根據不同感測鋼棒長度所得到之波形進行視介電度之分析，分析結果如圖 4- 17 所示，隨著感測鋼棒長度的增加視介電度有降低的情形，約至感測鋼棒 25 公分時所得之視介電度趨於穩定，較不受感測鋼棒長度之影響，由此數值模擬可知，在現地試驗與模型試驗中，室內標定時採用 11.5 公分長之感測鋼棒而現場量測卻是採用 22 公分長之感測鋼棒，根據數值模擬結果指出，此感測鋼棒長度之差異將會造成兩者所得之視介電度有所差異，而造成量測上之誤差。

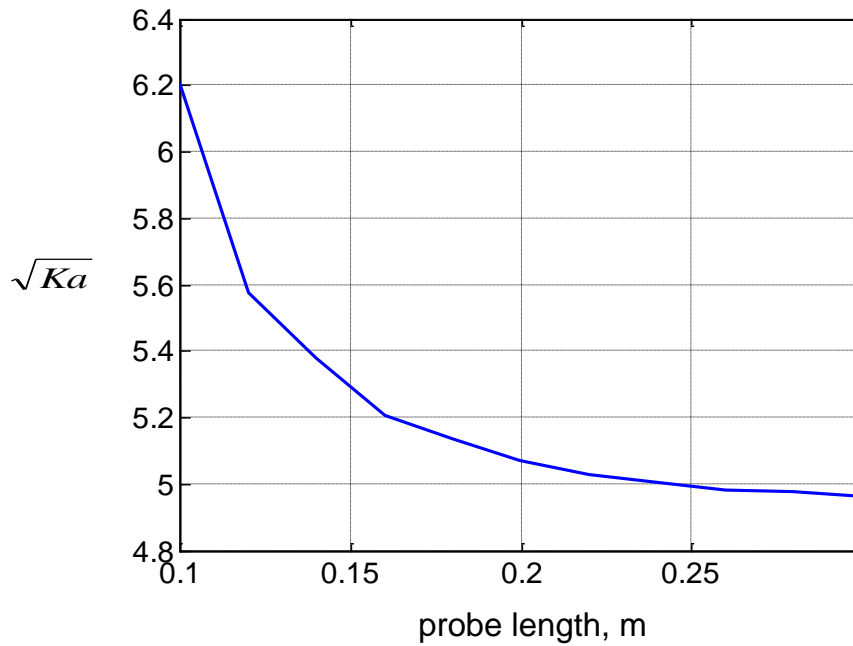


圖 4-17 感測鋼棒長度與視介電度之關係

為確認數值模擬結果之正確性，另使用湖山土土樣進行實際量測資料比對，比對時是於室內以 11.5 公分同軸式感測器以及 22 公分同軸式感測器進行視介電度量測分析比較，比較結果如圖 4-18 所示，採用 22 公分感測鋼棒進行量測所得之視介電度較採用 11.5 公分感測鋼棒所得結果為低，與數值模擬所得之結果相符，如此可確認採用之感測器長度不同將造成量測上之誤差。因此，根據此一探討，進行室內視介電度標定時將改採用與現地相同長度之感測鋼棒，以降低可能之誤差來源。

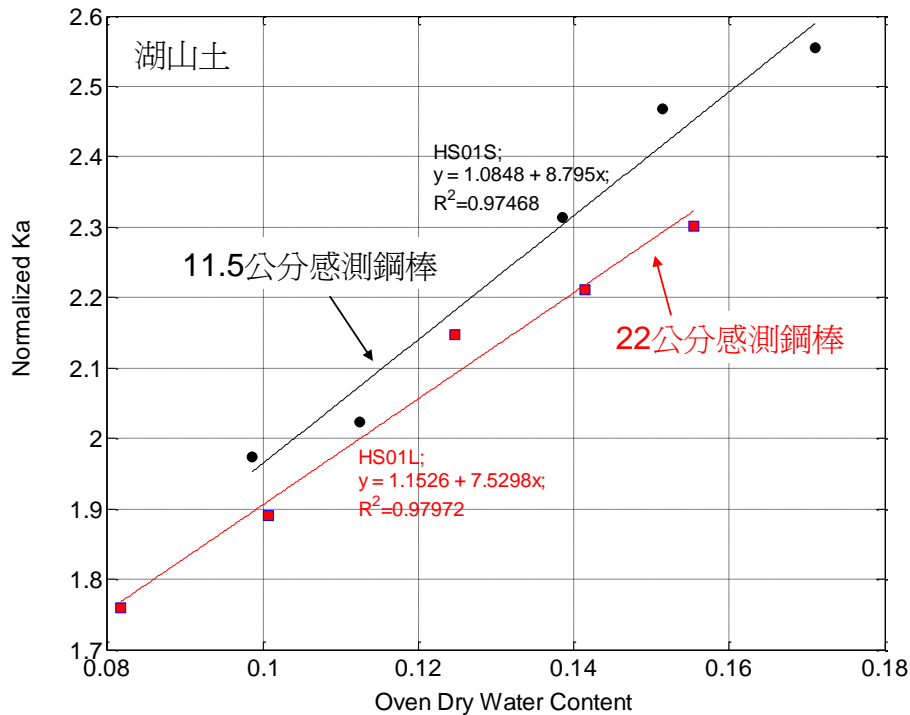


圖 4-18 湖山土 22 公分感測鋼棒與 11.5 公分感測鋼棒視介電度量測差異比較

4.3.3 雙步驟法誤差來源探討：感測器型式差異之影響

ASTM 雙步驟法在現地量測時，其第一步驟是採用多棒式感測器將感測鋼棒貫入土中，而後在第二步驟中是將多棒式感測器所圍起之區域內土樣挖起放入同軸式感測器中再量測一次，第一次之現地評估顯示兩者所得之土壤介電度行為會有所差異(如圖 4-16 所示)，因此針對兩者使用感測器型式之不同是否會造成此差異產生進行探討。在探討上因現地誤差來源原因不明，不易控制實驗變因，因此以數值模擬之方式進行，模擬之方法是使用通用 TDR 波傳模型(Lin and Tang, 2007)，而土壤之介電頻譜是採用混合模型模擬，模擬使用之參數主要是設定土壤之比表面積為 $200\text{m}^2/\text{g}$ ，含水量 25%，乾密度 $1.56\text{g}/\text{cm}^3$ ，比重 2.7，感測器長度設為 25 公分，其餘參數採用 Lin(2003)所提供之參考值設定。感測器型式之不同，撇開貫入擾動以及取樣空間之間

題，其主要的差異是在於感測器本身的特徵阻抗的不同，因此在模擬時是比對在不同感測器特徵阻抗下，所得到之視介電度是否有所差異。

根據對 TDR 量測系統之同軸式感測器與多棒式感測器於空氣中於感測器段所測得之反射係數推估，同軸式感測器之特徵阻抗採用 152 歐姆，而多棒式感測器之特徵阻抗採用 222 歐姆，將此二者進行 TDR 波形模擬並分析其視介電度 K_a ，分析結果如圖 4- 19 所示，由圖中可知，雖然兩種感測器之型式有所不同，但其所得之 K_a 皆一致，並不受感測器型式不同而有所影響，可初步排除此一量測誤差來源之可能性。

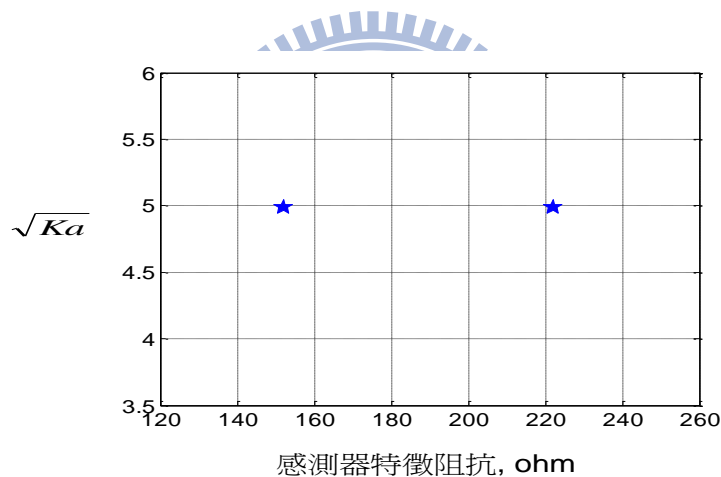


圖 4- 19 感測器型式差異之影響

4.3.4 雙步驟法誤差來源探討：貫入擾動影響

由現地試驗現場之施作照片可知多棒式感測器之感測鋼棒貫入所造成的擾動(土壤開裂)必然對結果造成影響，但其影響之行為是否一致卻未能確定，因此為確認圖 4- 16 中現地同一土壤採用多棒式感測器與同軸感測器量測所得介電關係的差異情形是否具有重覆性，將再進行一次現地試驗評估，評估之結果同樣進行同軸式感測器與多棒式感測器視介電度量測結果的比較，比較結果如圖 4- 20 所示，第一

次現地試驗與第二次現地試驗同軸式感測器所得到之正規化視介電度約略在同一線性關係上，然而多棒式結果卻有所不同，四個試驗點位中有兩個點位的多棒式感測器視介電度是約略在同軸式感測器線性關係上，與第一次現地試驗在同軸式感測器下方的介電行為不同。此結果說明貫入擾動對多棒式感測器所得到之土壤介電行為影響並無一固定之行為，即使於現場皆是觀察到土壤開裂之情況，其所造成之影響是為擠壓或鬆動(乾密度提升或降低)還是無法得知，因此在此情況下，不易以觀察所得之結果以修正之方法進行貫入擾動影響的去除，如此，降低貫入擾動之影響會是感測器改善之較佳方向與目標。

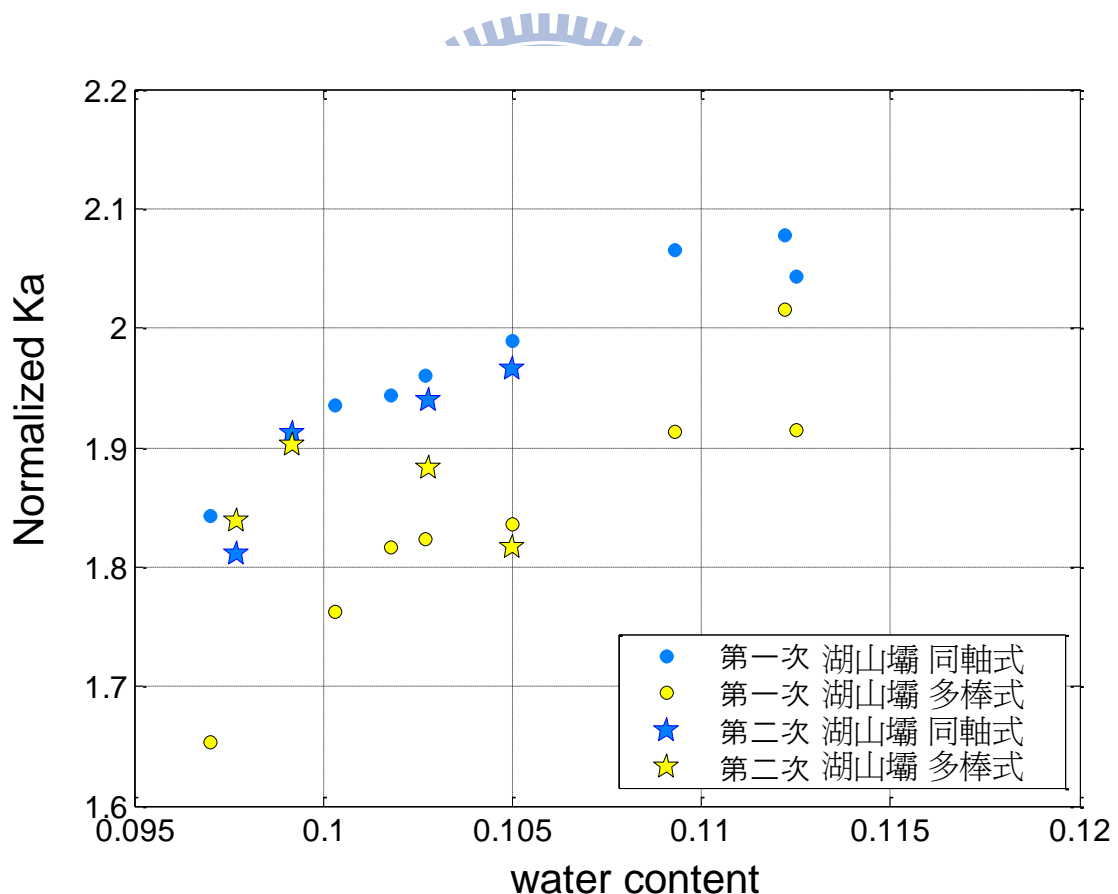


圖 4-20 兩次 TDR 現地多棒式與同軸式感測器之介電性質差異

4.3.5 TDR 現地含水量與乾密度量測改善方案

就目前試驗來看雙步驟尚未解決乾密度問題，由於 TDR 雙步驟法在含水量準確度表現上還算理想，短期內可用 TDR 法聯合砂錐法進行以改善乾密度量測準確度。然而 TDR 雙步驟法明顯受到感測器貫入擾動影響造成乾密度誤差，為改善其準確度將針對現地感測器進行改良以改善乾密度量測準確度。對於這兩種改善方案其介紹如下：

TDR 法與砂錐法聯合使用：

不論在室內模型或現地試驗量測雙步驟法的同時，亦同時使用砂錐法取得實際乾密度，實際上砂錐法真正取得的是濕密度還需要以含水量才能取得乾密度，含水量則需要以烘乾法秤重來取得含水量資訊。其相關式如下：

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1+w} \quad \text{.....(4-3)}$$

其中， ρ_d 為乾密度， ρ_m 為濕密度， w 為含水量。

在雙步驟法部分同軸感測器取得含水量資訊而發展出 TDR 法與砂錐法聯用，在雙步驟法同軸感測器可以以全土壤標定參數將含水量誤差降至 1% 以內的前提下，TDR 法與砂錐法聯用是個有很好潛力的方法可以及時得到輾壓土壤含水量與乾密度資訊。

TDR 法與砂錐法聯合運用使用之工具如圖 4-21 所示除了 ASTM TDR 法之同軸感測器儀器部分外，並搭配砂錐法之砂錐桶(內填標準砂)與砂錐法底盤；在試驗流程如圖 4-22 所示先進行砂錐法(ASTM D1556)取得濕密度，再將砂錐法取出之土壤至入同軸感測器夯模夯實後進行視介電度量測以取得含水量，再以此含水量代入(4-3)式即可

取得乾密度，全部流程約 25 分鐘並可以省去烘乾法取得含水量需要多等一天之困擾，達到及時取得輾壓土壤資訊。

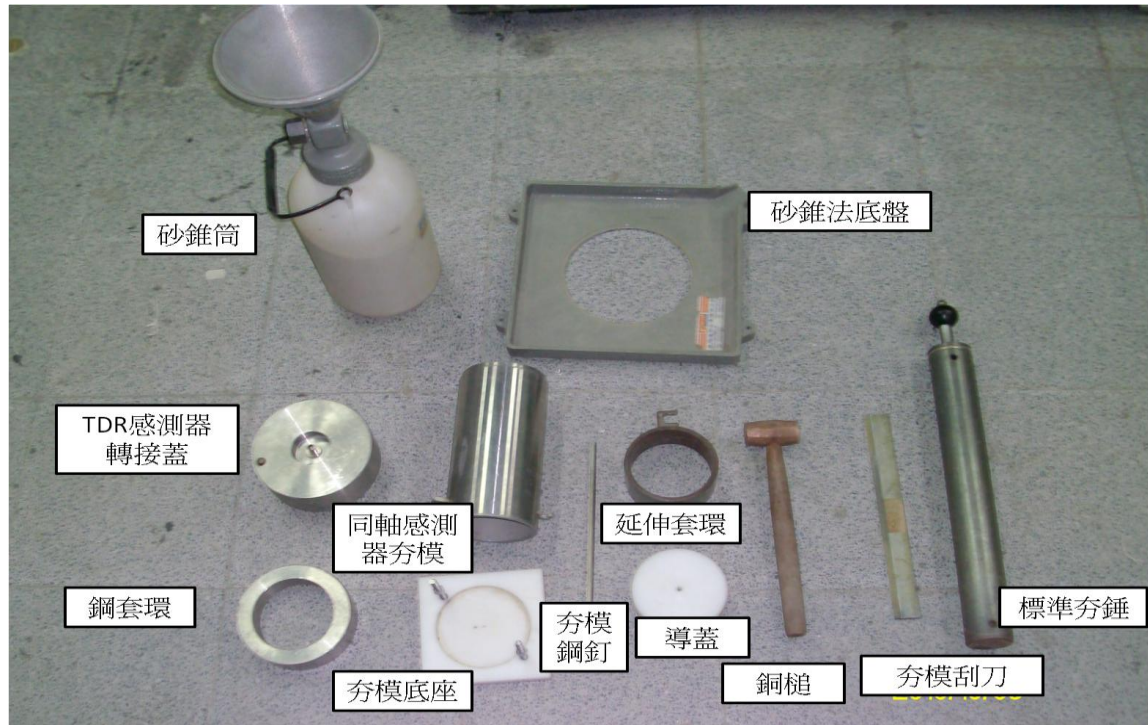


圖 4- 21 TDR 法與砂錐法聯用之實驗儀器

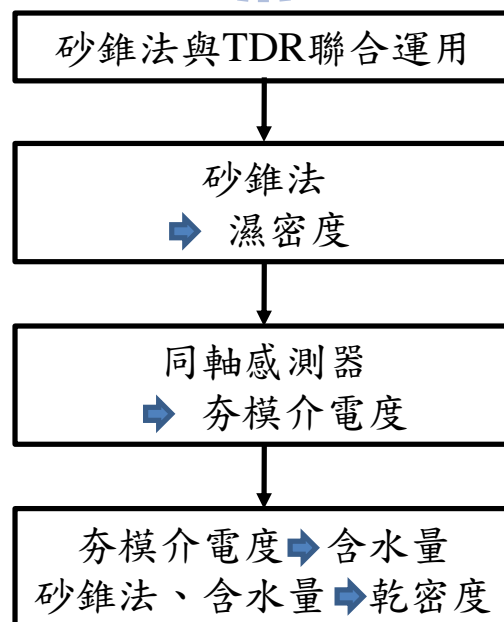


圖 4- 22 TDR 法與砂錐法試驗流程

現地感測器改善：

根據前面三小節對現地量測可能之誤差來源的探討可知，在試驗方法本身建議標定與現地量測採用相同長度之感測鋼棒可有較佳的量測準確度，而在現地感測器之改善上主要是以降低貫入擾動之影響為改善方向，在此一前提下，可以有兩種改善思維，其一是降低貫入擾動本身，另一種是雖然無法降低貫入擾動，但可增大感測器感應範圍，而間接降低擾動產生之影響。在第一種思維下，可以有兩種改善方案，一是減少貫入之感測鋼棒數，二是縮小貫入之感測鋼棒的尺寸；而在第二種思維下，可改變感測器型式，將原本採用多棒式感測器而造成取樣空間較集中於中央正極感測鋼棒周邊之感測器型態改為取樣空間較大的貫入式感測器。根據對現有感測器變動的多寡，依序對減少感測鋼棒數、縮減感測鋼棒尺寸以及變更貫入式感測器三種改善安案進行測試。

1. 減少貫入鋼釘數

首先進行減少感測鋼棒數之可行性，試驗之規劃是配合第一次的現地評估作業於湖山壩上游擋水壩之碾壓土層中進行 TDR 量測時，與標準程序不同，並不一次將多棒式感測器的四根感測棒皆貫入後才量測，而是先行將中間之正極感測棒貫入土中後(如圖 4- 23 所示)，依次貫入第一根負極感測棒後量測一次，貫入負極第二根後，再量測一次，最末待第三根負極感測棒亦貫入後再量測一次，透過分析此三次不同貫入感測棒數量所造成不同的擾動程度加以比較其三者間的介電度差異，以了解不同貫入感測鋼棒數目對貫入擾動所造成之影響是否會有所差異。

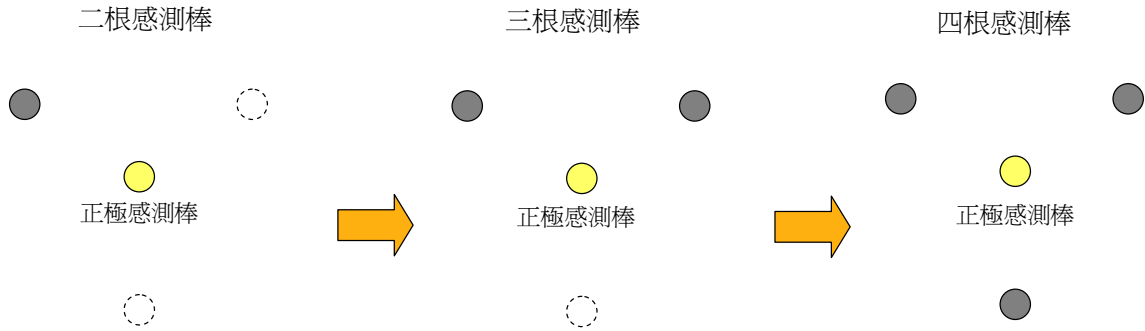


圖 4- 23 現地 TDR 感測器改善-減少感測鋼棒數試驗規劃

2. 縮減感測鋼棒尺寸

減少感測鋼棒數目的方案雖然對較緊密的現地土壤處可有效減少貫入之擾動，但其本身穩定性不足，對於需有高度準確度之量測而言較不恰當，因此再進一步進行縮減感測器尺寸之試驗，測試採用之直徑由目前之 10mm 降至 8mm 以及 6mm 兩種尺寸如圖 4- 24 所示(其直徑之縮減需至少保持在感測棒勁度可足夠貫入土中的範圍內)進行現地測試。

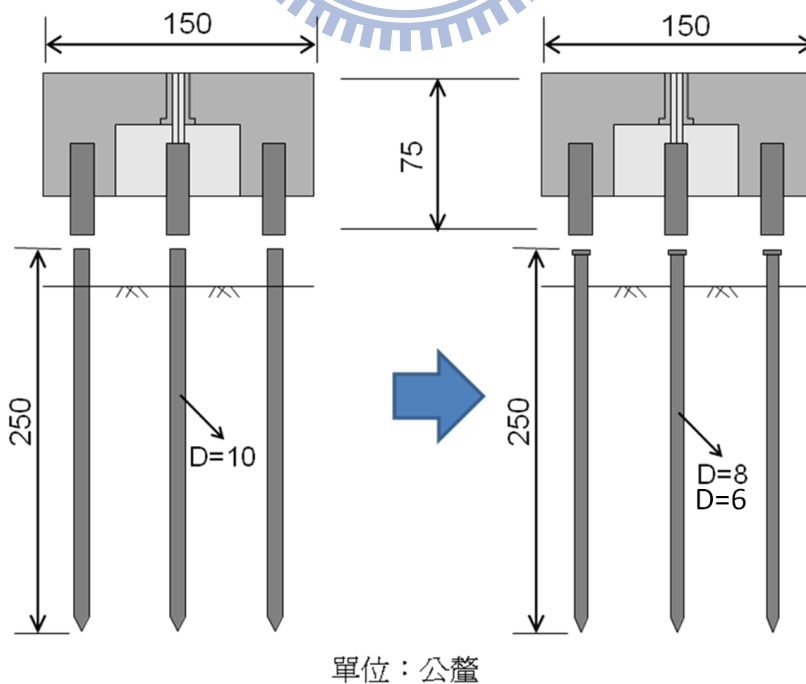


圖 4- 24 TDR 感測器設計圖：MRP 感測器由 10mm 改成 8mm、6mm

3. 採用貫入式感測器

除此之外，為降低貫入影響所造成的變異，亦進行貫入式感測器之設計規劃及測試，初步之其設計圖與實體圖如圖 4- 25 所示，感測器設計直徑採 10mm，鋼釘貫入土端長度約為 256 mm，以不銹鋼做為主體材料車出槽溝鑲入一個上底為 5mm、下底為 2mm、高為 3mm 的德爾林條(塑膠材料)，德爾林條中間洗一條小槽溝置入一條直徑 0.5mm 單芯銅線，由德爾林條使內導體絕緣，並將內外導體接上 BNC 接頭可以連結傳輸纜線。為了在貫入式感測器釘入土裡時保護貫入上面的 BNC 接頭而製作一個鋼釘蓋，當貫入土裡時把蓋子蓋上，而量測時再把鋼釘蓋拔下。

此貫入式感測器長度與直徑皆與改善前之現地用感測鋼棒尺寸相同，但因為等同只有一個鋼釘的貫入擾動，並且有較大的感應空間，因而預期其亦可有良好的改善效果。

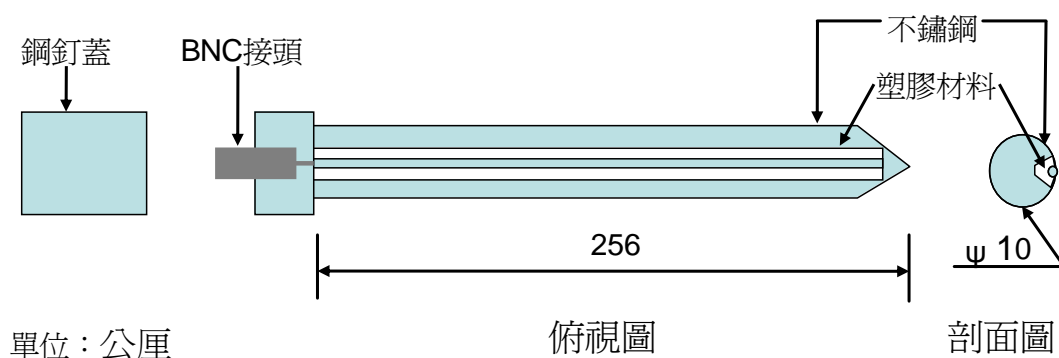


圖 4- 25 貫入式感測器設計圖與實體圖

4.3.6 TDR 法與砂錐法聯用改善成效

在現地進行雙步驟法同時可以取得同軸感測器含水量與砂錐法濕密度，則可根據前面 4.3.5 小節提出 TDR 法與砂錐法聯運用來評估改善成效。而現地改善成果如圖 4- 26 所示，圖中垂直軸 TDR 法與砂錐法聯用取得之乾密度，水平軸為砂錐法與烘乾法取得之乾密度，由圖片中顯示在乾密度的表顯上誤差皆在 2% 以內，其量測成果更優於 ASTM 雙步驟法外，本方法得到乾密度準確度以達到輾壓土壤工程品管之需求可以建議在國內可以推廣。

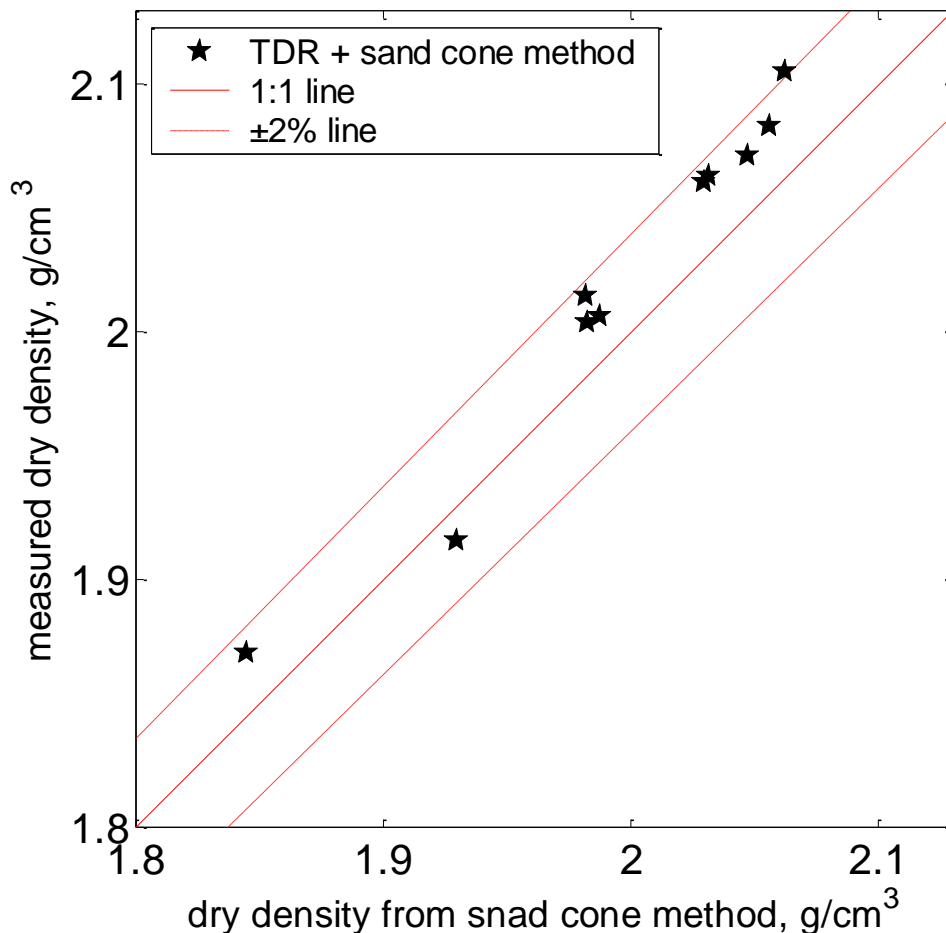


圖 4- 26 砂錐法與 TDR 法聯用量測密度(各自標定參數分析)比對結果

4.3.7 現地改感測器改善成效

根據前面 4.3.4 小節對現地量測可能之誤差來源的探討可知介電量測受到土壤受擾動影響造成乾密度量測誤差，也根據 4.3.5 小節針對現地趕測器提出了三種改善方案包括減少貫入鋼釘數、縮小多棒式感測器鋼釘尺寸與製作貫入式感測器可能可以改善的方案，其改善成果如下：

減少貫入鋼棒數改善成效：

此試驗於現場採用 ASTM D6780 感測器進行試驗，共在三處不同位置進行測試(試驗地點編號分別為 TDR01、TDR02 與 TDR03)，為避免雜訊干擾所造成的試驗錯誤，每一個感測棒數目在量測時皆進行三筆量測，現場之試驗情況如圖 4-27 所示，由圖中可見，當只有兩根感測棒貫入時在正極感測棒與負極感測棒間已有明顯裂縫產生，第三根以及第四根感測棒貫入後的情形類似。



圖 4-27 現地 TDR 量測誤差來源探討-貫入擾動影響試驗情形

將測得之 TDR 波形以單切線法(請見 2.2.3)進行視介電度 Ka 之分析，將視介電度量測值正規化後分析比較如圖 4- 28 所示。圖 4- 28 橫軸為貫入土中之感測棒數目，垂直軸為視介電度開根趨勢外，其餘兩處感測棒貫入數目對視介電度之影響並不明顯。圖中三角形號處是在同軸感測器中所得之正規化介電值，圖 4- 28c 之測試點位所在與圖 4- 20 中受擾動程度最大者相鄰，感測鋼棒貫入後有較明顯擾動，其多棒式感測器介電行為是在同軸感測器下方，由此結果可見，當貫入擾動對土壤產生是為擠壓情形時，減少貫入之感測鋼棒數目是可有效降低貫入擾動所造成之影響。而由圖中較不受擾動影響的 a 與 b 中不同感測鋼棒數目(即是不同感測器型式，並具有不同之特徵阻抗)之結果亦可驗證前一小節對於感測器型式並不影響視介電度計算之探討結果(2 根、3 根與 4 根感測鋼棒所得之正規化 Ka 有相近的結果)。

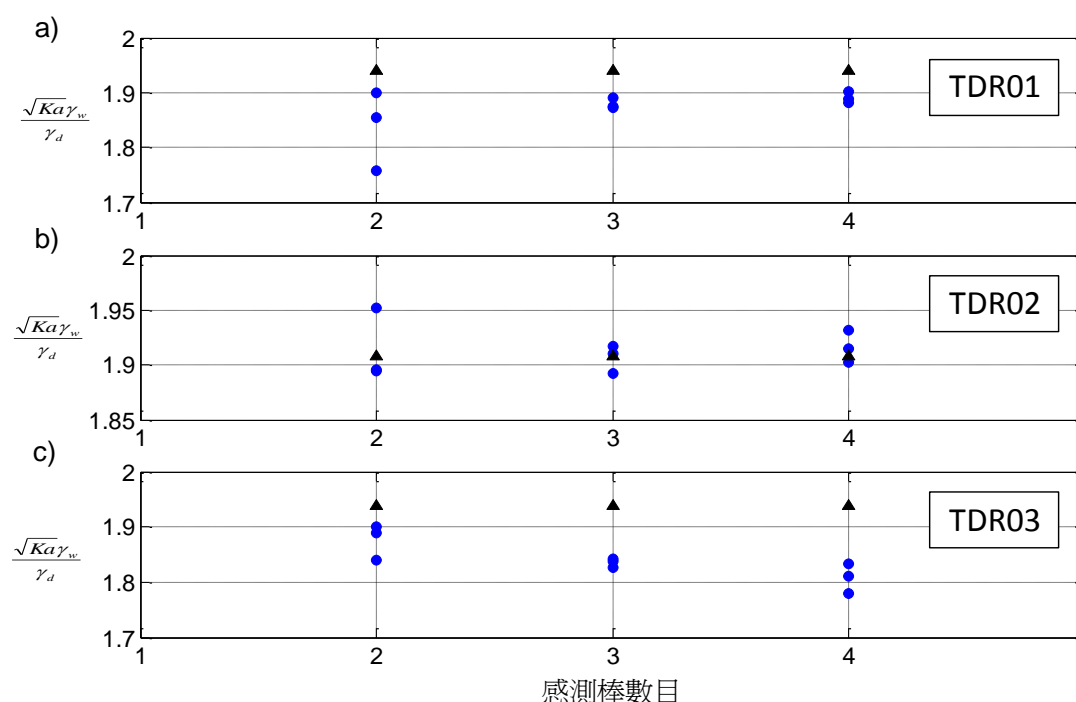


圖 4- 28 現地 TDR 量測誤差來源探討-貫入擾動影響試驗結果

有鑒於前面所提及貫入擾動影響測試是以 TDR 感測器轉接蓋進行測試之成果，轉接蓋並沒有辦法自主性站立在施作上並非是個穩定

試驗方法，根據前面所提及的減少鋼棒數進行改善，針對可以量測兩根鋼釘之感測器轉接蓋進行製作，其製作設計圖與實體圖如圖 4- 29 所示，感測器為一厚 30mm 德爾林塊(塑膠材料)，兩端皆為直徑 35mm、高 21.5mm 之圓柱形不鏽鋼腳鑲入德爾林塊裡，兩腳圓心距為 114.6mm。試驗使用之鋼釘為多棒是感測器之鋼釘，在雙步驟法試驗之前，先將 MRP 模具最外側之兩根鋼釘貫入進行二根鋼棒感測器量測，待量測完畢後再釘入另外兩根鋼棒進行雙步驟法四根鋼棒感測器量測，其試驗規劃如圖 4- 30 所示。

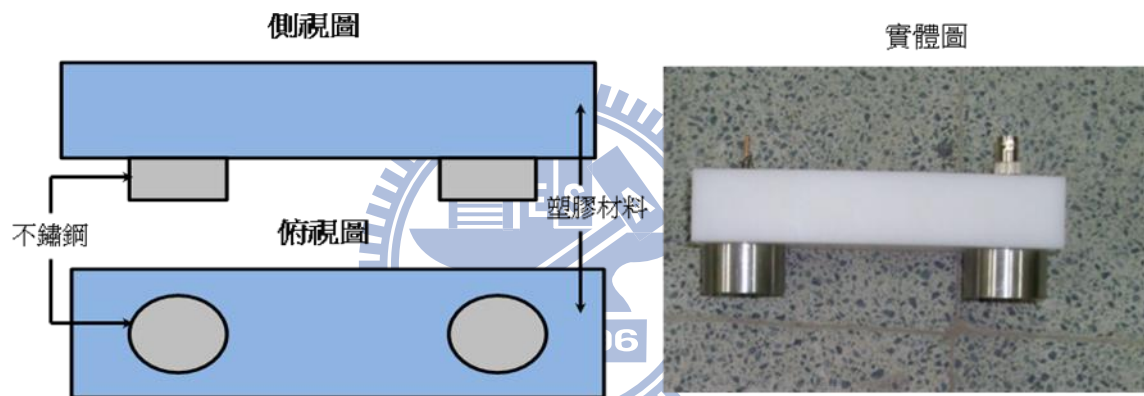


圖 4- 29 二根感測棒感測器轉接蓋

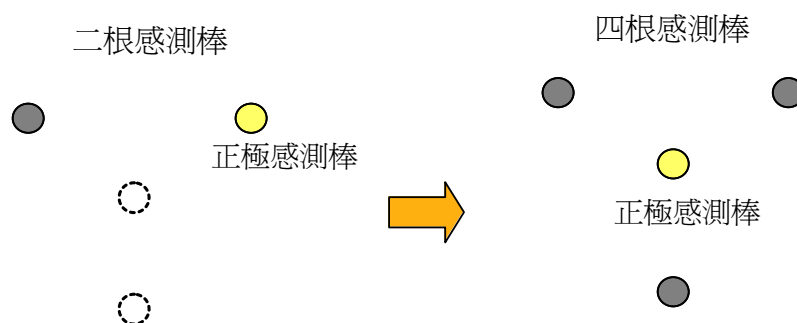


圖 4- 30 以新製二跟式感測器轉接蓋減少鋼釘數評估試驗規劃

依據二根鋼棒感測器試驗規劃(如圖 4- 30 所示)再度於湖山水庫湖南壩進行現地試驗評估(2010.09.29)，其試驗現場情況如圖 4- 31 所示，本次試驗主要以 6mm 與 8mm 鋼釘為主，本圖為 6mm 之鋼釘同一組試驗為例，在本圖中 6mm 鋼釘表現的裂縫並不明顯，不論二根鋼棒或四根鋼棒現地裂縫沒有非常明顯差異。

號並對乾密度進行正規化，a)、b)、c)是表示三處不同測試位置之結果，結果顯示除了在圖 4- 28c 該測試處隨著感測棒數目增加視介電度略有下降之

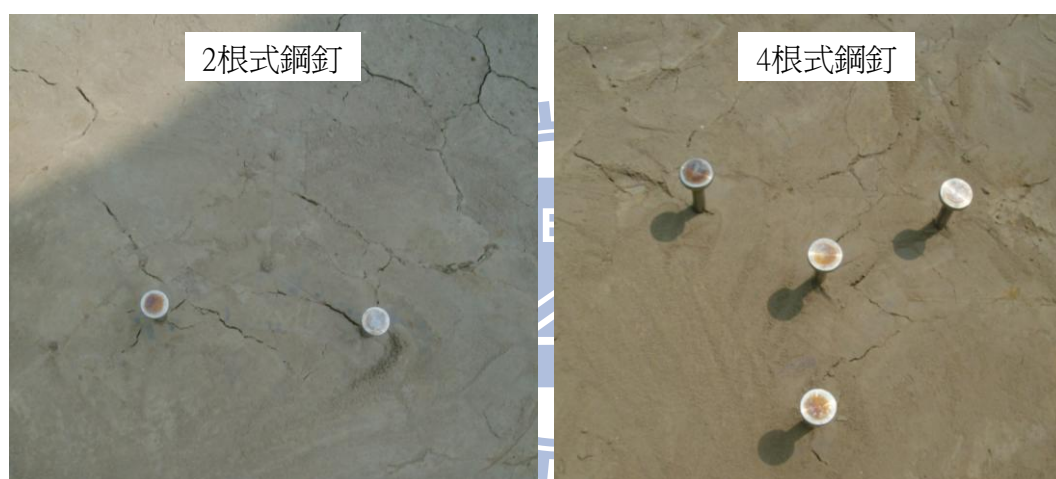


圖 4- 31 減少鋼棒現地試驗情況

亦將本試驗測得之 TDR 波形以單切線法(請見 2.2.3)進行視介電度 K_a 之分析，將視介電度量測值正規化後分析比較如圖 4- 32 所示，不論 6mm 與 8mm 鋼釘四根鋼棒多棒式感測器與同軸感測器直幾乎一致，但二根鋼棒多棒式感測器成果重複性不佳且有一致偏高的情況，在二根鋼棒感測器量測時更會受到週遭環境影響，在量測附近有一點雜物皆會影響波形跳動造成波形不盡理想，在二根式感測器評估的成果明顯並不如四根鋼棒感測器，二根式的感測器其因電磁場具有不對稱(unbalanced)的先天特性，而使得其作用有如天線會較為容易受到

外界其它電磁波源的干擾，進而使得量測數據的穩定性下降，有鑑於此建議採用四根鋼棒的縮減尺寸多棒式感測器進行即可有很好成效。

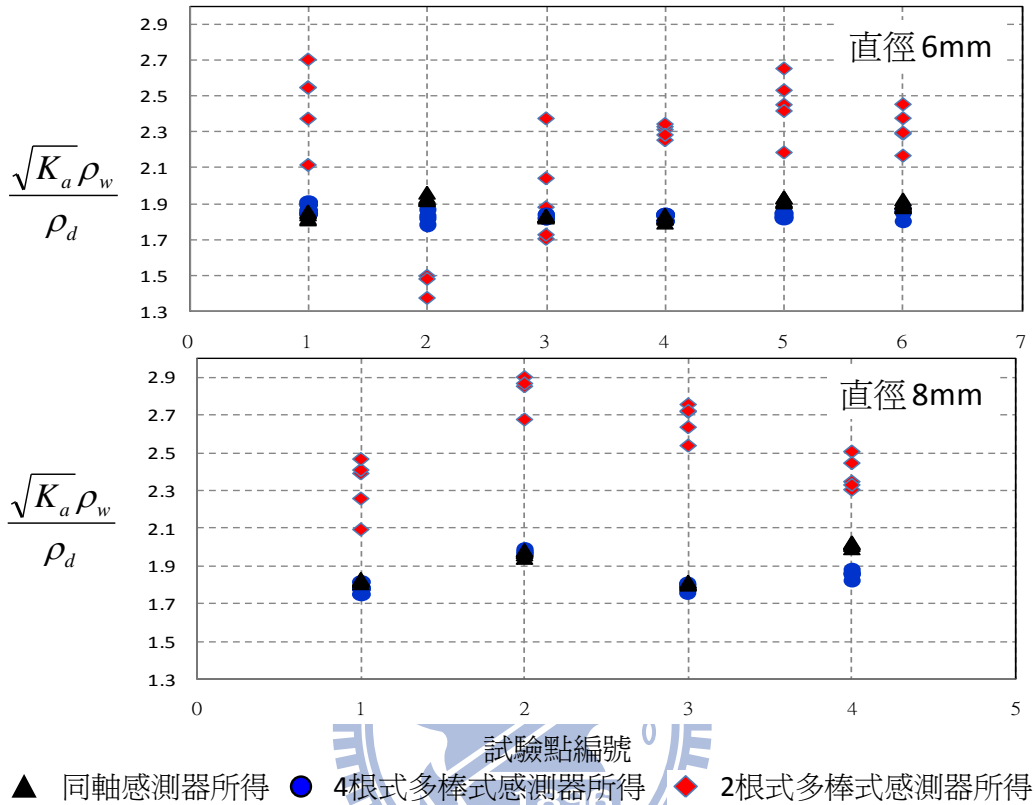


圖 4-32 減少鋼棒感測器試驗評估成果

縮小多棒式感測器鋼釘尺寸改善成效：

將現有 MRP 感測器直徑由目前之 10mm 降至 8mm、6mm (其直徑之縮減需至少保持在感測棒勁度可足夠貫入土中的範圍內)，以這兩種尺寸的鋼釘於湖山水庫湖南壩進行現地試驗評估(2010.09.29)，其試驗現場情況如圖 4-33 所示，圖中也可以發現在直徑 6mm 鋼釘在現地施作所產生的裂縫比直徑 8mm 鋼釘產生的裂縫還少。



圖 4-33 不同尺寸鋼釘在現地試驗情況

在湖山水庫湖南壩進行現地試驗評估將測得之 TDR 波形以單切線法(請見 2.2.3)進行視介電度 K_a 之分析，分析結果如圖 4-34 所示，視介電度經過開根號與乾密度正規化後(多棒式感測器使用砂錐法得到乾密度、同軸使用模內的乾密度)，直徑 6mm 鋼釘與 8mm 鋼釘呈現的成果都不錯，明顯的很接近同軸感測器量測的值，本圖可以說明鋼釘尺寸造成貫入擾動明顯影響現地試驗量測。

實際上在現場施做時，6mm 鋼釘在貫入土裡時比 8mm 鋼釘更容易貫入，試驗結束拔鋼釘情況亦是 6mm 鋼釘比 8mm 鋼釘更容易拔起，相較之下 6mm 鋼釘在施作上更省時、便利性佳。

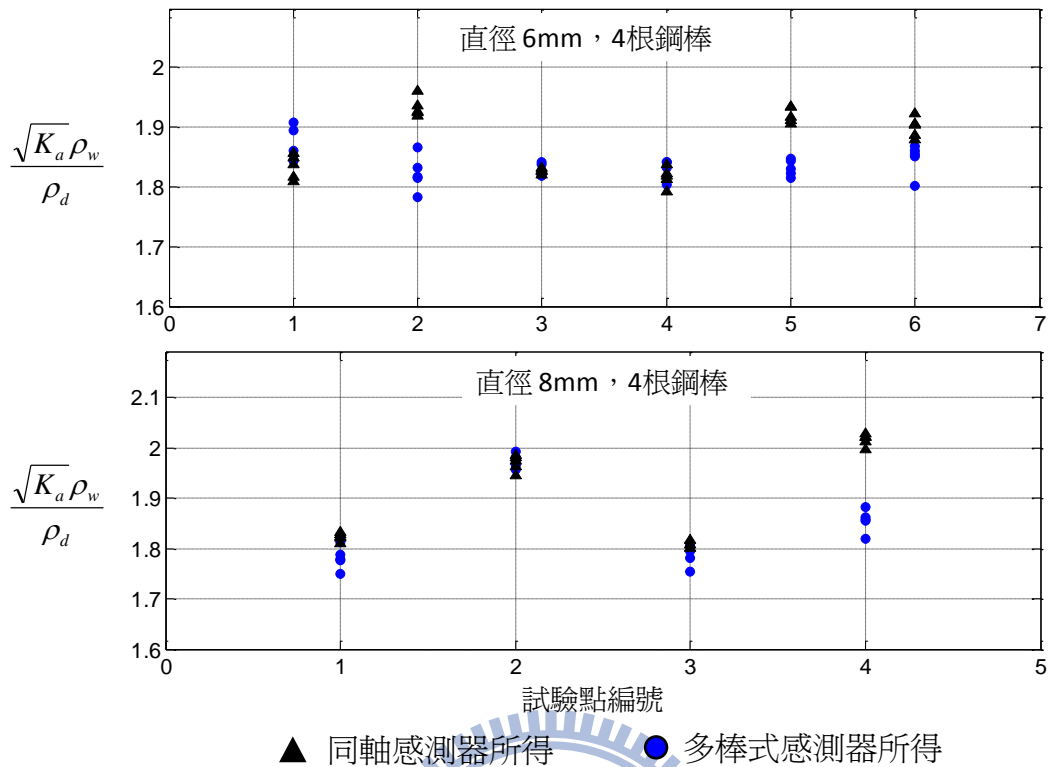


圖 4-34 縮小鋼釘尺寸現地試驗成果

採用貫入式感測器改善成效：

本研究製作的貫入式感測器鋼釘於湖山水庫湖南壩進行現地試驗評估(2010.09.29)，其試驗現場情況如圖 4-35 所示試驗時鋼釘造成的龜裂也並不明顯。



圖 4-35 貫入式感測器現地試驗情況

在湖山水庫湖南壩進行現地試驗評估將現場貫入式感測器測得之 TDR 波形以單切線法(請見 2.2.3)進行視介電度 K_a 之分析;由於貫入式感測器中間有塑膠材料將降低在土壤量測視介電度,在試驗前先將貫入式感測器置入純水中量測視介電度(已知純水介電常數為 81)來進行修正,得到修正倍數 1.6167 將現地視介電度修正分析結果如圖 4- 36 所示顯示在經過修正與正規化後成果也相當良好,同軸感測器與貫入感測器兩者結果很一致貫入式感測器確實有效降低同軸與現地間所測得之視介電度。

惟現地使用經驗顯示在經過五次試驗後,德爾林條與鋼釘有部分分離的情況致使試驗數據不佳,目前之貫入式感測器於耐久度上尚嫌不足,於現地貫入約六次後會有不鏽鋼與德爾林脫離的問題,此問題之改善需透過專用黏合膠的測試或是更專業性之設計加以解決。

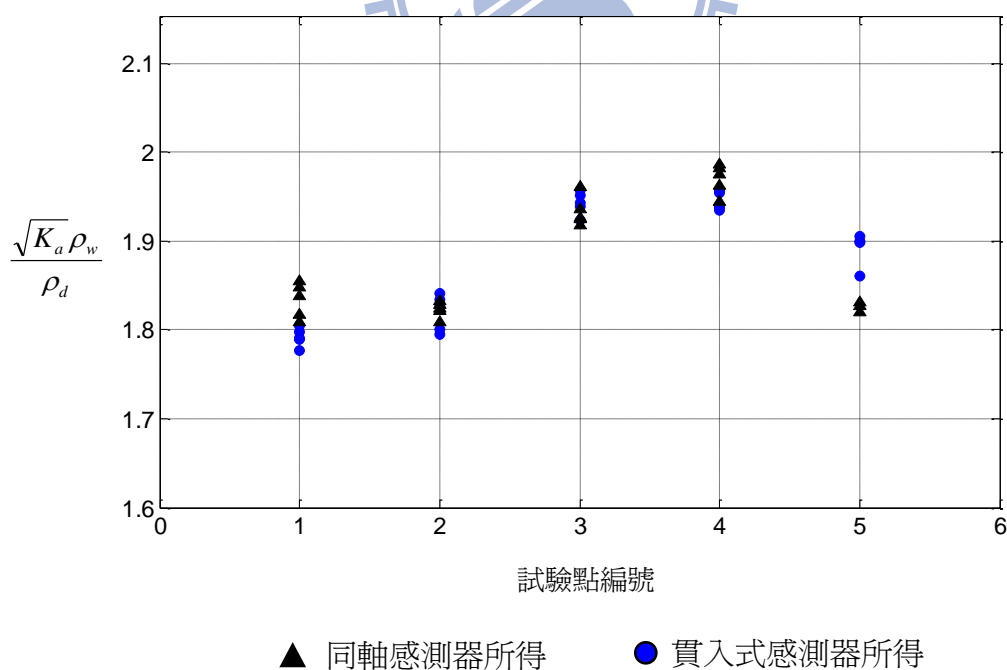


圖 4- 36 貫入式感測器現地試驗成果

根據湖山水庫湖南壩進行現地試驗評估(2009.09.29)現場進行含水量及乾密度量測與砂錐法之比對，是以 ASTM 雙步驟法(包含直徑 6mm 與 8mm 多棒式感測器成果)外，並加入貫入式感測器與同軸感測器聯用之成果(貫入式感測器含水量由雙步驟法同軸感測器取得)，其分析中所需之標定參數是以在第 4.2.2 小節建議使用全部土壤之標定之結果(如表 4- 1 所示)，結果比對如圖 4- 37 及圖 4- 38 所示。圖 4- 37 為含水量之比較結果，橫軸為採用烘乾稱重法所得之含水量，垂直軸為使用 TDR 量測所得之含水量，結果顯示採用 6mm 鋼釘、8mm 鋼釘與貫入式感測器之結果誤差都在 2%之內，其含水量皆如預期的在 2%，但含水量皆有一致偏低情況可能仍為受土壤種類影響。

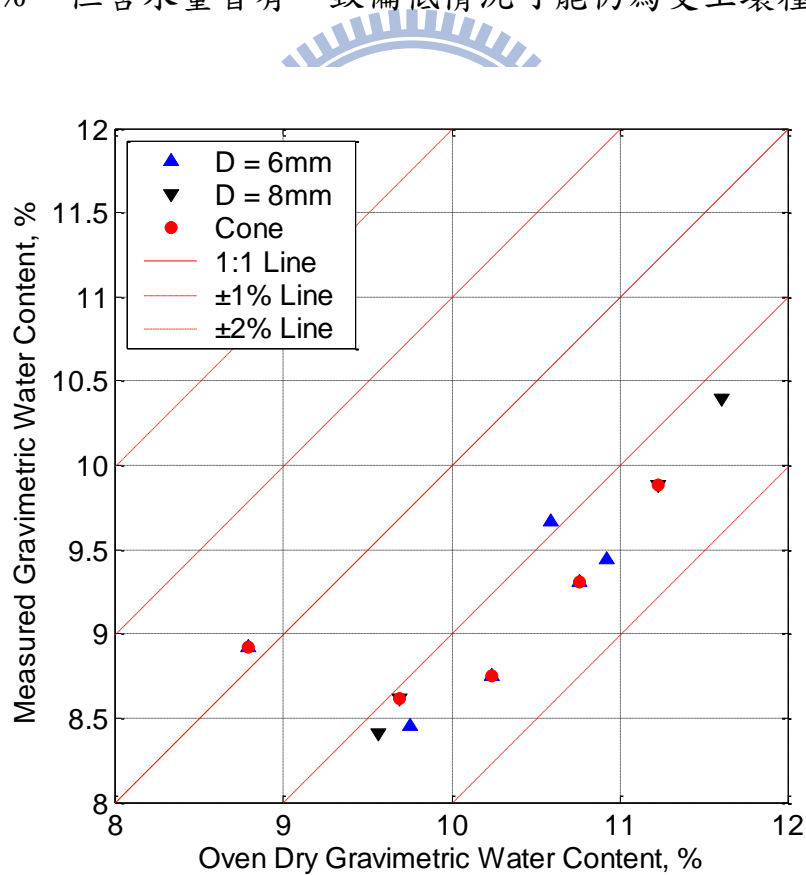


圖 4- 37 現地感測器改善—含水量比對結果

圖 4- 38 為乾密度之比較結果，橫軸為砂錐法所得之乾密度，垂直軸為使用雙步驟法(包含多棒式感測器 6mm、8mm 鋼釘)與貫入式感測器與同軸感測器聯用之成果，比對結果顯示使用 6mm 鋼釘、8mm 鋼釘與貫入式感測器的成果誤差都在 3% 以內。雙步驟法部分有效解決貫入擾動影響致使乾密度準確度明顯提升，再現地施作表現上 6mm 鋼釘比 8mm 鋼釘更容易貫入與拔起，施作上不但省時更有效率，建議以 6mm 鋼釘作為雙步驟法多棒式感測器；由於含水量有著 2% 的誤差在致使乾密度亦有 3% 的誤差，如能解決土壤種類問題乾密度表現會更佳。

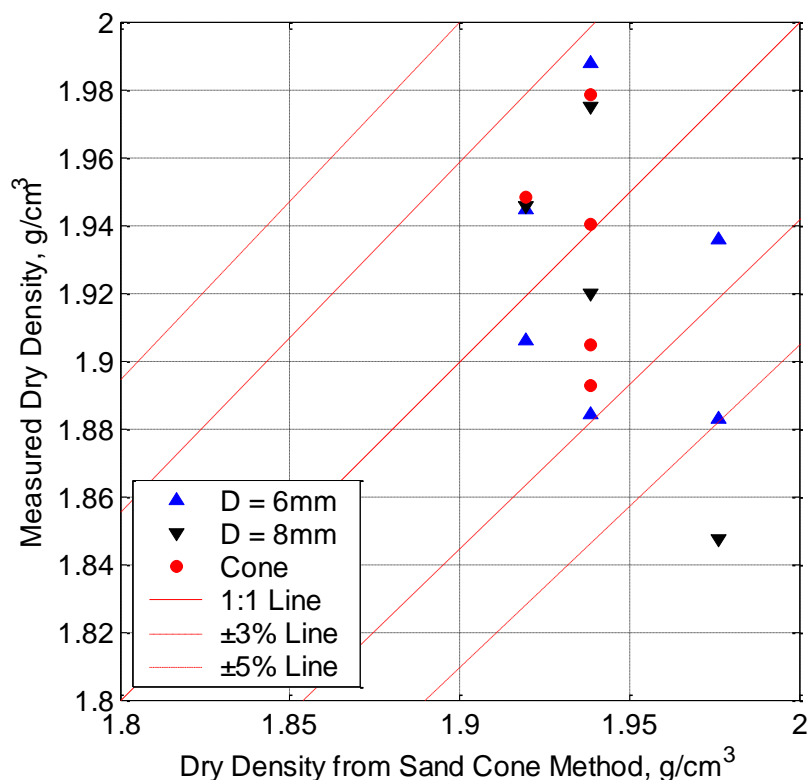
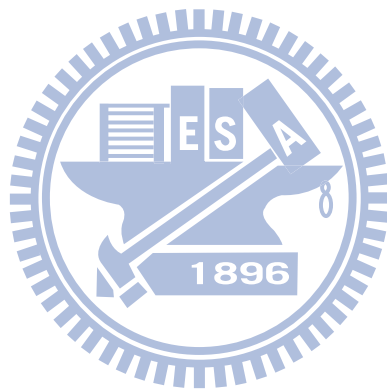


圖 4- 38 現地感測器改善－乾密度比對結果

經過三種改善方法之測試後，減少感應鋼棒數、縮減感應鋼棒尺寸以及改採貫入式感測器皆可有效降低貫入擾動所造成之影響，然而

根據三種不同方法於現地施作時的穩定性、施作便利性與使用耐久性之考量後認為，目前採用縮減感應鋼棒至直徑 6mm 之方案最為恰當可行。



五、結論與建議

5.1 結論

本研究顯示介電度分析若採用相同之土壤進行量測，其所得之體積含水量可達 1% 之準確度，但若標定土壤與現地量測之土壤存在有差異時，其誤差最大至少可達 8%。然而，由採用共同迴歸之參數進行分析時，因使用之參數已同時考量不同土壤種類之可能影響範圍，可將土壤種類造成之誤差影響大幅降低至 2% 的程度，在進行具有土樣不確定因素存在之量測時，可採用綜合迴歸之參數以降低其可能因土壤種類差異而造成的誤差程度性。而導電度分析在標定部分，其線性迴歸不理想，導電度行為也受土壤影響很嚴重，在導電度分析方面其準確性並不理想。

本研究透過採用大型夯模進行室內模型試驗比對，比對之量測方法包含 ASTM D6780 TDR 雙步驟法、ASTM D6780 TDR 單步驟法，比對結果顯示，ASTM D6780 雙步驟法更優於 ASTM D6780 單步驟法。

現地部分於湖山水庫上游擋水壩完成三次現地試驗共十組量測資料結果，在施作效率上，ASTM D6780 雙步驟法可於 35 分鐘獲得一組含水量與乾密度結果，而評估結果顯示，ASTM D6780 雙步驟法之含水量與烘乾稱重法之結果比較誤差小於 1%，但 ASTM D6780 雙步驟法之乾密度與砂錐法之結果比較誤差達 8%，單步驟法量測雖然簡易，但乾密度與含水量則評估結果不理想，含水量誤差約 2%，而乾密度誤差更是大於 8%，由此可知 ASTM D6780 雙步驟法優於 ASTM D6780 單步驟法，而實際上單步驟法理論上亦存在著理論上矛

盾缺陷。

綜合現地試驗與模型試驗結果比對結果，雙步驟法優於單步驟法，惟目前雙步驟法乾密度量測上有著同軸感測器與 MRP 感測器正規化值線性迴歸並不一致導致誤差較大，現階段提出之砂錐與 TDR 技術聯合運用，比對結果顯示，砂錐與 TDR 技術聯合運用優於 ASTM D6780 雙步驟法與 ASTM D6780 單步驟法，其砂錐與 TDR 技術聯合運用含水量與烘乾稱重法之結果比較誤差小於 1%，而砂錐與 TDR 技術聯合運用之乾密度與砂錐法之結果比較誤差小於 2%，其量測時間可以省去烘乾法量測含水量的時間，可以及時得到現地碾壓土壤含水量與乾密度資訊。聯合使用砂錐法與 TDR 含水量量測技術進行現地含水量及乾密度量測表現良好(誤差在 2% 以下)，現階段建議可推廣做為碾壓土壤工程品管之技術。

現地試驗中同軸感測器與 MRP 感測器在視介電度試驗中並不如預期的在同一條回歸線上，如此造成 ASTM TDR 雙步驟法乾密度量測上有較大誤差，經測試結果顯示此誤差之來源是為土壤擾動造成，將現地多棒式感測器由四根改做二根，可有效降低貫入所造成之擾動，提升雙步驟法於現地乾密度量測之準確度。

針對土壤貫入擾動影響再度進行現地評估，評估除了製作二根鋼棒感測器轉接蓋外，還針對雙步驟法多棒式感測器鋼棒修細至直徑 6mm 與 8mm 以及另外製作一根貫入式感測器。由現地結果顯示兩根鋼棒感測器在視介電度分析有重複性不佳的問題，波形分析經過正規化後也不如四根鋼棒的成果準確，現地量測時亦受到環境干擾影響很大，就這次結果並不建議使用。四根鋼棒多棒式感測器測試的結果顯示直徑 6mm 鋼釘與 8mm 鋼釘在含水量誤差達到 2% 以內，乾密度誤

差達到 3% 以內，皆有效提升乾密度誤差改善土壤貫入擾動影響，而 6mm 鋼釘在施作上更容易貫入與拔起，在施作上有其便利性可以加快作業時間，在雙步驟法改善上更建議以直徑 6mm 鋼釘作為多幫式感測器鋼釘。在貫入式感測器改善乾密度量測其現地誤差也在 3% 以內，在感測器容易壞能需改善外貫入式感測器將是一個有發展潛力的新式感測器。

根據本研究對 ASTM D6780 規範上建議在單步驟法部分有著理論上矛盾，建議暫不採納待發展成熟時再重新納入。雙步驟法建議以直徑 6mm 鋼棒做為多棒式感測器之感測棒，在施作上可以避免貫入擾動影響，操作上方便貫入與拔起作業上能更加迅速。TDR 法與砂錐法聯用效果亦佳，短期內可以將 TDR 法與砂錐法聯用納入規範使用。

5.2 建議

- (一) ASTM D6780 TDR 雙步驟法含水量量測表現尚可接受，惟目前碾壓土壤視介電度量測有受到土壤種類影響，雖然依然可以以全回歸分析參數來改善部分誤差，但最終仍然希望以降低土壤種類誤差，文獻回顧顯示在頻率 500MHz 到 1GHz 之間，不同土壤的介電常數變化不大，較不受土壤組構與種類之影響，有潛力做為含水量量測之最佳頻段，有鑑於此，建議後續可進行應用土壤介電頻譜分析來更進一步改善土壤種類影響之可能，如能改善介電度受土種類影響，可減少反覆標定不同現地土壤時間，將可大幅提升工程檢核效率。此外低頻之介電度資訊可能有助於土壤密度之量測。

- (二) 單步驟法導電度與土壤性質之關係變異性大，實驗結果並不如預期，實際上單步驟法理論上亦存在著理論上矛盾缺陷，其於碾壓土壤含水量與乾密度檢測之適用性仍須進一步探討，建議必須進一步對導電度行為進行探討。後續單步驟法亦可以考慮以濕密度與乾密度進行標定搭配介電度與乾密度、濕密度關係來改良單步驟法含水量與乾密度量測技術。
- (三) ASTM TDR 雙步驟法同軸感測器與 MRP 感測器介電度量測正規化後並未落在同一條回歸線上，原因主要為土壤受擾動造成，除 6mm 多棒式感測器是為改善方案外，貫入式感測器表顯上也有相當大的潛力，建議後續可以朝向發展貫入式感測器。貫入式感測器目前有著容易壞的問題需要被克服，建議以後多嘗試找尋更理想的接合粘著劑以提高使用持久性。另外建議可以朝著如何更有效去標定亦可能發展出省去同軸感測器量測之步驟達到更省時更有效率之碾壓土壤工程品管之技術。
- (四) 雙步驟法之施作效率主要受到需取土至模中量測之影響而無法更加有效的降低其施作時間，為可達成非破壞性之量測以提升量測速率可達 10 分鐘之目的，建議後續可再針對不同之非破壞性檢測技術與 TDR 量測技術之聯合使用之可行性進行研究探討。

參考文獻

1. ASTM Standard D698-07, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))”, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA
2. ASTM Standard D1556-07, “Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method”, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA
3. ASTM Standard D2216-05, “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA
4. ASTM Standard D2922-01, “Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)”, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA
5. ASTM Standard D6780-05, “Standard Test Method for Water Content and Density of Soil in Place by Time Domain Reflectometry (TDR)”, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. Dirksen, C., and S. Dasberg.(1993). Improved calibration of time domain reflectometry of soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:660–667.

7. Feng, W., Lin, C.P., Deschamps, R.J. and. Drnevich, V.P (1999), “theoretical model of a multisection time domain reflectometry measurement system”, water resource research, 35:2321-2331.
8. 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.
9. Heimovaara, T. J. (1994). “Frequency Domain Analysis of Time Domain Reflectometry Waveforms: 2 A four-component complex dielectric mixing model for soils,” Water Resources Research, Vol. 30, No. 2, pp. 201-209
10. Heimovaara, T. J., de Winter, E. J. G., van Loon, W. K. P., and Esveld, D. C. (1996). “Frequency-Dependent Dielectric Permittivity from 0 to 1 GHz: Time Domain Reflectometry Measurements Compared with Frequency Domain Network Analyzer Measurements,” Water Resources Research, Vol. 32, No. 12, pp. 3603-3610.
11. Hook, W.R., and N.J. Livingston. (1996). Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:35–41.
12. Jacobsen, O.H., and P. Schjønning. 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. J. Hydrol. 151:147–157.

13. Klein, K. and Santamarina J.C. (2003), Electrical Conductivity In Soils: Underlying Phenomena, Journal of Environmental Engineering Geophysics, vol. 8, no. 4, pp. 263-273.
14. Ledieu, J., P. De Ridder, P. De Clerck, and S. Dautrebande. (1986). A method for measuring soil moisture content by time domain reflectometry. J. Hydrology (Amsterdam) 88:319–328.
15. Lin, C.P. (1999). Time domain reflectometry for soil properties. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
16. Lin, C.-P. (2003), "Frequency Domain versus Traveltime analyses of TDR Waveforms for Soil Moisture Measurements," Soil Sci. Soc. Am. J., 67(3): 720-729.
17. Ponizovsky, A.A., S.M.Chudinova, and Y.A. Pachepsky. (1999). Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. J. Hydrology (Amsterdam) 218:35–43.
18. Roth, K., H. Schulin, H. Flühler, and W. Attinger. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resour. Res. 26:2267–2273.
19. Shan, P. H. and Singh, D. N., 2005, "Generalized Archie's Law for Estimation of Soil Electrical Conductivity," Journal of ASTM International, Vol. 2, No. 5, pp. 145-164.
20. Siddiqui, S.I. and Drnevich, V.P. (1995), "Use of Time Domain Reflectometry for the Determination of Water Content and Density of Soil," FHWA/IN/JHRP-95/9, Purdue University.

21. Sun, Z.J., G.D. Young, R.A. McFarlane, and B.M. Chambers. (2000). The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. *Can. J. Soil Sci.* 80:13–22.
22. Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16:574–582.
23. Yu, X. and Drnevich, V.P. (2004), “Soil Water Content and Dry Density by Time Domain Reflectometry,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 9, September.

