

土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定 應用探討

成果報告



行政院農業委員會水土保持局編印
中華民國 110 年 12 月

土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定
應用探討

**Investigation of soil dielectric and
hydrology properties on shallow landslide
stability
(成果報告)**

執行單位：國立中央大學

執行期間：110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：鐘志忠 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定應用探討

摘要

土層含水特性與導電度/電阻率具有高度相關性，因此已有相關研究嘗試透過地電阻影像探測 (Electrical Resistivity Tomography, ERT) 輔助進行大範圍地區之含水量分布量測，甚至延伸於基質吸力，以進行淺層崩塌穩定性分析。但電阻率又同時受到地文及水文因子的影響，因此難以單獨利用 ERT 量測地層含水特性分佈，前期研究提出結合時域反射技術 (Time Domain Reflectometry, TDR) 具同時量測土層含水特性及導電度 (Electrical Conductivity, EC)/電阻率 (Resistivity) 之特性進行監測輔助，但其中含水量與電阻率遲滯 (Hysteresis) 現象的產生與乾溼循環速度相關；此外，上述土壤含水特性與導電度關係除受土壤種類與乾密度控制，仍需進一步檢核如水質導電度、pH 值等環境因子影響。為此，本研究嘗試建立改良型之 TDR 壓力鍋、砂箱與離心機試驗，配合 TDR 介電頻譜技術，增加頻率域上之介電行為，以連結上述土壤水文、環境以及力學因子，評估觀測值與影響因子間之不確定性，最後以實際坡地為示範站，將整合 TDR 含水量貫入器與地電阻測法相關成果，蒐集現地觀察資料以驗證上述研究方法之可行性，並配合數值方法，以淺崩塌邊坡為例，剖析實際坡地穩定分析之不確定性與限制。

關鍵詞：時域反射技術、淺崩塌、介電頻譜、含水量、電阻率

Investigation of soil dielectric and hydrology properties on shallow landslide stability

Abstract

The water content of the soil layer is highly correlated with conductivity/resistivity. Therefore, related studies have attempted to assist in the measurement of water content distribution in a large area through Electrical Resistivity Tomography (ERT), even extending to the matrix suction to analyze the stability of shallow landslide. However, resistivity is also affected by geological and hydrological factors, so it is difficult to use ERT alone to measure the distribution of soil-water profile. The previous study proposed to combine Time Domain Reflectometry (TDR) to measure the soil-water characteristics with electrical conductivity, but the hysteresis between water content and resistivity is related to the drying and wetting rate. In addition, the above-mentioned relationship between soil moisture and electrical conductivity is not only controlled by soil type and dry density, but still needs to be further checked for the influence of environmental factors, such as water conductivity, pH value and so on.

To this end, this research attempts to establish an improved TDR pressure plate, sand box and centrifuge tests, combined with TDR dielectric spectrum, increasing information of the dielectric behavior in the frequency domain in order to link the above-mentioned soil hydrological, environmental and mechanical factors. The uncertainty between the influence factors and the actual slope land will be used as a demonstration by integrating the TDR penetrometer and the related results of ERT. On-site observation data will be used to verify the feasibility of the above methods, as well as cooperation with the numerical method. Finally, uncertainty and limitation of shallow slope stability analysis will be

commented.

Keywords: Time Domain Reflectometry (TDR), Shallow landslide,
Dielectric spectrum, Soil water content, Resistivity

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 緒論	1-1
第一節 背景說明	1-1
第二節 計畫目標	1-3
第二章 工作執行方法與初步成果	2-1
第一節 相關文獻回顧評析	2-1
一、 非飽和土之水文與力學特性	2-1
二、 土壤電學特性	2-4
三、 TDR 技術說明	2-9
四、 TDR 於非飽和土之水文與力學特性探討	2-12
五、 VNA 相關應用	2-17
六、 綜合評析	2-21
第二節 第一年研究規劃與初步成果	2-22
一、 現地場址 TDR 含水量與導電度行為探討	2-22
二、 TDR 砂箱與壓力鍋試驗規劃	2-27
三、 TDR 介電頻譜分析精進	2-58
第三節 第二年研究規劃	2-108
一、 TDR 與離心機物理模型整合	2-108
二、 重力影響因子探討	2-111
第四節 第三年研究規畫	2-117

一、 現地試驗場址說明	2-117
二、 數值分析與不確定性探討	2-121
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第四章 結論與建議	4-1
第一節 結論	4-1
第二節 建議	4-1
第三節 預期成效	4-1
參考文獻.....	5-1
附錄 A 審查意見與回覆.....	附-1
A1 申請計畫意見回覆	附-1
A2 期初計畫書意見回覆	附-3
A3 期中計畫書意見回覆	附-6

表次

表 2-1 實驗之參數設定	2-36
表 2-2 土壤基本物性實驗表(桃園紅土).....	2-37
表 2-3 貫入器的含水量-介電常數轉換公式率定之係數.....	2-43
表 2-4 各貫入器的導電度-穩態值轉換公式率定之係數.....	2-43
表 2-5 TDR 系統與材料 COLE-COLE 參數(ε_s , ε_∞ , f_{rep} , ξ , EC_{dc} , Z_p , α_R)反算結果.....	2-88
表 2-6 (第一組) TDR 系統與材料 COLE-COLE 參數(ε_s , ε_∞ , f_{rep} , ξ , EC_{dc} , Z_p , α_R)反算結果 (感測段參數由下表帶入).....	2-92
表 2-7 (紅土)各時間點之試體相關帶入參數.....	2-92
表 2-8 離心模型與原型之縮尺比	2-110
表 2-9 中大紅土基本物性(黃聖棋, 2014)	2-119

圖次

圖 1-1 利用地電阻電阻剖面轉換為含水量與基值吸力剖面示意圖.	1-3
圖 1-2 研究架構圖	1-4
圖 2-1 參考文獻相關性	2-1
圖 2-2 土壤水分特徵曲線 (林宏達與拱祥生, 2001)	2-4
圖 2-3 土壤介電頻譜示意 (修改自 HILHORST AND DIRKSON, 1994)	2-6
圖 2-4 電流於多孔隙介質中三種主要傳導路徑(修改自 SAUER, 1955)	2-8
圖 2-5 砂岩乾溼循環試驗飽和度對應電阻率關係圖(KNIGHT, 1991)	2-8
圖 2-6 孔隙內水分分佈示意圖(KNIGHT, 1991)	2-9
圖 2-7 時域反射儀之基本架構	2-11
圖 2-8 三軸試驗用之電阻探頭 (JOSÉ ET AL. 2012)	2-14
圖 2-9 ZIGZAG-SHAPED 形狀 TDR 壓力鍋元件(FERNÁNDEZ ET AL., 2008)	2-14
圖 2-10 含水量與電阻率遲滯(HYSTeresis)現象與乾溼循環速度相關 (CHUNG ET AL. 2019)	2-15
圖 2-11 現地含水量與電阻率關係與降雨入滲速率影響 (CHUNG ET AL. 2019)	2-15
圖 2-12 離心機滲透計初步規劃(McCARTNEY AND ZORNBERG, 2006)	2-16
圖 2-13 離心機滲透計 TDR 介電常數與含水量之率定(McCARTNEY AND ZORNBERG, 2006)	2-16
圖 2-14 離心機滲透計 (CENTRIFUGE PERMEAMETER) 概念示意 (ZORNBERG AND McCARTNEY, 2010A)	2-17

圖 2-15 TDR 於離心機滲透計量測成果 (ZORNBERG AND MCCARTNEY, 2010A).....	2-17
圖 2-16 自來水中實測和理論值(S_{11} 散射函數的實部和虛部) (HEIMOVAARA ET AL., 1996)	2-20
圖 2-17 空氣、丁醇、酒精和水校正圖(LOGSDON, 2005)	2-20
圖 2-18 現地場址 TDR 含水量與導電度監測配置	2-23
圖 2-19 現地場址 TDR 含水量原始資料	2-23
圖 2-20 現地場址 TDR 含水量濾波結果	2-24
圖 2-21 現地場址 TDR EC 原始資料.....	2-24
圖 2-22 現地場址 TDR EC 濾波結果.....	2-25
圖 2-23 降雨事件分類.....	2-25
圖 2-24 不同降雨事件之含水量與導電度速率分類.....	2-26
圖 2-25 含水量與導電度關係受降雨影響.....	2-26
圖 2-26 改良型 TDR 壓力鍋試驗配置(CHUNG ET AL. 2019).....	2-30
圖 2-27 本研究 TDR 壓力鍋試驗配置	2-30
圖 2-28 本研究 TDR 壓力鍋外部設計圖	2-31
圖 2-29 本研究 TDR 壓力鍋測量步驟示意圖.....	2-31
圖 2-30 本研究 TDR 壓力鍋實體照片	2-32
圖 2-31 模擬砂箱與 ERT 設備結合(魏士凱，2019).....	2-34
圖 2-32 TDR 貫入器之(左)電磁場分布模擬，以及(右)應力分布模擬 (魏士凱，2019).....	2-34
圖 2-33 砂箱紅土之導電度與含水量遲滯現象(魏士凱，2019).....	2-35
圖 2-34 實驗設備示意圖(包含了砂箱、排水系統、灑水系統與量測系統(TDR、ERT、TENSIO-METER)).....	2-37
圖 2-35 貫入器在砂箱所在位置之示意圖(側視圖).....	2-37

圖 2-36 貫入器在砂箱所在位置之示意圖(俯視圖).....	2-38
圖 2-37 砂箱實驗所使用的各 TDR 感測導波器實際照片	2-38
圖 2-38 T5 張力計(T5 PRESSURE TRANSDUCER TENSIO METER).....	2-38
圖 2-39 灑水系統實際照片(1).....	2-39
圖 2-40 灑水系統實際照片(2).....	2-40
圖 2-41 灑水系統示意圖(1).....	2-40
圖 2-42 灑水系統示意圖(2).....	2-41
圖 2-43 灑水系統示意圖(3).....	2-41
圖 2-44 排水系統實際照片	2-42
圖 2-45 排水系統與砂箱的相對位置之實際照片	2-42
圖 2-46 (N1)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(LSQ CURVE FIT)2-44	
圖 2-47 (N1)經由含水量-介電常數轉換公式推倒出來的預估介電常數 與真實介電常數之誤差圖	2-44
圖 2-48 (N1)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMIN SEARCH BND)..	2-45
圖 2-49 (N1)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真 實導電度之誤差圖	2-45
圖 2-50 (N2)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(LSQ CURVE FIT)2-46	
圖 2-51 (N2)經由含水量-介電常數轉換公式推倒出來的預估介電常數 與真實介電常數之誤差圖	2-46
圖 2-52 (N2)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMIN SEARCH BND)..	2-47
圖 2-53 (N2)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真 實導電度之誤差圖	2-47
圖 2-54 (S)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(LSQ CURVE FIT)..	2-48

圖 2-55 (S)經由含水量-介電常數轉換公式推倒出來的預估介電常數 與真實介電常數之誤差圖	2-48
圖 2-56 (S)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMINSEARCHBND)	2-49
圖 2-57 (S)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真 實導電度之誤差圖	2-49
圖 2-58 (3)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMINSEARCHBND)	2-50
圖 2-59 (3)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真 實導電度之誤差圖	2-50
圖 2-60 目前砂箱實驗的實際架設圖	2-52
圖 2-61 3 電極貫入器在各個所量測到的體積含水量(1HR 平均)....	2-52
圖 2-62 3 電極貫入器在各個所量測到的導電度(1HR 平均)	2-53
圖 2-63 (第一組)3 電極貫入器之體積含水量與導電度之關係圖...	2-53
圖 2-64 N1 貫入器在各個所量測到的體積含水量(1HR 平均)	2-54
圖 2-65 N1 貫入器在各個所量測到的導電度(1HR 平均)	2-54
圖 2-66 N1 貫入器之體積含水量與導電度之關係圖	2-55
圖 2-67 N2 貫入器在各個所量測到的體積含水量(1HR 平均)	2-55
圖 2-68 N2 貫入器在各個所量測到的導電度(1HR 平均)	2-56
圖 2-69 N2 貫入器之體積含水量與導電度之關係圖	2-56
圖 2-70 S 貫入器在各個所量測到的體積含水量(1HR 平均).....	2-57
圖 2-71 S 貫入器在各個所量測到的導電度(1HR 平均).....	2-57
圖 2-72 S 貫入器之體積含水量與導電度之關係圖	2-58
圖 2-73 TDR 之等效電路(EQUIVALENT CIRCUIT)模式(修改自 LIN, 2003A).....	2-60
圖 2-74 靈敏度 S_m 受感測器長度 L 影響	2-61
圖 2-75 靈敏度 S_m 受感測器阻抗 Z_p 影響	2-62

圖 2-76 (A) 典型 TDR 波型, 以及 (B)微分波形之特徵回波.....	2-65
圖 2-77 (A)PVA 相位受導電度影響誤差以及(B) PVA 速度誤差 ..	2-66
圖 2-78 PVA 介電度於不同土壤與含水量之差異.....	2-66
圖 2-79 PVA 介電度(1 GHz)以及傳統 TDR 分析於不同含水量差異 ..	67
圖 2-80 PVA 介電度(1 GHz) 及傳統 TDR 分析於 EC 影響	2-68
圖 2-81 PVA 介電度(1 GHz) 及傳統 TDR 分析於纜線長度影響...	2-68
圖 2-82 以 VNA 進行土壤介電頻譜分析 (LEWANDOWSKI ET AL. 2019)	2-70
圖 2-83 以 VNA 進行土壤介電頻譜之系統標定與實際量測程序 ..	2-71
圖 2-84 向量網路分析儀(VNA) 量測模具單元	2-73
圖 2-85 TYPE-N/EIA 1 5/8" 元件	2-74
圖 2-86 RIGID LINE COUPLING ELEMENT 1 5/8"	2-74
圖 2-87 同軸模具(COAXIAL SAMPLE HOLDERS)示意圖 (單位為 MM)...	74
圖 2-88 MINIVNA PRO LITE	2-76
圖 2-89 SMA 校正元件 (開路 OPEN,短路 SHORT,負載 LOAD)	2-76
圖 2-90 建立校正介面	2-77
圖 2-91 讀取開路、短路和負載校正元件資料	2-77
圖 2-92 保存和更新校正圖	2-78
圖 2-93 MINIVNA PRO LITE	2-79
圖 2-94 SMA 校正元件 (開路 OPEN,短路 SHORT,負載 LOAD).....	2-79
圖 2-95 建立校正介面	2-79
圖 2-96 讀取開路、短路和負載校正元件資料.....	2-80
圖 2-97 保存和更新校正圖	2-81
圖 2-98 R60 VECTOR REFLECTOMETER 向量網路分析儀.....	2-82

圖 2-99 校正介面.....	2-82
圖 2-100 校正完成之介面	2-83
圖 2-101 S11 訊號 (A)校正前 (B)校正後.....	2-83
圖 2-101 VNA 於飽和土壤之介電頻譜計算結果.....	2-84
圖 2-101 VNA 於乾土之介電頻譜計算結果.....	2-84
圖 2-101 VNA 於不同含水量土壤之介電頻譜計算結果.....	2-85
圖 2-102 砂箱實驗之電磁波傳播路徑簡化模型(第一纜線段、多工器、 第二纜線段、貫入器 AB 膠段、感測段(紅土試體中)) ...	2-86
圖 2-103 奈奎斯特採樣定理之頻率解析度示意圖	2-87
圖 2-104 模擬與量測值對照圖(Hz 之擷取頻率)(A)完整波型，(B)放大 感測段之波型	2-89
圖 2-105 自來水之介電頻譜(COLE-COLE FUNCTION 理論值).....	2-90
圖 2-106 (第一組，2021/9/6 00:02:05)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之 擷取頻率)(A)完整波型，(B)放大感測段之波型	2-93
圖 2-107 (第一組，2021/9/6 00:02:05)(紅土)試體之介電頻譜(COLE- COLE FUNCTION 理論值) (A)X 對軸為對數刻度，(B) X 對軸為 正常刻度	2-94
圖 2-108 (第一組，2021/9/6 00:02:05) PHASE VELOCITY ANALYSIS 介電 常數頻譜理論值與 COLE-COLE FUNCTION 之介電常數頻譜理 論值對照圖	2-95
圖 2-109 (第一組，2021/9/7 15:52:13)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之 擷取頻率)(A)完整波型，(B)放大感測段之波型	2-96
圖 2-110 (第一組，2021/9/7 15:52:13)(紅土)試體之介電頻譜(COLE- COLE FUNCTION 理論值) (A)X 對軸為對數刻度，(B) X 對軸為 正常刻度	2-97

圖 2-111 (第一組, 2021/9/7 15:52:13) PHASE VELOCITY ANALYSIS 介電常數頻譜理論值與 COLE-COLE FUNCTION 之介電常數頻譜理論值對照圖	2-98
圖 2-112 (第一組, 2021/9/8 08:23:41) 模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (A) 完整波型, (B) 放大感測段之波型	2-99
圖 2-113 (第一組, 2021/9/8 08:23:41) (紅土) 試體之介電頻譜(COLE-COLE FUNCTION 理論值) (A) X 對軸為對數刻度, (B) X 對軸為正常刻度	2-100
圖 2-114 (第一組, 2021/9/8 08:23:41) PHASE VELOCITY ANALYSIS 介電常數頻譜理論值與 COLE-COLE FUNCTION 之介電常數頻譜理論值對照圖	2-101
圖 2-115 (第一組, 2021/9/8 15:27:02) 模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (A) 完整波型, (B) 放大感測段之波型	2-102
圖 2-116 (第一組, 2021/9/8 15:27:02) (紅土) 試體之介電頻譜(COLE-COLE FUNCTION 理論值) (A) X 對軸為對數刻度, (B) X 對軸為正常刻度	2-103
圖 2-117 (第一組, 2021/9/8 15:27:02) PHASE VELOCITY ANALYSIS 介電常數頻譜理論值與 COLE-COLE FUNCTION 之介電常數頻譜理論值對照圖	2-104
圖 2-118 (第一組, 2021/9/16 01:03:32) 模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (A) 完整波型, (B) 放大感測段之波型	2-105
圖 2-119 (第一組, 2021/9/16 01:03:32) (紅土) 試體之介電頻譜(COLE-COLE FUNCTION 理論值) (A) X 對軸為對數刻度, (B) X 對軸為正常刻度	2-106

圖 2-120 (第一組，2021/9/16 01:03:32)PHASE VELOCITY ANALYSIS 介電常數頻譜理論值與 COLE-COLE FUNCTION 之介電常數頻譜理論值對照圖	2-107
圖 2-121 中央大學土木系之地工離心機.....	2-110
圖 2-122 離心機模型模擬概念圖	2-111
圖 2-123 TDR 纜線於離心機坡地滑動模擬配置(XU AND PIERCE, 2013)	2-113
圖 2-124 TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱(鐘志忠，2019)	2-114
圖 2-125 河堤模型試驗之基礎於不同離心機重力下之 TDR 波形結果(鐘志忠，2019).....	2-115
圖 2-126 剪力模型試驗於 55G 離心機重力下之結果(TRAN，2020)...	2-115
圖 2-127 TDR 於離心機滲透模型之配置(McCARTNEY AND ZORNBERG, 2006)	2-116
圖 2-128 中央大學宵夜街停車場無人機建模(簡濟豪 2019).....	2-119
圖 2-129 現地 ARDUINO 三軸加速度計測站(簡濟豪 2019).....	2-120
圖 2-130 現地 ARDUINO 測站 1 之 ROLL 監測資料	2-120
圖 2-131 現地 ERT SCHLUMBERGE 方法成果.....	2-120
圖 2-132 LFS 莫爾庫倫應力圖 (LU ET AL. 2012)	2-124
圖 2-133 極限平衡法與 LFS 分析結果比較(LU ET AL. 2012)	2-124
圖 2-134 不確定性分析流程(灰色區塊為本研究研發項目).....	2-125

第一章 緒論

第一節 背景說明

臺灣由於具有獨特且年輕之地質條件，加上近來天候極端變化，降雨強度集中（時間域與地域），臺灣之邊坡坍塌問題頻傳，以水庫集水區為例，坍塌產生之土石將導致水庫庫容淤積問題(辜炳震等人，2009)，而山區道路邊坡或社區之災害，也將致使人命財產損傷。坡地崩塌型式依其移動方式可分為墜落(fall)、傾翻(topple)、滑動(slide)、轉動(slump)、流動(flow)與潛移(creep)等，而大部分之因降雨造成之邊坡滑動或轉動大多可區分為深層與淺層坡地滑動。其中淺層坡地滑動一般多發生於坡度較陡、地質材料膠結不良、缺乏植被或舊有崩塌地層的邊坡，滑動面常發生於土層與岩層交界面之上，或僅發生於土層中，滑動破壞的土體厚度不大、厚度均勻，一般約介於1~3 m間(周南山，2005)。淺層滑動常因降雨雨水入滲土層，改變非飽和土層其含水特性，包含流體之運動與分布情況，提升土壤含水量並降低基質吸力(Matric suction)，進而使得土體穩定性降低(Fredlund, 1987; Lu and Godt, 2008; Bordoni et al., 2015; Cho, 2016; 2017; Jeong et al., 2017; 蕭新財，2011；鄭清江等人，2009；林德貴等人，2007)。另外地表水入滲速率與淺層土層之含水量(飽和度)有高度相關，對應於淹水分析有其關鍵影響(Castillo et al., 2003; Brocca et al., 2009)，綜合上述應用，淺層非飽和土層含水特性之監測有其必要性。

又因為土層含水特性與導電度/電阻率具有高度相關性，因此已有相關研究嘗試透過地電阻影像探測(Electrical Resistivity Tomography, ERT)輔助進行大範圍地區之含水量分布量測(Zhou et al., 2001; Brunet et al., 2010; Beff et al., 2013; Garre et al. 2019)，甚至延伸至基質吸力(Matric suction)分布，如圖 1-1 所示。但電阻率又同時受

到地文及水文因子的影響，因此難以單獨利用 ERT 量測地層含水特性分佈，前期研究提出結合時域反射技術 (Time Domain Reflectometry, TDR) 具同時量測土層含水特性及導電度 (Electrical Conductivity, EC)/電阻率 (Resistivity) 之特性，由 TDR 監測結果率定地文因子，包含未飽和層土壤水力傳係數 (Hydraulic conductivity) 等 (謝昀達、邱永嘉，2018)，但其中含水量與電阻率遲滯 (Hysteresis) 現象的產生與乾溼循環速度相關 (Chung et al. 2019)；此外，上述土壤含水特性與導電度關係除受土壤種類與乾密度控制，仍需進一步檢核如水質導電度、pH 值等環境因子影響。

另一方面，現有 TDR 結合壓力鍋或是延伸性之 TDR 伸張計研發 (用於土壤保水曲線 (soil water retention curve)) (Zornberg and McCartney, 2010; 謝昀達與邱永嘉，2018)，也僅採用 TDR 一般含水特性及導電度分析方法，較少利用介電頻譜之特性以審視上述相關土壤水文、環境以及力學因子關係性，缺乏更多資料 (redundancy) 以提高判釋的可靠度。

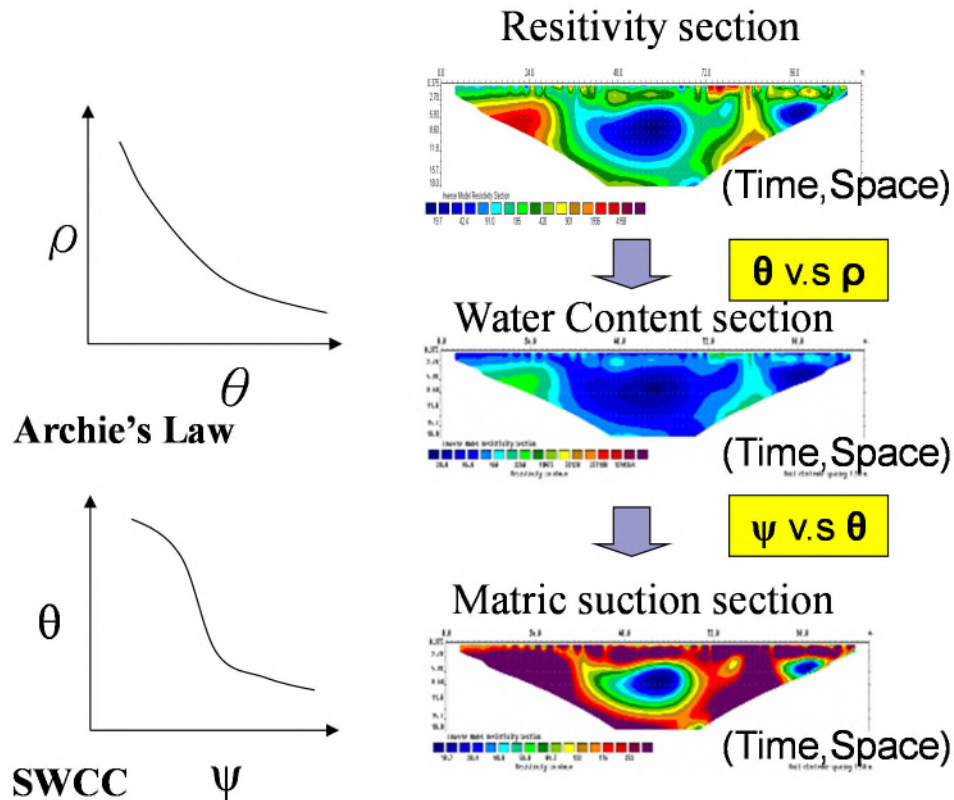


圖 1-1 利用地電阻電阻剖面轉換為含水量與基值吸力剖面示意圖

第二節 計畫目標

有鑑於此，本研究擬定提出利用 TDR 技術於土壤介電行為與水文特性探討，以及相關不確定性分析，其架構圖如圖 1-2 所示，預計之研究目標如下：

- (一) 第一年：建立改良型之 TDR 壓力鍋與砂箱試驗，配合 TDR 介電頻譜技術，增加頻率域上之介電行為，以連結上述土壤水文、環境以及力學因子，評估觀測值與影響因子間之不確定性；
- (二) 第二年：由於 TDR 壓力鍋或砂箱等現有物理模型均未考量重力問題，因此基於本申請人初步之 TDR 結合離心機成果，

透過上述壓力鍋以及砂箱物理模型基礎，延伸重力影響下之評估；

- (三) 第三年：以中央大學坡地為示範站，將整合 TDR 含水量貫入器與地電阻測法相關成果，蒐集現地觀察資料以驗證上述研究方法之可行性，並配合數值方法，以淺崩塌邊坡為例，剖析實際坡地穩定分析之不確定性與限制。

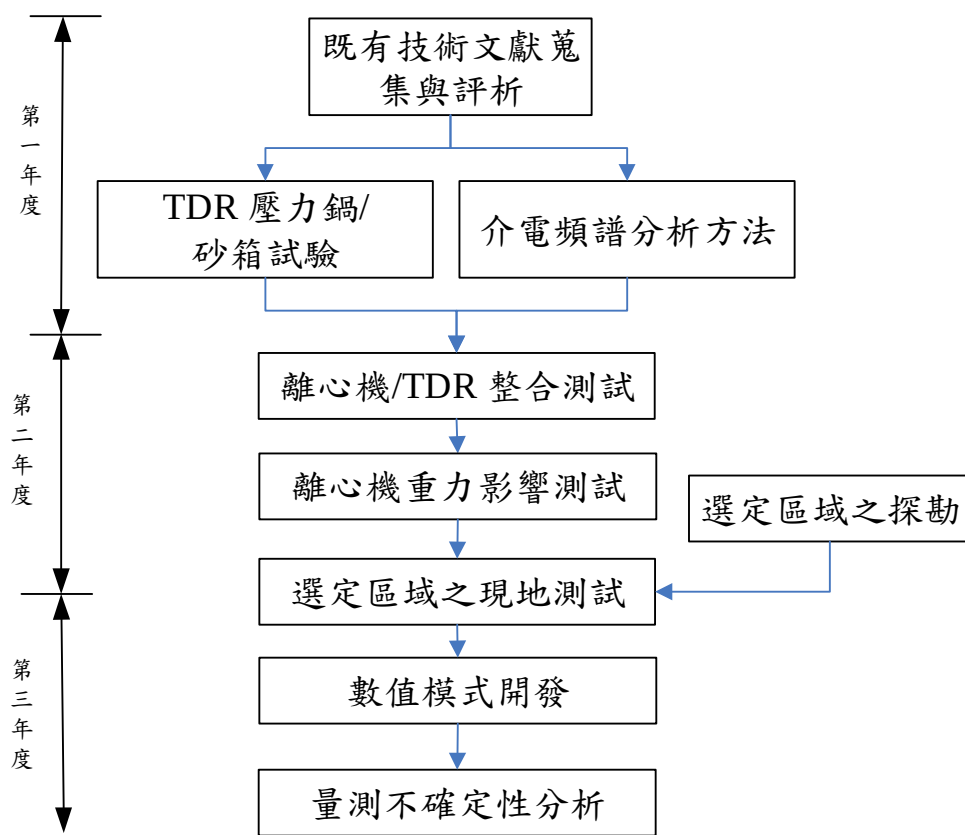


圖 1-2 研究架構圖

第二章 工作執行方法與初步成果

第一節 相關文獻回顧評析

基於本研究計畫預定研究課題，並就相關性整理如圖 2-1 所示，並包含本計畫前期階段性成果。以下就各項技術相關文獻回顧進行初步評析：

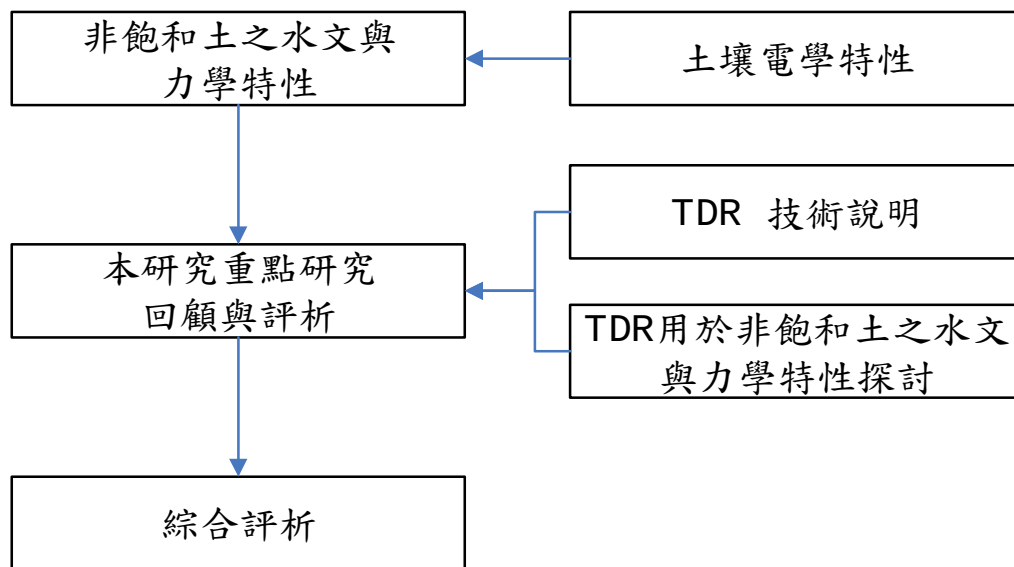


圖 2-1 參考文獻相關性

一、非飽和土之水文與力學特性

由於土層在降雨前可能為未飽和狀態，即水力傳導係數 K 為未飽和水力傳導係數，其值將伴隨土壤的飽和度(或含水量，或孔隙水壓力)而變化，因此土壤之水力傳導係數非為定值。一般而言，因現地土壤總吸力 ψ 較不易量測，而總吸力主要包含兩個不同的部分，一為基質吸力 σ_s ，另一則是滲透吸力(Fredlund and Rahardjo, 1993)。而於非飽和土壤工程分析，常用基質吸力以代表總吸力。因此可透過土壤體積含水量 θ 與基質吸力 σ_s 之關係，也就是土

壤水分特徵曲線(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) (Fredlund and Rahardjo, 1993)，如圖 2-2 所示，將含水量與基質吸力關係推導如公式 1：

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \sigma^s)^n} \right)^m \quad (1)$$

其中， α 為土壤特徵曲線之參數。根據上式可將水力傳導係數 K 表為土壤含水量函數 $K(\theta)$ (Van Genuchten and Nielsen, 1985; Fredlund et al., 1994)，如公式 2：

$$\frac{K(\theta)}{K_{sat}} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (2)$$

上述為常見之 Van Genuchten 模式，其中 S 為飽和度， θ_s 為飽和含水量(Saturated moisture content)， θ_r 為殘餘含水量(Residual moisture content)， K_{sat} 為飽和水力傳導係數(Saturated hydraulic conductivity)， α 為進氣潛能因子(Empirical parameter of air entry value)， n 為孔隙指數(pore index)， m 為曲線密合因子(Curve fitting parameter)， m 、 n 之關係為 $m=1-1/n$ 。

$K(\theta)$ 函數可直接採用土層材料的飽和滲透係數 K_{sat} 評估求得。其中，土壤之飽和滲透係數 K_{sat} 則可根據 Kozeny—Carman 經驗公式推求 (Chapuis and Aubertin, 2003)，如公式 3：

$$K_{sat} = C \times e^3 / (1+e) \quad (3)$$

其中 e 為土壤孔隙比， C 為常數（假設為 1）。利用上述方法，即可求取各土層材料之水力傳導係數函數(Hydraulic conductivity function, HCF) 與基質吸力，進而可考慮非飽和土層之剪力強度，

利用邊坡穩定之極限平衡法推估邊坡穩定程度。

因土壤的剪力強度與土壤所受之應力狀態是有關，Fredlund et al. (1978)將飽和土壤之莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 破壞準則擴展到非飽和土壤之範圍，提出以 $(\sigma - u_a)$ 與 $(u_a - u_w)$ 二個獨立應力狀態變數構成不飽和土壤的剪力強度公式，其方程式如公式 4：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (4)$$

其中， c' 為有效凝聚力； $(\sigma_f - u_a)_f$ 為破壞時破壞面上的淨正向應力； $(u_a - u_w)_f$ 為破壞時破壞面上的基質吸力； ϕ' 為 $(\sigma_f - u_a)_f$ 引起的有效內摩擦角； ϕ^b 為 $(u_a - u_w)$ 增加造成剪應力增加所對應的角度。研究結果顯示，非飽和土壤之剪力強度會隨基質吸力的增加而呈非線性變化 (Vanapalli et al., 1996)。

基於前文提到之土壤的水分特性曲線，Vanapalli et al. (1996) 發展了一套經驗式，以飽和土壤之剪力強度參數和土壤水分特性曲線去推估非飽和土壤的剪力強度，如公式 5：

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \quad (5)$$

因降雨導致淺層坡地滑動分析模式，主要首先透過降雨滲流分析，於可透水邊界輸入降雨歷時曲線後開始啟動，再配合各土層材料之水力傳導係數函數 (hydraulic conductivity unction) ~ 總吸力 Ψ 關係函數 (Fredlund and Rahardjo, 1993)，並採用暫態流分析 (transient seepage analysis) 模式進行完整的降雨入滲及滲流分析 (林德貴等人, 2007)。考量淺層土壤之基質吸力現地量測不易，加上上述之非飽和滲流模式乃至於非飽和土壤強度相關文獻多數導向以土壤含水量作為依據，以進一步推估非飽和滲流與非飽和土壤強度參數；

另外，國內常用之修正水筒模式 (Tank model) (Kadoya and Tanakamaru, 1988；陳岱源，2005)，雖已考量土壤入滲容量以及土壤含水量狀況，但仍須配合實際現地含水量量測，以作為水筒模式相關參數之率定使用。因此現地之土壤含水量實為重要之觀測資訊。

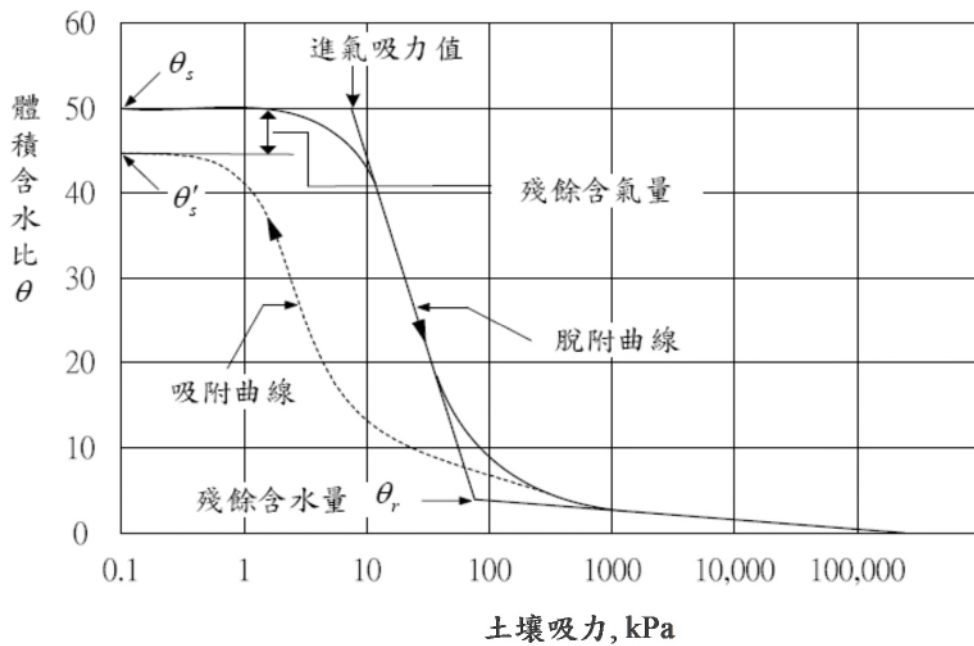


圖 2-2 土壤水分特徵曲線 (林宏達與拱祥生，2001)

二、土壤電學特性

材料的介電度(permittivity)，為判斷該材料極性的基準，在頻率域中為外加電場頻率的函數，如公式 6：

$$\varepsilon(f) = \varepsilon'(f) - j\varepsilon''(f) \quad (6)$$

f 為頻率， ε' 和 ε'' 為 ε 的實部與虛部，介電度的實部通常稱為介電常數(Dielectric constant)，介電常數是一種衡量材料可由外在電場儲存多少能量的基準；介電度的虛部被稱做損失係數，且為衡量該材料之於外在電場的消散或損耗的基準。為了方便起見，定義等

值介電度表示介電度 ε 與導電度 EC_{dc} 的總體影響。另一方面由相對介電度 $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$ ， ε_0 為自由空間的介電度（ 8.854×10^{-12} F/m），等值相對介電度 ε_r^* 可被寫成公式 7 Debye's equation：

$$\varepsilon_r^*(f) = \varepsilon_r'(f) - j \left[\varepsilon_r''(f) + \frac{EC_{dc}}{2\pi f \varepsilon_0} \right] \quad (7)$$

而 Debye's equation 一般則可進一步改寫為 Cole-Cole 形式 (Hasted, 1973)，本研究稱 Cole-Cole function，如公式 8：

$$\varepsilon^*(f) = \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (if / f_{rel})^{1-\xi}} \right] - \frac{iEC_{dc}}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (8)$$

其中 f_{rel} 為 relaxation frequency, ε_s 為初始介電度， ε_∞ 為穩態介電度。

Dobson et al. (1985) 與 Heimovaara (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，其模型認為土壤之介電度與土顆粒、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，其數學式可表示為公式 9 (Lin, 2003)

$$\varepsilon_m^\beta = \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_s} \right) \varepsilon_s^\beta + (\theta - \delta \gamma_d A_s) \varepsilon_{fw}^\beta + (\delta \gamma_d A_s) \varepsilon_{bw}^\beta + \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} - \theta \right) \varepsilon_a^\beta \quad (9)$$

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； γ_d 為土體乾密度； γ_s 為平均土顆粒密度； β 為迴歸係數。

因為土壤是各種孔隙液體、空氣以及不同礦物、粒徑、形狀、與排列所構成的孔隙介質，故存在不同的極化作用與電磁學反應，

這些與土壤物理特性相關因素集合在一起所呈現出某種程度的電學特性，從高頻至低頻影響介電頻譜不同的部分，因此介電頻譜為與土壤物理性質有關的函數，如圖 2-3 所示（Hilhorst and Dirkson, 1994；Lin et al., 2003）。

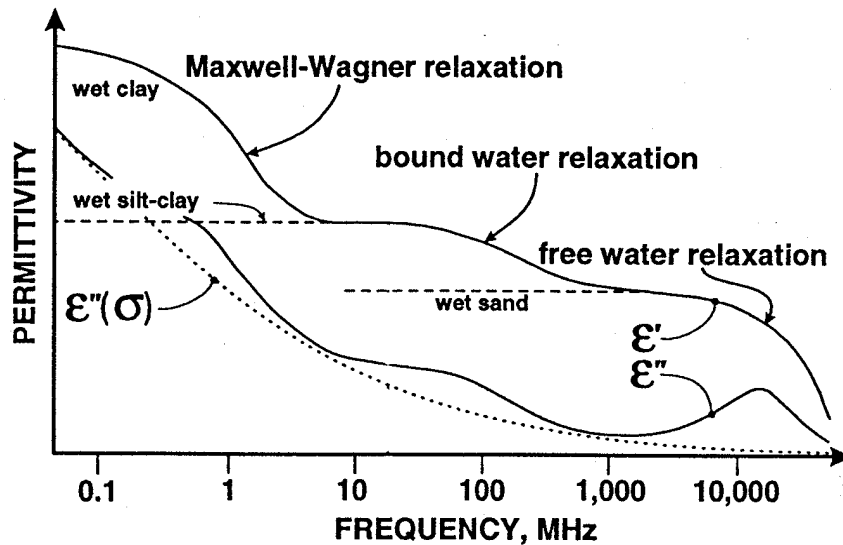


圖 2-3 土壤介電頻譜示意 (修改自 Hilhorst and Dirkson, 1994)

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 2-4 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。

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，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)。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，而多數學者(Archie, 1942; Feng et al., 1999; Lin, 1999; Shan and Singh, 2005; Klein and Santamarina, 2003; Mojid et al., 2007)所提出之導電度行為模型，不論是由經驗式或經由假設模型所推導出之關係式，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，其通式為公式 10：

$$EC_{dc} = a_{uni} EC_w \theta^{m_{uni}} \quad (10)$$

其中， a_{uni} 及 m_{uni} 為標定參數； EC_{dc} 為土體導電度； EC_w 為孔隙水之導電度。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。第二種是為多項式型式，其通式為公式 11

$$EC_{dc} = a\theta^2 + b\theta + c\theta_d^2 + d\theta_d + e \quad (11)$$

其中， a, b, c, d, e 為標定參數； θ_d 為黏土的吸附水層體積與土體體積比。Feng et al. (1999)、Lin (1999) 以及 Mojid et al. (2007) 屬於此種型式。

上述各種型式，其所顯示之導電度與體積含水量皆是一對一的函數關係，然而 Knight (1991) 針對現地取回之岩體進行乾溼循環試驗，試驗方式主要是將試體放入壓力鍋內，利用高壓蒸氣方式使試體內含水量增加，而乾燥過程則是採用自然乾燥方式進行，

試體的含水量是透過秤重法估計，其試驗結果發現導電度與含水量關係在乾溼循環過程中並不一致(如圖 2-5 所示)，其具有遲滯現象，而其認為造成此現象之主因在於岩體孔隙內水分佈於乾溼循環過程中並不一致所造成，如圖 8 所示。

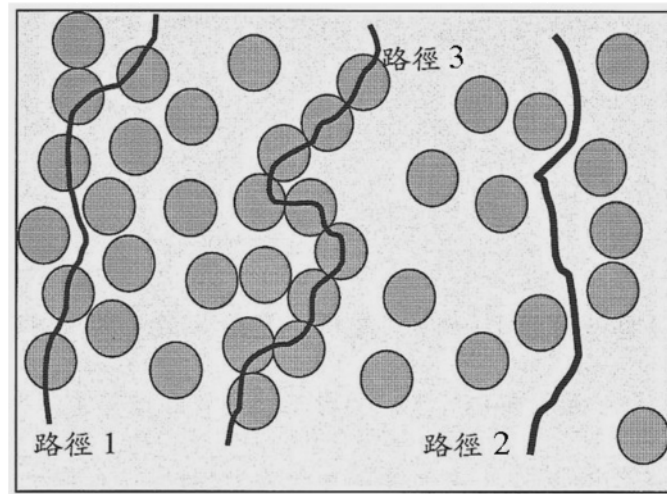


圖 2-4 電流於多孔隙介質中三種主要傳導路徑（修改自 Sauer, 1955）

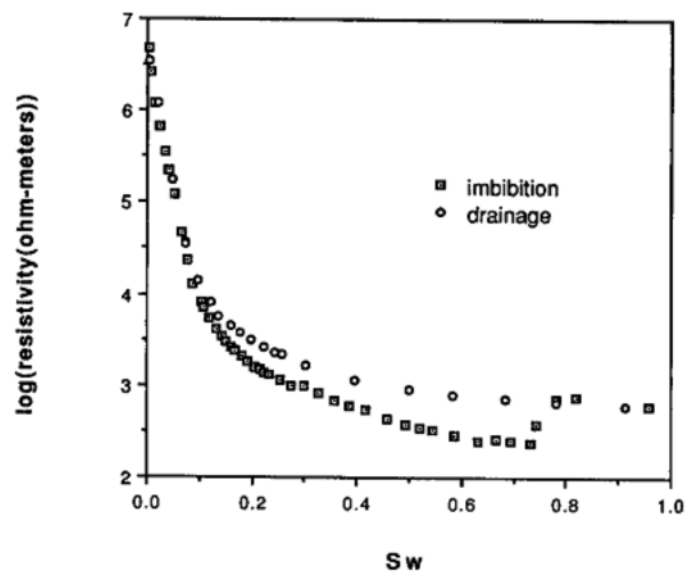


圖 2-5 砂岩乾溼循環試驗飽和度對應電阻率關係圖(Knight, 1991)

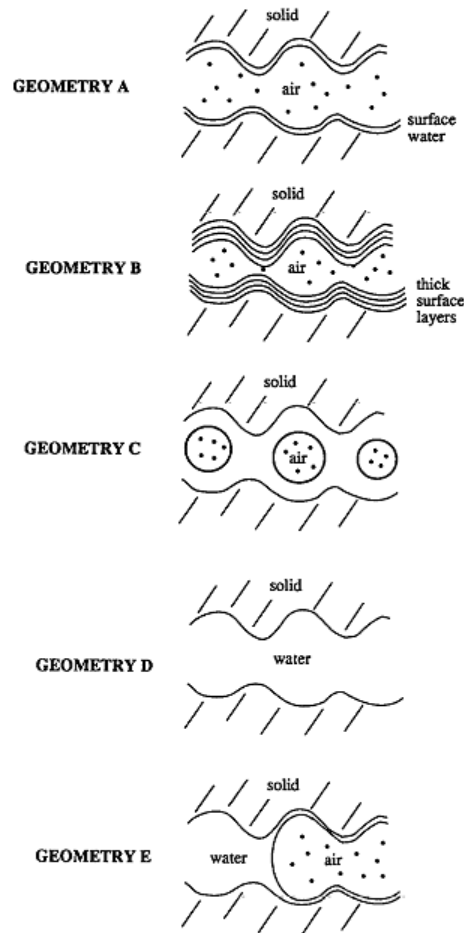


圖 2-6 孔隙內水分分佈示意圖(Knight, 1991)

三、TDR 技術說明

時域反射儀 (Time Domain Reflectometer) 主要由階躍脈衝電壓產生器 (step generator)、訊號採樣器 (sampler) 與示波器 (oscilloscope) 組成，TDR 之基本原理與雷達相同，由製波器 (step generator) 發射一電磁脈衝進入同軸電纜 (coaxial cable) 及感測導波器 (sensing waveguide)，並由示波器記錄因感測導波器斷面變化或介質改變所產生之反射訊號，如圖 15 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線 (同軸纜線) 與感測導波器，導波器為同軸纜線之延伸，同時作為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可

藉由反射訊號得知環境變化參數。透過不同感測導波器之設計與分析方法，TDR 技術可應用在不同的監測項目：

(一)變形監測：

透過 TDR 纜線本身之幾何形狀改變造成反射訊號為原理，則可提供邊坡滑動位置定位監測 (Dowding et al., 1988 ; Dowding and Pierce, 1994 ; Lin et al., 2009)，TDR 地滑計可以有效彌補傳統傾斜觀測管這方面的限制，對於薄的錯動面具有良好的檢測能力，可有效偵測滑動面位置，且有容易自動化之優點。雖然目前 TDR 地滑計之滑動位移量化部分受限於地層剪動模式與材料互制的複雜性與纜線電阻的影響，但可基於自動化與變形趨勢之定性觀察，以能提供即時預警之優勢。

(二)介質界面型：

係利用 TDR 之反射訊號量測不同介質之界面位置，例如水位之監測(空氣與水界面)或土壤沖蝕監測(河流與河床土壤之界面) (Hollywood, 1997; Yankielun and Zabilansky, 1999; Lin et al., 2017a)。目前計畫申請人所研發之水位監測元件也以成功應用於中港大排抽水站水位監測使用 (Chung et al., 2013) ; Lin and Tang (2005) 則利用不同阻抗之界面移動發明一種 TDR 伸縮計。

(三)介電分析型：

係將所欲研究之材料作為感測導波器內部介質，利用反射訊號之走時 Δt 與導波器之長度 L 計算電磁波速及相對應之視介電度 (Apparent dielectric constant, K_a) (Topp et al. 1980)，如公式 12，

$$K_a = \left(\frac{c\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (12)$$

其中 c 為光速 (2.998×10^8 m/s)。視介電度主要用於體積含水量 θ ($= w \cdot \gamma_d$) 求取使用。利用反射訊號大小量測材料之導電度 (EC) (Lin et al., 2007; 2008)。由土壤的電學性質可進一步推估土壤之含水量 (Lin, 2003) 或水中的含砂濃度 (Chung et al., 2011)，其中含砂濃度已經有效地提供河川泥砂觀測，以及水庫異重流行為掌握 (Lin et al., 2016)。利用 TDR 頻譜分析則具有能克服時間域因為材料消散性所造成波形不易判釋等問題。藉由頻率域分析材料在各個頻率的反應，將有助於探討分析土壤材料之間液相材料與土壤顆粒、組構相互作用下產生的物理性質與電學性質關係 (Lin, 1999; ; Chung, 2008; Lin, et al. 2015; 2017b)。

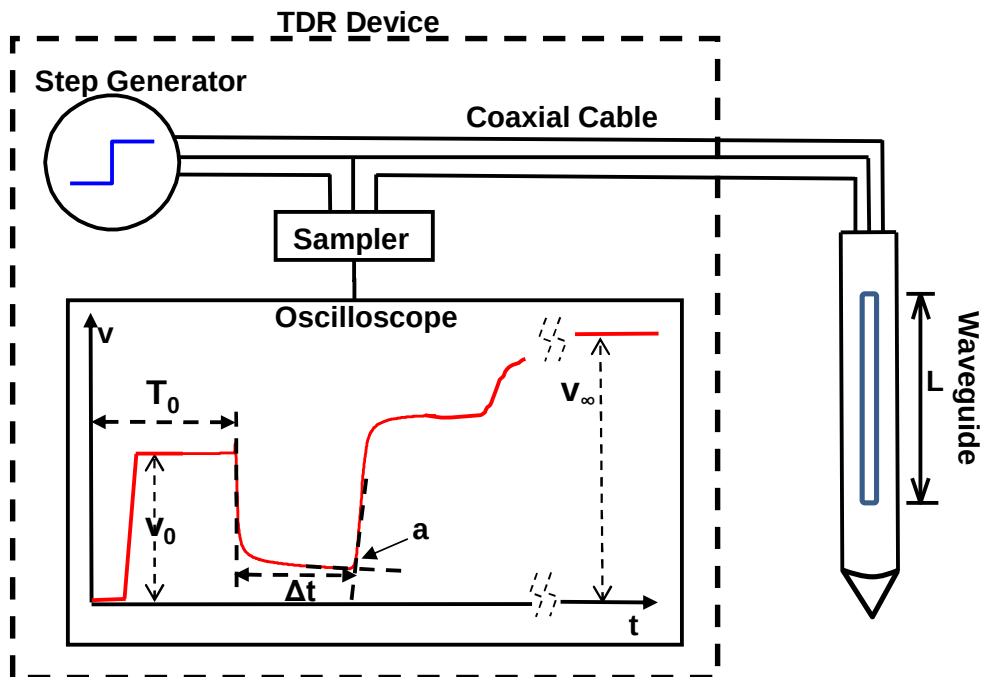


圖 2-7 時域反射儀之基本架構

四、TDR於非飽和土之水文與力學特性探討

基於上述之基本土壤物理性質與電學性質之說明，透過電學性質之量測優勢與便利性，多數研究嘗試以電學量測成果與土壤物理性質建立關係式。[Knight \(1991\)](#) 試驗結果發現砂岩導電度與含水量關係在乾溼循環過程中並不一致(如圖 2-5 所示)，其具有遲滯現象為著名發現；後續包含 [José et al. \(2012\)](#) 透過三軸試驗與電阻探頭(圖 2-8)試驗，雖然在乾溼循環下沒有發現導電度與含水量關係有顯著之遲滯現象，但當進行 Archie's law 於低飽和度下之擬合有顯著誤差。[Bai et al. \(2013\)](#) 則是發現但當乾溼循環次數增加，土壤 EC 值會隨之下降。

[曾介君 \(1996\)](#) 使用 TDR 結合張力計(tensiometer)，以完整同時求得水力傳導度與 SWCC 之量測；[Simunek et al. \(1999\)](#) 利用室內盤式入滲儀(Tension disc infiltrometer)以及 TDR 含水量量測，以確定土壤水力參數。[Vaz et al. \(2002\)](#) 研發 TDR 為一伸張計，藉以同時可提供土壤含水量與張力之量測。[張舒婷\(2007\)](#) 也提出利用壓力鍋試驗，配合張力計與 TDR 的即時數據讀取，以求取土壤水分特性曲線與不飽和水力傳導度。

[姚奕全 \(2007\)](#) 提出以砂箱試驗模擬應用 ERT 於崩積層含水特性調查，透過 TDR 進行含水量與導電度擷取，以及張力計使用，於降雨濕潤階段中，張力計量測值受量測範圍限制與時間延遲效應(time-delay)影響大，其 SWCC 可信度較低；乾燥階段中，僅初始量測資料受量測範圍限制與時間延遲效應影響。[吳瑋晉\(2008\)](#) 則是建議上述砂箱試驗之時間延遲效應受感測器埋設位置影響。

[Fernández et al. \(2008\)](#) 提出一改良 TDR 壓力鍋元件(壓力範圍 0~500kPa)進行土壤 SWCC 量測，其中 TDR 之內導體為 zigzag-

shaped 形狀，如圖 2-9 所示，並加入不同飽和速率過程探討，發現 SWCC 受其飽和速率顯著影響。[林哲毅\(2009\)](#) 透過改善型 TDR 壓力鍋進行一般粉土之試驗，證實含水量與電阻率遲滯(Hysteresis)現象的產生與乾溼循環速度相關，如圖 2-10 所示。[楊士輝\(2011\)](#) 使用 TDR 貫入器進行現地尺度試驗，結果顯示含水量與電阻率關係(斜率變化)受降雨入滲速率影響，降雨越快則其斜率越緩，如圖 2-11 所示。

[曾燕翔\(2015\)](#) 透過實驗室砂箱實驗量測土壤保水曲線並比較動態與靜態下土壤保水曲線之差異，藉由 TDR 及土壤孔隙張力計量測含水量與毛細壓力，可以描繪出土壤保水曲線間之差異並觀察到遲滯現象；其現地觀測資料亦發現張力值亦受到溫度變化所影響。[謝昀達與邱永嘉\(2018\)](#)利用砂箱實驗配合 TDR 進行導電度和含水量的量測，同時搭配土壤張力計的量測結果，描繪土壤保水曲線再經由導電度的量測結果，擬合曲率因子(tortuosity factor)，其獲得不同土壤之水力傳導係數。

[McCartney and Zornberg \(2006\)](#) 首先利用 TDR 於離心機進行飽和土壤之水力特性量測，提出離心機滲透計(Centrifuge permeameter)初步設置如圖 2-12，以進行介電常數與含水量之率定，如圖 2-13。[Zornberg and McCartney \(2010a; 2010b\)](#)再基於上述之概念，整合 TDR 進行非飽和土壤之水力特性探討，包含 SWCC 與水力傳導係數，其中離心機可提供不同水力梯度之環境，而試驗過程中 TDR 負責含水量之量測，其實際配置可參考圖 2-15 所示。

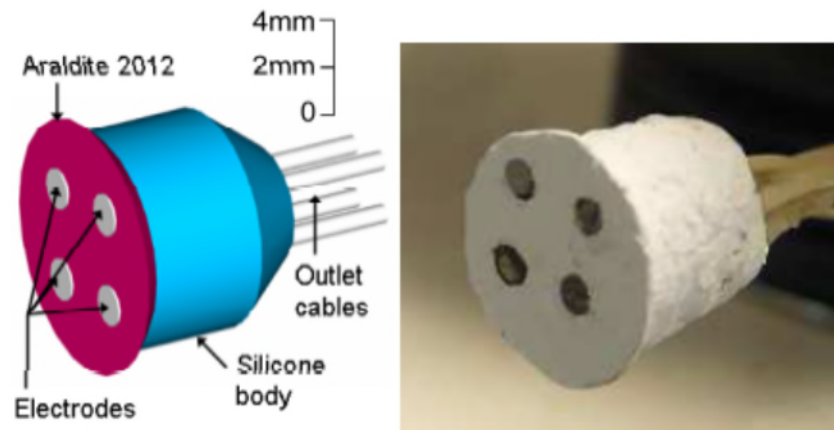


圖 2-8 三軸試驗用之電阻探頭 (José et al. 2012)

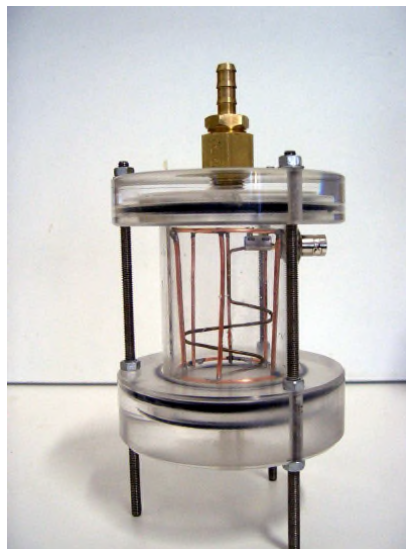


圖 2-9 Zigzag-shaped 形狀 TDR 壓力鍋元件(Fernández et al., 2008)

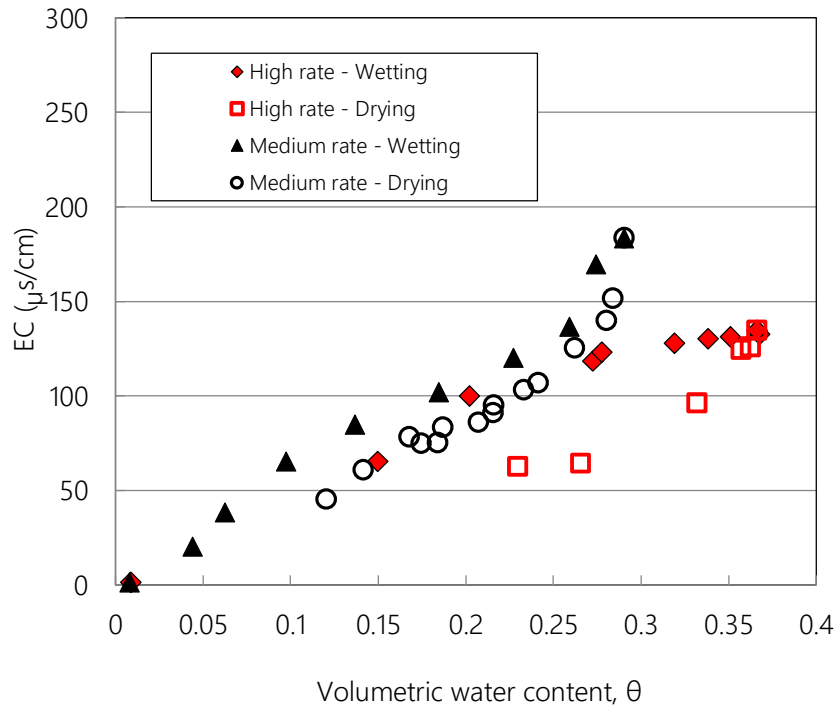


圖 2-10 含水量與電阻率遲滯(Hysteresis)現象與乾溼循環速度相關
(Chung et al. 2019)

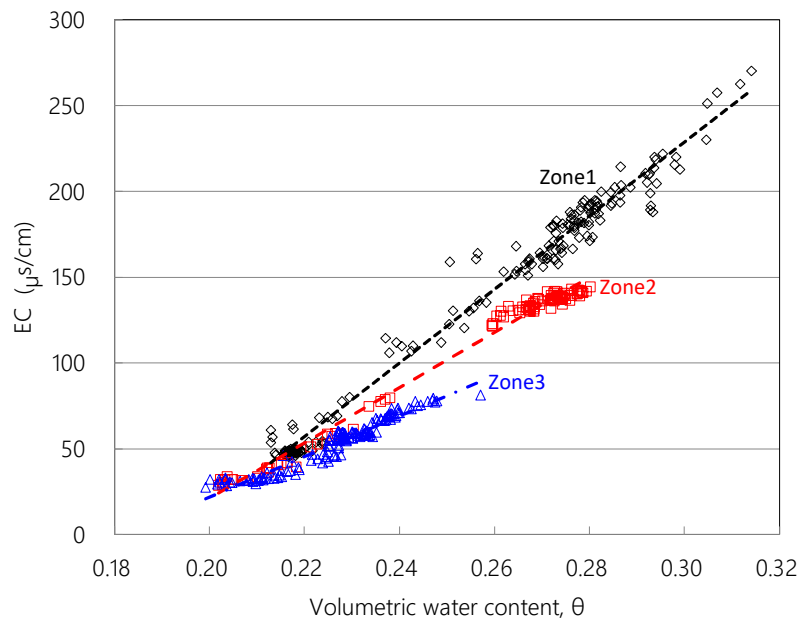


圖 2-11 現地含水量與電阻率關係與降雨入滲速率影響 (Chung et al. 2019)

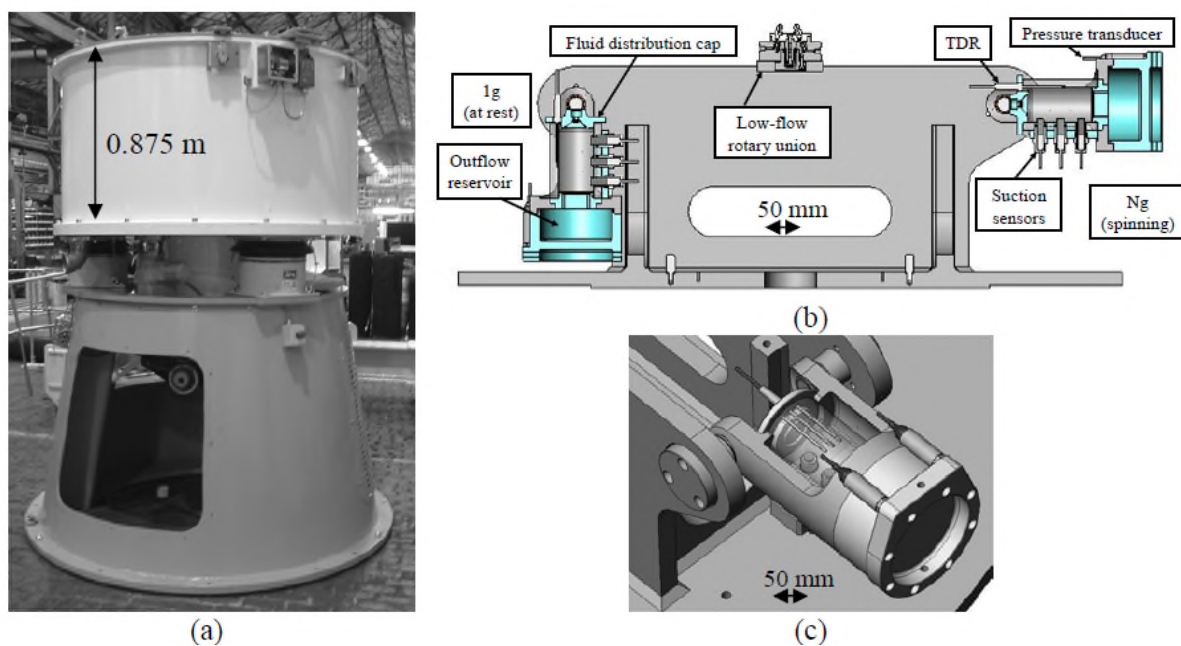


圖 2-12 離心機滲透計初步規劃(McCartney and Zornberg, 2006)

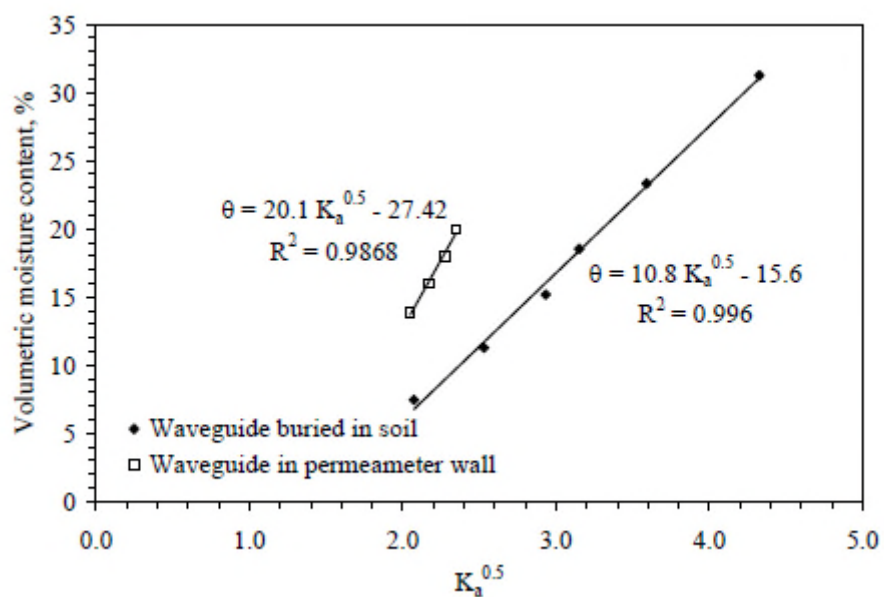


圖 2-13 離心機滲透計 TDR 介電常數與含水量之率定(McCartney and Zornberg, 2006)

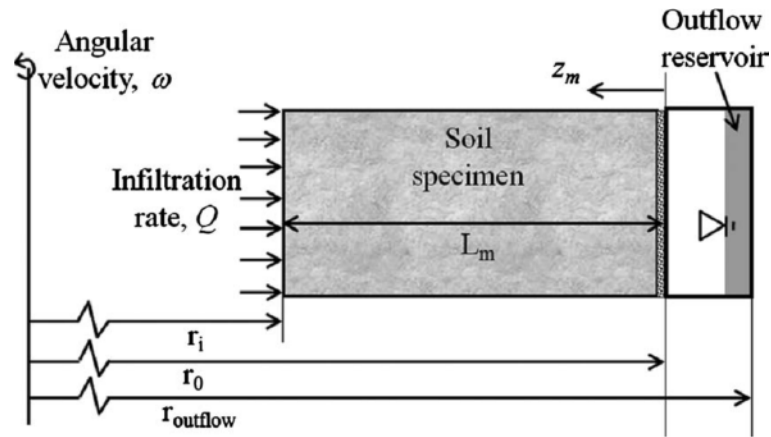


圖 2-14 離心機滲透計(Centrifuge permeameter)概念示意
(Zornberg and McCartney, 2010a)

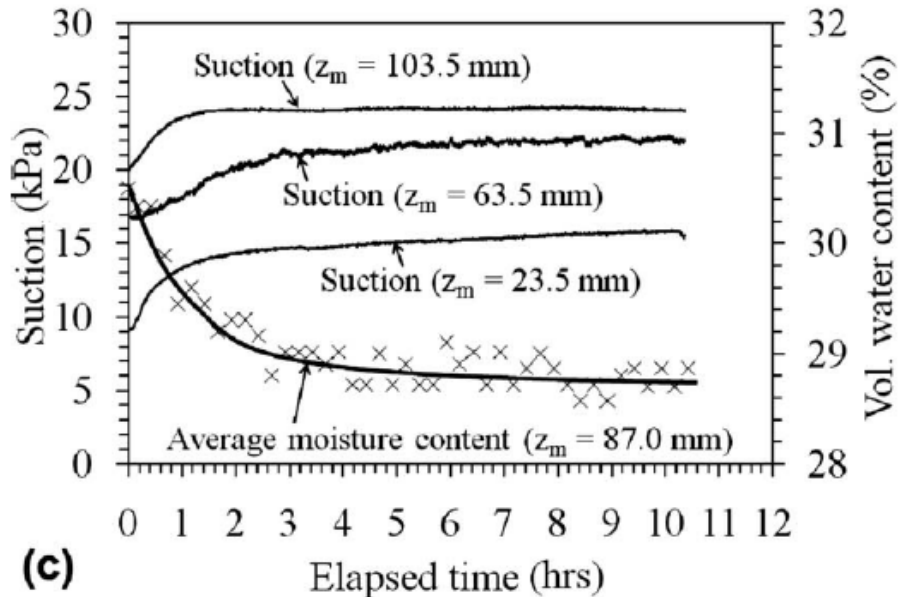


圖 2-15 TDR 於離心機滲透計量測成果 (Zornberg and McCartney, 2010a)

五、VNA相關應用

向量網路分析儀(Vector Network Analyzer, VNA) 用於進行電磁波反射訊號於個別頻率之測量，即 S_{11} 散射係數(scattering parameter)的擷取。 S_{11} 是電磁波在同一傳輸線通道反射的散射係數

(反射回同一個通道)。使用 [Logsdon and Laird \(2002\)](#) 基於 [Campbell \(1990\)](#) 的程序，可將 S_{11} 轉換為介電常數。主要步驟首先將 S_{11} 轉換為複阻抗 $Z^*(\Omega)$ 。

$$Z^* = 50 \left[(1 + S_{11}^*) / (1 - S_{11}^*) \right] \quad (13)$$

並轉換為導電度 $EC_{dc} (Sm^{-1})$

$$EC_{dc} = Z_p^* \epsilon_0 c / (L Z^*) \quad (14)$$

其中

Z_p = 截面同軸模具(Truncated Coaxial Sample Holder)的阻抗，

ϵ_0 = 真空介電常數 ($8.854 \times 10^{-12} Fm^{-1}$),

c = 光速 ($3 \times 10^8 ms^{-1}$),

L = 模具長度

模具的阻抗 Z_p ，可根據探頭尺寸計算：

$$Z_p = 60 / \epsilon_a^{1/2} \times \ln(m/n) \quad (15)$$

其中

m = 外導體的半徑 (m)

n = 內導體的半徑 (m)

下式將導電度轉換為複介電常數（相對於真空的介電常數）

$$\epsilon^* = \sigma^* / [\pi f \epsilon_v \arctan(2\sigma' / \sigma'')] \quad (16)$$

下式為複電常數頻譜平方根

$$\epsilon_a^{1/2} = \left(\left\{ 1 + \left[1 + \tan^2(\epsilon'' / \epsilon') \right]^{1/2} \right\} \epsilon' / 2 \right)^{1/2} \quad (17)$$

對於粘土，在接近 1 GHz 時可以獲得合理的數據 ([Logsdon and Laird, 2004a; 2004b](#))；然而對於土壤，這種計算程序於高於

50 到 100 MHz 的頻率幾乎不可靠 (Kraft, 1987)。為了補充上述 Kraft 程序的結果, Logsdon (2005) 使用 Heimovaara et al. (1996) 建議之四分之一波長程序來確定其中至少一個或兩個高頻位置的視介電常數的平方根

$$\varepsilon_a^{1/2} = [(2n-1)c]/(4Lf_n) \quad (18)$$

其中

n = 四分之一波長頻率值(數個, 不只一個)

f_n = S_{11} 的實部

上述之四分之一波長頻率是通過檢查 S_{11} 頻譜中的實部負數尖峰值(negative spikes)來確定的, 如圖 2-16 所示。然而上述要通過任一程序計算介電常數, 先必須估計模具的阻抗。其研究建議兩者都可以使用具有已知特性的液體的測量頻譜, 如使用空氣、丁醇、酒精和水, 從預期已知之 S_{11} 計算中進行反擬合。而校正基於四分之一波長頻率, 利用已知模具長度(L)和液體的介電特性, 可將(18)式改寫

$$2c/(4f_1) = \varepsilon_a^{1/2} L \quad (19)$$

如果將 $2c/(4f_1)$ 繪製為 $\varepsilon_a^{1/2}$ 的函數, 則斜率是 L 。 f_1 是第一四分之一波長頻率, 而 $\varepsilon_a^{1/2}$ 是該頻率的視介電常數。圖 2-17 是 Logsdon (2005) 校正的結果, 其用於確定感測長度 L 的四種溶液, 在回歸中 L 表現出發散的情況, 因此具有不確定性。而假定的感測長度 L 使計算出來的介電常數和電導度值呈反向移動(式(19)), 因此感測長度 L 會影響與文獻中的數值比較, 必須特別精準。

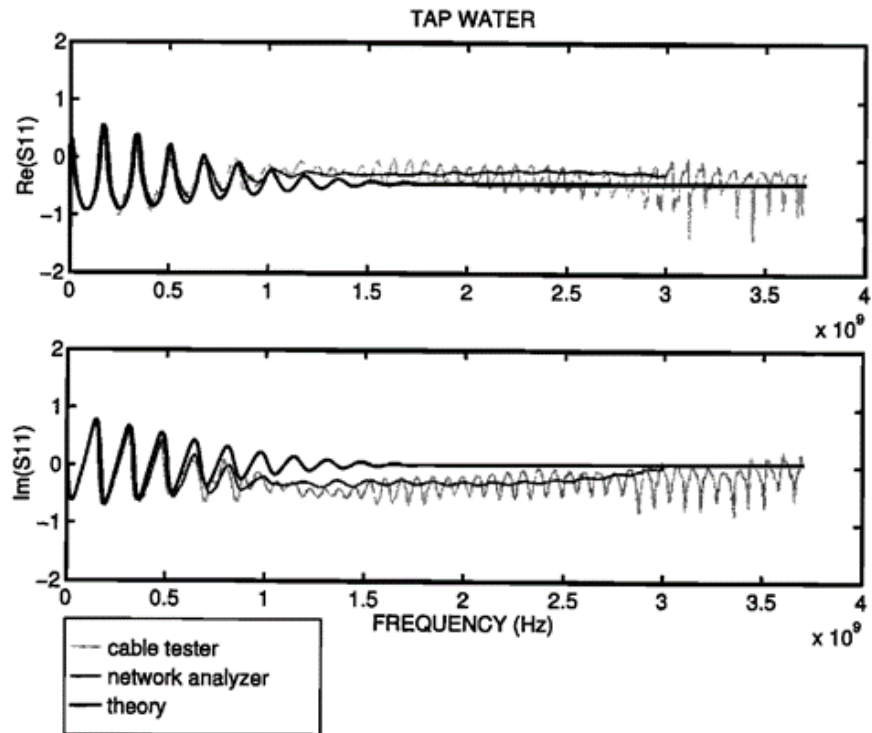


圖 2-16 自來水中實測和理論值(S_{11} 散射函數的實部和虛部)
(Heimovaara et al., 1996)

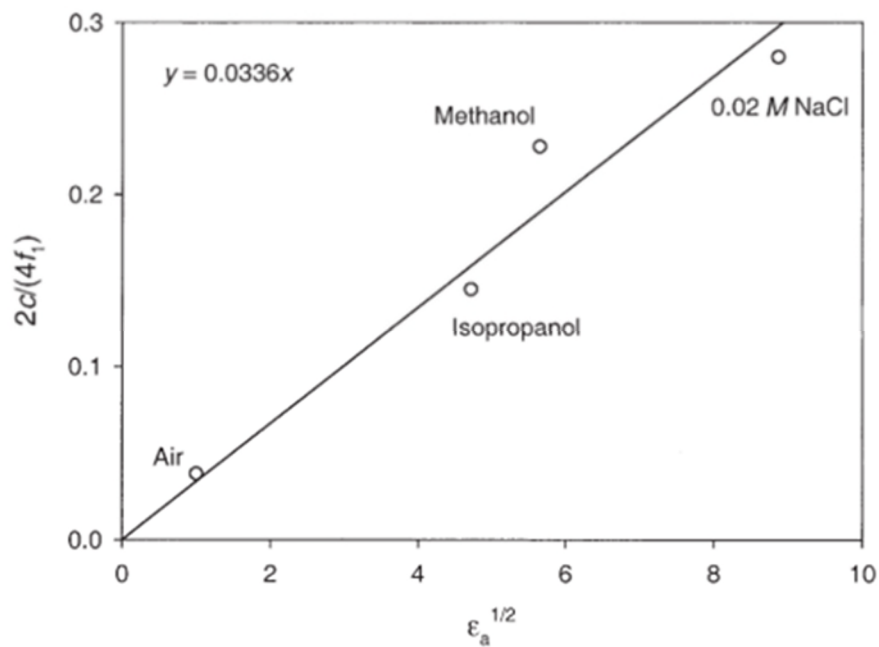


圖 2-17 空氣、丁醇、酒精和水校正圖(Logsdon, 2005)

六、綜合評析

根據上述文獻回顧內容，針對本研究主要重點議題，整理相關評析如下：

- (一) 利用 TDR 於土壤導電度與含水量關係建立有其優勢，含水量與電阻率遲滯(Hysteresis)現象的產生與乾溼循環速度有相關，但與土壤物性（如乾密度、孔隙率等）以及環境因子（如溫度、水質導電度、pH 值）等綜合影響尚未有完整的評估。
- (二) 目前 TDR 仍僅限於一般時間域之含水量以及導電度量測使用，尚未透過寬頻資訊提供額外資料比對，因此以研究角度而言，建立寬頻資訊量測技術，應可透過額外之資料內涵（redundancy）以提高上述關係判釋的可靠度，或是提出量測基本不確定性。
- (三) 由於 TDR 壓力鍋等現有物理模型均未考量重力問題，加上時間尺度影響等，因此本研究將擬定現有初步 TDR 結合離心機之成果，透過上述回顧以及砂箱物理模型經驗，延伸重力影響下之評估；
- (四) 室內試驗成果需要進一步現場測試與驗證，因此本研究將擬定整合相關成果，透過中央示範站與 TDR 含水量貫入器、ERT 之安置，蒐集現地觀察資料，以及相關數值方法分析，以驗證相關研究方法之可行性，藉以提出淺崩塌穩定性分析與不確定性。

第二節 第一年研究規劃與初步成果

一、現地場址TDR 含水量與導電度行為探討

本研究初步利用前期計畫之監測成果，重新探討 TDR 含水量與導電度行為。現場之監測配置如圖 2-18 所示，包含不同深度之 TDR 貫入器。其現場監控之含水量原始資料如圖 2-19 所示，由於其歷時有顯著之雜訊，因此本研究採用 moving average 方式進行資料平滑化，結果如圖 2-20 所示。而導電度之原始監測數據如圖 2-21 所示，但因為現場 EC 資料有顯著上下跳動偏移問題，一般 moving average 方式無法有效取得歷時分佈，因此採用上包絡邊界為取用原則，重新將 EC 資料濾波如圖 2-22 所示。

基於上述監測資料，本研究認為基於圖 2-19 含水量歷時分佈，其中以 P5 為例，可分析之降雨事件如圖 2-23 分類，進而可以針對不同事件過程，包含含水量與 EC 於濕潤與乾燥過程之速率分析如圖 2-24，大致可分為三組快慢不同之群組；再基於上述相關研究成果，將含水量與 EC 相關性繪製於圖 2-25，並將三組快慢不同之群組分別繪製其率定曲線，可顯著發現當濕潤與乾燥愈快時，其率定曲線較為平緩，反之則率定曲線較為陡峭，其關係大致符合前期 Chung et al. (2019) 研究成果。

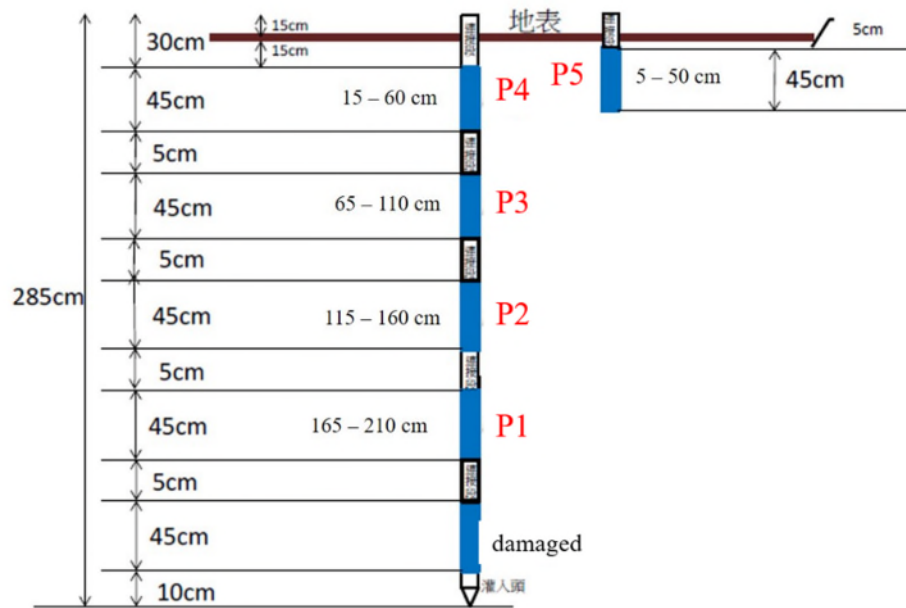


圖 2-18 現地場址 TDR 含水量與導電度監測配置

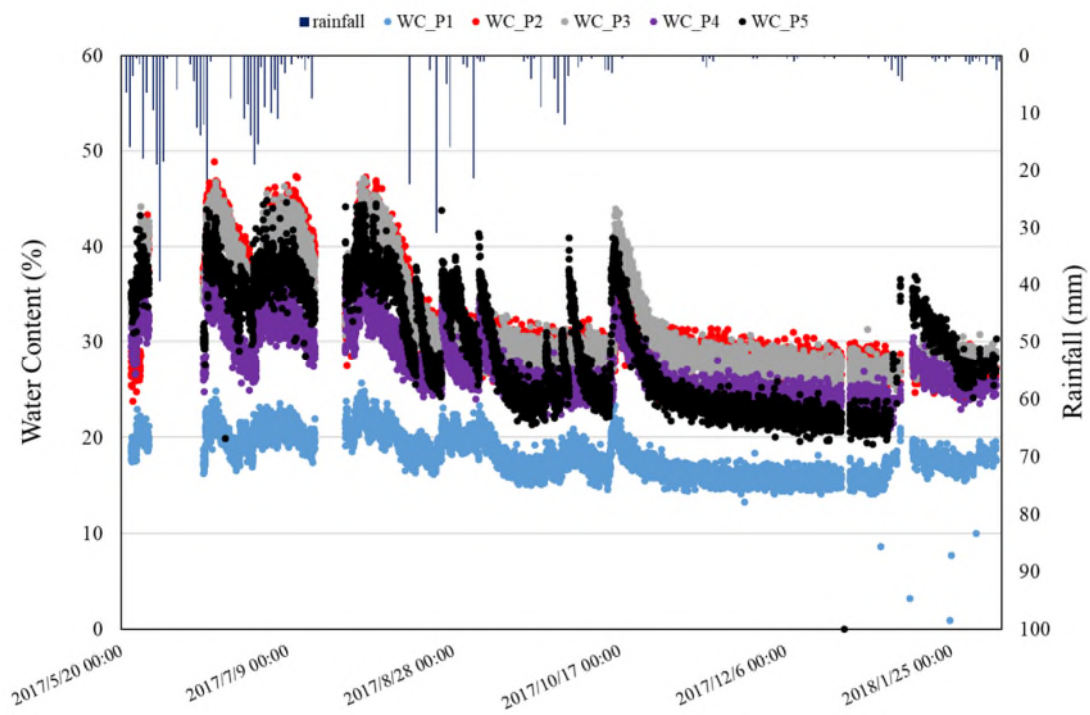


圖 2-19 現地場址 TDR 含水量原始資料

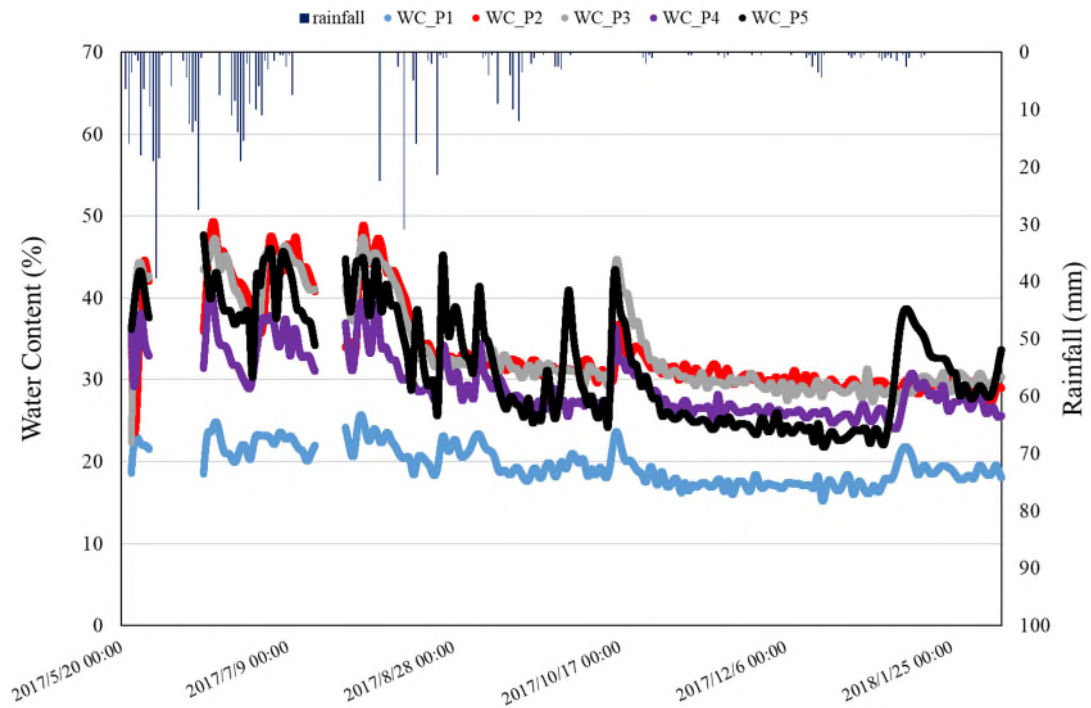


圖 2-20 現地場址 TDR 含水量濾波結果

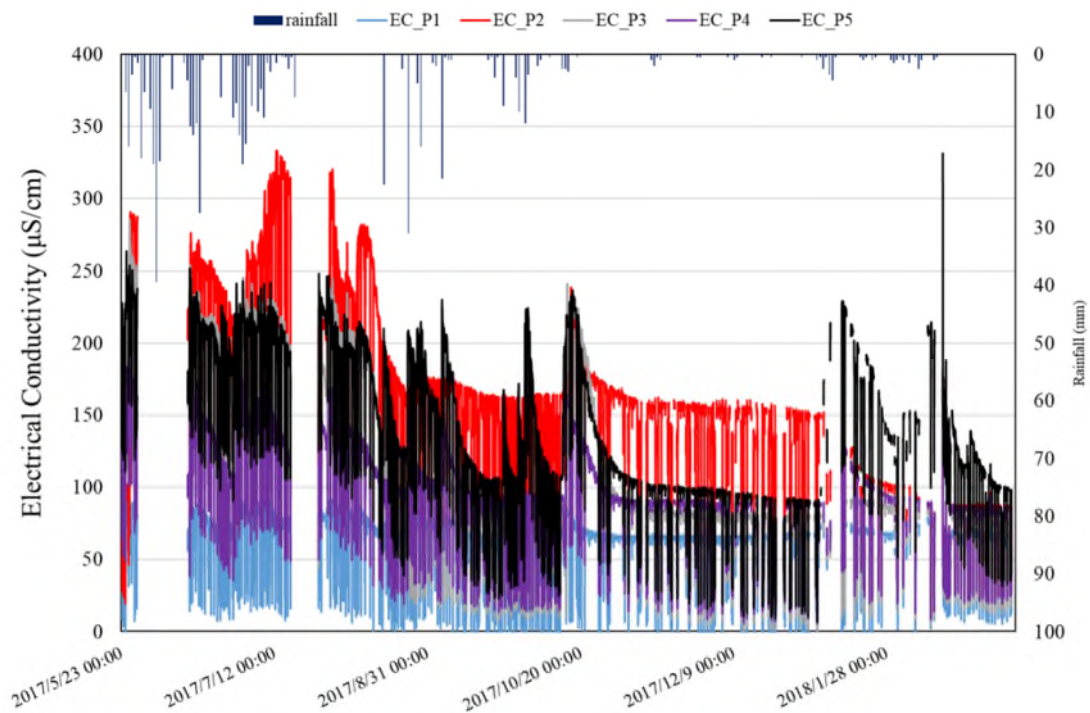


圖 2-21 現地場址 TDR EC 原始資料

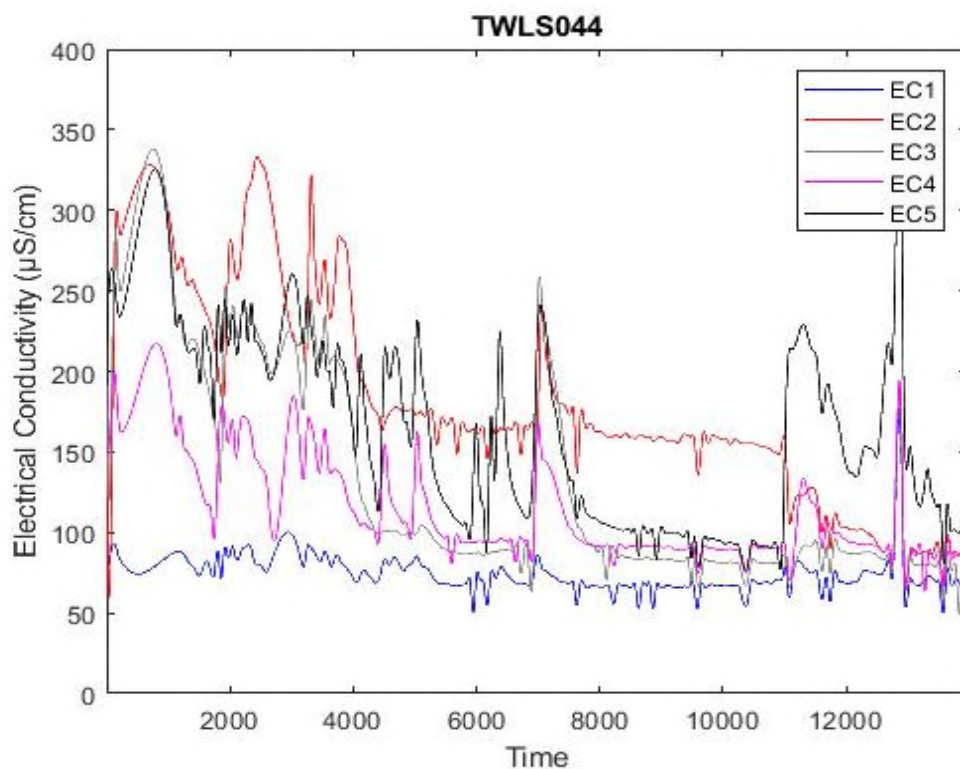


圖 2-22 現地場址 TDR EC 濾波結果

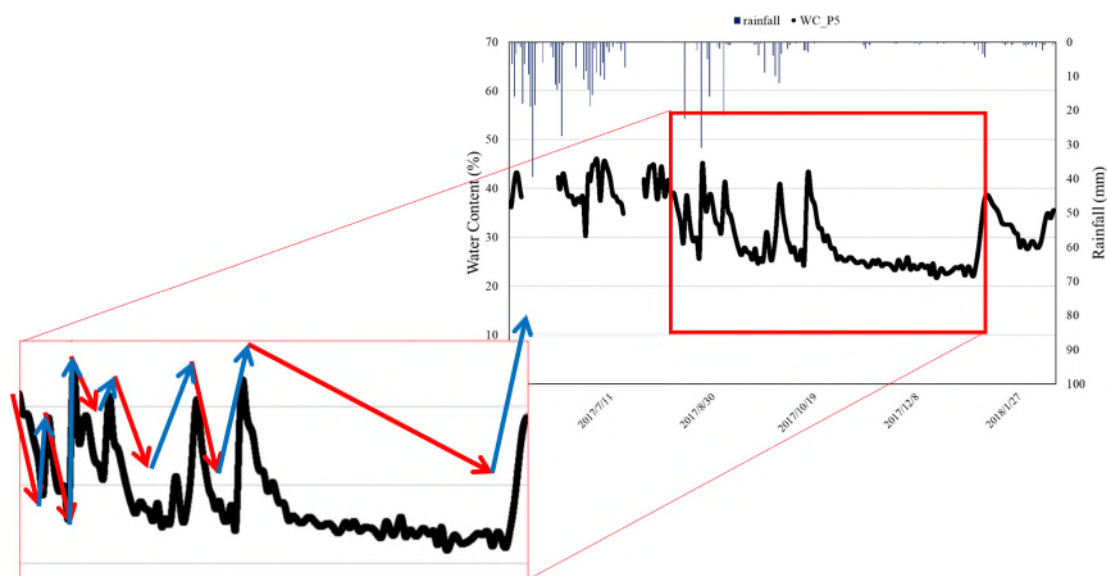


圖 2-23 降雨事件分類

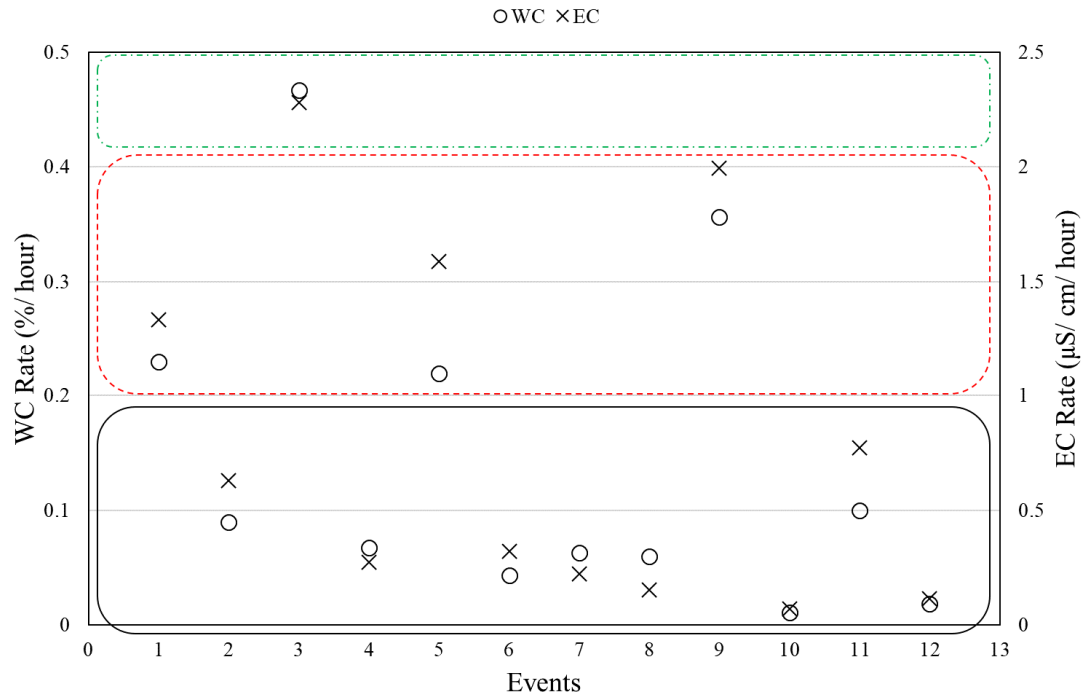


圖 2-24 不同降雨事件之含水量與導電度速率分類

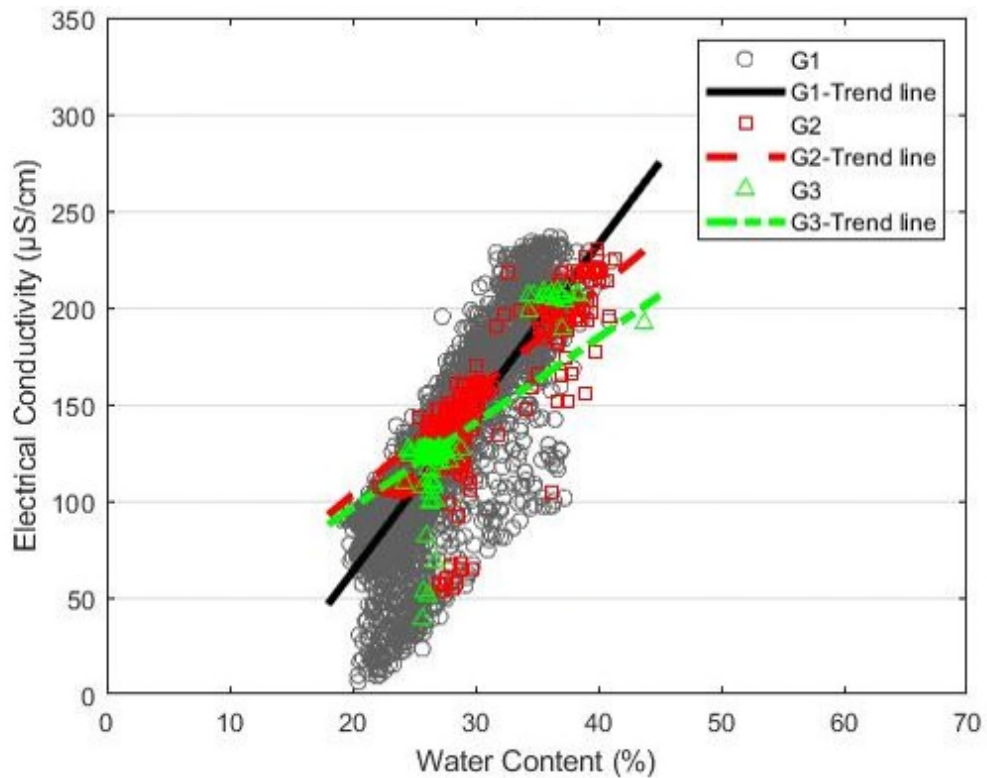


圖 2-25 含水量與導電度關係受降雨影響

二、TDR砂箱與壓力鍋試驗規劃

(一)壓力鍋試驗

本研究所採用之壓力鍋將參考林哲毅(2009)與 Chung et al. (2019)配置，如圖 2-26 所示，其儀器可以分別獨力控制及量測土壤中的孔隙水壓力和孔隙氣壓力，因此需採用高進氣吸力值陶瓷板進行控制與量測，配合 TDR 同軸探針之改良，圖中主要外部鋼模則為 TDR 外導體，內部探針為內導體，鋼模高為 16 公分，直徑為 10.2 公分，鋼模側邊則開設一孔洞放置溫度計，試體底盤則開設一槽溝放置高進氣陶瓷進氣板。配合空壓機使用，其壓力上限為 10 kg/cm^2 。利用手動式調壓閥提供試體所需之圍壓，壓力表可顯示圍壓之大小，精度為 0.2 kg/cm^2 。

一般壓力鍋試驗已可有效取得 SWCC 曲線以及相關 Van Genuchten 模式 α 與 m 參數，曾燕翔(2015)更進一步指出在不同的流量與邊界條件設定下，考量動態環境下所進行一系列土壤保水曲線有其遲滯現象，因此本研究將透過此 TDR 改良壓力鍋之配合下，可充分探討土壤種類與密度，以及不同環境因子，包含溫度、pH 值的影響因子之不確定性。

初步規畫以一般粉土與中大紅土為基礎，並以至少兩種乾密度(鬆與緊 $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$) 為規畫，溫度以一般室溫以及如夏日 $30 \sim 35$ 度為主，pH 值設定為較酸值 5 與中性 $7 \sim 8$ 為主。另外也將加入降雨水之 EC 值 100 與 $1000 \mu\text{S/cm}$ 。

本計畫目前設計改善壓力鍋設備以配合 TDR 同軸探針，並使用 TDR 量測壓力鍋內的體積含水量與導電度之變化。相關土樣進一步可使用單埠向量網路分析儀 VNA 進行土壤介電

頻譜之量測。另外本試驗重點在於可配合本研究所提之介電頻譜分析方法，預計可細緻區分介電頻譜與各項影響因子之關聯性。

1. 實驗配置：

本研究改良之 TDR 壓力鍋裝置的主要構件在圖 2-27 中詳細顯示，由以下幾個元件組成：

- (1). TDR 內導體（圖 2-27 - 編號 1），內導體由金屬棒所製成，並連接到 BNC 連接器（圖 2-27 - 編號 2），桿尖為尖錐狀，以方便貫入試體。TDR 內導體的直徑設置為 6 mm，使其有更佳的穿透效果(Lin et al., 2006a)，
- (2). BNC 連接器（圖 2-27 - 編號 2），該連接器用於將同軸纜線連接到內導體（圖 2-27 - 編號 1）和外導體（圖 2-27 - 編號 2），
- (3). 外導體（圖 2-27 - 編號 3），該導體採用標準壓實模具（內徑為 6 英吋(inch)），
- (4). 多孔陶瓷板（圖 2-27 - 編號 4），這個陶瓷板是由燒結的高嶺土，富含許多均勻的小孔。陶瓷板充當不飽和土壤試體與孔隙水壓測量系統之間的介面。
- (5). 內底板（圖 2-27 - 編號 5）是標準監考模具和陶瓷壓力板組成的支架。這個盤子有兩個洞作為水進出多孔陶瓷板的通道。
- (6). 溫度感測器（圖 2-27 - 編號 6）的準確度為 $\pm 0.1\%$ 。

- (7). 外上板（圖 2-27 - 編號 7），外底板（圖 2-27 - 編號 8），和外腔室（圖 2-27 - 編號 9）是測試期間控制氣壓的室的一部分。

圖 2-28 為壓力鍋外部裝置的示意圖 壓力鍋中的標準夯實模將設置為 TDR 探頭的外導體，其內徑為 6 inch。而 TDR 的內導體直徑為 6 mm。探頭下有一個孔，作為水流入試體的水通道。透水石放置在探頭下方，來確保在濕潤過程均勻飽和。探頭放置在腔室內，而內部氣壓受外部的氣壓裝置所影響，使控制試體的乾濕速率。為了量測試體溫度，將溫度感測器放置在探頭旁，並與數據採樣器(DAQ)相連。

2. 實驗流程：

使用改良 TDR 壓力鍋測量導電度和體積含水量，並基於圖 2-29 進水進氣修訂，2.實驗流程將分為以下階段組成：

- (1). 潤濕乾燥測試的第一步是應用高背壓力（10-20 kPa），直到多孔陶瓷板完全飽和。
- (2). 其次，將土壤壓實在 TDR 同軸探針模具（圖 2-27 - 編號 3）中，並達最高所需的密度，
- (3). 第三，在潤濕過程中，土壤樣本使用高背壓去除水中離子氣泡，已達飽和狀態。在此過程中，必須使用溫度計保持土壤試體的溫度。
- (4). 最後調節壓力，以控制土壤試體的含水量。

上述 TDR 壓力鍋部分元件受到疫情影響，後半段執行期才由國外進口完成，目前本體與相關處理轉接器銜接初步加工完成，如所示，目前持續進行相關因子測試，預期能透過後續第二年度計畫產出成果。

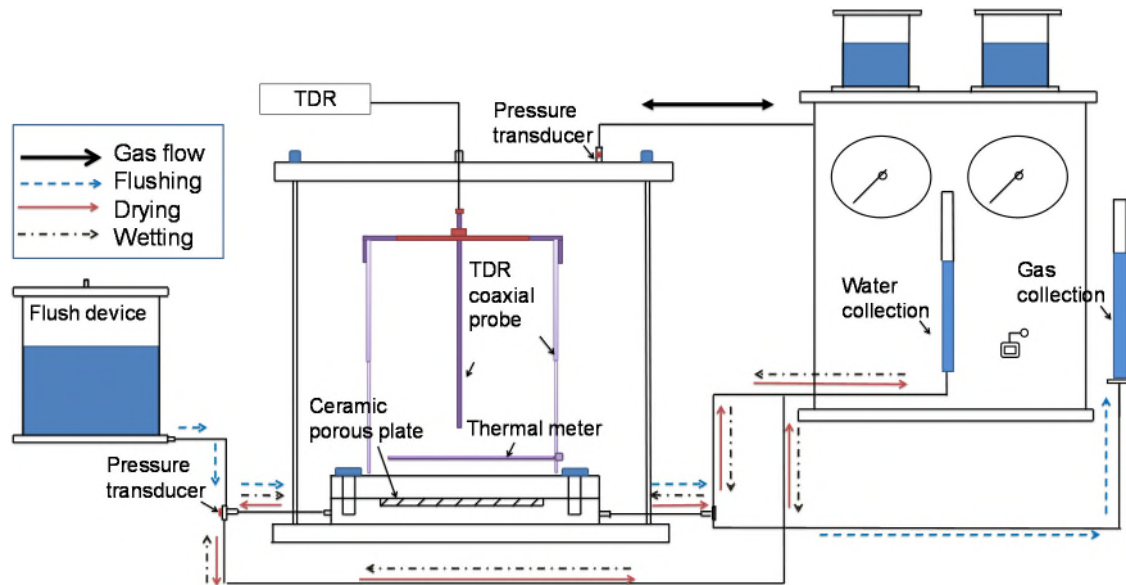


圖 2-26 改良型 TDR 壓力鍋試驗配置(Chung et al. 2019)

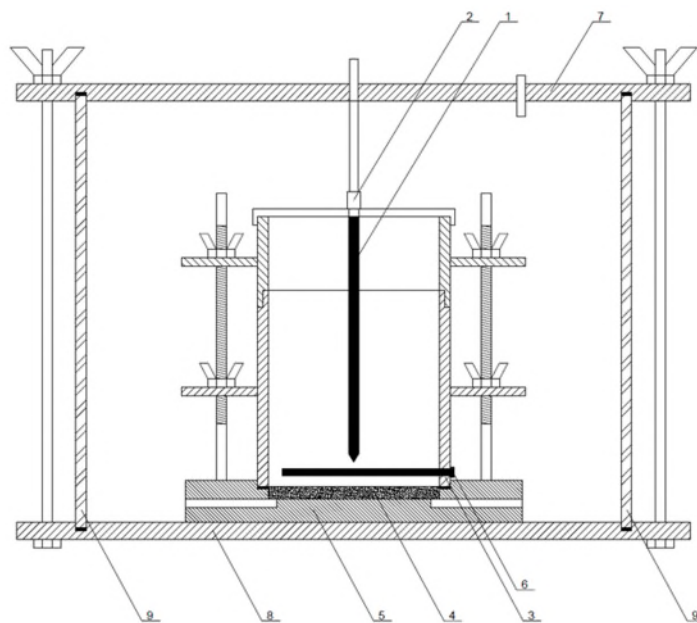


圖 2-27 本研究 TDR 壓力鍋試驗配置

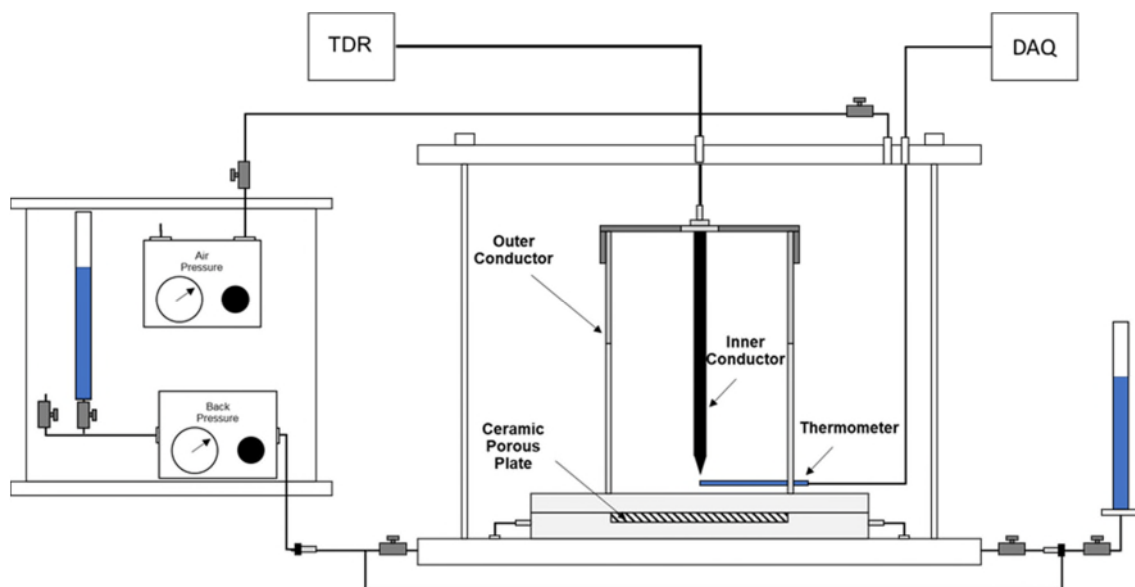


圖 2-28 本研究 TDR 壓力鍋外部設計圖

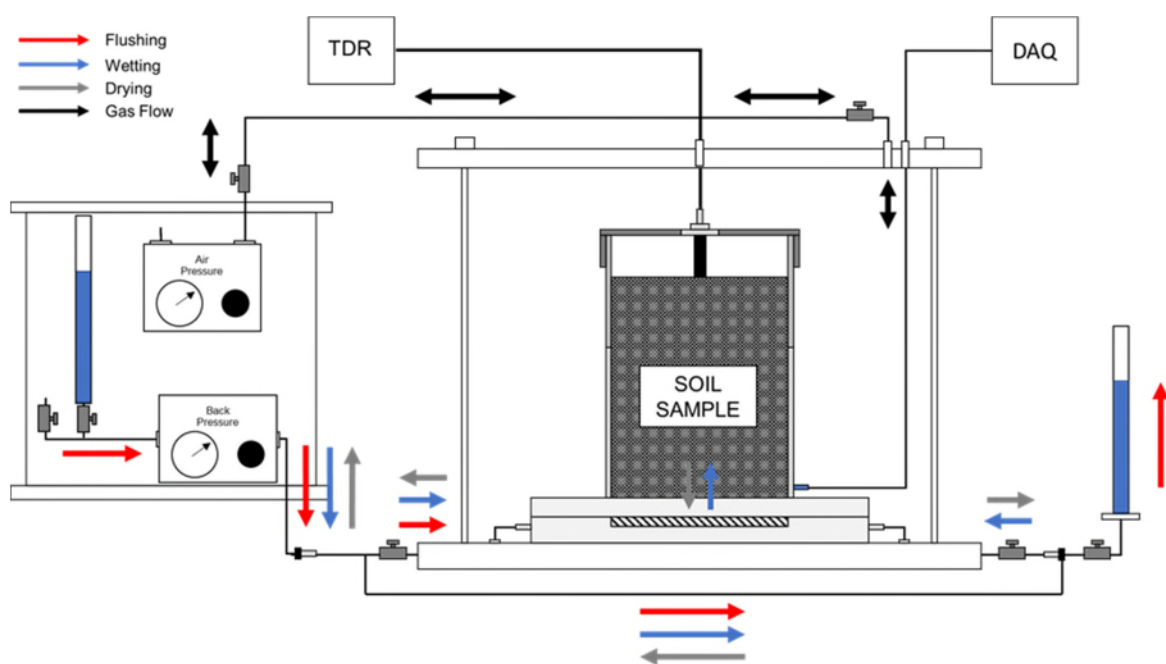


圖 2-29 本研究 TDR 壓力鍋測量步驟示意圖



圖 2-30 本研究 TDR 壓力鍋實體照片

(二)砂箱試驗

本研究進階考慮實際動態下之量測不確定性，所使用之砂箱模型將擬定參考(魏士凱，2019)之初步成果，以尺寸大小 100cm×100cm×100cm 砂量進行包含 TDR 含水量、導電度、介電頻譜以及基值吸力之相關性探討，另外為降低砂箱邊界對於地電阻量測時的電流場產生邊界效應的影響，填入土樣深度應盡可能等於電探測線展距，規劃砂箱中的電探測線展距為 50 cm 左右，因此填入之土樣深度至少為 70cm。

本試驗採用之 TDR 感測器方面則是擬定使用的 TDR 貫入感測器；貫入式探頭有利於感測器置入砂箱進行資料量測，又其本身貫入土壤中所佔體積較小，故可降低感測器本身材料電阻對於地電阻量測時的電場影響。其中 TDR 貫入將透過魏士凱(2019)之相關成果，配合 COMSOL 有限元素分析軟體，先進行包含不同配置下之電磁場量測範圍，如圖 2-32 所示，先行

取得最佳之構建設計，以提升量測代表性，減少貫入效應(Lin et al. 2006a; 2006b)與材料非均質之影響。

砂箱所用之情境為間歇性的降雨入滲行為或乾濕季的季節交替等影響所形成的土壤乾溼循環，所考量的因子包含降雨強度造成的入滲速率、水質導電度與 pH 值影響。而透過 TDR 將同時監測含水量與導電度之歷時資料，並配合 ERT 之剖面量測結果進行比對。

魏士凱(2019)採用全石英砂進行入滲測試，但期導電度可能受限於單一粒徑細砂影響無顯著之變化，因此後續實驗土壤改採為中壢紅土，依據統一土壤分類法其土壤性質屬於 CL，液性限度為 43.85，塑性指數為 21.85（黃聖棋，2014），透過直接採樣並填入砂箱內，初步可得到入滲與乾燥期間之導電度與含水量遲滯現象，如圖 2-33，吻合 Chung et al. (2019)提出其關係受入滲速率之影響。但其中由於短型三針 TDR 感測器 (Three electrode)與小型 TDR 貫入器(S)可能受限於感測器量測範圍較小，且試驗土樣未均勻(直接取樣後置入砂箱)，因此 EC 範圍較低。

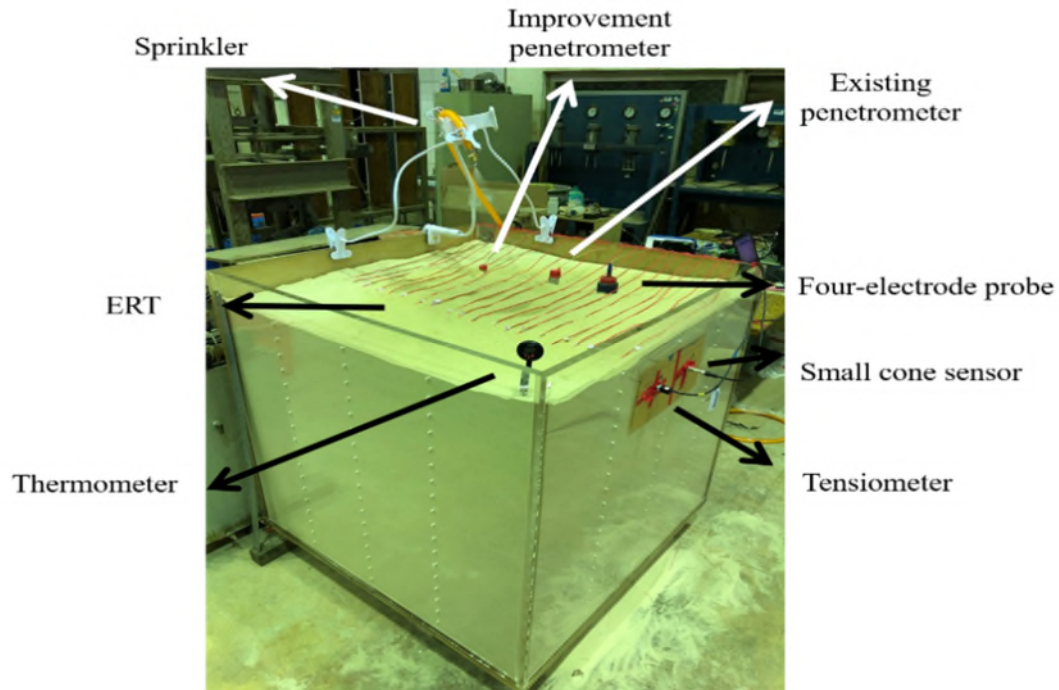


圖 2-31 模擬砂箱與 ERT 設備結合(魏士凱，2019)

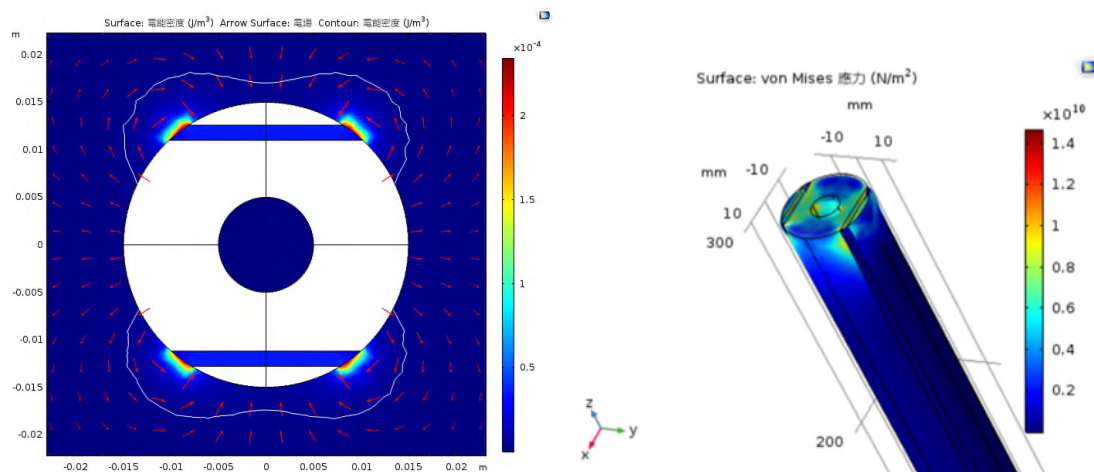


圖 2-32 TDR 貫入器之(左)電磁場分布模擬，以及(右)應力分布模擬(魏士凱，2019)

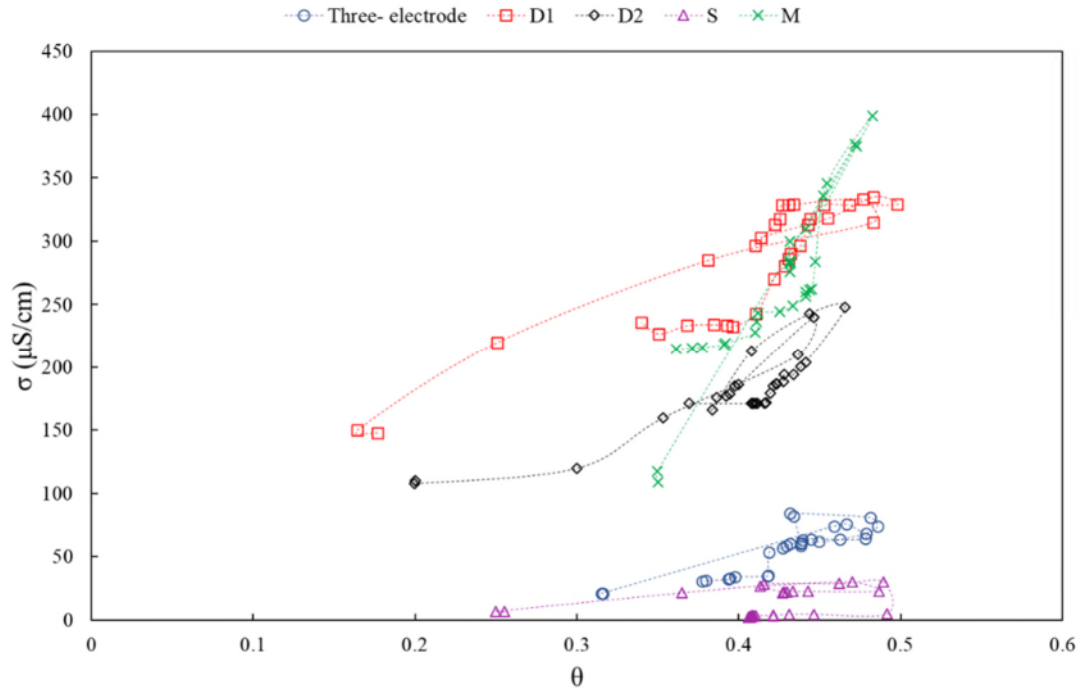


圖 2-33 砂箱紅土之導電度與含水量遲滯現象(魏士凱，2019)

因此本研究透過上述不同類型種類土壤，加上不同密度之調整，以及環境因子(溫度、pH 值)，可因應土壤物性影響因子，乃至於實際入滲與乾燥速率動態探討。以下為本研究的說明與相關執行成果：

基於前述成果，本研究嘗試尋找其他影響土壤導電度與含水量遲滯效應的影響因子，對比出其他因子的影響程度，並搭配地電阻影像剖面法(ERT)與張力計嘗試繪製出地下大範圍體積含水量與基質吸力分布剖面圖，其使用的轉換關係示意圖如圖 1-1 所示。而 Archie's Law 和 SWCC (Soil-Water characteristic curve)如式(13)和式(14)所示。

$$\frac{1}{\rho} = A \cdot \theta^m \quad (20)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + [1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad (21)$$

1. 實驗配置：

本研究以不同的變因來探討何種變因會加重遲滯效應的產生，分別由乾密度、雨水的 pH 值與導電度進行實驗對照，共有 6 組試驗，每組的降雨量都設定為 50(mm/hr)，而變因的規劃的物理參數如表 2-1 所示。本研究先使用桃園紅土作為實驗使用土壤，其基本物性實驗資料如表 2-2 所示。而本研究之實驗設備配置如圖 2-33 所示，與圖 2-31 的配置大致相同，不同點在於更改灑水與排水設備。

砂箱內的測量儀器(TDR、ERT、Tensiometer)配置如圖 2-35 與圖 2-36 所示。而砂箱內使用的 TDR 貫入器如圖 2-37 所示，在圖內紅字為 TDR 貫入器代號，而 N1、N2 為新式雙側貫入器，S 為舊式貫入器，3 為傳統三電極感測導波器，M 為小型 TDR 貫入器。本實驗所使用的張力計為 T5 張力計如圖 2-38 所示。灑水設備如圖 2-39、圖 2-40、圖 2-41、圖 2-42 與圖 2-43 所示。排水如圖 2-44 與圖 2-45 所示，凸出之排水孔會接上軟管將水排出實驗場所外。

表 2-1 實驗之參數設定

	Experiment					
	Dry density		pH for rainwater		Conductivity for rainwater	
	Tight	loose	Acidity	Normal	Natural	High
Precipitation per hour(mm/hr)	50	50	50	50	50	50
Conductivity for rainwater(μs/cm)	0	0	0	0	100	1200
pH	7	7	5	7	7	7
Dry density(g/cm ³)	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

表 2-2 土壤基本物性實驗表(桃園紅土)

液性限度 LL(%)	37.91
塑性限度 PL(%)	24.14
塑性指數 PI (%)	13.77
比重	2.62
最大乾密度(g/cm ³)	1.705
最佳含水量(%)	18.124
USCS 分類法	SP(級配不良砂)
AASHTO 分類法	A-2-6

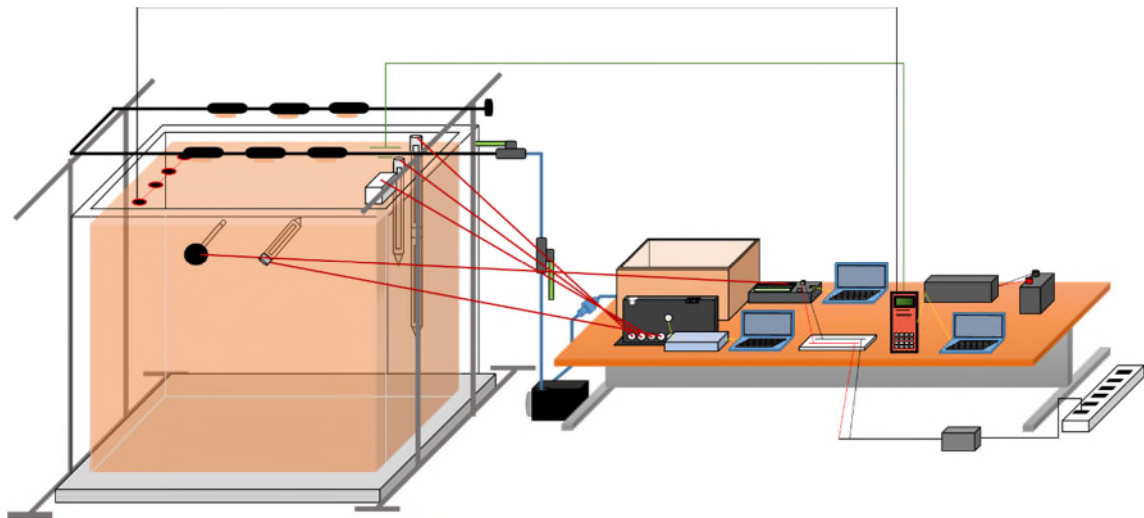


圖 2-34 實驗設備示意圖(包含了砂箱、排水系統、灑水系統與量測系統(TDR、ERT、Tensiometer))

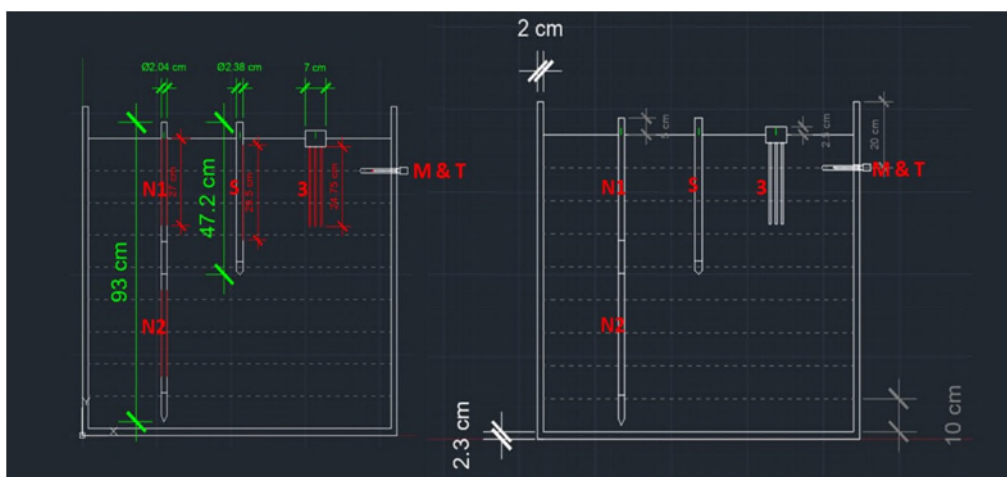


圖 2-35 貫入器在砂箱所在位置之示意圖(側視圖)

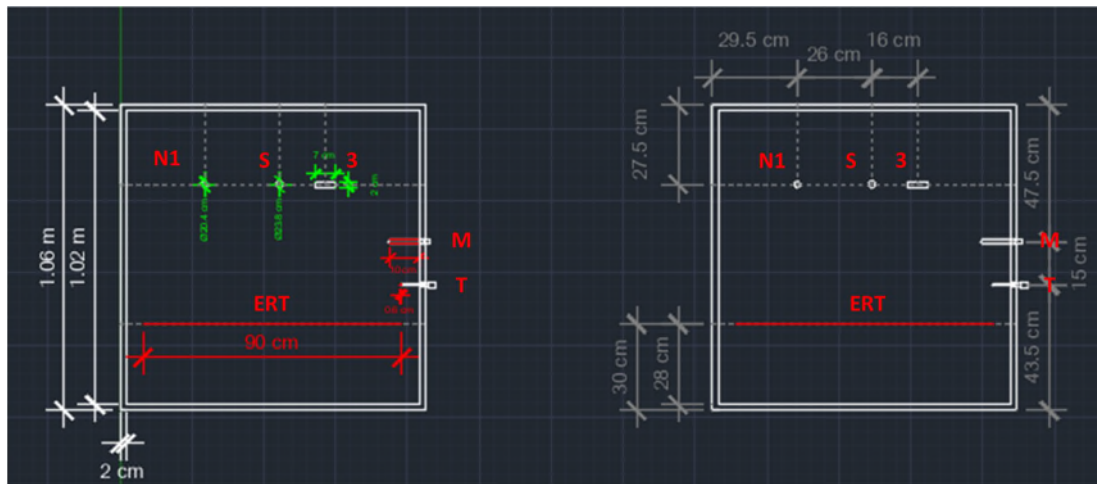


圖 2-36 貫入器在砂箱所在位置之示意圖(俯視圖)



圖 2-37 砂箱實驗所使用的各 TDR 感測導波器實際照片



圖 2-38 T5 張力計(T5 Pressure Transducer Tensiometer)



圖 2-39 灑水系統實際照片(1)



圖 2-40 灑水系統實際照片(2)

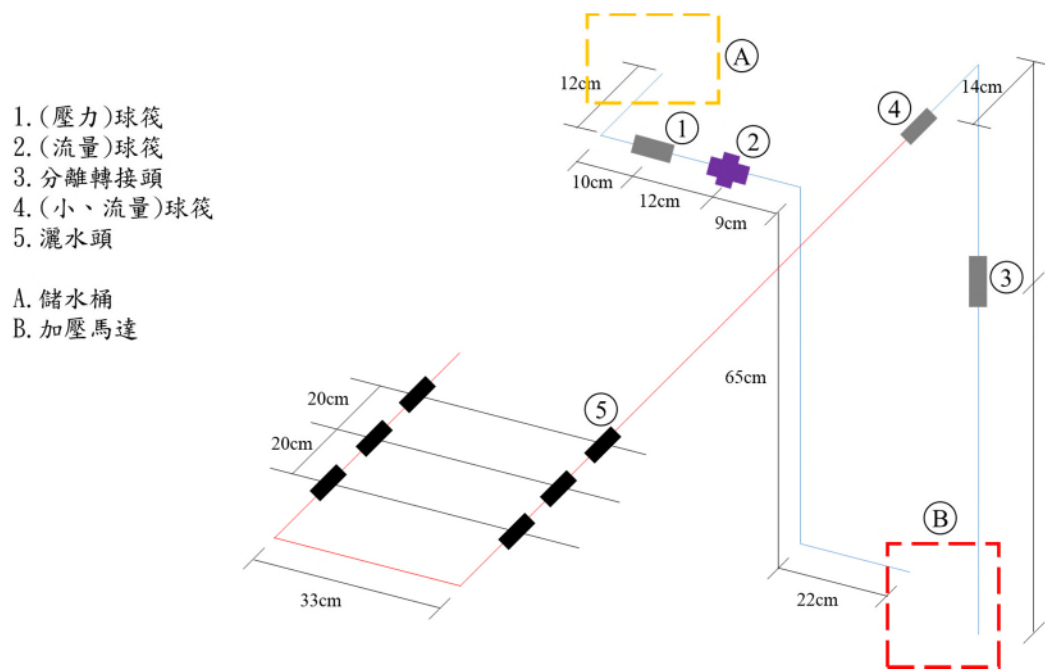


圖 2-41 灑水系統示意圖(1)

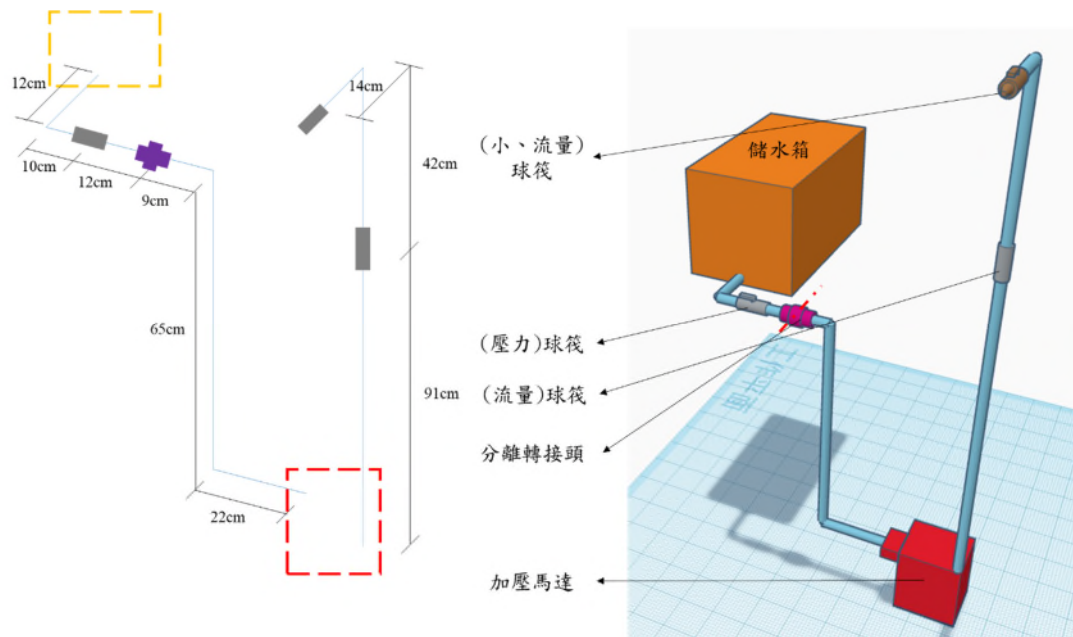


圖 2-42 灑水系統示意圖(2)

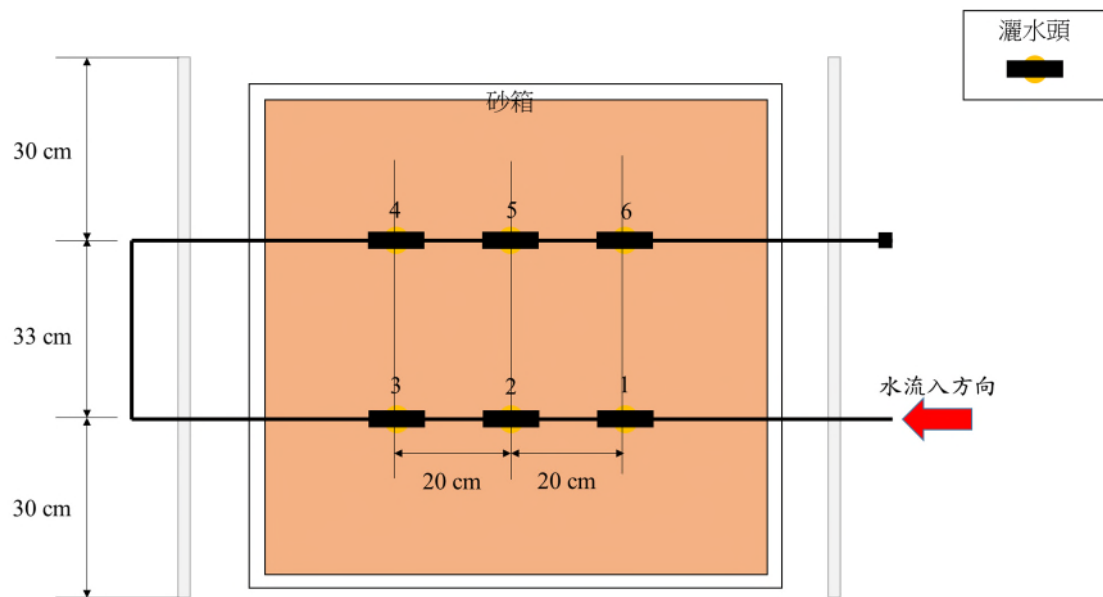
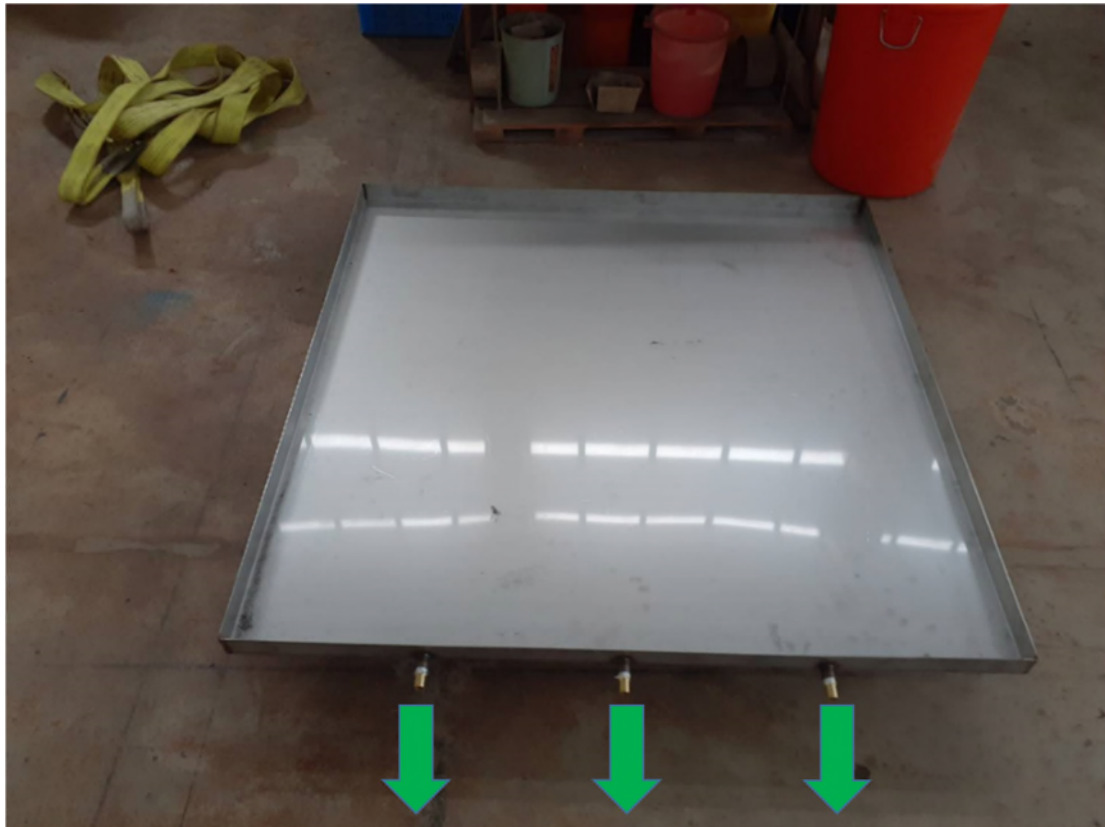


圖 2-43 灑水系統示意圖(3)



水流出方向

圖 2-44 排水系統實際照片

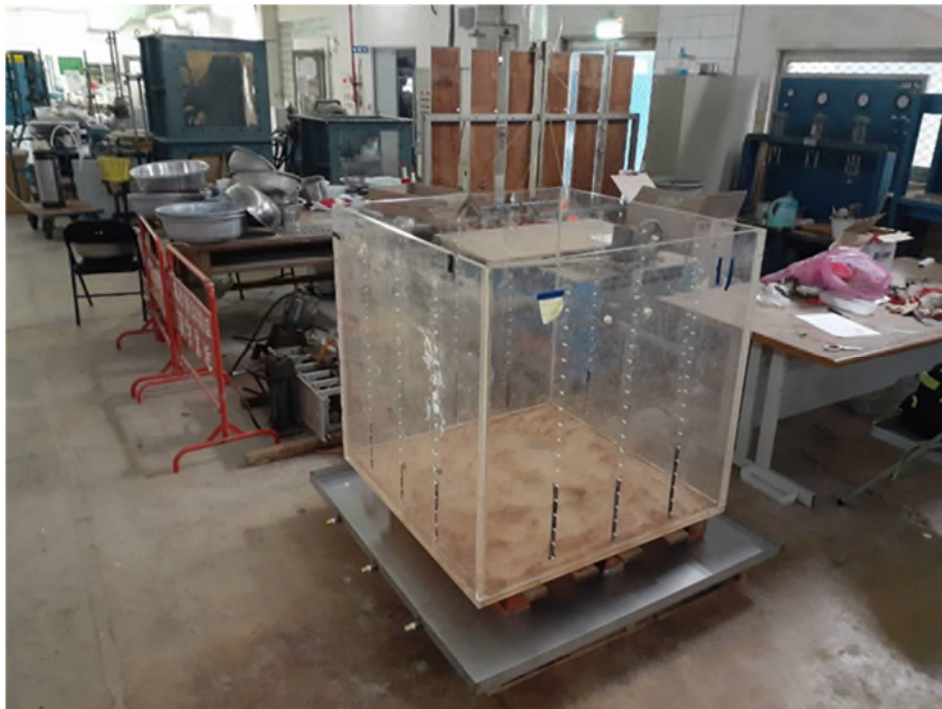


圖 2-45 排水系統與砂箱的相對位置之實際照片

2. 儀器率定：

本研究在砂箱中將使用 5 個 TDR 感測導波器和一個張力計進行體積含水量、導電度與基值吸力的量測，而其中 3 種 TDR 感測導波器(貫入器)由於結構問題須進行含水量-介電常數轉換公式率定和導電度-穩態值轉換公式率定，其編號分別為 N1、N2 與 S，而 N3 則為日後遇到 TDR 感測導波器發生損壞時的替補方案。下面兩張表分別代表含水量-介電常數轉換公式率定之係數和導電度-穩態值轉換公式率定之係數。

表 2-3 貫入器的含水量-介電常數轉換公式率定之係數

	α	n	Ka_{probe}
N1	0.2037	1.0031	3.1666
N2	0.12643	0.9432	2.5037
S	0.048669	0.87081	1.9337
3	0.42665	0.90573	1

表 2-4 各貫入器的導電度-穩態值轉換公式率定之係數

	β	R_{cable}
N1	163.9791	1.6887
N2	182.8069	0.75009
S	261.5766	1.0222
3	404.0786	2.8329

而下面等圖為使用兩個 Matlab 的 function 進行率定(係數回

歸)，其分別為最小平方法 lsqcurvefit function，與 John D'Erric 對 Matlab 內建的 fminsearch function 進行改良的 fminsearchbnd function，而本研究對其含式進行編寫，使其成為最小平方法之演算法。

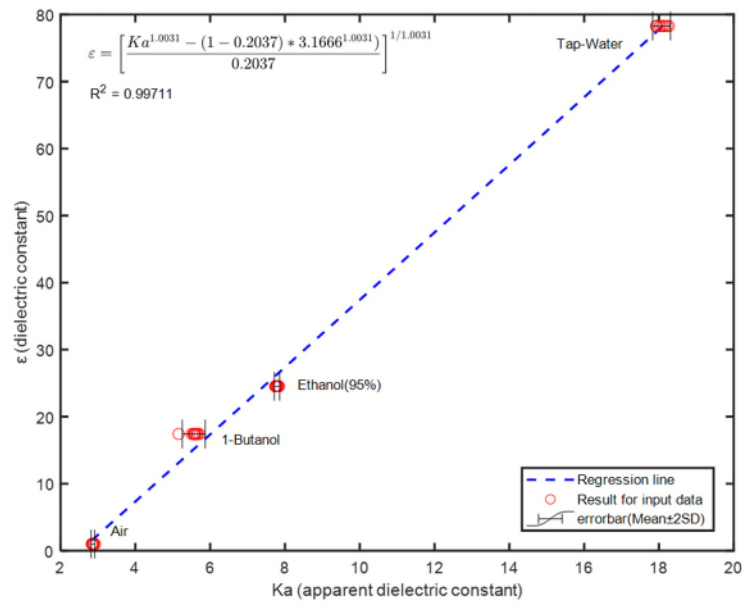


圖 2-46 (N1)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(lsqcurvefit)

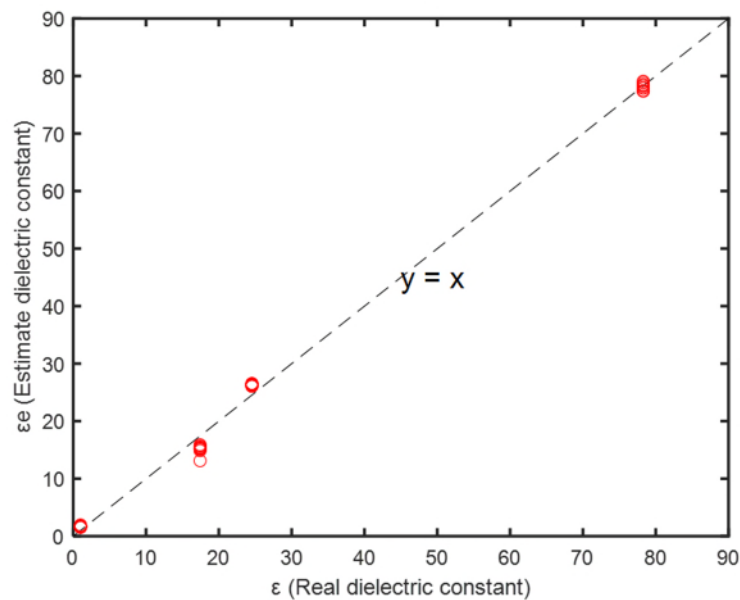


圖 2-47 (N1)經由含水量-介電常數轉換公式推倒出來的預估介電常數與真實介電常數之誤差圖

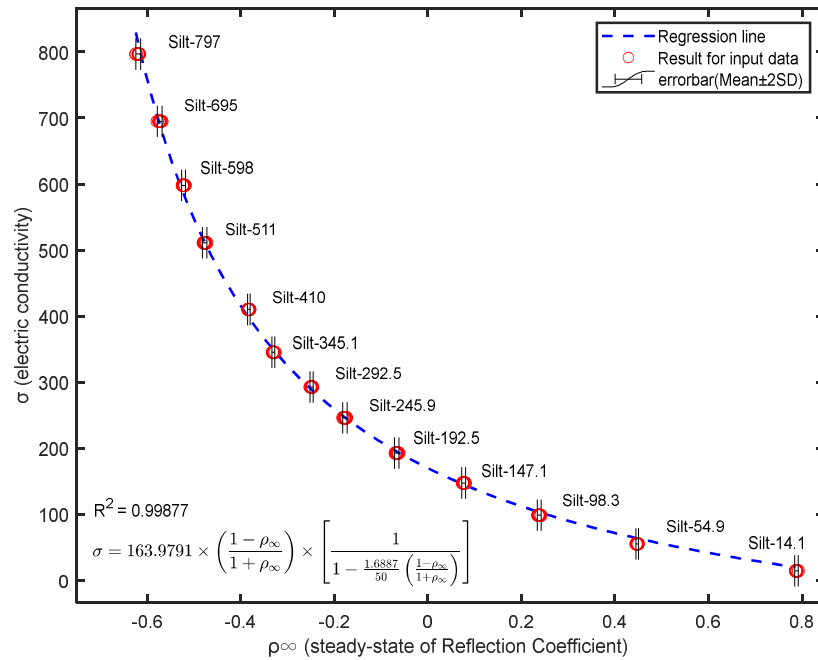


圖 2-48 (N1)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

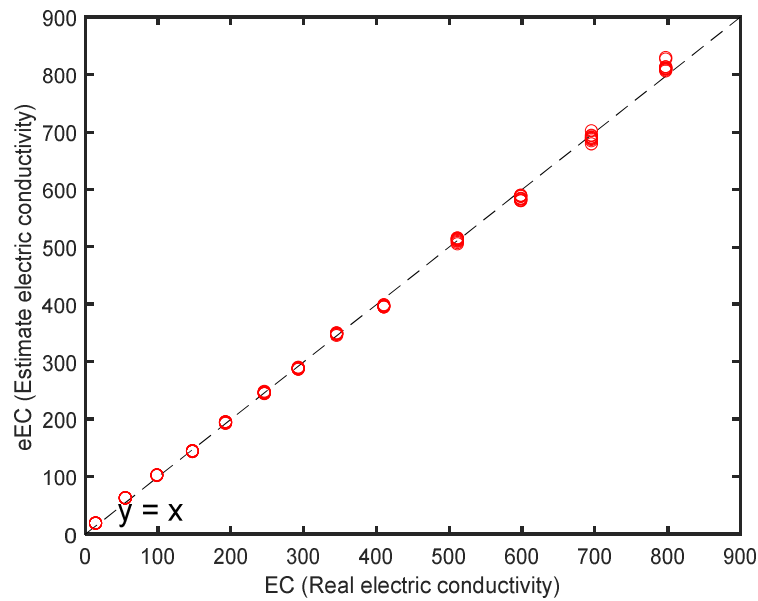


圖 2-49 (N1)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真實導電度之誤差圖

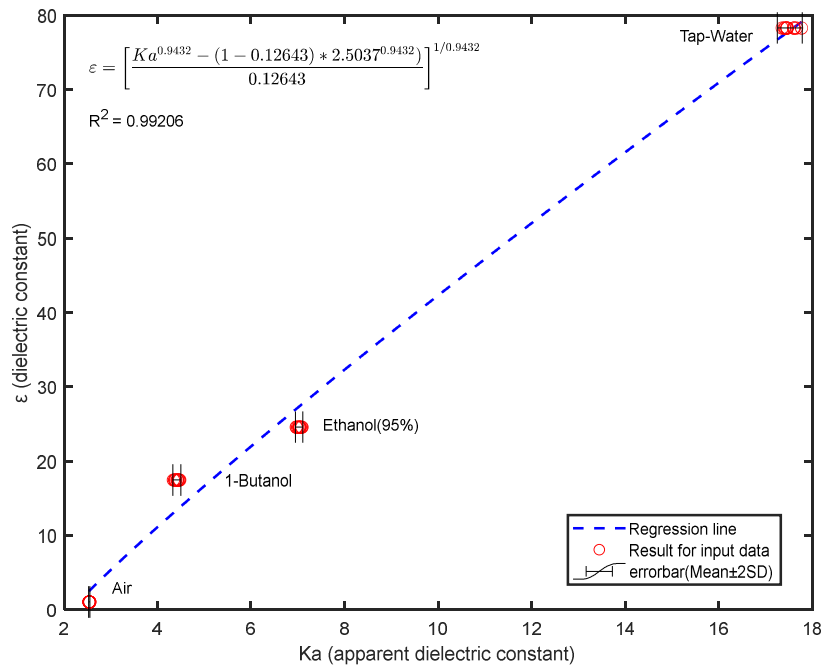


圖 2-50 (N2)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(Isqcurvefit)

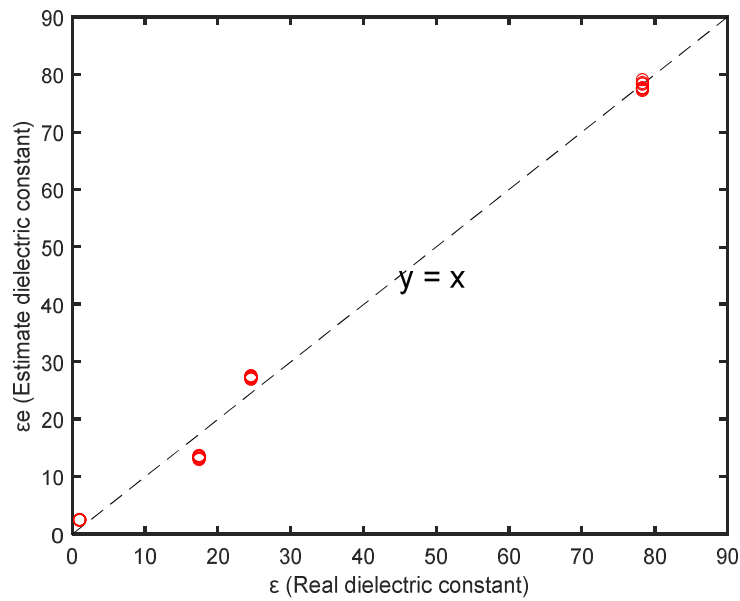


圖 2-51 (N2)經由含水量-介電常數轉換公式推倒出來的預估介電常數與真實介電常數之誤差圖

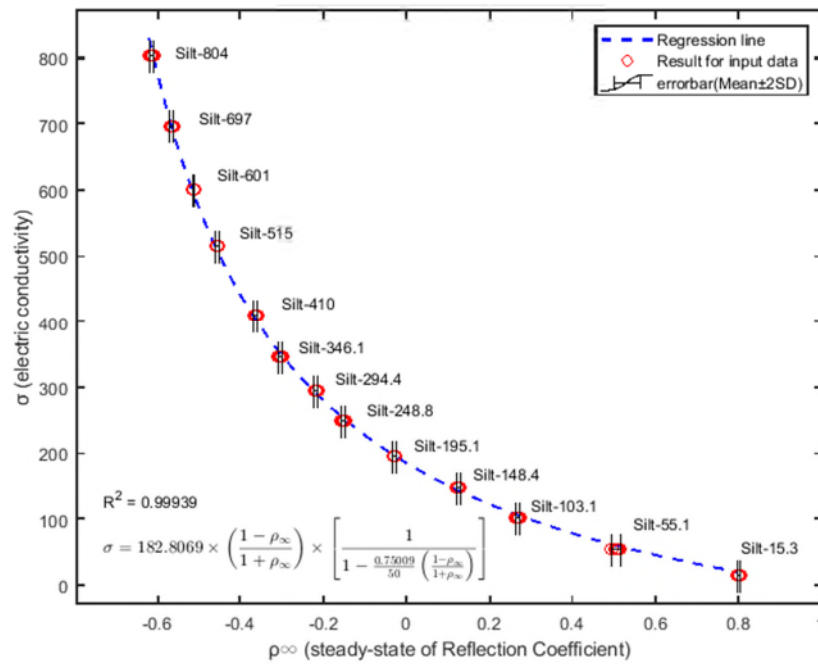


圖 2-52 (N2)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

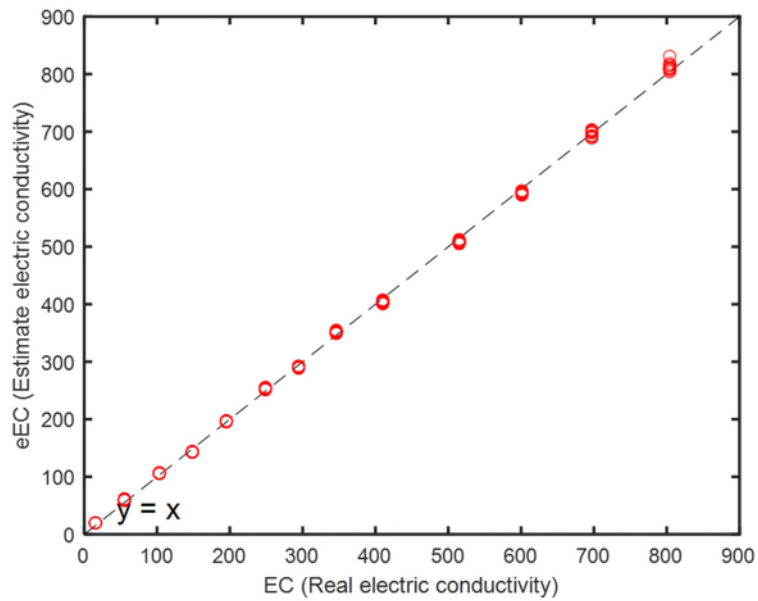


圖 2-53 (N2)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真實導電度之誤差圖

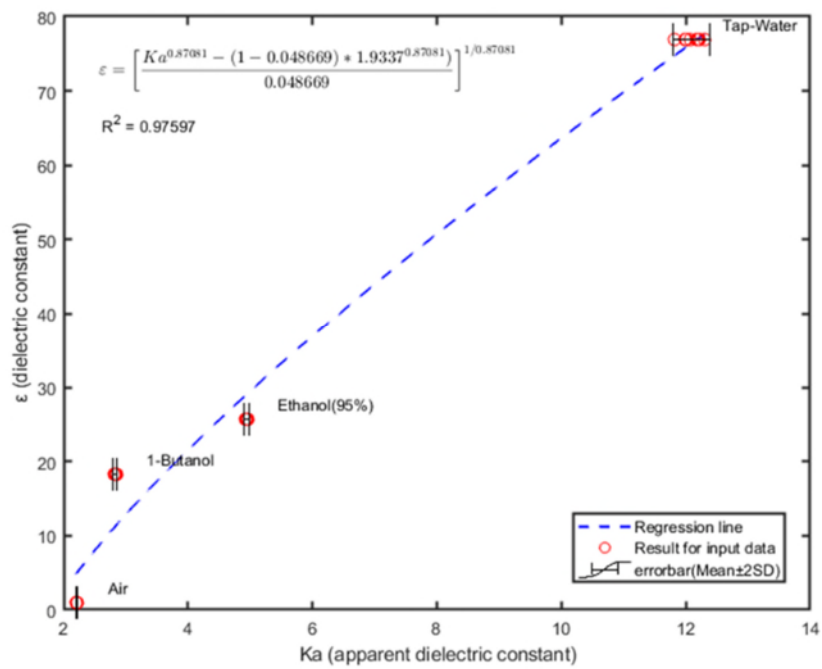
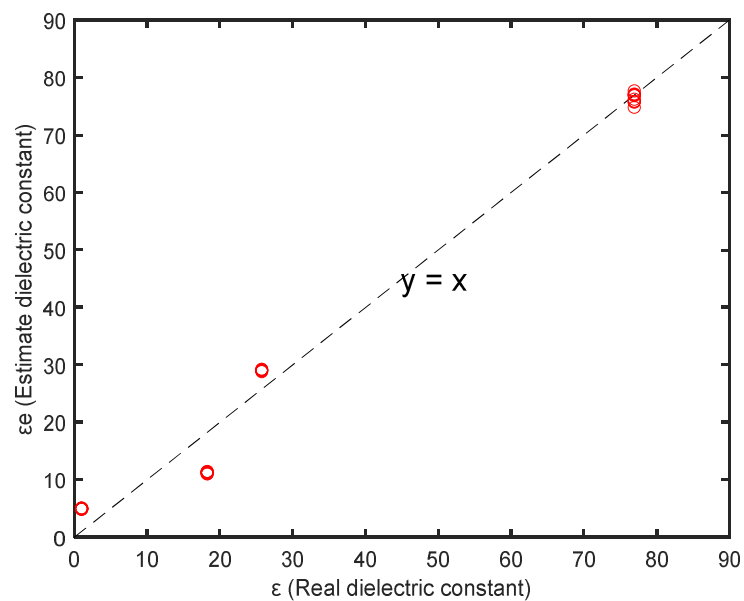


圖 2-54 (S)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(Isqcurvefit)

圖 2-55 (S)經由含水量-介電常數轉換公式推倒出來的預估介電常數
與真實介電常數之誤差圖

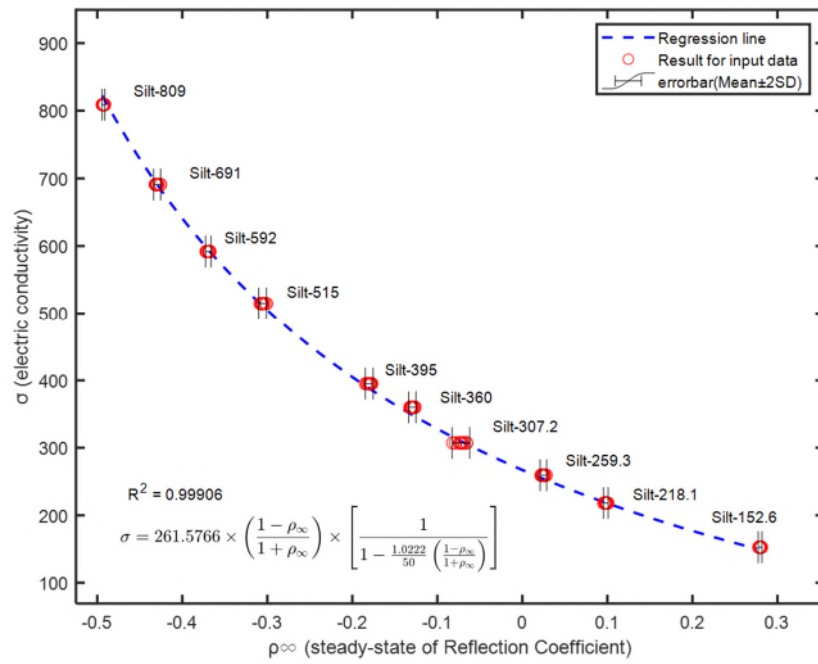


圖 2-56 (S)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

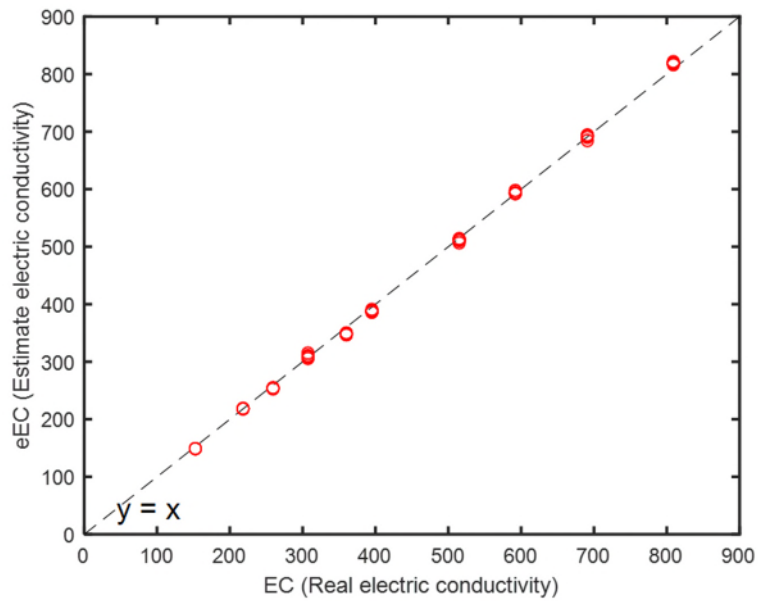


圖 2-57 (S)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度與真實導電度之誤差圖

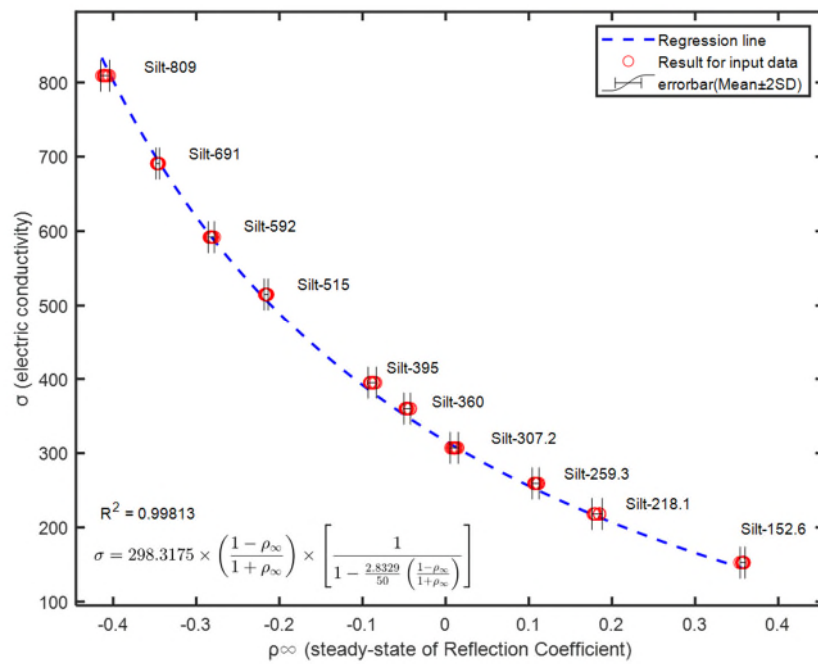
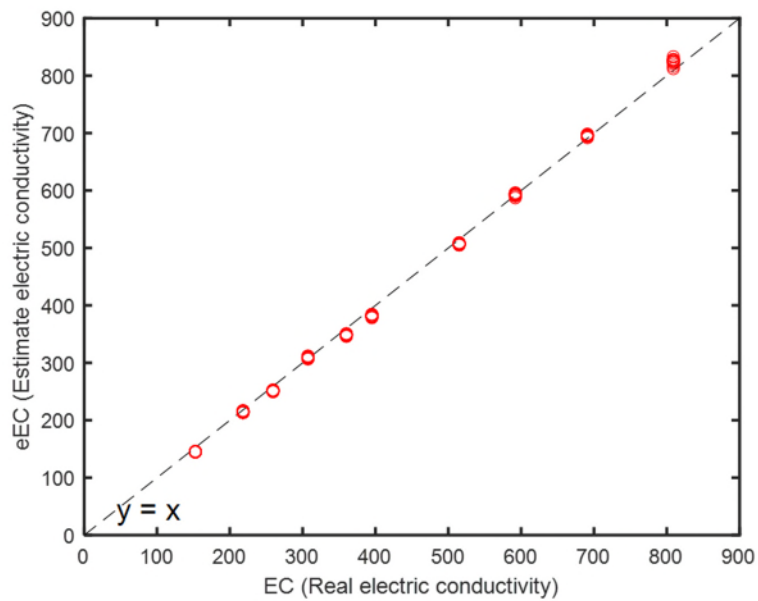


圖 2-58 (3)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

圖 2-59 (3)經由導電度-穩態值轉換公式推倒出來的預估導電度
與真實導電度之誤差圖

3. 第一組測試成果

本研究第一組砂箱實驗使用桃園楊梅紅土，其預期的相關物理參數為表 2-1 的 Dry density 之 loose 的部分，其乾密度預期為 $1.5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ，由工地密度實驗得知真實的夯實結果之密度為 $1.378 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ，實驗的實際情況如圖 2-60 所示。

本研究初步於 2021 年 9 月 7 號下午 1 點 35 分進行降雨之砂箱實驗，降雨時間一小時，平均降雨量 75.49 (mm/hr) ，在砂箱 $0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ 面積內之降雨量)，雨水為純水無導電度，即在下午 2 點 35 分停止降雨。之後乾燥約 1 天，並在隔日 9 月 8 號下午 2 點 16 分開始為期一小時降雨，平均降雨量 59.65 (mm/hr) ，在濕潤階段每五分鐘紀錄一筆含水量與導電度的資料；之後乾燥約 24 天結束實驗，並以每一小時紀錄一筆含水量與導電度的資料。

圖 2-61 為代號 3 之傳統 3 電極貫入器所量測到的體積含水量，並在紅色圓圈之時間點取出 TDR 的反射波型，嘗試用上述之方法反演算出 Cole-Cole function 的五個參數，並繪製出 Cole-Cole function 所導出的複介電常數與頻率之關係之理論值。後續將 Phase velocity analysis (PVA) 繪製出介電常數之理論值與 Cole-Cole function 之實部進行比較。

而各貫入器量到的體積含水量與導電度如下(資料有進行去極端值(正負 1 個標準差)與 1 小時平均的處理。M 小型貫入器導體接觸不良並不顯示其結果。)



圖 2-60 目前砂箱實驗的實際架設圖

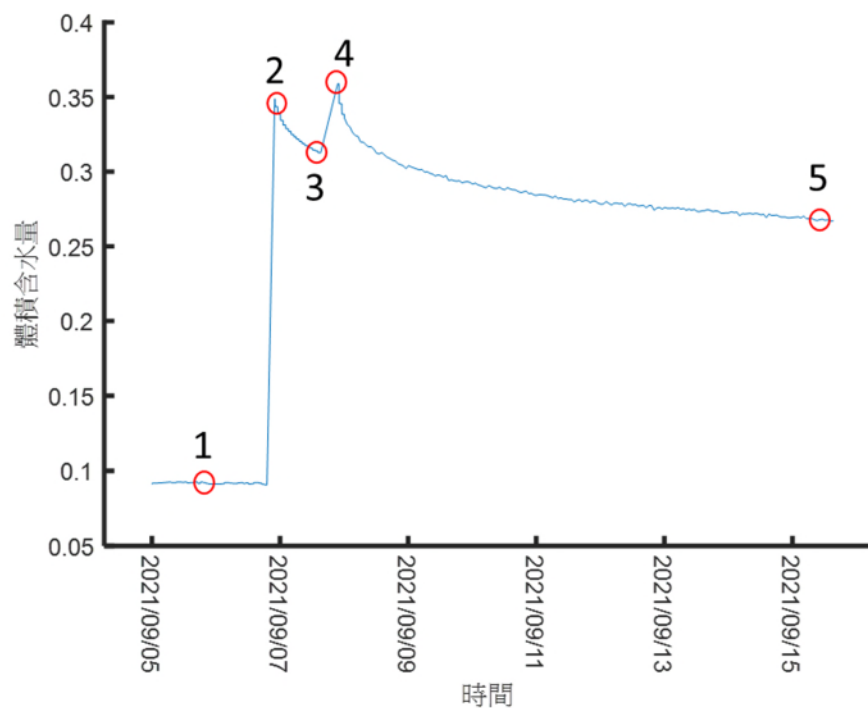


圖 2-61 3 電極貫入器在各個所量測到的體積含水量(1hr 平均)

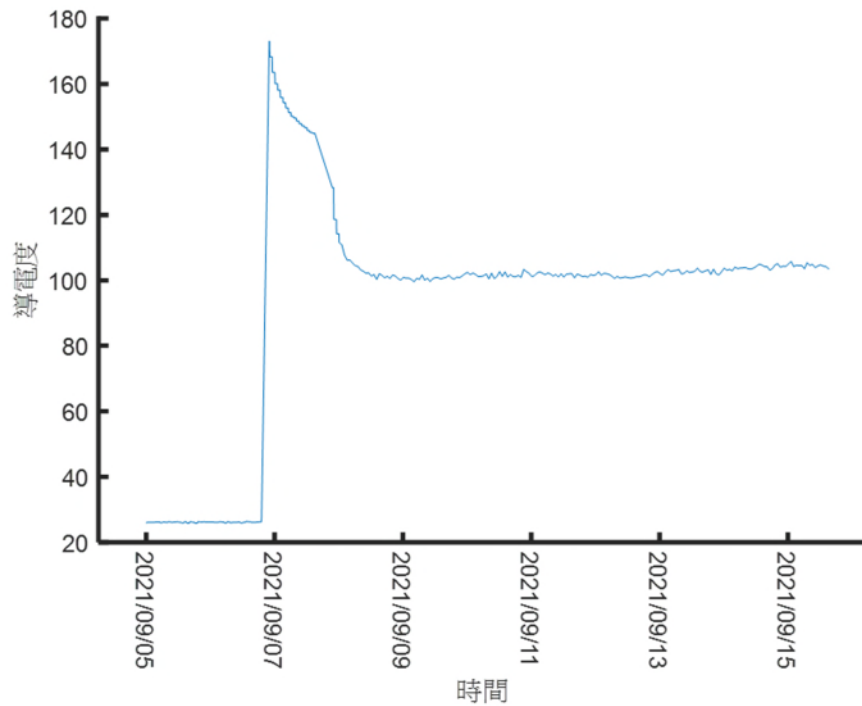


圖 2-62 3 電極貫入器在各個所量測到的導電度(1hr 平均)

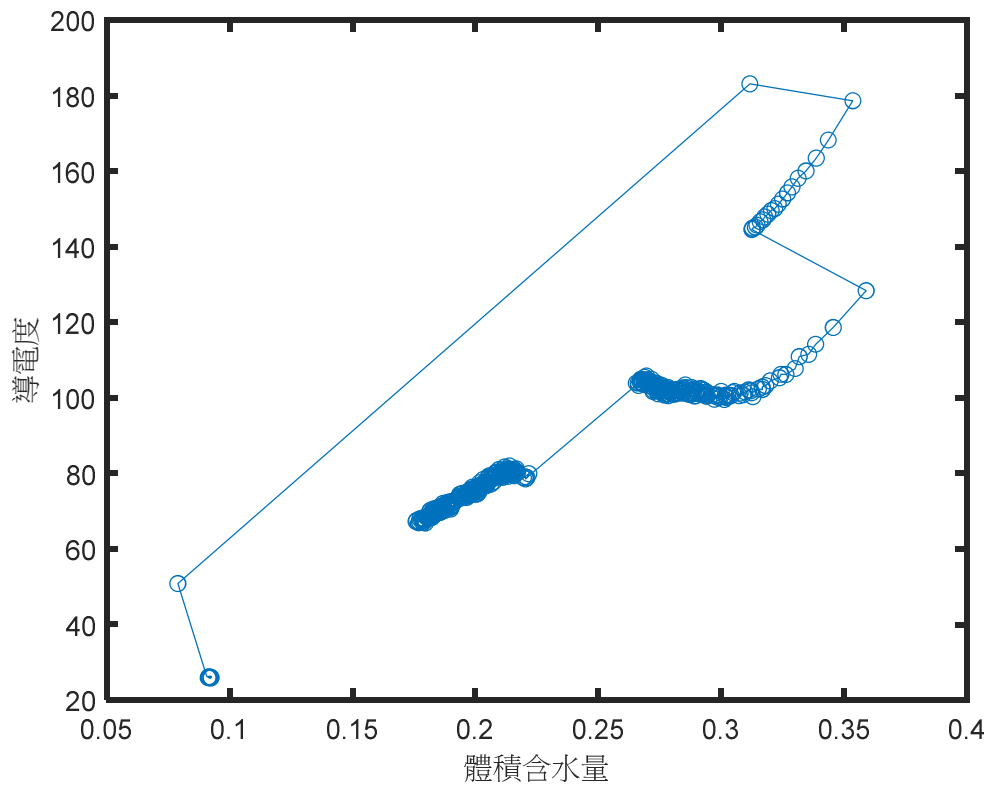


圖 2-63 (第一組) 3 電極貫入器之體積含水量與導電度之關係圖

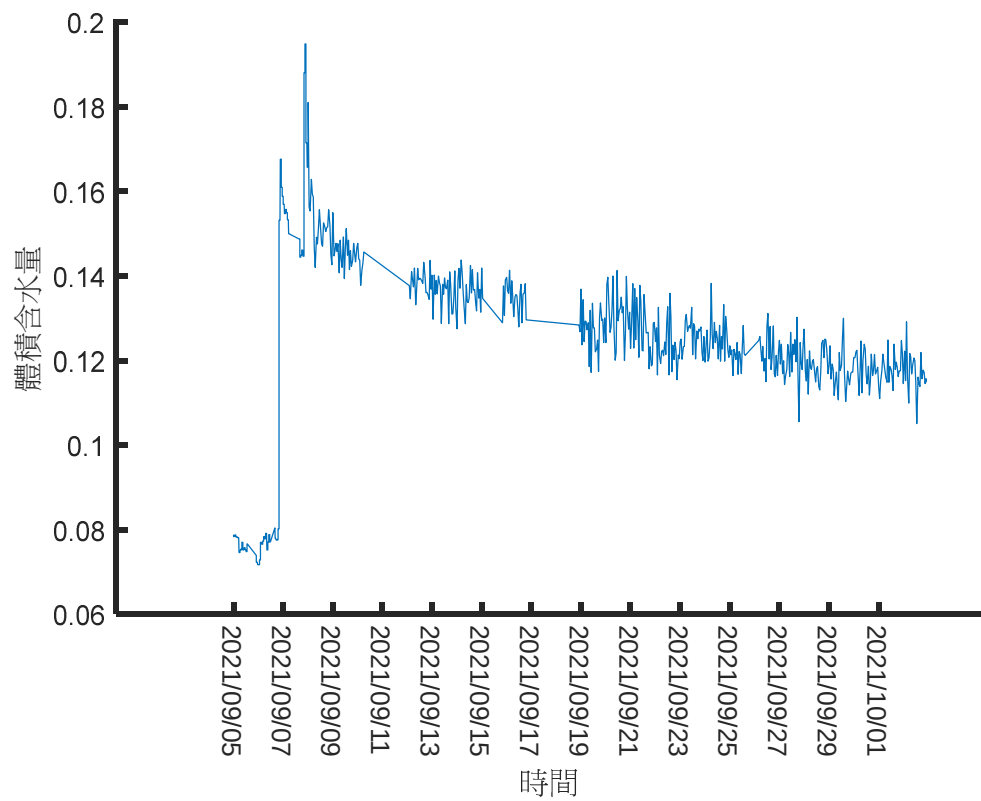


圖 2-64 N1 貫入器在各個所量測到的體積含水量(1hr 平均)

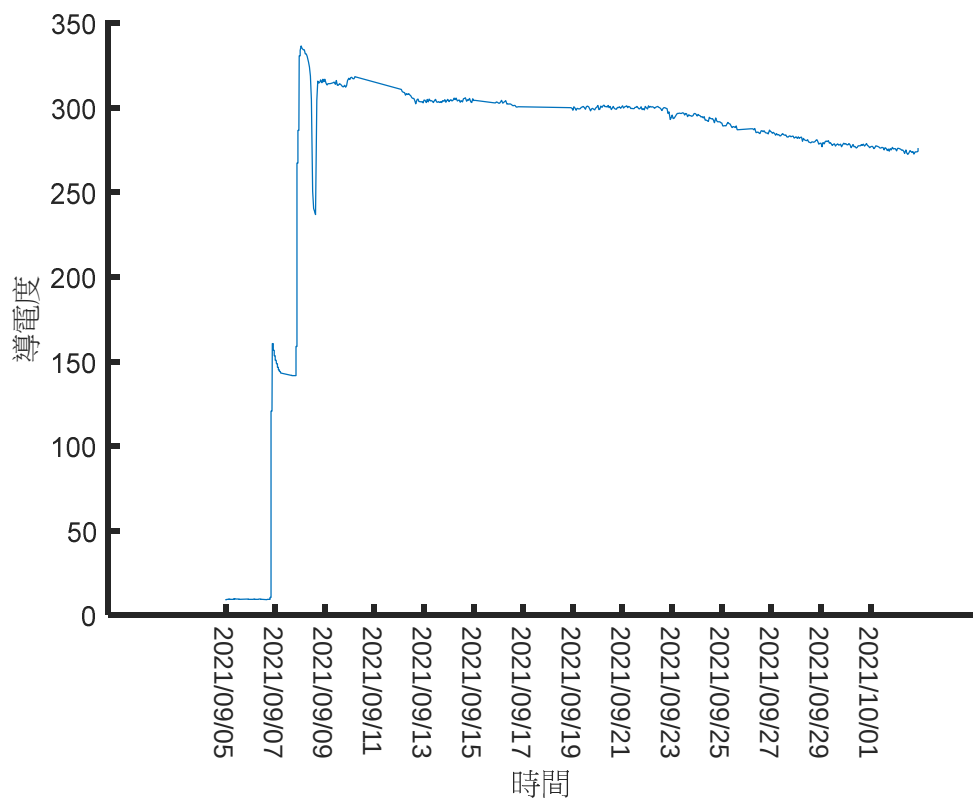


圖 2-65 N1 貫入器在各個所量測到的導電度(1hr 平均)

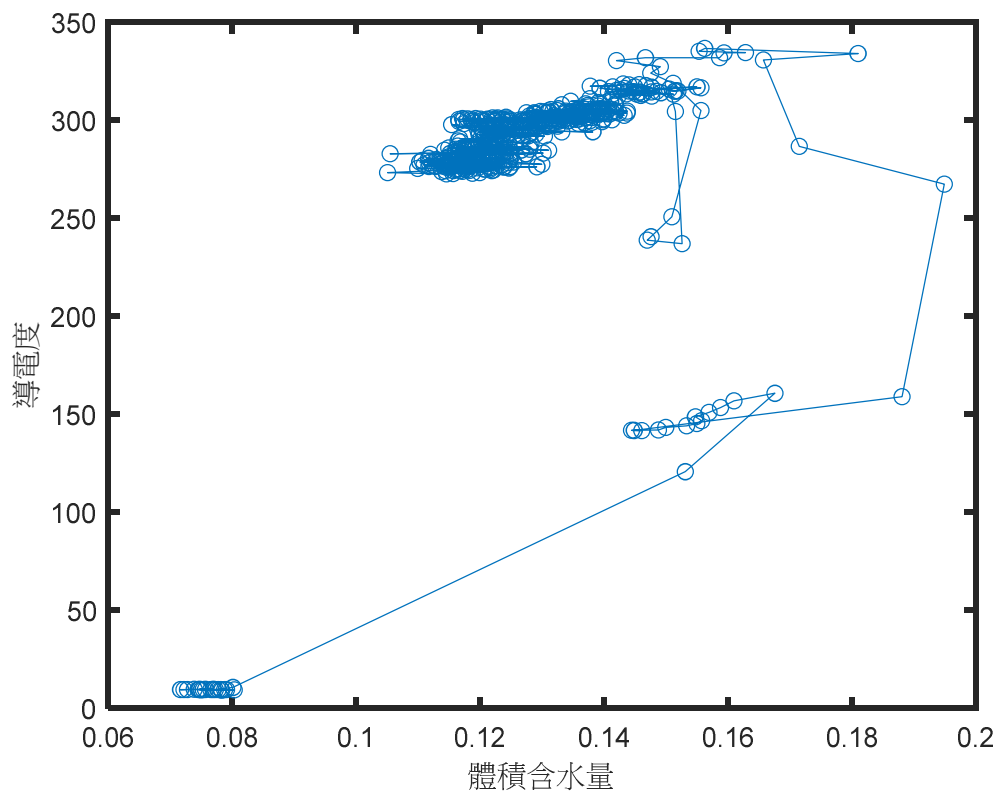


圖 2-66 N1 貫入器之體積含水量與導電度之關係圖

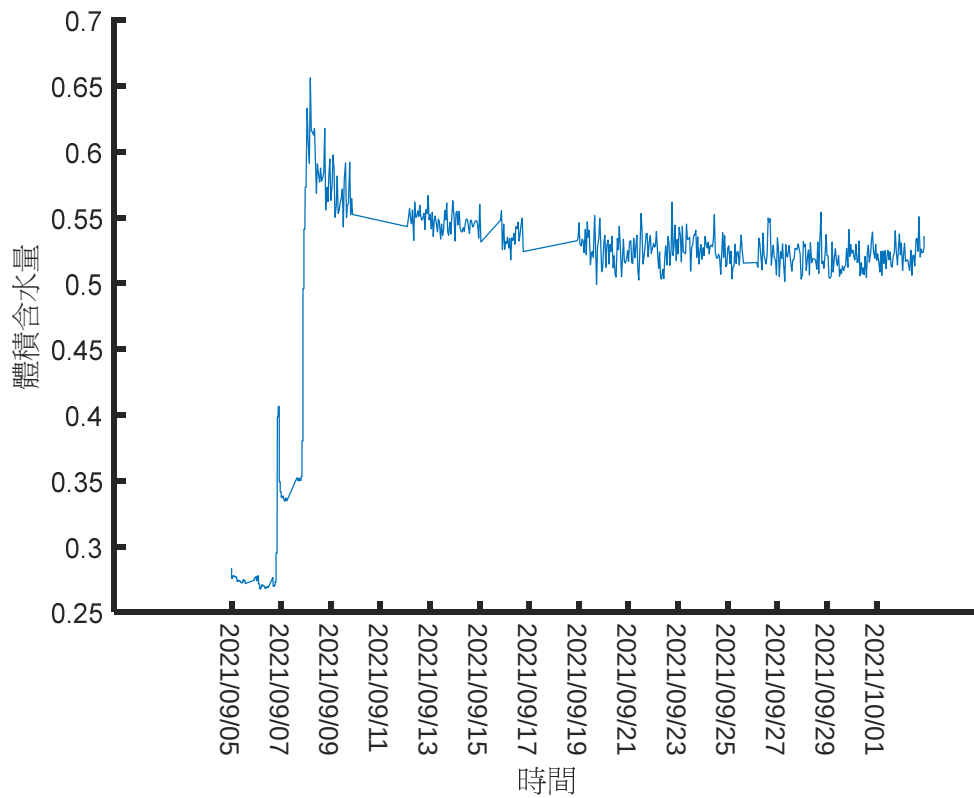


圖 2-67 N2 貫入器在各個所量測到的體積含水量(1hr 平均)

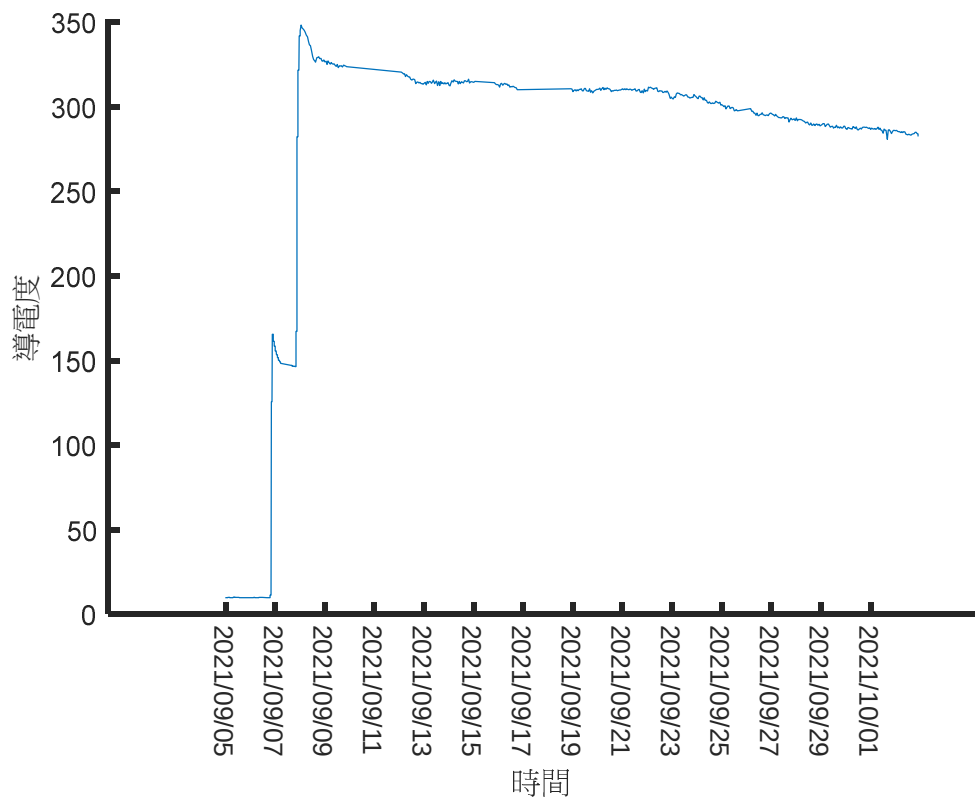


圖 2-68 N2 貫入器在各個所量測到的導電度(1hr 平均)

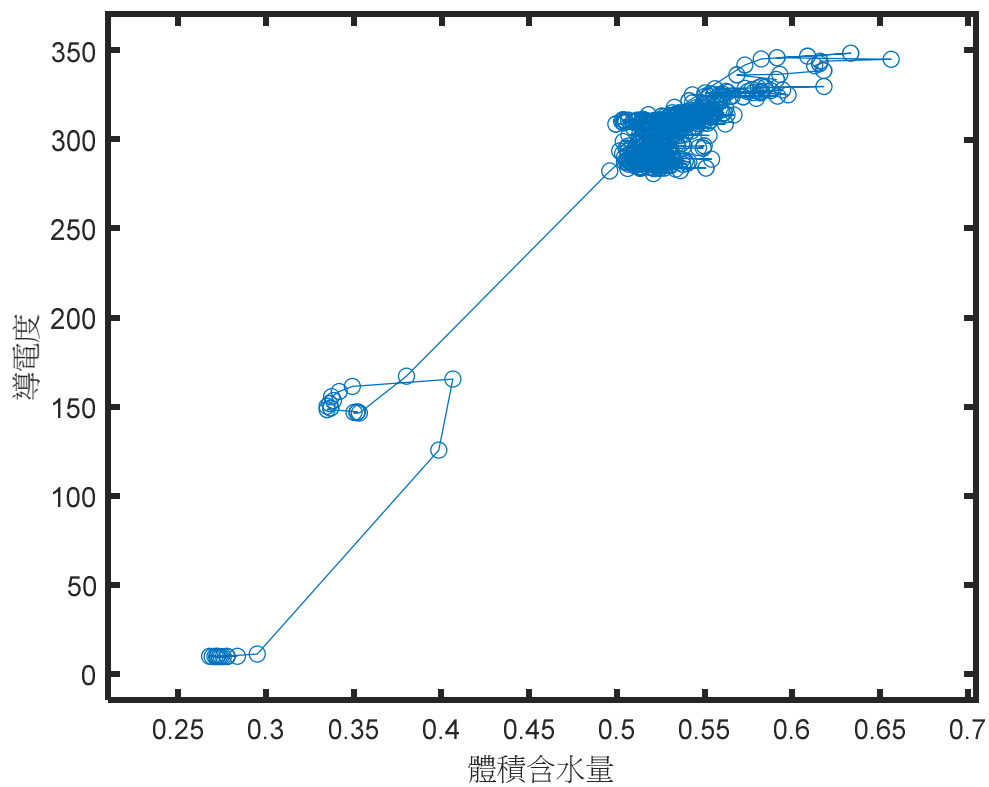


圖 2-69 N2 貫入器之體積含水量與導電度之關係圖

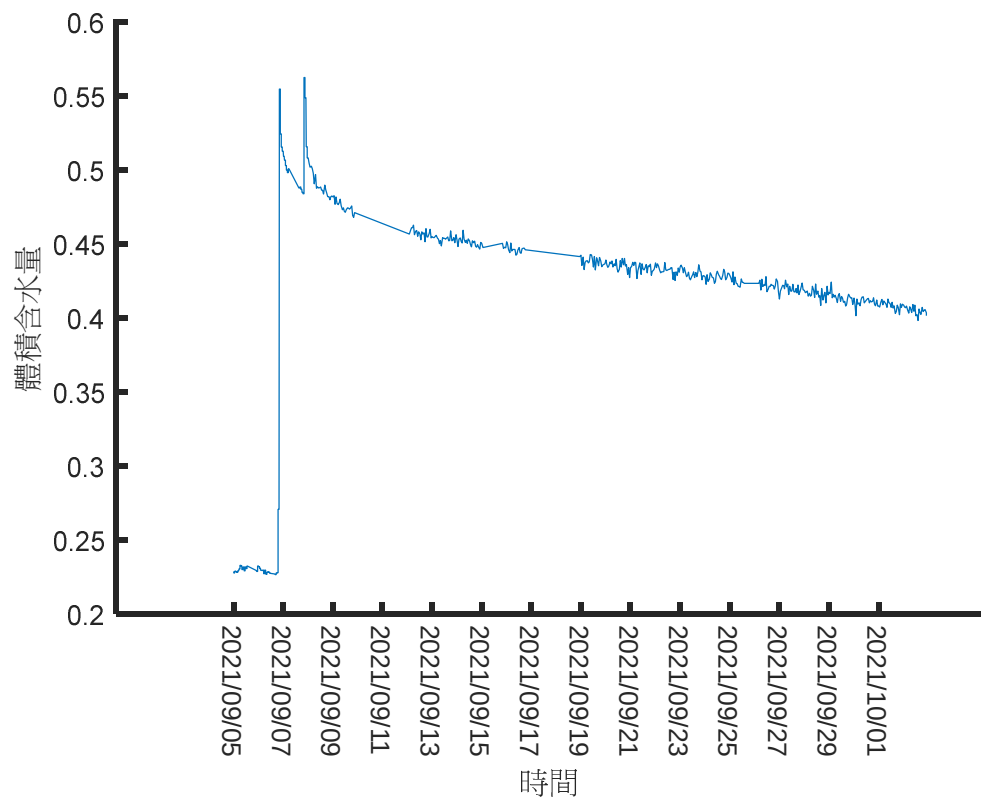


圖 2-70 S 貫入器在各個所量測到的體積含水量(1hr 平均)

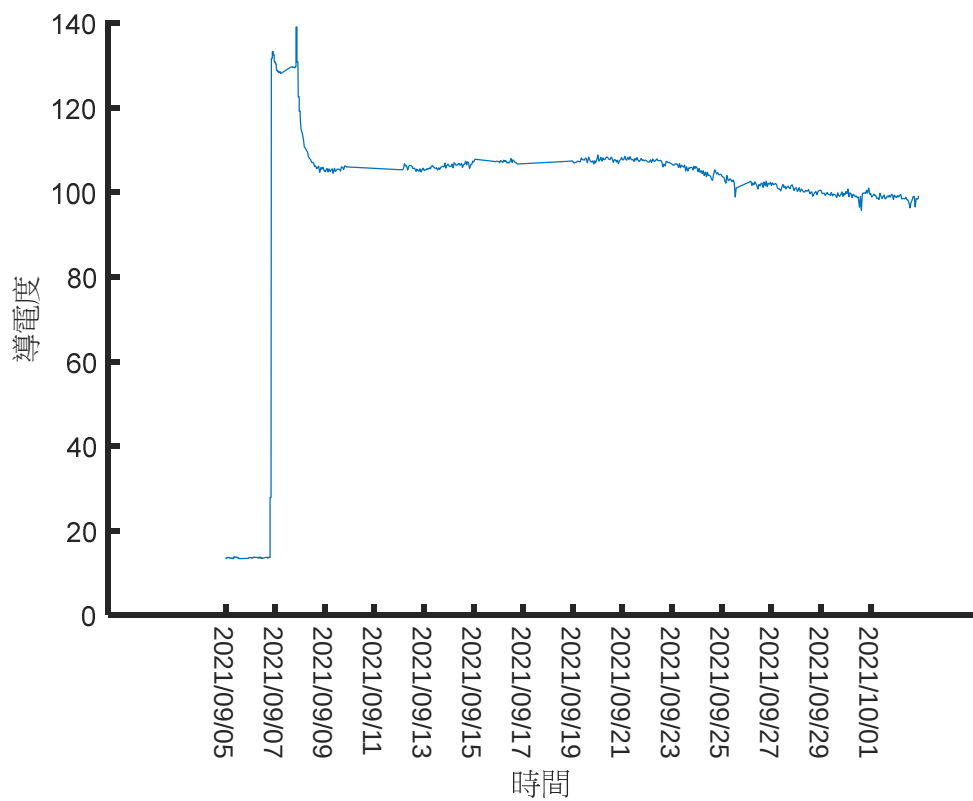


圖 2-71 S 貫入器在各個所量測到的導電度(1hr 平均)

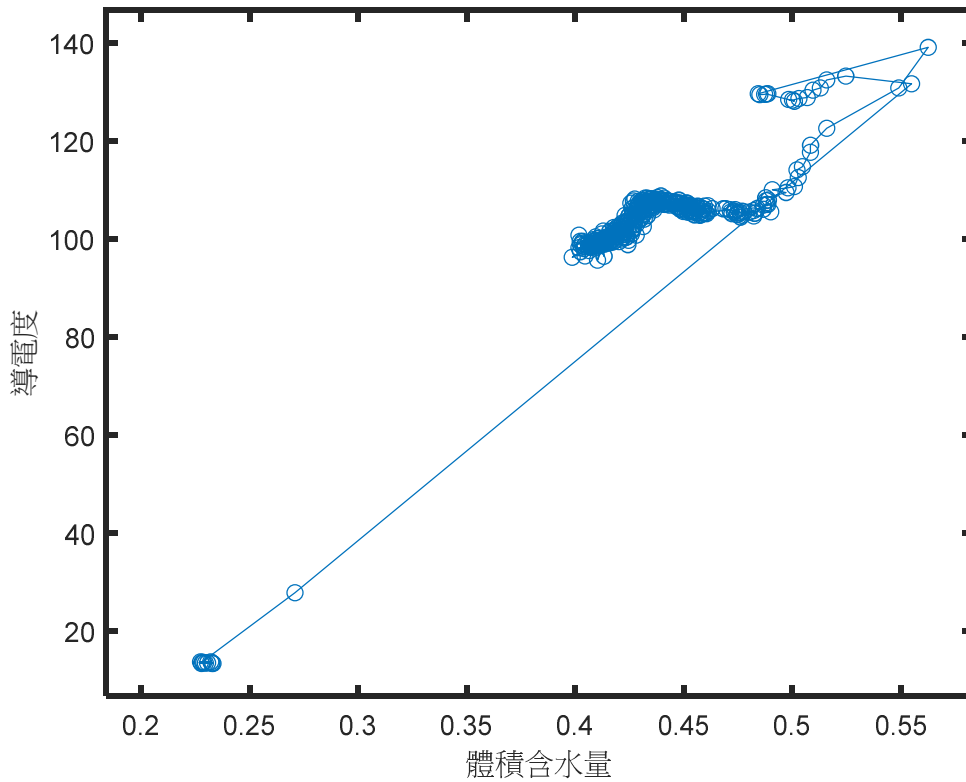


圖 2-72 S 貫入器之體積含水量與導電度之關係圖

三、TDR 介電頻譜分析精進

基於上述文獻回顧內容，目前介電頻譜分析可分為三種方法：

(一)TDR 全波形反算分析

TDR 全波形反算分析(Full waveform inversion analysis)為傳統進行精準電學行為量測使用。TDR 量測系統之傳輸線至少包括延長線段及感應段，不同段之傳遞常數 γ 與特徵阻抗 Z_c 基本表示如下，

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} = \alpha + j\beta \quad (22)$$

$$Z_c = \frac{\ln(b/a)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \quad (23)$$

加上考慮傳輸線的 skin effect，傳遞常數 γ 與特徵阻抗 Z_c 需乘上一個因子進行修正，修正式如下，

$$\gamma' = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} \times A \quad (24)$$

$$Z_c' = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \times A \quad (25)$$

$$A = \sqrt{1 + (1-j) \left(\frac{\eta_0}{Z_p} \right) \frac{\alpha_R}{\sqrt{f}}} \quad (26)$$

其中， A (無因次)為電阻修正因子(resistance correction factor)，及每單位長度的修正值，而 $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 120\pi (\Omega)$ 為自由空間的內在阻抗(intrinsic impedance of free space)， $\alpha_R (\text{sec}^{-0.5})$ 為電阻耗損因子(resistance loss factor)，為考慮 skin effect 所衍生的傳輸線之橫截面積與表面電阻率的函數。如不考慮因傳輸線電阻，即 $\alpha_R = 0$ ， $A = 1$ ，則如式 15 與 16 的表示式。

因此整體 TDR 可以基於不同段落之等效電路(Equivalent circuit)模式而多段模式模擬，如圖 2-73 所示。波傳的模擬首先將不同段落的整體效應以 TDR 起始端的輸入阻抗 (Input impedance Z_{in}) 表示，起始端的輸入阻抗可由末端阻抗 (Z_L) 及各段落之特徵阻抗以下式之遞回方式求得：

$$\begin{aligned} Z_{in}(z_n) &= Z_L \\ Z_{in}(z_{n-1}) &= Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} \tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L \tanh(\gamma_n l_n)} \\ Z_{in}(z_{n-2}) &= Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(z_{n-1}) \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\ &\vdots \\ Z_{in}(0) &= Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} \tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1) \tanh(\gamma_1 l_1)} \end{aligned} \quad (27)$$

其中下標 i 代表各段落。一般之 TDR 量測系統邊界條件為(Z_L

$=\infty$). TDR 波形在頻率域之反應可由輸入阻抗與起始端之邊界條件推導得到：

$$V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s = H V_s \quad (28)$$

其中 $V(0)$ 是 TDR 輸入波形的富立葉轉換， V_s 是 TDR 輸入方波的富立葉轉換， Z_s 是源頭阻抗 (Source impedance)，通常 TDR 儀器之 $Z_s = 50 \Omega$ ， $H = Z_{in}(0) / (Z_{in}(0) + Z_s)$ 為系統函數。TDR 波形(v_t)之模擬可由 $V(0)$ 之富立葉反轉換得到，利用此模型可反算傳輸線參數、材料性質以及纜線的電阻衰減程度。

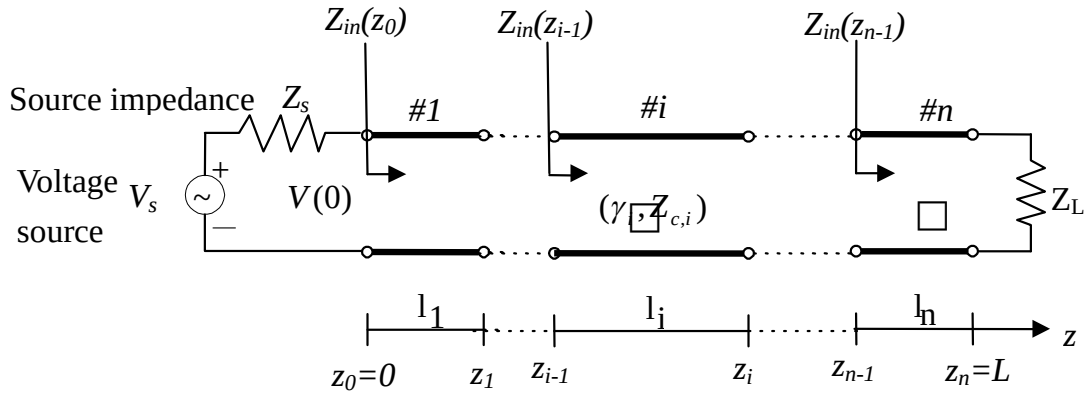


圖 2-73 TDR 之等效電路(Equivalent circuit)模式(修改自 Lin, 2003a)

本計畫初步配合數值分析計算，嘗試先行了解 S_{11} 靈敏度 $S_{\dot{m}}$ 行為，將其推導公式如下：

$$S_{\dot{m}} = \left[\frac{\partial [abs(S_{11})] / abs(S_{11})}{\partial m / m} \right]_{\dot{m}} = \frac{\partial [abs(S_{11})]}{m} \frac{m}{abs(S_{11})} \quad (29)$$

其中 m 為不同影響因子，包含感測器長度 L 與 Z_p 等。因此本研究配合傳統水之介電頻譜，以及透過公式 9 土壤組合率設定一般 silt loam 進行上述靈敏度因子影響 S_m 分析。圖 2-74 為靈敏度 S_m 受感測器長度 L 影響，透過數值分析成果顯示，不同量測物質於高頻之靈敏度有顯著差異，可能受到本身材料介電頻譜頻散影響；另外若感測器採用短路(shorted-end)，則低頻靈敏度較差。圖 2-75 為靈敏度受感測器阻抗 Z_p 影響，此部分則只有短路感測器之低頻靈敏度較差。

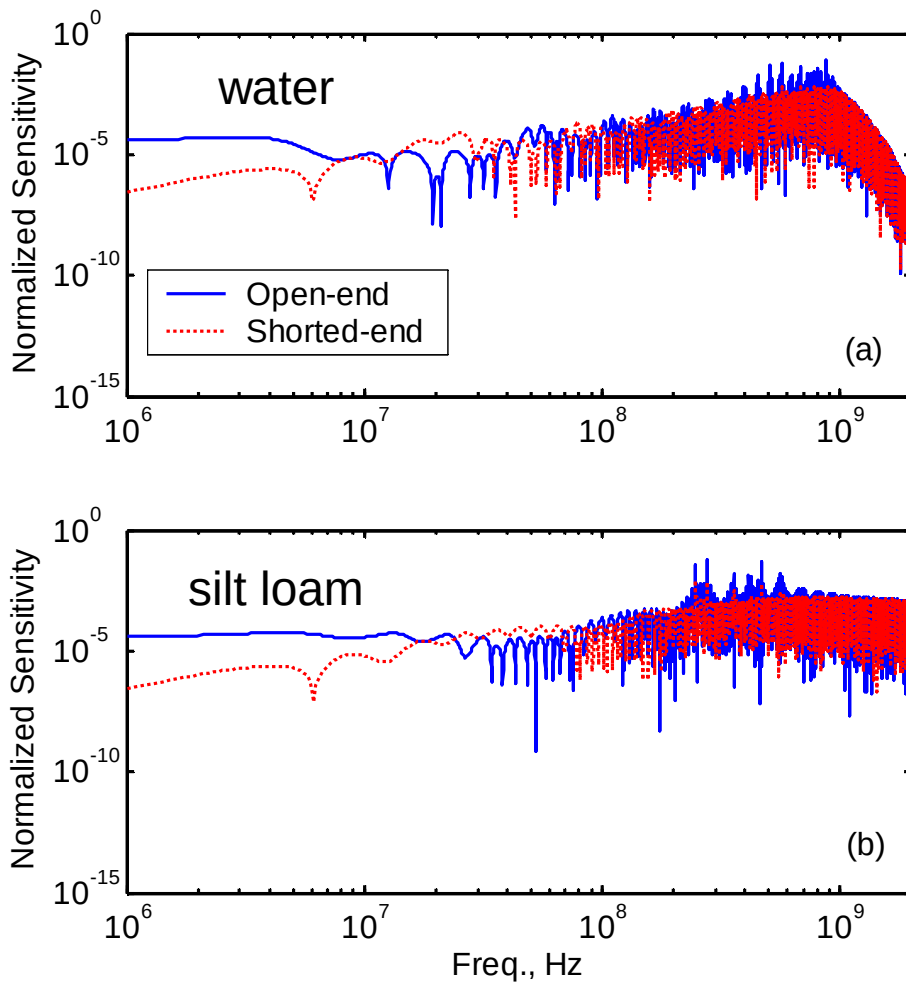


圖 2-74 靈敏度 S_m 受感測器長度 L 影響

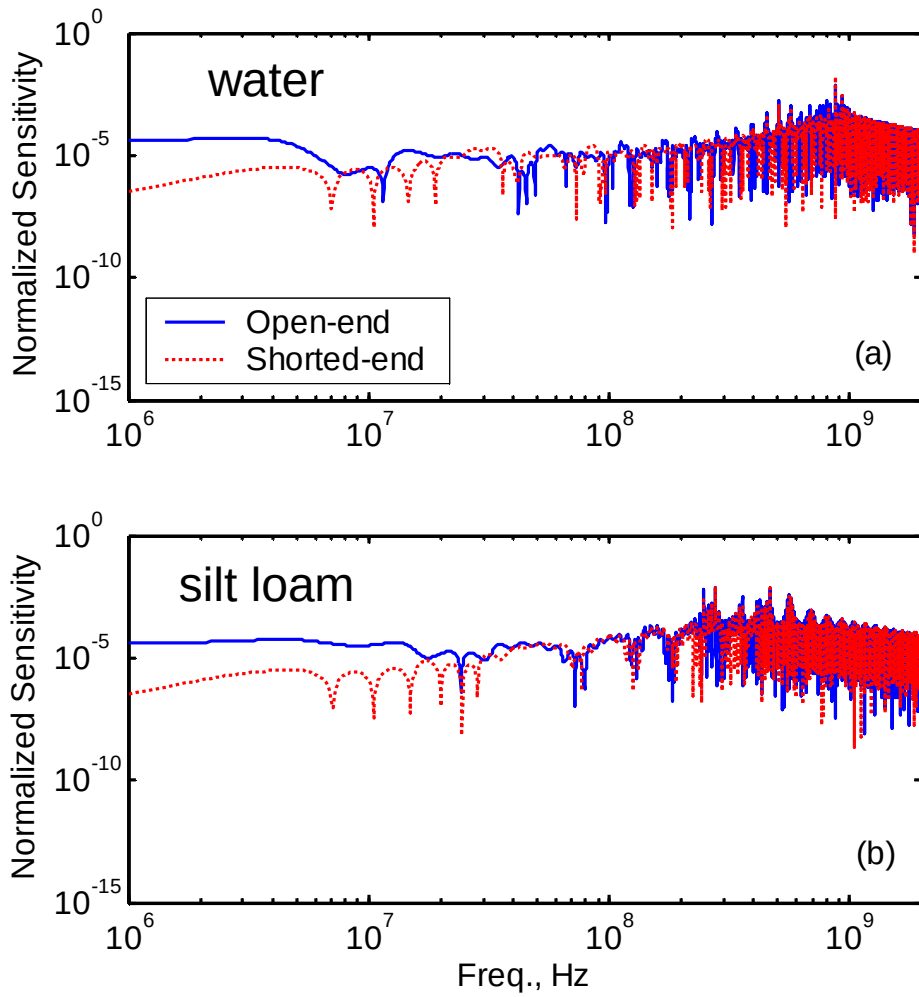


圖 2-75 靈敏度 S_m 受感測器阻抗 Z_p 影響

(二) Short-open-load (SOL) 方法

由於現有全波形反算程序需要對於各線路段落進行精確之參數率定，實務上較為繁瑣也可能導致量測誤差較高，因此本研究另外參考 [Lin et al. \(2015\)](#) 成果，建議可採用 TDR 傳輸線矩陣運算方法，如 ABCD 矩陣法(ABCD matrix)，其改良式寬頻介電頻譜分析方法說明如下：

ABCD 矩陣法對多段式傳輸線理論模型定義第 i 個段落之 ABCD 矩陣 Φ_i 為

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i L_i) & -Z_c \sinh(\gamma_i L_i) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma_i L_i) & \cosh(\gamma_i L_i) \end{bmatrix} \quad (30)$$

則整體多段式傳輸線理論模型之 ABCD 矩陣 Φ 為

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \Phi_n \Phi_{n-1} \cdots \Phi_1 \quad (31)$$

一旦獲得 Φ 矩陣後，TDR 波形在頻率域反應便可由下式獲得

$$V(0) = \frac{Z_L D - B}{(Z_L D - B) - Z_s (Z_L C - A)} V_s \quad (32)$$

透過 ABCD 矩陣法將其簡化為兩個段落的傳輸線理論模型，將感測段自其它傳輸纜線中分離，並將其視為新的阻抗輸入 $Z_L = Z_{in}(z_{n-1})$ ，則(7)式可改寫為

$$V(0) = \frac{Z_{in}(z_{n-1})D - B}{(Z_{in}(z_{n-1})D - B) - Z_s (Z_{in}(z_{n-1})C - A)} V_s \quad (33)$$

採用此一改良自 ABCD 矩陣法之分析方法目的主要是希冀透過事前之標定，可將非感測段之其它段落之 ABCD 矩陣求出，而後將現場資料透過反算技巧獲得 $Z_{in}(z_{n-1})$ ，而進一步獲得感測段之介電頻譜資料，然而需注意，若單只僅具有量測所得之 TDR 反射波形是無法解算獲得上式中的 A、B、C、D 四個未知參數，如此欲採用上式達到量測感測段介電頻譜之目的便無法達成，幸而，若進一步整理上式可得

$$V(0) = \frac{Z_{in}(z_{n-1}) - \frac{B}{D}}{(Z_{in}(z_{n-1}) - \frac{B}{D}) - Z_s (Z_{in}(z_{n-1}) \frac{C}{D} - \frac{A}{D})} V_s \quad (34)$$

可發現計算 TDR 頻率域反應之獨立參數僅需 B/D 、 C/D

以及 A/D 三個，如此，在標定上便可用 SOL (short-open-load) 標定法，即在感測段初始處進行短路量測、移除感測段量測，以及採用已知材料量測，便可將非感測段之量測系統參數標定完成，進而可用於現場進行介電頻譜量測。

(三)Phase velocity analysis (PVA)

Chung (2008) 首先提出以類似表面波譜分析法(Spectral Analysis of Surface Wave, SASW)分析方法，將典型 TDR 波形進行微分後取進入感測器之第一個與末段反射之第二個特徵回波，如圖 2-76 所示，接著將此兩組特徵波形求取相對之頻率域之相位差異 $\Delta\phi(f)$ ，藉以求取相位速度 V_{ph} 如下所列：

$$\Delta\phi(f) = \phi_2(f) - \phi_1(f) = \text{Angle}[CSD(u_1(t), u_2(t))] \quad (35)$$

$$V_{ph} = \frac{2\pi f(2L)}{\Delta\phi(f)} \quad (36)$$

其中 $CSD(u_1, u_2)$ 為上述兩組特徵訊號之平均之 cross-spectral density， L 為實際感測器長度。Chung (2008) 透過模擬方式驗證其可行性，主要可求取中高頻段之頻譜(100MHz–1 GHz)資訊，且此一方法已用於實務水中泥砂濃度量測使用(Lin et al. 2015)。Lin et al. (2017)則更進一步探討上述特徵回波受時間視窗截錄(Truncation)所產生之資料誤差影響。而感測標的土壤之 EC 與感測器長度決定了有效頻段之最低邊界，而感測標的之介電頻散則控制之有效頻段之上邊界。總言之此一方法相較前述兩種介電頻譜分析方法簡易，但僅可提供中高頻段之頻譜資訊。因此本研究將評析三組介電分析方法，了解

個別方法差異後截長補短，可有效補充介電頻譜之完整性與可靠度。

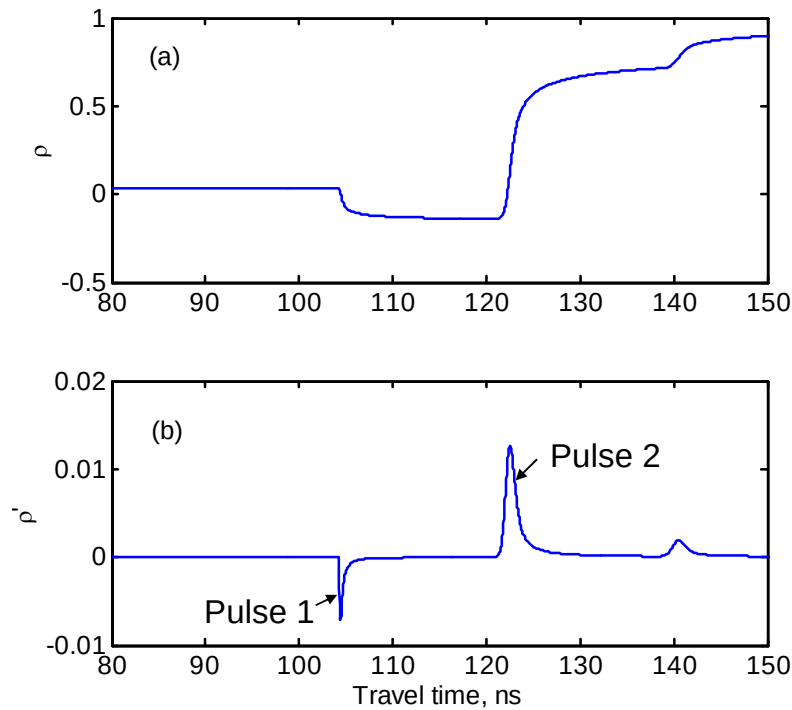


圖 2-76 (a) 典型 TDR 波型，以及 (b)微分波形之特徵回波

本研究為探討基本 PVA 之可行性與相關影響因子，透過上述 TDR 全波形模擬，嘗試分析 PVA 成果。其中圖 2-77 主要設定當材料為水，當受到不同導電度時，其 PVA 相位與速度分別受導電度影響誤差。可顯著發現，PVA 大致可適用之範圍 70~80 MHz 到 1 GHz；圖 2-78 顯示 PVA 介電度計算結果於不同土壤與含水量之差異，基於公式 9 土壤組合率設定 A_s 代表不同表面積之土壤，可大致歸類砂至黏土土壤，而在相同含水量之下，介電度大約於 1 GHz 下有共同值，但越低頻則差異越顯著。

圖 2-79 顯示 PVA 介電度(1 GHz)以及傳統 TDR 利用走時切

線(單切與雙切)分析於不同含水量之差異，可顯示 1 GHz 之 PVA 介電度分析成果較接近理論值，驗證其 PVA 分析可行性，以及後續於低頻分析之能力。

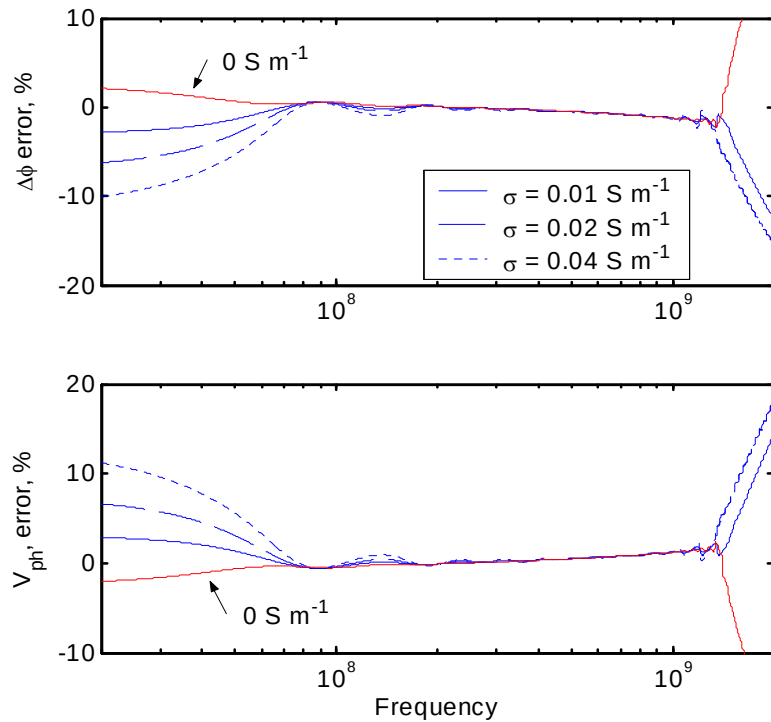


圖 2-77 (a)PVA 相位受導電度影響誤差以及(b) PVA 速度誤差

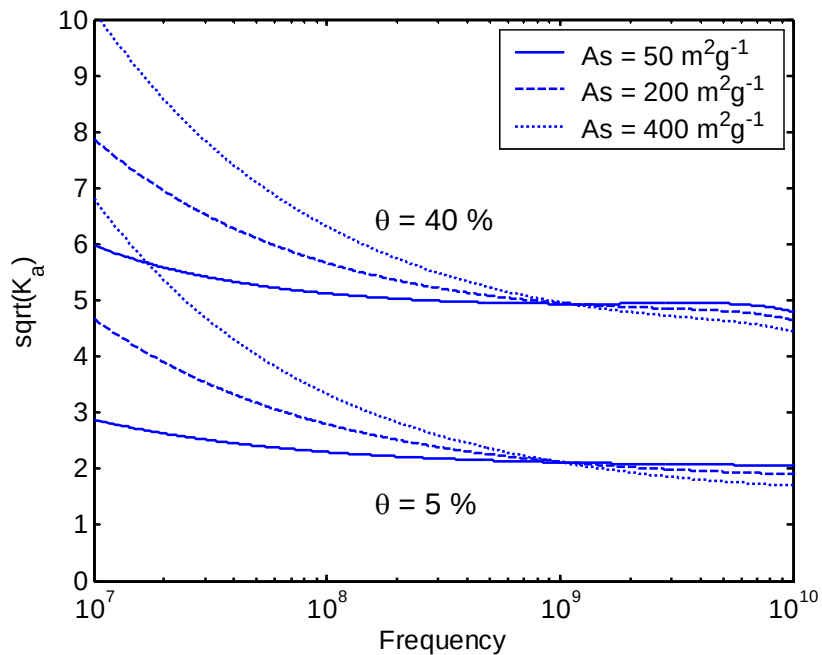


圖 2-78 PVA 介電度於不同土壤與含水量之差異

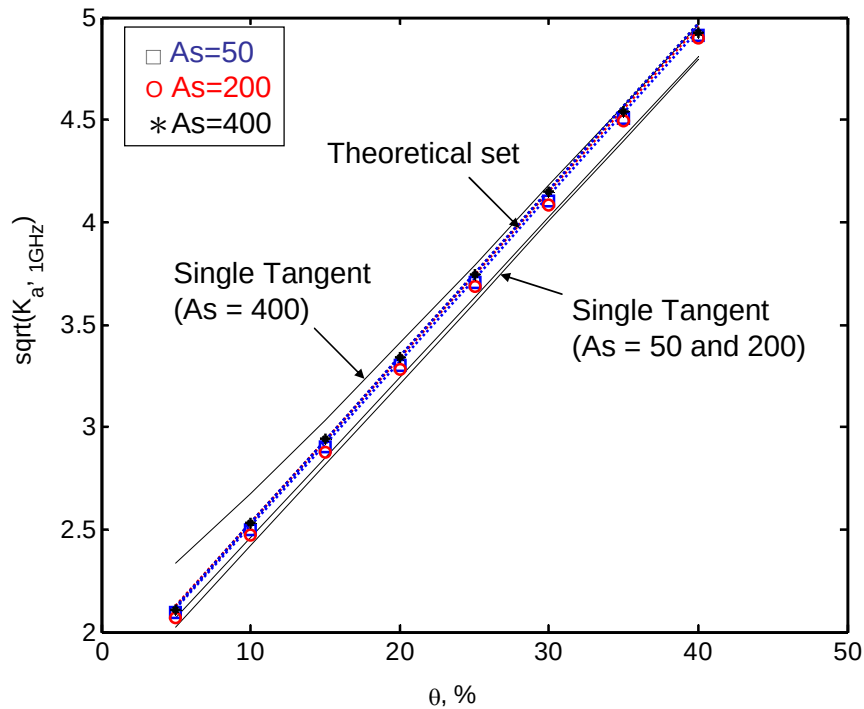


圖 2-79 PVA 介電度(1 GHz)以及傳統 TDR 分析於不同含水量差異

基於上述成果，本研究進一步探討 PVA 介電度(1 GHz) 及傳統 TDR 分析於 EC 影響，如圖 2-80 所示，同樣於 1 GHz PVA 不受 EC 影響，但傳統 TDR 單切分析影響顯著。圖 2-81 顯示 PVA 介電度(1 GHz) 及傳統 TDR 分析於不同纜線長度(電阻)影響，其中 1 GHz PVA 不受不同纜線長度影響，但傳統 TDR 單切分析影響顯著。以上又進一步充分顯示 PVA 分析可行性，因此本研究將持續配合 PVA，並後續進行低頻分析。

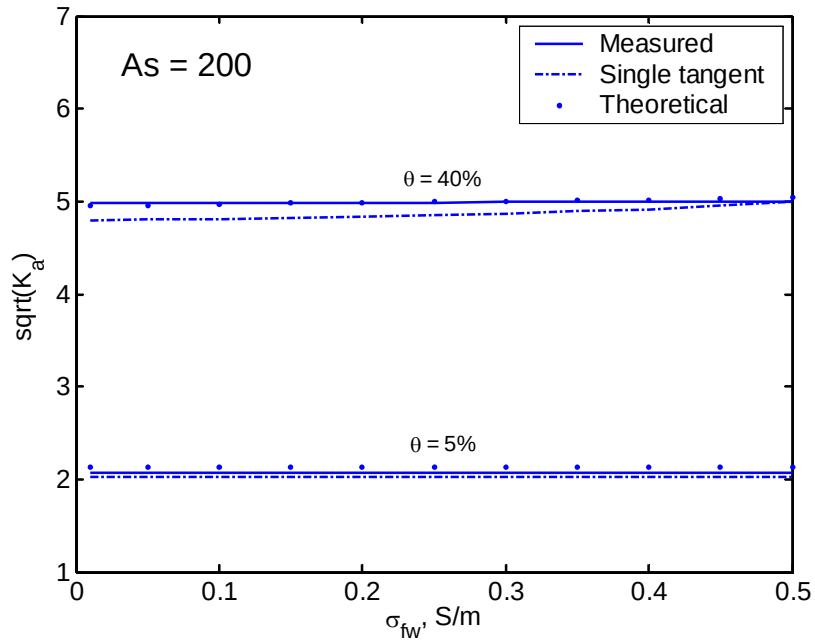


圖 2-80 PVA 介電度(1 GHz) 及傳統 TDR 分析於 EC 影響

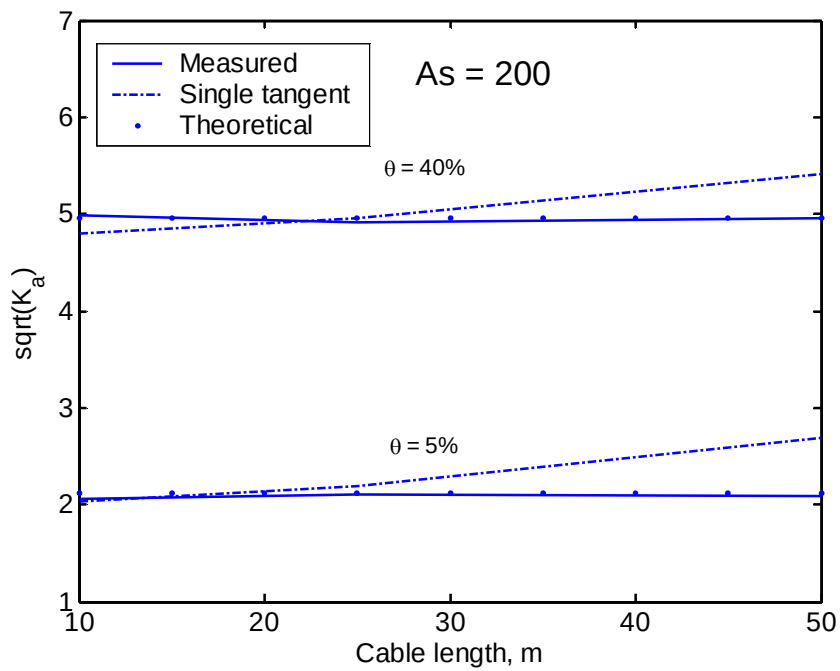


圖 2-81 PVA 介電度(1 GHz) 及傳統 TDR 分析於纜線長度影響

(四)VNA 於介電頻譜量測

介電頻譜則是可使用向量網路分析儀(vector network analyzer, VNA)進行不同頻率之掃描分析，但相較於上述三種方法，由於 VNA 設備較為昂貴且率定程序過於複雜，因此不適合於實務現地監測應用，但可作為一基礎介電頻譜量測參考。

Logsdon (2005) 以 VNA 進行 300 kHz to 3 GHz 之土壤介電頻譜量測，但實際最高有效範圍至 100 MHz，並發現 relaxation frequency 隨土壤含水與導電度上升而增加。Skierucha and Wilczek (2010) 提出 FDR (frequency domain reflectometry) 之量測方法與感測元件，以 VNA 進行 10~500 MHz 的頻段資料分析以供 TDR 比對。Lewandowski et al. (2019) 提出以簡易型 VNA 進行 0.05–3 GHz 土壤介電頻譜分析，其試驗設備如圖 2-82 所示，透過對不同含水量、鹽度以及土壤 texture 之試驗結果顯示其設備量測可行性。Xu et al. (2019) 也應用 miniVNA 證實可有效取得 1MHz–3 GHz 土壤介電頻譜。

然而上述之傳統 VNA 測試實際上得仰賴 Two-port 進行測定，因此 Lewandowski et al. (2019) 提出以 one-port 率定方法，並配合 electronic calibration unit (ECU) 進行終端邊界條件之切換(short, open, matched termination, and offset short)，如圖 2-83 進行系統率定與量測建議。

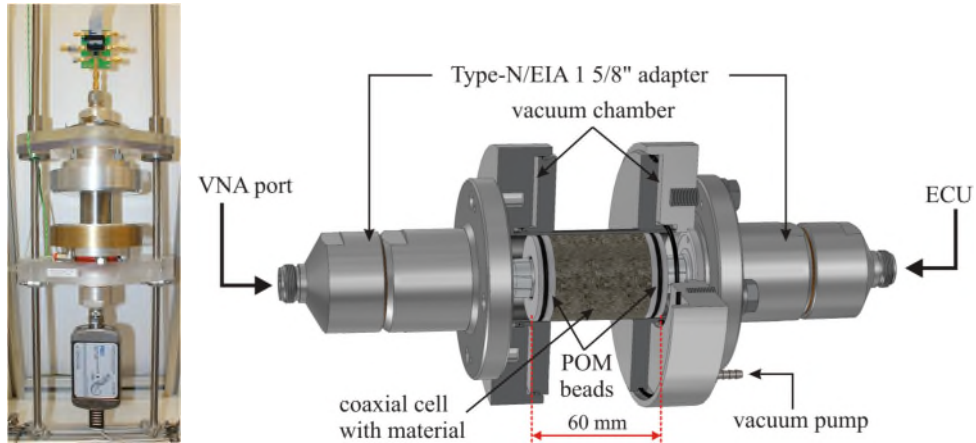
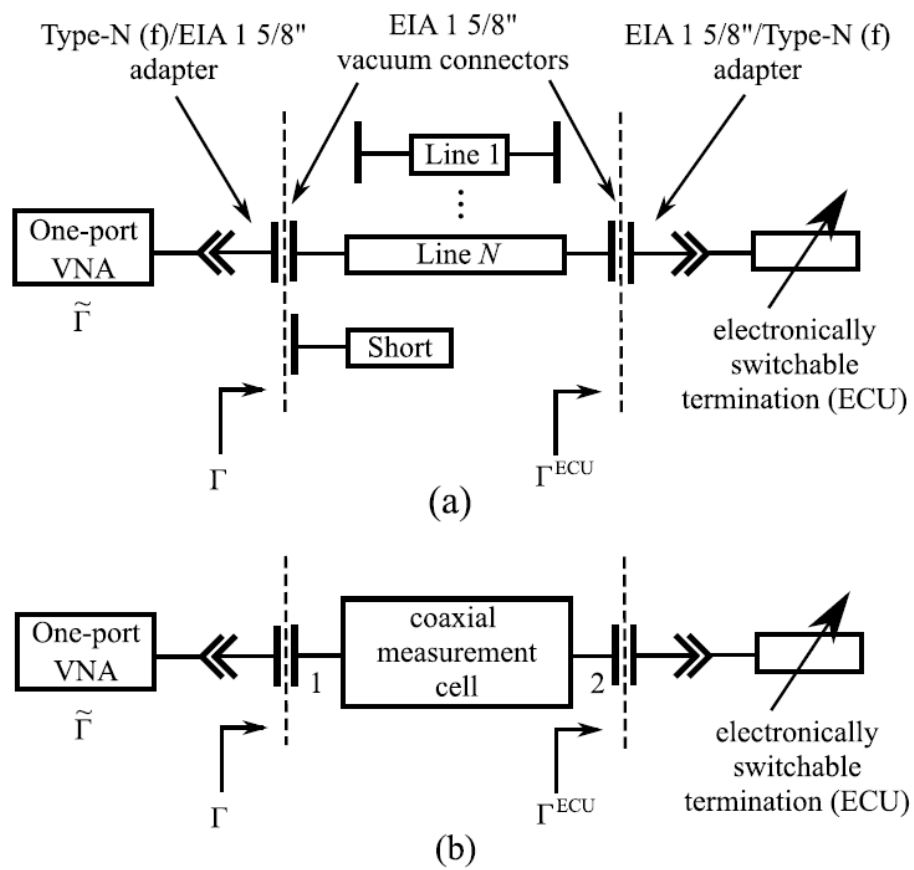


圖 2-82 以 VNA 進行土壤介電頻譜分析 (Lewandowski et al. 2019)



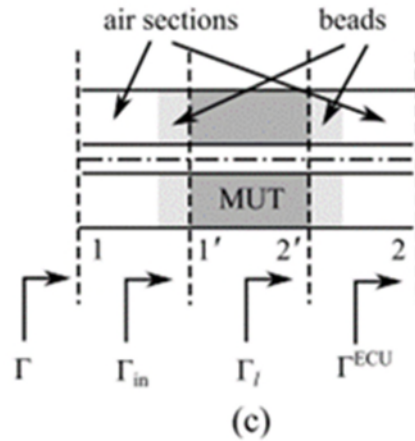


圖 2-83 以 VNA 進行土壤介電頻譜之系統標定與實際量測程序

(a) 系統校準 (b) 散射參數的測量 (c) MUT 散射參數提取

(Lewandowski et al. 2019)

本研究參考上述文獻成果，提出本土化設備製作與率定程序，初步成果如下：

1. 實驗配置

VNA 測量單元如圖 2-84 所示：

- (1). 模具 Sample Holder：由耐酸鋼所製成。其構造分成兩部分，外導體內徑為 $38.8 + 0.075 \text{ mm}$ ，內導體外徑為 $16.9 + 0.05 \text{ mm}$ 。兩個導體的長度均為 60 mm 。
- (2). 真空連接段 Vacuum connection：分為 A 部分和 B 部分，A 部分由金屬製成，帶有外部 O 形圈密封，以確保與模具完整箱接，並防止水從模具內溢漏出。而由橡膠製成的 O 形密封圈可以承受 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $+108 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的溫度。而 B 部分將直接與 Type-N/EIA 1

5/8" 適配器連接並充當外導體並連接到模具 (Sample Holder) 的外導體。而且，當 A 部分和 B 部分連接時，它們之間會形成一個空間。而 B 部分與管子相連並連接到真空機以抽氣來施加負壓。這種設計方式將確保連接器的連接品質、準備速度和可重複性。

(3). 剛線聯軸器元件(Rigid line coupling element) 1 5/8" 是 Revoton Machinery 的產品。它將內部適配器 Type-N/EIA 1 5/8" 連接到模具的內部導體。

(4). Type-N/EIA 1 5/8" 是 Revoton Machinery 產品，它使向量網路分析儀 (VNA) 可以連接至模具 (Sample Holder) 上。同軸模具 (coaxial sample holders) 由導體上的銅和頭部的金屬製成。圖 2-87 顯示了同軸模具的細節。模具由三部分組成：

- i. 內導體的外徑為 13 mm，長度為 17 mm
- ii. 外導體有一個 33 mm 的內導體，長度為 39 mm
- iii. BNC 接頭焊接在支架的頭部，BNC 接頭連接到電纜上。

由於上述之 VNA 模具受到疫情影響，後半段執行期才由國外進口完成，目前正在加工處理轉接器銜接部分。因此相關頻率分析部分將於期末簡報時補充說明。

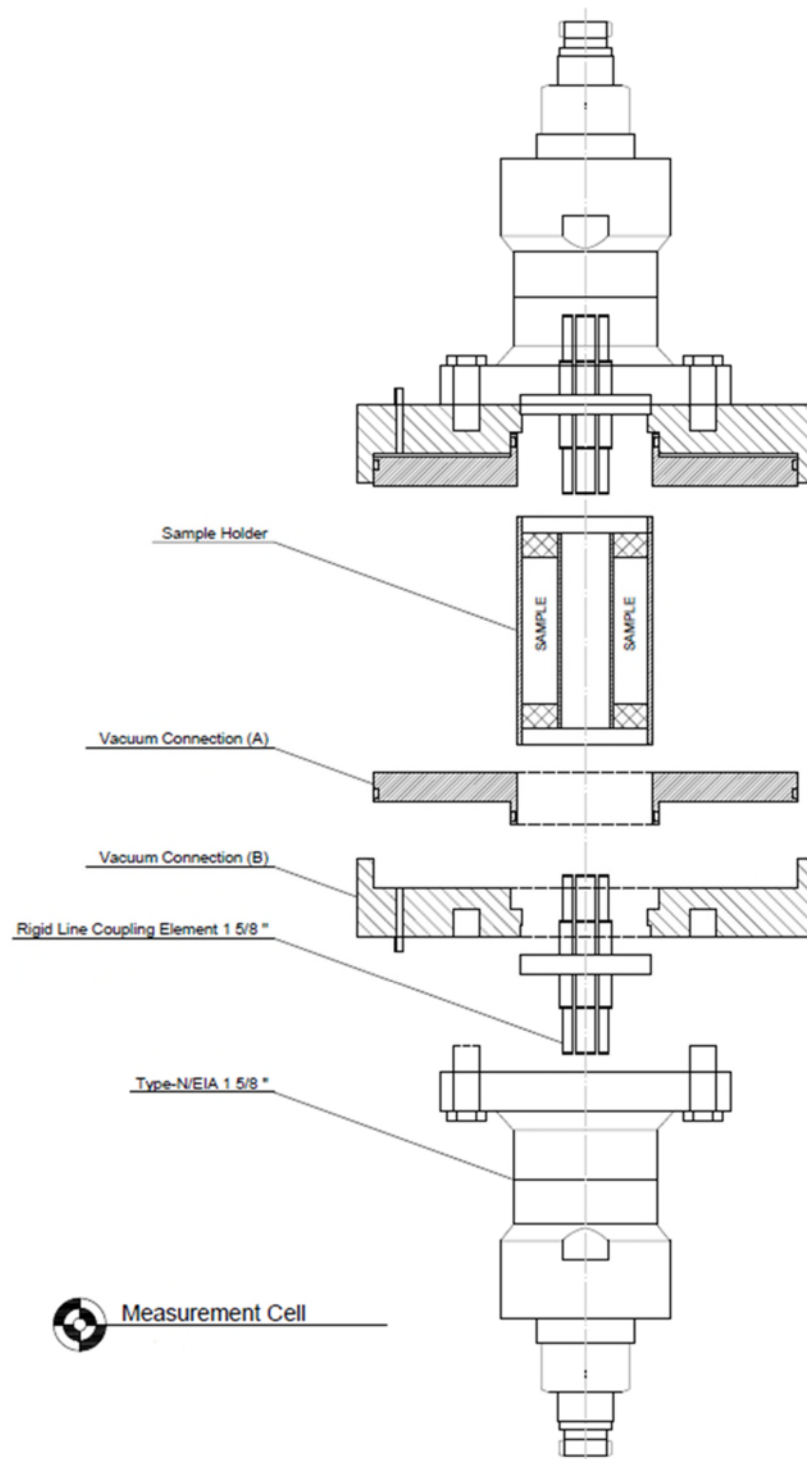


圖 2-84 向量網路分析儀(VNA) 量測模具單元

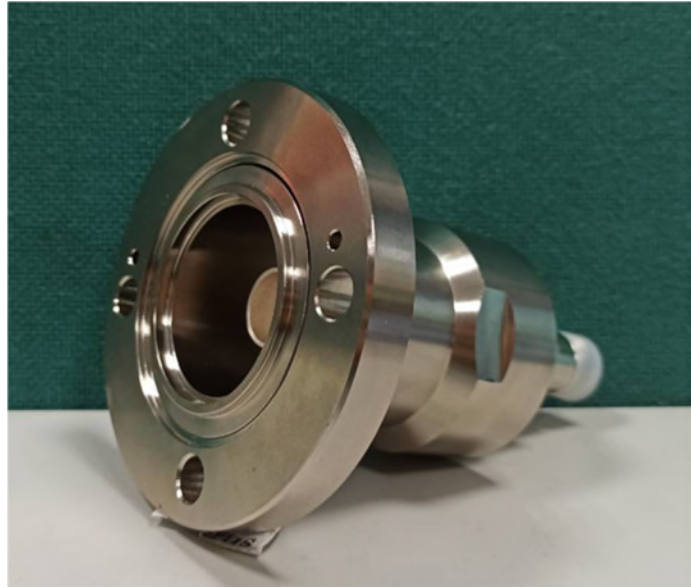


圖 2-85 Type-N/EIA 1 5/8'' 元件



圖 2-86 Rigid line coupling element 1 5/8''

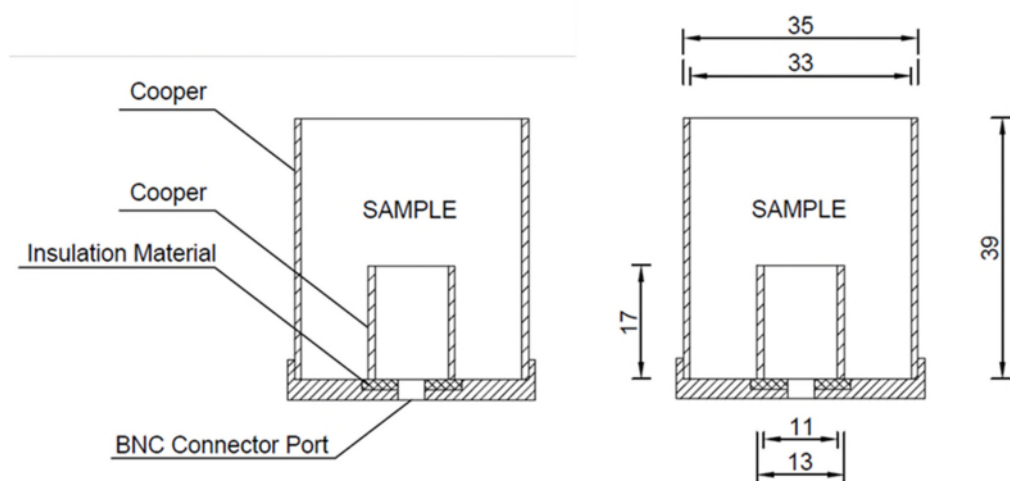


圖 2-87 同軸模具(coaxial sample holders)示意圖 (單位為 mm)

2. 儀器校正

本研究基於 [Lewandoski \(2017\)](#) and [Lewandoski \(2019\)](#) 所提出的方式進行實驗。測量過程如圖 2-83 所示。而量測的目的是為了知道待測物 (MUT) 內含的複視介電常數頻譜。量測過程須依下列方式進行校正。

1. 系統校正 (如圖 2-83) 的計算式:

- (1). 單端口 VNA 校準係數 Γ 來自原始反射係數測量值 $\tilde{\Gamma}$
- (2). 未知的反射係數 Γ_m^{ECU} , $m = 1, \dots, M$ 是電子可切換終端電子校準單元(ECU).

$$\Gamma = \frac{\tilde{\Gamma} - E_2}{E_1 + E_3 \Gamma} \quad (37)$$

其中 E_1 、 E_2 和 E_3 是校正係數。

2. 第二步，量測單元散射參數(scattering parameters)(如圖 2-83 (b))。藉由設定好的 ECU 實現不同的終端反射係數 Γ_m^{ECU} 來取得輸入反射係數 Γ ，而散射參數將被間接地確定。

$$\Gamma = \frac{S_{11} - \Delta \Gamma^{ECU}}{1 - S_{22} \Gamma^{ECU}} \quad (38)$$

其中， Γ^{ECU} = ECU 呈現的反射係數， $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ 是 DUT 散射矩陣(DUT scattering matrix)的決定因素。

量測單元散射參數是由介電頻譜所提取 (如圖 2-83 (c))。此提取的第一步驟是從單元散射參數 (參考平面 1 和 2) 來計算待測材料的散射參數 (即參考平面 1' 和 2' 的散射參數)。為了這個目標，使用 [Lewandowski](#)

等人(2017) 中介紹的傳輸矩陣(transmission matrix)的方法，從單元散射參數中去嵌入空氣部分和支撐系(supporting beads)。

1. miniVNA PRO Lite 產品之校正：

MiniVNA PRO Lite 具有 100 kHz 至 200 MHz 的測量頻率，其支持 S11 和 S21 的測量。miniVNA PRO Lite 有電腦程式可以對開路、短路、負載、直通(straight-through)進行校正的功能（對應的校準組件如圖 2-88 所示）。



圖 2-88 miniVNA PRO Lite



圖 2-89 SMA 校正元件 (開路 open, 短路 short, 負載 load)

(1)校正步驟：

- i. 在程式中選擇 Toolbar > Calibration > Create (from: <http://www.eastchip.com/minivnasoft.asp>),

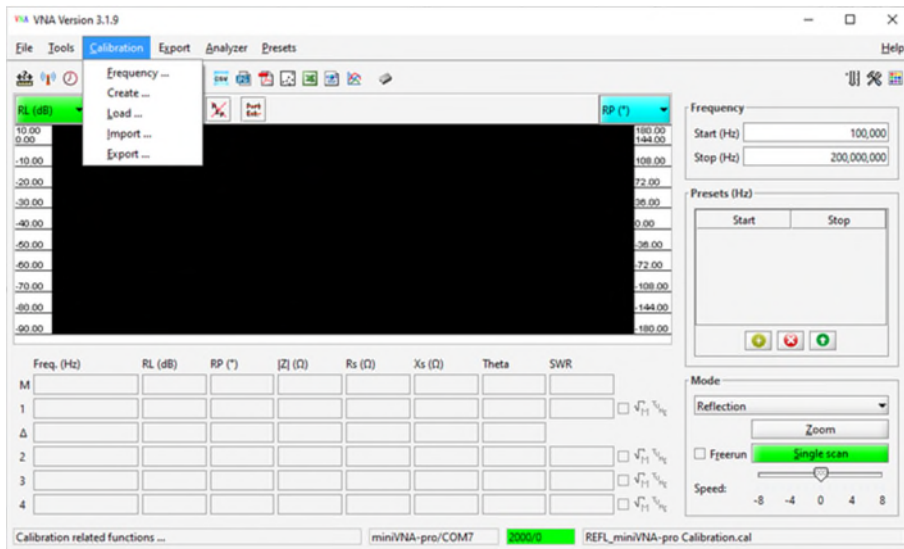


圖 2-90 建立校正介面

- ii. 交替連接開路、短路和負載校正元件並讀取資料，直到成到程式讀取完成。而默認的校正點數為 10000 點。

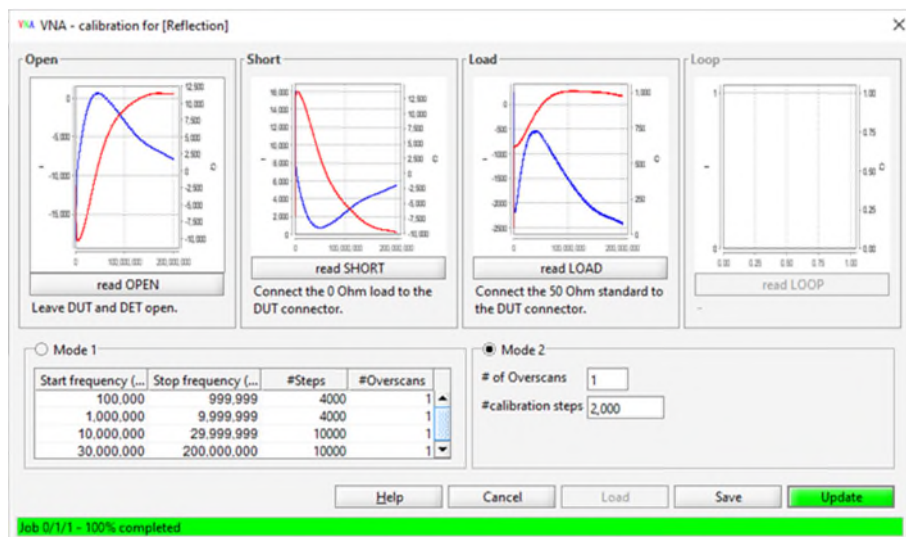


圖 2-91 讀取開路、短路和負載校正元件資料

iii. 點擊更新以更新校正資料並保存校正圖。

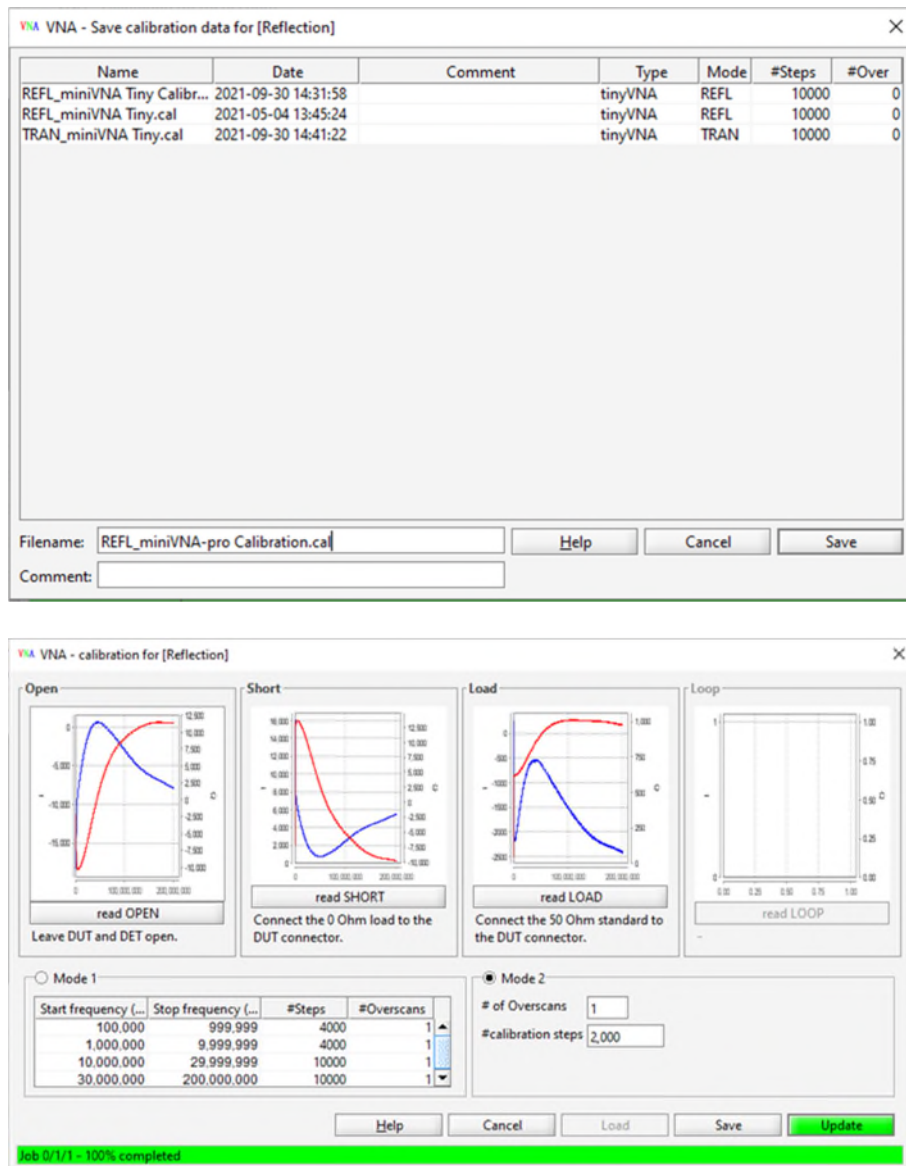


圖 2-92 保存和更新校正圖

2. miniVNA Tiny 產品之校正：

MiniVNA Tiny 具有 1 MHz 至 3 GHz 的測量頻率，其 VNA 支持 S11 和 S21 的測量。 miniVNA Tiny 有電腦程式可以對開路、短路、負載、直通(straight-through)進行校正的功能（對應的校準組件如圖 2-89 所示）。



圖 2-93 miniVNA PRO Lite



圖 2-94 SMA 校正元件 (開路 open, 短路 short, 負載 load)

(1)校正步驟：

- i. 在程式中選擇 Toolbar > Calibration > Create
(from: <http://www.eastchip.com/minivnasoft.asp>),

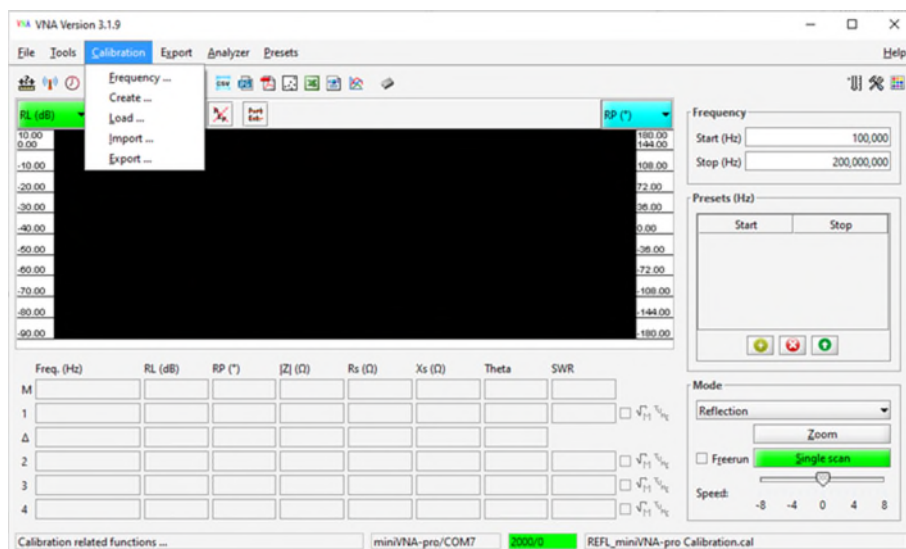


圖 2-95 建立校正介面

- ii. 交替連接開路、短路和負載校正元件並讀取資料，直到成到程式讀取完成。而默認的校正點數為 10000 點。

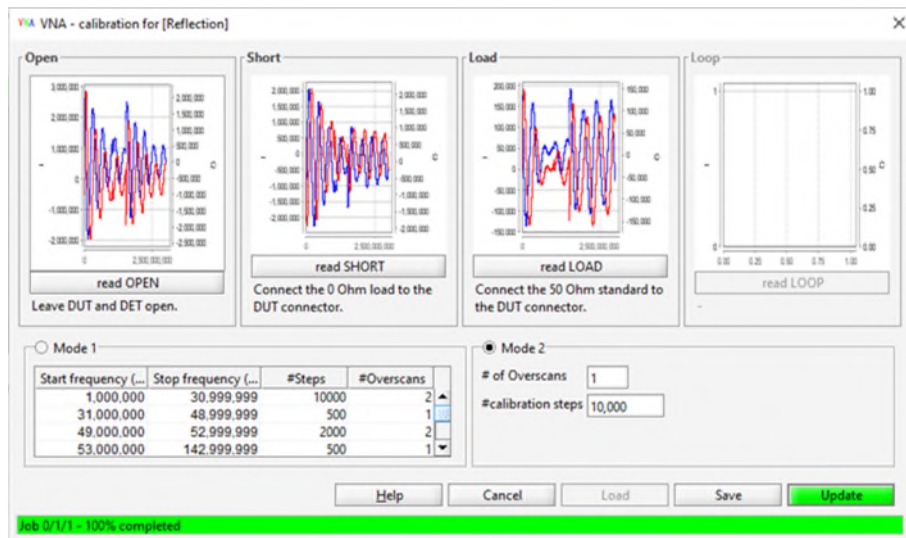
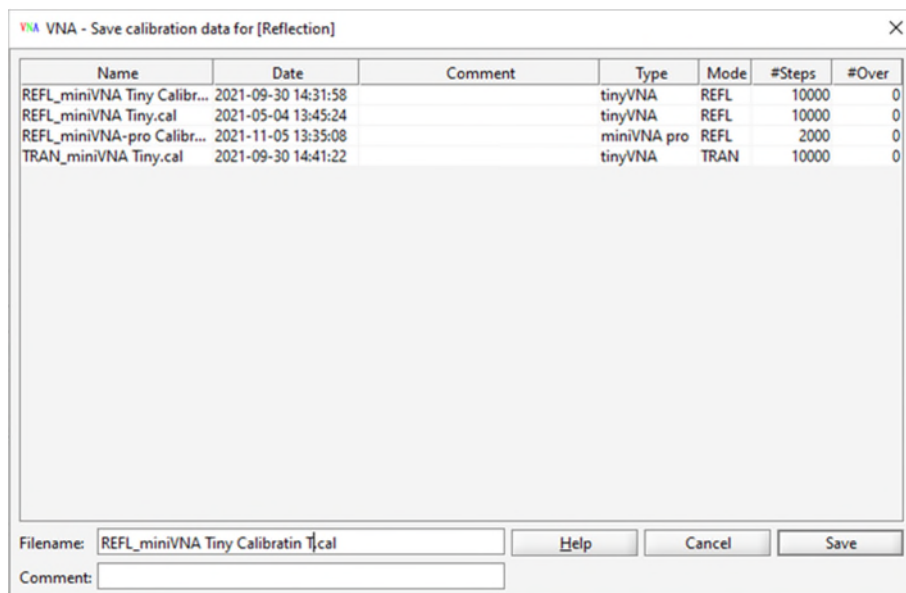


圖 2-96 讀取開路、短路和負載校正元件資料

- iii. 點擊更新以更新校正資料並保存校正圖。



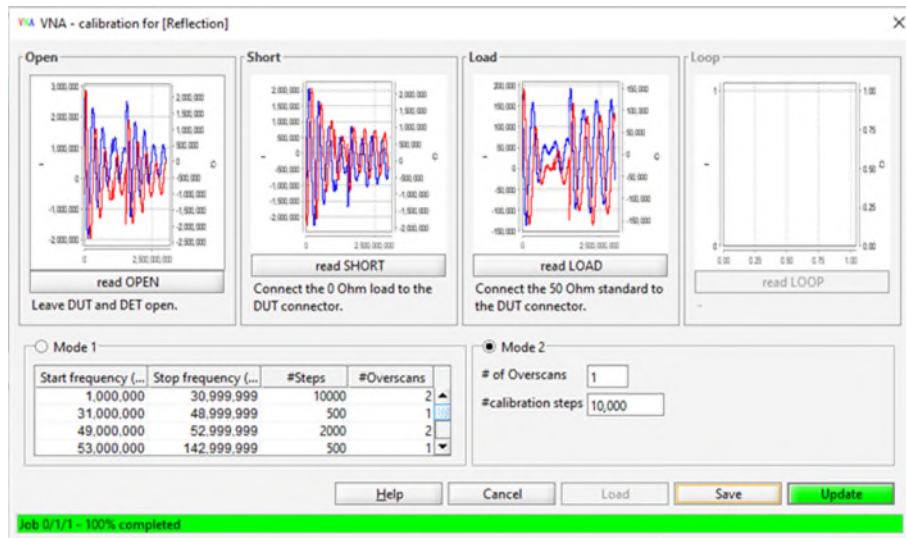


圖 2-97 保存和更新校正圖

3. Cooper Mountain Technology (CMT) R60 Vector Reflectometer 校正：

Cooper Mountain Technology (CMT) R60 Vector Reflectometer (圖 2-98) 通過 USB 連接到外部 由 PC 供電與操作。CMT R60 Vector Reflectometer 可以做出實驗室品質般的測量，而可以量測到 1 MHz 至 6 GHz 的振幅和相位。其攜帶式的尺寸大小可允許在任何環境下操作，從而實現高度可靠的性能和校正的穩定性。



圖 2-98 R60 Vector Reflectometer 向量網路分析儀

(1)校正步驟：

- i. 打開程式並點擊” Calibration” ，將顯示校正介面。



圖 2-99 校正介面

- ii. 交替連接開路、短路和負載校正元件並讀取資料，直到成到程式讀取完成。

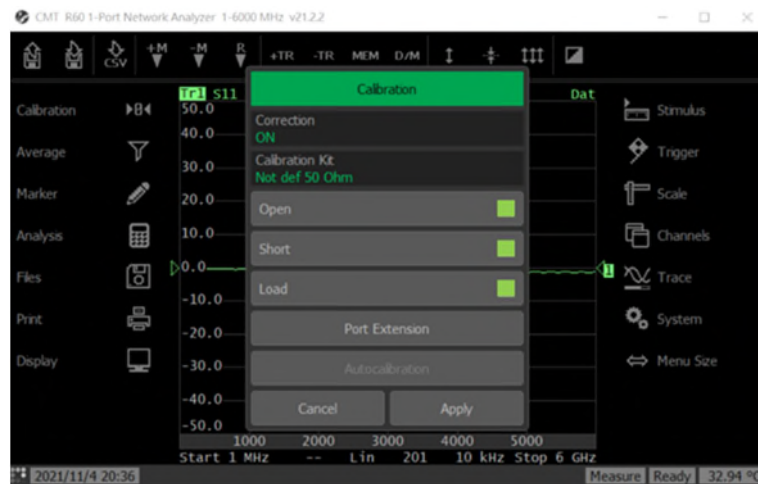


圖 2-100 校正完成之介面

- iii. 將校準結果應用至程式中

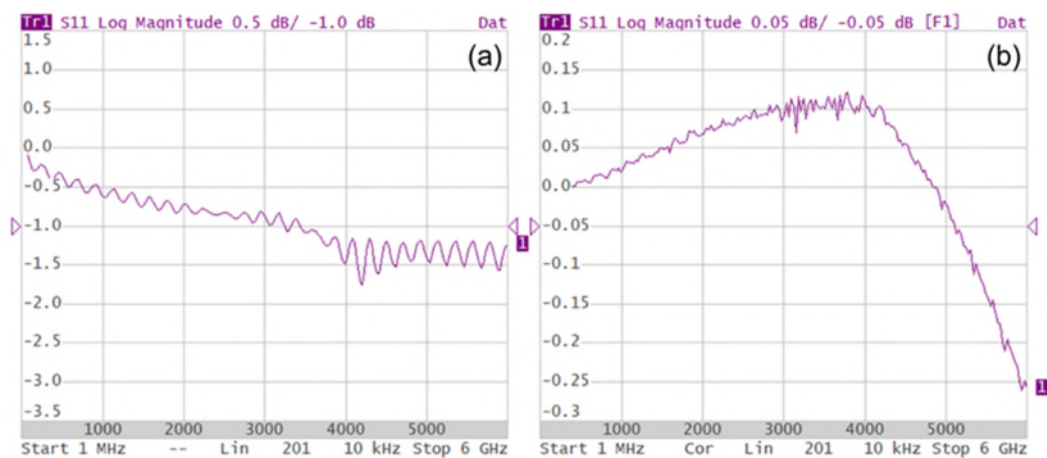


圖 2-101 S11 訊號 (a)校正前 (b)校正後

3.VNA 介電分析成果

本計畫基於上述 VNA 率定程序，配合後續砂箱試驗同樣材料與含水量，進行以下 VNA 測試，其中圖 2-102 顯示飽和土壤之介電頻譜計算結果，其中配合後續砂箱試驗資料，

於相同含水量下之頻率範圍約為 0.1 GHz；圖 2-103 顯示乾土之介電頻譜計算結果，同樣配合後續砂箱試驗資料，於相同含水量下之頻率範圍約為 0.3 GHz，代表實際上傳統透過時間域 K_a 值估計含水量，仍有其不確定性，且不同含水量之對應頻率有所不同。

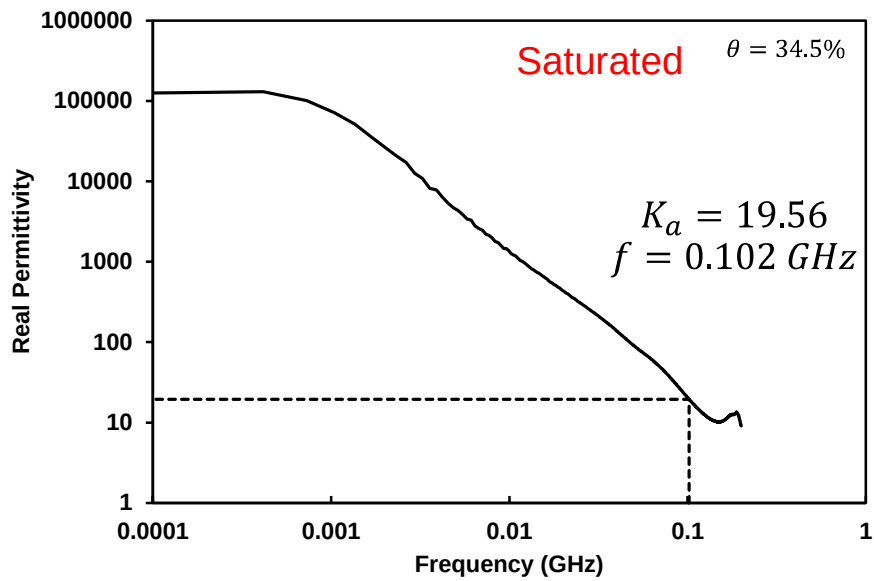


圖 2-102 VNA 於飽和土壤之介電頻譜計算結果

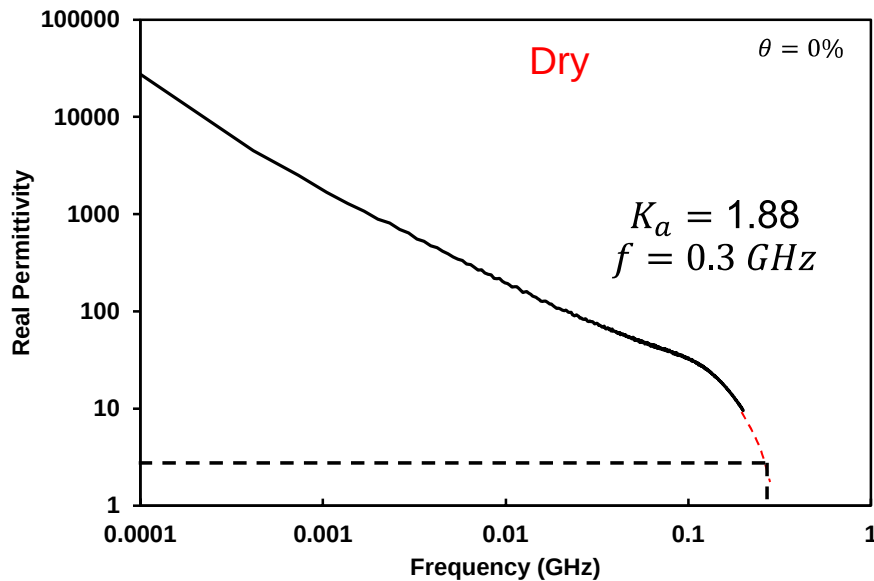


圖 2-103 VNA 於乾土之介電頻譜計算結果

圖 2-104 顯示不同含水量之介電頻譜計算結果，由於目前本研究採用之 VNA 範圍高頻有限，目前仍嘗試透過不同之設備擴展頻寬，藉以分析不同頻率之介電度行為。

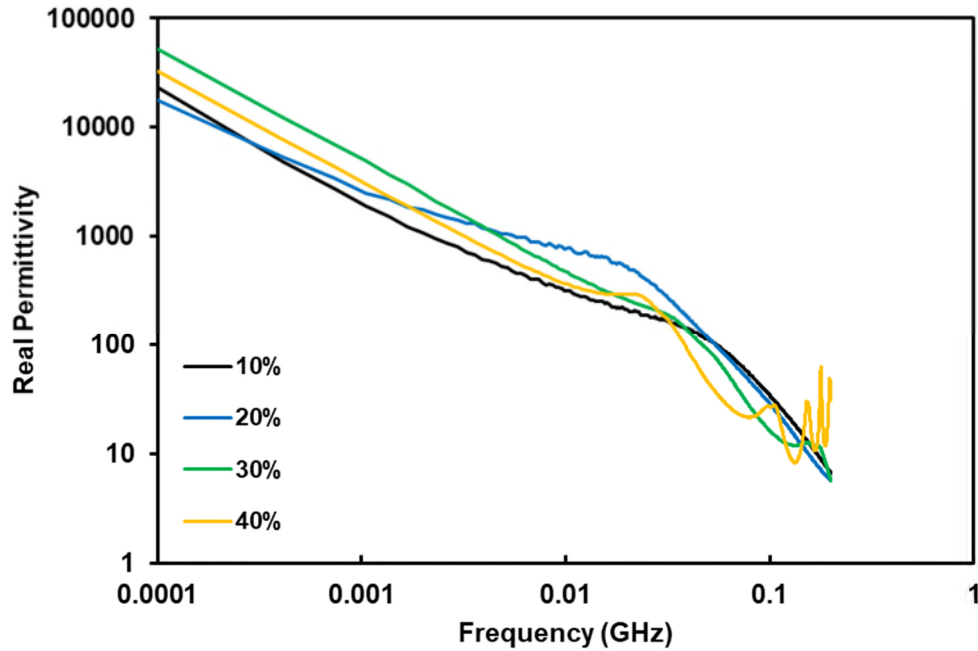


圖 2-104 VNA 於不同含水量土壤之介電頻譜計算結果

(五)砂箱實驗-介電頻譜分析

1. TDR 傳輸線率定

為找出土壤的介電頻譜，本研究簡化 TDR 脈衝產生器產生的電磁波到試體的傳播路徑。如圖 2-105 砂箱實驗之電磁波傳播路徑簡化模型所示，紅色箭頭為脈衝波傳播方向，綠色箭頭為反射波。並藉由模擬 TDR 波型之程式進行正算模擬，而模擬程式之編程依據由上述的 TDR 全反算分析(即式 17~21)與 Cole-Cole function(即式 8)進行搭配，且使用 Matlab 內建的最小平方法之演算法，對於各參數帶入不同的數值進行迭代反算，參數分別由三個方程式(式 8、18、19)

所衍生的 7 大參數(ε_s , ε_∞ , f_{rep} , ξ , EC_{dc} , Z_p , α_R)
執行上述參數帶入執行迭代反算，並依此迭代出來的參數畫
出介電常數與頻率域之關係圖，即介電頻譜。

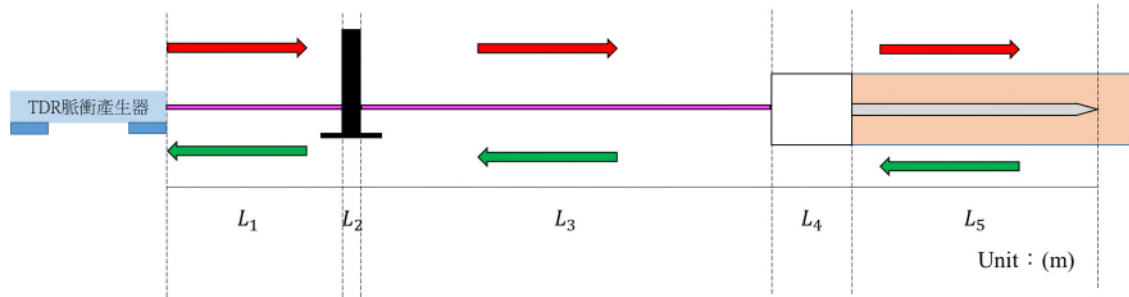


圖 2-105 砂箱實驗之電磁波傳播路徑簡化模型(第一纜線段、多工器、第二纜線段、貫入器 AB 膠段、感測段(紅土試體中))

依照奈奎斯特採樣 (Nyquist sampling) 定理，當擷取資料之取樣時間為每 t_0 秒 1 筆，並且擷取總時長為 T 秒時，則在頻率域方面，最高可辨識之頻率為 $(1/t_0)/2$ (Hz)，而頻率辨識間格為 $1/T$ (Hz)，如圖 b 所示。因此，本研究因為每筆實驗資料採樣點數為 10000 點，擷取頻率為 10^{11} (Hz)，所以能擷取到的介電頻譜最小只能到 10^7 (Hz)，最高可辨識到 5×10^{10} (Hz)。

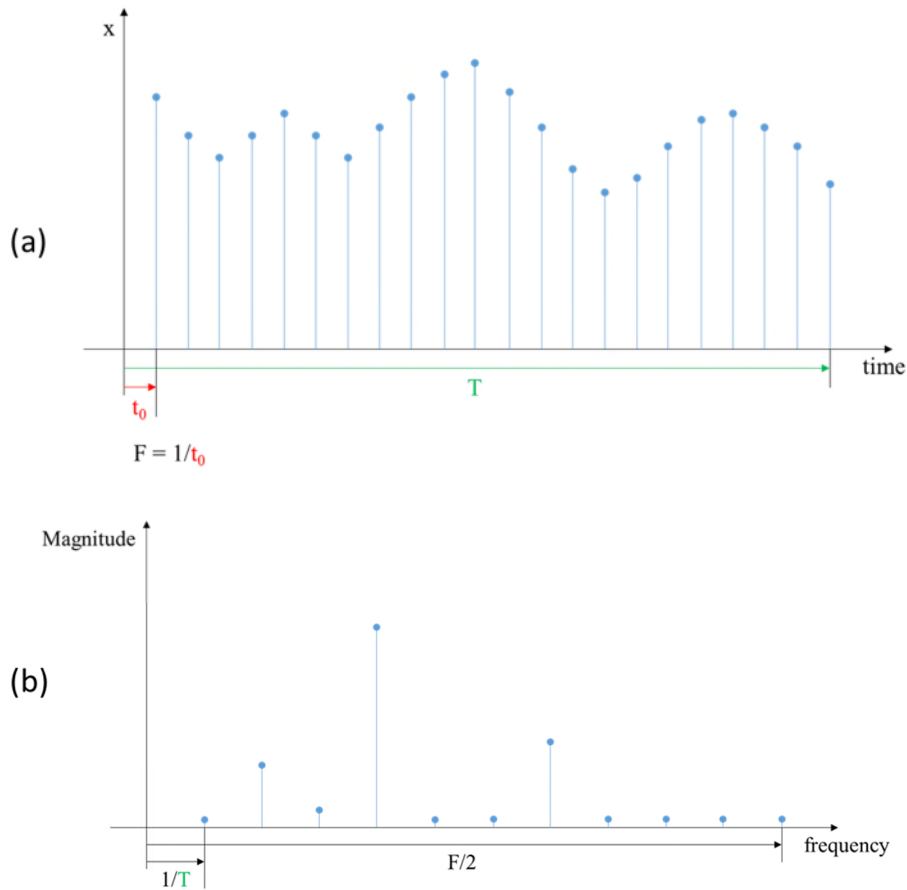


圖 2-106 奈奎斯特採樣定理之頻率解析度示意圖

在對於第一組砂箱實驗資料使用 TDR 全反算分析之前，將傳統 3 電極放置在自來水中的資料，率定第一纜線段、多工器、第二纜線段、貫入器 AB 膠段、感測段的 TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數(ε_s , ε_∞ , f_{reb} , ξ , EC_{dc} , Z_p , α_R)。之後將第一纜線段、多工器、第二纜線段、貫入器 AB 膠段的 TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數固定，進行第一組實驗傳輸線材料的介電頻譜反算。而 TDR 系統與傳輸線材料 Cole-Cole 參數的反算結果如表 2-5 所示，圖 2-107 為依反算後的參數帶入程式模擬後的波型與實際量測的波型進行比較，圖 2-108 為 Cole-Cole 參數反算後的結果進行理論值的繪製。

表 2-5 TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數(ε_s , ε_∞ , f_{rep} , ξ , EC_{dc} , Z_p , α_R)反算結果

	第一纜線 段	多工器	第二纜線段	貫入器 AB 膠 段	感測段
L_n (m)	4.06	0.09	3.56	0.06	0.24
ε_s	2.225	1.732	2.225	5	78.54
ε_∞	2.225	1.32	2.225	5	4.22
f_{rep} (Hz)	1	1	1	1	1.7×10^{10}
ξ	0	0	0	0	0.0125
EC_{dc} (S/m)	0	0	0	0	0.0286
Z_p (Ω)	70.233	53.439	70.233	150	167
α_R	183.259	1	183.259	199.977	552

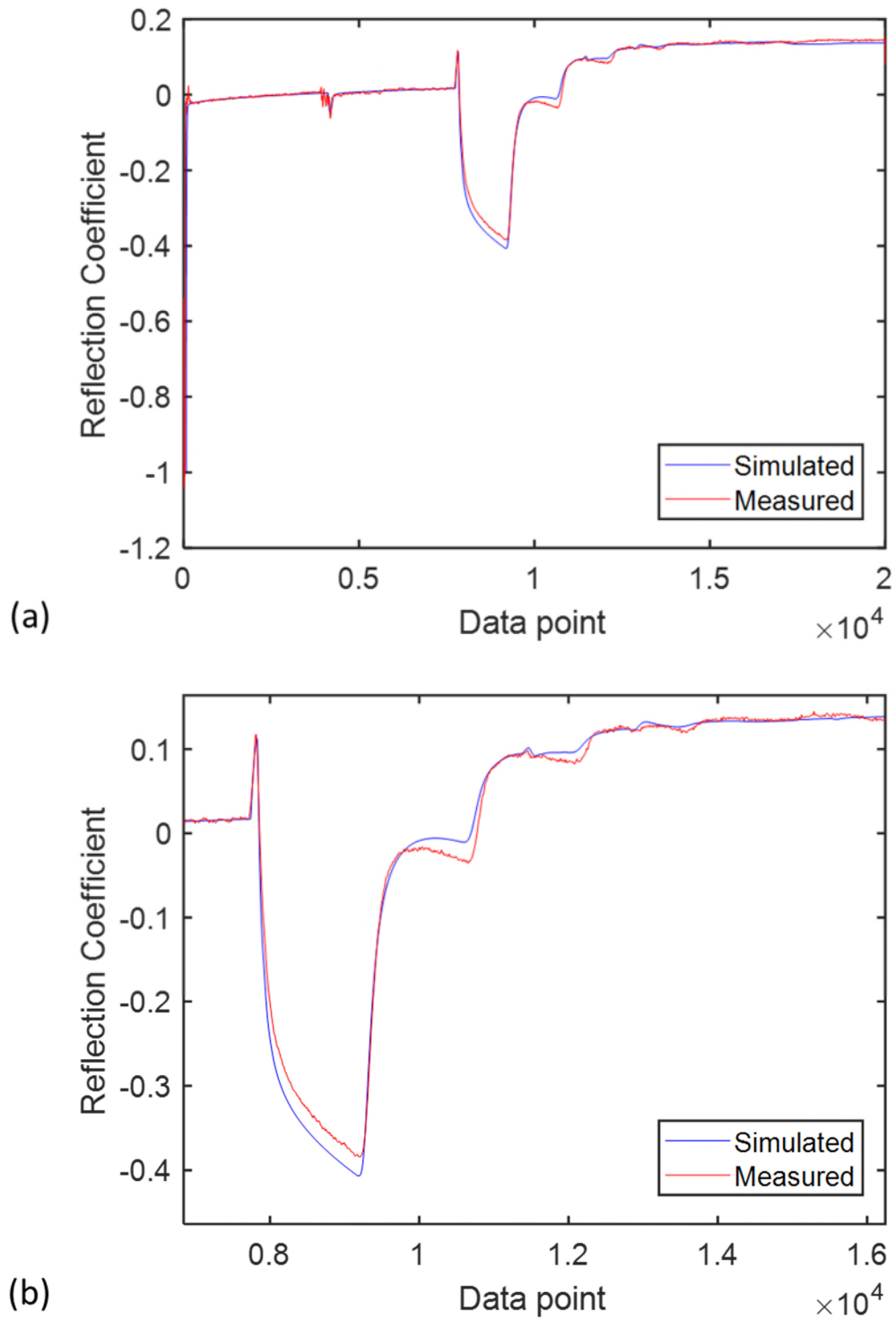


圖 2-107 模擬與量測值對照圖(Hz 之擷取頻率)(a)完整波型，(b)放大感測段之波型

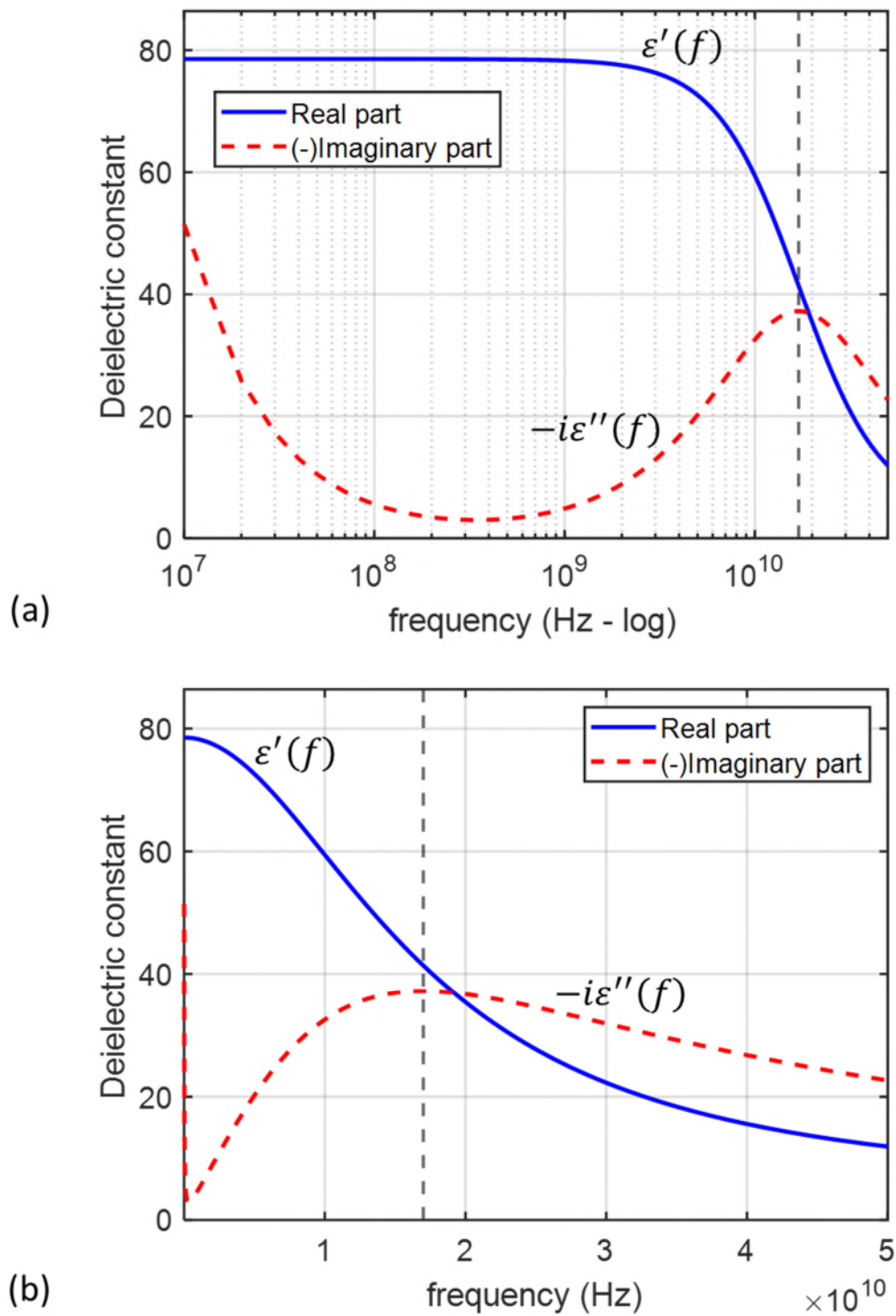


圖 2-108 自來水之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)

(a) x 對軸為對數刻度，(b) x 對軸為正常刻度

2. 砂箱介電頻譜分析成果

本研究將取出砂箱試驗圖 2-61 各五個時間點所量測到的實際波型進行 TDR 全反算分析，並加入 PVA 高頻計算頻譜比較。全反算分析依由上述率定好的第一纜線段、多工器、第二纜線段、貫入器 AB 膠段的 TDR 系統與傳輸線材料 Debye 參數固定不動如表 2-6 所示，而反算出各個時間點的感測段，即紅土試體的 TDR 系統與材料 Debye 參數，如表 2-7 所示。反算後的模擬波型與實際量測值如圖 2-109、圖 2-115、圖 2-118、圖 2-121 所示。之後，依其反算出來的 **Cole-Cole** 參數進行時域介電常數與 PVA 的頻率域介電常數進行比較，如圖 2-110、圖 2-111、圖 2-113、圖 2-114、圖 2-116、圖 2-117、圖 2-119、圖 2-120、圖 2-122、圖 2-123 所示。

Chung (2008) 表明 PVA 在 100M Hz 與 1G Hz 的介電頻譜相對於其他頻率具有可靠度，高於 1G Hz 的部分介電常數有發散的現象，低於 100M Hz 的部分與高於 1G Hz 的部分之介電常數會受到導電度之影響。在圖 2-111 中可以看到 PVA 介電頻譜與在 100M Hz 與 1G Hz 與 TDR 全反算分析毫不相關，所以在於低含水量的土壤試體不適合使用 PVA 進行分析；圖 2-114 為土壤濕潤時期，也相對於其他時間點導電度為最高，在 100M Hz 的部分與高於 1G Hz 雖然比起圖 2-111 相對穩定，但明顯與 TDR 全反算分析的介電常數的值較高，推測受到高導電度的影響使得 PVA 的介電常數值上升；而圖 2-117、圖 2-120、圖 2-123 的相對於圖 2-111 與圖 2-114，其 PVA 在 100M Hz 與 1G Hz 的介電常數與

TDR 全反算分析的部分相當，推估在土壤較濕潤與較低導電度時使用 PVA 來分析介電頻譜的穩定度較佳。

表 2-6 (第一組) TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數(ε_s , ε_∞ , f_{rep} , ξ , EC_{dc} , Z_p , α_R)反算結果 (感測段參數由下表帶入)

	第一纜線段	多工器	第二纜線段	貫入器 AB 膠段
L_n (m)	0.54	0.22	3.56	0.06
ε_s	2.225	1.732	2.225	5
ε_∞	2.225	1.32	2.225	5
f_{rep} (Hz)	1	1	1	1
ξ	0	0	0	0
EC_{dc} (S/m)	0	0	0	0
Z_p (Ω)	70.233	53.439	70.233	150
α_R	183.259	1	183.259	199.977

表 2-7 (紅土)各時間點之試體相關帶入參數

($Z_p = 0.24$, $Z_p (\Omega) = 167$, $\alpha_R = 522$)

時間點	ε_s	ε_∞	f_{rep} (Hz)	ξ	EC_{dc} (S/m)
(1) 2021/9/6 00:02:05	26.094	5.388	1.235×10^6	0.581	0.0021
(2) 2021/9/7 15:52:13	40.947	1	4.455×10^6	0.75	0.0163
(3) 2021/9/8 08:23:41	50.380	6.5	7.797×10^5	0.75	0.0132
(4) 2021/9/8 15:27:02	57.506	9.96	8.422×10^5	0.75	0.0123
(5) 2021/9/16 01:03:32	40.897	6.636	1.034×10^5	0.749	0.0095

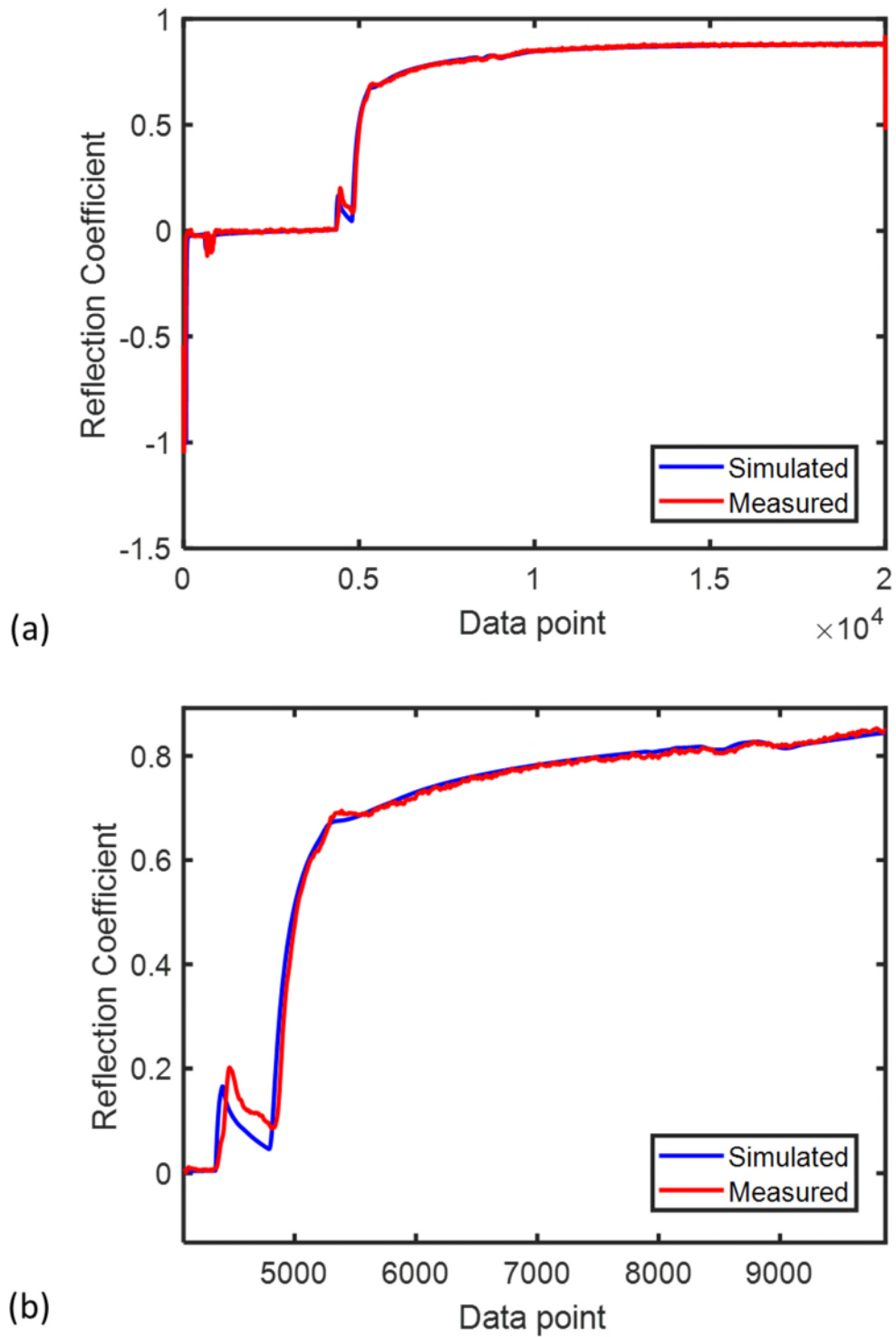


圖 2-109 (第一組，2021/9/6 00:02:05)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (a)完整波型，(b)放大感測段之波型

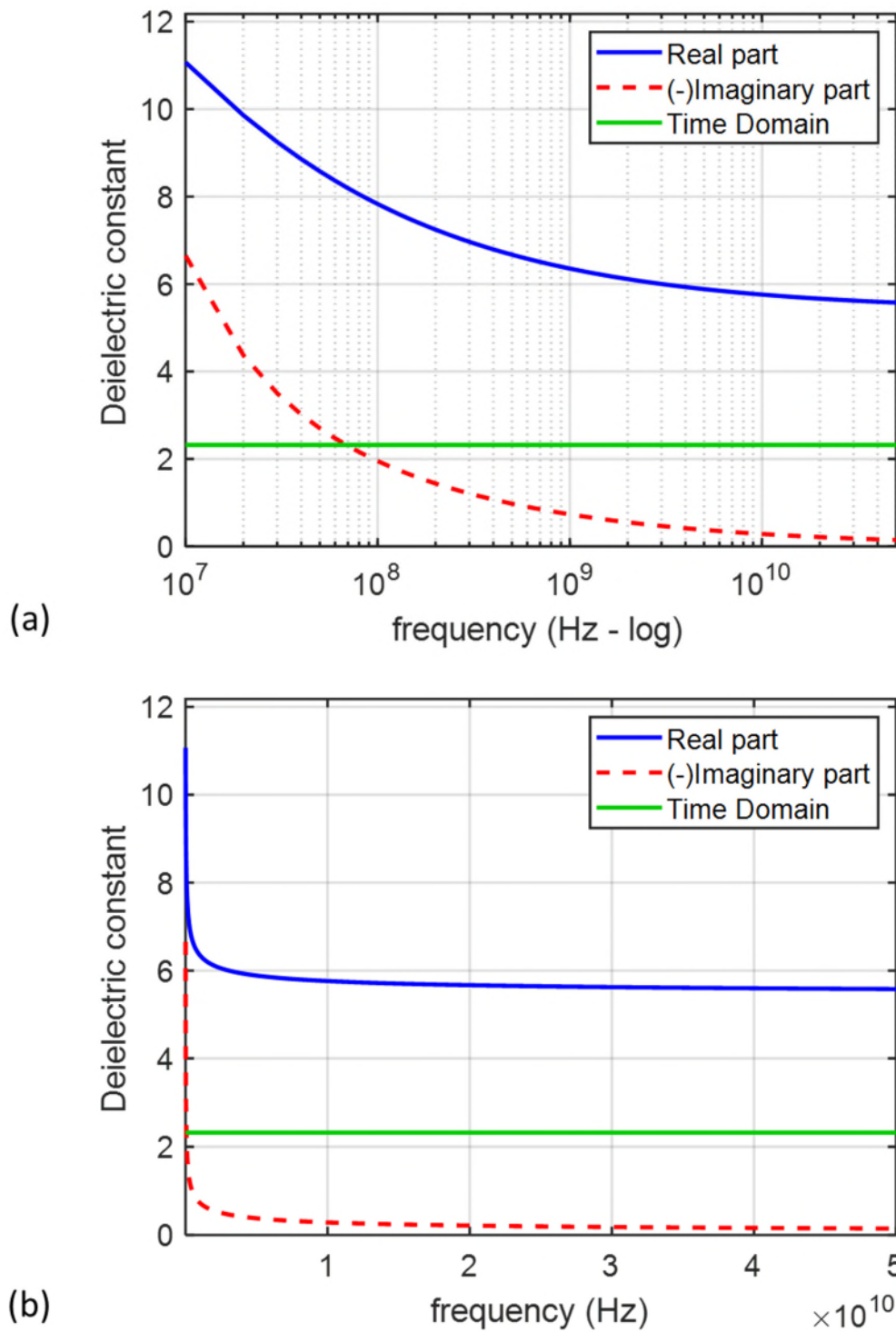


圖 2-110 (第一組, 2021/9/6 00:02:05)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值) (a)x 對軸為對數刻度, (b) x 對軸為正常刻度

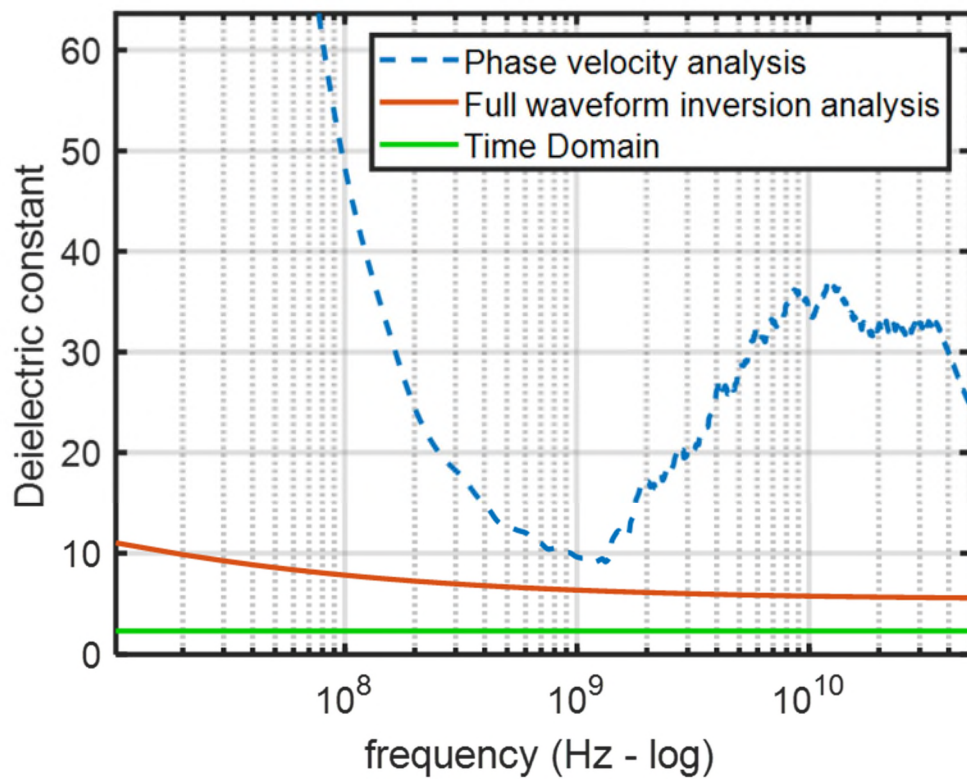


圖 2-111 (第一組, 2021/9/6 00:02:05) Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

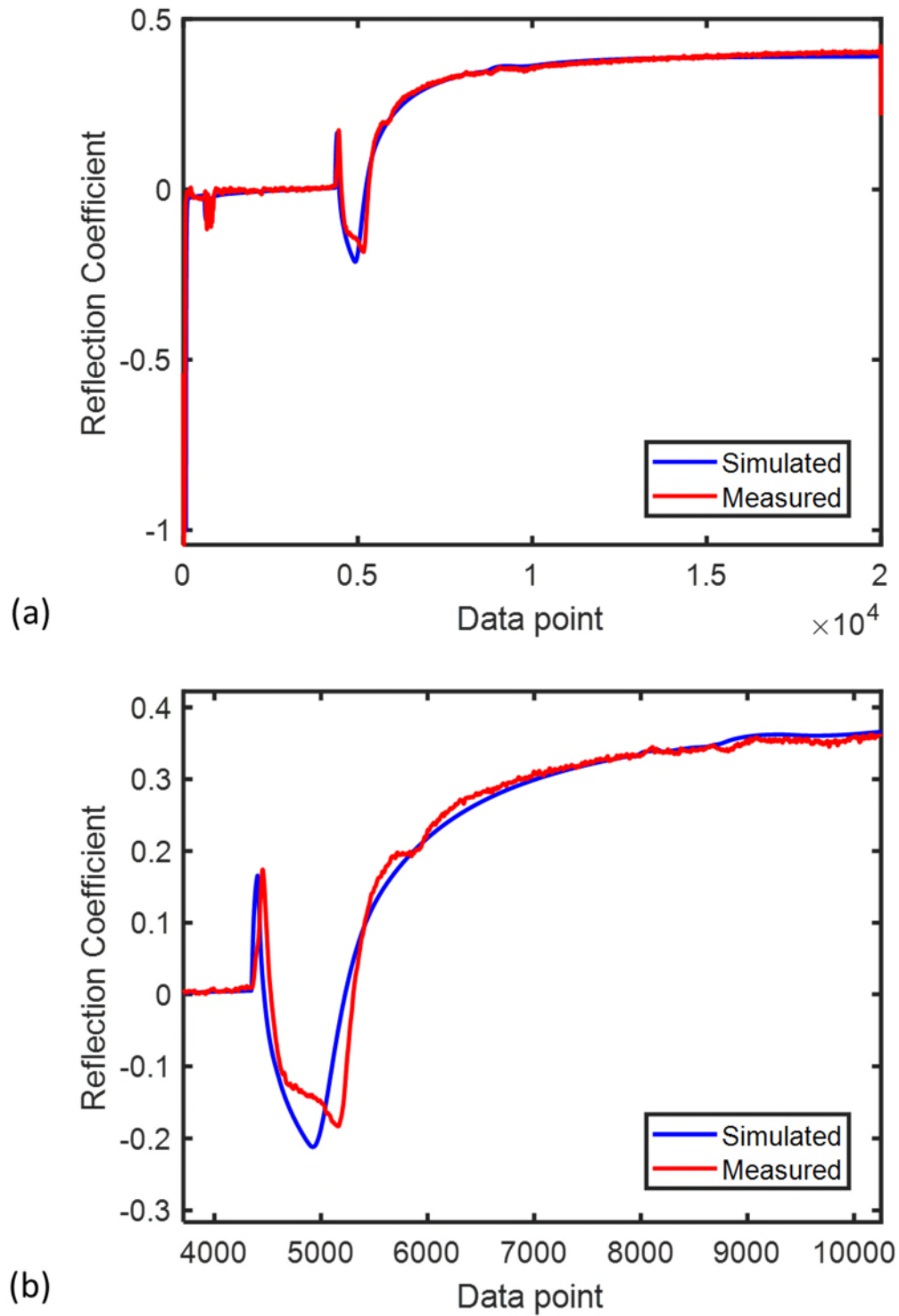


圖 2-112 (第一組, 2021/9/7 15:52:13)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (a)完整波型, (b)放大感測段之波型

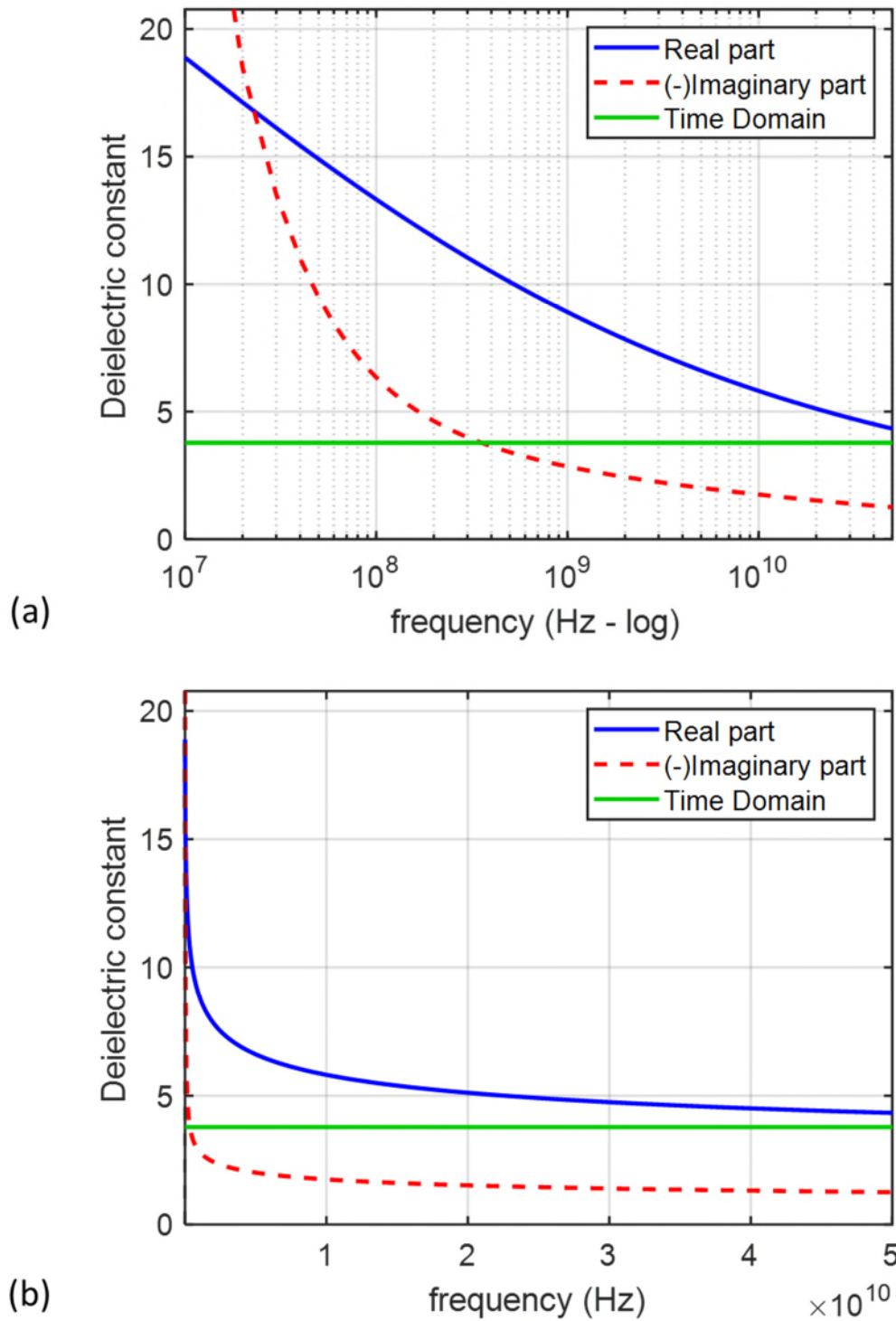


圖 2-113 (第一組，2021/9/7 15:52:13)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值) (a)x 對軸為對數刻度，(b) x 對軸為正常刻度

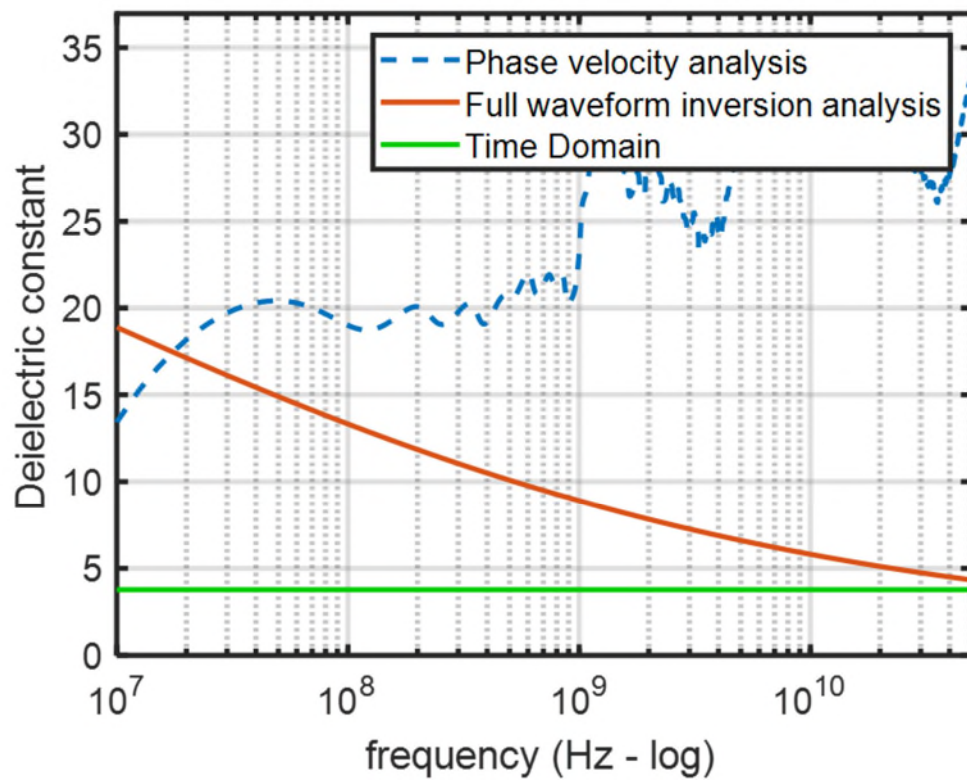


圖 2-114 (第一組, 2021/9/7 15:52:13) Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

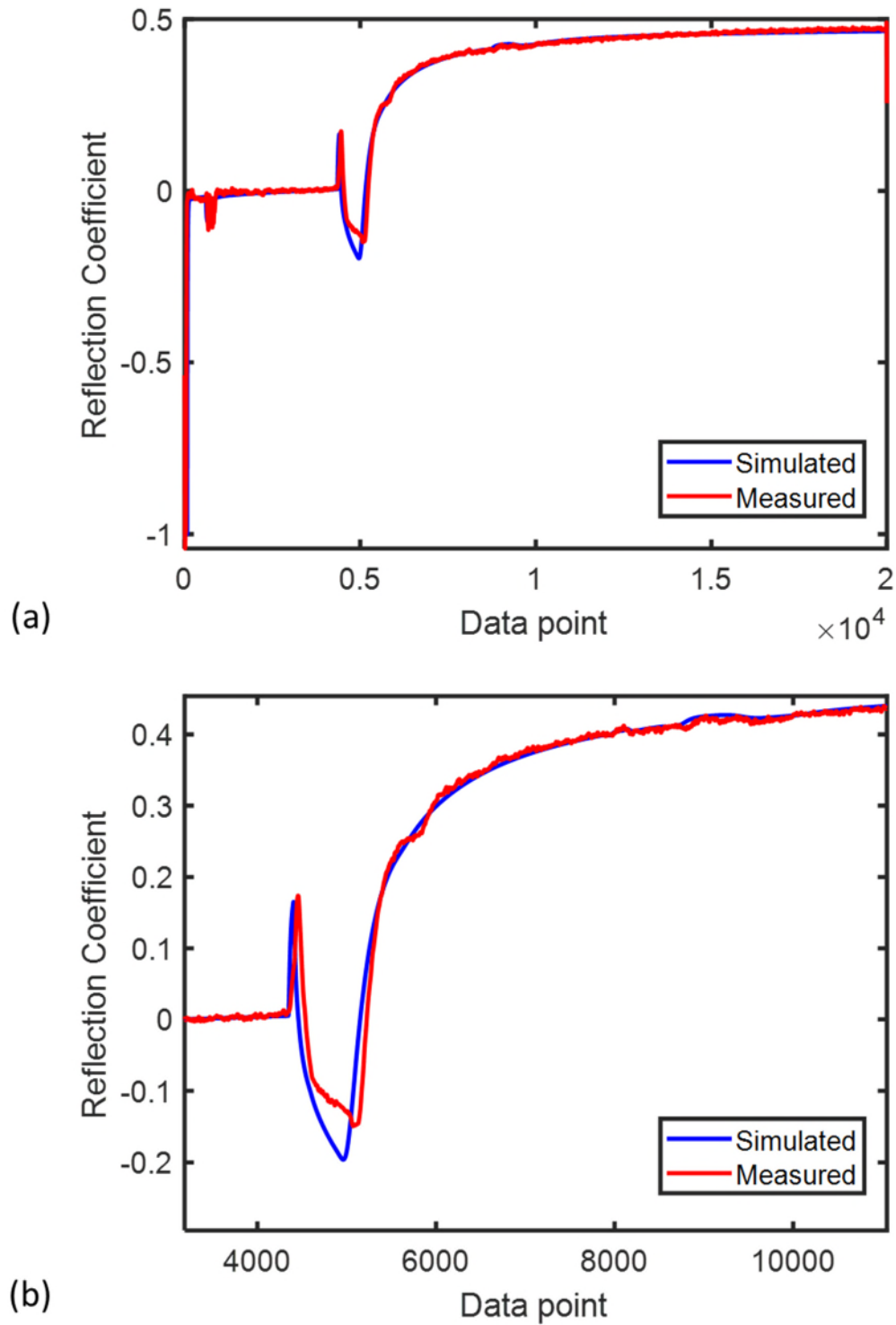


圖 2-115 (第一組, 2021/9/8 08:23:41)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (a)完整波型, (b)放大感測段之波型

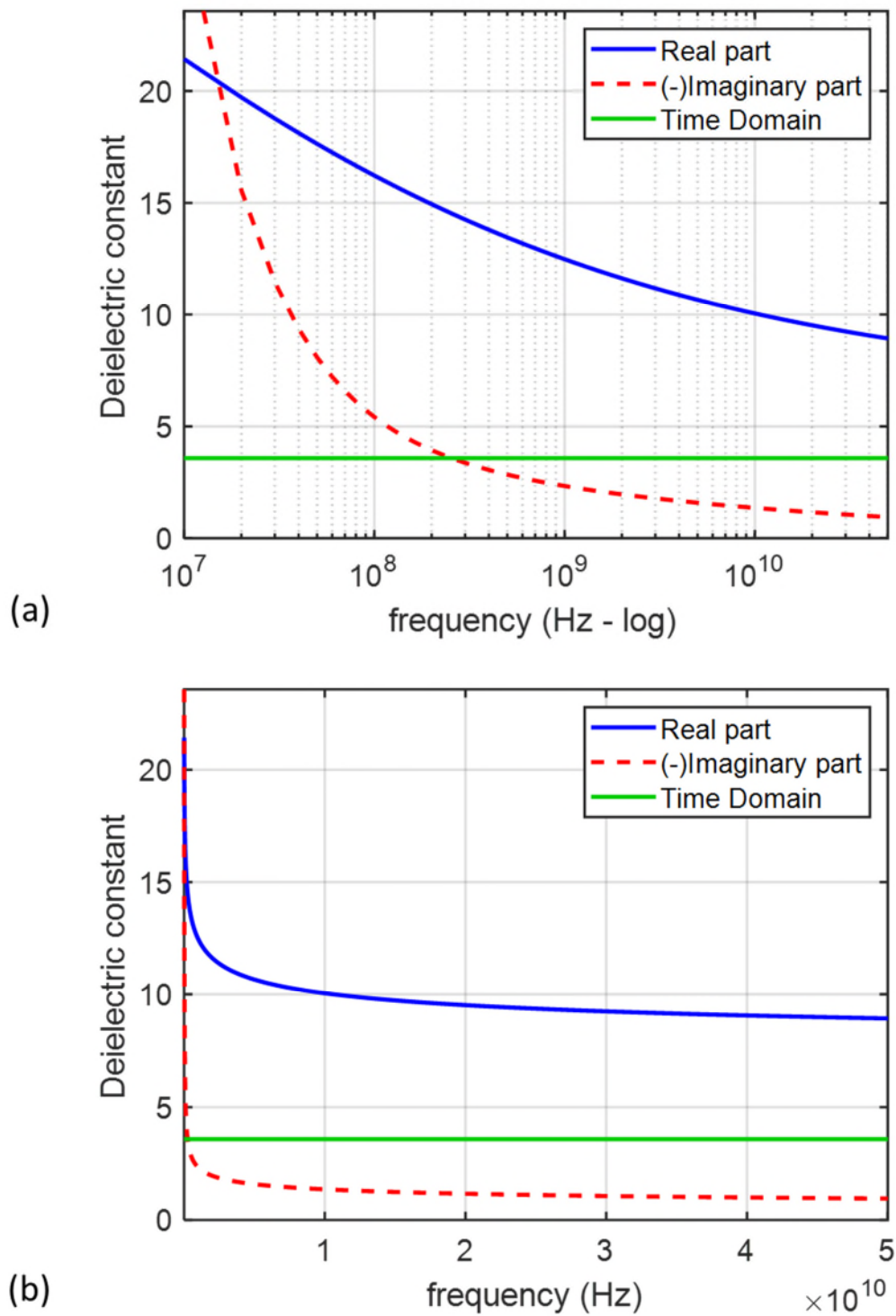


圖 2-116 (第一組, 2021/9/8 08:23:41)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值) (a)x 對軸為對數刻度, (b) x 對軸為正常刻度

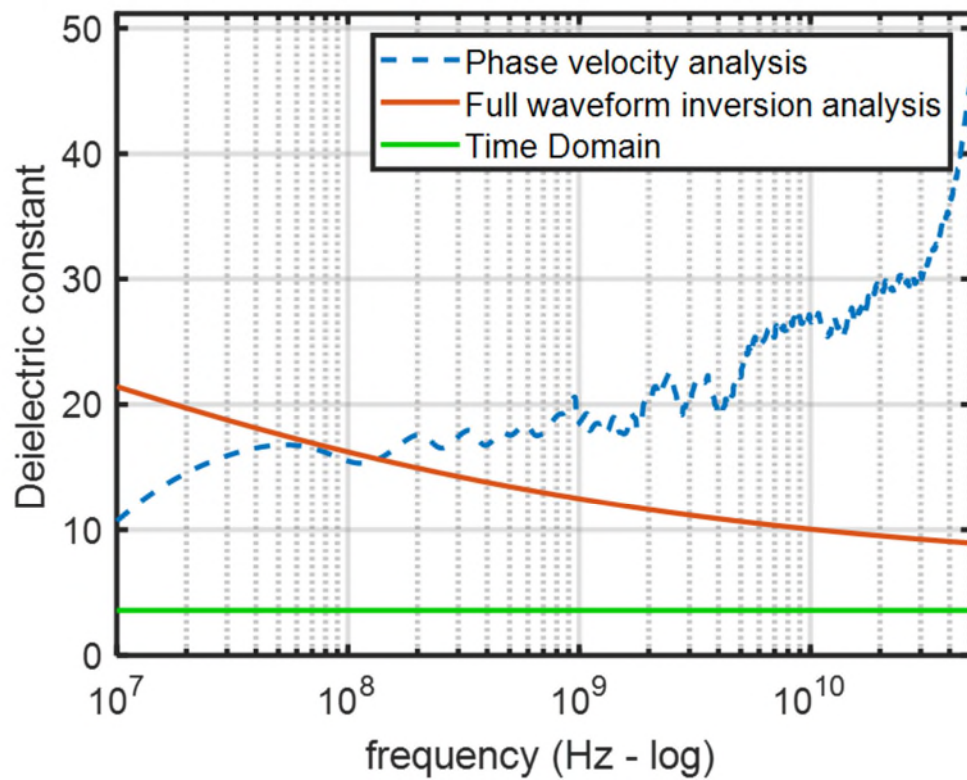


圖 2-117 (第一組, 2021/9/8 08:23:41) Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

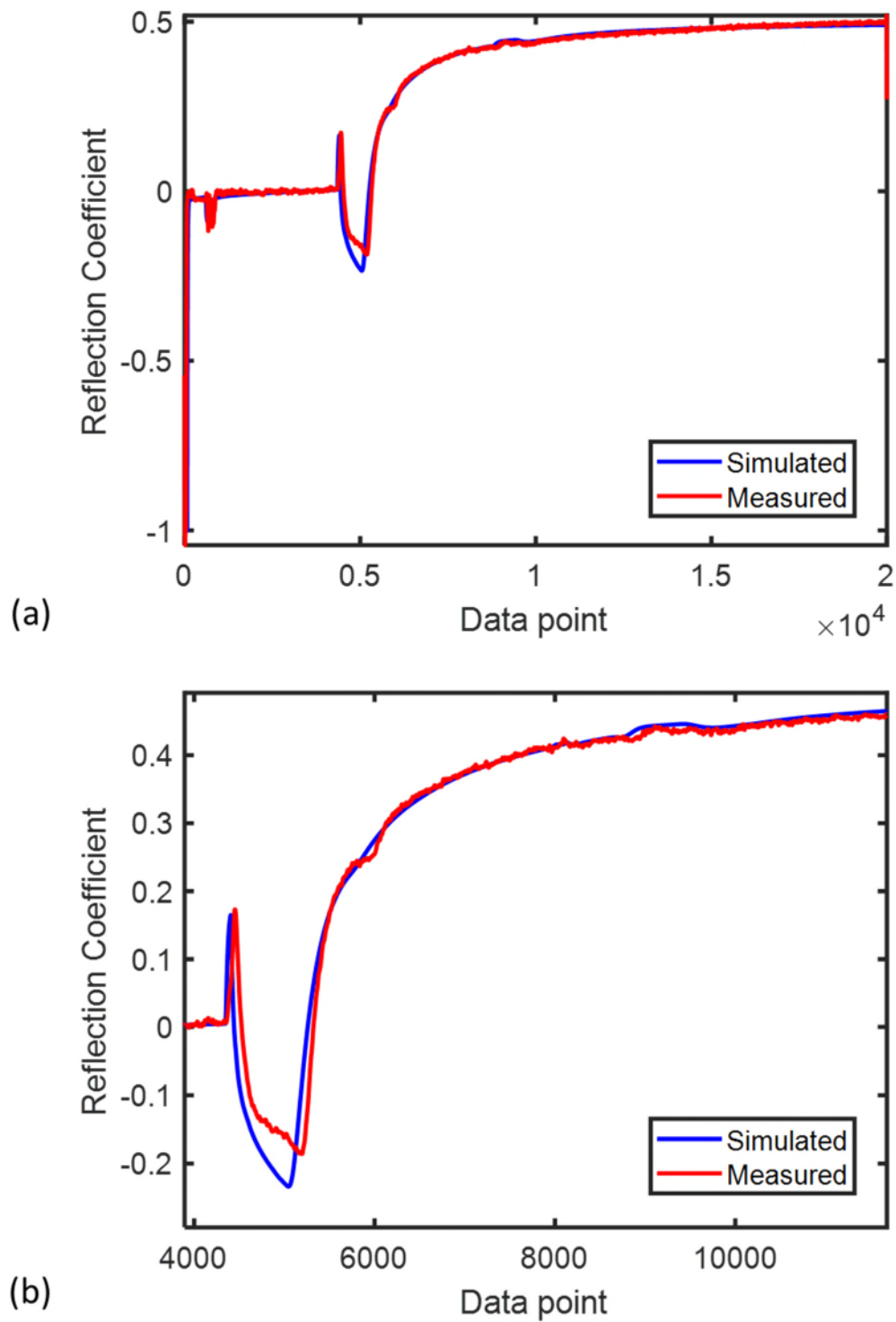


圖 2-118 (第一組，2021/9/8 15:27:02)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (a)完整波型，(b)放大感測段之波型

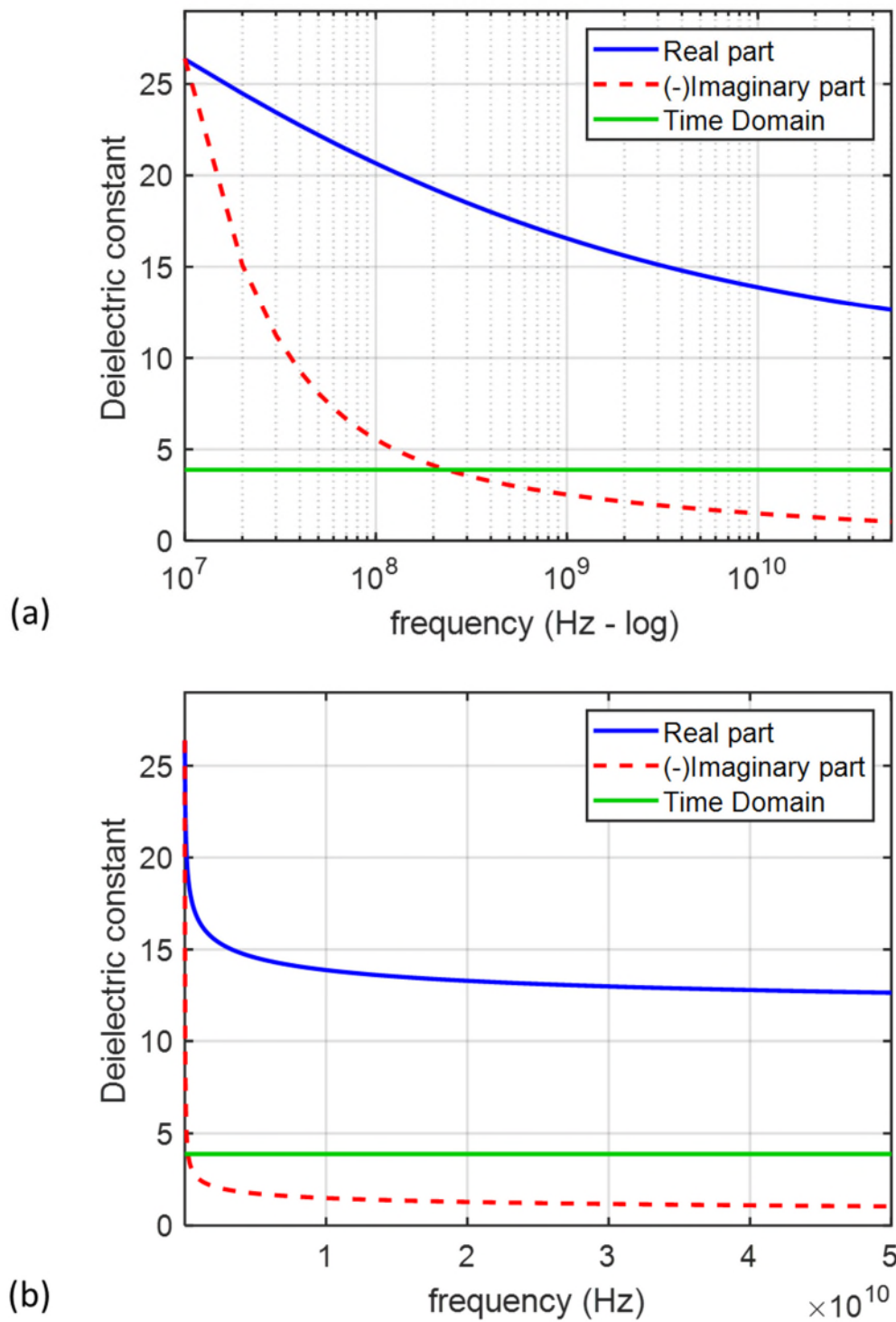


圖 2-119 (第一組, 2021/9/8 15:27:02)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值) (a)x 對軸為對數刻度, (b) x 對軸為正常刻度

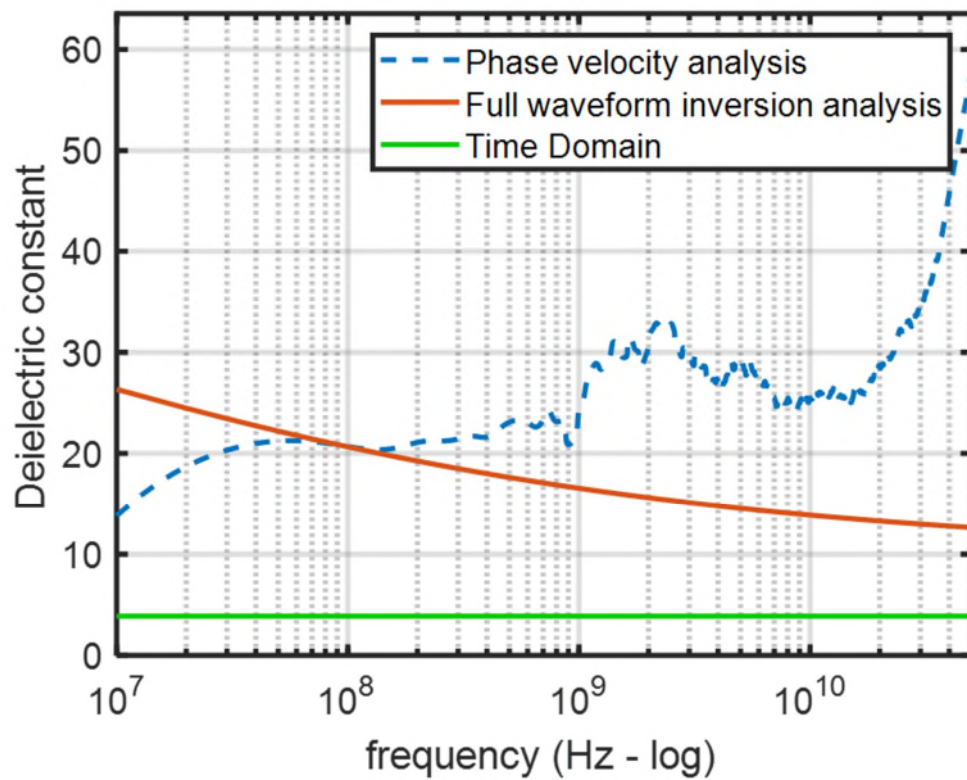


圖 2-120 (第一組, 2021/9/8 15:27:02) Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

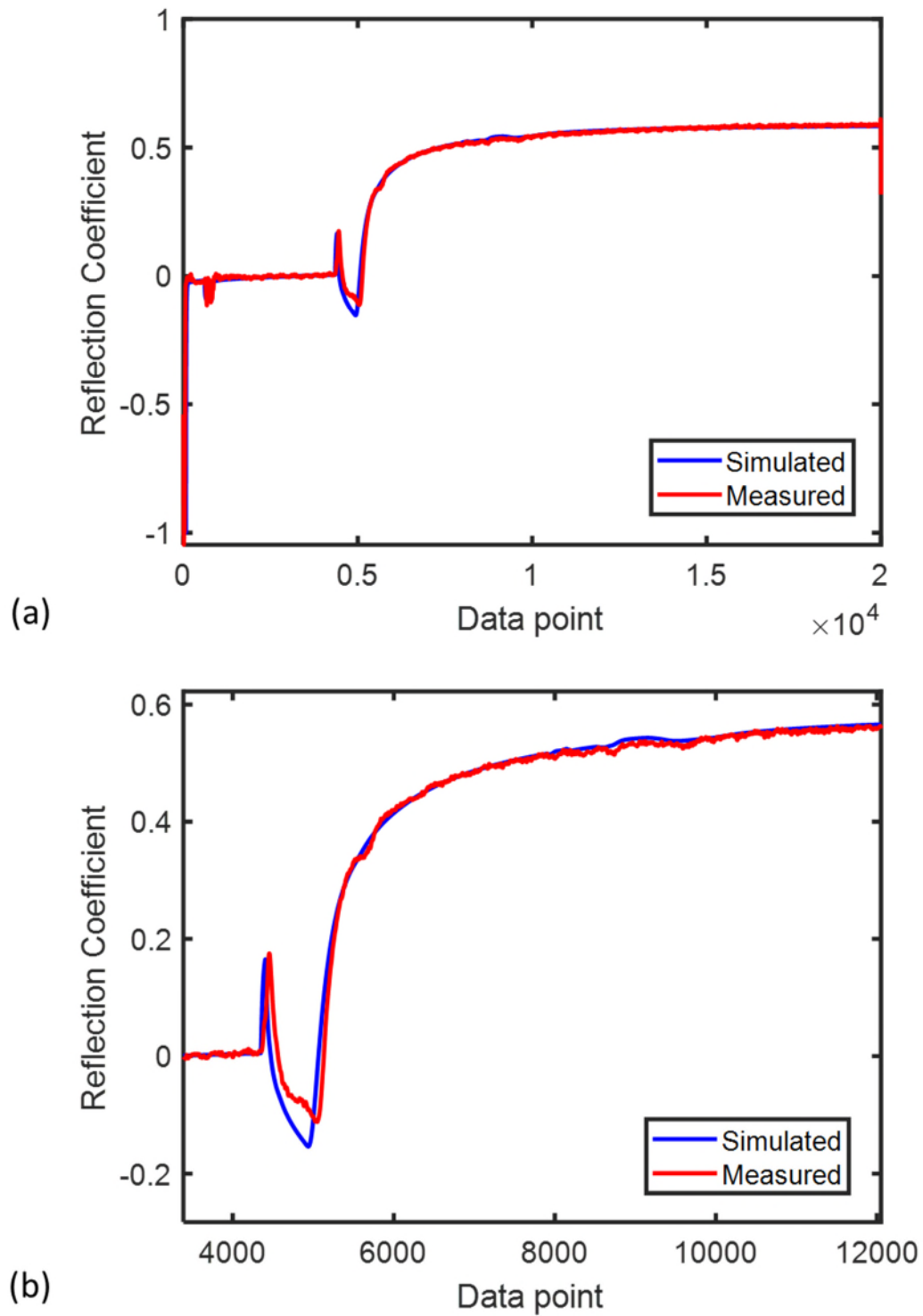


圖 2-121 (第一組，2021/9/16 01:03:32)模擬與量測值對照圖(1×10^{11} Hz 之擷取頻率) (a)完整波型，(b)放大感測段之波型

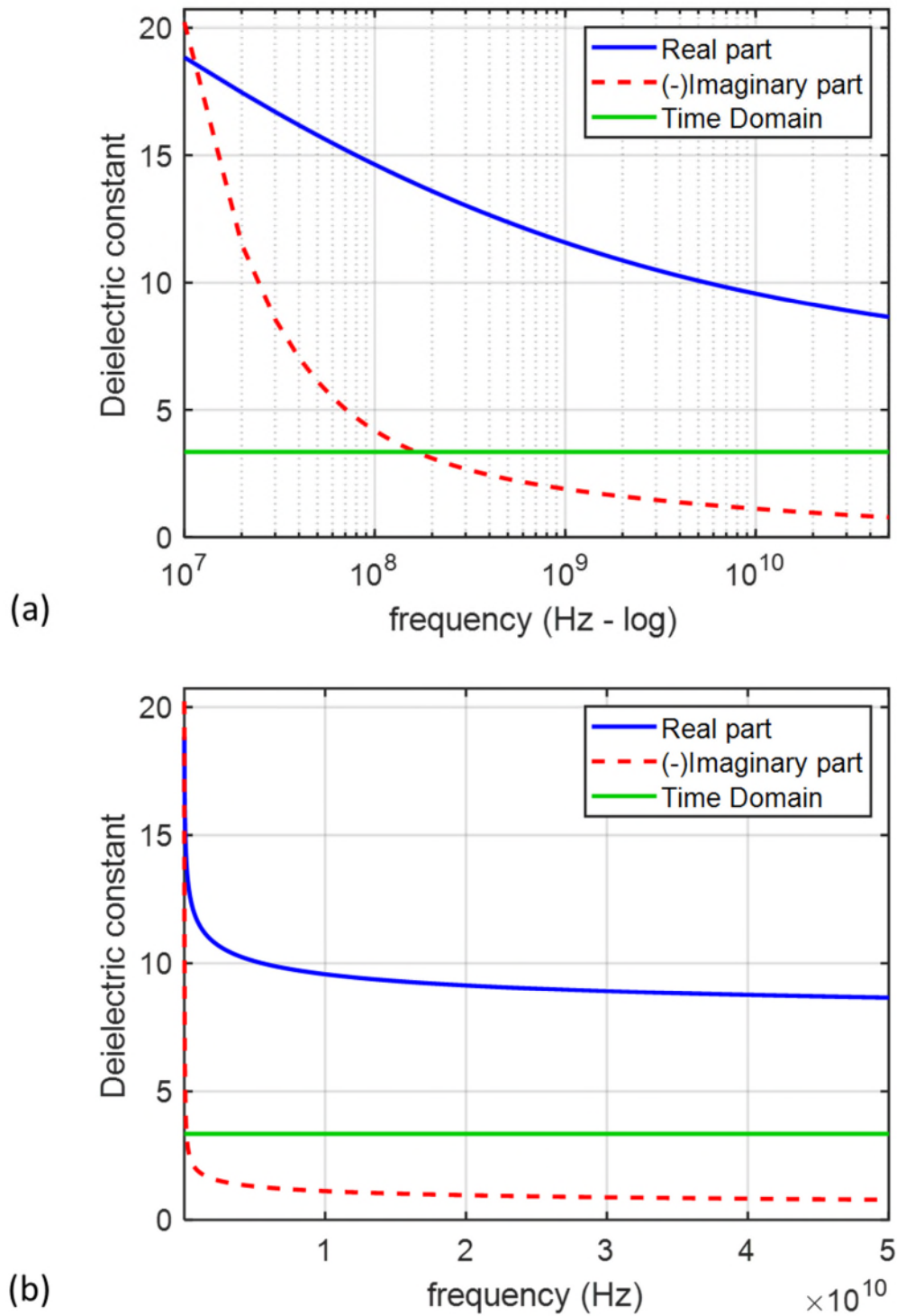


圖 2-122 (第一組, 2021/9/16 01:03:32)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值) (a)x 對軸為對數刻度, (b) x 對軸為正常刻度

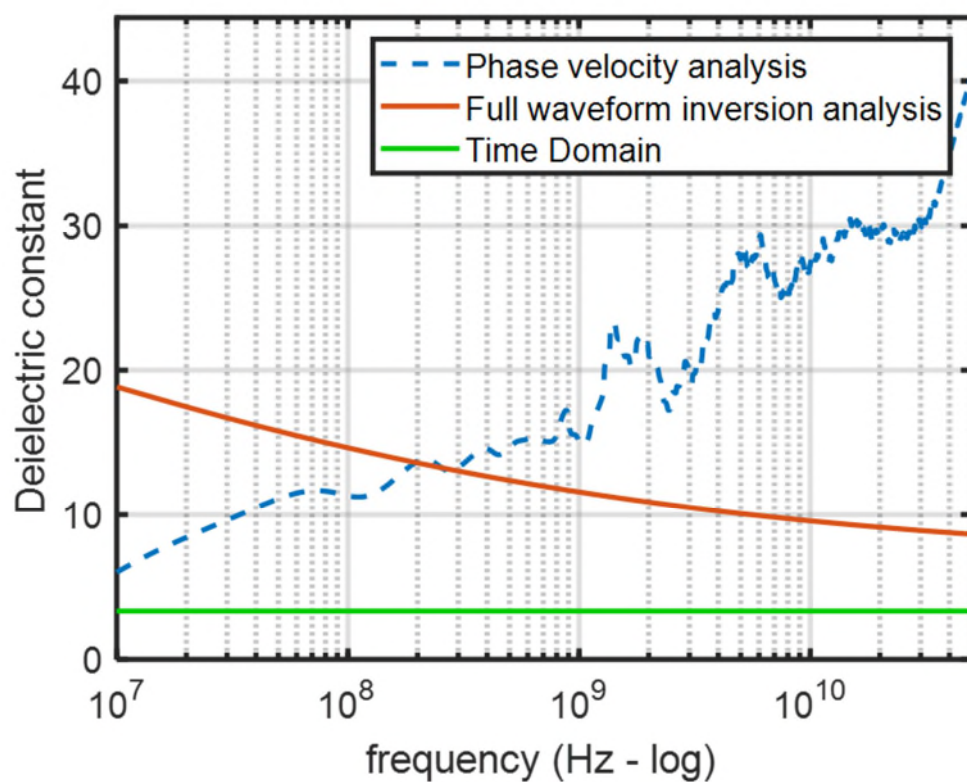


圖 2-123 (第一組，2021/9/16 01:03:32)Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

第三節 第二年研究規劃

一、TDR與離心機物理模型整合

圖 2-124 是國立中央大學土木系的地工離心機 (NCU centrifuge)，其容量為 100 g-ton，標稱旋轉半徑 (nominal radius) 3 m，屬於中尺度的地工離心機。配合離心機掛台空間 (1 m 長、0.55 m 寬、0.72 m 高) 及 4 kN 掛台載重的限制。試驗設備可分為離心機機械主體 (Centrifuge Mechanical Assembly)、電源供應系統 (Power Supply System)、操作者使用之桌面控制系統 (Operator Desk Controller) 三個部分，其中控制系統於 2017 年更新，能更有效率的進行離心模型試驗。

重力係使大地工程結構物受力變形與破壞的最主要因素，根據模型模擬相似性條件，模型內材料的應力狀態必須與原型 (Prototype) 材料的應力狀態相同，這是大地結構模型的主要特點，也是施作大地工程相關模型試驗的困難處。離心模型試驗乃利用人造離心力場，提升工程結構縮尺模型的自重，使其符合原型狀態，根據以下兩項物理原理，應證離心模型理論之正確性：

1. 根據近代相對論，牛頓提出的重力及慣性力是等效的，所以原型承受重力場與縮尺模型承受離心慣性力場，兩者皆適用相同的物理效應。
2. 材料的力學性質主要由電子雲內的電磁力控制，然而電磁力比重力及離心力大的許多，因此改變離心力場並不會使土壤之力學性質改變。

物理模型可以觀察破壞機制、檢核數值或理論模型的正確性且具重複性，但仍然存在尺度效應 (Scale Effect) 此一缺點。為克

服此缺點，在進行縮尺模型試驗時，必需使模型與原型的應力條件完全相同，才能使模型的受力行為與原型一致。離心模型與原型之縮尺比詳列如表 2-8。

基於上述縮尺概念，模型模擬(Modeling of Models)將原型以不同比例之縮尺模型分別於對應的 g 值進行離心模型試驗，探討影響離心模型試驗之誤差，模型模擬的概念可以圖 2-125 表示。假設現地基礎其寬度為 1,000 cm，即圖中之 A1 點，以 1/10 縮尺模型(基礎模型寬度 100 cm)在 10g 的離心力場或以 1/100 縮尺模型(基礎模型寬度 10 cm)在 100g 的離心力場中進行離心模型試驗，即圖中的 A2 與 A3，則 A2 為 A1 的模型，同理 A3 為 A2 以及 A1 的模型，所以 A2 與 A3 的力學行為應該都與原型 A1 相同。但是當試驗土壤顆粒的大小未經縮尺時，各基礎模型所接觸的砂顆粒數量就會不相同，這會影響到模型表現的力學行為。於不同尺寸的模型，其顆粒尺寸效應不盡相同，因此利用離心模型試驗的結果來解釋原型之力學行為，即為一種模型模擬的途徑。

除了物理模型以外，亦可利用現地之觀測資料來進行回饋分析，但是現地試驗的工程浩大且浪費資源，因此利用模型模擬來檢核較為可行。圖 2-125 中 C2、B2、A2 代表在 10g 的離心力場中，分別進行基礎寬度為 1 cm、10 cm 以及 100 cm 的模型試驗會有尺寸效應。圖 2-125 中的 C1、B2、A3 代表 1/100 縮尺模型分別在 1g、10g 以及 100g 進行模型試驗則會有應力大小不同的效應。一個完整有用的離心模型試驗，必須考慮模型尺寸效應及應力大小效應，利用模型模擬預測原型的力學行為。整體而言，離心模型試驗具有下列幾項優點：

1. 降低模型尺寸與時間尺度。

2. 模型與原型承受相同的應力狀態與應力路徑。
3. 可與數值模擬之結果相互驗證。

表 2-8 離心模型與原型之縮尺比

物理量	單位	縮尺比 (離心模型/原型)
應力(Stress)	kPa	1
應變(Strain)	-	1
長度(Linear Dimension)	m	1/N
面積(Area)	m ²	1/N ²
體積(Volume)	m ³	1/N ³
質量(Mass)	kg	1/N ³
密度(Density)	kg/ m ³	1
單位重(Unit Weight)	N/ m ³	N
力(Force)	N	1/N ²
壓密時間(Time: Diffuse)	sec	1/N ²
時間(Time: Dynamic)	sec	1/N
加速度(Acceleration)	m/sec ²	N
頻率(Frequency)	1/s	N



圖 2-124 中央大學土木系之地工離心機

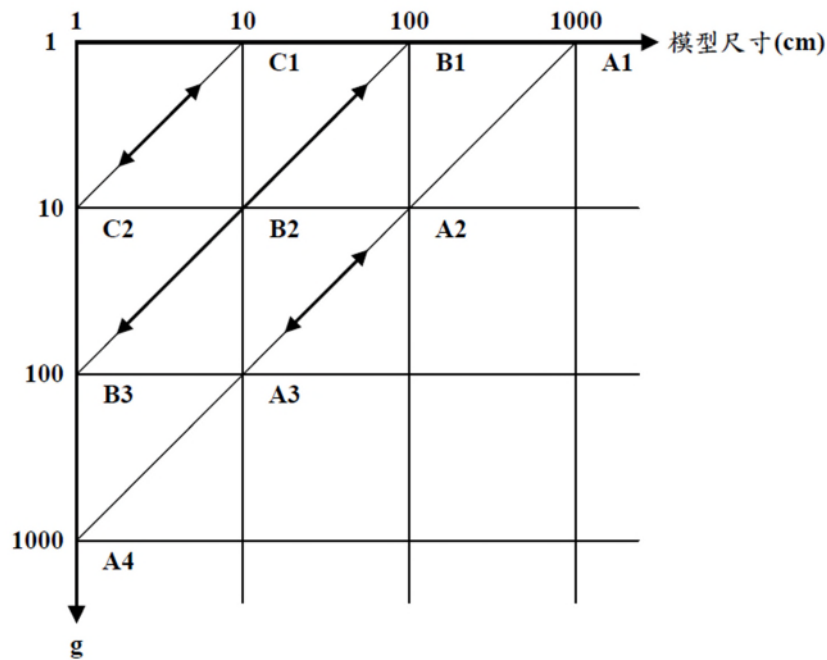


圖 2-125 離心機模型模擬概念圖

二、重力影響因子探討

試體製作利用空氣賁降法製作砂土模型試體，以移動式賁降儀配合固定落距進行試體製作，製作之方法及步驟將敘述於下：

1. 製作試體之前，事先確定需埋設之感測器個數。
2. 將組立好的模型試驗箱置於在可升降之推車上，並置於鋼管下方，微調鋼管出口至試體表面的距離，調整時避免柔性塑膠管有彎曲或折到的情形，以此為砂土賁降高度。
3. 將試驗用砂土，倒入賁降儀漏斗內，待裝入足夠之砂土後，開啟鋼管管口開始進行賁降。

4. 實降路徑採用 U 型迴圈路徑法，使各層之土壤表面保持平整，以確保實降高度維持一定。
5. 實降至預定高度時，放置孔隙水壓計、TDR 感測器、張力計以及溫度計等，並確定感測器之軸向與試驗箱長軸平行，並小心固定訊號線。重複步驟 3、4、5 直到砂土層達到預定高度為止。
6. 由吊秤量得模型試驗箱內之砂土重，再計算得模型砂土層整體之相對密度。

TDR 系統與離心機整合除可參考 [Zornberg and McCartney \(2010a; 2010b\)](#) 之外，也可進一步以 [Xu and Pierce \(2013\)](#) 經驗進行改良，如圖 2-126 所示，以新式 TDR3000 之設備透過目前光纖資料擷取系統進行資料整合，本申請人已初步建立國內首座 TDR 於離心機之整合測試，如圖 2-127 所示(鐘志忠，2019)，並成功進行河堤模型之基樁 TDR 變形感測於 80g 之測試，以及剪力模型於 55g 之測試，分別如圖 2-128 與圖 2-129 所示(Tran, 2020)。因此後續透過離心機物理模型設置，初步可參考上述砂箱配置小型 TDR 感測器與基值吸力感測器，如圖 2-130，將 TDR 感測器以非破壞形式嵌入之模具內，並適當以前述魏士凱(2019)所提出之貫入器率定方法，應可探討土壤電學與水文物理性質關係精進評估，包含從 0 g 至高倍重力加速度之影響。

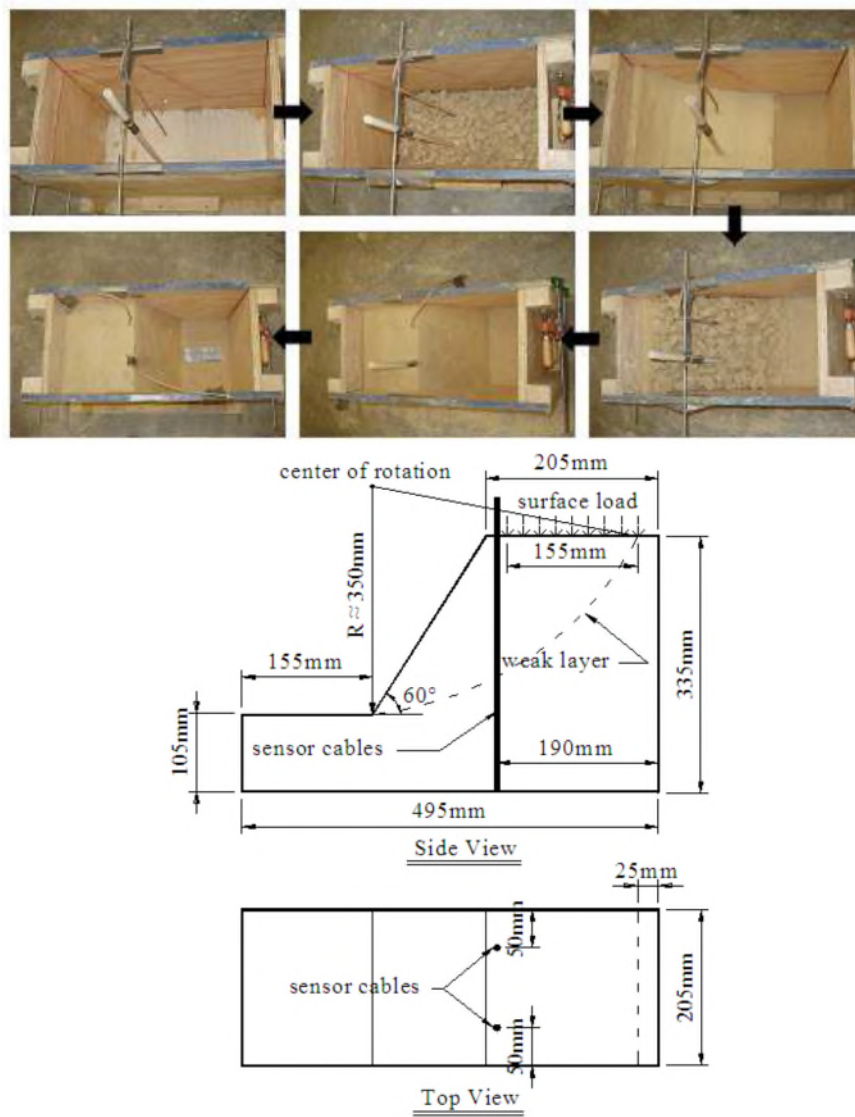


圖 2-126 TDR 纜線於離心機坡地滑動模擬配置(Xu and Pierce, 2013)

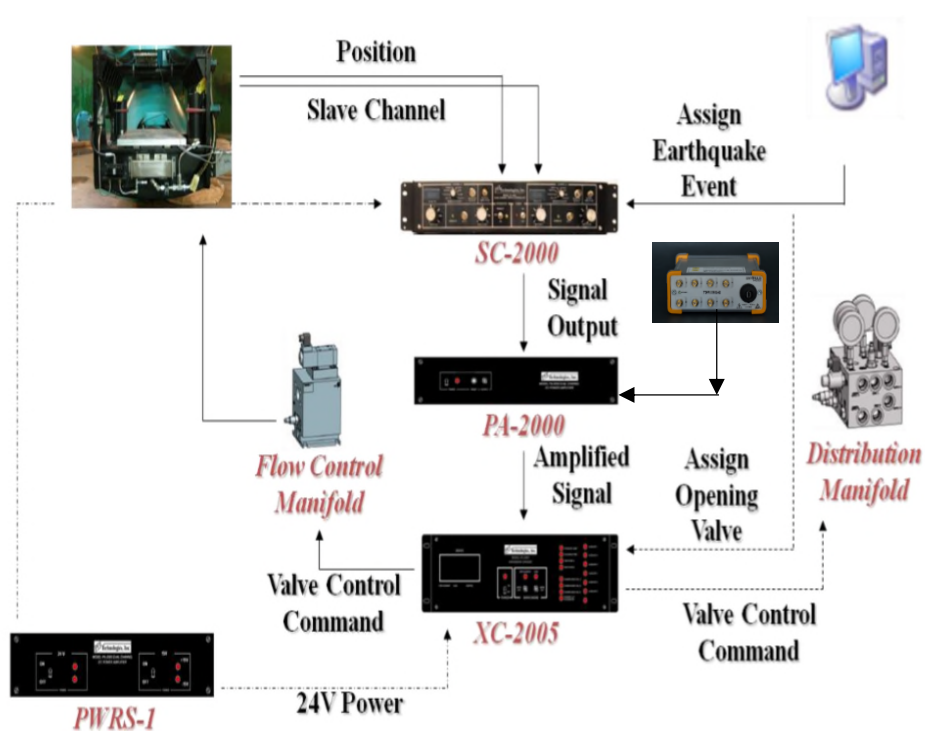


圖 2-127 TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱(鐘志忠，2019)

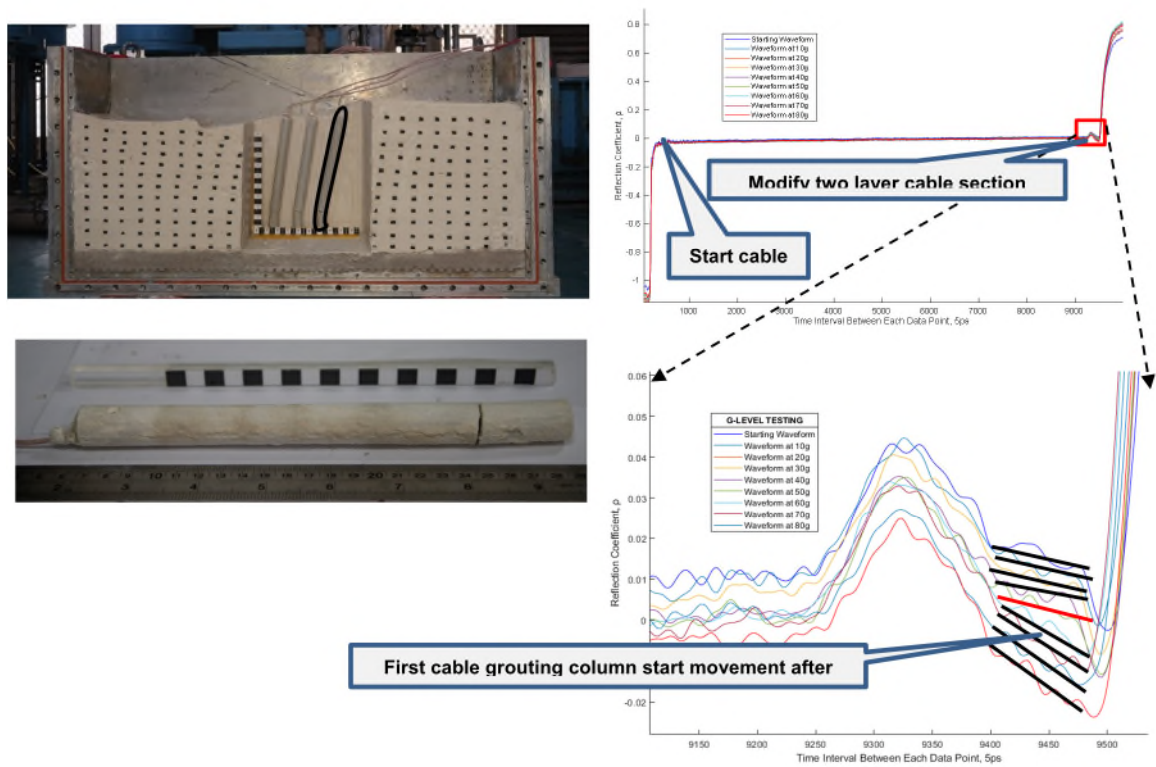


圖 2-128 河堤模型試驗之基礎於不同離心機重力下之 TDR 波形結果(鐘志忠，2019)

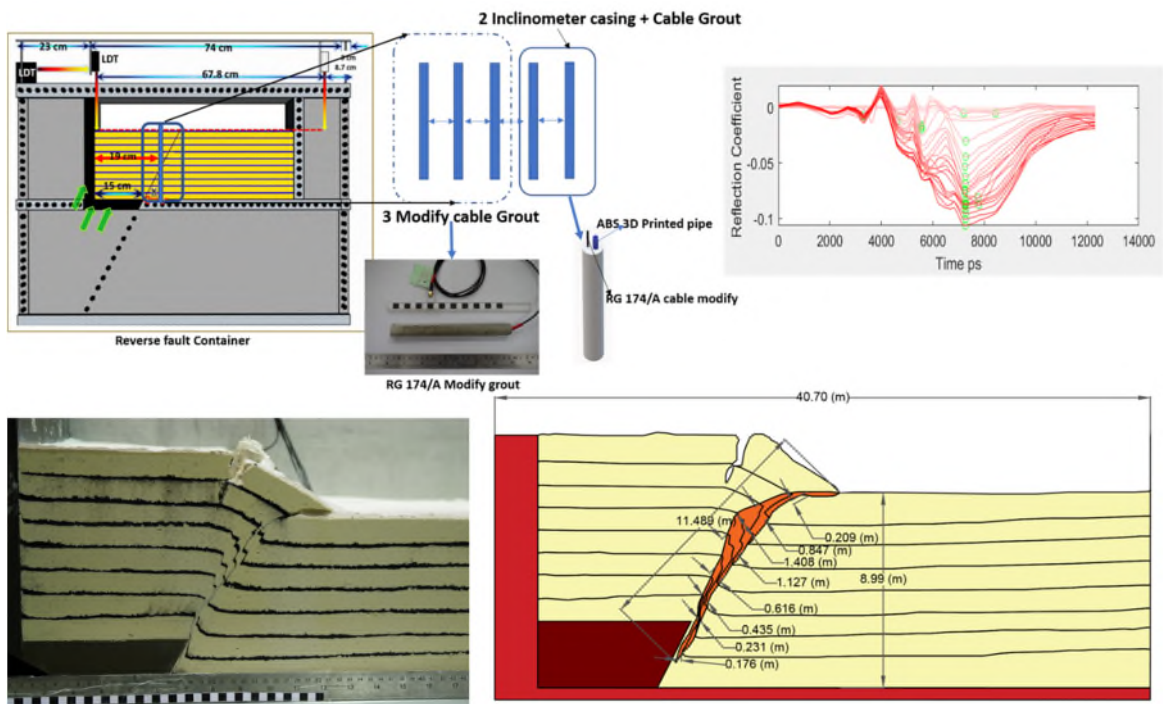


圖 2-129 剪力模型試驗於 55g 離心機重力下之結果(Tran，2020)

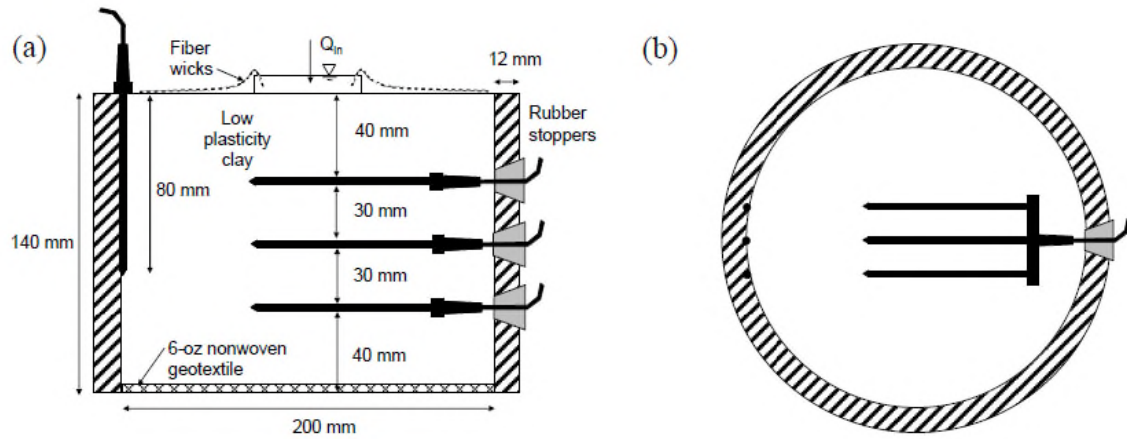


圖 2-130 TDR 於離心機滲透模型之配置(McCartney and Zornberg, 2006)

第四節 第三年研究規畫

一、現地試驗場址說明

國立中央大學復校位置為桃園市中壢區上雙連坡坡面上，如圖 2-131 所示，形狀呈一個梯形，四周長分別為 55 公尺、40 公尺、40 公尺、20 公尺，由於鄰近宵夜街停車場與女十四宿舍受到中央大學校方的關注，且符合淺崩塌地滑，具有設置系統做為測試的價值(簡濟豪 2019)。根據經濟部發表的山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書，國立中央大學校地座落於店子湖層，其主要由下部礫石層和上部紅土層所組成，礫石主要為白色石英岩、暗灰色砂質砂岩、淺灰色砂岩等。其紅土依照 ASTM 及 CNS 等相關規範進行基本物理性質試驗如表 2 所示，依據統一土壤類法其土壤性質屬於 CL。

為針對其坡地穩定性，中央大學宵夜街停車場共設立 3 個測站，如圖 2-132 所示(簡濟豪 2019)，其中測站 1、測站 2 及測站 3 設置 Arduino、三軸加速度計感測器，另包含鐵柱、儀器箱、太陽能板、儲存電力電池等，藉以完成現地防水、固定與自動供電等優勢。三軸加速度計提供 Roll 及 Pitch 的測量，分別是 X 軸與 Y 軸的旋轉矩陣，X 軸為由北向南、Y 軸為由西向東，即 Roll 為測量繞著南北向旋轉矩陣、Pitch 維繞著東西向旋轉。其測站 1 接收之 Roll 資料如圖 2-133 所示。

本研究將擬定承接現有簡濟豪(2019)試驗設備，嘗試加入魏士凱(2019)所研發之 TDR 貫入器，進行分層含水量與介電頻譜量測使用，另外本研究也以 ERT 進行大範圍地區之含水量分布量測，前期沿坡向施測成果如圖 2-134 所示，基於上述 Zhou et al. (2001)、Brunet et al., (2010) 與 Beff et al.(2013)之施作經驗為參考，嘗試將

現地之 TDR 量測資訊，包含進階之介電頻譜與導電度資訊，透過第一年與第二年所建立之土壤介電性質與水文性質關係，回歸至圖 1-1 之執行概念，將觀測資料延伸至現地坡地穩定分析使用。

本研究將擬訂於中央大學之宿舍邊坡作為初步探討，後續驗證可行，預定可延伸至阿里山五彎仔案例分析，或配合水保局執行之大規模崩塌潛勢區進行驗證。

表 2-9 中大紅土基本物性(黃聖棋，2014)

樣本	中大紅土
細粒料含量(%)	75
土壤比重 G_s	2.6
液性限度 LL(%)	43.85
塑性限度 PL(%)	22
塑性指數 PI(%)	21.85
統一土壤分類	CL



圖 2-131 中央大學宵夜街停車場無人機建模(簡濟豪 2019)



圖 2-132 現地 Arduino 三軸加速度計測站(簡濟豪 2019)

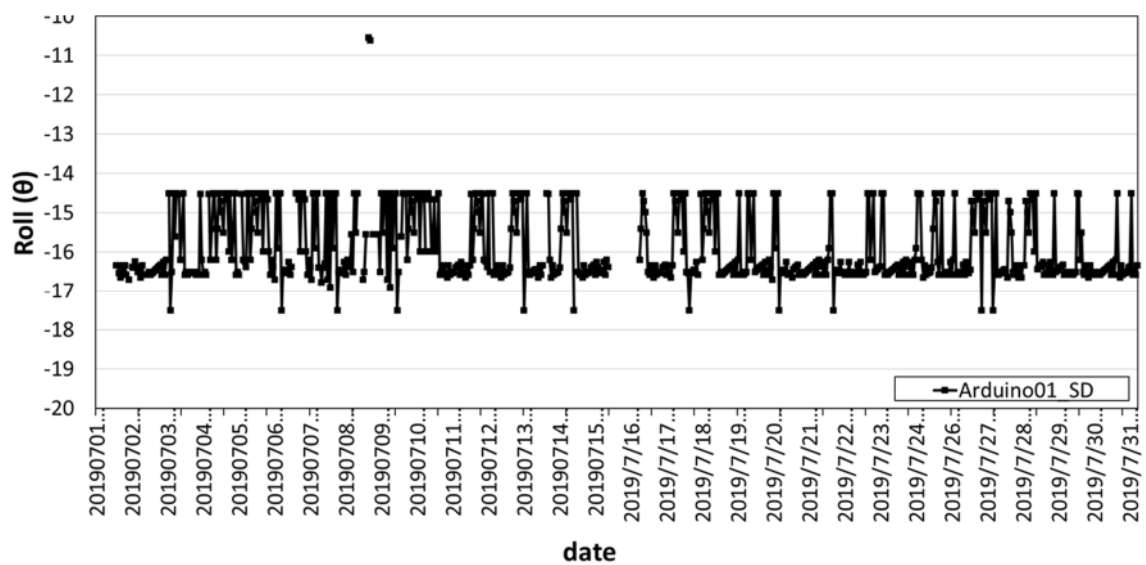


圖 2-133 現地 Arduino 測站 1 之 Roll 監測資料

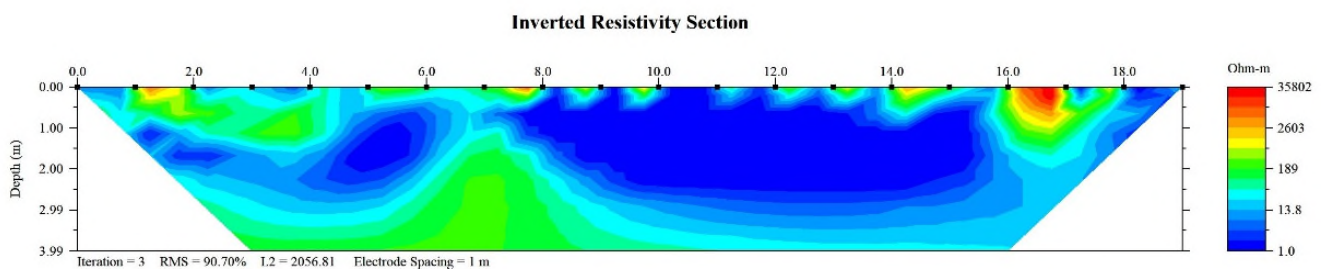


圖 2-134 現地 ERT Schlumberge 方法成果

二、數值分析與不確定性探討

本研究將初步配上述中央大學場址之地層材料試驗與地質資料收集與調查，完成地質模型，並初步擬定採用 SEEP/W 與 SLOPE/W 軟體進行非飽和土壤下之傳統極限平衡分析。另外本計畫擬定基於 Lu et al. (2012) 研究成果，以 Local factor of safety (LFS) 之概念，並配合 Hybrid finite element limit-equilibrium 方法進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析。LFS 定義如下：

$$LFS = \frac{2 \cos \phi'}{q'} (c' + p' \tan \phi') \quad (39)$$

其中 p' 與 q' 為一般土壤應力參數。 p' 與 q' 應力參數則可參考圖 2-135 所示，其公式整理如下

$$\begin{cases} p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma^s \\ q' = \sigma_1' - \sigma_3' = \sigma_1 - \sigma_3 \end{cases} \quad (40)$$

其中有效主應力可改寫為：

$$\begin{cases} \sigma_1' = \sigma_1 - u_a - \sigma^s \\ \sigma_3' = \sigma_3 - u_a - \sigma^s \end{cases} \quad (41)$$

而土壤基值吸力 σ_s 則為：

$$\begin{cases} \sigma^s = -(u_a - u_w) & \text{as } u_a - u_w \leq 0 \\ \sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} & \text{as } u_a - u_w \geq 0 \end{cases} \quad (42)$$

有關於滲流分析部分，若有已知或監測之降雨資料，則配合常用之暫態非飽和流 (Transient unsaturated flow) 之 Richard's 方程式：

$$\nabla \cdot K(h) \nabla H + W = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} K(h) = \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \quad (43)$$

其中 $K(h)$ 為水力傳導函數 (Hydraulic conductivity function, HCF) ; h 為壓 (張) 力水頭, 若為張力水頭, 則 $h=(u_a-u_w)/\gamma$, γ 為濕土單位重; H 為總壓力頭 (Total head $H=h+z$); W 為滲流來源所提供一通量; $\theta(h)$ 則是已知之現地土壤水分特徵曲線 SWCC。Lu et al. (2012) 參考上述公式, 將 $K(h)$ 改寫如下:

$$K(h) = K_{sat} \frac{\left\{ 1 - (\alpha|h|)^{n-1} \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2n}}} \quad (44)$$

若採用一般 Richard's 方程式或配合 SEEP/W 演算, 可由降雨歷時估計現場不同時間下之壓 (張) 力水頭 h , 濕土單位重 γ , 以及土壤含水量 θ_{est} , 當然此一部分估計的含水量與 TDR 實測含水量 θ_{TDR} 不盡相同, 因此本研究將以現場 TDR 監測值回饋修訂上述 Richard's 公式或 SEEP/W 結果, 後續才可進一步依照下式進行總應力分析如下:

$$\nabla \cdot (\sigma) + \gamma(\theta)b = 0 \quad (45)$$

其中 σ 為 2 維平面下之應力張量 (stress tensor), b 為體力單位向量 (Unit vector of body force)。

透過上述相關步驟執行, 並配合本研究預定採購之 COMSOL 有限元素軟體 Geomechanics 與 Porous Media Flow 模組 (本申請人已有主程式), 參考 Shao and Bogaard (2014) 之建議, 將上述分析程序建置至相關模組內, 以計算坡面不同時間與不同位置下之 LFS, LFS 方法不同於既有 SLOPE/W 極

限平衡分析（圓弧滑動破壞面）之分析結果，可凸顯局部坡面破壞型態，如圖 2-136 所示。

本研究預計之不確定性分析流程如圖 2-137 所示，首先基於第 1~2 年有關介電頻譜於不同環境因子與動態入滲影響下，提出導電度與含水量關係率定之助益，後續透過現地取得 ERT 電阻剖面下，可由上述成果以及 TDR 所提供之單點現地 θ_{TDR} 與 EC_{TDR} 率定關係，將電阻剖面轉換為大範圍之含水量 θ_{ERT} 剖面與 SWCC 資訊。如此一來，綜合本研究第 1~2 年成果考慮量測之變異性與其中不確定性後，依照 LFS 方法以 COMSOL 有限元素分析軟體以及 HYDRUS 搭配 GuoCube 進行穩定分析；另一方面可由理論(預定透過 SEEP/W)求取入滲含水量 θ_{set} 估計值，再配合 SLOPE/W 進行傳統圓弧滑動分析，進而再與 LFS 進行差異比較，如圖 2-136 所示。

綜合以上各項流程，圖 2-137 初步也提出可能之誤差來源，基於現地案例分析或是延伸之靈敏度評估，應可了解觀測資料與理論估計之使用限制與可信範圍，能更有效判釋全域與局部邊坡滑動穩定性。

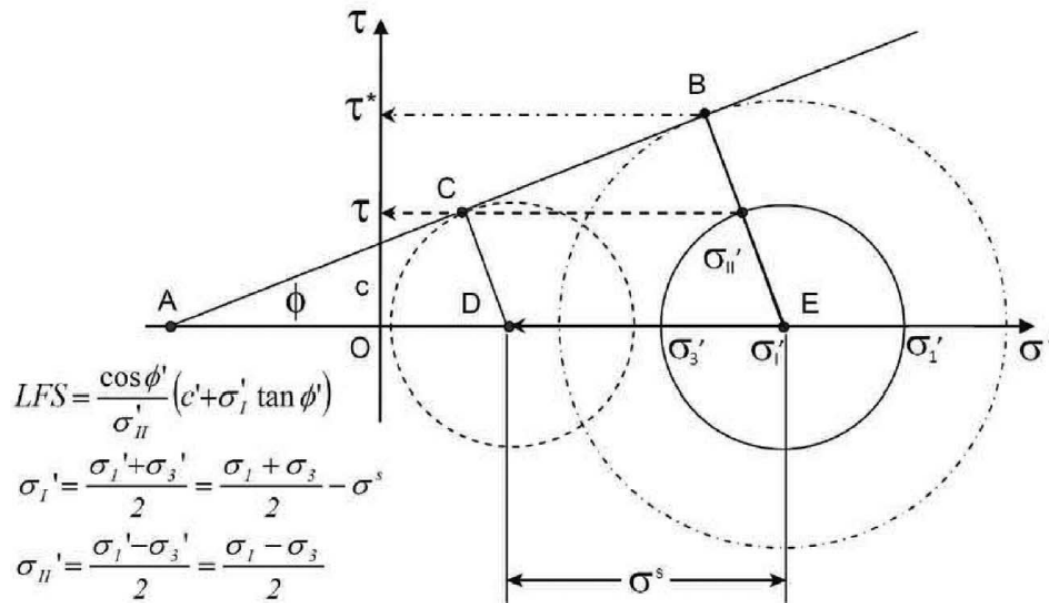


圖 2-135 LFS 莫爾庫倫應力圖 (Lu et al. 2012)

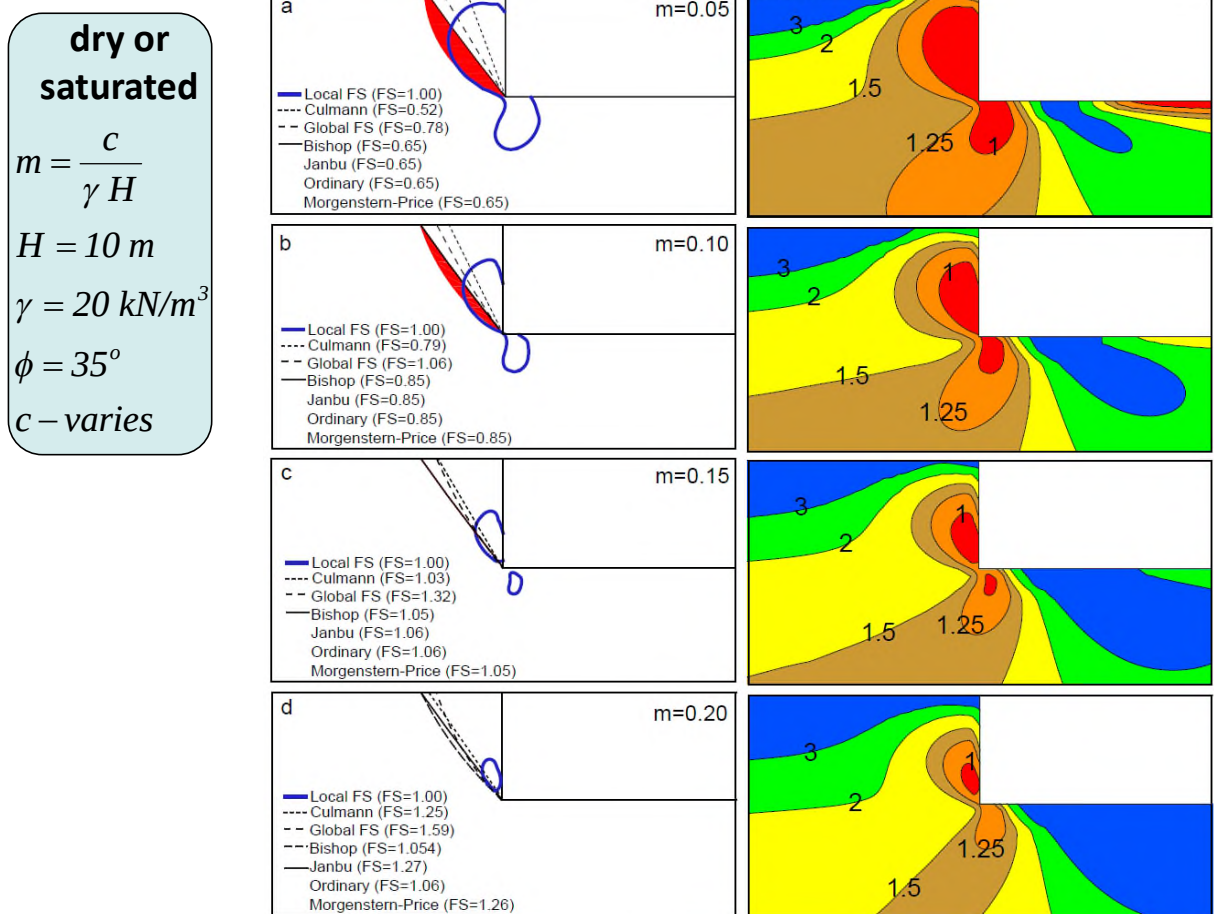


圖 2-136 極限平衡法與 LFS 分析結果比較(Lu et al. 2012)

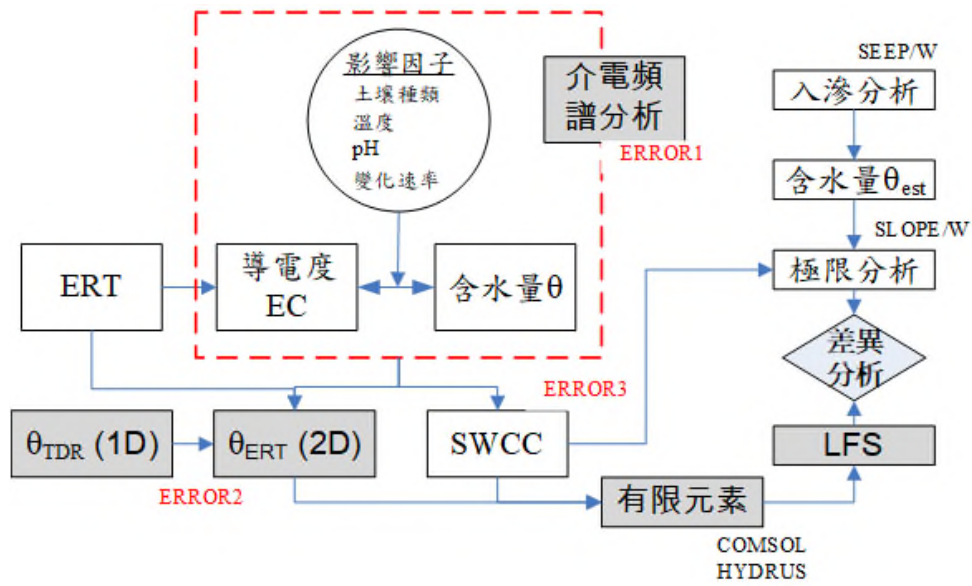


圖 2-137 不確定性分析流程(灰色區塊為本研究研發項目)

第三章 工作進度與交付項目

第一節 重要工作項目

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施地點	備註
	單位	全程計畫 目標 110 年 02 月至 110 年 12 月	至 110 年 度止累計 成果	本年度預 定目標	水保局 經費	其他配 合經費		
科技落實	項	1	0	1	400	0	國立中央大學	擬定進行 TDR 改良壓力鍋與砂箱，可充分探討土壤種類與密度，以及不同環境因子，包含溫度、pH 值的影響因子之不確定性，乃至於實際入滲與乾燥速率動態探討。
科技創新	項	1	0	1	312	0	國立中央大學	網路分析儀以及租賃簡易型 VNA 分析儀，並以壓力鍋以及砂箱 TDR 試驗資料進行上述三種介電頻譜分析方法之比對與驗證，提出土壤介電頻譜影響因子以及量測不確定分析
研究報告	本	1	0	1	10	0		研究成果報告一份

第二節 預定進度

重要工作項目	工作比重 %	預定進度	110				備註
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月	
科技落實	45	工作量 或內容	壓力鍋與砂箱模型建置	壓力鍋與砂箱模型初步測試	壓力鍋與砂箱模型影響因子探討	壓力鍋與砂箱模型影響因子探討	擬定進行 TDR 改良壓力鍋與砂箱，可充分探討土壤種類與密度，以及不同環境因子，包含溫度、pH 值的影響因子之不確定性，乃至於實際入滲與乾燥速率動態探討。
		累計百分比	25	40	75	100	
科技創新	50	工作量 或內容	VNA 分析儀初步測試	VNA 模型建立	VNA 模型試驗與分析	VNA 模型試驗與比對	網路分析儀以及租賃簡易型 VNA 分析儀，並以壓力鍋以及砂箱 TDR 試驗資料進行上述三種介電頻譜分析方法之比對與驗證，提出土壤介電頻譜影響因子以及量測不確定分析
		累計百分比	25	40	75	100	
研究報告	5	工作量 或內容	架構擬定	期中進度彙整	檢討與整理	期末成果彙整	
		累計百分比	10	40	80	100	
累計總進度	百分比		24	40	75	100	

第四章 結論與建議

第一節 結論

1. 本研究第一年規劃建立改良型之 TDR 壓力鍋、砂箱試驗，配合 TDR 介電頻譜技術，增加頻率域上之介電行為，並以 VNA 設備進行驗證，以連結土壤水文、環境以及力學因子，評估觀測值與影響因子間之不確定性。
2. 目前砂箱工作初步完成，也完成首次 TDR 介電頻譜方法測試分析，目前持續進行不同因子試驗探討。前期研究表明 PVA 在 100M Hz 與 1G Hz 的介電頻譜相對於其他頻率具有可靠度，但透過砂箱試驗觀察其 PVA 在 100M Hz 與 1G Hz 的介電常數與 TDR 全反算分析的部分相當，推估在土壤較濕潤與較低導電度時使用 PVA 來分析介電頻譜的穩定度較佳。

第二節 建議

TDR 壓力鍋與 VNA 模具也受到疫情影響，後半段執行期才由國外進口完成，目前已經初步完成 TDR 壓力鍋加工處理與轉接器銜接部分，建議第二年度持續配合執行。VNA 標定項目已經初步完成，初步完成與砂箱試驗比較，確認試驗之可行性，未來可持續探討相關因子試驗成果。

第三節 預期成效

1. 本計畫主要進行本土性基礎監測技術實力培植外，一方面也接軌國際研究趨勢，可作為未來基礎資料與海量資料 (Big data) 供應者。另外配合不同量測技術以及元件，應有餘裕(redundant)之數據

互相進行合理性與準確性評估，而得到可能較佳之結果。整體可有效提供深/淺層崩塌基本資料需求。

2. 對於本計畫參與之研究生，除了可強化其本身於主要課題之基礎知識，兼具力學、統計與作業研究等分析能力外，至少可獲得不同領域之量測技術，例如資料擷取原理、基本訊號分析與電子電路處理等，對於未來工程實務應用，將具備多元基礎能力，助於培養具有跨領域之工程師。另外透過本計畫基礎量測技術測試與改良過程，應可訓練其觀察現象、提出問題與解決問題的邏輯觀念養成。
3. 本計畫相關監測元件開發、整體設備與量測方法成果可申請專利 1 項，國內外學術研討會 3 篇，以及學術 SCI 期刊發表 2 篇論文。

參考文獻

1. 曾介君 (1996)，利用終端反射 TDR 方法探討土壤之未飽和傳輸特性，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
2. 林宏達與拱祥生 (2001)，不飽和土壤力學性質試驗及其在邊坡工程之應用，地工技術，83 期，39-52。
3. 周南山 (2005)，山區道路邊坡災害防治，森林遊憩設施規劃設計與施工研習會。
4. 陳岱源 (2005)，修正型水筒模式應用於基流分離之研究，國立成功大學碩士論文。
5. 林德貴，陳啟天，徐森彥，蘇苗彬 (2007)，梨山地滑區降雨滲流及穩定性分析，水土保持學報 39 (4)，419 - 451。
6. 張舒婷 (2007)，土壤水分特性曲線與不飽和水力傳導度之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
7. 姚奕全 (2007)，應用地電阻法於崩積層含水特性調查與監測之初探，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
8. 吳瑋晉 (2008)，結合地電阻法與 TDR 於土層含水特性之監測，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
9. 林哲毅 (2009)，土壤電阻率與含水特性關係之探討，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
10. 鄭清江，譚志豪，鍾明劍，李錦發，費立沅 (2009)，莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例，地工技術，第 122 期，133-142。
11. 辜炳震，蕭震洋，林伯勳，梁惠儀，鄭錦桐，(2009)，建立石門水庫集水區豪雨誘發淺層崩塌之土方量推估模式，中華民國第 13 屆大地工程研討會。
12. 蕭新財 (2011)，不飽和崩積土壤淺層水文特性對邊坡穩定影響之研究，國立臺灣科技大學碩士論文。
13. 黃聖棋 (2014)，地工織物加勁土壤之承载力影響因子探討-以中大紅土為例，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
14. 曾燕翔 (2015)，動態毛細壓力於土壤保水曲線之變化分析及現地長期入滲監測試驗，國立臺灣海洋大學應用地球科學研究所碩士論文。
15. 謝昀達、邱永嘉(2018)，以導電度量測結果推估未飽和層土壤水力傳係數之初探，第十屆地下水資源及水質保護研討會暨 2018 海峽兩岸地下水與水文地質應用研討會，桃園。
16. 魏士凱 (2019)，Modification of TDR Penetrometer for Water

- Content Profile Monitoring，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
17. 簡濟豪 (2019)，淺層崩塌物聯網系統與深層型時域反射邊坡監測技術之整合，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
 18. 鐘志忠 (2019)，淺層崩塌可犧牲式元件與深層型時域反射邊坡監測技術之整合研發，水土保持局。
 19. Tran, Van-Nhiem, (2020)，Improved TDR Deformation Monitoring by Integrating Centrifuge Physical Modelling，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
 20. Archie, G. E., (1942), “Electrical-Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics,” Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers,. 146, 54-62.
 21. Arulanandan, K. and Smith, S. S., (1973), “Electrical dispersion in relation to soil structure,” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99, No. SM12, 1113-1133.
 22. A. Wilczek, A. Lewandowski, M. Kafarski, A. Szyplowska, J. Szerement, and W. Skierucha, “Złacze linii współosiowych lub falowodowych oraz sposób
 23. Beff, L., Gunther, T., Vandoorne, B., Couvreur, V., Javaux, M., (2013). Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 595 – 609.
 24. Bai, W., Kong, L.-W., Guo, A., 2013. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. J. Rock Mech. Geotech. Engin., 5(5), 406 – 411.
 25. Brunet, P., Clement, R., Bouvier, C., 2010. Monitoring soil water content and deficit using electrical resistivity tomography (ERT) - A case study in the Cevennes area, France. J. Hydrol. 380(1), 146-153.
 26. Bordoni, M., Meisina, C., Valentino, R., Lu, N., Nittelli, M., Chersich, S., 2015. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis. Engin. Geol., 193, 19-37.
 27. Chapuis, R. P. and Aubertin, M. (2003), “On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils,” Canadian Geotechnical Journal, 40(3), 616-628, 10.1139/t03-013.
 28. Cho, S.-E., 2016. Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall infiltration, Engin. Geol., 211, 184-197.
 29. Cho, S.-E., 2017. Prediction of shallow landslide by surficial stability analysis considering rainfall infiltration, Engin. Geol., 231, 126-138.

30. Chung, C.-C. (2008), “Improved Time Domain Reflectometry Measurements and Its Application to Characterization of Soil-Water Mixtures” , Ph.D. Thesis, Chiao Tung University, Taiwan, R. O. C.
31. Chung, C.-C. and Lin, C.-P., (2011) “High concentration suspended sediment measurements using time domain reflectometry,” *Journal of Hydrology*, 401, 134-144.
32. Chung, C.-C and Lin, C.-P., (2009) “Apparent Dielectric Constant and Effective Frequency of TDR Measurements: Influencing Factors and Comparison” , *Vadose Zone Journal*, Vol. 8, No. 3: 548-556.
33. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Chen, P.-H., Wu, I.-L., and Tsay, T.-K., (2013) “New TDR waveguide and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage,” *Journal of Hydrology*, 505, 346-351.
34. Chung, C.-C., Lin, C.-P, Yan, S.-H. Lin, J.-Y., and Lin, C.-H. (2019) investigation of non-unique relationship between soil electrical conductivity and water content due to drying-wetting rate using TDR, *Engineering Geology*, 252, 54-64.
35. Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., and EL-Rayes, M. A., (1985), Microwave dielectric behavior of wet soil part II: dielectric mixing models, *IEEE Trans. Geoscince and Remote sensing*, Vol. GE-23, pp. 35-46.
36. Dowding, C. H., Su, M. B., and O'Connor, K. M., (1988). "Principles of time domain reflectometry applied to measurement of rock mass deformation," *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 25, 287-297.
37. Dowding, C. H. and Pierce, C. E., (1994). “Use of time domain reflectometry to detect bridge scour and monitor pier movement,” *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmenal, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, Sept 7-9, U.S. Bureau of Mines, Special Publication SP 19-94, NTIS PB95-105789, 579-587.
38. 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.
39. Fernández, D.M., Arrúe, J.L., López, V.P.M.V., (2008). A TDR-pressure cell design for measuring the soil-water retention curve, *Soil and Tillage Research*, 100, 1 – 2, 114-119.
40. Fredlund, D. G., (1987), “Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction,” *Slope Stability*, Edited by Anderson, M. G. and Richards, K. S., John Wiley and Sons Ltd.
41. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons.

42. Fredlund, D. G., Xing, A., and Huang, S., (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve," *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533-546.
43. Hasted, J. B., 1973, *Aqueous Dielectrics*, Chapman and Hall, London.
44. Heimovaara, T. J., (1994), Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms: 1 measurement of the complex dielectric permittivity of soils, *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 189-199.
45. Hilhorst, M. A. and Dirkson, C., (1994), Dielectric water content sensors: time domain versus frequency domain, *Symposium and Workshop on Time domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, IL., Spec. Publ. SP 19-94, pp. 23-33.
46. Hollywood, P. M. (1997). "TDR level measurement," *Meas. Control*, 31(6), 94 – 98.
47. Jeong S., Lee, K., Kim, J, Kim, Y., 2017. Analysis of rainfall-induced landslide on unsaturated soil slopes, *Sustainability*, 9, 1280; doi:10.3390/su9071280.
48. José M.-C., Pereira, J.-M., Delage, P., Cui, Y.-J., 2012. The influence of changes in water content on the electrical resistivity of a natural unsaturated loess. *ASTM Geotech. Testing J.*, 35(1), 11-17.
49. Kadoya, M. and Tanakamaru, H., (1988) "Flood runoff forecasting with long and terms runoff model," 6th APRD International Association of Hydraulic Research, Kyoto, Japan, 183-190.
50. Klein, K. and Santamarina J.C. (2003), *Electrical Conductivity in Soils: Underlying Phenomena*, *Journal of Environmental Engineering Geophysics*, 8, 4, 263-273.
51. Knight, R., (1991), Hysteresis in the electrical resistivity of partially saturated sandstones: *Geophysics*, 56, 2139 – 2147.
52. Lewandowski, A., Szyplowska, A., Kafarski, M., Wilczek, A., Barmuta, P., & Skierucha, W. (2017). 0.05 – 3 GHz VNA characterization of soil dielectric properties based on the multiline TRL calibration. *Measurement Science and Technology*, 28(2), 024007.
53. Lewandowski, A., Szyplowska, A., Wilczek, A., Kafarski, M., Szerement, J., Skierucha, W. (2019) One-Port vector network analyzer characterization of soil dielectric spectrum, *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 57, 6, 3661-3675.
54. Lin, C. -P. (1999). *Time domain reflectometry for soil properties*. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
55. 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.
56. Lin, C-P, Tang, S.-H, and Chung, C.-C., (2006a) "Development of TDR Penetrometer through Laboratory Investigations: 1. Measurement of Soil Dielectric Constant," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 4, Paper ID: GTJ14093.
57. Lin, C-P, Chung, C.-C., and Tang, S.-H., (2006b) "Development of TDR Penetrometer through Laboratory Investigations: 2. Measurement of Soil Electrical Conductivity," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 4, Paper ID: GTJ14315.
58. Lin, C. P., Chung, C. C., and Tang, S. H., (2007), "Accurate TDR Measurement of Electrical Conductivity Accounting for Cable Resistance and Recording Time," *Soil Science Society of America Journal*, 71 : 1278-1287
59. Lin, C.-P., Chung, C.-C., Huisman, J. A., and Tang, S.-H., (2008) "Clarification and calibration of reflection coefficient for electrical conductivity measurement by time domain reflectometry," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1033-1040.
60. Lin, C.-P. and Tang, S.-H. (2005). " Development and calibration of a TDR extensometer for geotechnical monitoring," *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), Paper ID: GTJ12188.
61. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, W.-C., and Chung, C.-C., (2009). "Quantification of cable deformation with TDR: implications to landslide monitoring," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(1), 143-152.
62. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, C.-H., and Chung, C.-C., (2015) "An improved modeling of TDR signal propagation for measuring complex dielectric permittivity," *Journal of Earth Science*, 26(6), 827-834.
63. Lin, C.-P., Chung, C.-C, Wu, I.-L., Wu, P.-L., Lin, C.-H., and Wu, C.-H., (2016) "Extensive monitoring system of sediment transport for reservoir sediment management," Chapter 10, *Natural Resources and Control Processes*, Ed. by L.K. Wang, M.H.S Wang, Y.T. Hung, and N.K. Shamma, *Handbook of Environmental Engineering*, Volume 17, Springer Science, USA.
64. Lin, C.-P, Wang, K., Chung, C.-C., and Weng, Y.-W. (2017a) "New types of TDR sensing waveguides for bridge scour monitoring," *Smart Materials and Structures*, DOI: 10.1088/1361-665X/aa71f9.
65. Lin, C.-P, Ngui Y.J., Lin, C.H. (2017b) A novel TDR signal processing technique for measuring apparent dielectric spectrum, *Meas. Sci. Technol.* 28, 015501.
66. Logsdon (2005). *Soil Dielectric Spectra from Vector Network*

- Analyzer Data, Soil Sci. Soc. Am. J., 69, 983 – 989.
67. Lu, N., Godt, J., (2008). Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. Water Resour. Res. 44(11), doi: 10.1029/2008WR006976.
68. Lu, N., Sener-Kaya, B., Wayllace, A., And Godt, J.W., (2012) “Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety,” Water Resources Research, 48, W09524, doi: 10.1029/2012WR011830.
69. McCartney, J.S., and Zornberg, J.G. (2006) TDR System for Hydraulic Characterization of Unsaturated Soils in the Centrifuge.” Proceedings of the TDR. Third International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications, West Lafayette, Indiana, September 11-17, pp. 1-12
70. Mojid M. A, Rose D. A, and Wyseure G. C. L. (2007). A model incorporating the diffuse double layer to predict the electrical conductivity of bulk soil. European Journal of Soil Science 58: 560-572.
71. Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., and Prather, R. J., (1976) “Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity,” Soil Science Society of America Journal, 40, 651 – 655.
72. Sauer, M. C., et al., (1955), “Electrical Conductance of Porous Plugs Ion Exchange Resin-Solution System,” Industrial and engineering chemistry, Vol. 47, No. 10, pp. 2187-2193.
73. Shan, P. H. and Singh, D. N., (2005), “Generalized Archie’ s Law for Estimation of Soil Electrical Conductivity,” Journal of ASTM International, 2, 5, 145-164.
74. Shao, W., Bogaard, T.A. (2014) How to Use COMSOL multiphysics for coupled dual-permeability hydrological and slope stability modeling, Procedia Earth and Planetary Science, 9, 83 – 90.
75. Simunek, J., Wendroth, O., van Genuchten, M.T., (1999). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments, Water Resources Research, 35(10), 2965-2979.
76. Skierucha, W., Wilczek, A., (2010). A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10 – 500 MHz frequency range, Sensors, 10, 3314-3329; doi:10.3390/s100403314.
77. Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., (1980). “Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines,” Water Resource Research,

- doi.org/10.1029/WR016i003p00574.
78. Van Genuchten, M. Th. and Nielsen, D. R., (1985), “On Describing and Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils,” *Annales Geophysicae*, Vol.3, 615-628.
 79. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W., (1996), “Model for Prediction of Shear Strength with respect to Soil Suction,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 379-392.
 80. Vaz, C.M.P., Hopmans, J.W., Macedo, A., Bassoi, L.H., Wildensehild, O., (2002). Soil water retention measurements using a combined tensiometer-coiled time domain reflectometry probe, *Soil Science Society of American Journal*, 66(6), 1752-1759.
 81. Xu, Z. Pierce, C.E., (2013). TDR-based shear deformation measuring system for slope failure modeling. *Advanced Materials Research*, 639-640, 1155-1161.
 82. Xu, J., Jones, S.B., Sheng, W. (2019) Factors influencing minivna-based dielectric measurements using bilinear analysis, *EGU General Assembly 2019*, Vienna, Australia.
 83. Yankielun, N. E. and Zabilansky, L. (1999). “Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 1279-1283.
 84. Zhou, Q.-Y., Shimada, J., Sata, A., 2001. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.* 37(2), 273-285
 85. Zornberg, J.G. and McCartney, J.S., (2010a). Centrifuge permeameter for unsaturated soils. I: theoretical basis and experimental developments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(8), 1051-1063.
 86. Zornberg, J.G. and McCartney, J.S., (2010b). Centrifuge permeameter for unsaturated soils. II: measurement of the hydraulic characteristics of an unsaturated clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(8), 1051-1063.

附錄 A 審查意見與回覆

A1 申請計畫意見回覆

審查意見	意見回覆
一、有關計畫書格式及經費審查部分: 1.經整體預算審查及調整，本計畫請於補助經費 722,000 元內調整編列。 2.執行期限請修正為自 110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日 (11.1 個月)。主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 11.1 個月內編列。 3.薪俸、研究主持人費明細表，僅列主持人即可，按日按件計資酬金所列兼職助理可不列。	1. 已修訂經費編列。 2. 已修訂執行期限與經費編列。 3. 已修訂經費編列。
二、為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分: 1. 土壤水分特徵曲線之建立不易，所開發之 TDR 壓力鍋能否滿足此項試驗，宜對 TDR 裝置之功能強調之。 2. 本研究對土壤介電行為之探討有助於配合水文條件對表層土壤水份之變異加以掌握，計畫有其研究之價值亦可加以嘗試。 3. 水文為影響崩塌的關鍵因子，透過導電，電阻分析土表下的水文特性為可以廣泛探討的議題。 4. 計畫目標明確且有長期的規劃。 5. 建議朝向現地量測的發展，才	1.感謝建議，本人前期研究 (Chung et al. 2019) 已有針對 TDR 壓力鍋進行初步測試，TDR 可同時量測含水量與導電度，目前將透過吸力量測部分進行調整設定，以符合土壤水分特徵曲線求定需求。 2.感謝建議，因土壤介電行為乃頻率域資訊，具有多元資料參考之潛力，應可有效對表層土壤水份之變異加以掌握。 3.感謝建議，本研究企圖利用土壤介電行為探討，包含地電阻地球物理方法，建立與傳統力學及水文特性相關性，以作為淺層土壤崩塌穩定性之多元資訊參考。 4.感謝建議，本研究將透過分期分年規劃，企圖達成土壤介電

能在自然環境特性中找到更有價值的成果。 6. TDR 常見於做變形監測，本研究提出用於含水量及導電度量測之構想，值得肯定。 7. 本研究或可思考目前水保局已在變形監測中之 TDR，如何利用現有的設置，擴充至能量測含水量及導電度。 8. 第三年之樣區建議選擇水保局執行之大規模崩塌潛勢區，如蘭台等地，以驗證其功效。	行為與水文特性於淺層崩塌穩定應用探討。 5.感謝建議，目前本研究將擬訂於中央大學之宿舍邊坡作為初步探討，後續驗證可行，預定可延伸至阿里山五彎仔案例分析。 6.感謝建議，本研究企圖將 TDR 多元觀測技術整合應用於坡地監測，包含土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定，與深層滑動監測使用。 7.感謝建議，本研究企圖將 TDR 多元觀測技術整合應用於坡地監測，包含土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定，與深層滑動監測使用。 8.感謝建議，目前本研究將擬訂於中央大學之宿舍邊坡作為初步探討，後續驗證可行，預定可延伸至阿里山五彎仔案例分析，或配合水保局執行之大規模崩塌潛勢區進行驗證。
--	--

A2 期初計畫書意見回覆

審查意見	意見回覆
1. P2-4, 圖 2-2 之橫軸請註明物理量及單位。	感謝建議, 已修訂。
2. σ 代表正向壓力 (式 (4)) 與導電度 (式 (10)), 容易混淆, 另 (式 10) 與 (式 11) 中 EC 與 σ 為相同物理量, 請更正。	感謝建議, 已統一將導電度改為 EC, σ 代表正向壓力。
3. 圖 2-19, 砂箱紅土上之導電度差異甚大, 是否為相同土壤, 宜標記並說明。	感謝建議, 圖 2-19, 砂箱紅土其中由於短型三針 TDR 感測器 (Three electrode) 與小型 TDR 貫入器 (S) 可能受限於感測器量測範圍較小, 且試驗土樣未均勻 (直接取樣後置入砂箱), 因此 EC 範圍較低。
4. 現地紅土礫石層之介電特性與室內紅土之值是否有差異, 宜加強探討。	感謝建議, 目前室內紅土主要採集於中大紅土礫石層表層部分, 因此基於相同土性下, 本研究將規畫不同之紅土密度試驗, 藉由試驗結果推估現場量測變異性。
5. 本局目前執行的大規模崩塌計畫, 屬深層崩塌而地電阻主要做為了解地下水層分佈, 做為地下排水工程施設參考, 本案未來的研究成果是否可應用在大規模崩塌之治理或監測?	感謝建議, 本研究主要以淺層崩塌為標的, 但深層崩塌可能也有淺層崩塌複合型災害, 因此本研究成果可進一步協助。另外 TDR 深層滑動面監測功能, 可同步作為大規模崩塌預警使用。
6. 本計畫預定效益可申請專利 1 項為何?	本計畫之語定申請之專利項目為 "利用 TDR 於土壤介電頻譜感測裝置與方法"。
7. 土壤介電性質與水文特性是重要的基礎資料, 但也非常缺乏, 本計畫以實驗出發, 建立	感謝建議, 目前本研究主要將著重土壤介電性質與水文特性關係建立, 並考慮可能影響因子。未

一連串改良之實驗，最後以實際坡地為示範站，將實驗所建置之儀器實際用來蒐集現地觀察資料，並配合數值方法來剖析坡地穩定分析之不確定性與限制。立意良好，也頗有創意。唯部分研究已經在水保局之前的創新計畫中執行過，也有具體的結論，建議本計畫執行前，先參考過去的成果，避免重複。	來延伸配合數值方法來剖析坡地穩定分析之不確定性與限制，因此將持續收集包含水保局之前的創新計畫具體的結論，避免執行內容重複。
8. 本研究案文獻回顧完整，整理清晰，有助於本研究內容的探討。	感謝建議，本計畫將續蒐集相關文獻以做補充。
9. 建議在年度規劃的實驗中，依據探討的條件設計不同的實驗數量，例如 P2-19 所提探討土壤種類，密度，溫度，pH 值等，各需要幾種土壤？搭配幾種密度？分別控制在那些 pH 值，才會知道如何執行，也才會連結本文研究主題是否合宜。	感謝建議，本研究將初步規畫以一般粉土與中大紅土為基礎，並以至少兩種乾密度(鬆與緊 $1.5\sim 1.6\text{ g/cm}^3$) 為規畫，溫度以一般室溫以及如夏日 $30\sim 35$ 度為主，pH 值設定為較酸值 5 與中性 $7\sim 8$ 為主。另外也將加入降雨水之 EC 值 100 與 $1000\text{ }\mu\text{S/cm}$。
10. 本研究擬針對淺層崩塌穩定探討，應該要在研究規劃中有更多水文特性與崩塌穩定的連結，否則就只會是建立土壤介電與水文特性關聯性。	感謝建議，本研究初步已回顧非飽和土之水文與力學特性，並預定於第三年研究規畫進行現地坡地穩定性試驗，取得相關土壤介電與水文特性關聯性，再配合 LFS 數值方式輸入相關初始與監測資料，藉以評估坡地穩定性。
11. 現場環境中，不容易建立降雨期間飽和土壤的介電特性、水文特性及崩塌穩定之關係。建議回到水文特性能呈現的土壤行為，抑或是潛勢特性	感謝建議，本研究預定於第三年研究規畫進行現地坡地穩定性試驗，取得相關土壤介電與水文特性關聯性，再配合 LFS 數值方式輸入相關初始與監測資料，藉

	以評估坡地穩定性。最終將提出相關量測建議與可能潛勢特性。
12.P3-1 預定進度，誤植為 108 年，請修正。	感謝建議，已修訂。
13.現行以壓力鍋量測 SWCC 之方式耗時費力，目前使用 TDR 是否能以較簡便快速的方式完成 SWCC 的率定？	目前 TDR 只是另外提供包含介電參數之量測，其他部分仍須遵守既有壓力鍋方式完成 SWCC 的率定，可能還是需要一定時間。
14.期中報告附錄，除檢附期初審查之意見外，計畫核定時之審查意見回復亦請一併附上。	感謝建議，已修訂。

A3 期中計畫書意見回覆

審查意見	意見回覆
1. 文獻回顧完整，有助於研究方向之釐清。	感謝建議，目前仍持續增加修訂。
2. 透過前期之研究的投入，已率定各項設備之效能。惟本計畫要進行探討之方向，未見具體成果，未來請加速創新研究工作之推動。	感謝建議，目前因疫情關係，砂箱準備工作初步完成，也完成首次 TDR 介電頻譜方法測試分析，目前持續進行不同因子試驗探討。另外 TDR 壓力鍋與 VNA 模具也受到疫情影響，後半段執行期才由國外進口完成，目前正在加工處理轉接器銜接部分。但 VNA 測試項目已經初步完成，後續將配合砂箱試驗進行，預定於 12 月底分享相關試驗成果。
3. 強化研究設計與未來現地研究之連結。	感謝建議，目前本研究第一階段將著重於室內試驗測試與驗證，後續將透過現地實驗場址進行 TDR 量測資訊，包含進階之介電頻譜與導電度資訊，透過第一年與第二年所建立之土壤介電性質與水文性質關係，回歸至圖 11 之執行概念，將觀測資料延伸至現地坡地穩定分析使用。
4. TDR 一般用於量測地中變形，本研究改良 TDR，量測土壤含水量與地電阻，為一創新研究方法。	感謝建議，本研究擬定提出利用 TDR 技術於土壤介電行為與水文特性探討，以及相關不確定性分析，基於現地觀察資料以驗證上述研究方法之可行性，並配合數值方法，以淺崩塌邊坡為例，剖析實際坡地穩定分析之不確定性與限制。
5. 根本歷年研究，崩塌與地下水的抬升有所關連，本研究是否考量地下水的因素？	感謝建議，若因地下水以上之非飽和層可透過本研究 TDR 技術進行量測，並基於土壤介電行

	為，如上所述，以淺崩塌邊坡為例，剖析實際坡地穩定分析之不確定性與限制。
6. 本研究著重於淺層崩塌，與本局推動的大規模崩塌，兩者崩塌機制是否有所不同。	感謝建議，淺層崩塌與大規模崩塌機制的確相異，但本人相信可能同時發生或互制影響，因此本研究前期已經初步建立 TDR 深層地滑監測，以及淺層 GNSS 監測整合，因此透過 TDR 可同步淺層崩塌與大規模崩塌監測之可行性。而本研究則是更著重於淺崩塌邊坡，利用 TDR 技術於土壤介電行為與水文特性探討，剖析實際坡地穩定分析之不確定性與限制。
7. 建議將本年度初步成果另寫於第三章工作進度，第二章則說明方法與步驟即可，目前的寫法，無法看出期中報告階段之成果。	感謝建議，本報告參考之前文獻，並調整相關進度於各章節中，期末應可呈現綜合性成果，惟 TDR 壓力鍋與 VNA 模具也受到疫情影響，後半段執行期才由國外進口完成，目前正在加工處理轉接器銜接部分。但 VNA 測試項目已經初步完成，後續將配合砂箱試驗進行，預定於 12 月底分享相關試驗成果。

行政院農業委員會水土保持局
與您一起打拼



行政院農業委員會水土保持局
南投市中興新村光華路 6 號
<http://www.swcb.gov.tw>