111 保發-8.1-保-01-06-001(16)

土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定應用探討(2)

成果報告



行政院農業委員會水土保持局編印
中華民國 111 年 12 月

計畫編號：111 保發-8.1-保-01-06-001(16)

土壤介電行為與水文特性於淺層崩塌穩定應用探討(2)

Characterization of soil dielectric and hydrology properties applied to shallow landslide stability (2)

（成果報告）

執行單位：國立中央大學

執行期間：111 年 1 月 18 日至 111 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 111 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物理性質於淺層崩塌穩定應用探討(2)

摘要

土層含水相關的物理性質與導電度/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，預定以實際坡地為示範站，將整合 TDR 含水量感測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

Characterization of soil dielectric and hydrology properties applied to shallow landslide stability (2)

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:TimeDomainReflectometry(TDR),Shallowlandslide,Dielectricspectrum,Soilwatercontent,Resistivity

目次

摘要 ..... **I**

Abstract ..... **II**

目次 ..... **IV**

表次 ..... **VI**

圖次 ..... **IX**

第一章 緒論 **1**

第一節 背景說明 1

第二節計畫目標 3

第二章工作執行方法與初步成果 **5**

第一節 相關文獻回顧評析 5

一、 非飽和土之水文與力學特性 5

二、 土壤電學特性 8

三、 TDR 技術說明 13

四、 TDR 於非飽和土之水文與力學特性探討 16

五、 VNA 相關應用 21

六、 綜合評析 25

第二節 模型試驗研究成果更新 26

一、 TDR 砂箱與壓力鍋試驗規劃 26

二、 TDR 介電頻譜分析精進 140

第三節 TDR 與離心機物理模型研究規劃 273

一、 TDR 與離心機物理模型整合 273

二、 重力影響因子探討 276

三、 TDR 於離心機滲透模型之配置 281

第四節 第三年研究規畫 296

一、 現地試驗場址說明 296
二、 數值分析與不確定性探討 300
第五節 結論與建議 304
一、 結論 304
二、 建議 305
第三章 工作進度與交付項目 307
第一節 重要工作項目 307
第二節預定進度 308
2. 第四章 預算經費分配 309
第一節預算總表 309
第二節預算分配明細表 309
第三節預算明細表 310
第四節計畫經費分攤明細表 313
第五節薪俸、研究主持人費明細表 313
參考文獻.....314
附錄 A 審查意見與回覆 A1
A1 申請計畫意見回覆 A1
A2 期中報告意見回覆 A3
A3 期末報告意見回覆 A6

表次

表 2-1TDR-200 訊號脈衝產生器規格..... 29
表 2-2 CLEAN CON 200 導電度計規格..... 39
表 2-3 初期條件為 1.35g/cm^3 乾密度的滲透係數實驗結果 41
表 2-4 初期條件為 1.45g/cm^3 乾密度的滲透係數實驗結果 42
表 2-5 本研究之 TDR 壓力鍋實驗的土壤樣品細節..... 43
表 2-6 本研究中 VNA 測試的樣本細節 43
表 2-7 土壤樣本的物性分析結果..... 43
表 2-8 每個潤濕過程的均方根誤差(RMSE)(樣本 1、2、3 和 4) 60
表 2-9 樣本 1、2 和 3 的每個過程的線性回歸的斜率和 R2。 74
表 2-10 砂箱實驗之參數設定 79
表 2-11 砂箱土壤基本物性實驗表(桃園紅土) 80
表 2-12 臺灣各地之降雨導電度..... 80
表 2-13 臺灣各地之降雨酸鹼值..... 81
表 2-14 感測器的含水量-介電常數轉換公式率定之係數 88
表 2-15 各感測器的導電度-穩態值轉換公式率定之係數 89
表 2-16 實際物理參數..... 102
表 2-17 實際物理參數.....110
表 2-18 實際物理參數.....117
表 2-19 實際物理參數..... 130
表 2-20 方程式 19 中的參數(正丁醇(1-BUTANOL)與乙醇(ETHANOL)
..... 169
表 2-21 土壤試體參數..... 173
表 2-22 測量空氣時各段的 TDR 全波形反算分析法參數..... 187

表 2-23 樣本 1 在乾密度為 1.35$gcm3$的各體積含水量之 TDR 全波形反算分析參數 188
表 2-24 樣本 2 在乾密度為 1.45$gcm3$的各體積含水量之 TDR 全波形反算分析參數 188
表 2-25 樣本 1 164.5 MS/CM 導電度與樣本 3 657 MS/CM 導電度在 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析參數 189
表 2-26 樣本 1 PH = 6.9 導電度與樣本 4 PH = 5.0 導電度在 20%體積含水量的 TDR 全波形反算分析參數 189
表 2-27TDR 系統與材料 COLE-COLE 參數($\varepsilon_s, \varepsilon_\infty, f_{rel}, \xi, \mathrm{EC}_{dc}, Z_p, \alpha_R$)反算結果 210
表 2-28(第一組)TDR 系統與材料 COLE-COLE 參數($\varepsilon_s, \varepsilon_\infty, f_{rel}, \xi, \mathrm{EC}_{dc}, Z_p, \alpha_R$)反算結果(感測段參數由下表帶入)..... 214
表 2-29(紅土)各時間點之試體相關帶入參數 214
表 2-30 (P1)TDR 全波形反算分析法反算結果 232
表 2-31 (P2)TDR 全波形反算分析法反算結果 234
表 2-32 (P3)TDR 全波形反算分析法反算結果 236
表 2-33 (P4)TDR 全波形反算分析法反算結果 238
表 2-34 (P5)TDR 全波形反算分析法反算結果 240
表 2-35 (P1)TDR 全波形反算分析法反算結果 244
表 2-36 (P2)TDR 全波形反算分析法反算結果 246
表 2-37 (P3)TDR 全波形反算分析法反算結果 248
表 2-38 (P4)TDR 全波形反算分析法反算結果 250
表 2-39 (P5)TDR 全波形反算分析法反算結果 252
表 2-40 (P1)TDR 全波形反算分析法反算結果 256
表 2-41 (P2)TDR 全波形反算分析法反算結果 258

表 2-42 (P3)TDR 全波形反算分析法反算結果 260
表 2-43 (P4)TDR 全波形反算分析法反算結果 262
表 2-44 (P5)TDR 全波形反算分析法反算結果 264
表 2-45 離心模型與原型之縮尺比 275
表 2-46 矽砂、高嶺土與混和材料的基本物性實驗之實驗結果 291
表 2-47 中大紅土基本物性(黃聖棋，2014) 298

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.....3
圖 1-2 研究架構圖 4
圖 2-1 參考文獻相關性 5
圖 2-2 土壤水分特徵曲線(林宏達與拱祥生，2001) 8
圖 2-3 土壤介電頻譜示意(修改自 HILHORST AND DIRKSON, 1994) 10
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）
..... 12
圖 2-5 砂岩乾溼循環試驗飽和度對應電阻率關係圖(KNIGHT, 1991).. 12
圖 2-6 孔隙內水分分佈示意圖(KNIGHT, 1991)..... 13
圖 2-7 時域反射儀之基本架構 15
圖 2-8 三軸試驗用之電阻探頭(JOSÉ ET AL. 2012)..... 18
圖 2-9ZIGZAG-SHAPED 形狀 TDR 壓力鍋元件(FERNÁNDEZ ET AL., 2008)
..... 18
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)..... 19
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) 19
圖 2-12 離心機滲透計初步規劃(MCCARTNEY AND ZORNBERG, 2006).. 20
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)..... 20
圖 2-14 離心機滲透計(CENTRIFUGE PERMEAMETER)概念示意(ZORNBERG
AND MCCARTNEY, 2010A) 21
圖 2-15 TDR 於離心機滲透計量測成果(ZORNBERG AND MCCARTNEY,
2010A) 21

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) 24
圖 2-17 空氣、丁醇、酒精和水校正圖(LOGSDON, 2005) 24
圖 2-18 改良型 TDR 壓力鍋試驗配置(CHUNG ET AL. 2019) 30
圖 2-19 本研究 TDR 壓力鍋試驗配置 30
圖 2-20 本研究 TDR 壓力鍋外部設計圖 31
圖 2-21 本研究 TDR 壓力鍋實體照片 31
圖 2-22 儀器底板 32
圖 2-23(A)TDR200，(B)TRH-300，(C)NIUSBDAQ6000，(D)真空機，和 (E)壓縮機機。 33
圖 2-24 本研究 TDR 壓力鍋測量步驟示意圖 35
圖 2-25 水容器 36
圖 2-26 TDR 測量結果(空氣和水) 37
圖 2-27 CLEAN CON200 導電度計 39
圖 2-28 導電度校正回歸結果 40
圖 2-29 水位高差示意圖 45
圖 2-30 樣本 1 初期乾燥過程中的實測波形 46
圖 2-31 樣本 1 所有潤濕和乾燥過程 46
圖 2-32 樣本 1 第一個循環中的潤濕過程和初期乾燥 46
圖 2-33 樣本 1 第一個循環中的乾燥過程 47
圖 2-34 樣本 1 第二循環的潤濕過程和初期乾燥 47
圖 2-35 樣本 1 第二循環乾燥過程 47
圖 2-36 樣本 2 所有潤濕和乾燥過程 49
圖 2-37 樣本 2 第一個循環中的潤濕過程 49
圖 2-38 樣本 2 第一個循環中的待機狀態 50

圖 2-39 樣本 2 第一個循環中的初期乾燥 50
圖 2-40 樣本 2 第一個循環中的後期乾燥過程 51
圖 2-41 樣本 2 第二個循環中的潤濕過程和初期乾燥 51
圖 2-42 樣本 2 第二個循環中的後期乾燥過程 52
圖 2-43 樣本 3 所有潤濕和乾燥過程 53
圖 2-44 樣本 3 第一個循環的潤濕過程和初期乾燥 53
圖 2-45 樣本 3 第一個循環的乾燥過程 54
圖 2-46 樣本 3 第二循環的潤濕過程和初期乾燥. 54
圖 2-47 樣本品 3 在第二個循環中的乾燥過程 55
圖 2-48 樣本 4 所有潤濕和乾燥過程 56
圖 2-49 樣本 4 第一個循環中的潤濕過程和初期乾燥 56
圖 2-50 樣品 4 第一個循環中的乾燥過程 57
圖 2-51 樣本 4 在第二個循環中的潤濕過程和初始乾燥 57
圖 2-52 樣本 4 第二循環乾燥過程 58
圖 2-53 樣本 1 (A) 循環 1 和 (B) 循環 2 的每個過程的 EC 與 Θ之關係圖..... 61
圖 2-54 樣本 1 每個過程的 EC 與 Θ 的回歸線 61
圖 2-55 樣本 1 的 EC-Θ 圖，(A) 第一個週期的潤濕過程，(B) 第一個週期的初期乾燥過程，(C) 第一個週期的乾燥過程，(D) 第二個週期的潤濕過程，(E) 第二個循環的初期乾燥過程，(F) 第二個循環的乾燥過程 62
圖 2-56 樣本 2 (A) 循環 1 和 (B) 循環 2 的每個過程的 EC 與 Θ之關係圖..... 63
圖 2-57 樣本 2 的每個過程的 EC 與 Θ 的回歸線 64

圖 2-58 樣本 2 的 EC-Θ 圖，(A) 第一個週期的潤濕過程，(B) 第一個週期的初期乾燥過程，(C) 第一個週期的乾燥過程，(D) 第二個週期的潤濕過程，(E)第二個週期的初期乾燥過程，(F) 第二個週的期乾燥過程 65
圖 2-59 樣本 3 (A) 循環 1 和 (B) 循環 2 的每個過程的 EC 與 Θ之關係圖..... 66
圖 2-60 樣本 3 每個過程的 EC 與 Θ 的回歸線..... 67
圖 2-61 樣本 3 的 EC-Θ 圖，(A) 第一個週期的潤濕過程，(B) 第一個週期的初期乾燥過程，(C) 第一個週期的乾燥過程，(D)第二個週期的潤濕過程，(E) 第二個循環的初始乾燥過程，(F) 第二個循環的乾燥過程 68
圖 2-62 樣品 4 (A) 循環 1 和 (B) 循環 2 的每個過程的 EC 與 Θ之關係圖..... 69
圖 2-63 樣本 4 的每個過程的 EC 與 Θ 的回歸線..... 70
圖 2-64 樣品 4 的 EC-Θ 圖，(A) 第一個週期的潤濕過程，(B) 第一個週期的初期乾燥過程，(C) 第一個週期的乾燥過程，(D) 的第二個週期潤濕過程，(E) 第二個循環的初始期燥過程，(F) 第二個循環的乾燥過程 71
圖 2-65 模擬砂箱與 ERT 設備結合(魏士凱，2019)..... 76
圖 2-66 TDR 感測器之(左)電磁場分布模擬，以及(右)應力分布模擬(魏士凱，2019)..... 76
圖 2-67 砂箱紅土之導電度與含水量遲滯現象(魏士凱，2019)..... 77
圖 2-68 實驗使用之桃園楊梅紅土的粒徑分布曲線圖..... 81
圖 2-69 實驗設備示意圖(包含砂箱、排水系統、灑水系統與量測系統(TDR、ERT、TENSIOMETER))..... 82

圖 2-70 感測器在砂箱所在位置之示意圖(側視圖) 82
圖 2-71 感測器在砂箱所在位置之示意圖(俯視圖) 83
圖 2-72 砂箱實驗所使用的各 TDR 感測導波器實際照片 83
圖 2-73T5 張力計(T5 PRESSURETRANSDUCER TENSIOMETER)..... 83
圖 2-74 灑水系統實際照片(1) 84
圖 2-75 灑水系統實際照片(2) 85
圖 2-76 灑水系統示意圖(1) 85
圖 2-77 灑水系統示意圖(2) 86
圖 2-78 灑水系統示意圖(3) 86
圖 2-79 排水系統實際照片 87
圖 2-80 排水系統與砂箱的相對位置之實際照片 87
圖 2-81(N1)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(LSQCURVEFIT) 89
圖 2-82(N1)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMINSEARCHBND) ... 90
圖 2-83(N2)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(LSQCURVEFIT) 90
圖 2-84(N2)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMINSEARCHBND) ... 91
圖 2-85(S)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(LSQCURVEFIT)..... 91
圖 2-86(S)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMINSEARCHBND)..... 92
圖 2-87(3)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(FMINSEARCHBND) 92
圖 2-88 砂箱實驗的實際架設圖 94
圖 2-89 3 電極感測器量測體積含水量(1HR 平均) 95
圖 2-90 3 電極感測器所量測導電度(1HR 平均) 95
圖 2-91 3 電極感測器之體積含水量與導電度之關係圖 96
圖 2-92 N1 感測器量測體積含水量(1HR 平均) 96
圖 2-93 N1 感測器量測導電度(1HR 平均) 97
圖 2-94 N1 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 97

圖 2-95 N2 感測器量測體積含水量(1HR 平均) 98
圖 2-96 N2 感測器量測導電度(1HR 平均) 98
圖 2-97 N2 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 99
圖 2-98 S 感測器量測體積含水量(1HR 平均) 99
圖 2-99 S 感測器量測導電度(1HR 平均) 100
圖 2-100 S 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 100
圖 2-101 傳統 3 電極感測器介電頻譜分析時間點 103
圖 2-102 3 電極感測器量測體積含水量與導電度 104
圖 2-103 3 電極感測器之體積含水量與導電度之關係圖 104
圖 2-104 N1 感測器量測體積含水量與導電度 105
圖 2-105 N1 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 105
圖 2-106 N2 感測器量測體積含水量與導電度 106
圖 2-107 N2 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 106
圖 2-108 S 感測器量測體積含水量與導電度 107
圖 2-109 S 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 107
圖 2-110 M 感測器量測體積含水量與導電度 108
圖 2-111 M 感測器之體積含水量與導電度之關係圖 108
圖 2-112 3 電極感測器體積含水量與導電度歷時圖 110
圖 2-113 3 電極感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸(由 FMINSEARCH 求解).....111
圖 2-114 N1 感測器體積含水量與導電度歷時圖 111
圖 2-115 N1 感測器反射訊號偏低 112
圖 2-116 N1 感測器相近時間資料的切線法(紅框為視介電常數).....112
圖 2-117 N2 感測器體積含水量與導電度歷時圖 113
圖 2-118 N2 感測器反射訊號偏低 113

圖 2-119 N2 感測器相近時間資料的切線法(紅框為視介電常數).....114
圖 2-120 S 感測器體積含水量與導電度歷時圖 114
圖 2-121 S 感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸 115
圖 2-122 M 感測器體積含水量與導電度歷時圖.....115
圖 2-123 M 感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸(由 FMINSEARCH 求解).....116
圖 2-124 3 電極感測器雜訊圖 118
圖 2-125 3 電極感測器藉由含雜訊訊號與不含雜訊訊號對比出雜訊頻率.....119
圖 2-126 3 電極感測器含雜訊訊號(Y)與率掉雜訊頻率訊號(YS)對比圖(右上角為程式碼)..... 120
圖 2-127 N1 感測器含雜訊訊號(Y)與率掉雜訊頻率訊號(YS)對比圖(右上角為程式碼)..... 121
圖 2-128 S 感測器含雜訊訊號(Y)與率掉雜訊頻率訊號(YS)對比圖(右上角為程式碼)..... 122
圖 2-129 3 電極感測器體積含水量與導電度歷時圖 123
圖 2-130 3 電極感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸(由 FMINSEARCHBAND 求解)..... 123
圖 2-131 N1 感測器體積含水量與導電度歷時圖 124
圖 2-132 N1 感測器雜訊圖 124
圖 2-133 N1 感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項 125
圖 2-134 N2 感測器體積含水量與導電度歷時圖 125
圖 2-135 N2 感測器雜訊圖 126

圖 2-136 N2 感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸(由 FMINSEARCH 求解)..... 126
圖 2-137 S 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 127
圖 2-138 S 感測器雜訊圖..... 127
圖 2-139 S 感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸(由 FMINSEARCH 求解)..... 128
圖 2-140 M 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 128
圖 2-141 M 感測器體積含水量與導電度之 ARCHIE'S LAW 加常數項回歸(由 FMINSEARCH 求解)..... 129
圖 2-142 N1 感測器雜訊圖..... 131
圖 2-143 N2 感測器雜訊圖..... 131
圖 2-144 S 感測器雜訊圖..... 131
圖 2-145 S 感測器的原始訊號與 4 個訊號對比圖(左下角為濾波所使用的 MATLAB 程式)..... 132
圖 2-146 S 感測器的原始訊號與 4 個訊號對比圖(頻率預放大)..... 133
圖 2-147 S 感測器的原始訊與濾波後的訊號對比圖(左下角為濾波所使用的 MATLAB 程式)..... 134
圖 2-148 3 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 135
圖 2-149 3 電極感測器體積含水量與導電度關係圖..... 135
圖 2-150 N1 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 136
圖 2-151 N1 電極感測器體積含水量與導電度關係圖..... 136
圖 2-152 N2 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 137
圖 2-153 N2 電極感測器體積含水量與導電度關係圖..... 137
圖 2-154 S 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 138
圖 2-155 S 電極感測器體積含水量與導電度關係圖..... 138

圖 2-156 M 感測器體積含水量與導電度歷時圖..... 139
圖 2-157 M 電極感測器體積含水量與導電度關係圖 139
圖 2-158TDR 之等效電路(EQUIVALENT CIRCUIT)模式(修改自 LIN, 2003A)
..... 142
圖 2-159 靈敏度 $S_{\hat{m}}$ 受感測器長度 L 影響 143
圖 2-160 靈敏度 $S_{\hat{m}}$ 受感測器阻抗 Z_P 影響..... 144
圖 2-161(A)典型 TDR 波型,以及(B)微分波形之特徵回波 147
圖 2-162 (A) PVA 相位受導電度影響誤差以及 (B) PVA 速度誤差 ... 148
圖 2-163 PVA 介電度於不同土壤與含水量之差異..... 148
圖 2-164 PVA 介電度(1 GHZ)以及傳統 TDR 分析於不同含水量差異
..... 149
圖 2-165PVA 介電度(1 GHZ)及傳統 TDR 分析於 EC 影響 150
圖 2-166PVA 介電度(1 GHZ)及傳統 TDR 分析於纜線長度影響 150
圖 2-167 以 VNA 進行土壤介電頻譜分析(LEWANDOWSKI ET AL. 2019)
..... 152
圖 2-168 以 VNA 進行土壤介電頻譜之系統標定與實際量測程序 .. 153
圖 2-169 向量網路分析儀(VNA)量測模具單元..... 155
圖 2-170 TYPE-N/EIA 1 5/8” 元件..... 156
圖 2-171 RIGID LINE COUPLING ELEMENT 1 5/8"..... 156
圖 2-172 同軸模具(COAXIAL SAMPLE HOLDERS)示意圖(單位為 MM) .. 156
圖 2-173(A) MINI VNAPRO LITE，和(B) MINI VNA TINY..... 158
圖 2-174SMA 校正元件(開路 OPEN,短路 SHORT, 負載 LOAD) 159
圖 2-175 測量期間的測量設置，分別使用：(A)空氣(AIR)、(B)正丁醇(1-
BUTANOL)、和(C)乙醇(ETHANOL)..... 159
圖 2-176 建立校正介面 160
圖 2-177 讀取開路、短路和負載校正元件資料..... 160

圖 2-178 保存和更新校正圖 161
圖 2-179 建立校正介面 162
圖 2-180 讀取開路、短路和負載校正元件資料 163
圖 2-181 保存和更新校正圖 164
圖 2-182 R60VECTORREFLECTOMETER 向量網路分析儀 165
圖 2-183 校正介面 165
圖 2-184 校正完成之介面 166
圖 2-185 S11 訊號(A)校正前(B)校正後 166
圖 2-186 平均 S11 和相位角：(A)空氣(AIR)、(B)正丁醇(1-BUTANOL)、和(C)乙醇(ETHANOL) 167
圖 2-187 電氣長度，定義為$2c4f1$的斜率，作為預測$\varepsilon a12$(視介電常數的平方根)的函數。 168
圖 2-188 測量結果與比較：(A)乙醇(ETHANOL)，和(B)正丁醇(1-BUTANOL) 169
圖 2-189NCU 紅土粒徑分布曲線圖 170
圖 2-190NCU 紅土最佳含水量曲線圖 171
圖 2-191 VNA 於飽和土壤之介電頻譜計算結果 172
圖 2-192 VNA 於乾土之介電頻譜計算結果 172
圖 2-193 不同體積含水量的 S11 與相位角(土壤乾密度 $1.4gcm3$)(A)15%，(B)20%，和(C)25% 173
圖 2-194 不同體積含水量的 S11 與相位角(土壤乾密度 $1.5gcm3$)(A)20%，(B)25%，和(C)30% 174
圖 2-195 S11 與相位角：(A)$1.4gcm3$，(B)$1.5gcm3$和(C)$1.6gcm3$乾密度 175
圖 2-196(A)實部介電常數，(B)虛部介電常數($1.4gcm3$乾密度與不同體積含水量) 176

圖 2-197(A)實部介電常數，(B)虛部介電常數(1.5$gcm3$乾密度與不同體積含水量)..... 177
圖 2-198(A)實部介電常數，(B)虛部介電常數(20%體積含水量與不同乾密度與)..... 178
圖 2-199 測量結果與參考值的比較：(A) 乙醇和 (B) 丁醇 180
圖 2-200 在 1.35 g/cm^3 乾密度不同體積含水量之 S11 和相位角：(A) 15% (B) 20% (C) 25%..... 181
圖 2-201 在 1.45 g/cm^3 乾密度不同體積含水量之 S11 和相位角：(A) 20% (B) 25% (C) 30%..... 182
圖 2-202 在 1.35 g/cm^3 乾密度和 20%體積含水量與不同導電度之 S11 和相位角：(A) 169 MS/CM (B) 651 MS/CM 入滲水導電度... 183
圖 2-203 (A)實數介電常數 (B)虛數介電常數(乾密度為 1.35 g/cm^3 與各不同體積含水量)..... 184
圖 2-204 (A)實數介電常數 (B)虛數介電常數(乾密度為 1.45 g/cm^3 與各不同體積含水量)..... 185
圖 2-205 (A)實數介電常數 (B)虛數介電常數(乾密度為 1.35 g/cm^3 與各不同導電度)..... 186
圖 2-206 TDR 全波形反算分析的模擬波形結果 189
圖 2-207 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 190
圖 2-208 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 190
圖 2-209 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 15% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果..... 191

圖 2-210 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 191
圖 2-211 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 192
圖 2-212 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 15% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 192
圖 2-213 循環 1 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 30% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 193
圖 2-214 循環 1 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 193
圖 2-215 循環 1 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 194
圖 2-216 循環 2 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 30% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 194
圖 2-217 循環 2 乾燥過程中體積含水量為 1.45 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 195
圖 2-218 循環 2 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 195
圖 2-219 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度、20% 體積含水量和 657 MS/CM 導電度(樣本 3)的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果..... 196
圖 2-220 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度、20%體積含水量和 PH = 5 酸鹼值(樣本 4) 的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果 196

圖 2-221 樣本 1 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜 (1.35 g/cm^3 乾密度和 25%體積含水量)..... 197
圖 2-222 樣本 1 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜 (1.35 g/cm^3 乾密度和 25%體積含水量)..... 197
圖 2-223 樣本 1 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜 (1.35 g/cm^3 乾密度和 15%體積含水量)..... 198
圖 2-224 樣本 2 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜 (1.45 g/cm^3 乾密度和 30%體積含水量)..... 198
圖 2-225 樣本 2 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜 (1.45 g/cm^3 乾密度和 25%體積含水量)..... 199
圖 2-226 樣本 2 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜 (1.45 g/cm^3 乾密度和 20%體積含水量)..... 199
圖 2-227 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(樣本 1 164.5 MS/CM 導電度和 20%體積含水量 與 樣本 3 657 MS/CM 導電度和 20%體積含水量 200
圖 2-228 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(樣本 1 PH = 6.9 酸鹼值和 20%體積含水量 與 樣本 4 PH = 5 酸鹼值和 20%體積含水量)..... 200
圖 2-229 樣本 1TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 和 25% 體積含水量)..... 203
圖 2-230 樣本 1TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 和 20% 體積含水量)..... 203
圖 2-231 樣本 1TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 和 15% 體積含水量) 204

圖 2-232 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.45 g/cm^3 和 30% 體積含水量)..... 204
圖 2-233 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.45 g/cm^3 和 25% 體積含水量)..... 205
圖 2-234 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.45 g/cm^3 和 20% 體積含水量)..... 205
圖 2-235 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(樣本 1 164.5 MS/CM 導電度和 20% 體積含水量 與 樣本 2 657 MS/CM 導電度 20% 體積含水量) 206
圖 2-236TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(樣本 1 PH = 6.9 和 20% 體積含水量 與 樣本 4 PH = 5 和 20% 體積含水量) 206
圖 2-237 LEWANDOWSKI ET AL. (2017) 程序、 LOGSDON (2005) 程序、TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 乾密度、20% 體積含水量和 64.5 MS/CM 導電度) 207
圖 2-238 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、感測器 AB 膠段、感測段(紅土試體中)) 208
圖 2-239 奈奎斯特採樣定理之頻率解析度示意圖 209
圖 2-240 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 211
圖 2-241 自來水之介電頻譜(COLE-COLE FUNCTION 理論值)..... 212
圖 2-242(第一組，2021/9/600:02:05)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 215

圖 2-243(第一組，2021/9/600:02:05)(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..... 216
圖 2-244(第一組，2021/9/600:02:05) 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 217
圖 2-245(第一組，2021/9/715:52:13)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 218
圖 2-246(第一組，2021/9/715:52:13)(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..... 219
圖 2-247(第一組，2021/9/715:52:13) 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 220
圖 2-248(第一組，2021/9/808:23:41)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 221
圖 2-249(第一組，2021/9/808:23:41)(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..... 222
圖 2-250(第一組，2021/9/808:23:41)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 223
圖 2-251(第一組，2021/9/815:27:02)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 224

圖 2-252(第一組，2021/9/815:27:02)(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..... 225
圖 2-253(第一組，2021/9/815:27:02)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 226
圖 2-254(第一組，2021/9/1601:03:32)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 227
圖 2-255(第一組，2021/9/1601:03:32)(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 228
圖 2-256(第一組，2021/9/1601:03:32)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 229
圖 2-257 分析時間點(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)..... 230
圖 2-258 (P1) PVA 波形微分範圍 232
圖 2-259 (P1)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 233
圖 2-260 (P1)模擬與實際波型對照圖 233
圖 2-261 (P2) PVA 波形微分範圍 234
圖 2-262 (P2)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 235
圖 2-263 (P2)模擬與實際波型對照圖 235

圖 2-264 (P3) PVA 波形微分範圍 236
圖 2-265 (P3)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 237
圖 2-266 (P3)模擬與實際波型對照圖 237
圖 2-267 (P4) PVA 波形微分範圍 238
圖 2-268 (P4)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 239
圖 2-269 (P4)模擬與實際波型對照圖 239
圖 2-270 (P5) PVA 波形微分範圍 240
圖 2-271 (P5)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 241
圖 2-272 (P5)模擬與實際波型對照圖 241
圖 2-273 分析時間點(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)..... 242
圖 2-274 (P1) PVA 波形微分範圍 244
圖 2-275 (P1)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 245
圖 2-276 (P1)模擬與實際波型對照圖 245
圖 2-277 (P2) PVA 波形微分範圍 246
圖 2-278 (P2)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 247
圖 2-279 (P2)模擬與實際波型對照圖 247
圖 2-280 (P3) PVA 波形微分範圍 248

圖 2-281 (P3)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 249
圖 2-282 (P3)模擬與實際波型對照圖 249
圖 2-283 (P4) PVA 波形微分範圍 250
圖 2-284 (P4)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 251
圖 2-285 (P4)模擬與實際波型對照圖 251
圖 2-286 (P5) PVA 波形微分範圍 252
圖 2-287 (P5)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 253
圖 2-288 (P5)模擬與實際波型對照圖 253
圖 2-289 分析時間點(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)..... 254
圖 2-290 (P1) PVA 波形微分範圍 256
圖 2-291 (P1)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 257
圖 2-292 (P1)模擬與實際波型對照圖 257
圖 2-293 (P2) PVA 波形微分範圍 258
圖 2-294 (P2)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 259
圖 2-295 (P2)模擬與實際波型對照圖 259
圖 2-296 (P3) PVA 波形微分範圍 260
圖 2-297 (P3)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 261

圖 2-298 (P3)模擬與實際波型對照圖 261
圖 2-299 (P4) PVA 波形微分範圍 262
圖 2-300 (P4)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 263
圖 2-301 (P4)模擬與實際波型對照圖 263
圖 2-302 (P5) PVA 波形微分範圍 264
圖 2-303 (P5)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖) 265
圖 2-304 (P5)模擬與實際波型對照圖 265
圖 2-305 分析時間點(P1：降雨前(與 SW1 同含水量)、P2：第一次降雨最高體積含水量(與 SW2 同含水量)、P3：第一次降雨最低體積含水量(與 SW3 同含水量)、P4：第二次降雨最高體積含水量(與 SW4 同含水量)、P5：乾燥期最低體積含水量(與 SW5 同含水量)) 267
圖 2-306 各事件同含水量對照圖 268
圖 2-307 分析時間點(P1：降雨前(與 SW1 同含水量)、P2：第一次降雨最高體積含水量(與 SW2 同含水量)、P3：第一次降雨最低體積含水量(與 SW3 同含水量)、P4：第二次降雨最高體積含水量(與 SW4 同含水量)、P5：乾燥期最低體積含水量(與 SW5 同含水)) 271
圖 2-308 各事件同含水量對照圖 272
圖 2-309 中央大學土木系之地工離心機 275
圖 2-310 離心機模型模擬概念圖 276
圖 2-311TDR 纜線於離心機坡地滑動模擬配置(XU AND PIERCE, 2013) 278

圖 2-312TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱(鐘志忠，2019) 279
圖 2-313 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) 280
圖 2-314 剪力模型試驗於 55G 離心機重力下之結果(TRAN，2020). 280
圖 2-315TDR 於離心機滲透模型之配置(MCCARTNEY AND ZORNBERG, 2006) 281
圖 2-316 水力梯度 282
圖 2-317 帶透明窗口之容器(736 MM X 385 MM X 200 MM) 284
圖 2-318 降雨系統的噴嘴 285
圖 2-319 單一噴嘴的降雨強度 286
圖 2-320 組裝後降雨系統與噴嘴 286
圖 2-321 實驗噴嘴率定後降雨強度(預設 3 組噴嘴可灑水) 287
圖 2-322 張力計實際照片與示意圖 287
圖 2-323 組合後張力計示意圖 288
圖 2-324 張力計輸出電壓與壓力關係圖 289
圖 2-325 LVDT 實際照片 289
圖 2-326 LVDT 輸出電壓與實際位移的關係圖 290
圖 2-327 降雨系統、空壓機、試體與離心機相對位置示意圖 290
圖 2-328 原尺度(1G)下的模型尺寸(MODEL SCALE-正視圖) 293
圖 2-329 原尺度(1G)下的模型尺寸(MODEL SCALE-側視圖) 294
圖 2-330 2 各加速度條件與降雨事件的時間順序示意圖 295
圖 2-331 中央大學宵夜街停車場無人機建模(簡濟豪 2019) 298
圖 2-332 現地 ARDUINO 三軸加速度計測站(簡濟豪 2019) 299
圖 2-333 現地 ARDUINO 測站 1 之 ROLL 監測資料 299
圖 2-334 現地 ERTSCHLUMBERGE 方法成果 299

圖 2-335LFS 莫爾庫倫應力圖(LU ET AL. 2012) 302
圖 2-336 極限平衡法與 LFS 分析結果比較(LU ET AL. 2012) 303
圖 2-337 不確定性分析流程(灰色區塊為本研究研發項目) 303

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），臺灣之邊坡坍崩問題頻傳，以水庫集水區為例，坍崩產生之土石將導致水庫庫容淤積問題（辜炳寰等人，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、缺乏植披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 1~3m 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(Matricsuction)，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(Matricsuction)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，20188)，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。

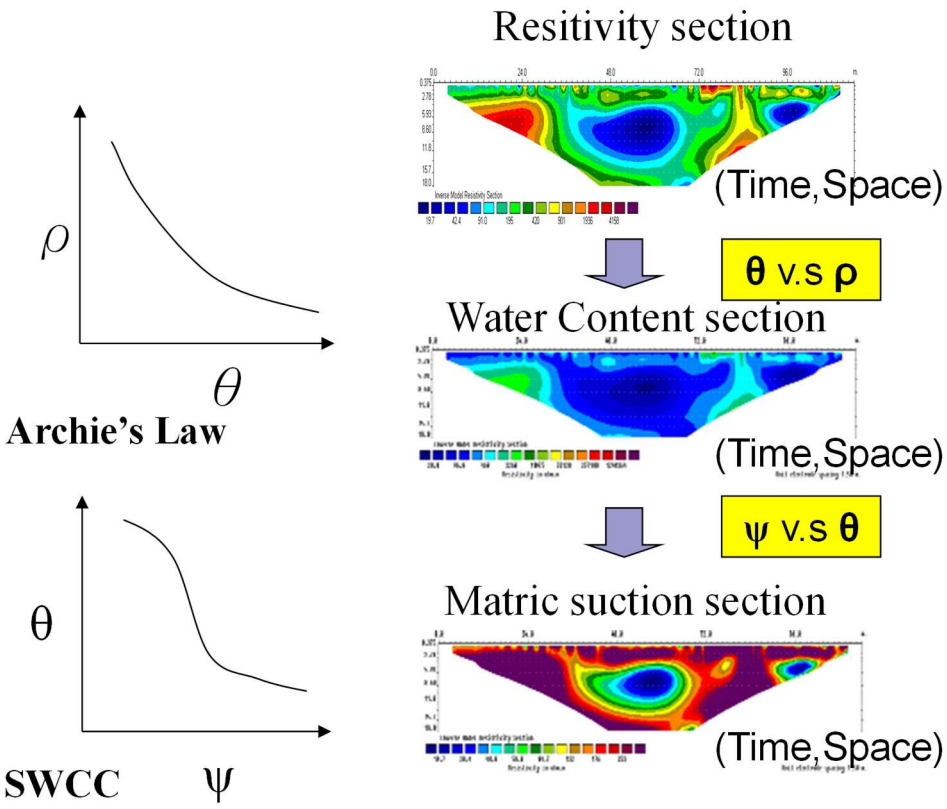


圖 1-1 利用地電阻電阻剖面轉換為含水量與基值吸力剖面示意圖

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(已執行)：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(執行中)：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 含水量感測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。

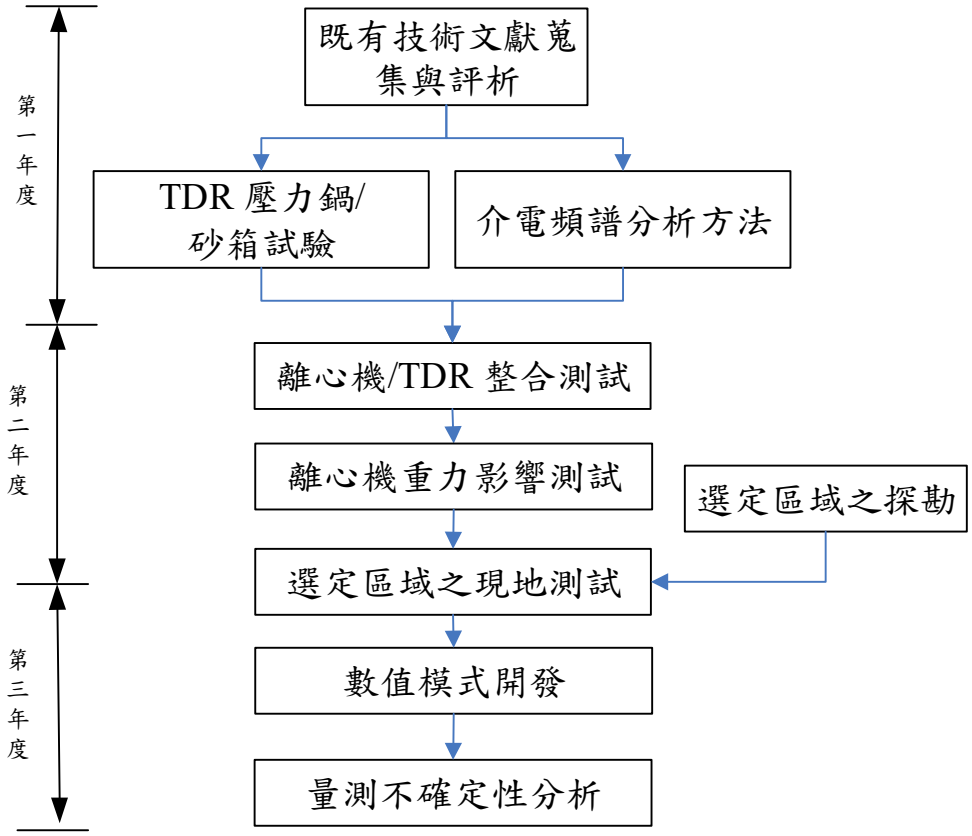


圖 1-2 研究架構圖

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：

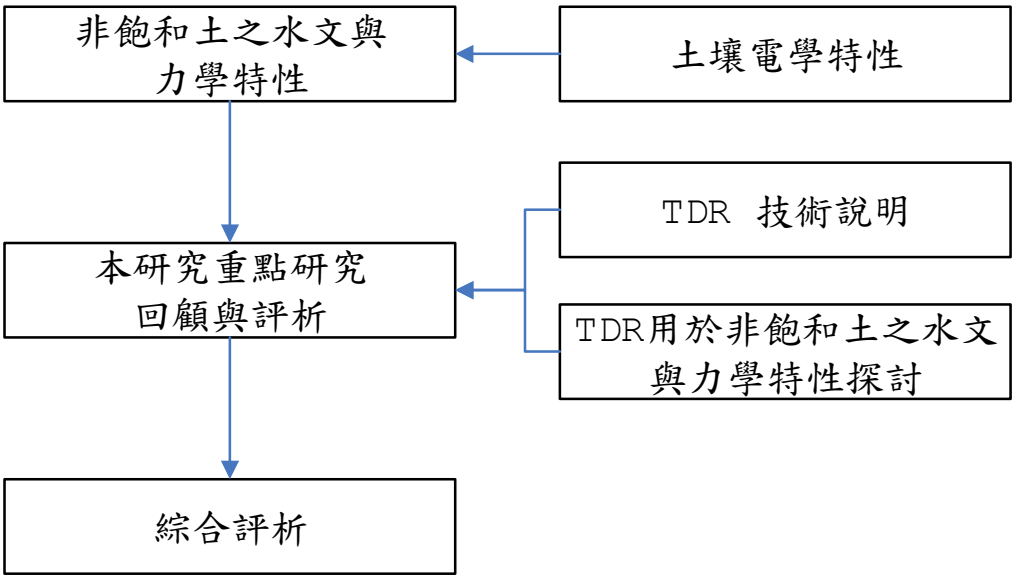


圖 2-1 參考文獻相關性

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：

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

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(θ)(Van Genuchten and Nielsen, 1985; Fredlund et al., 1994)，如公式 2：

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

上述為常見之 VanGenuchten 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(θ)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：

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

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。

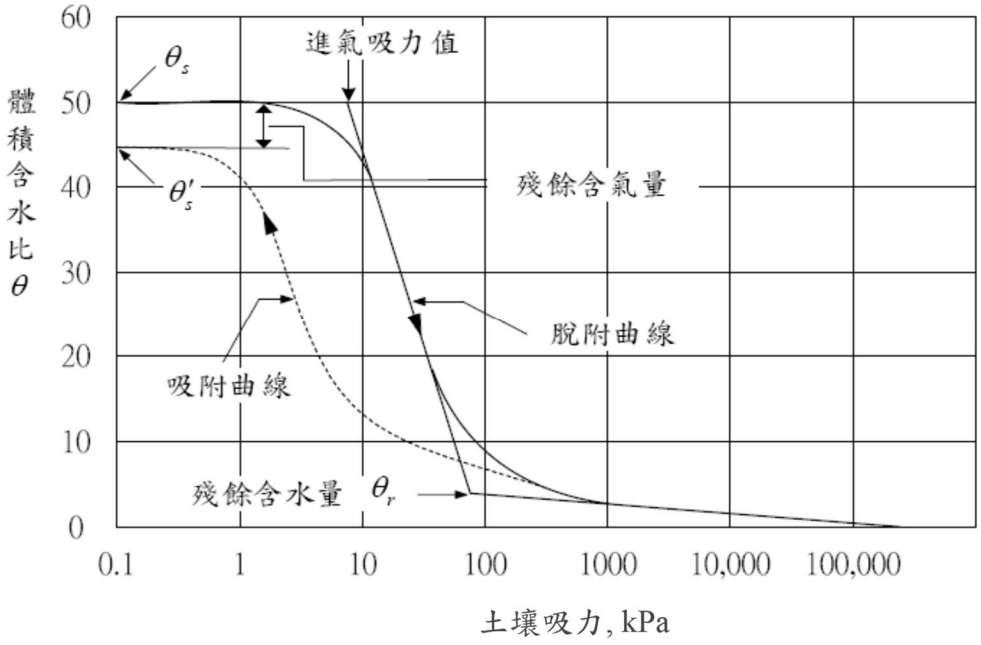


圖 2-2 土壤水分特徵曲線(林宏達與拱祥生，2001)

二、土壤電學特性

材料的介電度(Prmittivity)，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：

$$\varepsilon(f)=\varepsilon'(f)-j\varepsilon''(f) \tag{6}$$

其中 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 $\varepsilon_r=\varepsilon/\varepsilon_0$，$\varepsilon_0$ 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：

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

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：

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

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)

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

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)。

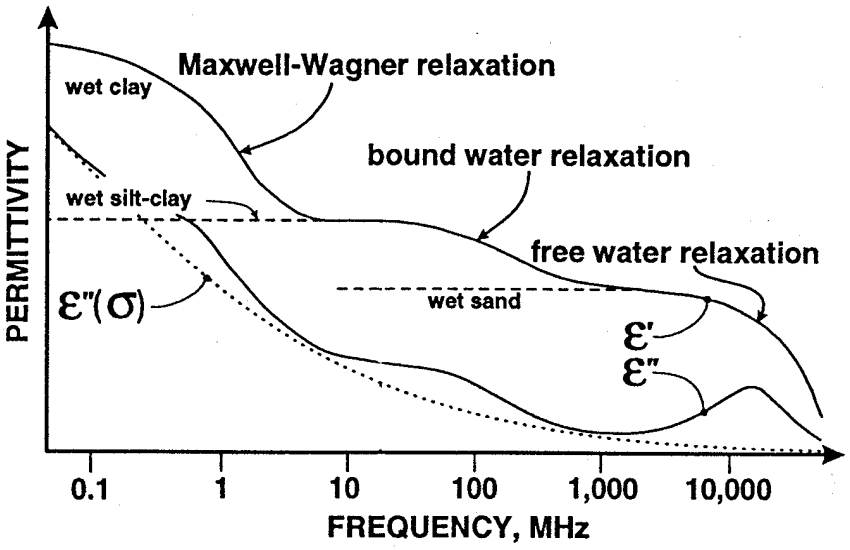


圖 2-3 土壤介電頻譜示意(修改自 Hilhorst and Dirkson, 1994)

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：

$$EC_{dc} = a_{uni} EC_w \theta^{m_{uni}} \tag{10}$$

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

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

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。

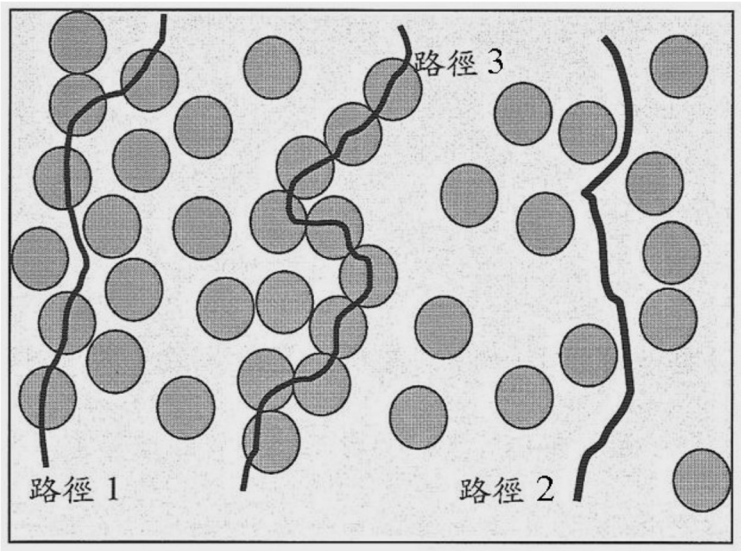


圖 2-4 電流於多孔隙介質中三種主要傳導路徑（修改自 Sauer, 1955）

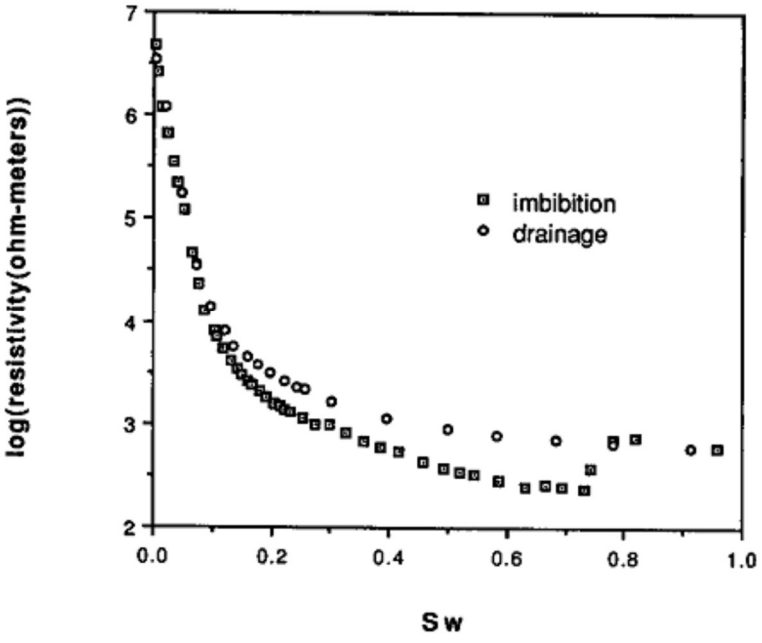


圖 2-5 砂岩乾溼循環試驗飽和度對應電阻率關係圖(Knight, 1991)

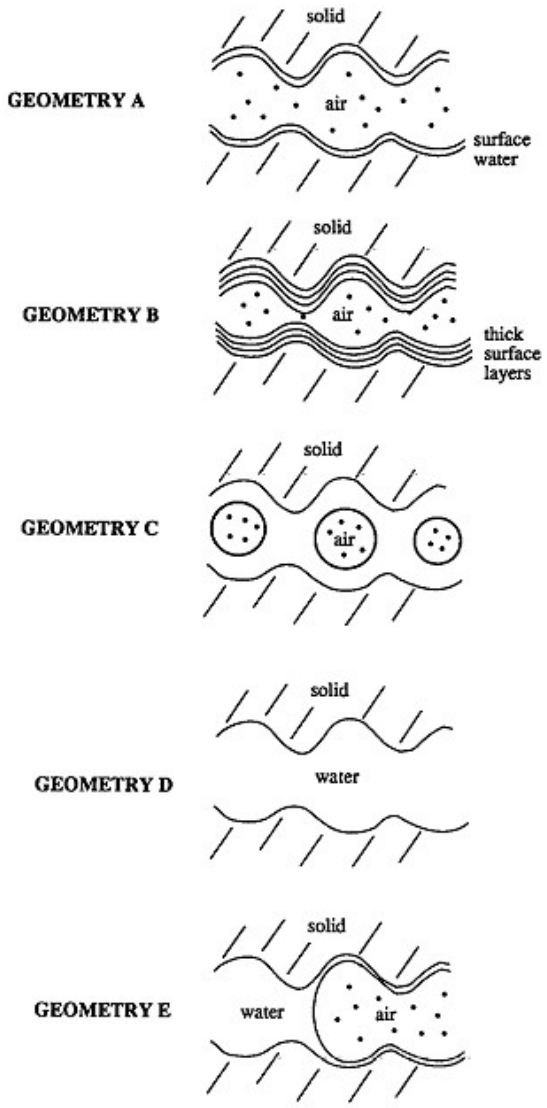


圖 2-6 孔隙內水分分佈示意圖(Knight, 1991)

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 coaxialcable)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 2-7 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，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; Chung et al., 2019)，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)。目前計畫主持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，

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

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*γ_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; Chung and Wang, 2022)，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)。

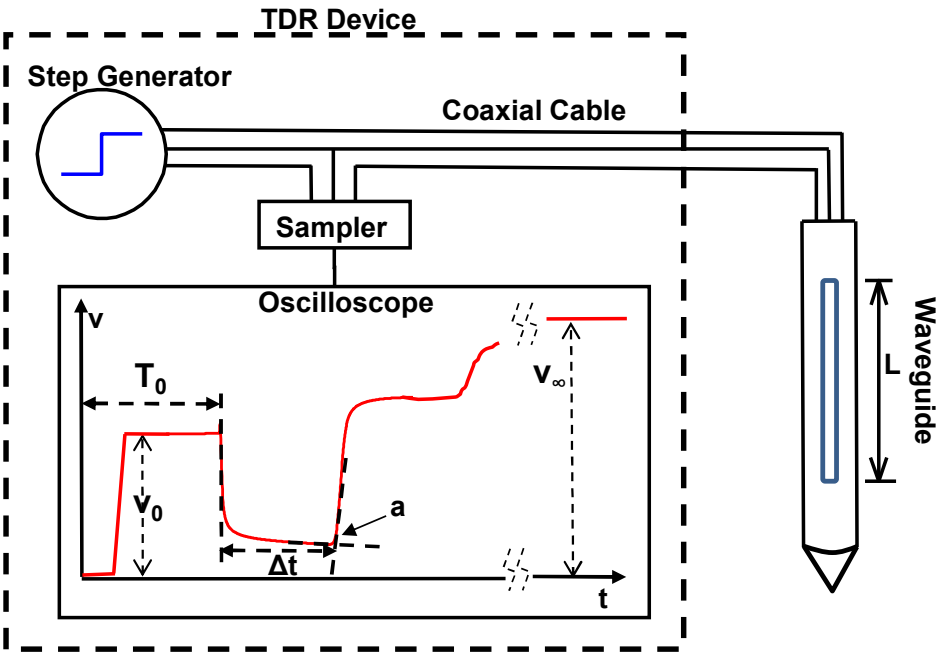


圖 2-7 時域反射儀之基本架構

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'slaw 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 感測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。

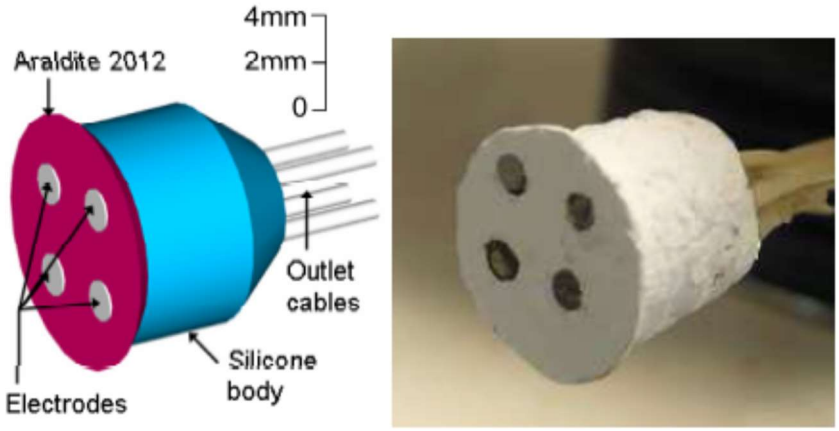


圖 2-8 三軸試驗用之電阻探頭(José et al. 2012)

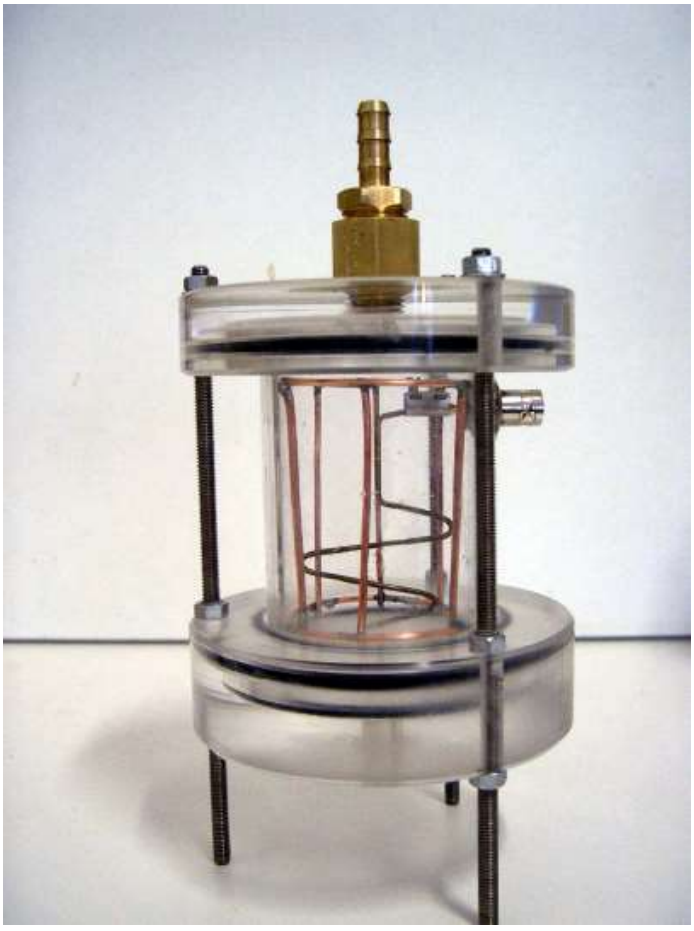


圖 2-9Zigzag-shaped 形狀 TDR 壓力鍋元件(Fernández et al., 2008)

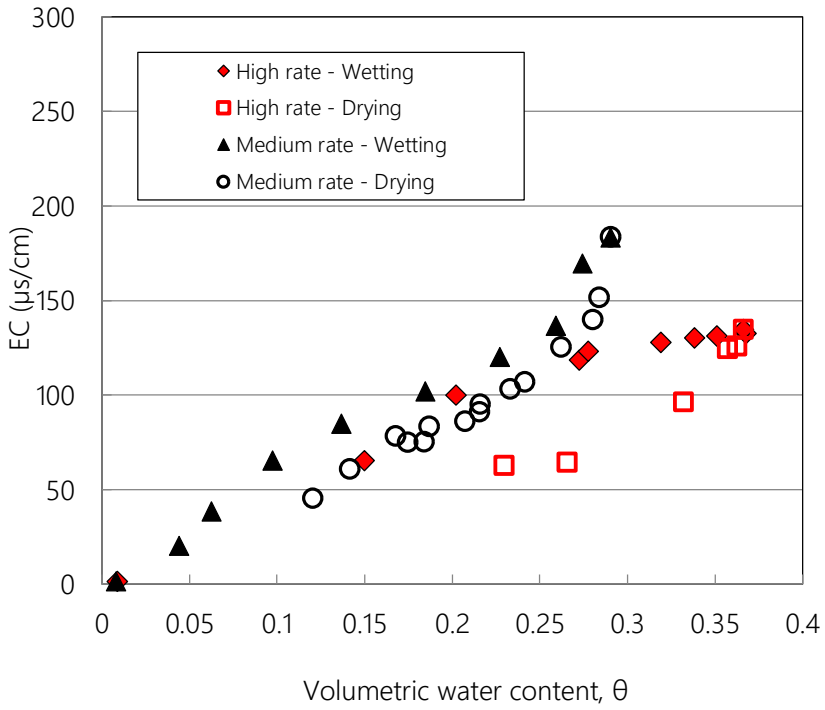


圖 2-10 含水量與電阻率遲滯(Hysteresis)現象與乾溼循環速度相關 (Chung et al. 2019)

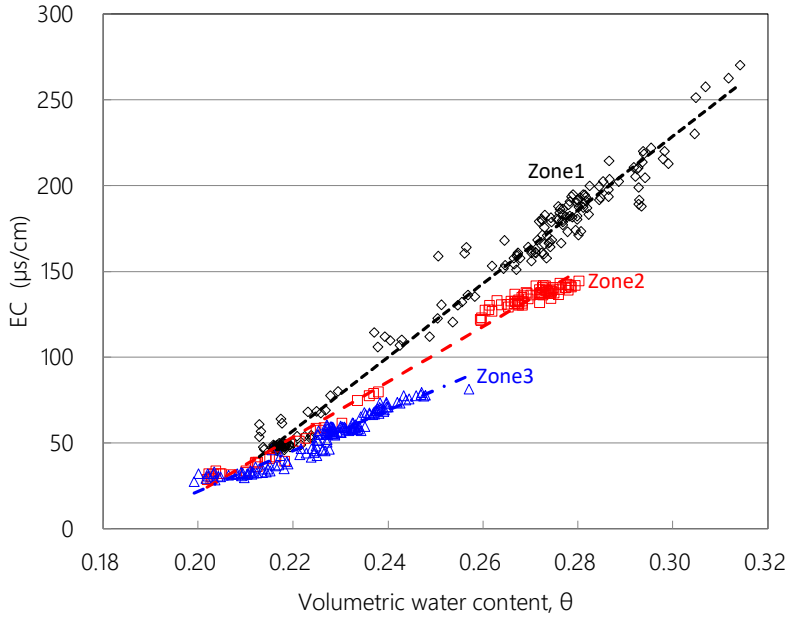


圖 2-11 現地含水量與電阻率關係與降雨入滲速率影響(Chung et al. 2019)

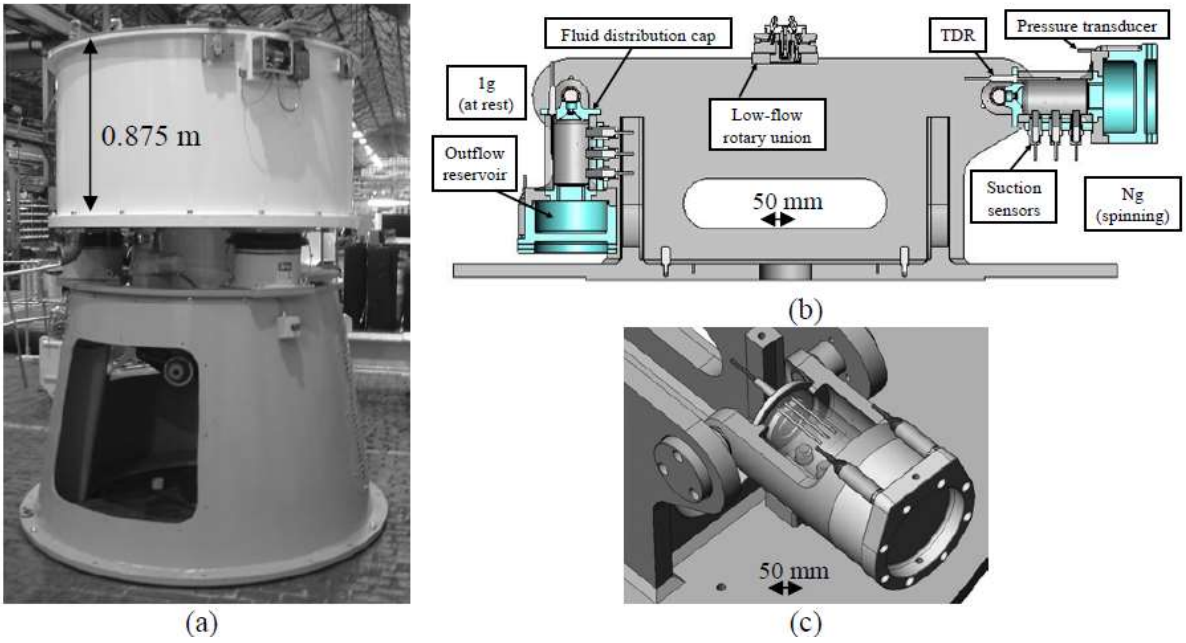


圖 2-12 離心機滲透計初步規劃(McCartney and Zornberg, 2006)

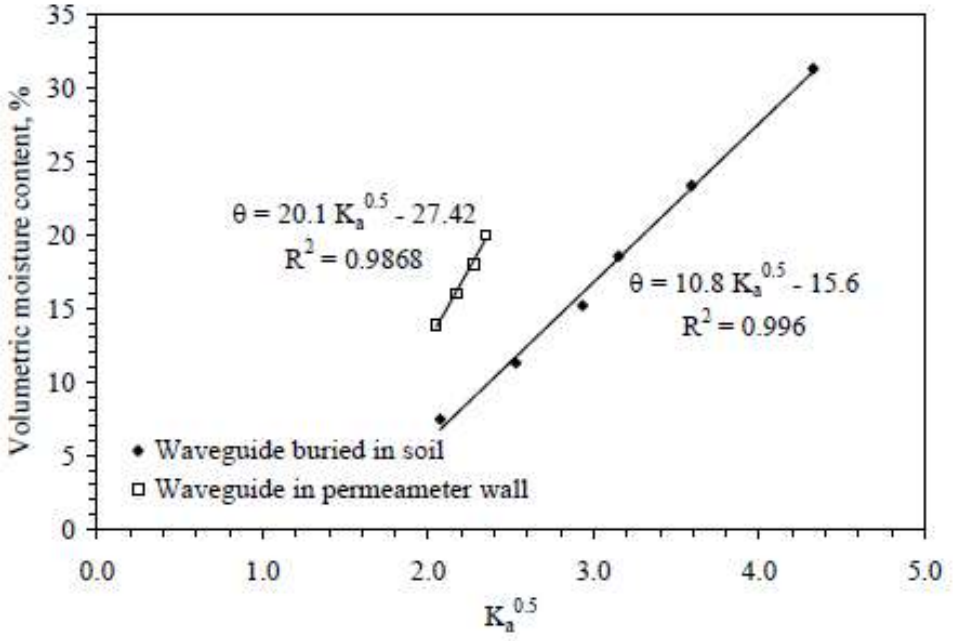


圖 2-13 離心機滲透計 TDR 介電常數與含水量之率定(McCartney and Zornberg, 2006)

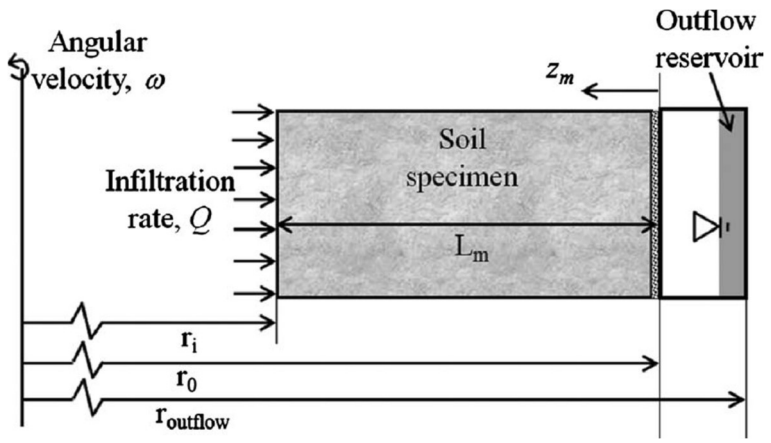


圖 2-14 離心機滲透計(Centrifuge permeameter)概念示意(Zornberg and McCartney, 2010a)

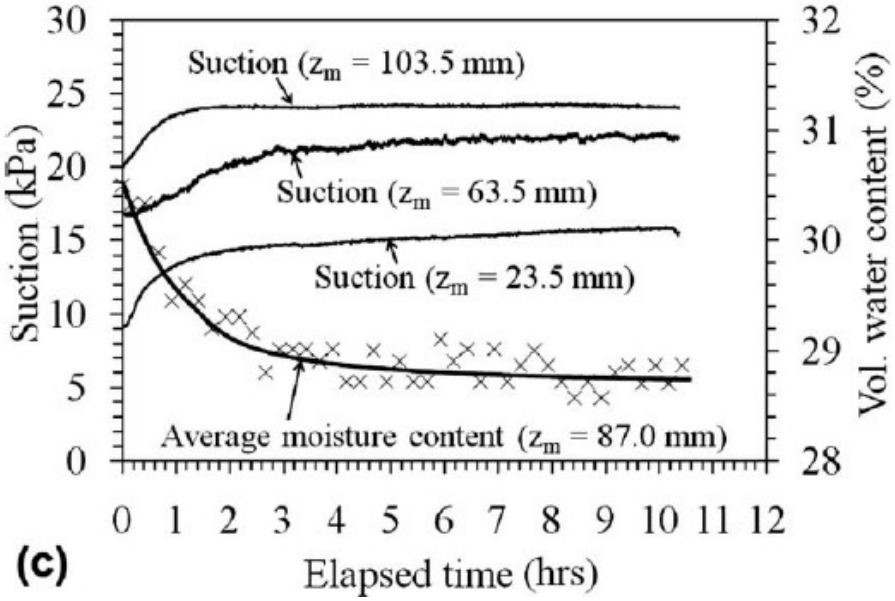


圖 2-15 TDR 於離心機滲透計量測成果(Zornberg and McCartney, 2010a)

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$Z^*(\Omega)$。

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

並轉換為導電度$EC_{dc}(Sm^{-1})$

$$EC_{dc} = Z_p^*\varepsilon_0 c/\left(LZ^*\right) \tag{14}$$

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$(8.854\times10^{-12}Fm^{-1})$,

c ＝ 光速$(3\times10^8 ms^{-1})$,

L ＝ 模具長度

模具的阻抗Z_p，可根據探頭尺寸計算：

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

其中

m ＝ 外導體的半徑(m)

n ＝ 內導體的半徑(m)

介電常數頻譜平方根

$$\varepsilon_a^{1/2} = \left(\left\{1+\left[1+\tan^2\left(\varepsilon''/\varepsilon'\right)\right]^{1/2}\right\}\varepsilon'/2\right)^{1/2} \tag{16}$$

其中，可進一步將導電度轉換為複介電常數（相對於真空的介電常數）

$$\varepsilon^* = \mathrm{EC}^*/\left[\pi f\varepsilon_v \arctan\left(2\mathrm{EC}'/\mathrm{EC}''\right)\right] \tag{17}$$

對於黏土，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，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

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

其中

n = 四分之一波長頻率值

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，主要得利用已知模具長度(L)和液體的介電特性，可將(18)式改寫

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

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。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。

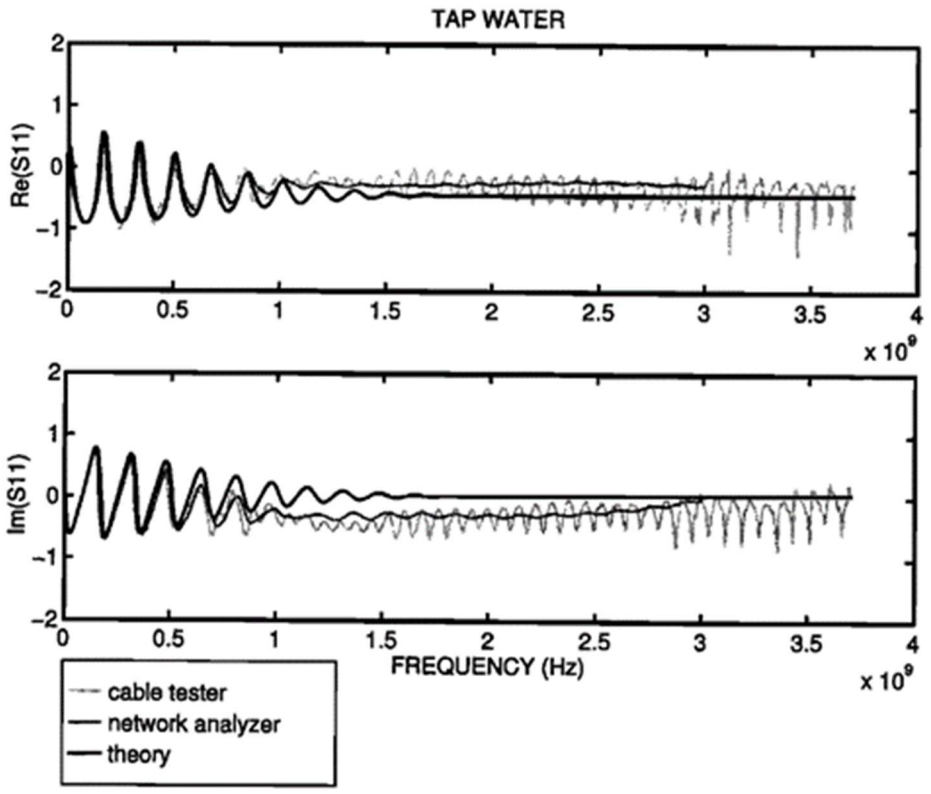


圖 2-16 自來水中實測和理論值(S_{11}散射函數的實部和虛部

(Heimovaara et al., 1996)

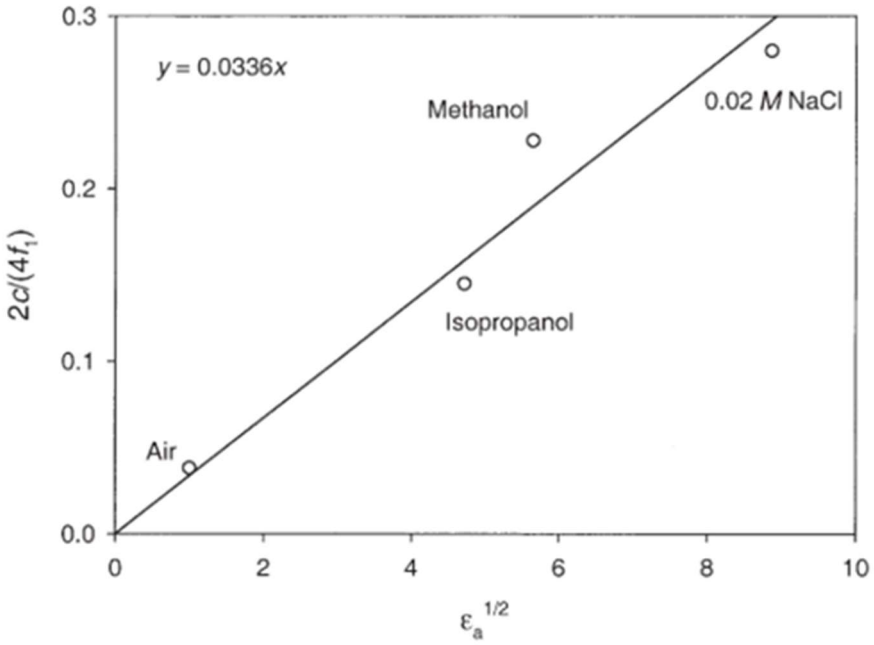


圖 2-17 空氣、丁醇、酒精和水校正圖(Logsdon, 2005)

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，透過中央大學示範站與 TDR 含水量感測器、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。

第二節模型試驗研究成果更新

一、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 2-18 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 外導体，內部探針為內導體，鋼模高為 16 cm，直徑為 10.2 cm，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 pH 值的影響因子之不確定性。**

實驗規畫以一般粉土與中大紅土為基礎，並至少以兩種乾密度(鬆 1.35 g/cm^3 與緊 1.45 g/cm^3)為規畫，溫度以一般室溫以及如夏日 30~35 度為主，pH 值設定為較酸值 5 與中性 7~8 為主。另外也將加入降雨水之 EC 值 160 與 660 μS/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：

TDR 壓力鍋：

本研究改良之 TDR 壓力鍋裝置的主要構件在圖 2-19 中詳細顯示，由以下幾個元件組成：

(1). TDR 內導體（圖 2-19-編號 1），內導體由金屬棒所製成，並連接到 BNC 連接器（圖 2-19-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 2-19-編號 2），該連接器用於將同軸纜線連接到內導體（圖 2-19-編號 1）和外導體（圖 2-19-編號 2），

(3). 外導體（圖 2-19-編號 3），該導體採用標準壓實模具（內徑為 6 inch），

(4). 多孔陶瓷板（圖 2-19-編號 4），由燒結的高嶺土組合而成，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 2-19-編號 5）作為模具和陶瓷壓力板的底部，也作為水進出多孔陶瓷板的通道。

(6). 溫度感測器（圖 2-19-編號 6）的準確度為 ±0.1%。

(7). 外上板（圖 2-19-編號 7），外底板（圖 2-19-編號 8），和外腔室（圖 2-19-編號 9）是測試期間控制氣壓室的一部分。

圖 2-20 為壓力鍋外部裝置的示意圖，壓力鍋中的標準夯實模(圖 2-21)將設置為 TDR 探頭的外導體，多孔陶瓷板放置在 TDR 探頭下方(圖 2-22)，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。

TDR200 訊號脈衝產生器：

基於 Campbell Scientific TDR200 設備能夠測量多孔介質的體積含水量(VWC)，例如土壤、土壤導電度或特定的時域測量。TDR200 主要可產生一電磁脈衝，應用於同軸系統(包括用於土壤測量的 TDR 探頭)。數據可由脈衝產生器存儲並數字化以供進一步的分析或存儲。此 TDR 的波形有最多 10112 個數據點。TDR-200 的測量範圍為 0 到 3800 m (距離)，分辨率為 1.35 mm。該設備的脈衝產生器可輸出 250 mV，源頭阻抗為 50Ω。設備的詳細規格如表 2-1 所示。

TRH-300(溫度計)

為量測實驗中的溫度，本研究使用了 TRH-300 溫度計。該設備的測量範圍為 0 至 40℃，輸出電壓為 0 至 5 VDC。將此設備探頭放在土壤樣品底部的孔上，並用矽膠密封，以防止測試過程中漏水。測試期間的設備細節和設置如圖 2-23(b)所示。

NI-USB6008 DAQ(數據採樣器)：

為從溫度計收集數據，本研究使用 NI-USB6008 DAQ 並使用 LabVIEW 程序進行控制。DAQ 和 TRH-300 的設置如圖 2-23(c)所示。

真空機：

真空機將在測試期間抽出模具腔室內的空氣來使水更快速滲透土體，幫助試體達到飽和。除此之外，本機器還用於去除水中的空氣(製造所需的水)，使水更容易吸收到儀器底板。真空機功率為 1/4 馬力(HP)，轉速為 50 L/min。抽真空機如圖 2-23(d)所示。

空氣壓縮機：

氣壓由空氣壓縮機提供，如圖 2-23(e)所示。此壓縮機具有 4.5 馬力和 55 公升容量的油箱，主要針對土壤施加正壓來去除土壤中的水分。

表 2-1TDR-200 訊號脈衝產生器規格

Specification	
Measurement Made	Volumetric water conten tof soil, electrical conductivity, deformation
Pulse Output	250mV in to 50Ω
Impedance's Output	50Ω ±1%
Waveform Averaging Capability	1to128
Waveform Sampling	
Range	0 to 3800m (distance) 0 to 27.75 μs
Resolution	1.35mm (distance) < 4.4ps (time)

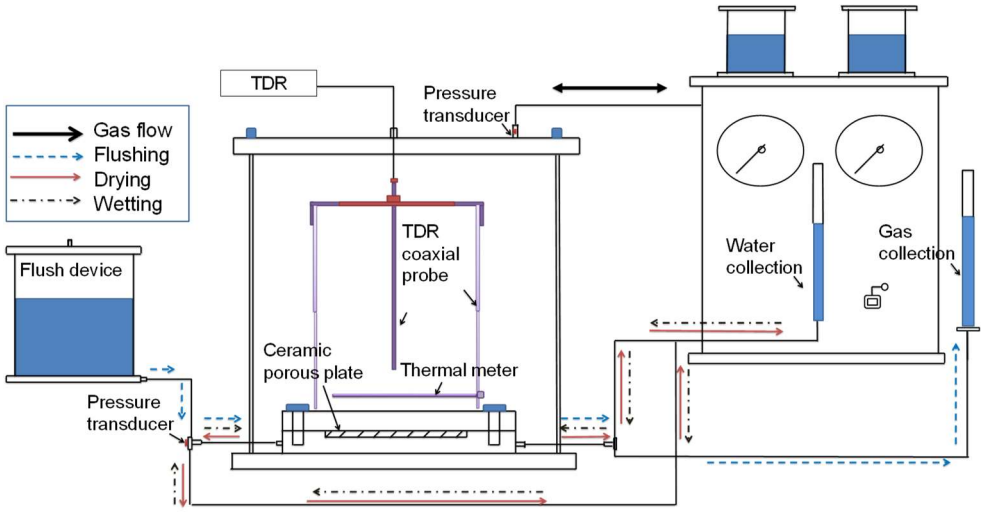


圖 2-18 改良型 TDR 壓力鍋試驗配置(Chung et al. 2019)

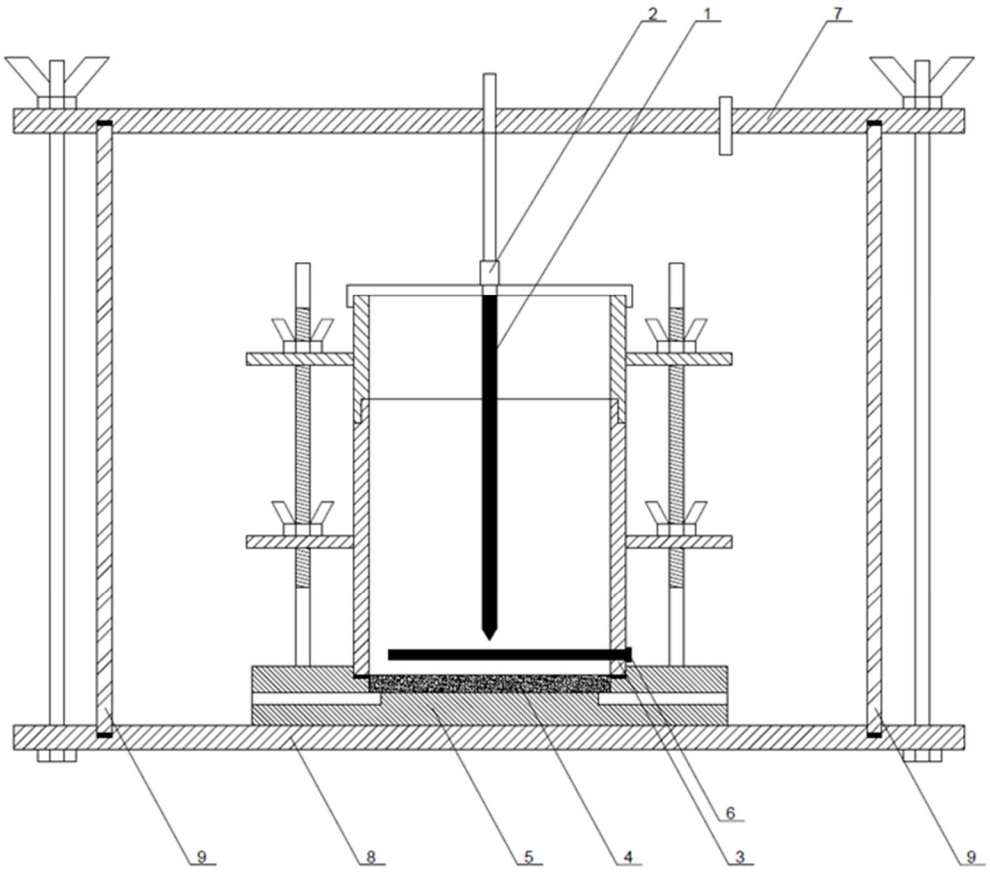


圖 2-19 本研究 TDR 壓力鍋試驗配置

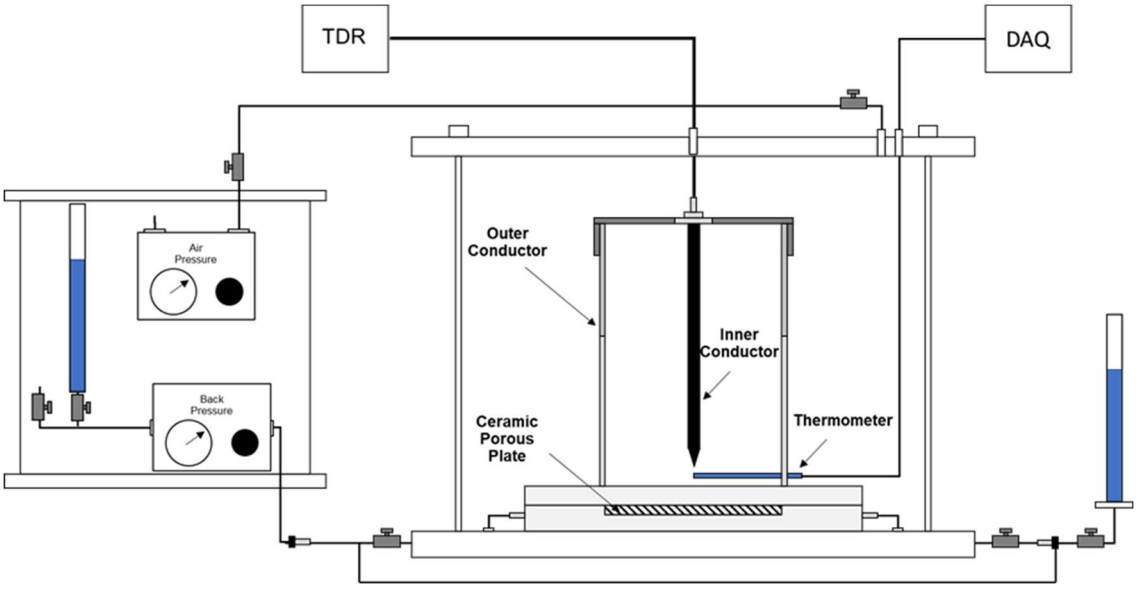


圖 2-20 本研究 TDR 壓力鍋外部設計圖



圖 2-21 本研究 TDR 壓力鍋實體照片

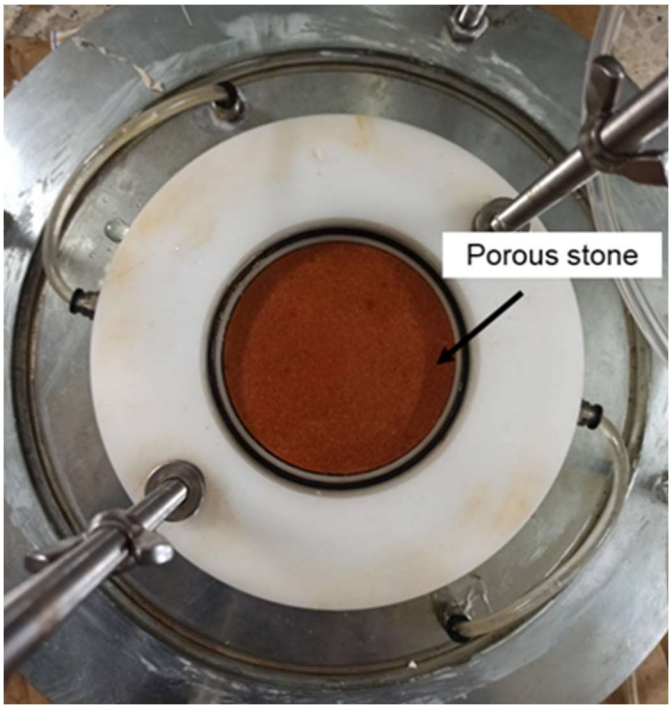


圖 2-22 儀器底板

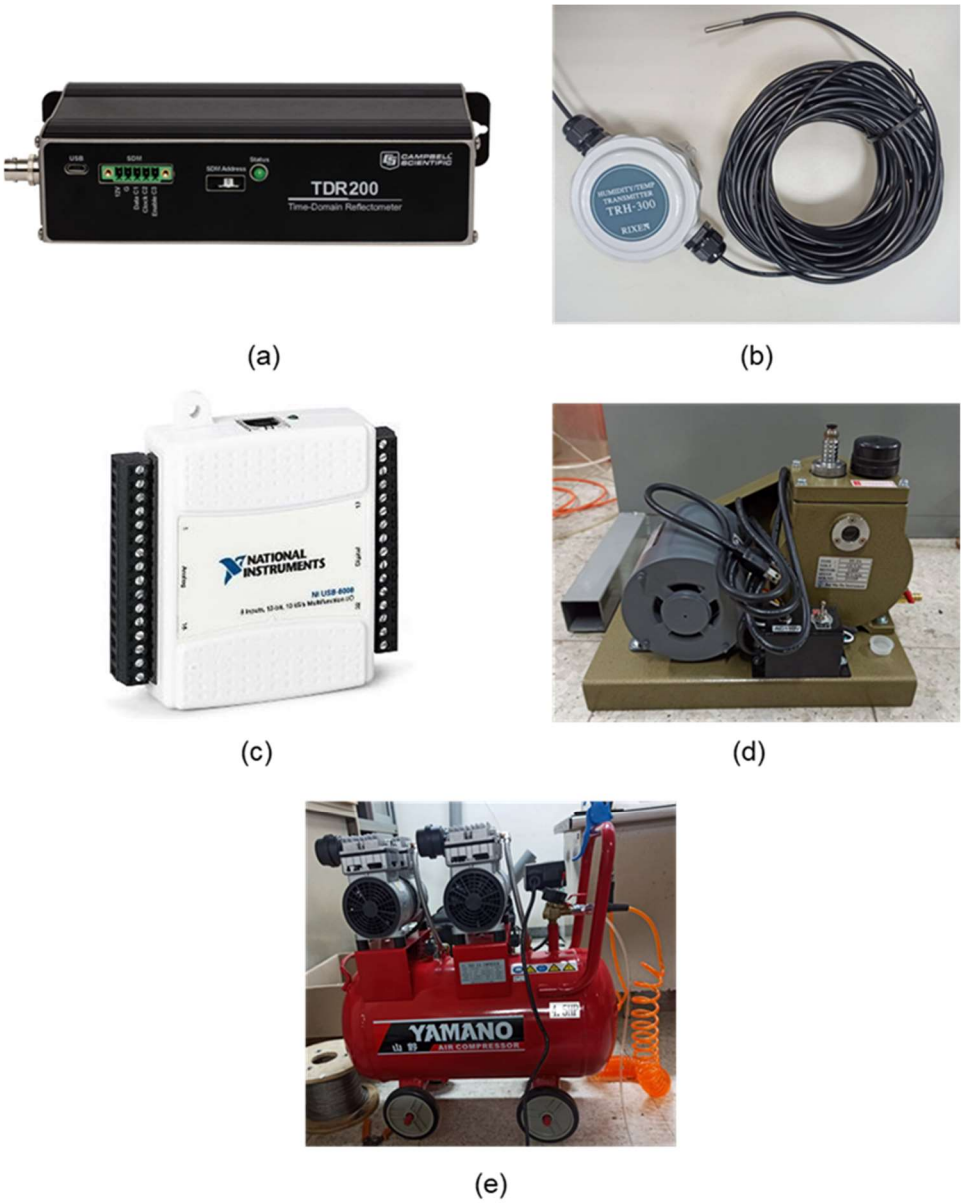


圖 2-23(a)TDR200，(b)TRH-300，(c)NIUSBDAQ6000，(d)真空機，和(e)壓縮機機。.

2. 實驗流程：

TDR 壓力鍋實驗將測試多種不同物理量土壤樣品。第一組實驗土壤乾密度為 1.35 g/cm^3，其滲透水導電度為 169.4 μS/cm。為評估土壤乾密度的影響，對照組之乾密度為 1.45 g/cm^3 和

169.4 μS/cm 之滲透水導電度。為了評估導電度對水的影響，第三組與第一組實驗的乾密度相同，但更改為更高的滲透水導電度(657 μS/cm)。更詳細的土壤樣品參數列於表 2-3。圖 2-24 為實驗示意圖。下面將詳細描述測試的步驟：

a. 測試的第一步是使透水石(多孔陶瓷板)飽和，施加壓力直到完全飽和(0.25 - 0.50 kg/cm^2)。

b. 其次，土壤樣品需在模具中被壓實到所要達到的乾密度。

c. 將土壤樣品放在腔室內並且緊密。腔室之間的間隙須用矽膠填充，以防止實驗過程中漏氣。

d. 下一步的潤濕步驟，土壤樣品以較慢的潤濕速率飽和。而滲透水將釋放至土壤樣品中，必要時在腔室中施加負壓以協助土壤潤濕的過程。

e. 在水容器上監測水減少的過程，並在每 1 分鐘記錄一次。當飽和度達到 1 時，(S=1)，則停止潤濕。

f. 在潤濕步驟完成後開始乾燥。在乾燥步驟，首先於腔室內施加正氣壓以讓土壤樣品內的滲透水通過模具的底座之孔洞排出。

g. 計算在潤濕步驟中流入土壤樣品的總流量(監測圖 2-25 水容器減少的量)。

h. TDR-200 在測試過程中每 1 分鐘記錄一次土壤樣品的反射波形。

i. 在潤濕和乾燥過程中，用模具側面的溫度計 TRH-300 將記錄土壤樣品的溫度。

在潤濕過程中，滲透係數採用降水頭法(Falling head methods)計算。降水頭法常用於計算低滲透性土壤的滲透係數，如粉砂和粘土。採用降水頭法計算土壤的滲透係數如下：

$$k_T = \frac{2.303aL}{At}\log_{10}\frac{h1}{h2} \tag{20}$$

其中，a為水容器截面積，L 為土壤樣品長度，A 土壤樣品的內部截面積，t是滲透的時間，$h1$和$h2$個別為$t=0$和$t=1$的水頭高。

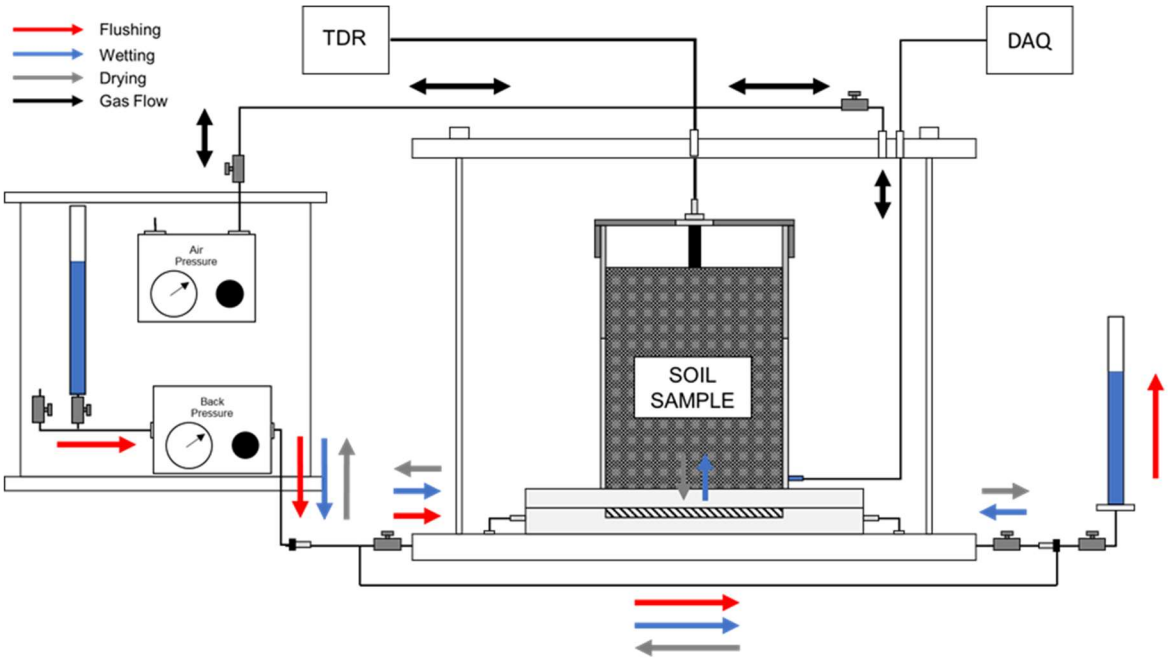


圖 2-24 本研究 TDR 壓力鍋測量步驟示意圖

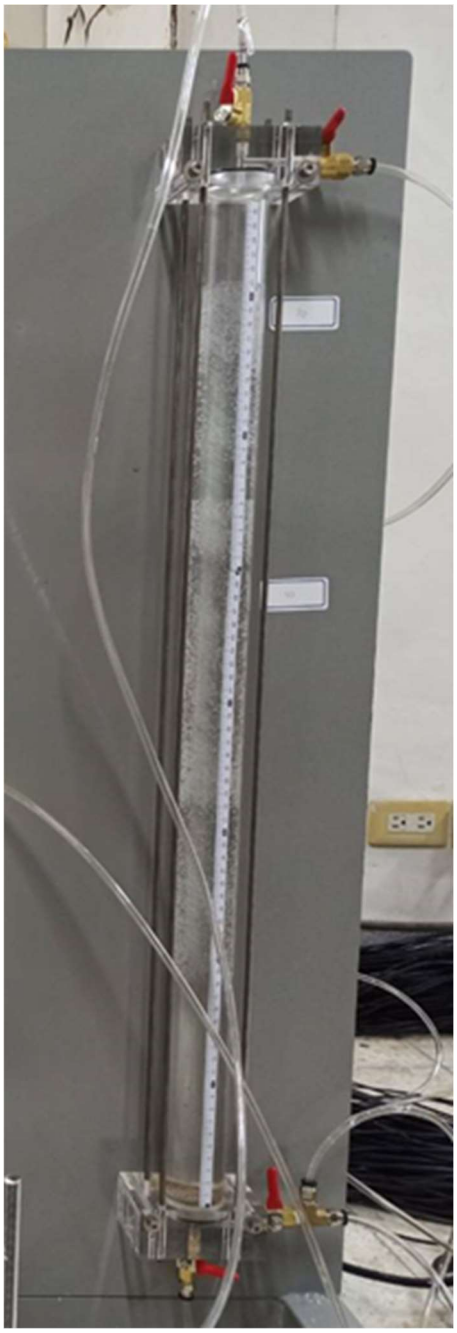


圖 2-25 水容器

3. 感測長度率定：

本研究為校準 L，使用水和空氣作為校準材料。TDR 壓力鍋感測模具對水和空氣的測量結果如圖 2-26 所示。根據 Heimovaara(1993)，電磁波在水中的傳播時間和空氣中的傳播時

間為：

$$\Delta\tau_w = t_0 + \frac{2L}{C}\sqrt{K_w(\mathrm{T})} \tag{21}$$

$$\Delta\tau_a = t_0 + \frac{2L}{C}\sqrt{K_a(\mathrm{T})} \tag{22}$$

其中，K_a是空氣的視介電常數(K_a=1)，K_w(T)是水的視介電常數。水的視介電常數是一個非恆定值，它與溫度有關，可計算為(Pepinetal.,1995)：

$$K_w = 87.740 - 0.4008T + 3.98\times(10^{-4})T^2 - 1.410\times(10^{-6})T^3 \tag{23}$$

其中，T是溫度(℃)，通過代入$\Delta\tau_w$、$\Delta\tau_a$、K_w和K_a並求方程式解獲得L和t_0。其率定後的t_0為2.291×10^{-8}(ps)，L 為0.09445(m)。

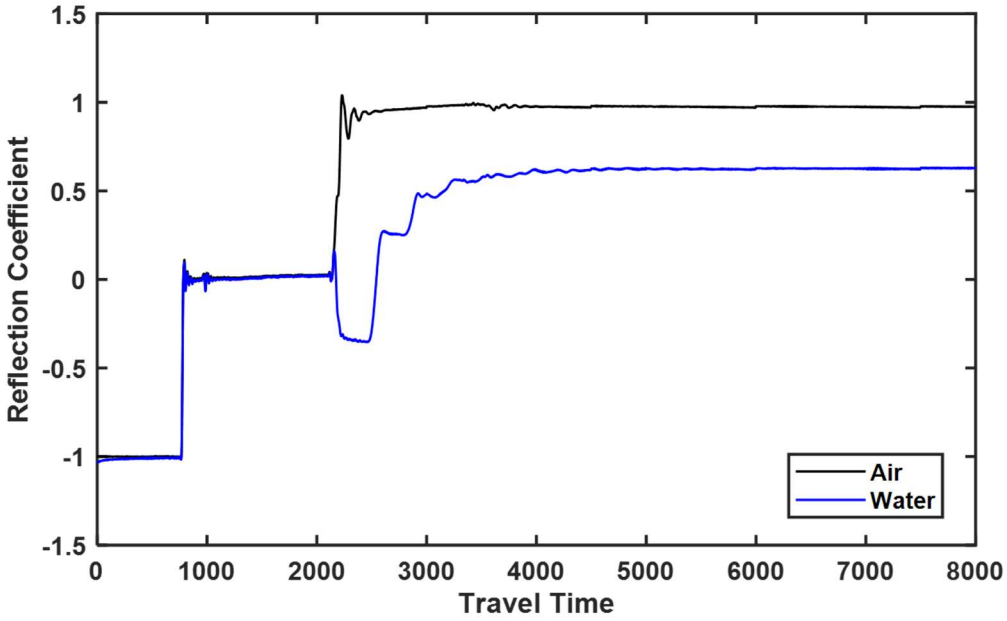


圖 2-26 TDR 測量結果(空氣和水)

4. 導電度率定：

通過不同導電度的溶液來校正導電度(EC)的量測。將氯化鈉(鹽)添加到水溶液中以增加導電度並記錄 TDR 波形。使用 CLEAN CON200 導電度計量測水的實際導電度(圖 2-27)。該導電度計可以測量高達 400.0 mS/cm，其分辨率為 0.001uS/cm 至 0.1 mS/cm。並且，還可以測量 -10 到 110.0 之間的溫度。導電度計的詳細規格如表 2-2 所示。

水的導電度在 TDR 波形中可以通過式 24 計算得出，其中，K_p 是模具的幾何因子，R_S 是 TDR 源頭阻抗，ρ'_∞ 是反射係數(式 25)。R_{cable} 可以通過式 26 計算，其中 $\rho'_{\infty,sc}$ 是模具處在短路狀態的穩態反射係數。

$$EC = \frac{K_P}{R_S}\left(\frac{1-\rho'_\infty}{1+\rho'_\infty}\right)\left[\frac{1}{1-\frac{R_{cable}}{R_s}\left(\frac{1-\rho'_\infty}{1+\rho'_\infty}\right)}\right] \tag{24}$$

$$\rho'_\infty = 2\frac{\rho_\infty - \rho_{\infty,air}}{\rho_{\infty,air}+1}+1 \tag{25}$$

$$R_{cable} = \frac{R_S}{\left(\frac{1-\rho'_{\infty.SC}}{1+\rho'_{\infty,SC}}\right)} \tag{26}$$

校準結果如圖 2-28 所示，使用 TDR 測量到的材料的導電度可以計算為：

$$EC = 1094.1458\left(\frac{1-\rho'_\infty}{1+\rho'_\infty}\right)\left[\frac{1}{1-\frac{0.45243}{50}\left(\frac{1-\rho'_\infty}{1+\rho'_\infty}\right)}\right] \tag{27}$$

表 2-2 CLEAN CON 200 導電度計規格

尺寸		$94\times190\times35mm\,(W\times L\times H)$
重量		$250g$
導電度	量測範圍	$0.000\,\mu S/cm\sim400.0\,mS/cm$
	解析度	$0.001\,\mu S/cm\sim0.1\,mS/cm$
	精度	0.5%
溫度	量測範圍	$-10.0°C\sim110.0°C$
	解析度	$0.1°C$
	精度	$0.5°C$



圖 2-27 CLEAN CON200 導電度計

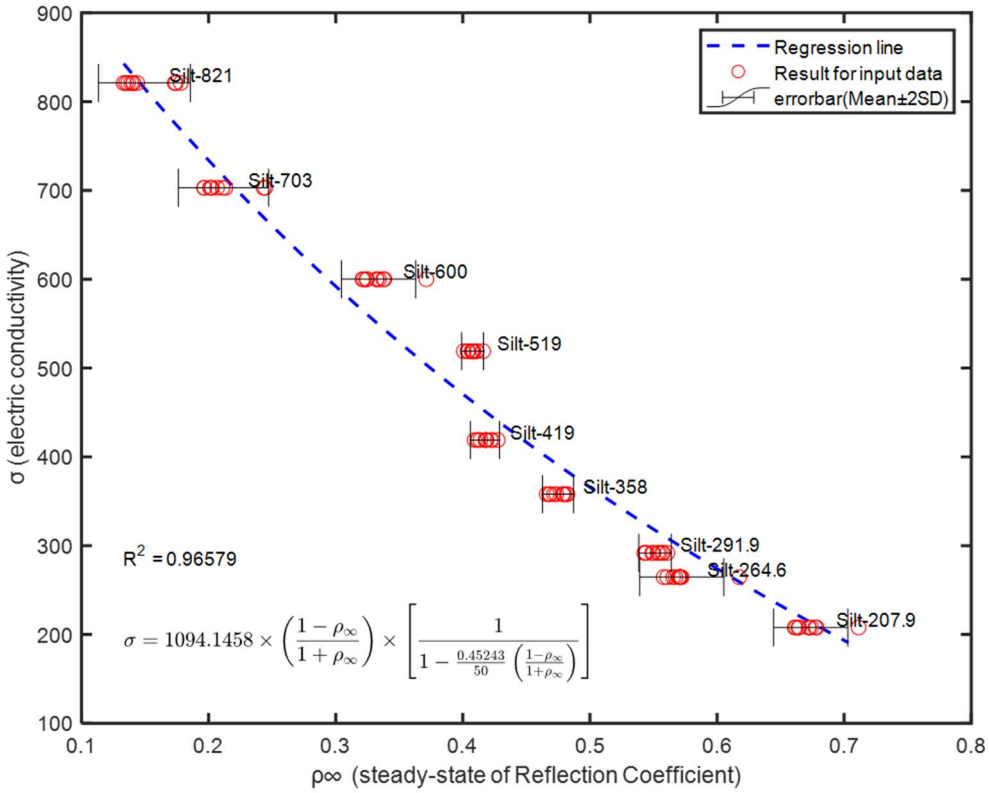


圖 2-28 導電度校正回歸結果

5. 土壤樣品：

土壤樣品為桃園楊梅紅土，土壤比重為 2.62，液性指數為 38.1%，塑性指數為 13.9%，土壤的粒徑分佈如圖 2-68 所示，土壤的最大乾密度為 $1.68\,g/cm^3$ ，最佳含水量為 17.6%。

為研究土壤乾密度、pH 和導電度的變化對土壤介電譜的影響，本研究準備不同的乾密度如 $1.35\,g/cm^3$ 和 $1.45\,g/cm^3$ 。而試體的滲透性試驗則採用降水頭法。選擇降水頭做為滲透性實驗是因為土壤樣品的土壤分類是粉土。將土壤夯實到需要的密度至模具中來開始滲透性實驗。將濾紙、多孔陶瓷板和延長環置於樣品模具中並將樣品模具鎖定並放置在滲透裝置中。然後通過計算滲透係數式 20。$1.35\,g/cm^3$ 和 $1.45\,g/cm^3$ 乾密度的紅土滲透性試驗

結果如表 2-3 和表 2-4 所示。

為觀察不同導電度的影響，本研究將鹽加入至自來水中並滲透至土壤樣品，使土壤具有更高的導電度。對於不同 pH 值的實驗組，第一個土壤樣品將使用 pH 值 6.9 的自來水製備，第二個土壤樣品的 pH 值則為 5。為了使 pH 值降低，在自來水中加入酸性溶液以降低 pH 值。土壤樣品詳情見表 2-5。關於 VNA 的相關測試，採用與 TDR 壓力鍋相同的程序製備的土壤樣品，請詳情參見表 2-6。

TDR 壓力鍋和 VNA 實驗的土壤樣品製備都遵循下列步驟：

a. 第一步準備 0%含水量的乾燥土。

b. 然後根據所需的含水量加入一定量的水至土壤中，如表 2-5 用於 TDR 壓力鍋實驗，表 2-6 則用於 VNA。

c. 然後將土壤靜置一天，以確保水分均勻地吸收到土壤中。

d. 然後按照表 2-5 和表 2-6 將土壤壓實到所需的乾密度。

表 2-3 初期條件為 1.35g/cm^3 乾密度的滲透係數實驗結果

水容器截面積 $a(cm^2)$	12.04
土壤樣品長度 $L(cm)$	11.20
土壤樣品截面積 $A(cm^2)$	81.71
花費時間($h1$ 至 $h2$) $t(s)$	60
初期含水量 $w(\%)$	12.6
空隙率 e	0.9156
乾密度 $\gamma_d(g/cm^3)$	1.3500

編號	$h1(cm)$	$h2(cm)$	$k(cm/s)$	S
1	30.00	27.10	0.00280	0.4578
2	27.10	26.00	0.00114	0.5218
3	26.00	25.40	0.00064	0.5468
4	25.40	24.80	0.00066	0.5607
5	24.80	24.40	0.00045	0.5746
		……		
35	18.45	18.30	0.00022	0.7094
36	18.30	18.20	0.00015	0.7135
37	18.20	18.10	0.00015	0.7163
38	18.10	18.00	0.00015	0.7191
39	18.00	17.90	0.00015	0.7219
40	17.90	17.80	0.00015	0.7246

表 2-4 初期條件為 1.45g/cm^3 乾密度的滲透係數實驗結果

水容器截面積 $a(cm^2)$	12.04
土壤樣品長度 $L(cm)$	11.20
土壤樣品截面積 $A(cm^2)$	81.71
花費時間($h1$ 至 $h2$), $t(s)$	60
初期含水量 $w(\%)$	205
空隙率 e	0.9156
乾密度 $\gamma_d(g/cm^3)$	1.3500

編號	$h1(cm)$	$h2(cm)$	$k(cm/s)$	S
1	30.00	28.70	0.00122	0.6483
2	28.70	28.40	0.00029	0.6869
3	28.40	27.40	0.00099	0.6958
4	27.40	26.70	0.00071	0.7256
5	26.70	26.20	0.00052	0.7464
		……		
35	22.65	22.60	0.00006	0.8638
36	22.60	22.50	0.00012	0.8653
37	22.50	22.45	0.00006	0.8682
38	22.45	22.40	0.00006	0.8697
39	22.40	22.35	0.00006	0.8712
40	22.35	22.30	0.00006	0.8727

表 2-5 本研究之 TDR 壓力鍋實驗的土壤樣品細節

土壤編號	1	2	3	4
乾密度 (g/cm^3)	1.35	1.45	1.35	1.35
初期重量含水量 $w(g/g)$	12.6	20.0	12.6	12.6
導電度 (μS)	164.5	169.4	657	169.4
pH	6.9	6.9	6.9	5.0

表 2-6 本研究中 VNA 測試的樣本細節

樣本名稱	乾密度 (g/cm^3)	重量含水量 $w(cm^3/cm^3)$	導電度 $(\mu S/cm)$	pH
1.35-15	1.35	15	169.4	6.9
1.35-20	1.35	20	169.4	6.9
1.45-20	1.45	20	169.4	6.9
1.45-25	1.45	25	169.4	6.9
1.45-30	1.45	30	169.4	6.9
1.35-20-hc	1.35	20	651	6.9

6. 實驗結果：

表 2-7 為初始實驗土壤樣本的物性分析結果。

表 2-7 土壤樣本的物性分析結果

Sample	$\gamma_d(g/cm^3)$	InitialWaterContent(%)	Salinity(μS)	pHValue
Sample1	1.35	12.6	161.1	6.8
Sample2	1.45	20.0	165.2	6.8

。樣本 1(1.35 g/cm^3& 164.5 $\mu S/cm$)實驗結果：

圖 2-31 顯示樣本 1 的實驗結果，其乾密度為 1.35 g/cm^3，初期重量含水量為 12.6%，水的導電度為 164.5 μS/cm。本實驗使用自來水潤濕土壤樣品，至土樣完全飽和或飽和度達到 100%後停止。水流示意圖如圖 2-24 所示。實驗前水容器的水高為 2

5cm，TDR 壓力鍋底部與水容器的水高差為 30 cm 如圖 2-29 所示。在此過程中，每隔一分鐘記錄一次水容器的水位高度。

在潤濕步驟完成後，在乾燥步驟開始之前，為了方便起見，將水容器內的水排掉。乾燥步驟是通過在腔室內施加氣壓並讓水從土壤樣品中流出來作為開始。在乾燥早期階段，水從土壤流向水容器，並每隔一分鐘記錄一次該過程中水位的變化。圖 2-24 也解釋了乾燥步驟。在第二個循環中重複該過程。而在潤濕和乾燥的過程中，每分鐘都會記錄 TDR 波形，如圖 2-30 所示。此後，本研究利用 Topp et al. (1980)計算出每分鐘記錄土壤樣品的土壤體積含水量，公式如下：

$$\theta = -5.3\times10^{-2} + 2.92\times10^{-2}K_a - 5.5\times10^{-4}K_a^{\,2} + 4.3\times10^{-6}K_a^{\,3} \tag{28}$$

圖 2-31 顯示所有潤濕和乾燥過程，在本次試驗中首先潤濕土壤樣品，直到飽和度 100%，而這個過程持續了 40 分鐘。式 28 計算出的體積含水量和觀察結果在目前這個階段有所不同，特別是在測試開始時潤濕速率較快速的階段。在潤濕結束後，由於土壤已經飽和，式 28 開始計算出的體積含水與水容器相似的值。該過程中的體積含水量如圖 2-32 所示。

本研究將乾燥過程分為兩個階段：初期乾燥和後期乾燥，分階段是因為乾燥過程開始時的速率較快，並且與後期乾燥過程形成強烈對比，根據觀察將初期乾燥和後期乾燥分開。如果乾燥速率小於 0.1 mm/min，則認為完成初期乾燥並繼續進行後期乾燥。在第一個循環中，初期乾燥持續 52 分鐘。在這個階段，觀測水容器之結果低於式 28 所估計之體積含水量，如在初期乾燥過程結束時，觀察到的體積含水量為 33.9%，而使式 28 計算出的體積含水量為 39%。後期初期乾燥中的體積含水量如圖 2-32，後

期乾燥過程持續四天，並在體積含水量為 0.2% 時停止(式 28)，如圖 2-33。

第二個循環的潤濕過程持續 72 分鐘，直到式 28 計算出的體積含水量達到 48.8%。在這個潤濕過程中，開始時式 28 計算出的體積含水量雨水容器計算出的體積含水量之差異也與第一個循環一樣，並且在潤濕的過程結束時開始相似。在最初的乾燥過程中也可以找到相似之處，其中水容器計算出的含水量低於土壤樣品於式 28 的含水量。在初期乾燥過程結束時，觀測的含水量為 50.5%，而式 28 的含水量為 49.8%。第二個循環的潤濕體積含水量和初期乾燥體積的含水量如圖 2-34 所示。乾燥過程持續 5 天，如圖 2-35 所示。

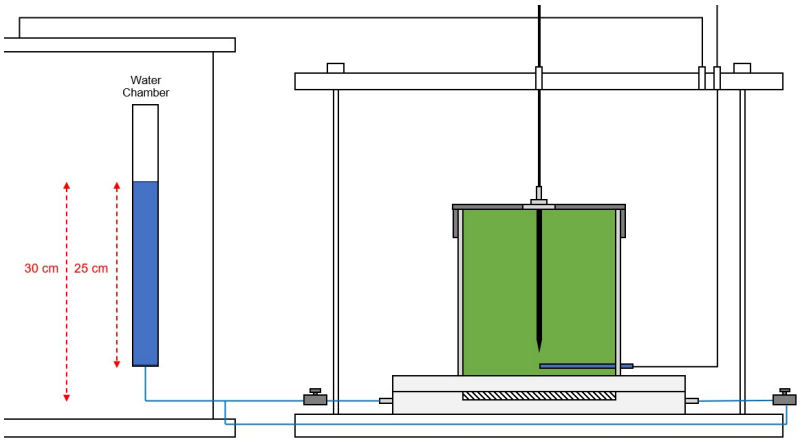


圖 2-29 水位高差示意圖

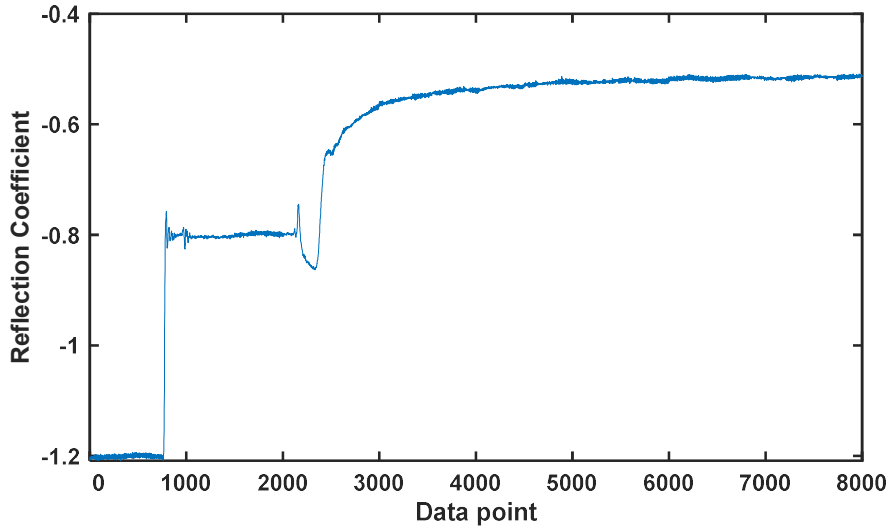


圖 2-30 樣本 1 初期乾燥過程中的實測波形

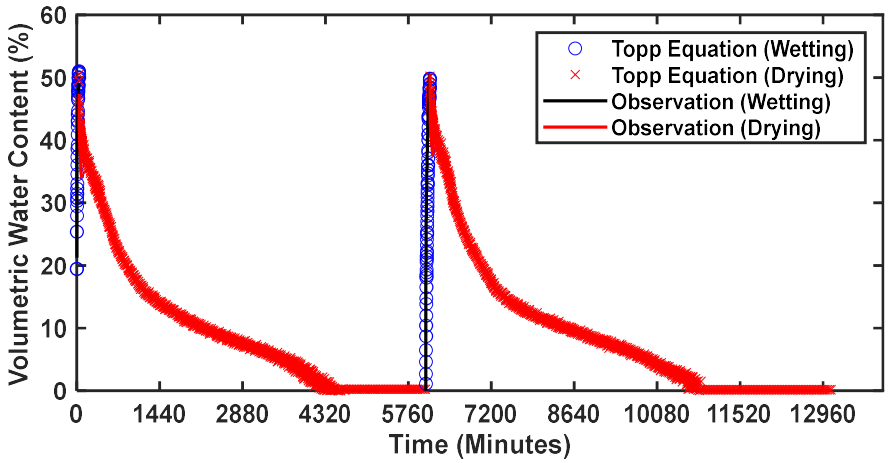


圖 2-31 樣本 1 所有潤濕和乾燥過程

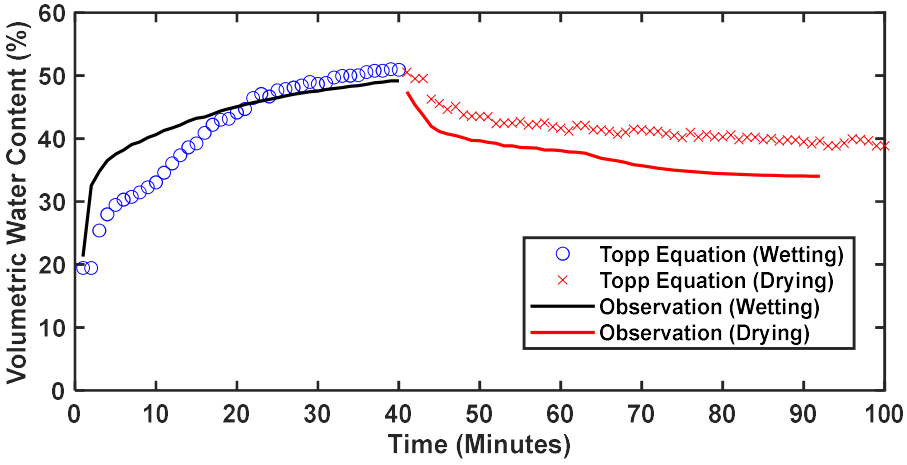


圖 2-32 樣本 1 第一個循環中的潤濕過程和初期乾燥

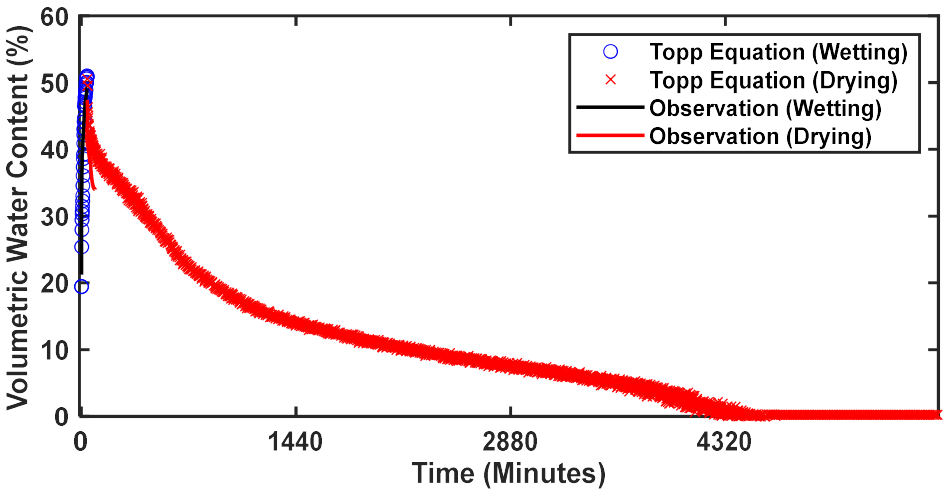


圖 2-33 樣本 1 第一個循環中的乾燥過程

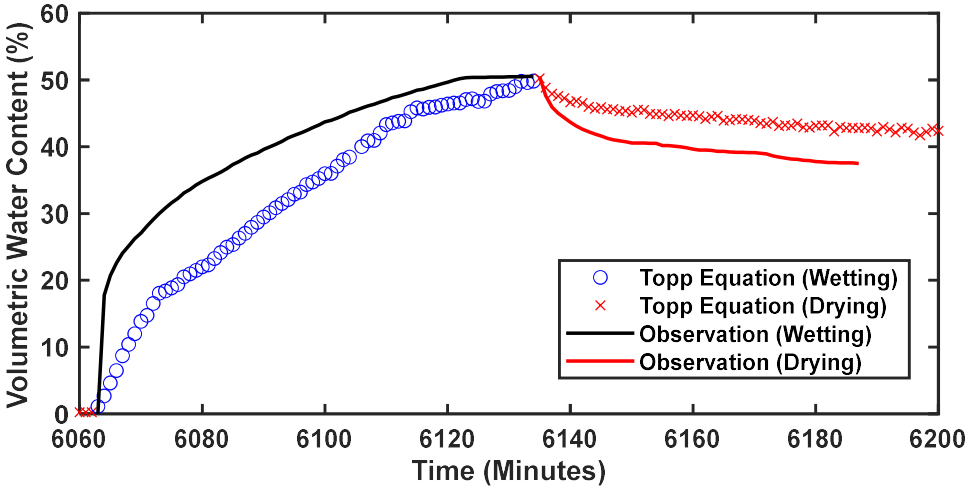


圖 2-34 樣本 1 第二循環的潤濕過程和初期乾燥

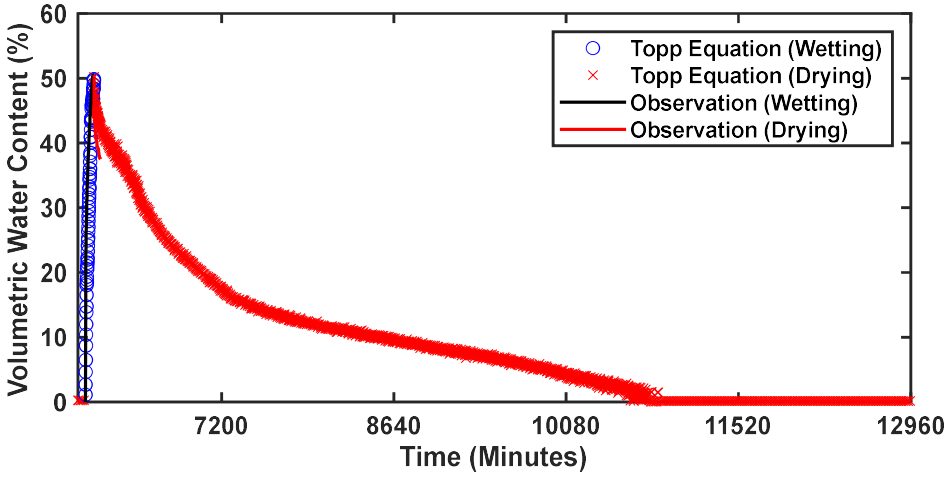


圖 2-35 樣本 1 第二循環乾燥過程

樣本 2(1.45 g/cm^3& 169.4 $\mu S/cm$)實驗結果：

樣本 2 的實驗過程與樣本 1 相同，樣本 2 所有潤濕和乾燥過程如圖 2-36。土壤乾密度為 1.45 g/cm^3，初期重量含水量為 20%。該樣本的使用的水導電度為 164.5 μS/cm，如表 2-5 所列。潤濕過程持續 242 分鐘並以 46.38% 的體積含水量結束(水容器觀察)，與式 28 方程相比，水容器觀測的體積含水量值較低，如圖 2-37。在潤濕過程結束時，觀察到的含水量為 44.3%，式 28 計算出的體積含水量為 46.4%。原本計劃要繼續進行乾燥過程，但使用矽膠密封的間隙處出現滲漏，因此需要一天修復。在修復過程中，測試樣本仍處於監測狀態，並在修復密封隙的待機狀態下(圖 2-38)，含水量從 46.3% 下降到 42.1%。

測試一直持續到最初的乾燥過程如圖 2-39 所示。在此過程中，水容器觀察的體積含水量和式 28 計算出的體積含水量具有相似的結果，其中在初期乾燥過程結束時，水容器觀察的體積含水量為 36.9%和式 28 的體積含水量為 37%。

而後期的乾燥過程，直到 1.7%(式 28)的體積含水量長期穩定。這個過程持續了十天，如圖 2-40 所示，但第二天的資料部分遺失，主要因為控制 TDR 的電腦當機導致。

實驗持續到第二個循環。圖 2-41 顯示了樣本 2 在第二個循環中的潤濕過程。在潤濕過程開始時，式 28 的體積含水量值低於水容器觀察到的結果。之後，在潤濕過程結束時返回到相同的體積含水量，這個潤濕過程持續了 295 分鐘。潤濕過程完成後，開始第二個循環的初期乾燥過程，持續 43 分鐘，而實驗持續 7

天的後期乾燥。

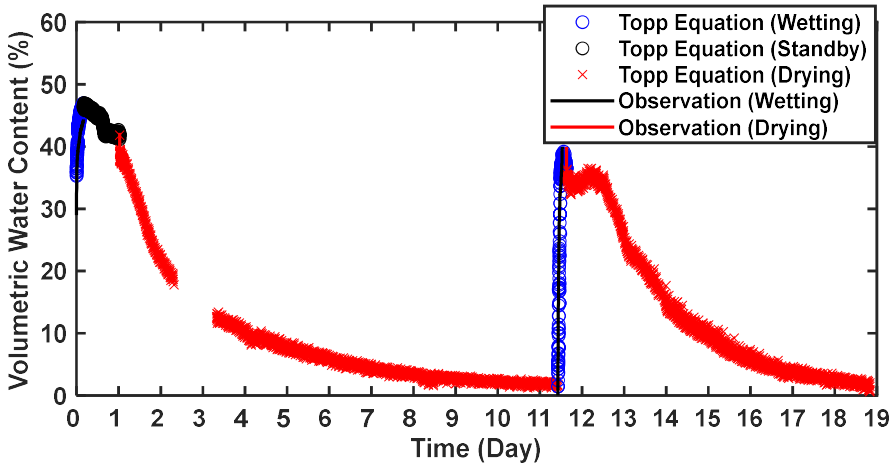


圖 2-36 樣本 2 所有潤濕和乾燥過程

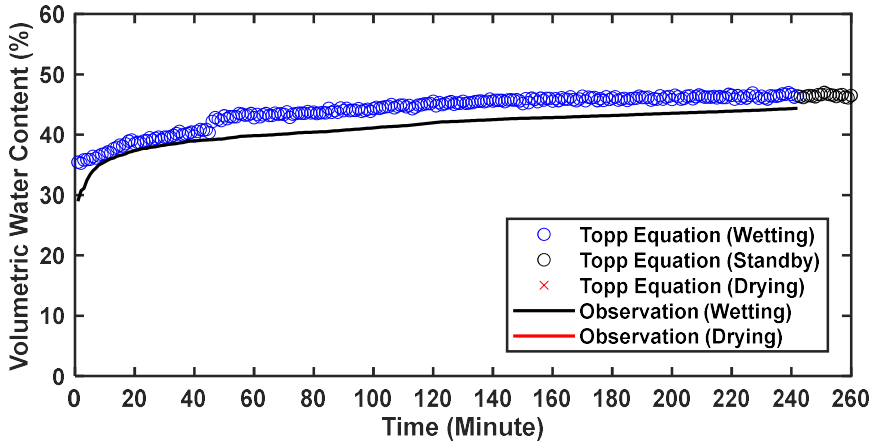


圖 2-37 樣本 2 第一個循環中的潤濕過程

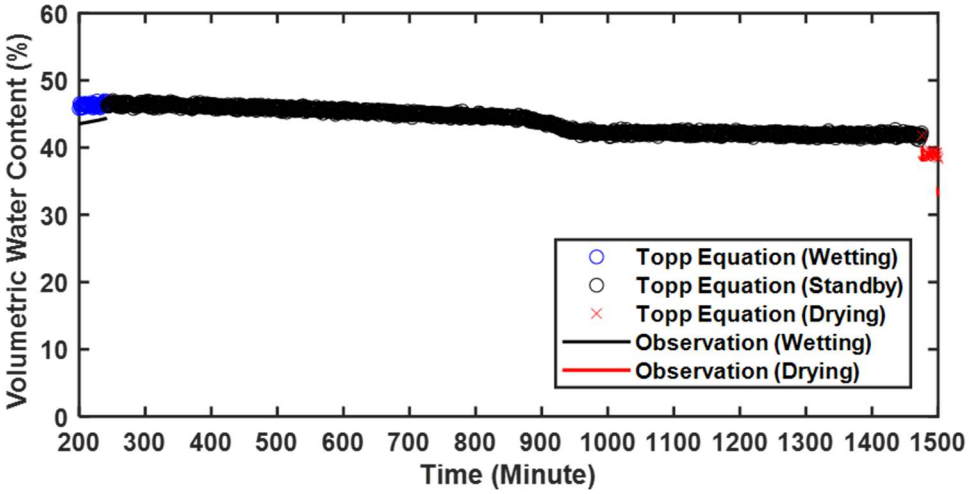


圖 2-38 樣本 2 第一個循環中的待機狀態

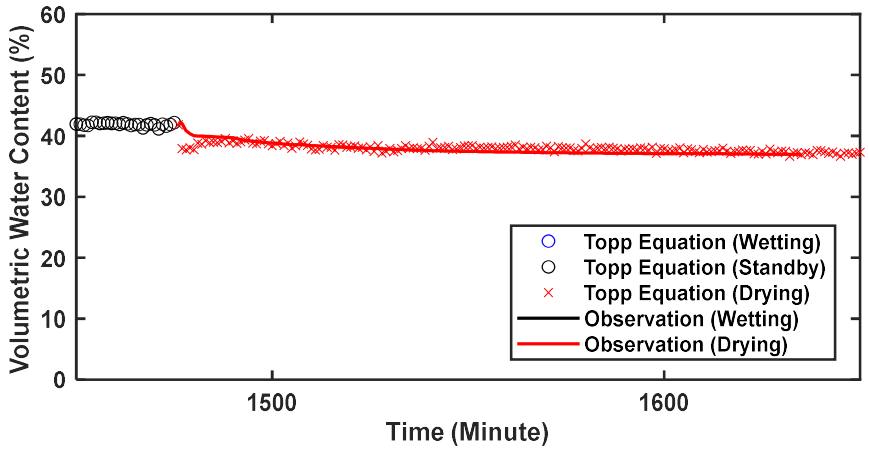


圖 2-39 樣本 2 第一個循環中的初期乾燥

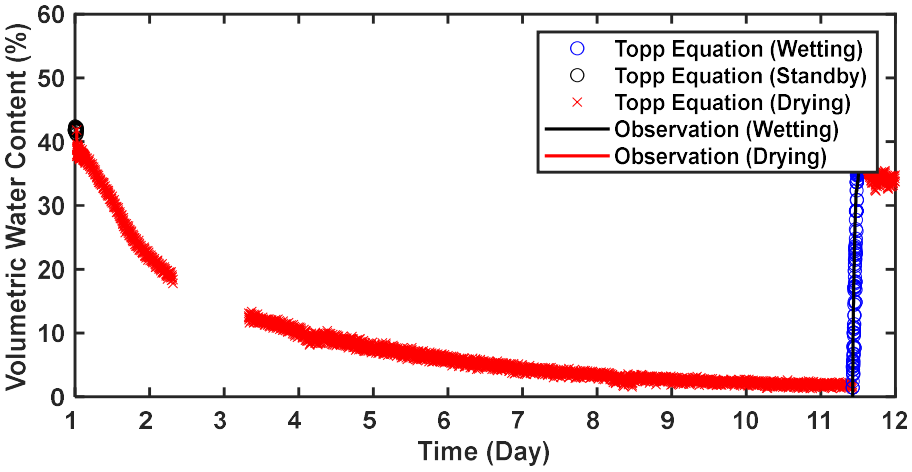


圖 2-40 樣本 2 第一個循環中的後期乾燥過程

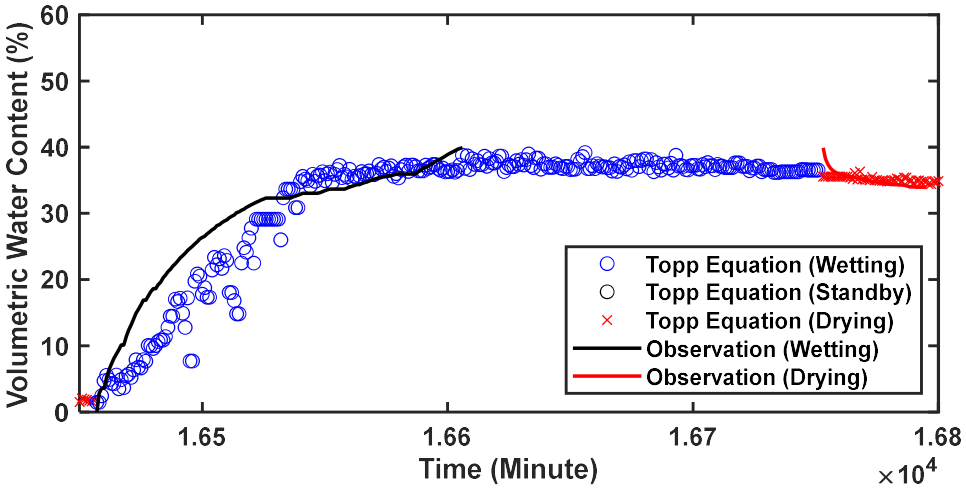


圖 2-41 樣本 2 第二個循環中的潤濕過程和初期乾燥

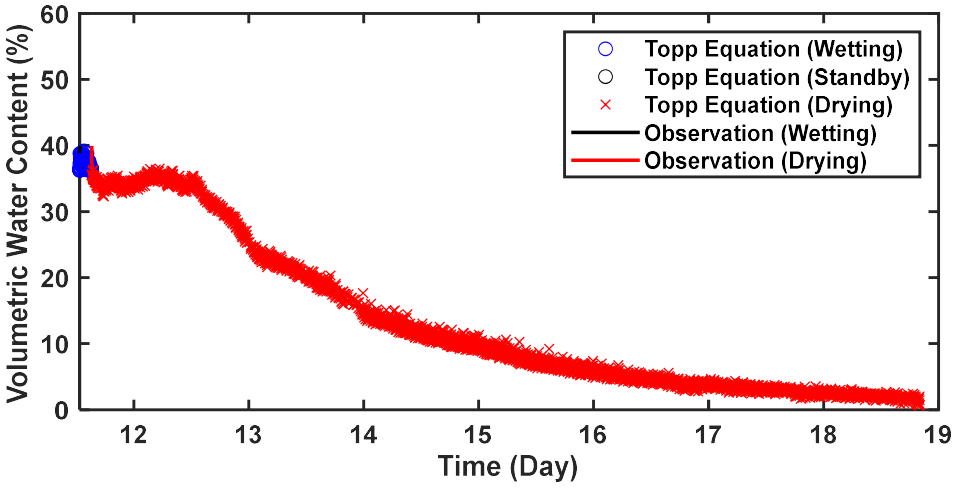


圖 2-42 樣本 2 第二個循環中的後期乾燥過程

樣本 3(1.35 g/cm^3& 657 $\mu S/cm$)實驗結果：

該實驗採用與先前樣本相同的程序備製，土壤乾密度為 1.35 g/cm^3，初期含水量為 12.6%(重量含水量)。該實驗中使用的水通過自來水中添加鹽份直到導電度為 657$\mu S/cm$。樣本 3 所有潤濕和乾燥過程如圖 2-43，第一個循環中的潤濕過程持續 14 分鐘，結束前水容器的量測結果為 48.1% ，式 28 計算出體積含水量為 48.7%，結果近乎重合。實驗在濕潤後繼續進行初期乾燥，與式 28 的結果相比，水容器觀察到的體積水含量具有較小的值，並停止在 38% ，式 28 計算出體積含水量為 40.1%。含水量的變化歷時如圖 2-44 所示。

在初期乾燥過程之後，測試繼續乾燥過程，持續了四天。在初期乾燥過程，式 28 計算出的數據部分超出水容器觀察到的體積水含量趨勢，如圖 2-45 所示。

測試繼續進行第二個循環的潤濕過程。圖 2-46 顯示樣本 3 的初期潤濕和乾燥過程。在潤濕過程開始時，與式 28 計算出的

體積水含量結果相比，水容器觀察到的體積水含量具有更高的值。在初期乾燥過程中，觀察到的水分含量與式 28 的結果相比具有較小的值，這一結果在樣本 1 發現，樣本 1 和 3 都具有較小的密度值。乾燥過程持續四天如圖 2-47 所示。

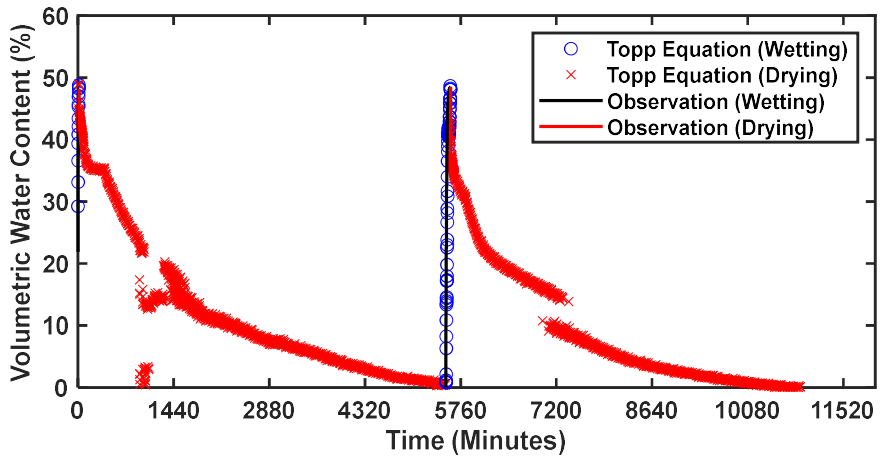


圖 2-43 樣本 3 所有潤濕和乾燥過程

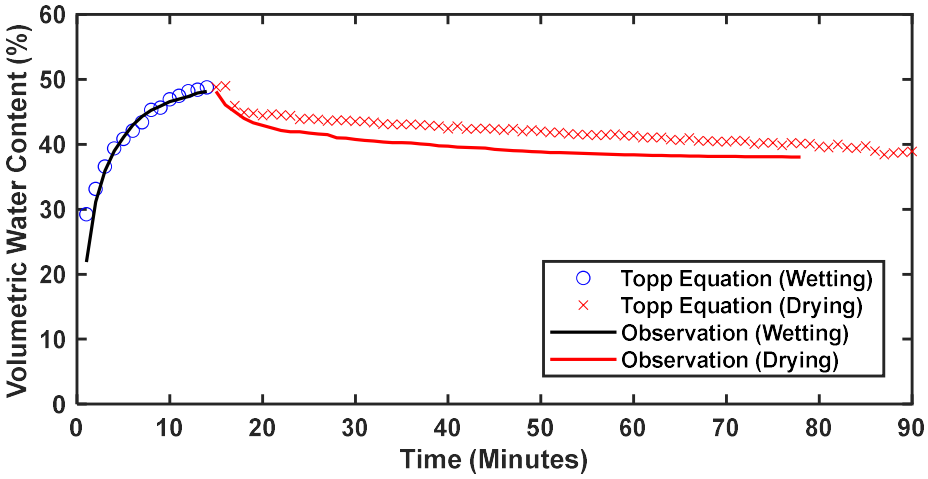


圖 2-44 樣本 3 第一個循環的潤濕過程和初期乾燥

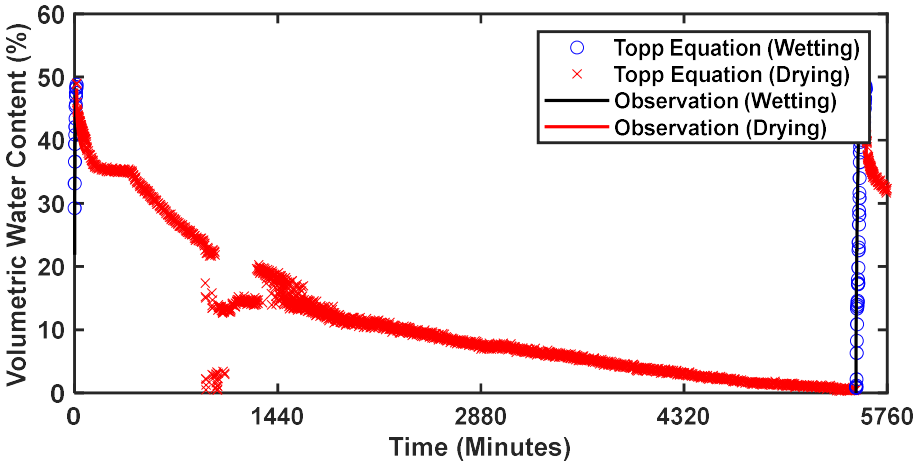


圖 2-45 樣本 3 第一個循環的乾燥過程

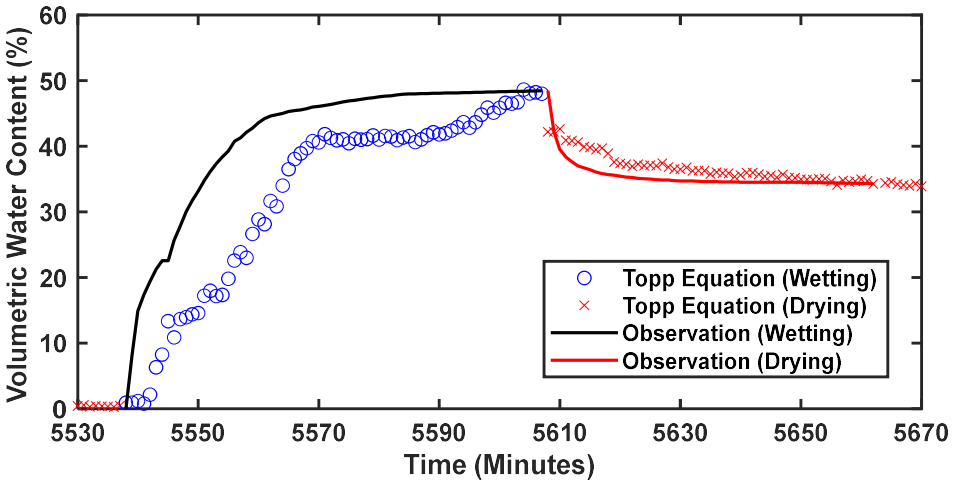


圖 2-46 樣本 3 第二循環的潤濕過程和初期乾燥.

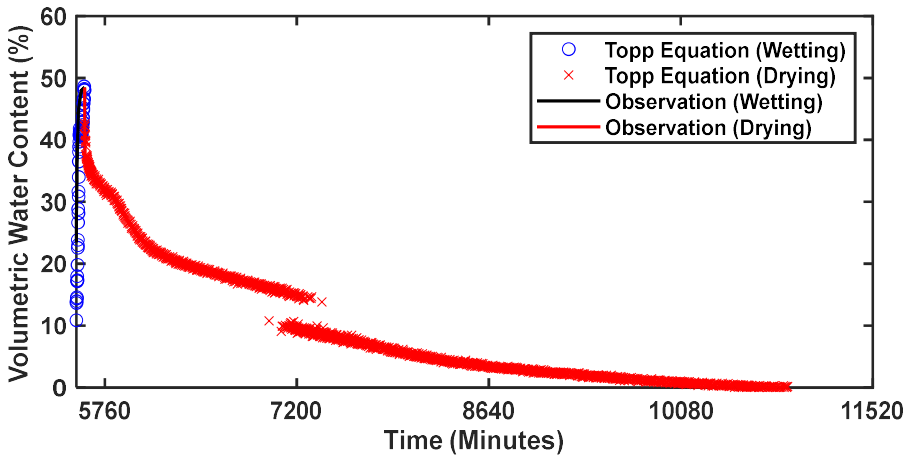


圖 2-47 樣本品 3 在第二個循環中的乾燥過程

樣本 4(1.35 g/cm^3& pH = 5)實驗結果：

該實驗採用與樣品 1 和 3 相同的程序配製，乾密度為 1.35 g/cm^3，初始含水量為 12.6%。使用硝酸(HNO_3)將自來水的 pH 值降低到 5。樣本 4 所有潤濕和乾燥過程如圖 2-48，第一個循環的潤濕過程持續了 125 分鐘。根據觀察結果，水容器觀測的體積含水量為 47.25%和式 28 計算出的體積含水量為 46.7%相近。但第一個循環的潤濕過程開始時，水容器觀測的體積含水量與式 28 計算出的不同，但最後又再度重合，與樣本 3 相同。實驗一直持續到第一個初期乾燥。在這個過程中，水容器觀測的觀測體積含水量比式 28 的體積含水量低，如圖 2-49 所示。實驗持續到後期的乾燥過程直到土壤完全乾燥。這個過程持續四天。

圖 2-51 顯示樣本 4 第二個循環的初始潤濕和乾燥過程。在潤濕過程開始時，與式 28 的結果相比，水容器觀察到的體積含水量具有更高的值。在初期乾燥的過程中，水容器觀察到的體積含水量與式 28 的結果相比具有較小的值。該結果也出現在具有相似乾密度的樣本 1 和 3 中。

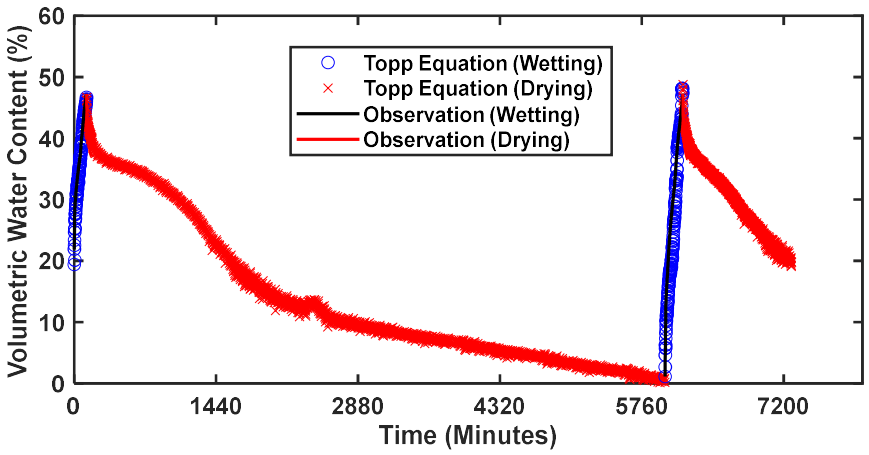


圖 2-48 樣本 4 所有潤濕和乾燥過程

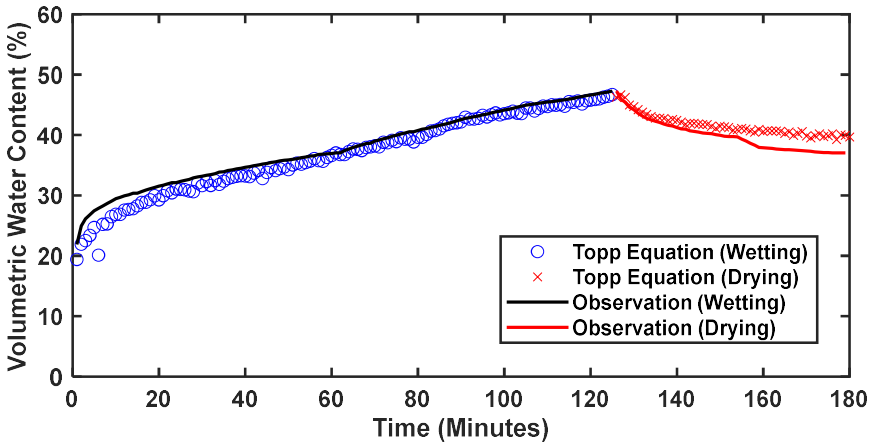


圖 2-49 樣本 4 第一個循環中的潤濕過程和初期乾燥

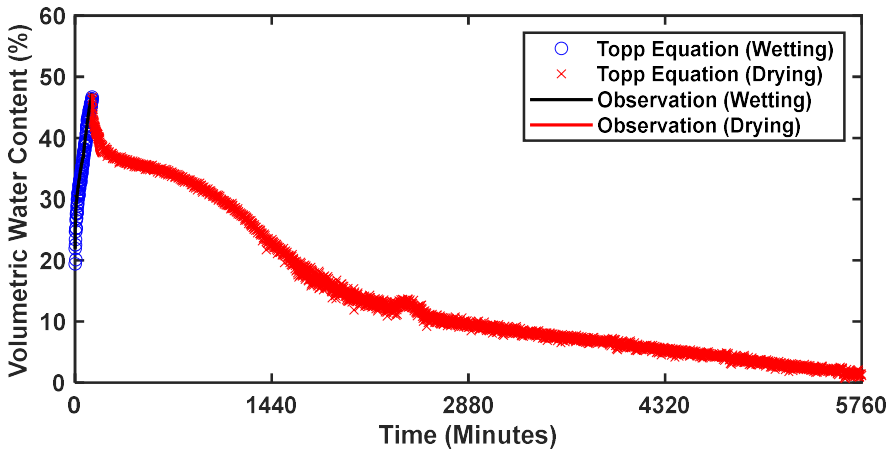


圖 2-50 樣品 4 第一個循環中的乾燥過程

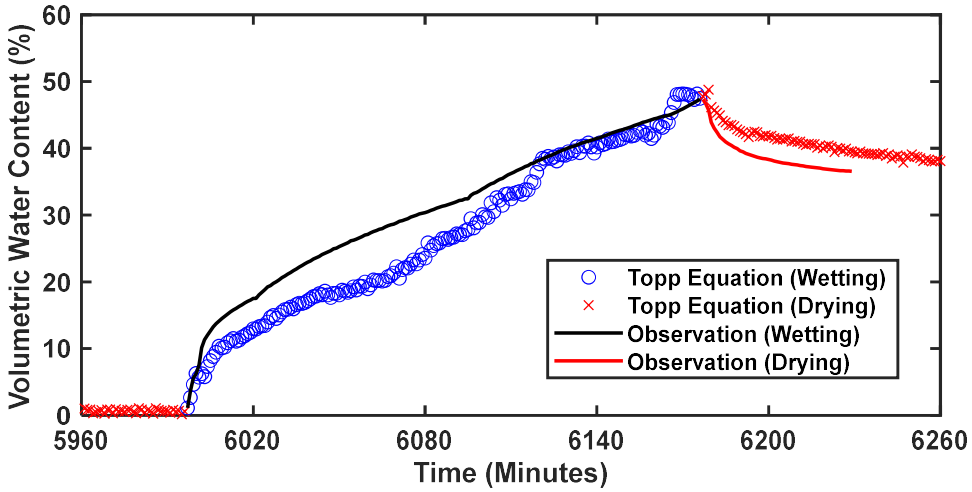


圖 2-51 樣本 4 在第二個循環中的潤濕過程和初始乾燥

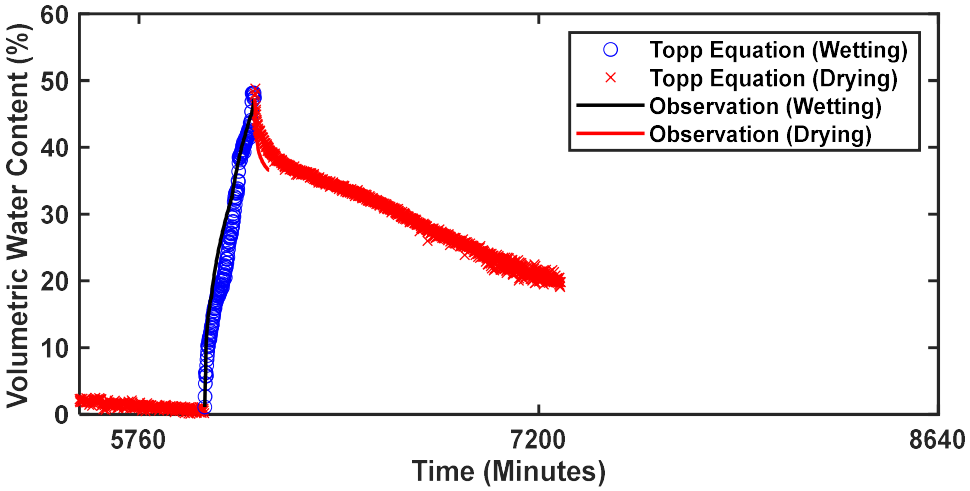


圖 2-52 樣本 4 第二循環乾燥過程

由於快速潤濕過程中水容器觀察出的體積含水量和式 28 計算出的體積含水量較高，這可能是由於潤濕開始時水份分布不均勻。而當前使用的 TDR 壓力鍋的設計，滲透水會從樣本底部滲入土壤，因此在潤濕過程開始時，水不會均勻分佈在整個土壤樣品當中。水容器觀察結果與式 28 計算出的體積含水量差異可以在樣本 1 在循環 1 和 2 的潤濕過程中找到。比較起來，循環 2 比循環 1 的差異更大，因為體積含水量變化更快。

本研究使用均方根誤差 (RMSE) 進行分析，第 1 週期中水容器觀測的體積含水量與式 28 中計算出的體積含水量之差為 4.76，而第 2 週期為 10.80。在循環 2 中，體積含水量在 76 分鐘內從 0 變為 49.8%(根據水容器觀察)，平均潤濕速率為 0.00065 cm/s。在第一個循環中，40 分鐘內體積含水量從 19.4% 變為 50.9%，平均潤濕速率為 0.00045 cm/s。所有樣本的 RMSE 值和潤濕率列於表 2-8。

樣本 3 中也具有相同的密度和高潤濕率。在樣本 3 中，循

環 1 的 RMSE 為 2.11，平均潤濕率為 0.00310 cm/s。在循環 2 中，RMSE 為 10.69，平均潤濕率為 0.00410 cm/s。

樣本 2 其潤濕率低於樣本 1 和 3。 在樣本 2 中，第一個潤濕循環的 RMSE 為 2.83，0.00017 cm/s，而第二個循環的 RMSE 為 2.54，0.00060 cm/s。同樣的結果也出現在樣本 4 中，第一個循環的平均潤濕速率為 0.00037 cm/s，RMSE 為 1.54，第二個循環的平均潤濕速率為 0.00071 cm/s，RMSE 為 4.62。

體積含水量的快速變化也受土壤密度的影響。低密度的土壤將有更多的空隙，使水更容易進入。水是否容易入滲並不能保證代表水在試體的均勻分佈。這可以從樣本 1 和 2 中觀察到。在乾密度較高的試體(如樣本 2 (1.45 g/cm^3))相比於較低乾密度(如樣本 1 (1.35 g/cm^3))，水容器觀察過程的體積含水量與式 28 計算出的體積含水量差異較小。樣本 2 中的 RMSE 值較小，其中第 1 週期為 2.83，第 2 週期為 5.54，而樣本 1 中，第 1 週期為 4.76，第 2 週期為 10.80。

可以得出結論，在快速潤濕率的情況下，用式 28 估計水含量會與實際含水量相比延遲。在滲透率值較高的土壤中(經常發生淺層滑坡)，在規劃 TDR 含水量早期預警系統時需要考慮結果的延遲。

潤濕過程開始時樣本內不均勻的滲透水分佈也影響了觀測值(水容器)與 Topp 方程體積含水量(TDR 波形)之間的差異。本研究需要更進一步的實驗與調查來證實，實驗也需要以恆定和控制良好的潤濕速率進行測試，所以建議需要對當前的 TDR 壓力鍋設計進行修改達到此目的。

表 2-8 每個潤濕過程的均方根誤差(RMSE)(樣本 1、2、3 和 4)

樣本名稱	RMSE	平均濕潤速率 (cm/s)
樣本 1 – 第一次潤濕循環	4.76	0.00045
樣本 1 – 第二次潤濕循環	10.80	0.00065
樣本 2 – 第一次潤濕循環	2.83	0.00017
樣本 2 – 第二次潤濕循環	5.54	0.00060
樣本 3 – 第一次潤濕循環	2.11	**0.00310**
樣本 3 – 第二次潤濕循環	10.69	**0.00410**
樣本 4 – 第一次潤濕循環	1.54	0.00037
樣本 4 – 第二次潤濕循環	4.62	0.00071

7. 實驗的體積含水量(θ)與導電度(EC)之關係：

樣本 1(1.35 g/cm^3& 164.5 $\mu S/cm$)：

圖 2-53 通過式 28 顯示樣本 1 的導電度與體積含水量的關係圖。和之前的敘述相同，本研究將資料分為三個部分，藍色圓圈表示潤濕過程，紅色圓圈表示初期乾燥過程，黑色圓圈表示後期乾燥過程。為了分析並解釋結果，本研究對每個過程進行線性回歸。圖 2-54 顯示了循環 1 和 2 的線性回歸線。實線代表第一個循環，虛線代表第二個循環線。

從圖 2-54 可以看出，第一個潤濕循環過程的斜率為 3.42，而第二個循環過程的斜率為 1.08。圖 2-55 更清楚地顯示樣本 1 中每個過程的線性回歸。圖 2-55 (c) 顯示導電度(EC)和體積含水量(θ)之間關係的兩種不同趨勢。在測試結束時，體積含水量高的地方，導電度發生了巨大的變化。在乾燥過程開始時存在差異，但在過程結束時又重合了。與循環 2 斜率 2.59 相比，循環 1 中第一個乾燥過程的斜率較小為 2.18。

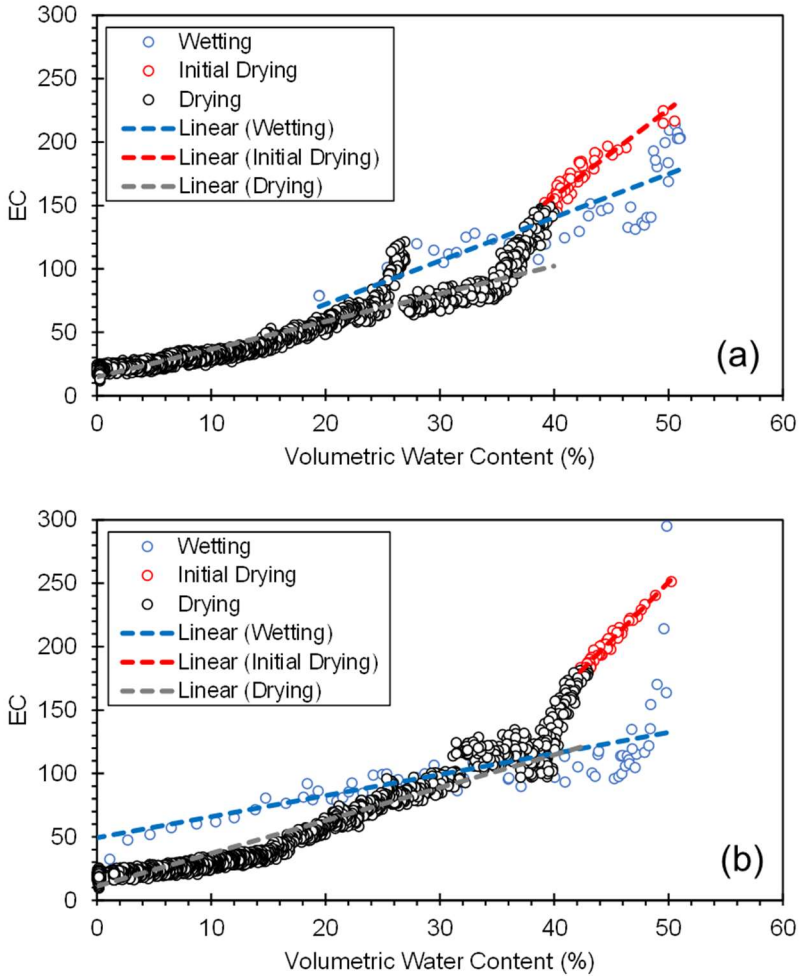


圖 2-53 樣本 1 (a) 循環 1 和 (b) 循環 2 的每個過程的 EC 與 θ 之關係圖

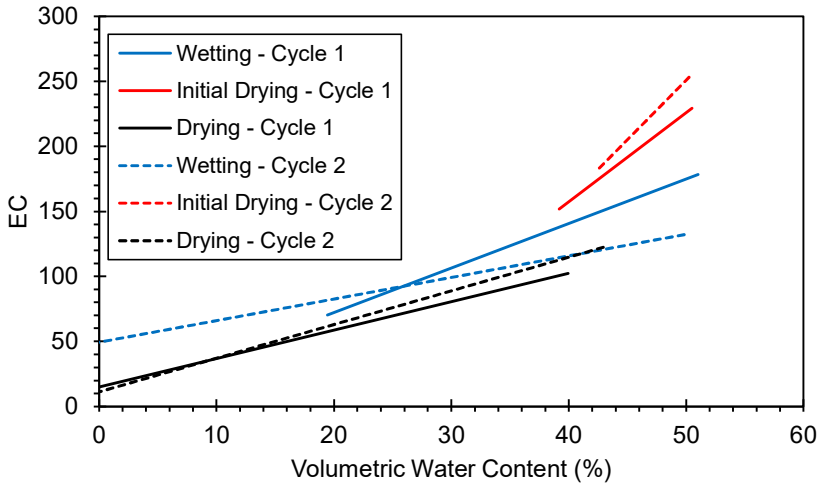


圖 2-54 樣本 1 每個過程的 EC 與 θ 的回歸線

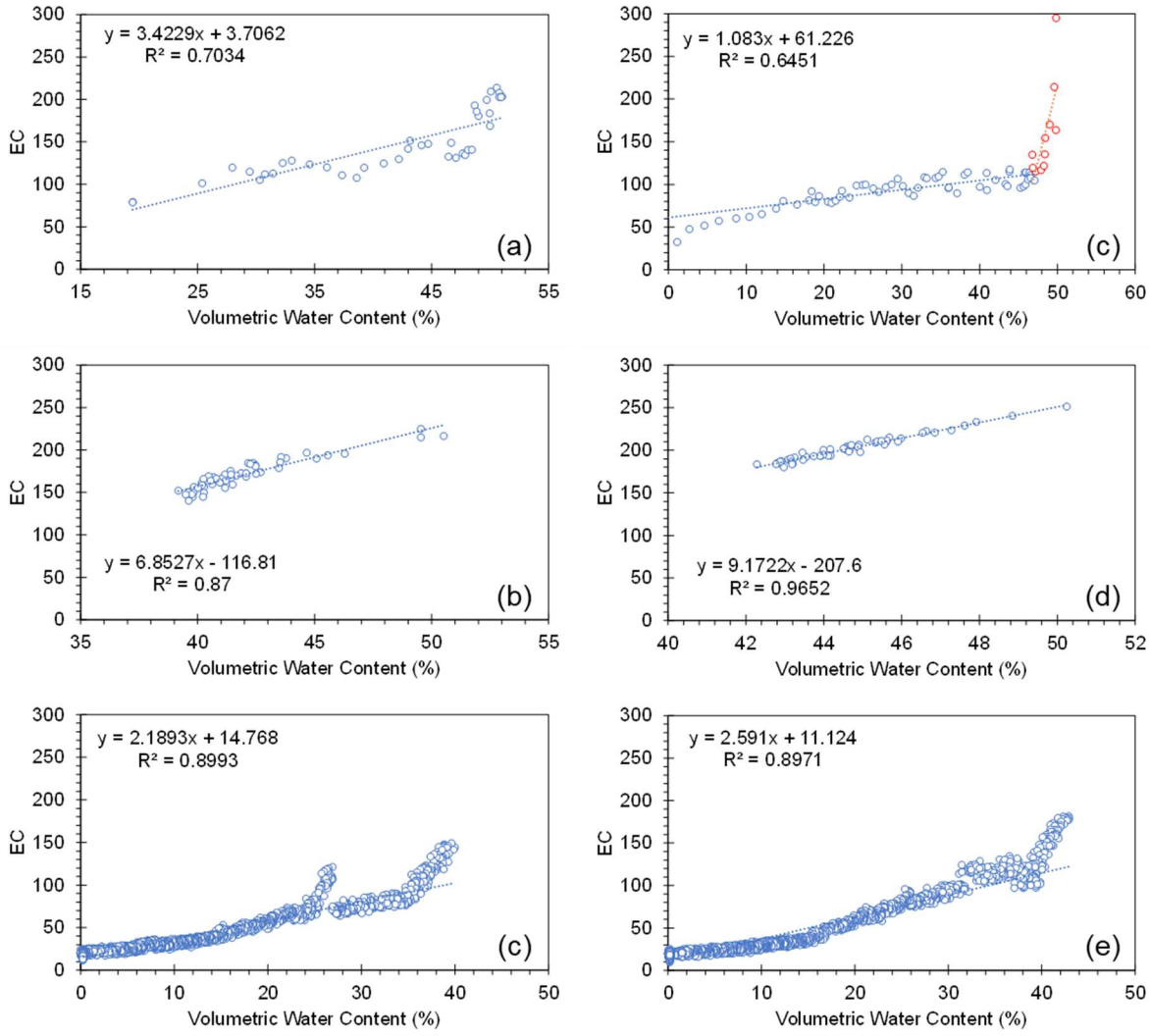


圖 2-55 樣本 1 的 EC-θ 圖，(a) 第一個週期的潤濕過程，(b) 第一個週期的初期乾燥過程，(c) 第一個週期的乾燥過程，(d) 第二個週期的潤濕過程，(e) 第二個循環的初期乾燥過程，(f) 第二個循環的乾燥過程

樣本 2(1.45 g/cm^3& 169.4 $\mu S/cm$)：

圖 2-56 通過式 28 顯示樣本 2 的導電度與體積含水量的關係圖。實驗數據點在第一次潤濕過程中散開，特別是在潤濕過程結束時。實驗數據在乾燥過程中分佈較大，但仍形成明顯的趨勢。

圖 2-57 更清楚地顯示了循環 1 和 2 的線性回歸線性線。從圖 2-57 可以看到第一個循環的潤濕過程有一個陡峭的斜率(4.08)，而第二個循環的潤濕過程有一個平緩的斜率(0.82)。對於乾燥過程，如樣本 1 中發生的那樣，在乾燥過程開始時存在差異，並且在測試結束時再次重合。圖 2-58 更清楚地顯示樣本 2 中每個過程的線性回歸。

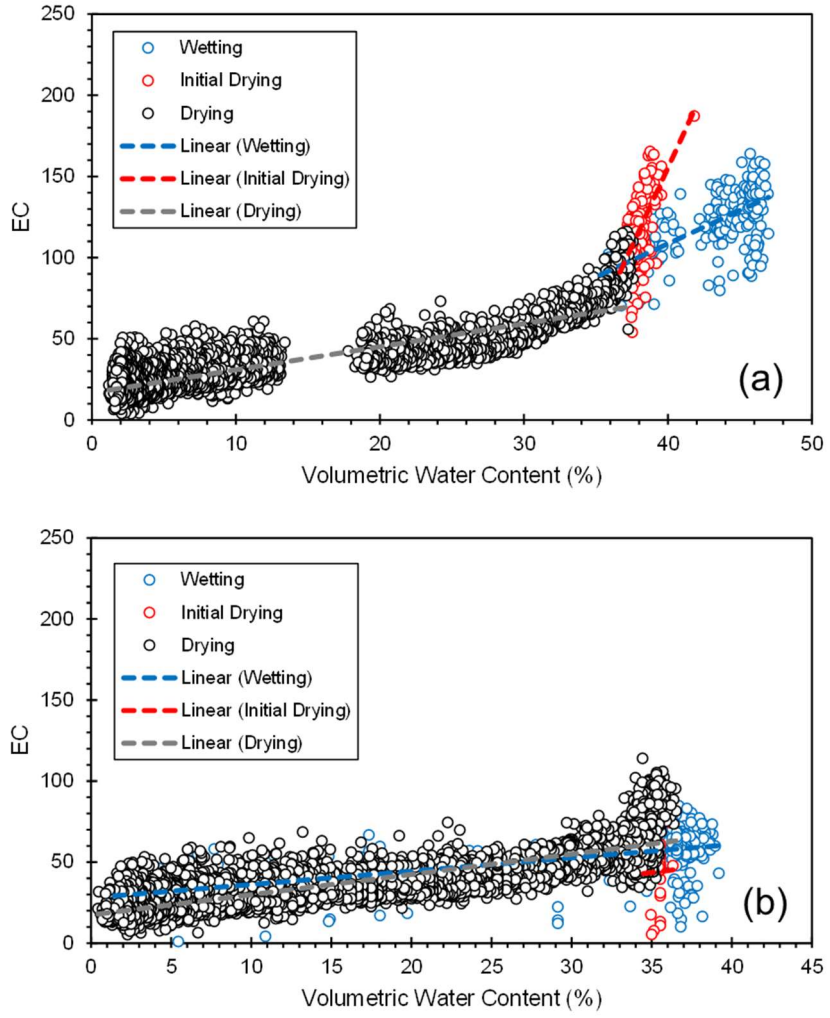


圖 2-56 樣本 2 (a) 循環 1 和 (b) 循環 2 的每個過程的 EC 與 θ 之關係圖

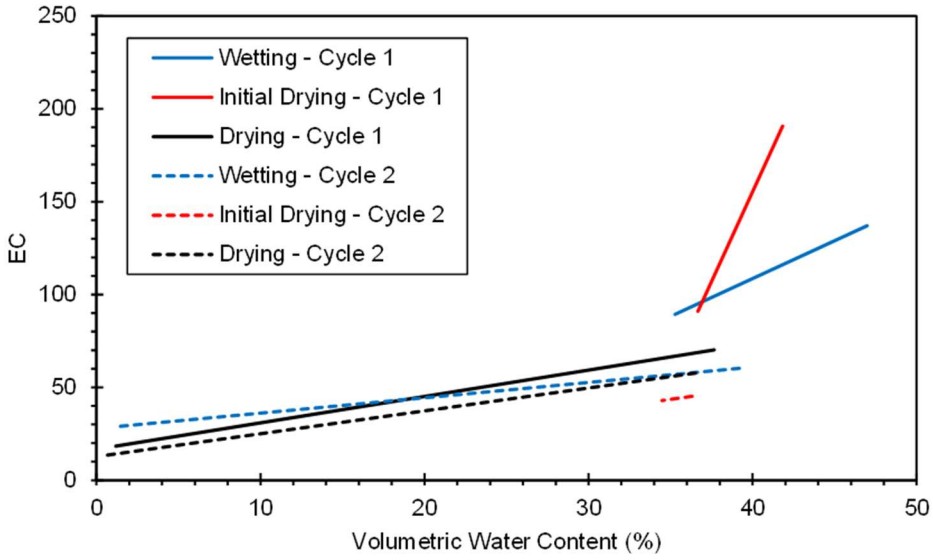


圖 2-57 樣本 2 的每個過程的 EC 與 θ 的回歸線

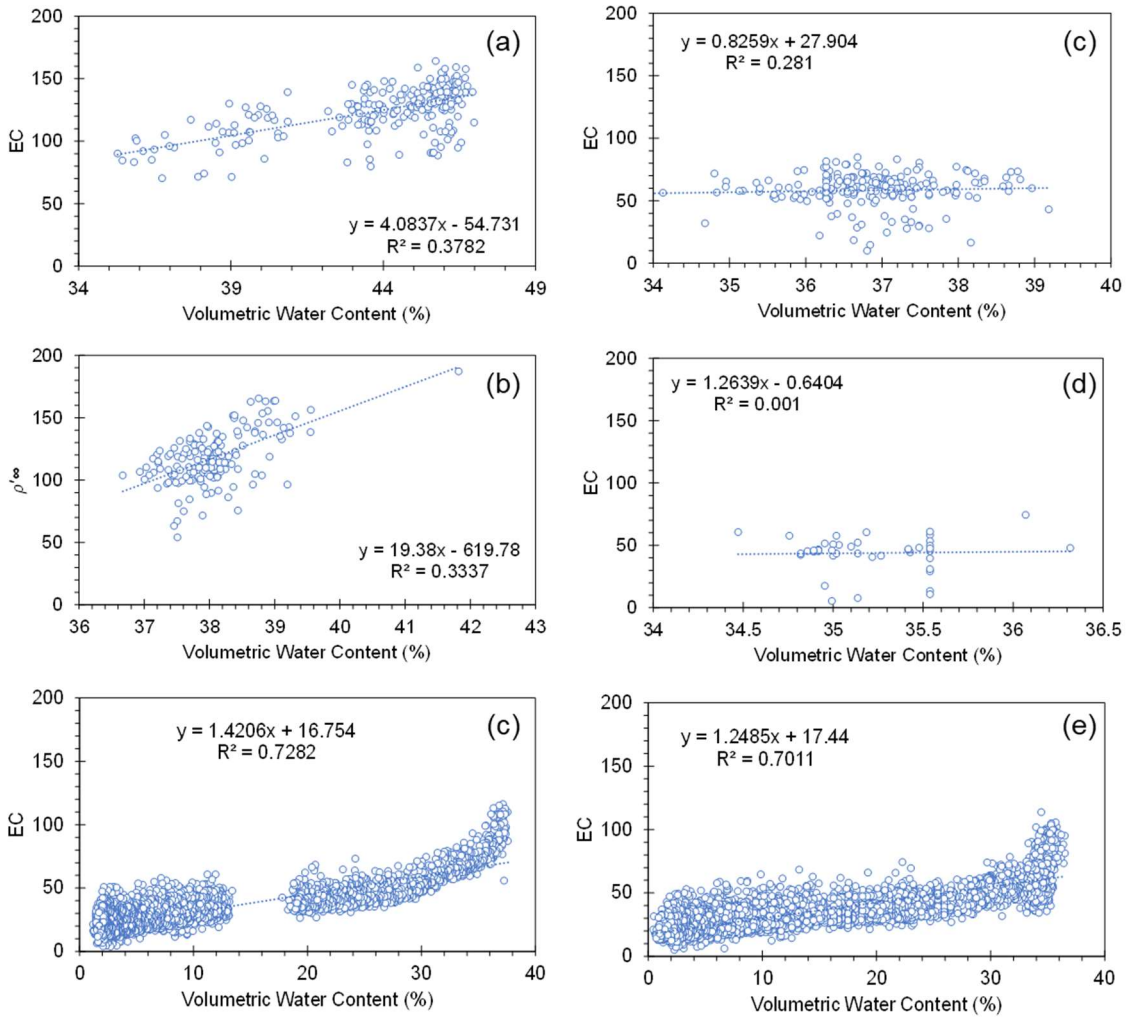


圖 2-58 樣本 2 的 EC-θ 圖，(a) 第一個週期的潤濕過程，(b) 第一個週期的初期乾燥過程，(c) 第一個週期的乾燥過程，(d) 第二個週期的潤濕過程，(e)第二個週期的初期乾燥過程，(f) 第二個週的期乾燥過程

樣本 3(1.35 g/cm^3& 657 $\mu S/cm$))：

圖 2-59 通過式 28 顯示樣本 3 的導電度與體積含水量的關係圖。該樣本中的關係具有較不確定的關係如圖 2-59 所示。從圖 2-60 可以看出，第一個循環中的潤濕過程具有平緩的斜率值，而第二個循環中的潤濕過程具有陡峭的斜率值。圖 2-61 更清楚地顯示了樣本 3 中每個過程的線性回歸。圖 2-61(c)顯示了 EC

和θ之間關係的兩種不同趨勢。在測試結束時，體積含水量較高的地方，導電度發生了巨大的變化，該現象與樣本 1 中觀察到的現象相同。對於乾燥過程，如樣本 1 和 2 中發生的那樣，在乾燥過程開始時存在差異，並在測試結束時再次重合。

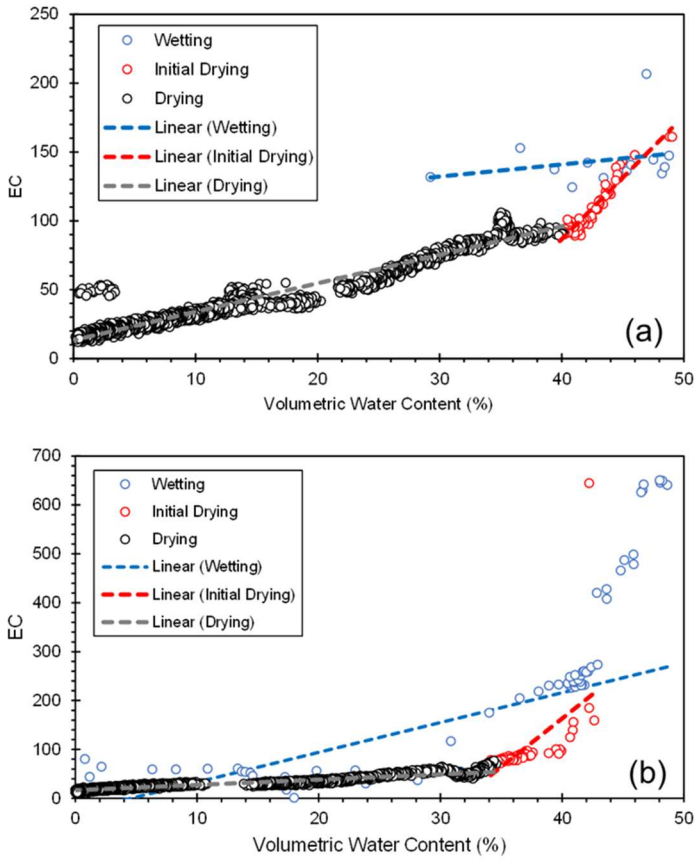


圖 2-59 樣本 3 (a) 循環 1 和 (b) 循環 2 的每個過程的 EC 與 θ 之關係圖

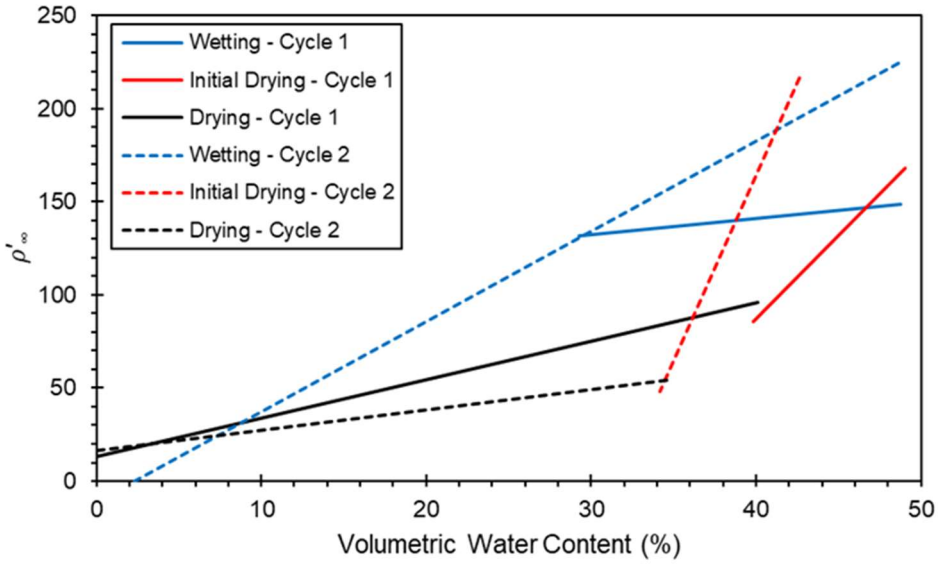


圖 2-60 樣本 3 每個過程的 EC 與 θ 的回歸線

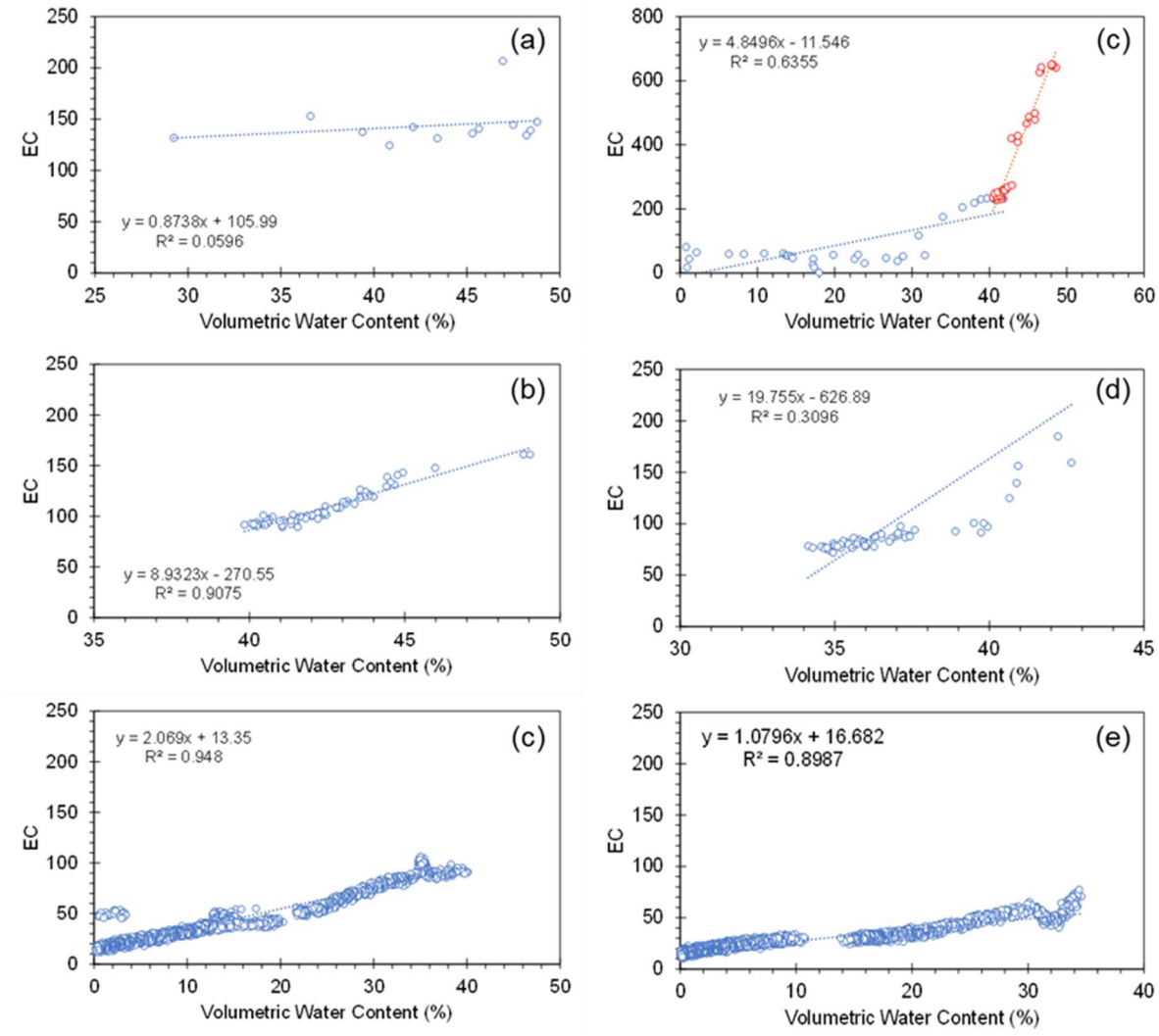


圖 2-61 樣本 3 的 EC-θ 圖，(a) 第一個週期的潤濕過程，(b) 第一個週期的初期乾燥過程，(c) 第一個週期的乾燥過程，(d)第二個週期的潤濕過程，(e) 第二個循環的初始乾燥過程，(f) 第二個循環的乾燥過程

樣本 4(1.35 g/cm^3 & $pH = 5$)：

圖 2-62 通過式 28 顯示樣本 4 的導電度與體積含水量的關係圖。該樣本中的 EC-θ 的關聯性較差。數據在第一次潤濕和初始乾燥過程中散開。對於乾燥過程，數據在乾燥過程中分佈較大，但仍形成明顯的趨勢。

圖 2-63 更清楚地顯示了循環 1 和 2 的線性回歸線。從圖 2-63 可以看出，第一個循環的潤濕過程有一個陡峭的斜率值(1.21)，而第二個循環的潤濕過程有一個平緩的斜率(0.26)。對於乾燥過程，如樣本 1 中發生的那樣，在乾燥過程開始時存在差異，並且在測試結束時再次重合。圖 2-64 更清楚地顯示了樣本 2 中每個過程的線性回歸。

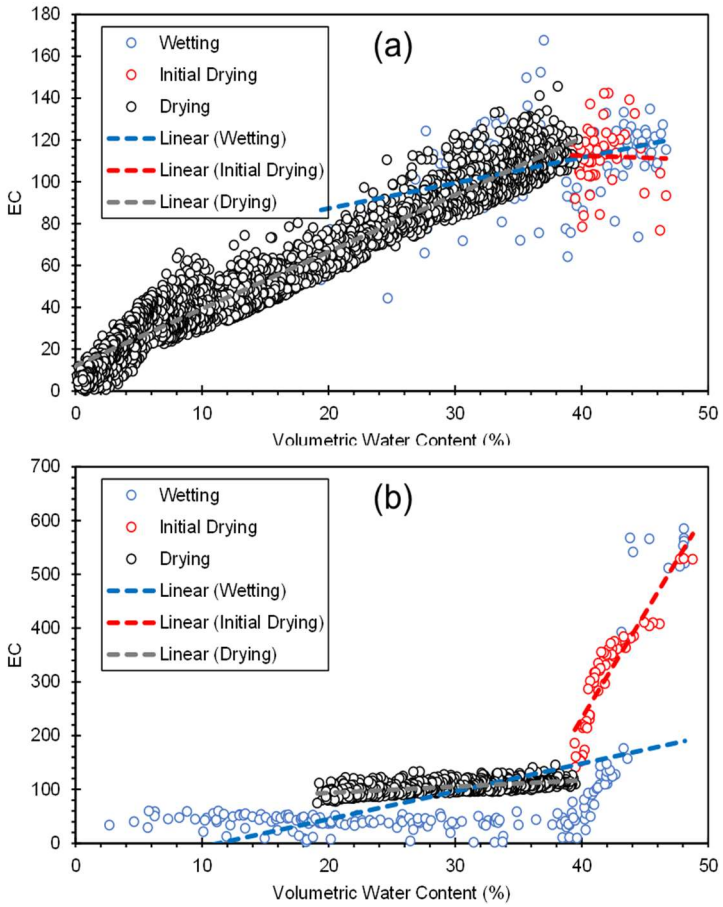


圖 2-62 樣品 4 (a) 循環 1 和 (b) 循環 2 的每個過程的 EC 與 θ 之關係圖

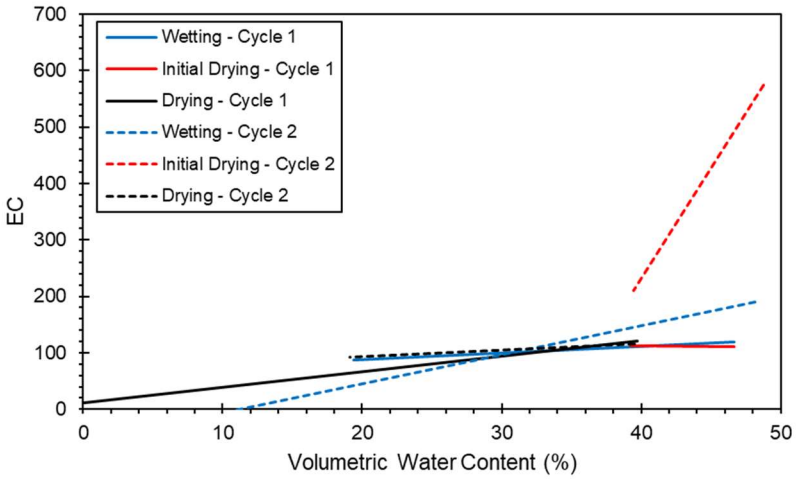


圖 2-63 樣本 4 的每個過程的 EC 與 θ 的回歸線

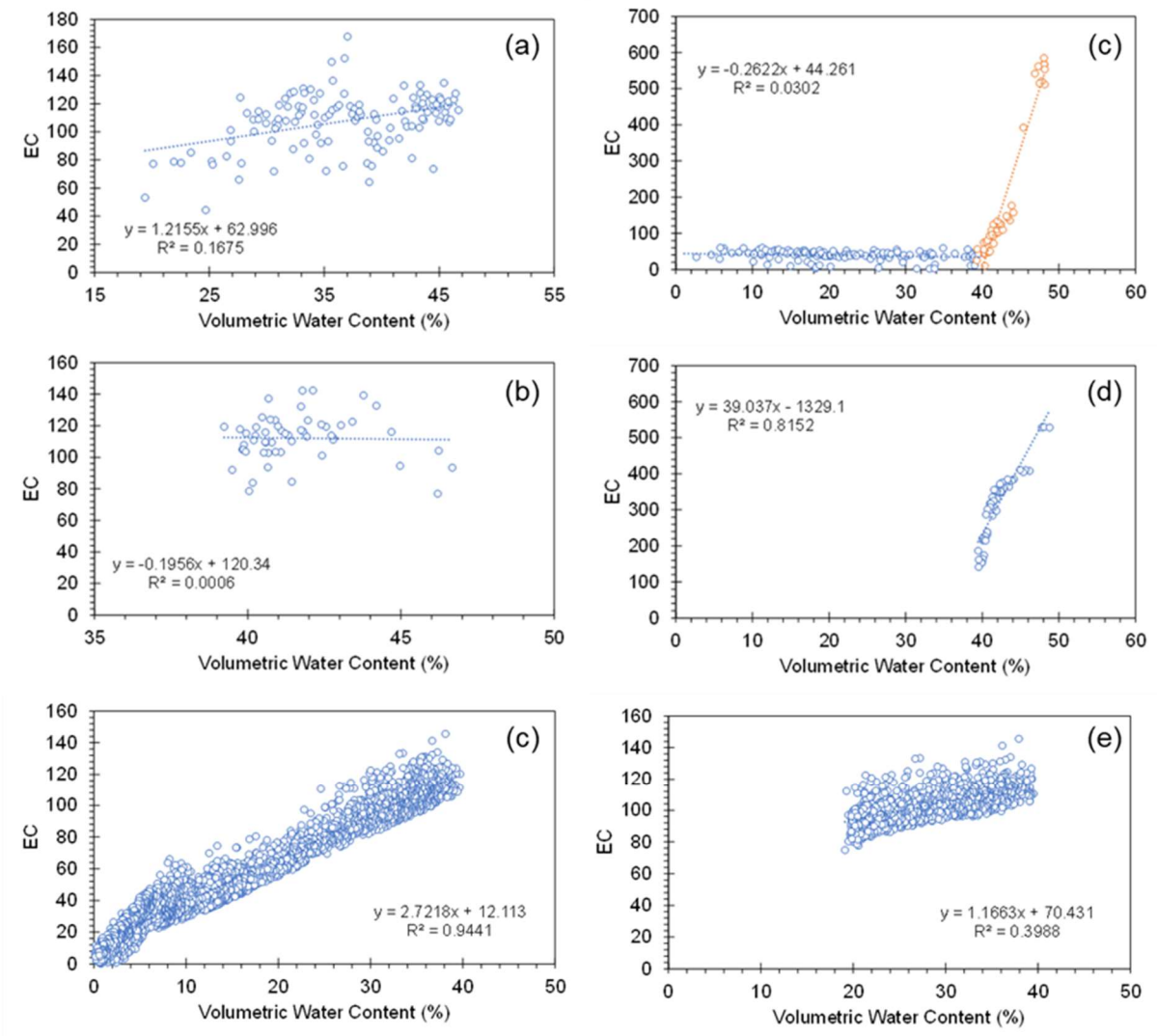


圖 2-64 樣品 4 的 EC-θ 圖，(a) 第一個週期的潤濕過程，(b) 第一個週期的初期乾燥過程，(c) 第一個週期的乾燥過程，(d) 的第二個週期潤濕過程，(e) 第二個循環的初始期燥過程，(f) 第二個循環的乾燥過程

綜合上述，圖 2-53、圖 2-56、圖 2-59 和圖 2-62 分別顯示了樣品 1、2、3 和 4 的導電度和體積含水量關係圖。如前所述，測試分為三個過程：潤濕過程、初期乾燥過程和後期乾燥過程。這種分類基於潤濕和乾燥過程，和過程速率(初期乾燥和後期乾燥過程)的差異，從數據中繪製一條線性回歸線，以方便對數據的

解釋。圖 2-54、圖 2-57、圖 2-60 與圖 2-63 分別比較了樣本 1、2、3 和 4 在每個過程中的線性回歸線。

在所有樣本中都可以觀察到遲滯現象，尤其是具有快速潤濕率的樣本。在樣本 1 實驗中，遲滯現象非常明顯(圖 2-54)。這也可以在樣本 3(圖 2-60)中觀察到，其乾密度與樣本中 1 相同。在與樣本 2 一樣具有較小潤濕和乾燥速率的測試中，特別是在第二個循環中，與樣品 1 相比遲滯現象較不明顯如圖 2-57 所示。

圖 2-54、圖 2-57 和圖 2-60 顯示每個過程的線性回歸線比較。在樣本 1 中，乾密度為 $1.35 g/cm^3$時，平均潤濕率較低的循環 1 的潤濕回歸線的斜率 (S=3.42) 比循環 2 (S=1.08) 的斜率更陡峭，平均潤濕速率更快如圖 2-54 所示。這也可以在樣本 2 中觀察到，其中循環 2 中的潤濕過程具有更快速的潤濕率，與循環 1 (0.57) 相比具有更平緩的斜率 (0.82)如圖 2-57 所示。

該結果與樣本 3 的結果相反，如圖 2-60 所示。潤濕率較低的循環 1 比循環 2 具有更平緩的斜率 (0.87)，而潤濕率較快速的循環 2 具有 4.84 的斜率。但是，第 1 週期的 R^2 值太小 (0.05)，表示該回歸線的代表性低。在圖 2-61(c)中可以更清楚地看到循環 1 中潤濕過程的線性回歸線。

另一方面，樣本 4 與樣本 1 、 2 的結果相似，其中樣本 4 循環 1 的平均潤濕速率 (0.00037 cm/s) 比循環 2 的斜率更大 (1.21)，而循環 2 平均潤濕率為 0.00071 cm/s 的斜率值為 0.26。

上述這證實 Knight (1991)和 Chung et al. (2019)的觀點，結果表明潤濕或乾燥速率是影響遲滯效應的參數之一。如樣本 1 與樣品 2 相比，較快速的乾濕速率具有較明顯的遲滯效應。此外，

與較慢的潤濕率相比，較快速的潤濕率會產生較小的含水量-導電度斜率。這與 Chung et al. (2019)提出的結果一致，其中具有較快乾濕速率的樣本具有較緩的斜率，反之亦然。而較快速的乾燥速率具有較明顯的遲滯效應。

然而，樣本 1 和样本 2 不能直接比較，因為本品 2 中較慢的潤濕率是由於具有高乾密度值，而不是由於測試中的設置。為進一步研究潤濕速率的影響，建議後續需要具有相同參數(例如乾密度和電導率)以及良好控制的乾濕速率的樣本。

此外，在高潤濕速率的潤濕過程結束時，EC 值有顯著變化，例如在樣本 1 循環 2 的潤濕過程結束時 (圖 2-53 (c))，樣本 3 循環 2 (圖 2-61(c)) 和樣本 4 循環 2 (圖 2-64(c))。當土壤樣品中的體積含水量高時，EC 值變化變得非常大。土壤樣品中最初充滿空氣的土壤孔隙幾乎完全被水取代，導致 EC 測量值非常高。

此外，pH 值似乎不會顯著影響 EC 和體積含水量之間的關係如圖 2-63。如前所述，在潤濕循環 2 中 EC 的升高不是由 pH 值影響引起的，而是由於高乾密度引起的。然而，需要更多具有更多不同 pH 值的測試來確認這一結果。

表 2-9 樣本 1、2 和 3 的每個過程的線性回歸的斜率和 R2。

實驗名稱	斜率	R2	濕潤/乾燥速率
樣本 1 (1.35 g/cm^3 乾密度，164.5 $\mu S/cm$ 導電度，6.9 pH)			
第一個循環的潤濕過程	3.42	0.70	0.00045
第一個循環的初期乾燥過程的	6.85	0.87	
第一個循環的後期乾燥過程	2.18	0.89	
第二個循環的潤濕過程	1.08	0.64	0.00065
第二個循環的後期乾燥過程	9.17	0.96	
T 第二個循環的後期乾燥過程	2.59	0.89	
樣本 2 (1.45 g/cm^3 乾密度，164.5 $\mu S/cm$ 導電度，6.9 pH)			
第一個循環的潤濕過程	4.08	0.37	0.00017
第一個循環的初期乾燥過程的	19.38	0.33	
第一個循環的後期乾燥過程	1.42	0.72	
第二個循環的潤濕過程	0.82	0.28	0.00060
第二個循環的後期乾燥過程	1.26	0.0001	
T 第二個循環的後期乾燥過程	1.25	0.70	
樣本 3 (1.35 g/cm^3 乾密度，657.5 $\mu S/cm$ 導電度，6.9 pH)			
第一個循環的潤濕過程	0.87	0.06	0.00310
第一個循環的初期乾燥過程的	8.93	0.91	
第一個循環的後期乾燥過程	2.07	0.95	
第二個循環的潤濕過程	4.84	0.61	0.00410
第二個循環的後期乾燥過程	19.75	0.31	
T 第二個循環的後期乾燥過程	1.07	0.89	
樣本 4 (1.35 g/cm^3 乾密度，149 $\mu S/cm$ 導電度，5 pH)			
第一個循環的潤濕過程	1.21	0.16	0.00037
第一個循環的初期乾燥過程的	0.19	0.0006	
第一個循環的後期乾燥過程	2.72	0.94	
第二個循環的潤濕過程	0.26	0.03	0.00071
第二個循環的後期乾燥過程	39.03	0.81	
T 第二個循環的後期乾燥過程	1.16	0.39	

(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 100 cm×100 cm×100 cm 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 70 cm。

本試驗採用之 TDR 感測器方面則是使用 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 2-66 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)採用全石英矽砂進行入滲測試，但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 2-67，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 感測器(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。

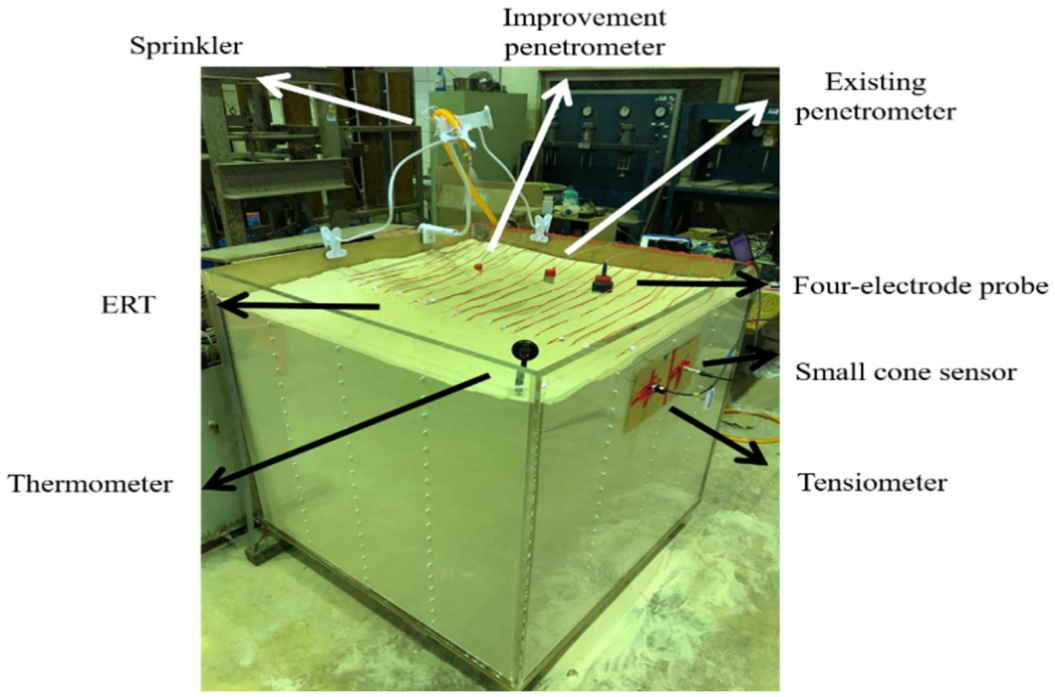


圖 2-65 模擬砂箱與 ERT 設備結合(魏士凱，2019)

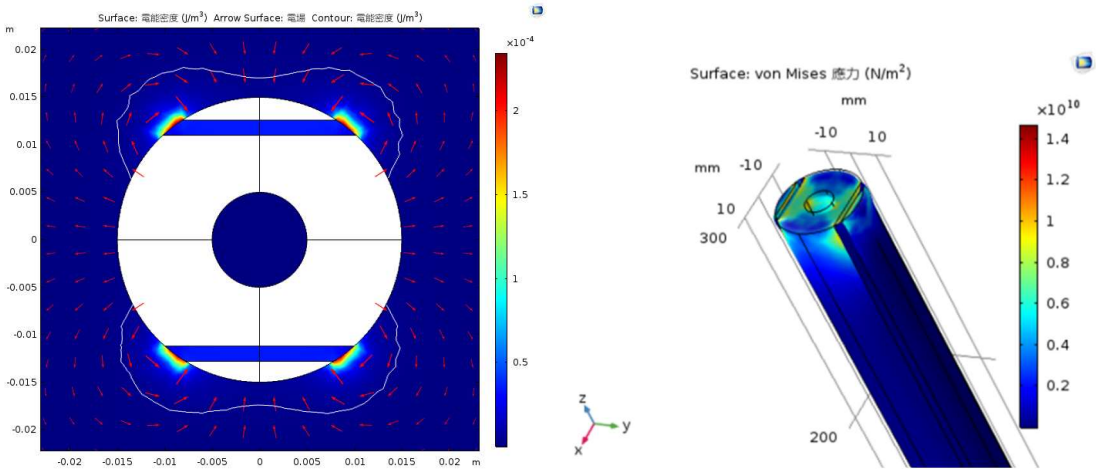


圖 2-66 TDR 感測器之(左)電磁場分布模擬，以及(右)應力分布模擬 (魏士凱，2019)

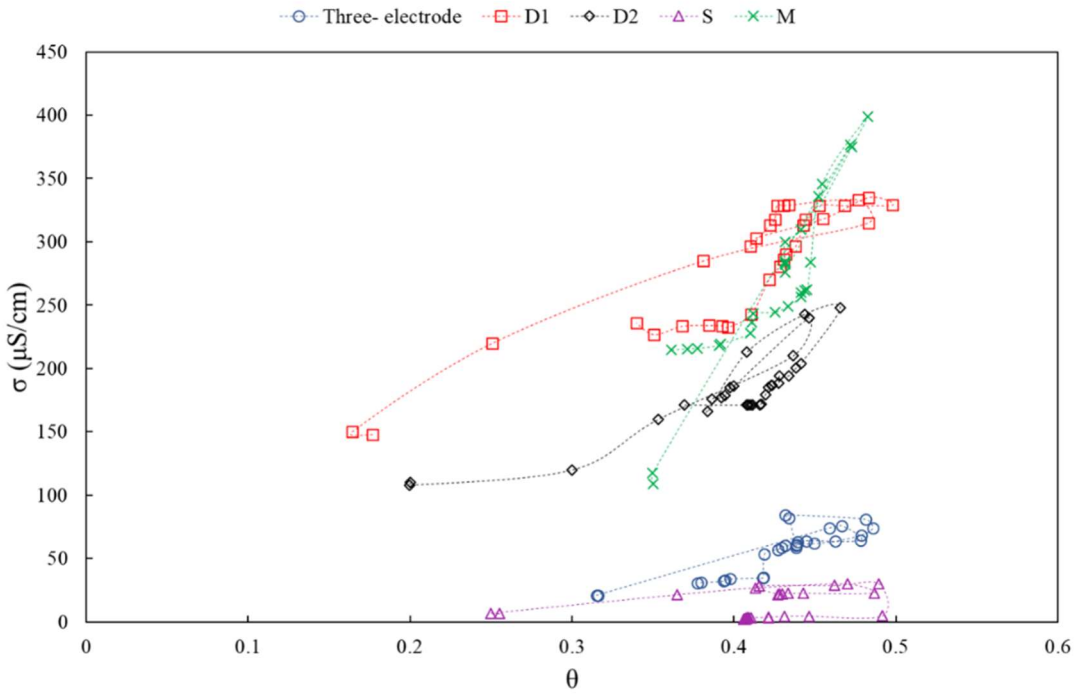


圖 2-67 砂箱紅土之導電度與含水量遲滯現象(魏士凱，2019)

(Three electrode 為傳統三電擊感測器，D1 下方為串接新式雙側感測器，D2 為串接上方新式雙側感測器，S 為舊式單側感測器，M 為小型雙側感測器)

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(29)和式(30)所示。

$$\frac{1}{\rho} = A \cdot \theta^m \tag{29}$$

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + [1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \tag{30}$$

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，而變因的規劃參數如表 2-10 所示。本研究先使用桃園紅土作為實驗使用土壤，粒徑分布曲線圖如圖 2-68，其基本物性實驗資料如表 2-10 所示。實驗砂箱可容納體積為 1 立方公尺，其內部長寬高長都為一公尺，並將紅土夯至砂箱中，高度為 90 公分。

本研究之實驗設備配置如圖 2-69 所示，與圖 2-65 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 2-70 與圖 2-71 所示。而砂箱內使用的 TDR 感測器如圖 2-72 所示，在圖內紅字為 TDR 感測器代號，而 N1、N2 為新式雙側感測器，S 為舊式感測器，3 為傳統三電極感測器，M 為小型 TDR 感測器。本實驗所使用的張力計為 T5 張力計如圖 2-73 所示。灑水設備如圖 2-74、圖 2-75、圖 2-76、圖 2-77 與圖 2-78 所示。排水如圖 2-79 與圖 2-80 所示，凸出之排水孔會接上軟管將水排出實驗場所外。

本研究使用自來水進行模擬降雨實驗，並在實驗開始先進行 1 小時降雨，之後自然乾燥 23 小時，再之後進行 1 小時降雨(在這期間本研究稱為濕潤期)，最後自然乾燥 24 天(本研究稱為乾躁期)。實驗乾密度的部分會執行兩組實驗，分別為相對緊和鬆的土

壤(緊乾密度：1.7 g/cm^3，鬆乾密度：1.3 g/cm^3)，並且模擬降雨使用自來水(預計 pH 值：7，導電度 160(μS/cm))；模擬降雨酸鹼度的部分是將實驗中兩次降雨(乾溼循環)分別降下不同酸鹼值的模擬雨水，其分別為酸性雨水(模擬酸雨)(預計 pH 值：5，導電度 160(μS/cm))與中性雨水(預計 pH 值：7，導電度 160(μS/cm))，而土壤密度為 1.3 g/cm^3；而模擬雨水導電度的部分是將實驗中兩次降雨分別降下不同導電度的模擬雨水，分別為自來水導電度(預計 pH 值：7，導電度 160(μS/cm))與自然最高導電度(預計 pH 值：7，導電度 240(μS/cm))，而土壤密度為 1.3 g/cm^3。而定義自然導電度與模擬酸雨之資料依行政院環境保護署所提供的資料做為依據，如表 2-12 和表 2-13 所示。並且，對於在於各個不同含水量的反射波形進行介電頻譜分析。

表 2-10 砂箱實驗之參數設定

	Experiment			
	Dry density		pH for rainwater	Conductivity for rainwater
	Tight	Loose	Acidity	High
Precipitation per hour (mm/hr)	50	50	50	50
Conductivity for rainwater (μs/cm)	160	160	160	**240**
pH	7	7	**5**	7
Dry density (g/cm^3)	**1.7**	**1.3**	1.3	1.3

表 2-11 砂箱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

表 2-12 臺灣各地之降雨導電度

行政院環境保護署(https://data.epa.gov.tw/dataset/aqx_p_314)

Location	avg. Electrical conductivity	max	min	STD
南投縣-日月潭	16.7065	81	2	11.941
嘉義市-嘉義	29.5353	207	6	25.0635
基隆市-彭佳嶼	85.7951	456	6	77.0731
宜蘭縣-宜蘭	37.9383	126	8	25.0028
屏東縣-恆春	22.9322	103	3.5	16.9795
新竹縣-新竹	31.2511	72	10.3	15.2071
桃園縣-中壢	56.8677	381	8	54.176
臺中市-臺中	23.4538	376.2	3	32.5814
臺北市-臺北	38.5329	162	12	25.2754
臺北市-鞍部	45.2181	186	7	29.5286
臺南縣-臺南	29.4676	238	4.7	24.9256
臺東縣-成功	49.2659	424	5	52.694
雲林縣-雲林	24.4275	102.7	6.8	17.8773
高雄市-高雄	37.8393	452	3.7	43.483
Total avg.	***37.8022***	240.4929	6.1429	32.272

表 2-13 臺灣各地之降雨酸鹼值

行政院環境保護署(https://data.epa.gov.tw/dataset/aqx_p_314)

Location	avg. pH	max	min	STD
南投縣-日月潭	5.4804	6.98	4.16	0.54562
嘉義市-嘉義	5.6992	6.93	4.11	0.56937
基隆市-彭佳嶼	5.0024	6.96	3.9	0.63733
宜蘭縣-宜蘭	5.1188	6.91	4.09	0.51311
屏東縣-恆春	5.548	7.53	4.2	0.51678
新竹縣-新竹	4.8918	6.43	4.06	0.48997
桃園縣-中壢	4.7397	6.77	3.73	0.49508
臺中市-臺中	5.653	7.27	4.23	0.71689
臺北市-臺北	5.0697	6.4	4.06	0.51066
臺北市-鞍部	4.8557	6.37	3.74	0.50267
臺南縣-臺南	5.7082	6.9	3.65	0.5828
臺東縣-成功	5.1856	6.58	3.91	0.59221
雲林縣-雲林	6.1813	6.85	5.29	0.39212
高雄市-高雄	5.2563	6.97	3.85	0.57593
Total avg.	***5.3136***	6.8464	4.07	0.54575

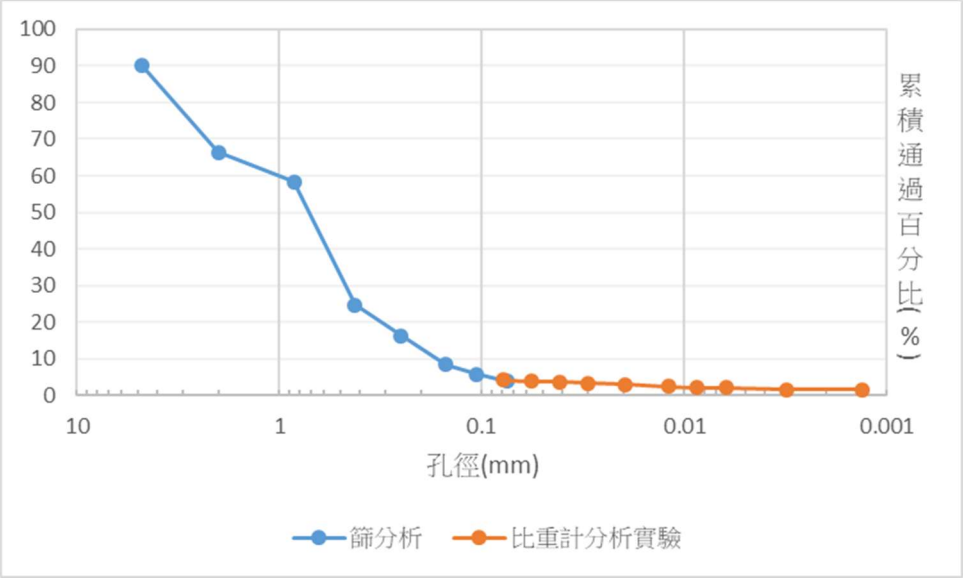


圖 2-68 實驗使用之桃園楊梅紅土的粒徑分布曲線圖

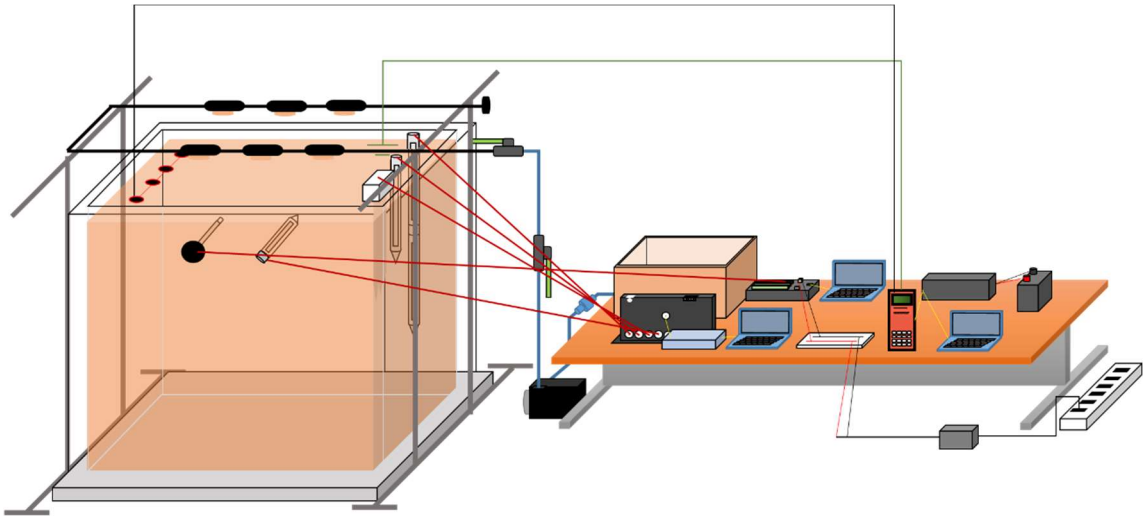


圖 2-69 實驗設備示意圖(包含砂箱、排水系統、灑水系統與量測系統(TDR、ERT、Tensiometer))

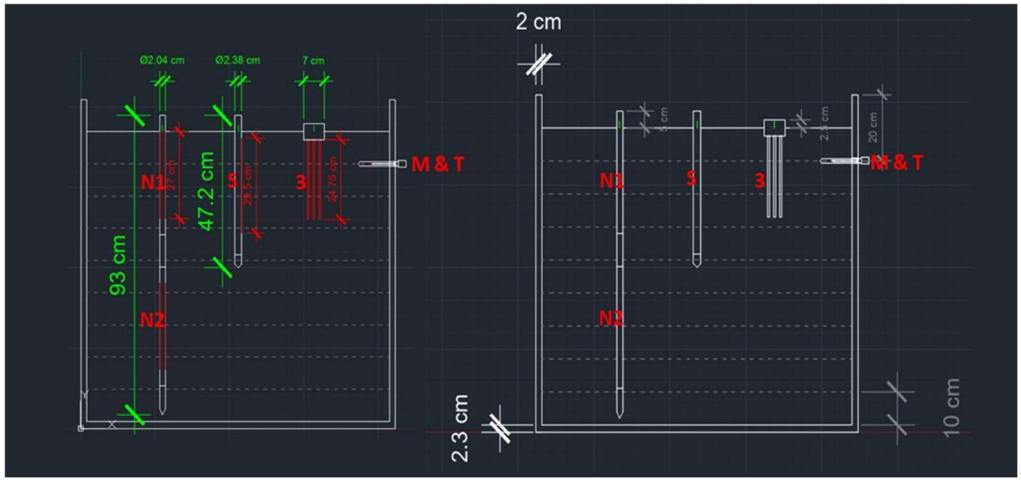


圖 2-70 感測器在砂箱所在位置之示意圖(側視圖)

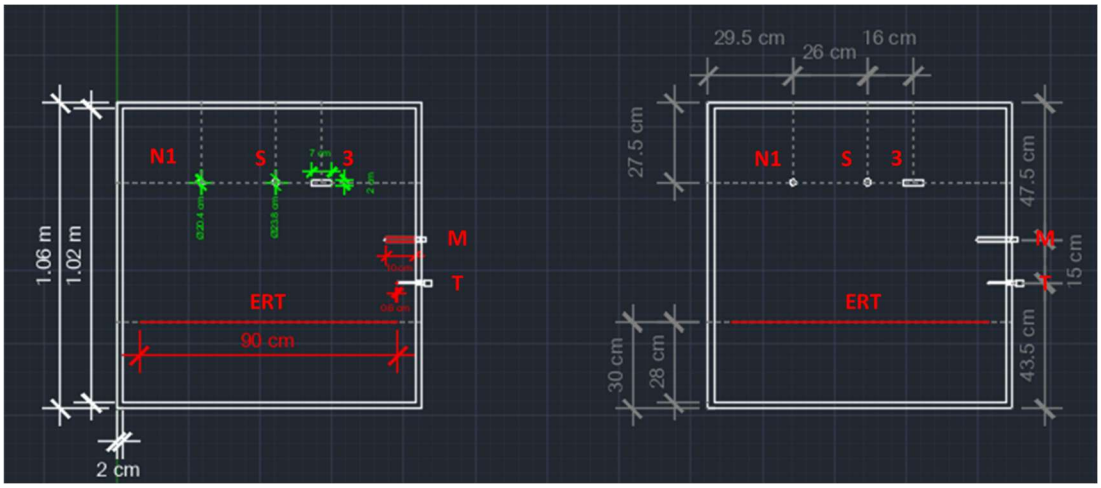


圖 2-71 感測器在砂箱所在位置之示意圖(俯視圖)



圖 2-72 砂箱實驗所使用的各 TDR 感測導波器實際照片



圖 2-73T5 張力計(T5 PressureTransducer Tensiometer)



圖 2-74 灑水系統實際照片(1)



圖 2-75 灑水系統實際照片(2)

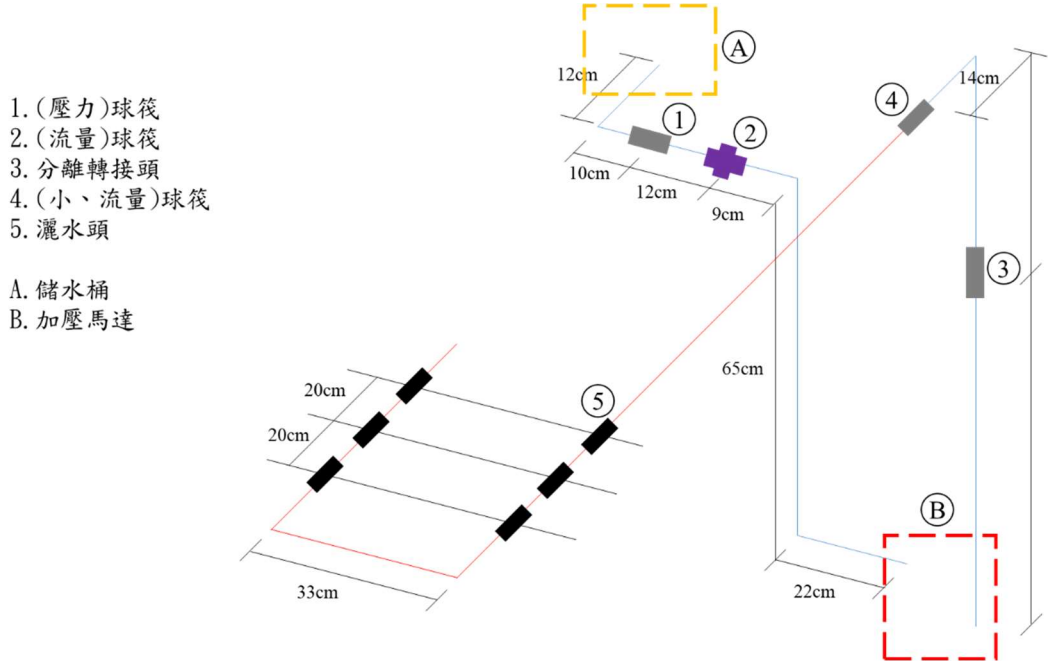


圖 2-76 灑水系統示意圖(1)

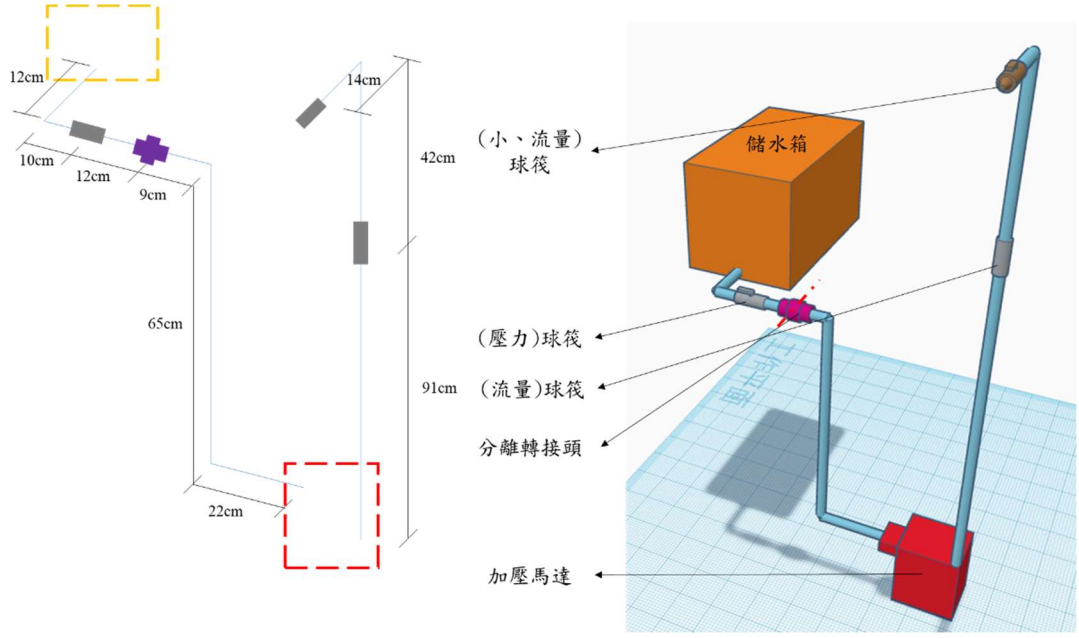


圖 2-77 灑水系統示意圖(2)

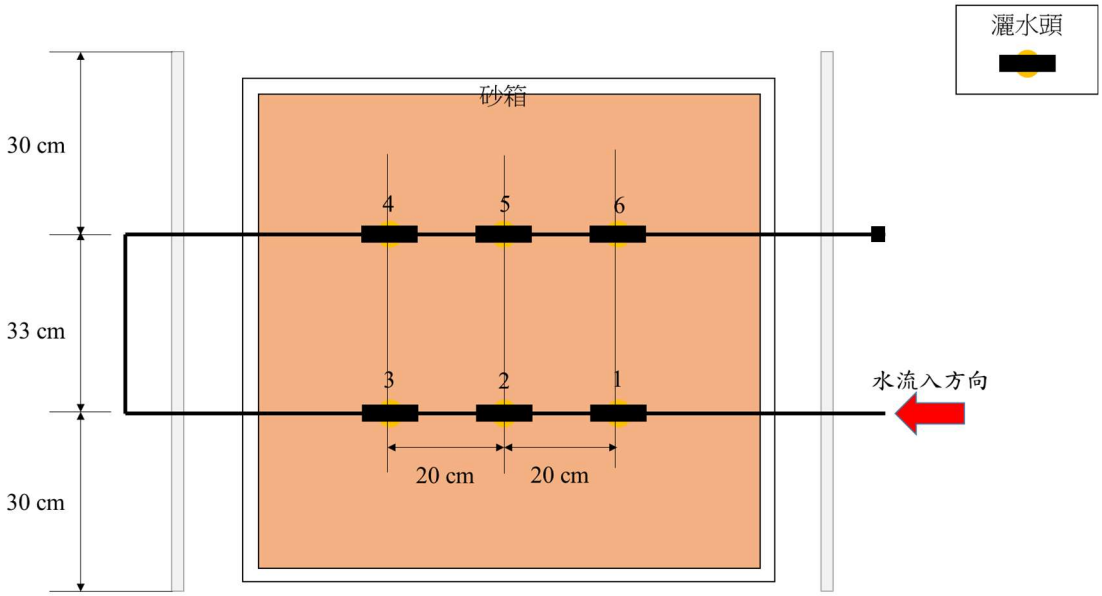


圖 2-78 灑水系統示意圖(3)

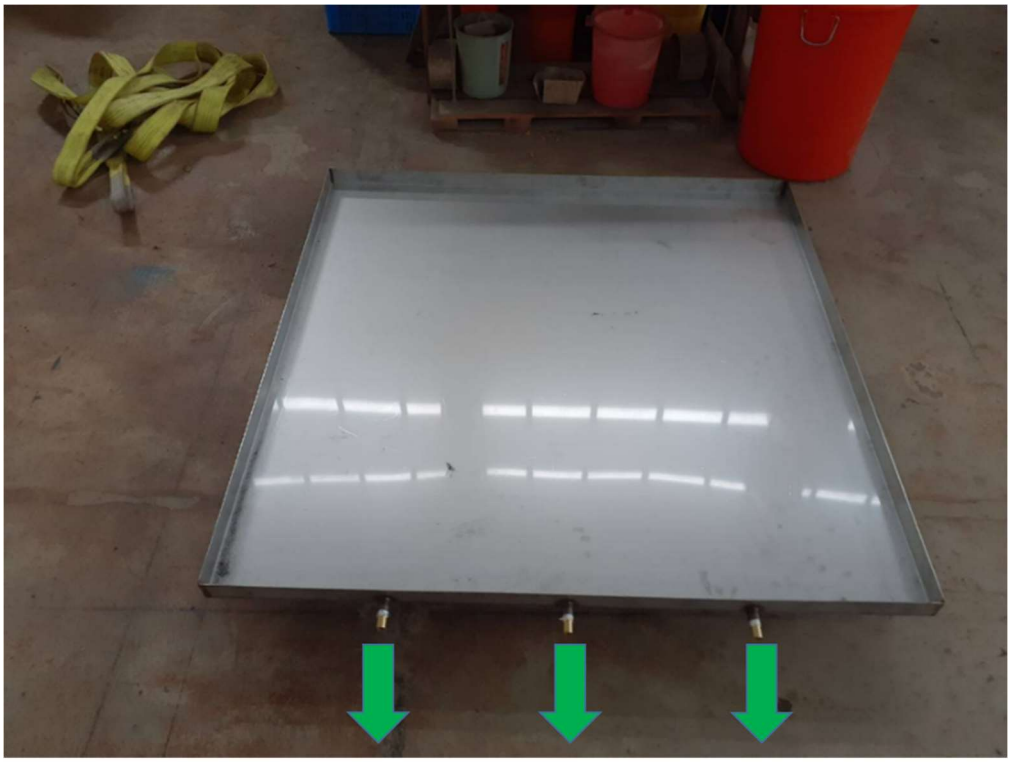


圖 2-79 排水系統實際照片

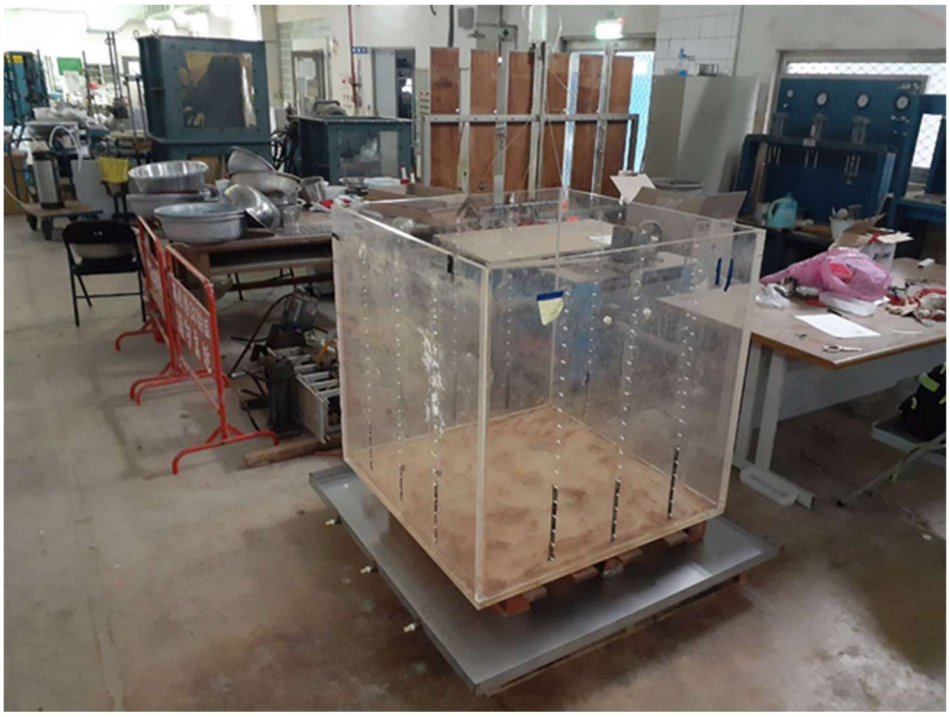


圖 2-80 排水系統與砂箱的相對位置之實際照片

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(感測器)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。表 2-14 與表 2-15 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。

而圖 2-81 至圖 2-87 分別為不同感測器於兩種率定回歸結果，其分別為最小平方法 lsqcurvefit function，與 Matlab 內建的 fminsearchbnd function。

表 2-14 感測器的含水量-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

表 2-15 各感測器的導電度-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

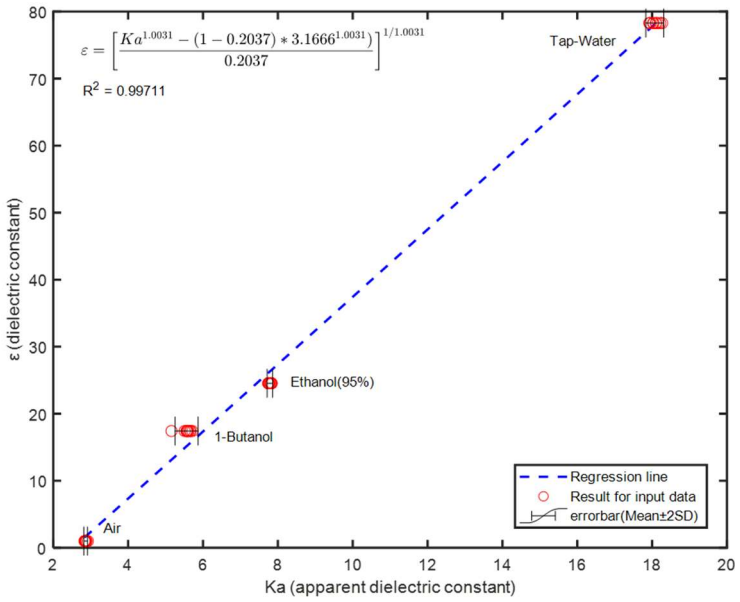


圖 2-81(N1)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(lsqcurvefit)

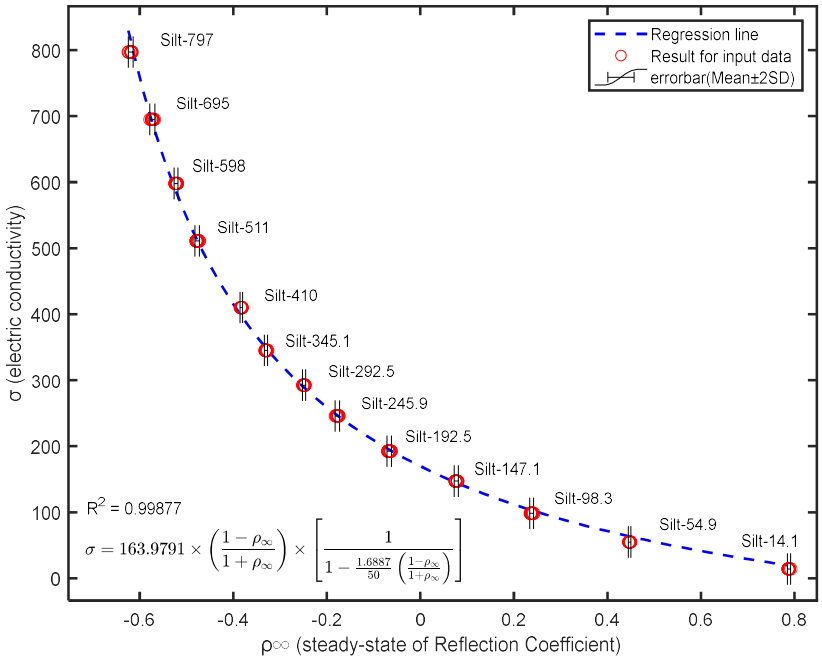


圖 2-82(N1)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

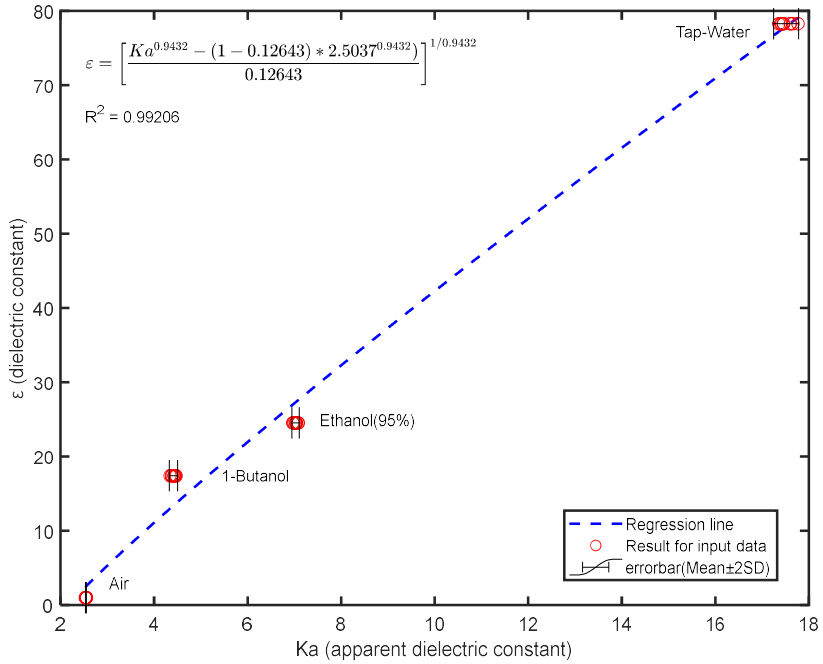


圖 2-83(N2)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(lsqcurvefit)

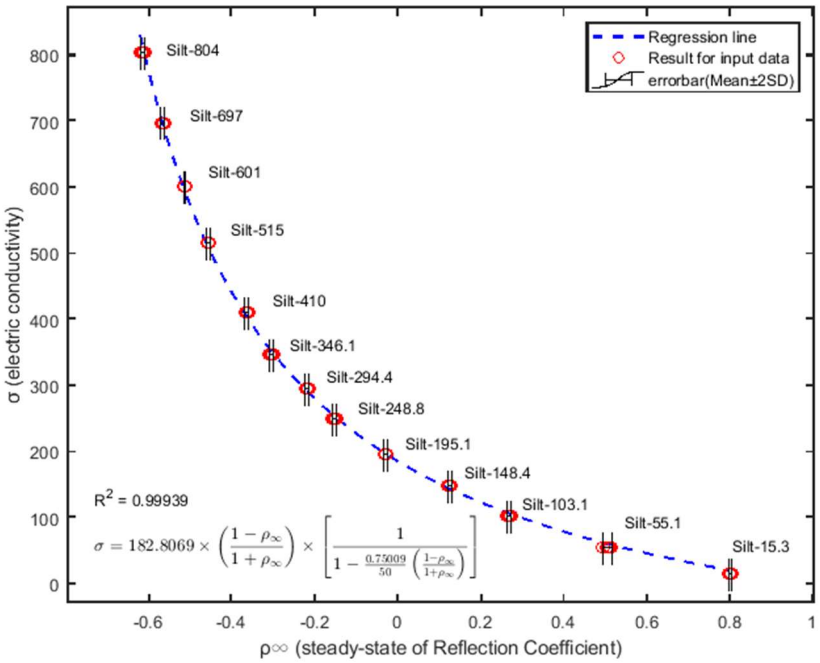


圖 2-84(N2)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

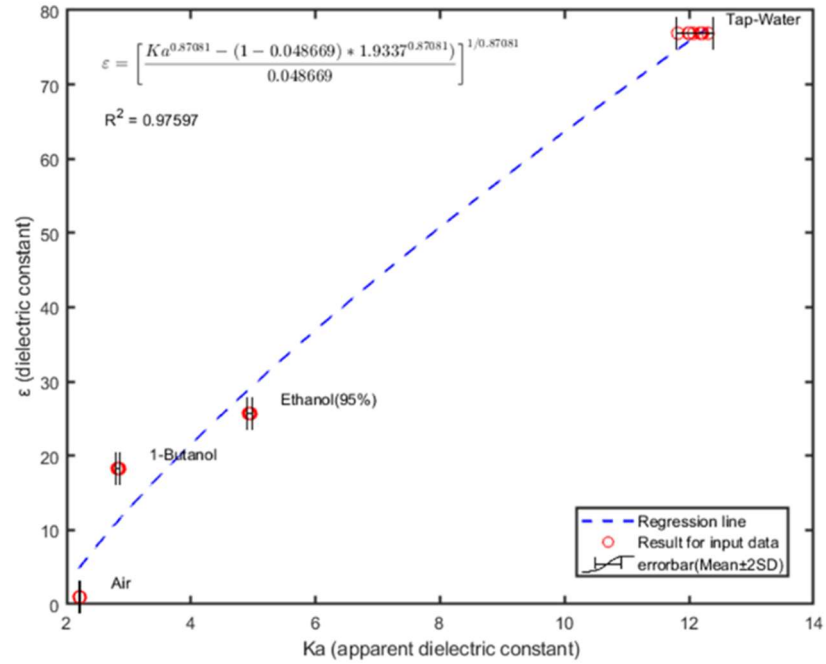


圖 2-85(S)含水量-介電常數轉換公式率定示意圖(lsqcurvefit)

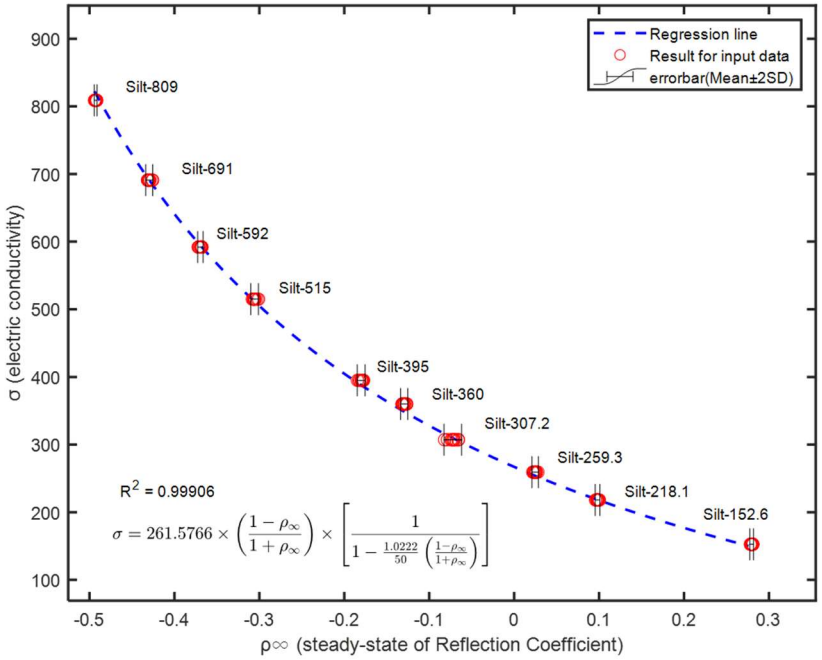


圖 2-86(S)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

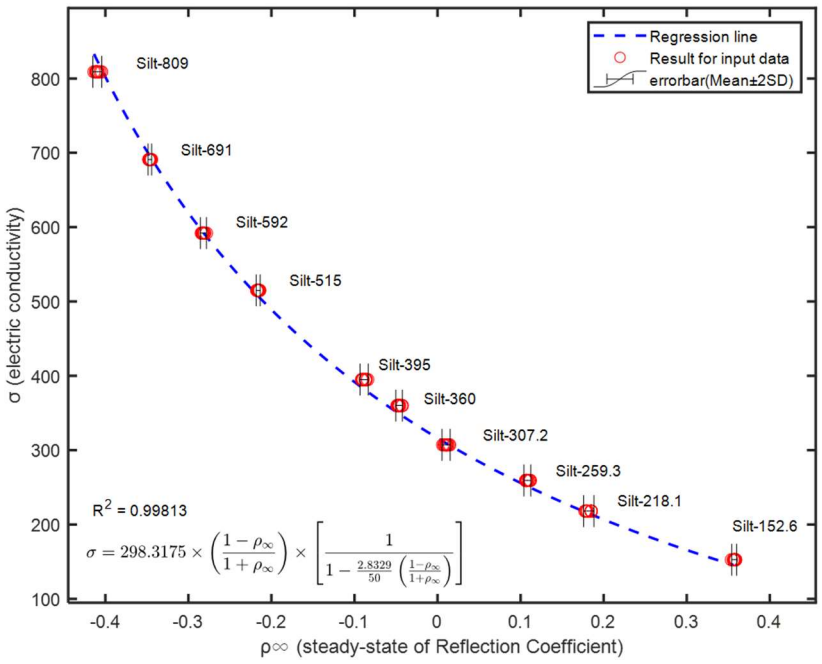


圖 2-87(3)導電度-穩態值轉換公式率定示意圖(fminsearchbnd)

3. 第一組(試驗組)測試成果

本研究第一組砂箱實驗使用桃園楊梅紅土，其乾密度預期為 1.5 g/cm^3，由工地密度實驗得知實際夯實密度為 1.378 g/cm^3，略低於預期乾密度，並將本組設置為試驗組，實驗的實際情況如圖 2-88 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，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 2-89 為代號 3 之傳統 3 電極感測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，嘗試用後續 TDR 全波形反算方法記算 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。

各感測器量到的體積含水量與導電度均進行去極端值(正負 1 個標準差)與 1 小時移動平均的處理，圖 2-89 至圖 2-100 為經過 1 個標準差與 1 小時移動平均處理的體積含水量歷時圖、導電度歷時圖與體積含水量-導電度關係圖，3 電極感測器(圖 2-91)可以看到類似於遲滯迴圈的路徑，但由於濕潤中的資料的擷取點數不足，是否遲滯效應待下一組實驗觀察。N1 感測器(圖 2-94)與 3 電極感測的乾溼路徑相似。而 N2 感測器

在經過兩次乾溼循環其體積含水量-導電度關係圖的路徑呈現左下至右上的螺旋狀(圖 2-97)。而 S 單側感測器則在經過兩次乾溼循環呈現不規則的路徑(圖 2-100)。由於 M 小型感測器導體接觸不良並不顯示其分析結果。



圖 2-88 砂箱實驗的實際架設圖

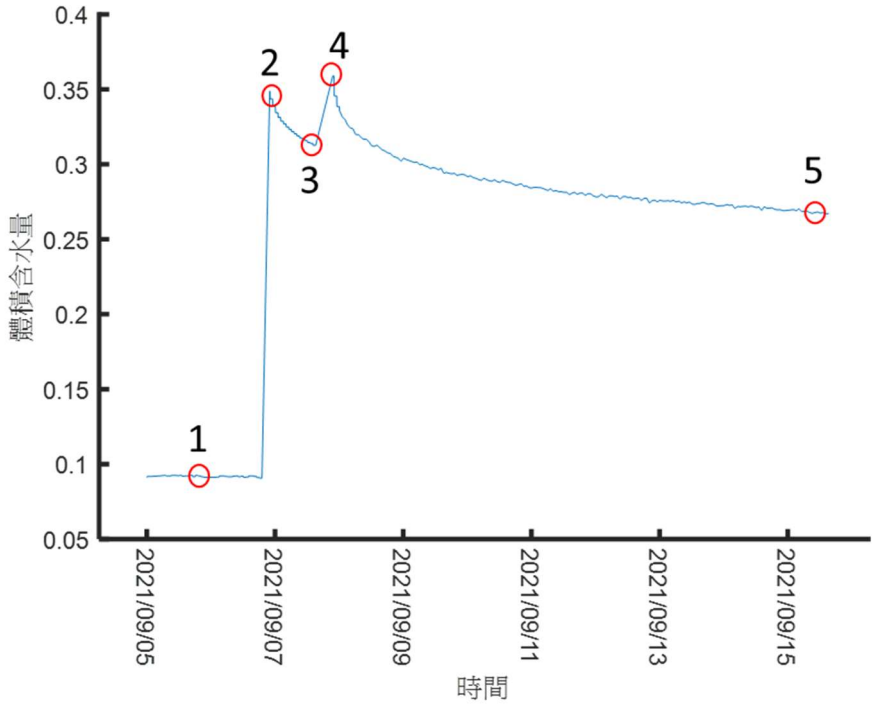


圖 2-89 3 電極感測器量測體積含水量(1hr 平均)

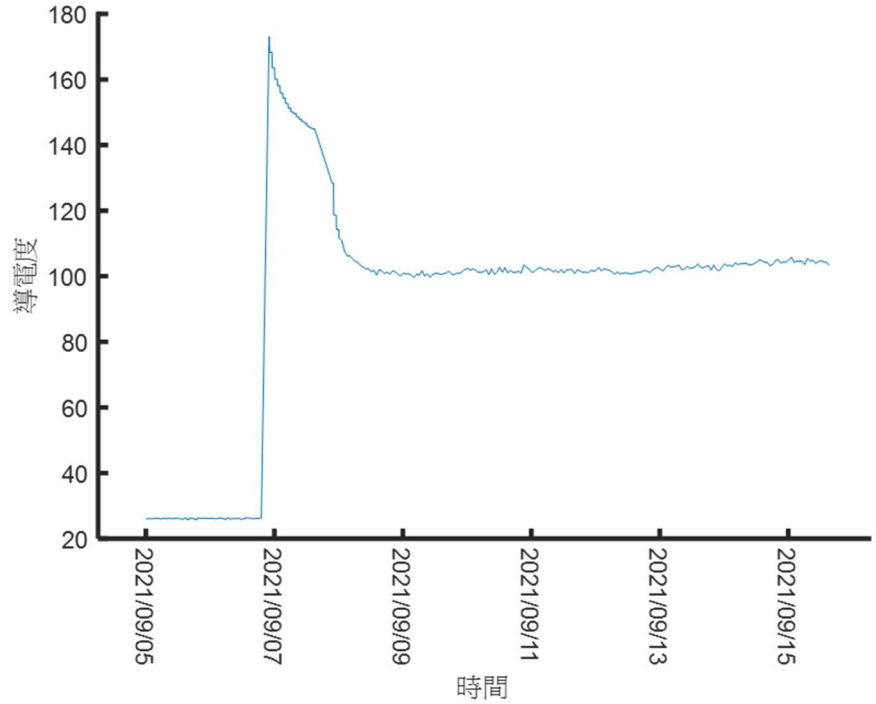


圖 2-90 3 電極感測器所量測導電度(1hr 平均)

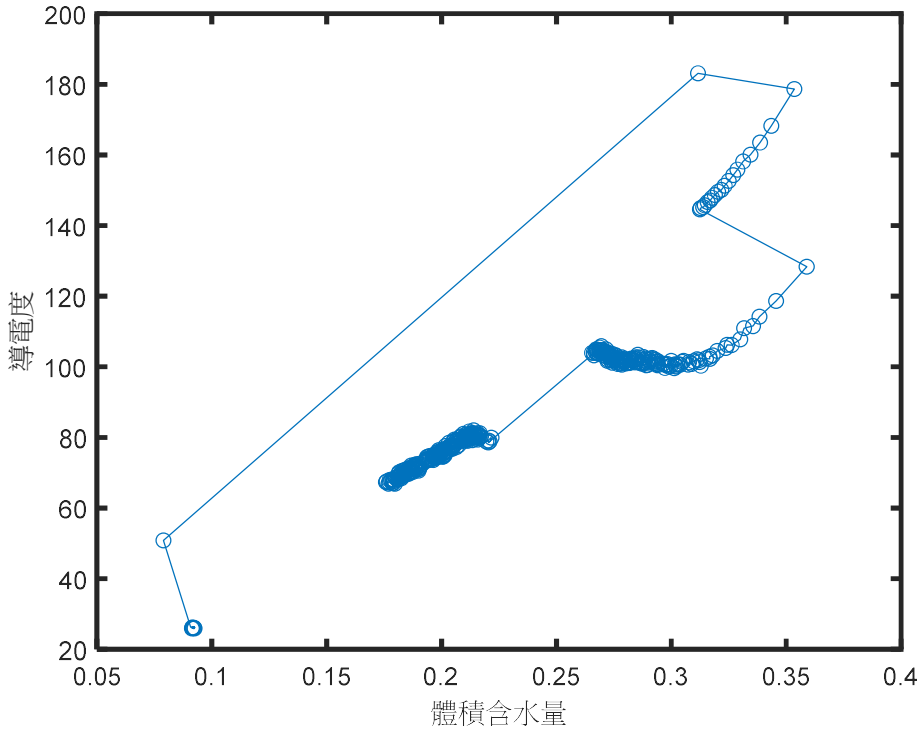


圖 2-91 3 電極感測器之體積含水量與導電度之關係圖

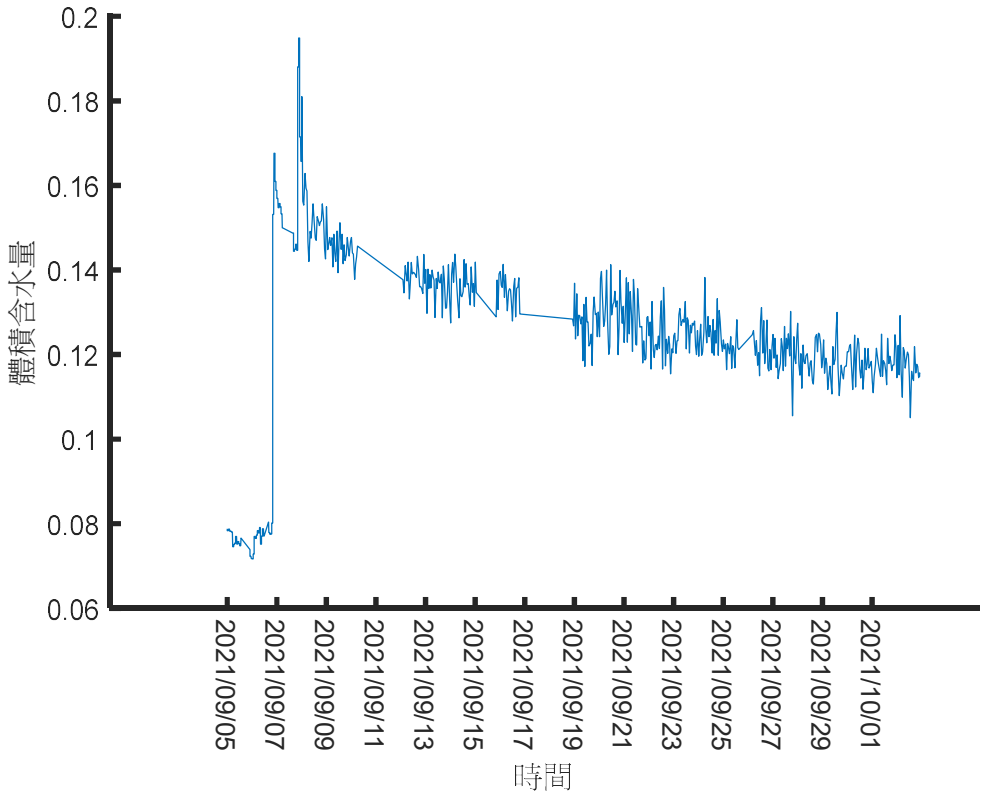


圖 2-92 N1 感測器量測體積含水量(1hr 平均)

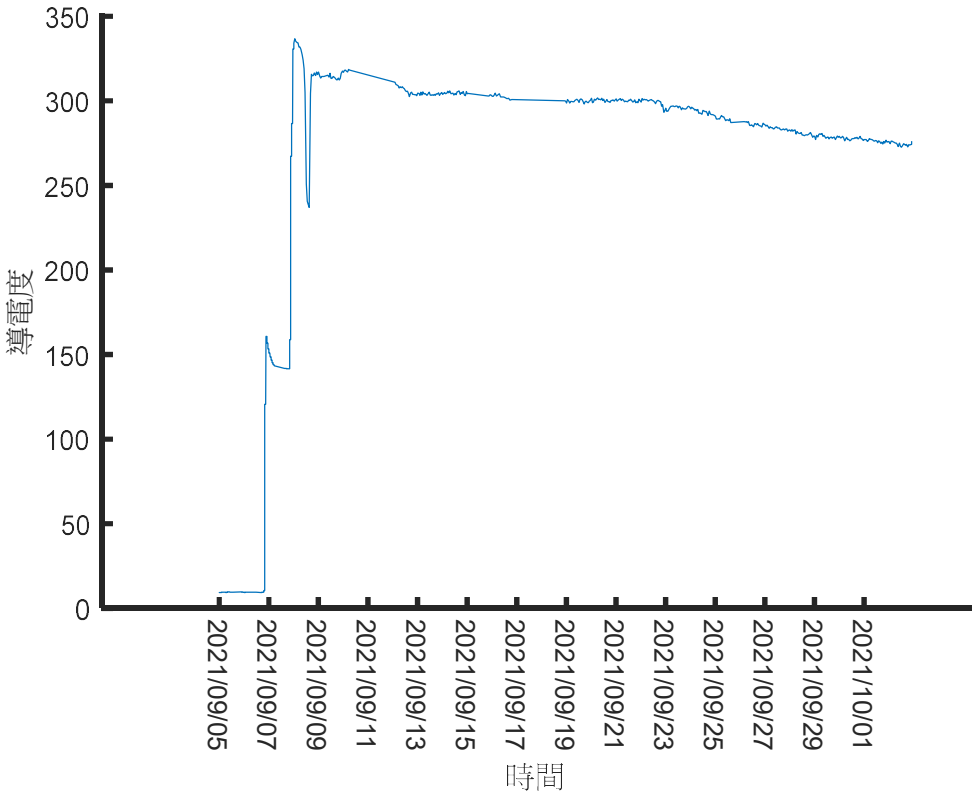


圖 2-93 N1 感測器量測導電度(1hr 平均)

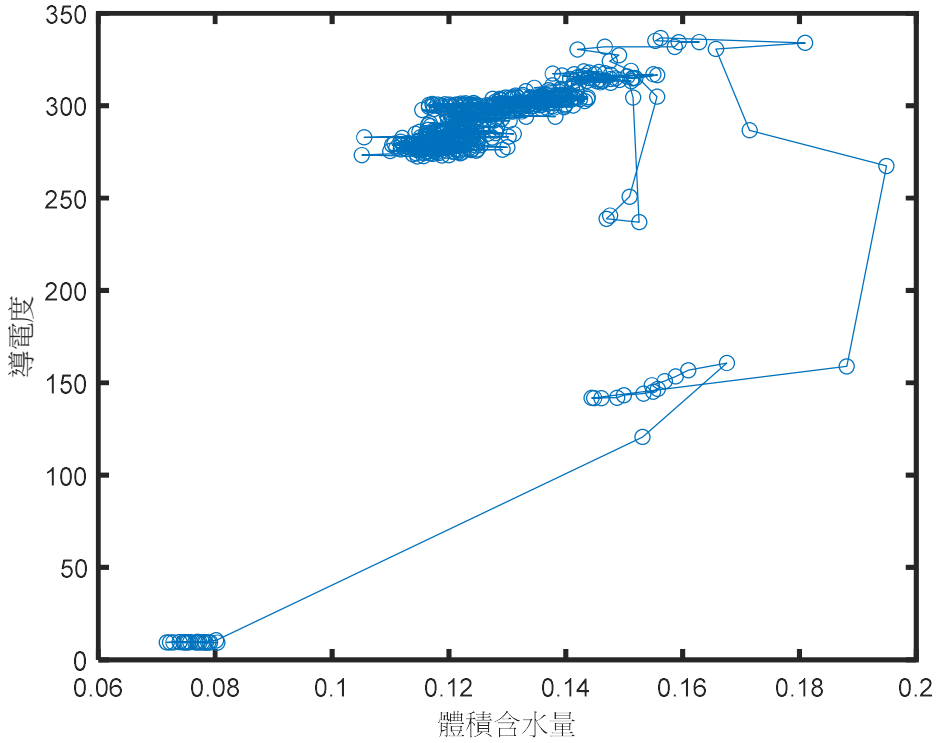


圖 2-94 N1 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

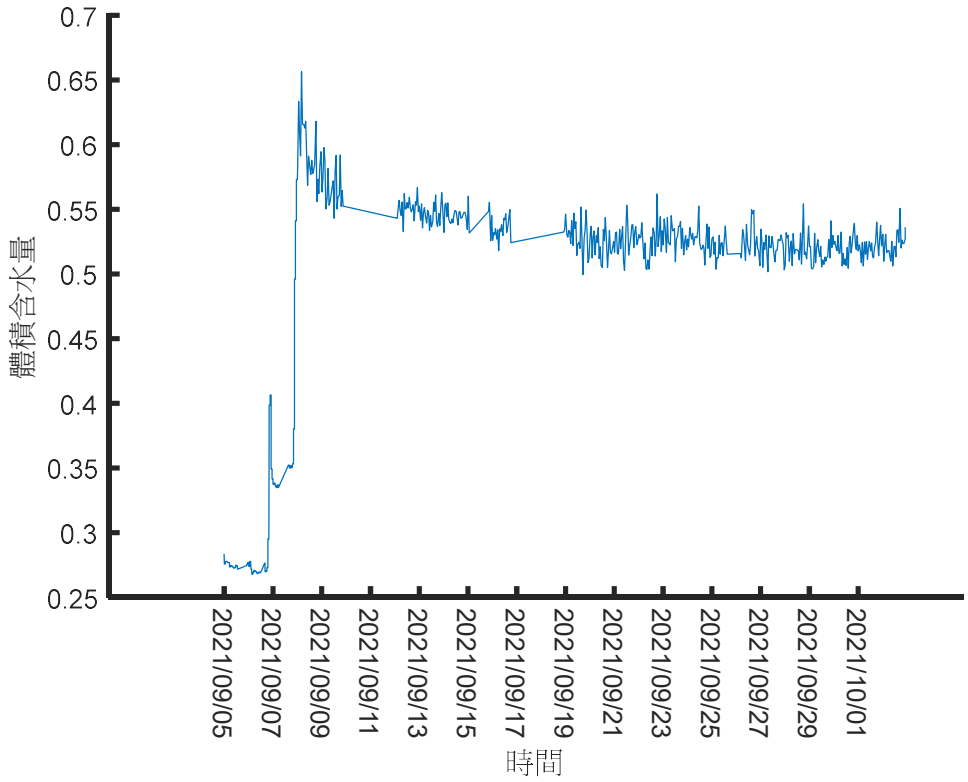


圖 2-95 N2 感測器量測體積含水量(1hr 平均)

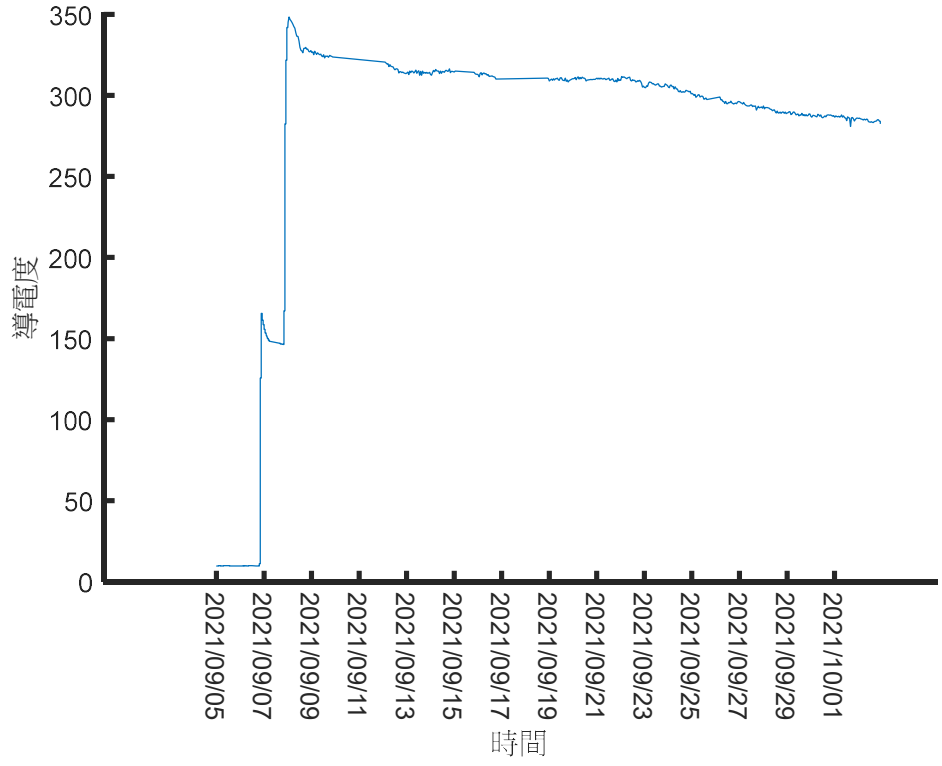


圖 2-96 N2 感測器量測導電度(1hr 平均)

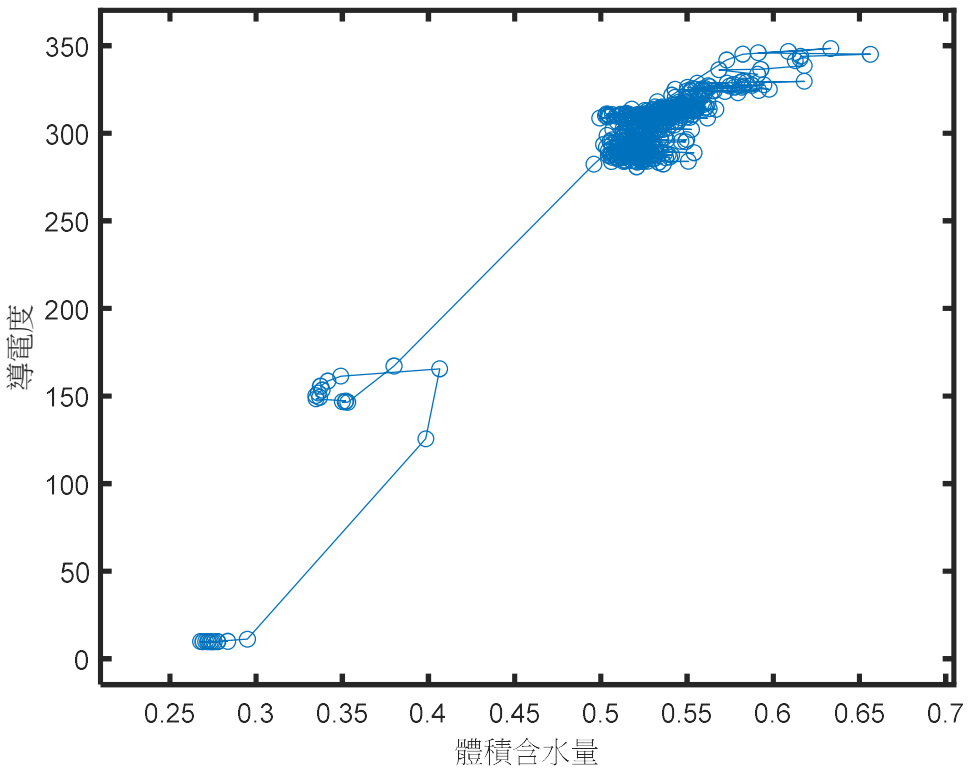


圖 2-97 N2 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

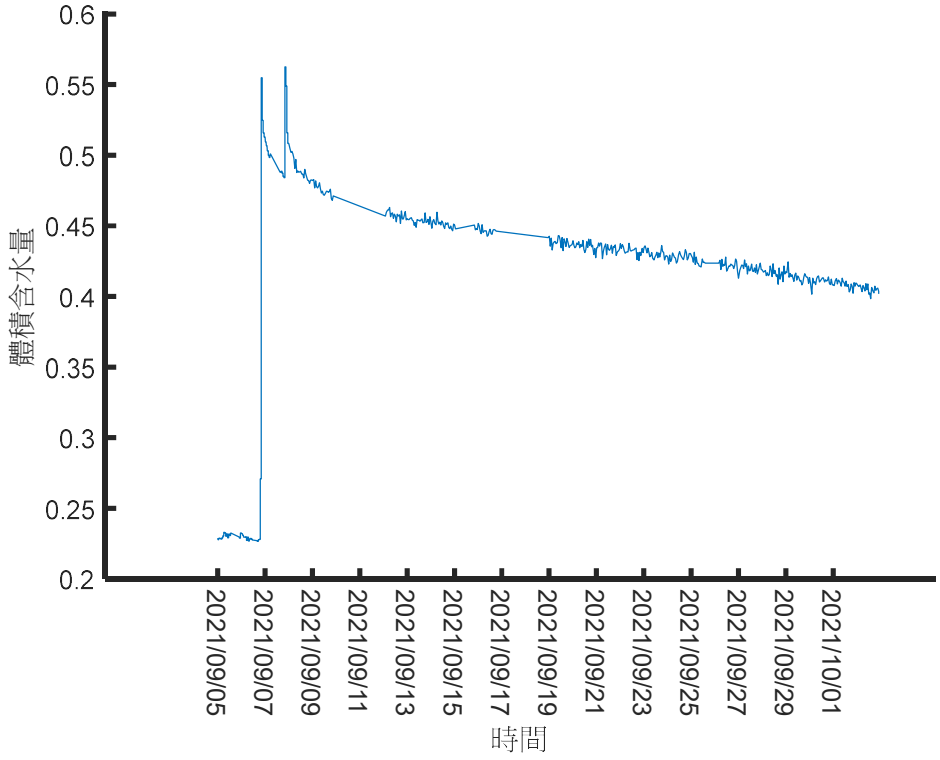


圖 2-98 S 感測器量測體積含水量(1hr 平均)

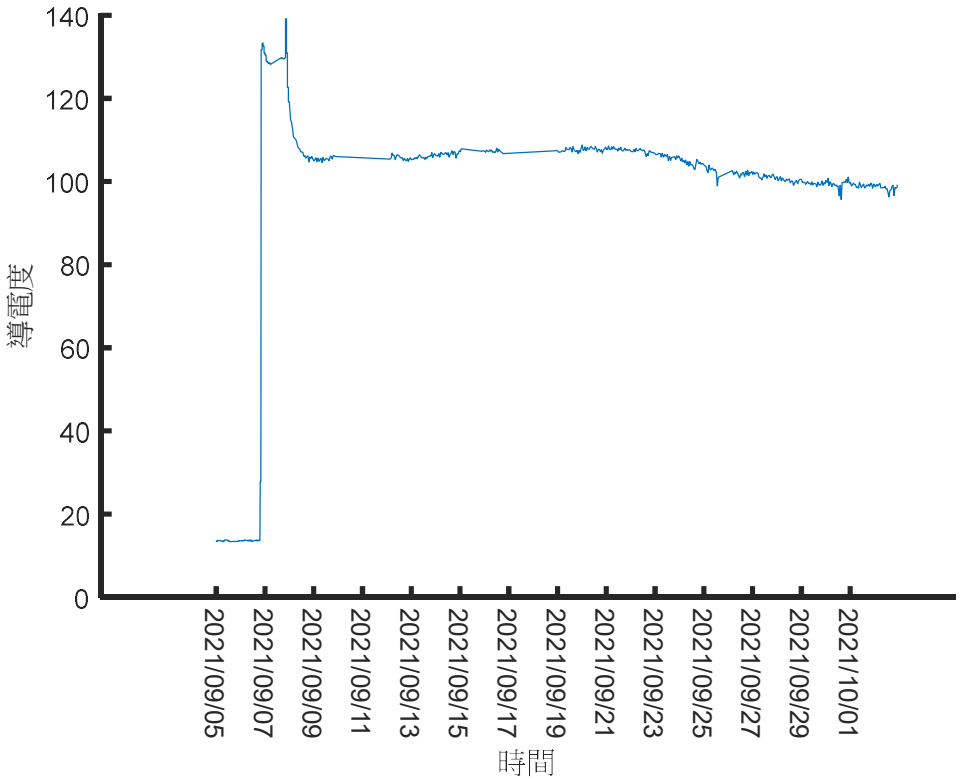


圖 2-99 S 感測器量測導電度(1hr 平均)

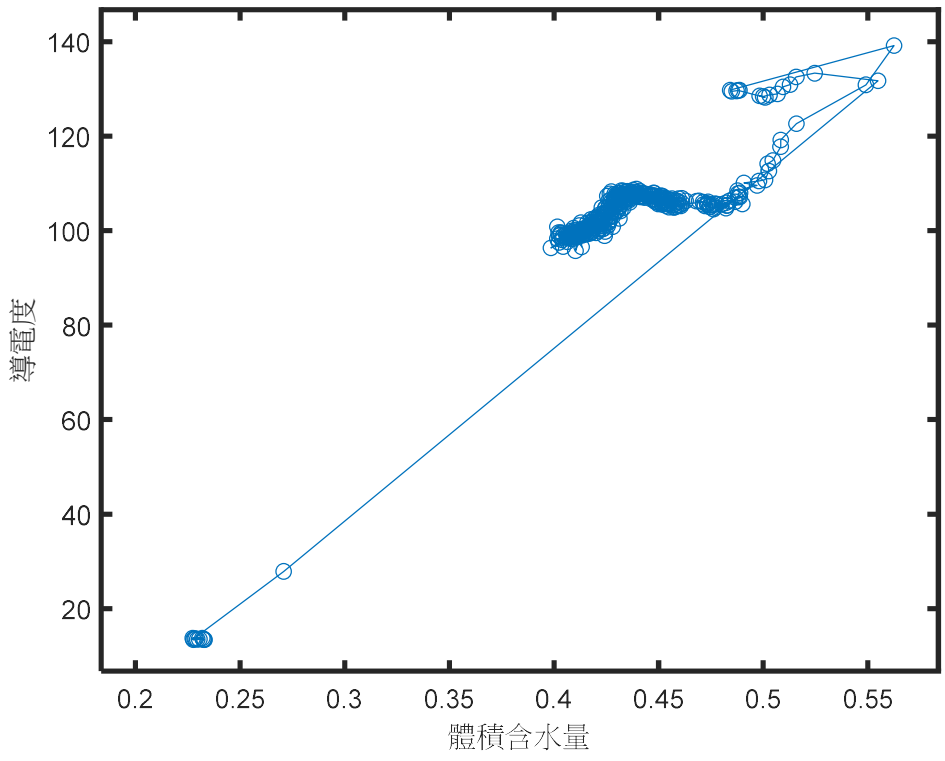


圖 2-100 S 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

4. 第二組(乾密度組—1.3g/cm^3)測試成果

本次實驗在實驗前確認降雨量、模擬降雨雨水的導電度和 pH 值與土壤乾密度，其乾密度原先預期為 1.5 g/cm^3，由工地密度實驗得知真實的夯實結果之密度為 1.3 g/cm^3，不符合預期乾密度，並設置為鬆土 1.3 g/cm^3 之實驗。

本次實驗初步於 2022 年 4 月 15 號中午 12 點進行降雨之砂箱實驗，降雨時間一小時，平均降雨量 81.33 mm/hr，雨水為純水無導電度，即在下午 1 點停止降雨。之後乾燥約 1 天，並在隔日 4 月 16 號下午 1 點開始為期一小時降雨，平均降雨量 74.78 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。

除了三電極貫入器的資料(圖 2-102)以外，其他的感測器量測資料(圖 2-104、圖 2-106、圖 2-108、圖 2-109)都有使用 Matlab 的 Smooth 進行移動平均的處理，其參數設定為 5 個資料點平均。可看到三電極貫入器體積含水量與導電度之關係接近於線性關係，但是在約 22.25 %與 30 μS/cm 的體積含水量與導電度之位置，相對於藍色虛線(回歸線)，資料點有明顯向上凸起，其對照於，當在乾燥期體積含水量逐漸下降時，導電度有下降後上升再下降的趨勢，導電度上升期間含水量下降的速度也有緩和下來。而導電度的浮動可能是在乾燥期的天氣變化，如雨天濕氣過大使孔隙內水含量上升，導致土壤再次形成電雙層(Diffuse Double Layer,DDL)，又或者導致部分電解質重新溶解，實際原因有待查證。而除了三電極貫入器的資料之外，其他貫入器的體積含水量與導電度之關係不如三電極貫入器符合

Archie's Law，是否由於其貫入器之結構造成體積含水量與導電度不精確，建議可在進行多組實驗對照驗證。

以三電極貫入器的資料來說，並未發現任何明顯的遲滯現象。N1 與 N2 新式雙側感測器在經過兩次乾濕循環呈現不規則的路徑(圖 2-105 與圖 2-107)。而 S 舊式單側貫入器與 M 小型貫入器的導電度(圖 2-108、圖 2-110)跳動非常大，可能由於是共用同一臺 TDR 脈衝產生器的的反射訊號有過多的雜訊導致，且由於其乾溼路徑呈現左右顛倒的 L 型，與回歸線的關聯性不高因此建議不繪製回歸線(圖 2-111)。

表 2-16 實際物理參數

Precipitation per hour(mm/hr)[1]	81.33276196
Precipitation per hour(mm/hr)[2]	74.7773458
Conductivity for rainwater(μs/cm)[1]	161.6(22.5℃)
Conductivity for rainwater(μs/cm)[2]	161.92(23.4℃)
PH[1]	6.2
PH[2]	6.2
Dry density(g/cm^3)	1.245

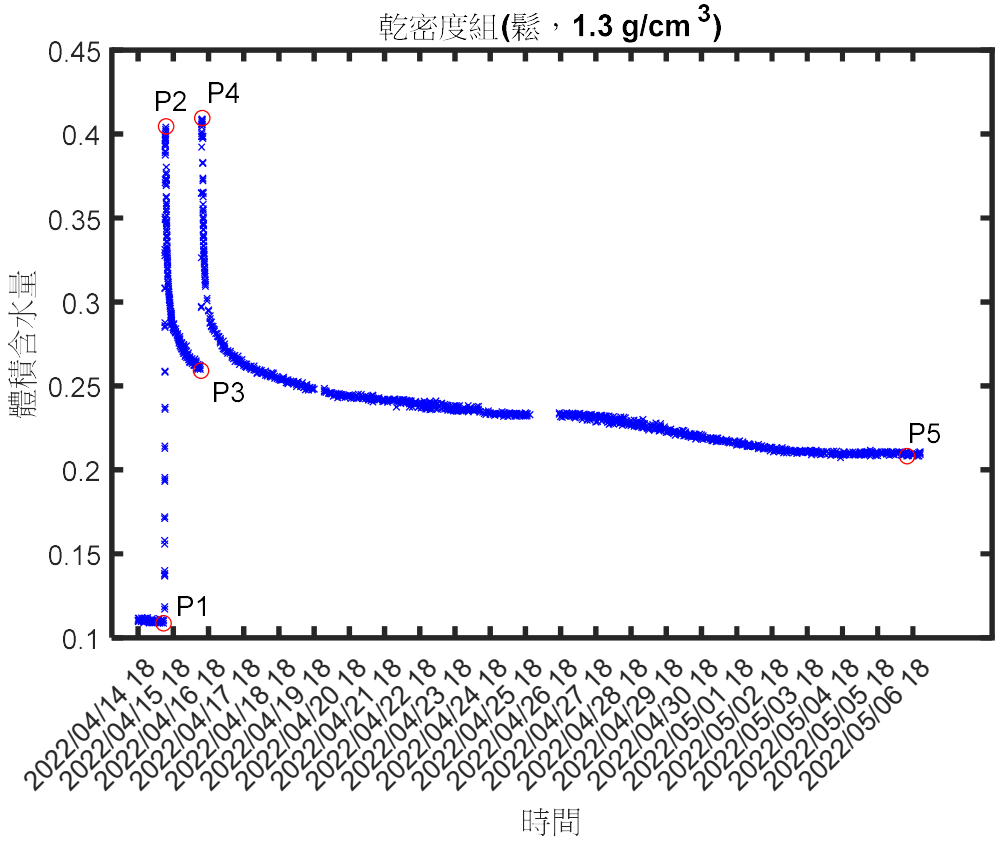


圖 2-101 傳統 3 電極感測器介電頻譜分析時間點

(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)

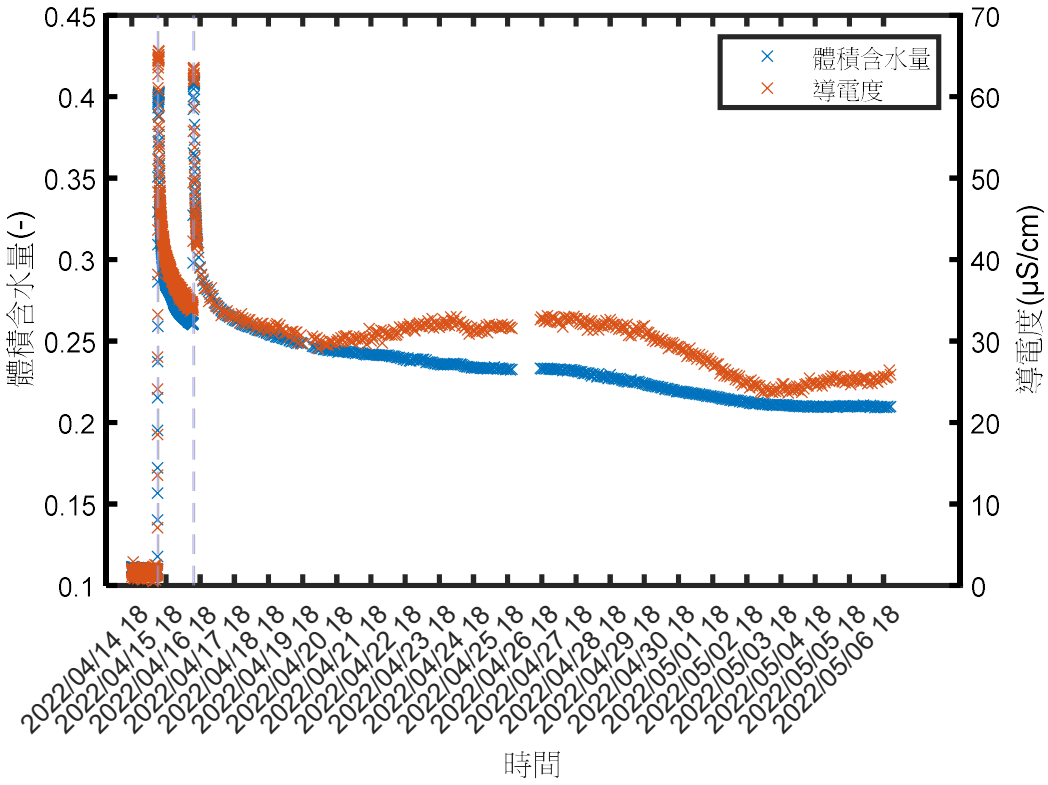


圖 2-102 3 電極感測器量測體積含水量與導電度

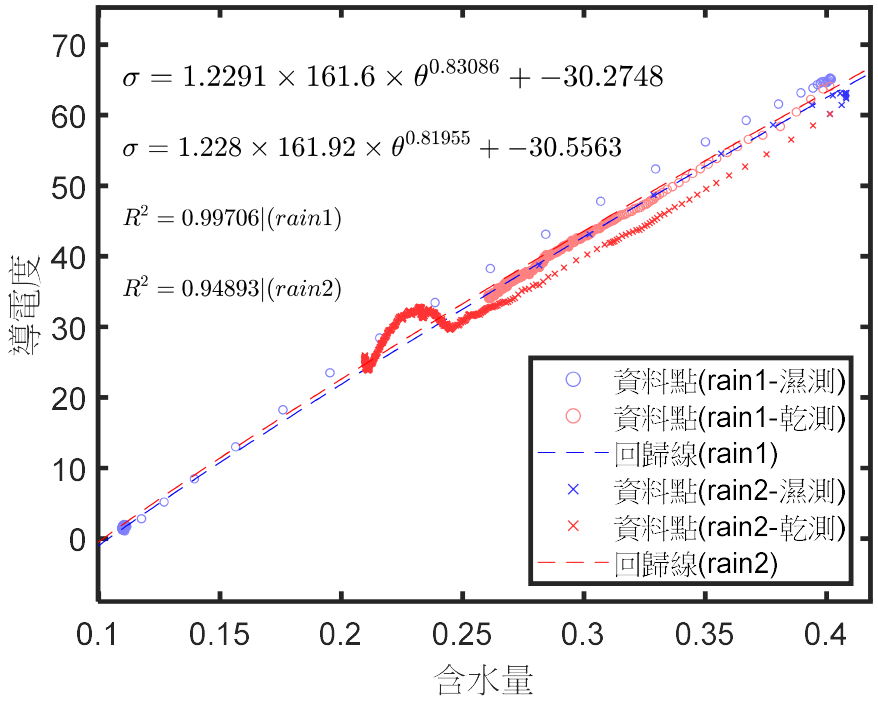


圖 2-103 3 電極感測器之體積含水量與導電度之關係圖

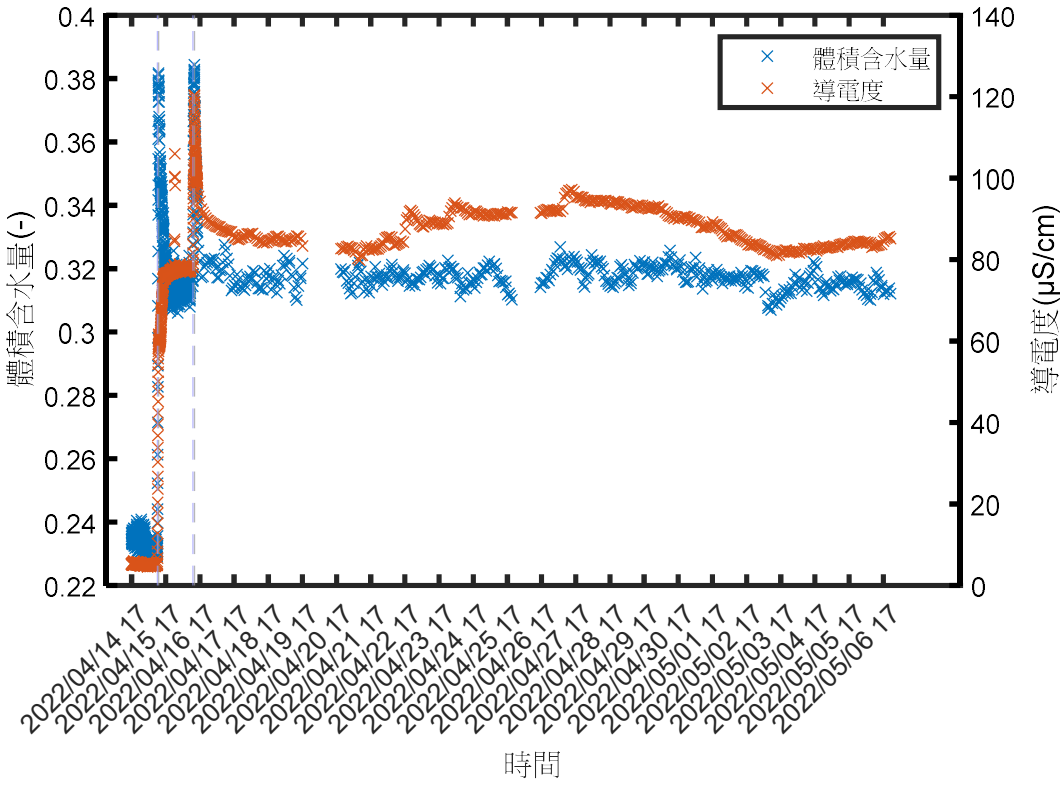


圖 2-104 N1 感測器量測體積含水量與導電度

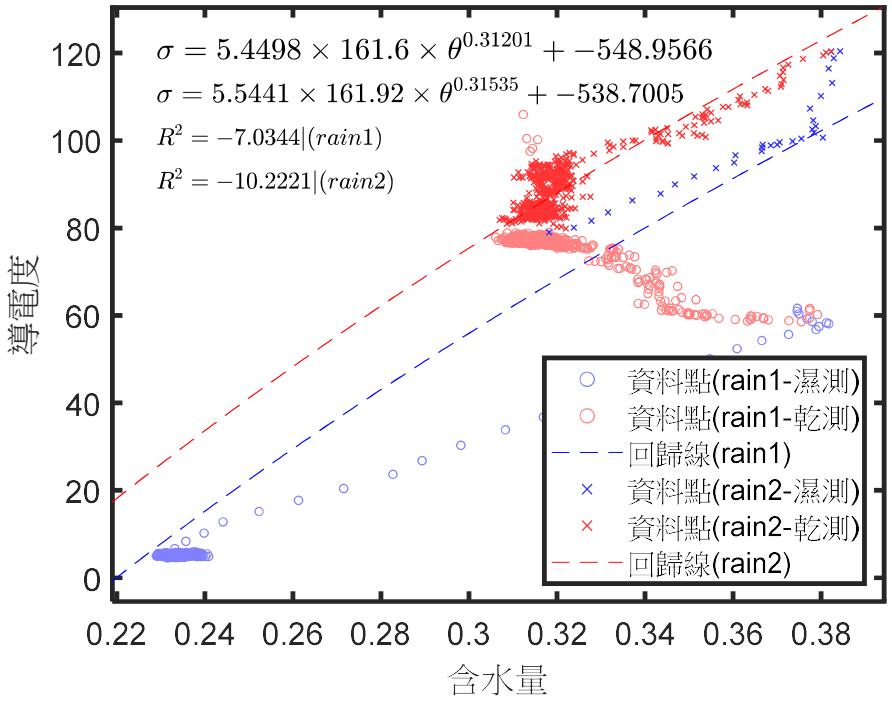


圖 2-105 N1 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

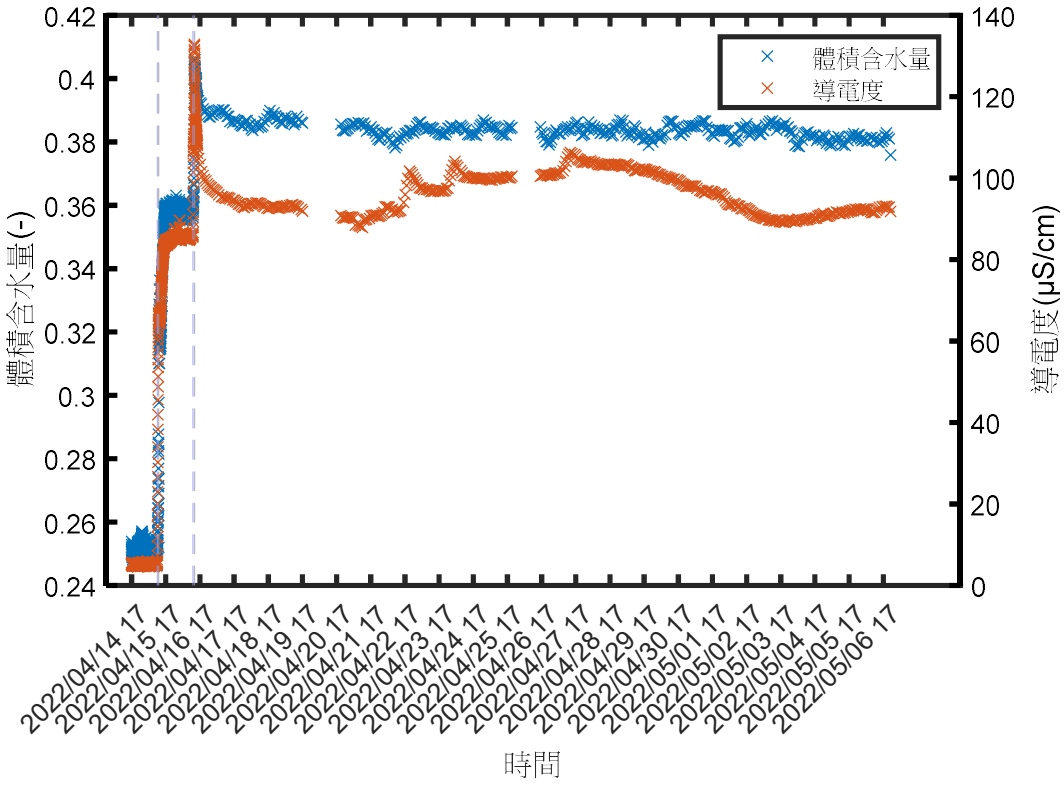


圖 2-106 N2 感測器量測體積含水量與導電度

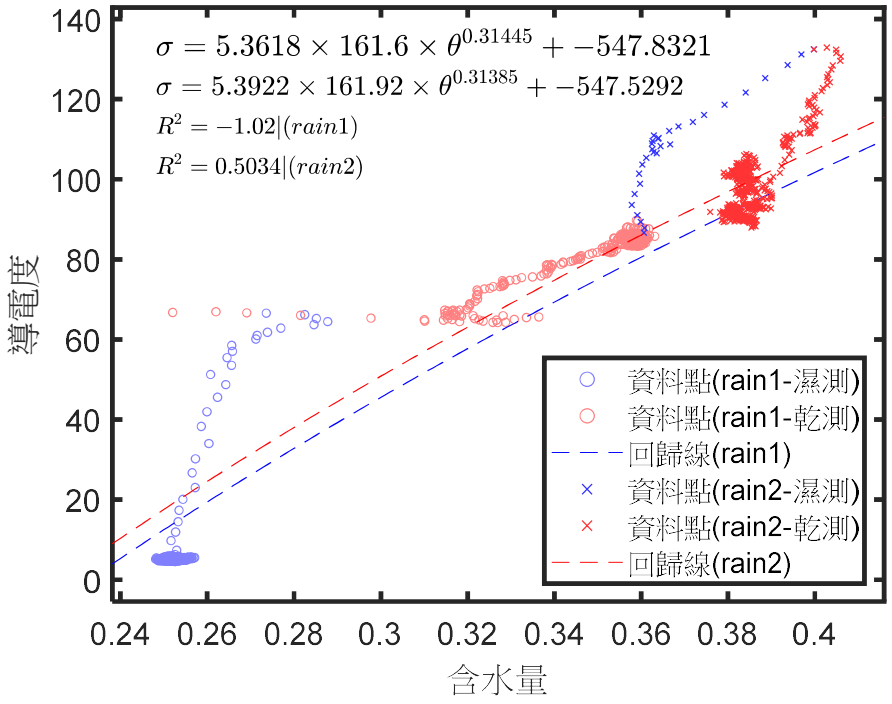


圖 2-107 N2 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

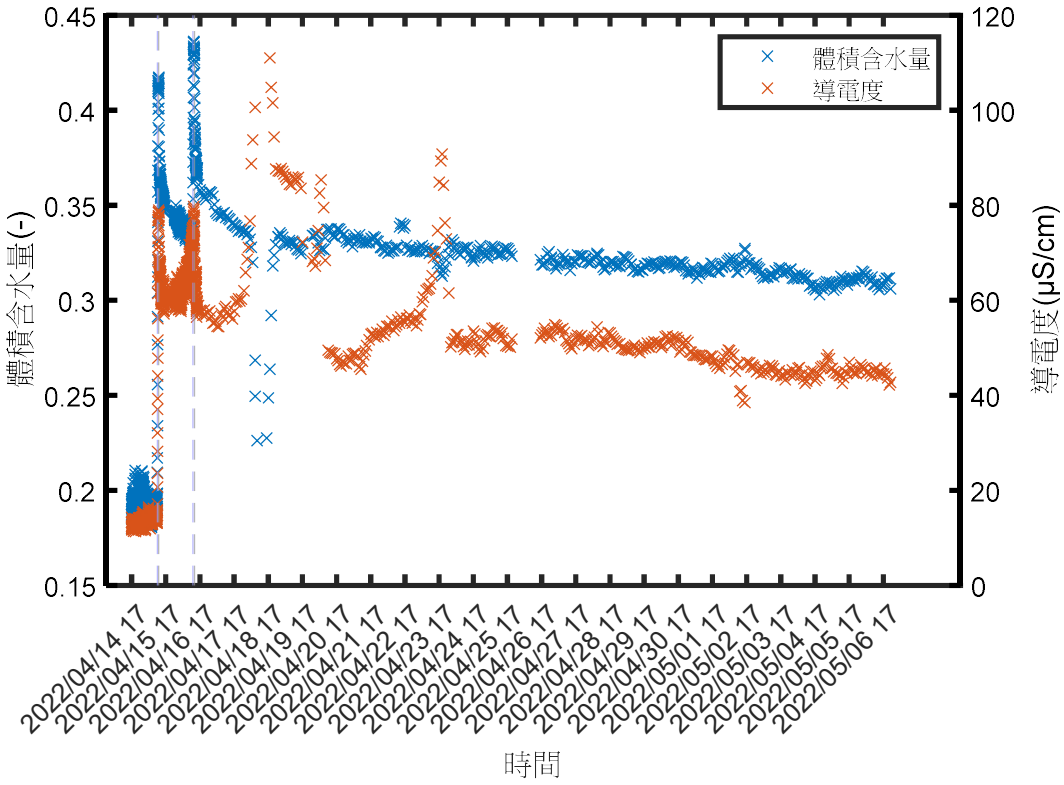


圖 2-108 S 感測器量測體積含水量與導電度

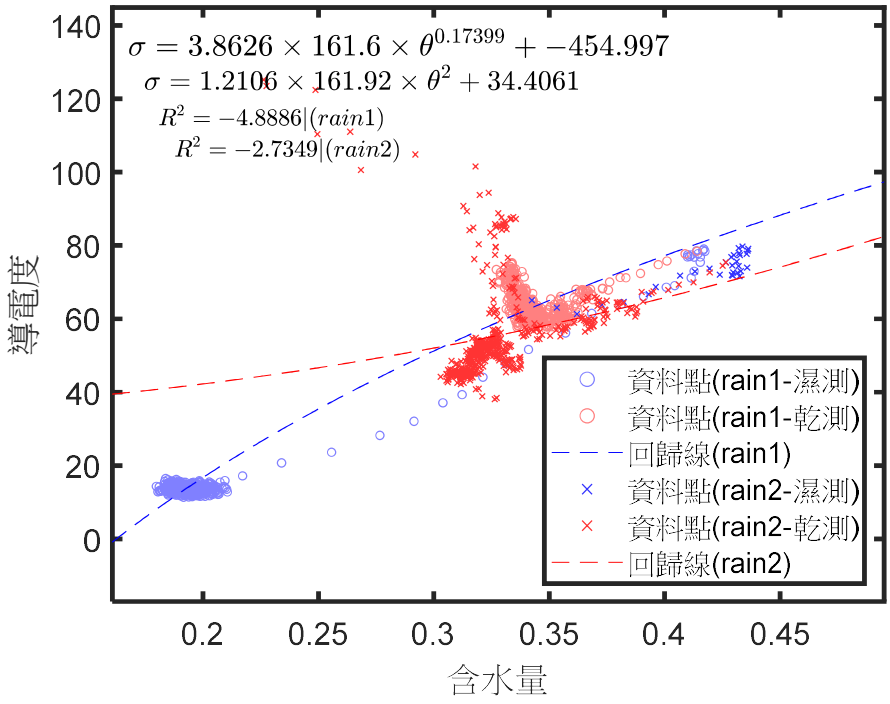


圖 2-109 S 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

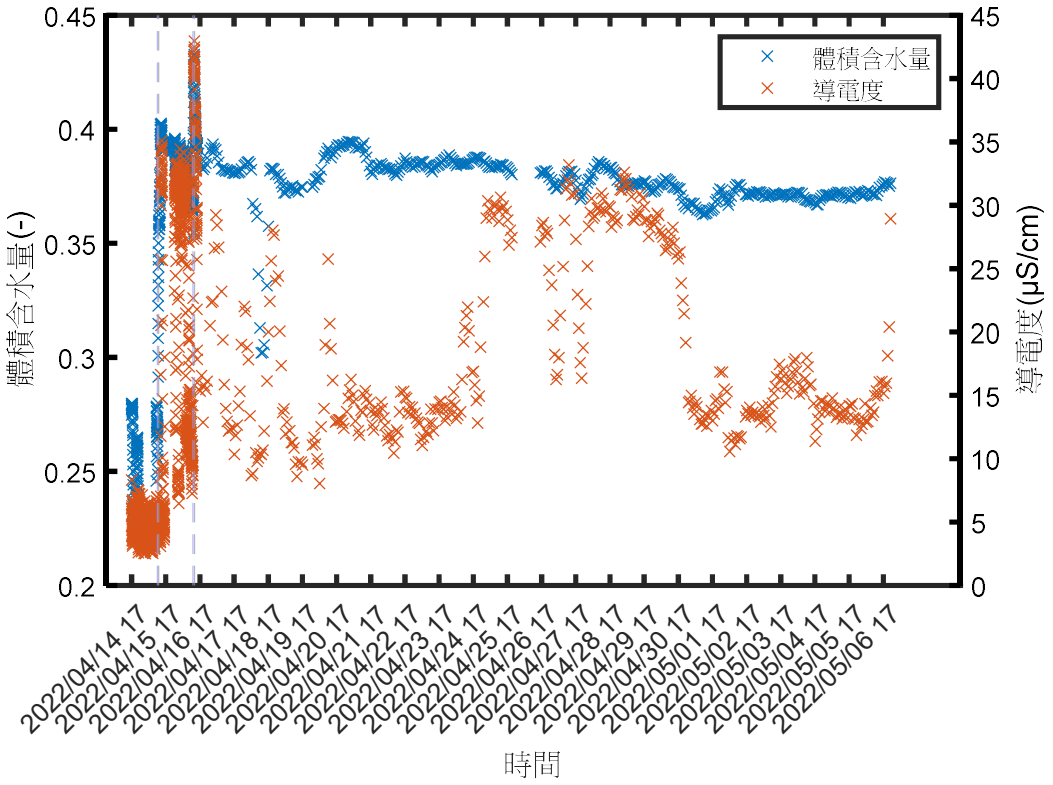


圖 2-110 M 感測器量測體積含水量與導電度

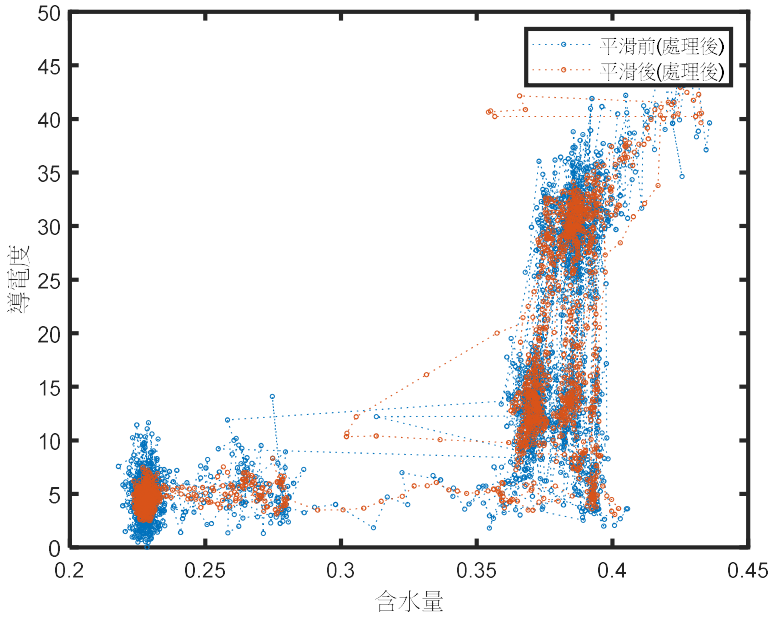


圖 2-111 M 感測器之體積含水量與導電度之關係圖

(資料不符之 Archie’ slaw 不進行回歸)

5. 第三組(自然高導電度組--240 μS/cm)測試成果

第三組除了三電極感測器的資料(圖 2-112)以外，其他的資料(圖 2-114、圖 2-117、圖 2-120、圖 2-122)都有使用 Matlab 的進行移動平均的處理。

在觀察三電極感測器(圖 2-112)與 S 舊式單側感測器(圖 180)的體積含水量與導電度之關係時，發現在初始濕潤時，依其線性回歸線呈現 S 形的波動。假設上述的 S 形的波動即為遲滯效應。在初始濕潤(即第一次降雨)的階段，與乾密度組 1.3 g/cm^3 進行比較，除了乾密度些許不同外，自然高導電度組平均降雨量比乾密度組 1.3 g/cm^3 組還來的緩和，並非 Chung et al.(2019)所提到的，可以在快速的乾濕循環可以看見較明顯的遲滯迴圈，初步推斷 S 形的波動並非 Chung et al.(2019)所提及的遲滯效應。此現象也許和乾密度組 1.3g/cm^3 的三電極感測器在最後乾燥導電度上升右下降的現象相似，但實際的發生機制不明。

M 小型感測器的資料(圖 2-123)仍處於較雜亂的現象，與乾密度組 1.3 g/cm^3 的 M 小型感測器相同，都是導電度的資料(圖 2-111、圖 2-123)較為雜亂，目前推測可能屬於實體結構上的問題。

由於 N1 與 N2 新式雙側感測器(圖 2-114、圖 2-117)的反射訊號偏低(圖 2-115、圖 2-118)，嘗試經過一系列的補救動作，而含水量的反射訊號先經過移動平均進行濾波，後來在給予空氣穩態值校正，空氣穩態值假定為-0.8，導電度的反射訊號是直接給予空氣導電度校正，空氣穩態值假定為-0.8。在導電度的部份的趨勢是正常的，但體積含水量的結果是雜亂的，目前

推測在於原始資料的雜訊較多，而自動化切線法對於雜訊極為敏感(圖 2-116、圖 2-119)，使得各個時間點的資料分析後的走時差彼此差距甚大，目前本研究持續需尋求其他方法校正。其初始輸出訊號偏低的問題目前可能是 TDR 電壓脈衝產生器給予的電壓不足，在實驗完成後進行確認。

表 2-17 實際物理參數

Precipitation per hour(mm/hr)[1]	71.64078293
Precipitation per hour(mm/hr)[2]	65.47394749
Conductivity for rainwater(μs/cm)[1]	169.7(29.5℃)
Conductivity for rainwater(μs/cm)[2]	246.8(29.3℃)
PH[1]	6.3
PH[2]	6.3
Dry density(g/cm^3)	1.327

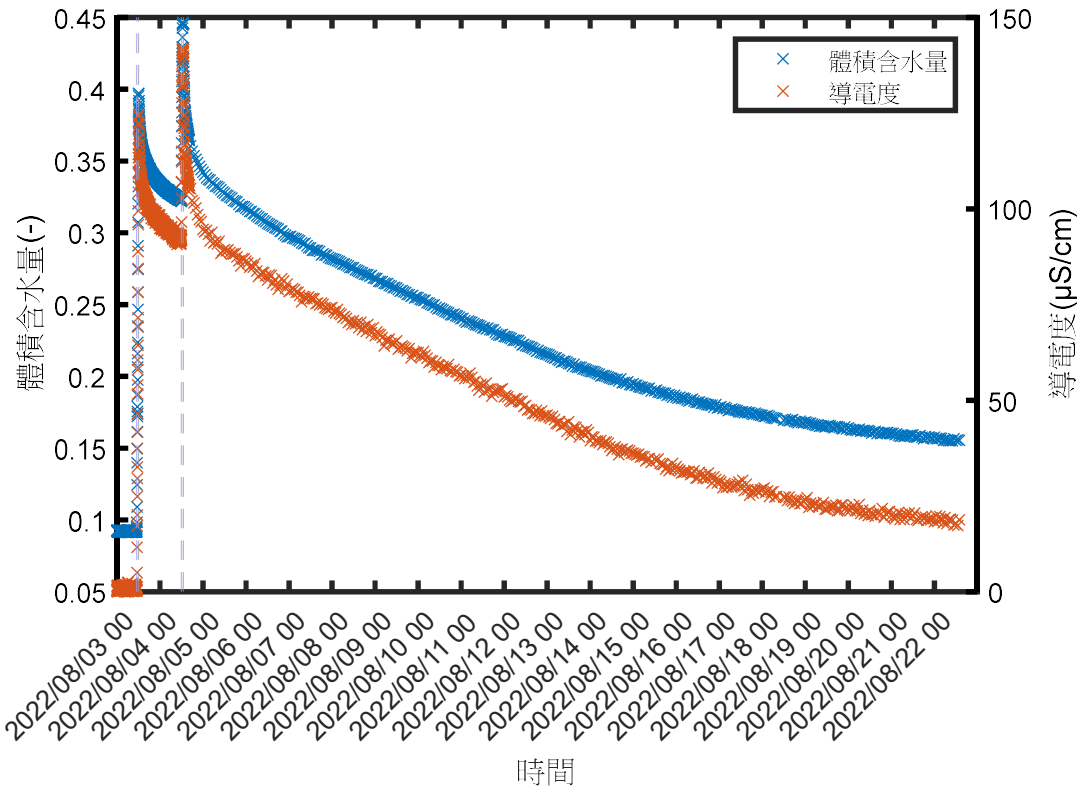


圖 2-112 3 電極感測器體積含水量與導電度歷時圖

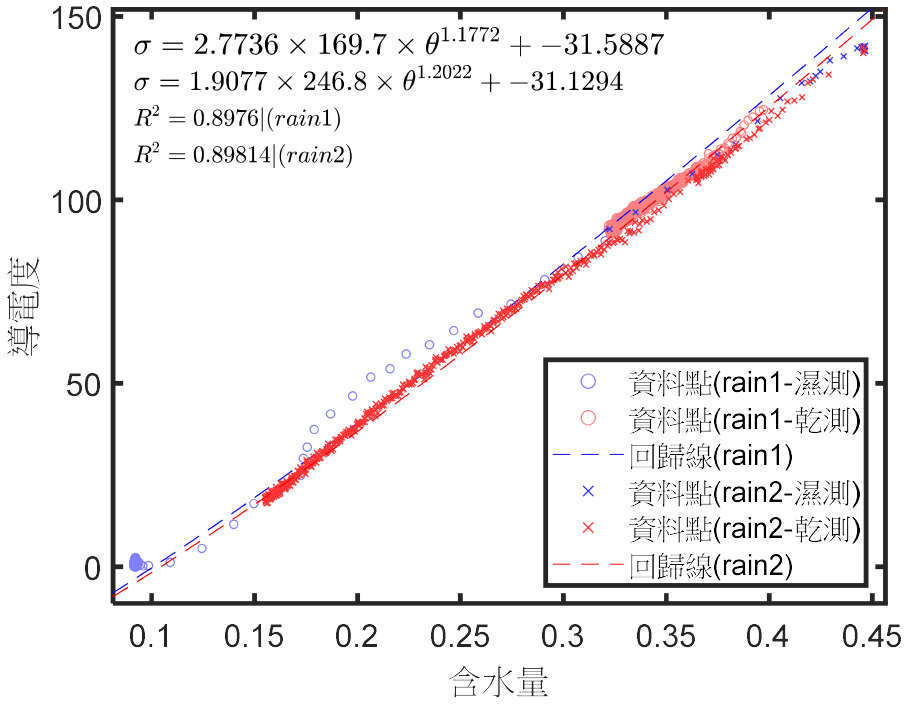


圖 2-113 3 電極感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearch 求解)

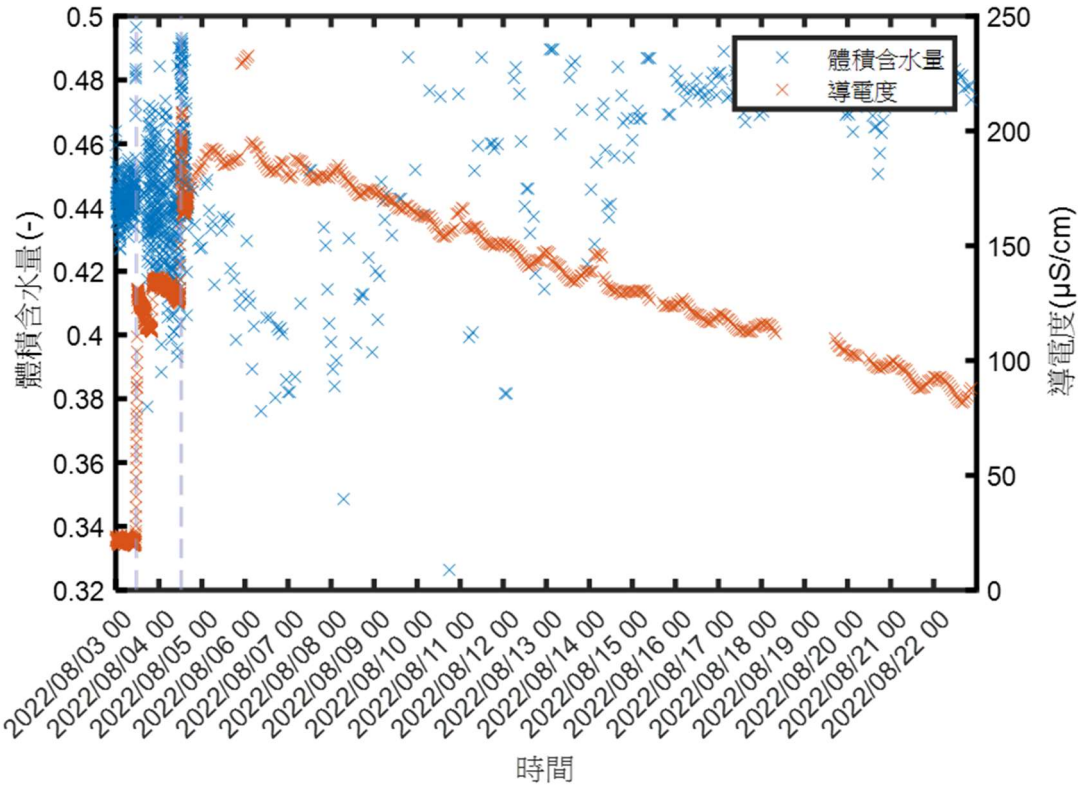


圖 2-114 N1 感測器體積含水量與導電度歷時圖

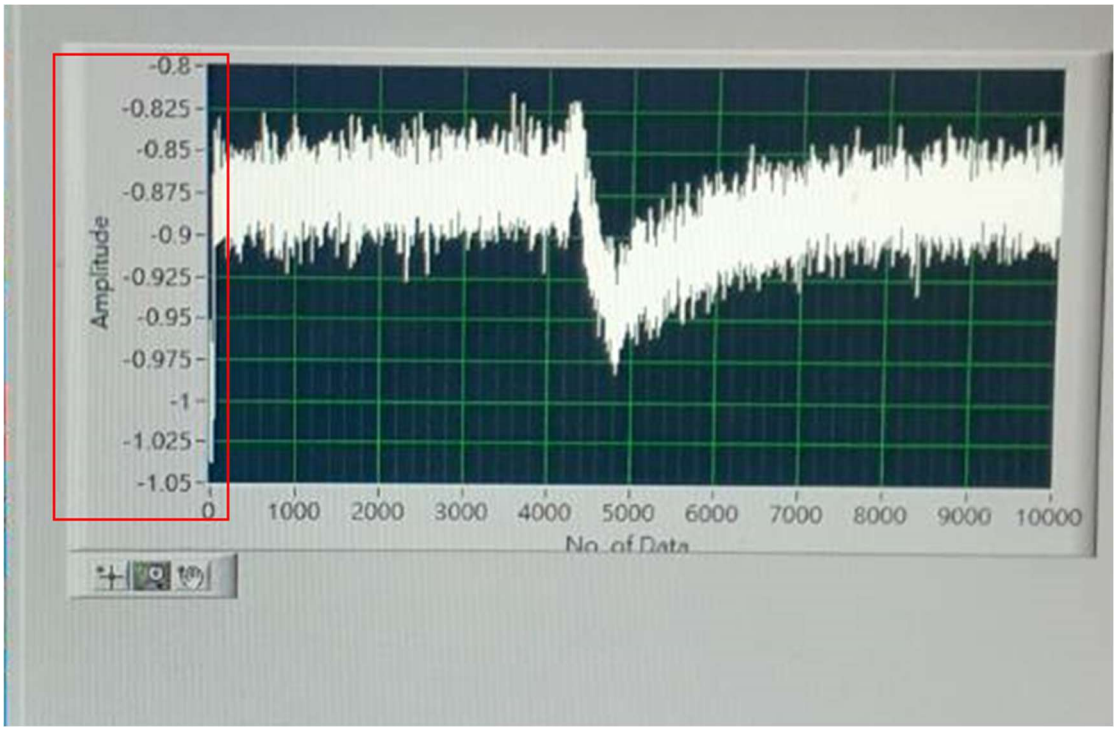


圖 2-115 N1 感測器反射訊號偏低

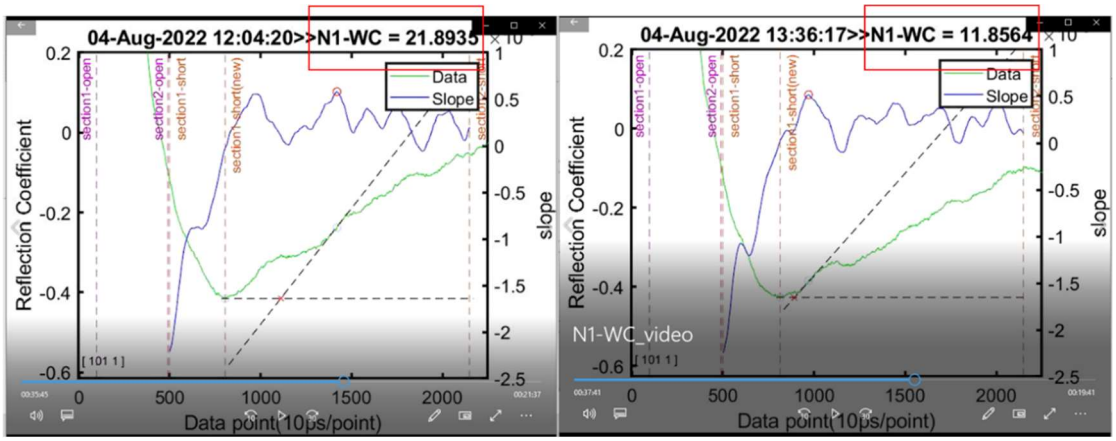


圖 2-116 N1 感測器相近時間資料的切線法(紅框為視介電常數)

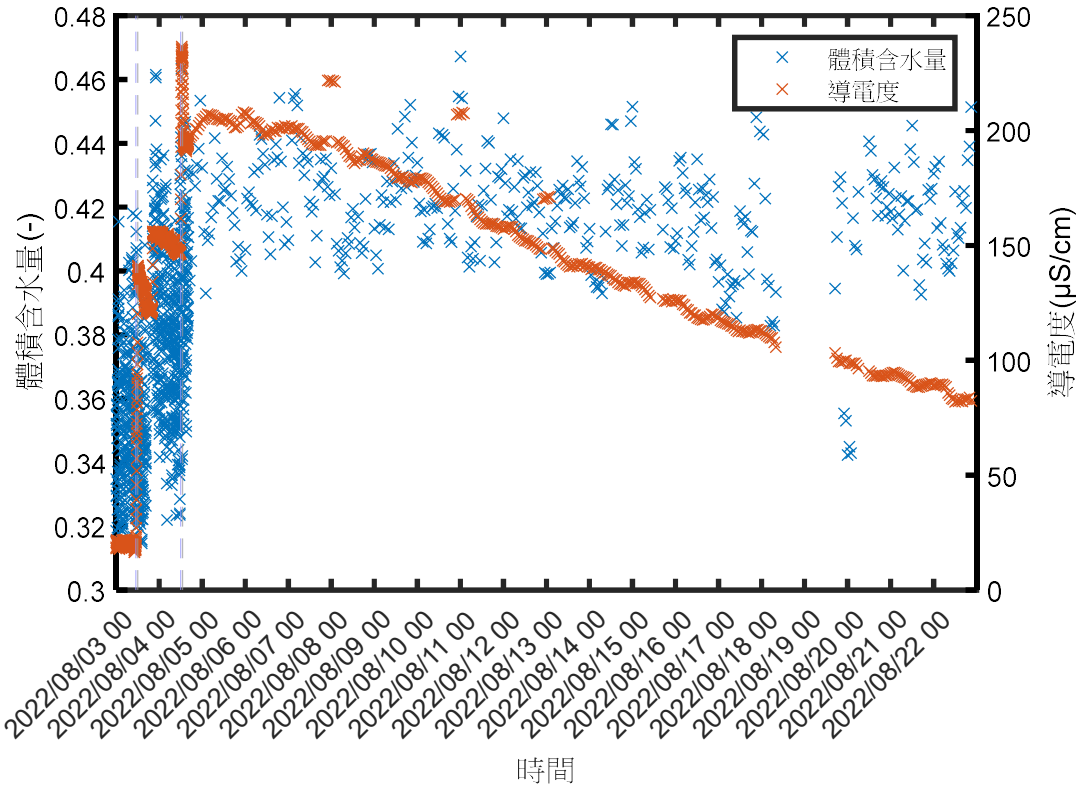


圖 2-117 N2 感測器體積含水量與導電度歷時圖

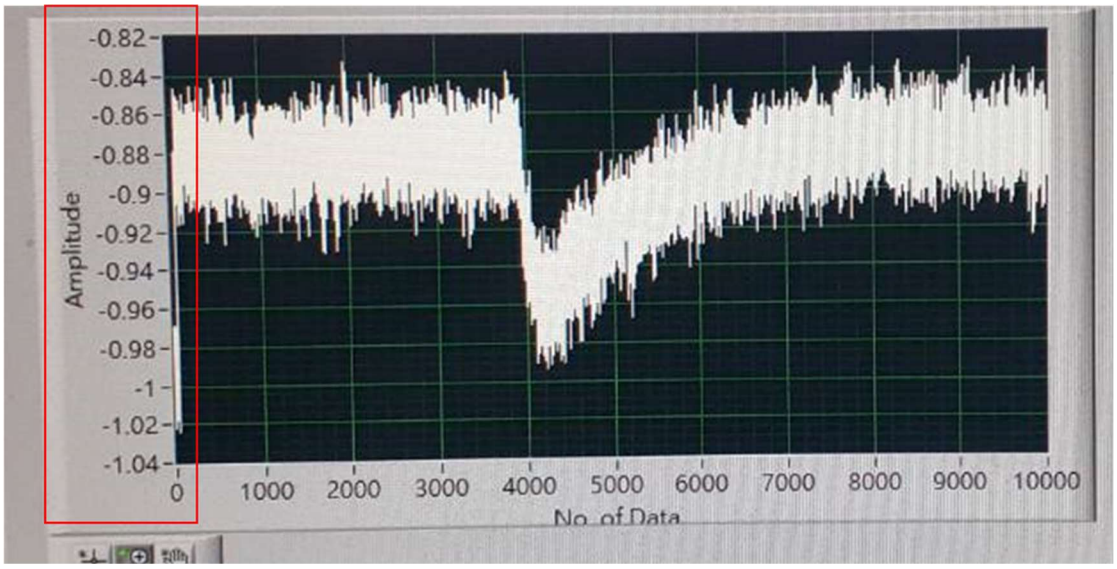


圖 2-118 N2 感測器反射訊號偏低

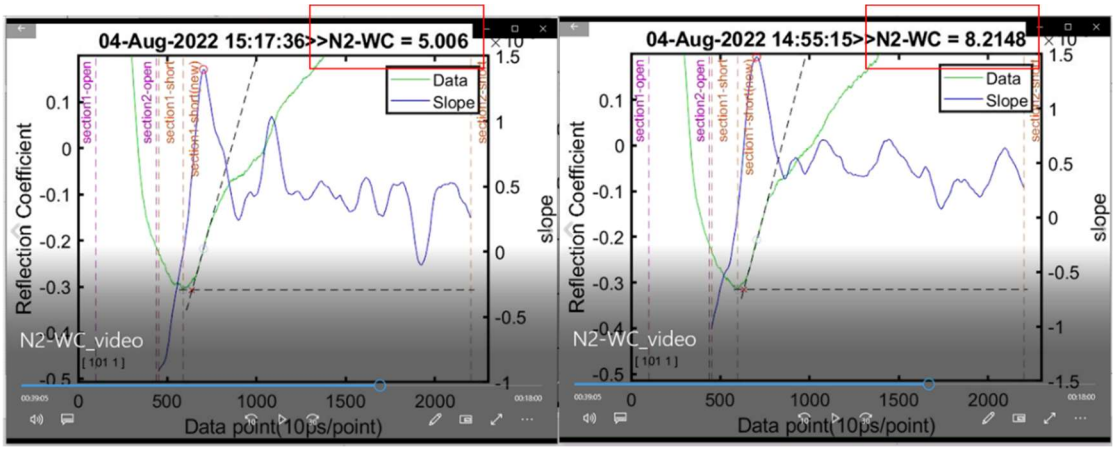


圖 2-119 N2 感測器相近時間資料的切線法(紅框為視介電常數)

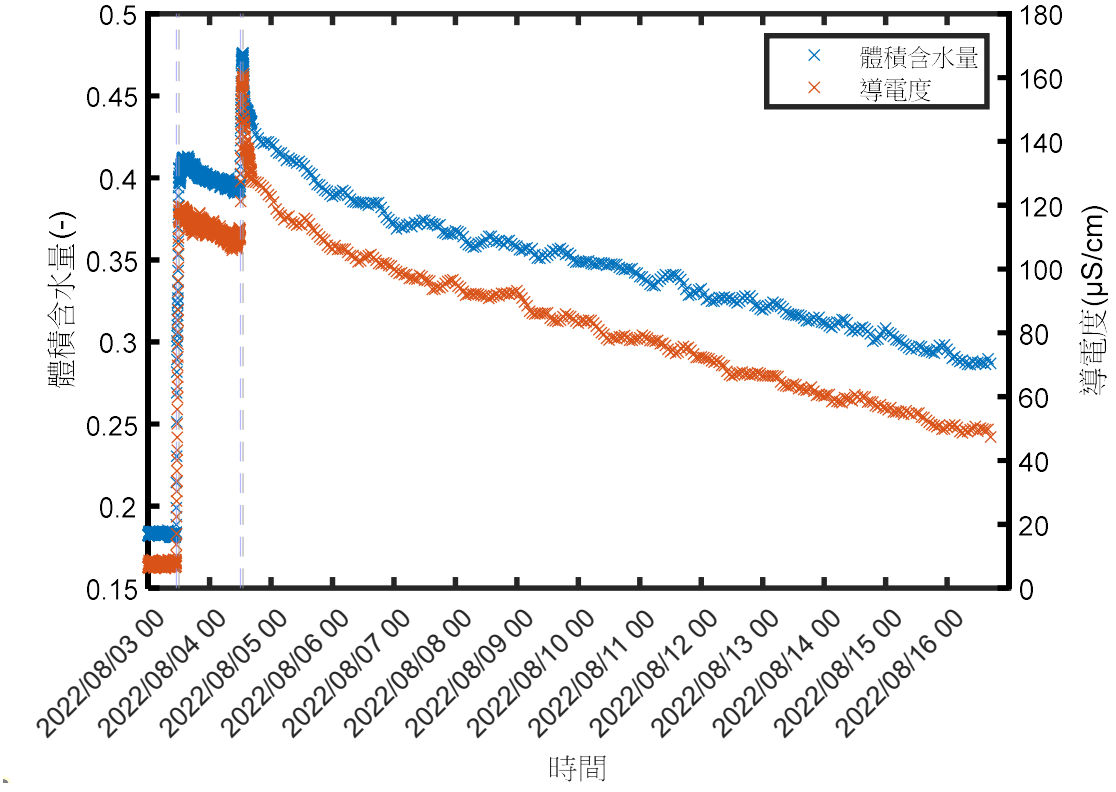


圖 2-120 S 感測器體積含水量與導電度歷時圖

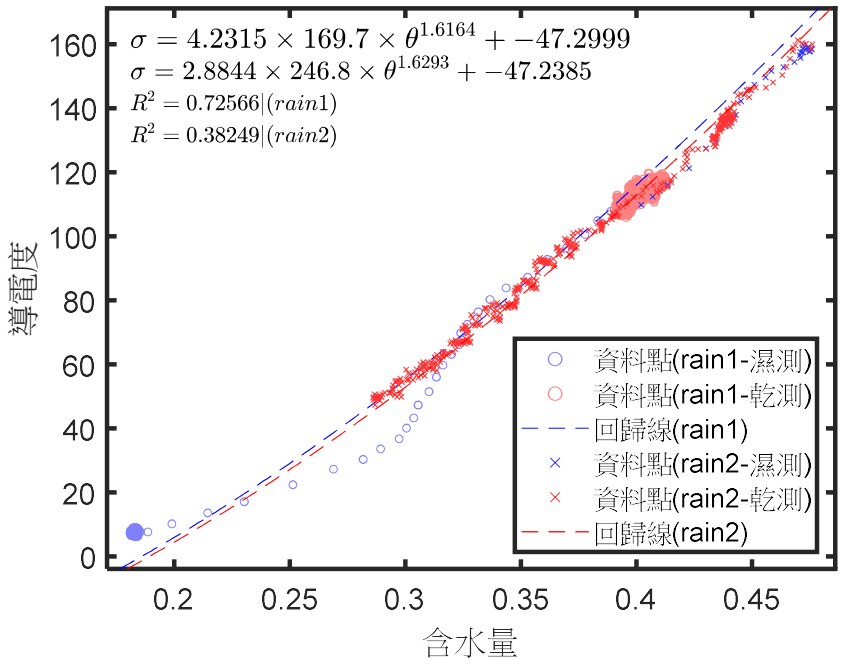


圖 2-121 S 感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸 (由 fminsearch 求解)

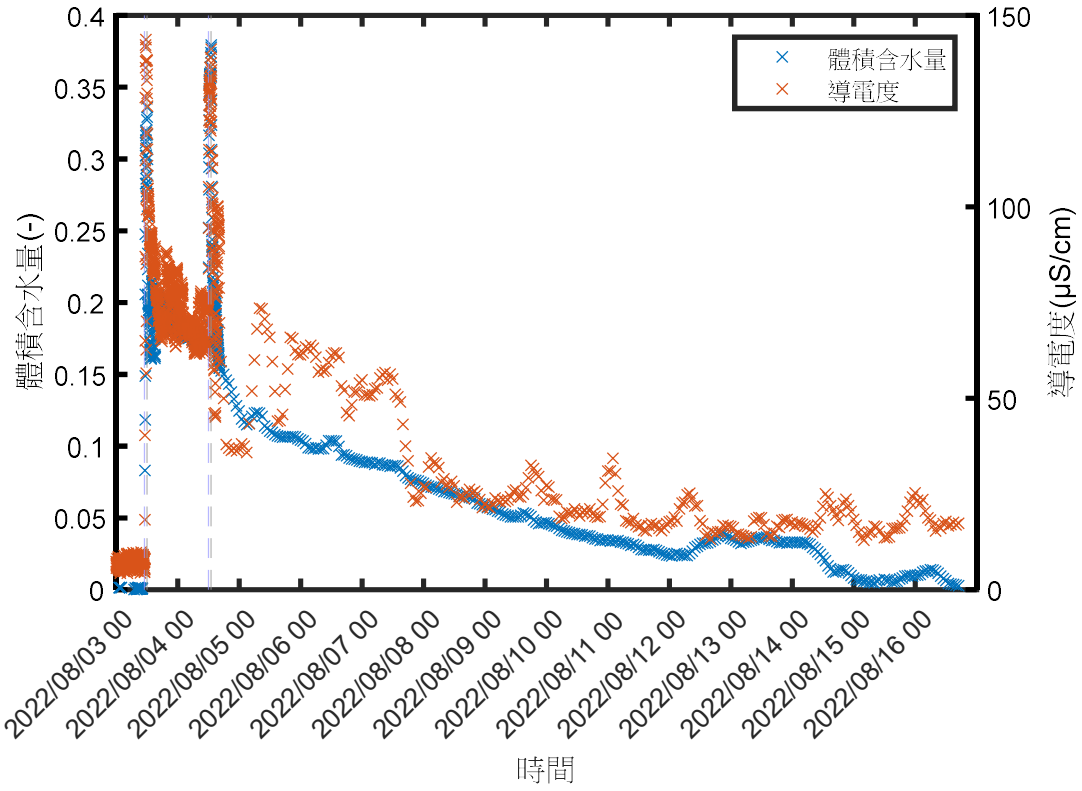


圖 2-122 M 感測器體積含水量與導電度歷時圖

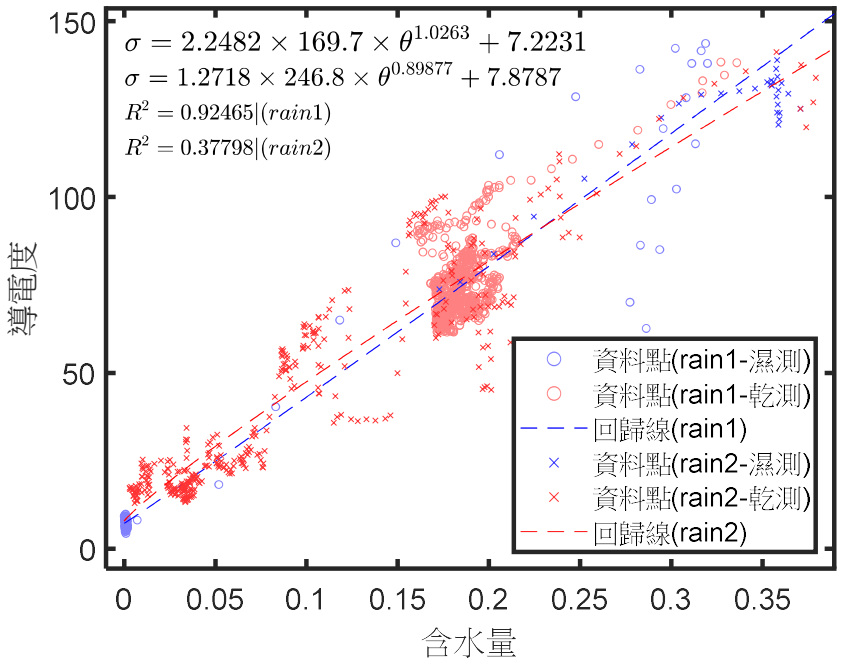


圖 2-123 M 感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearch 求解)

6. 第四組(高密度組--1.7 g/cm^3)測試成果

第四組除了三電極感測器的資料(圖 2-129)以外，其他的資料(圖 2-131、圖 2-134、圖 2-137、圖 2-140)都有使用 Matlab 進行移動平均的處理。

在實驗開始前，除了小型感測器 M，各感測器都觀察到反射訊號有一個類似 Sin 波震盪(如圖 2-124、圖 2-132、圖 2-135、圖 2-138)，經由三電極感測器的高密度組(1.7 g/cm^3)反射訊號與乾密度組(1.3 g/cm^3)反射訊號進行比對，發現在 2x10^8 Hz 至 4x10^8 Hz 與 7x10^8 Hz 至 1x10^9 Hz 之間的頻率乾密度組相對於高密度組有明顯的差別，此頻寬(Bandwidth)的強度高密度組高於乾密度組(如圖 2-125)。因此，本研究使用 Matlab 的帶通濾波(Band pass filter)來去除特定頻寬，並調整帶通濾波去除頻寬

的範圍來找出合適且各感測器通用的頻寬，結果為去除 7.8×10^8 Hz 至之間 1.2×10^9 Hz 與 2×10^8 Hz 至之間 4×10^8 Hz 的頻率之訊號，如圖 2-126、圖 2-127 與圖 2-128 所示。

除了三電極感測器的資料之外，其他的資料顯得有較多的雜訊。在觀察三電極感測器的體積含水量與導電度之關係圖(圖 2-130)，發現到明顯的遲滯迴圈，本實驗高密度組(1.7 g/cm^3)與乾密度組(1.3 g/cm^3)進行比較，其濕潤期與乾燥期水在孔隙中的分佈高密度組明顯不同於乾密度組，並且，濕潤期的回歸線斜率大於乾燥期回歸線斜率，假設降雨時(濕潤期)水的入滲速度，即體積含水量的變化率高於(乾燥期)的自然乾燥速度，與 Chung et al.(2019)的結論吻合。

而新式雙側感測器 N1 與 N2 的體積含水量與導電度之關係圖(圖 2-133)其變化路徑為螺旋形，與小型雙側感測器 M 的變化路徑過於雜亂，其成因不明。而舊式單側感測器 S 的兩次降雨後其回歸的斜率明顯不同，第一次降雨的回歸斜率大於第二次降雨的斜率，可能在這二次降雨之後，在舊式單側感測器 S 的感測範圍內水在孔隙中的分佈發生變化，在自然乾燥的最後其乾燥路徑逐漸回歸到第一次降雨的回歸線趨勢上。

表 2-18 實際物理參數

Precipitation per hour(mm/hr)[1]	71.54364248
Precipitation per hour(mm/hr)[2]	73.70848488
Conductivity for rainwater(μs/cm)[1]	159.5(24.7℃)
Conductivity for rainwater(μs/cm)[2]	156(23.7℃)
PH[1]	6.6
PH[2]	6.8
Dry density(g/cm^3)	1.703

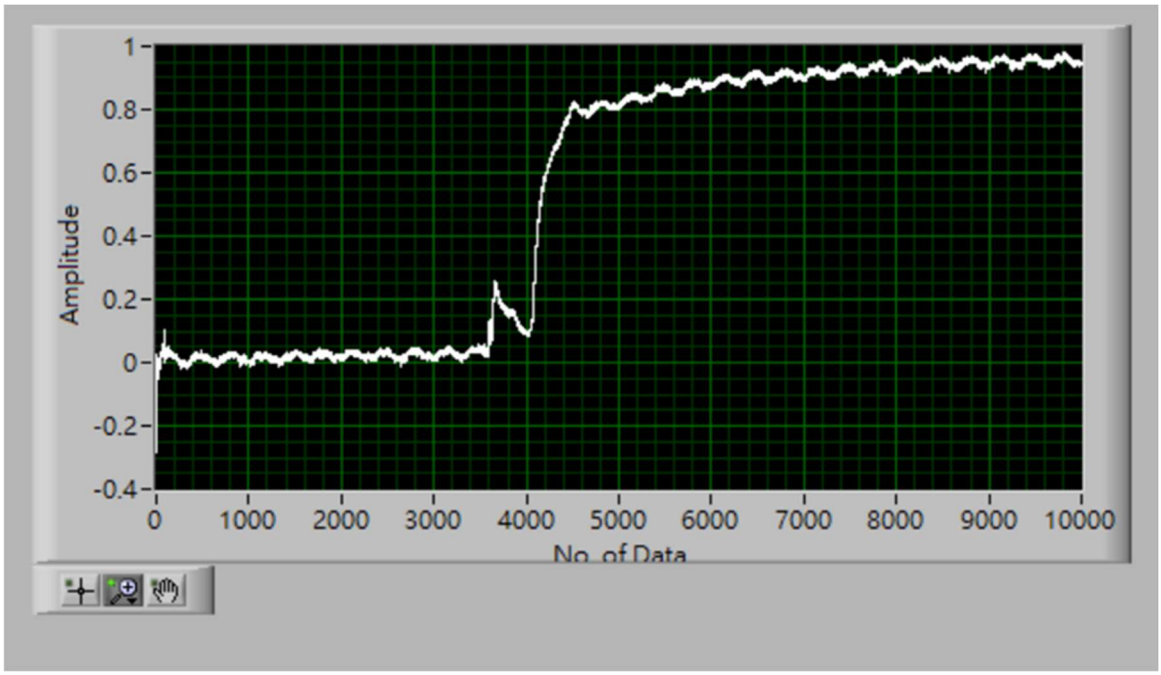


圖 2-124 3 電極感測器雜訊圖

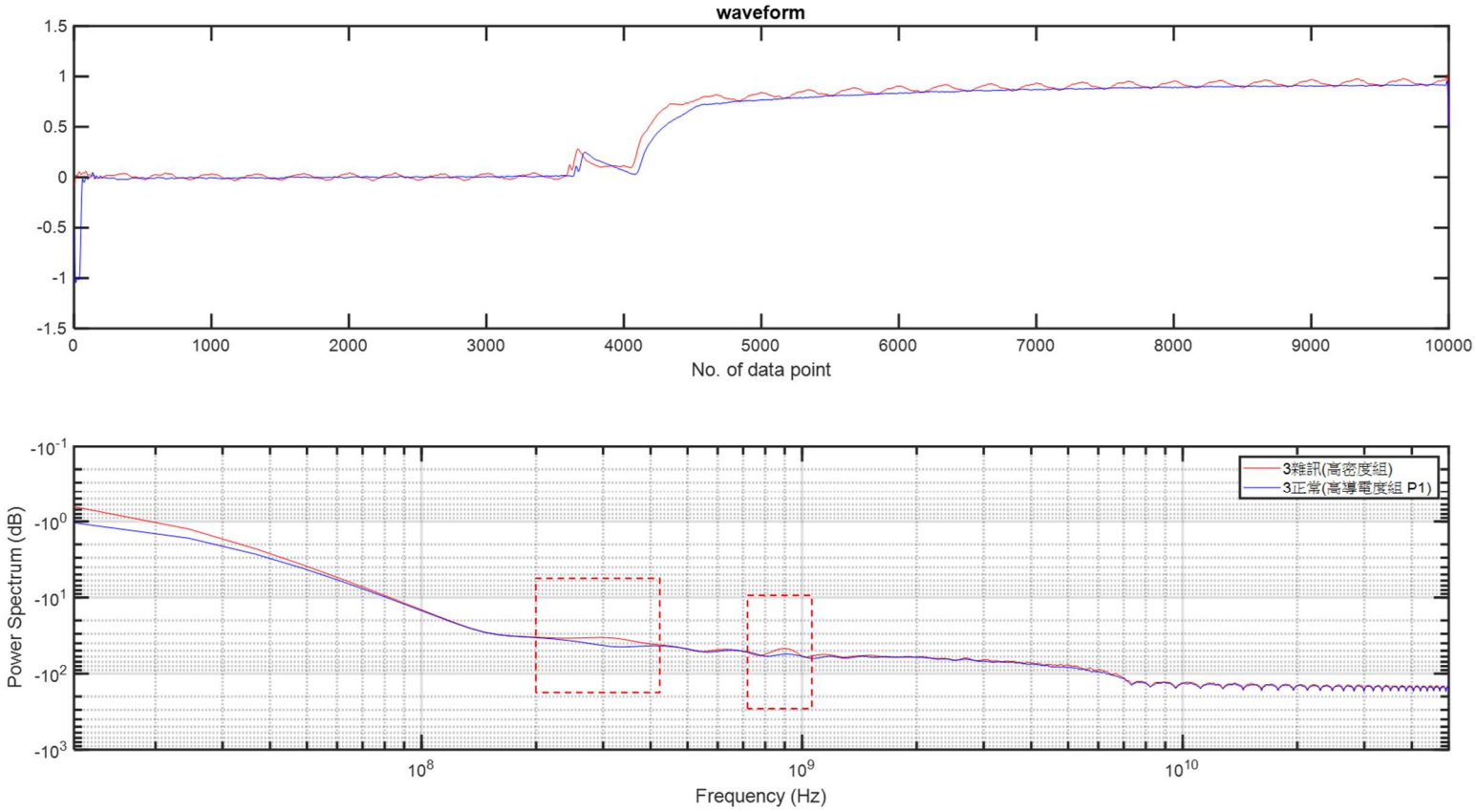


圖 2-125 3 電極感測器藉由含雜訊訊號與不含雜訊訊號對比出雜訊頻率

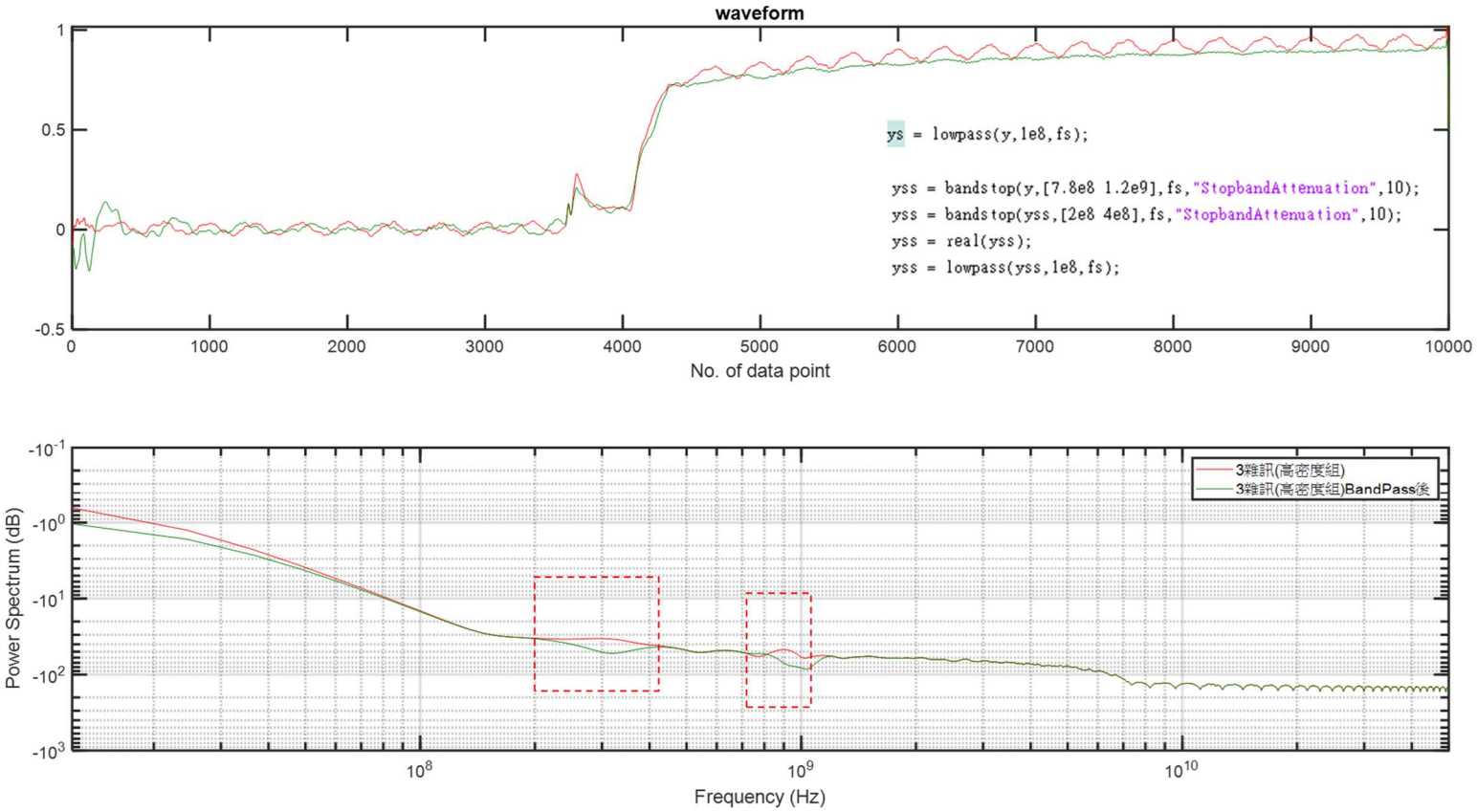


圖 2-126 3 電極感測器含雜訊訊號(y)與率掉雜訊頻率訊號(ys)對比圖(右上角為程式碼)

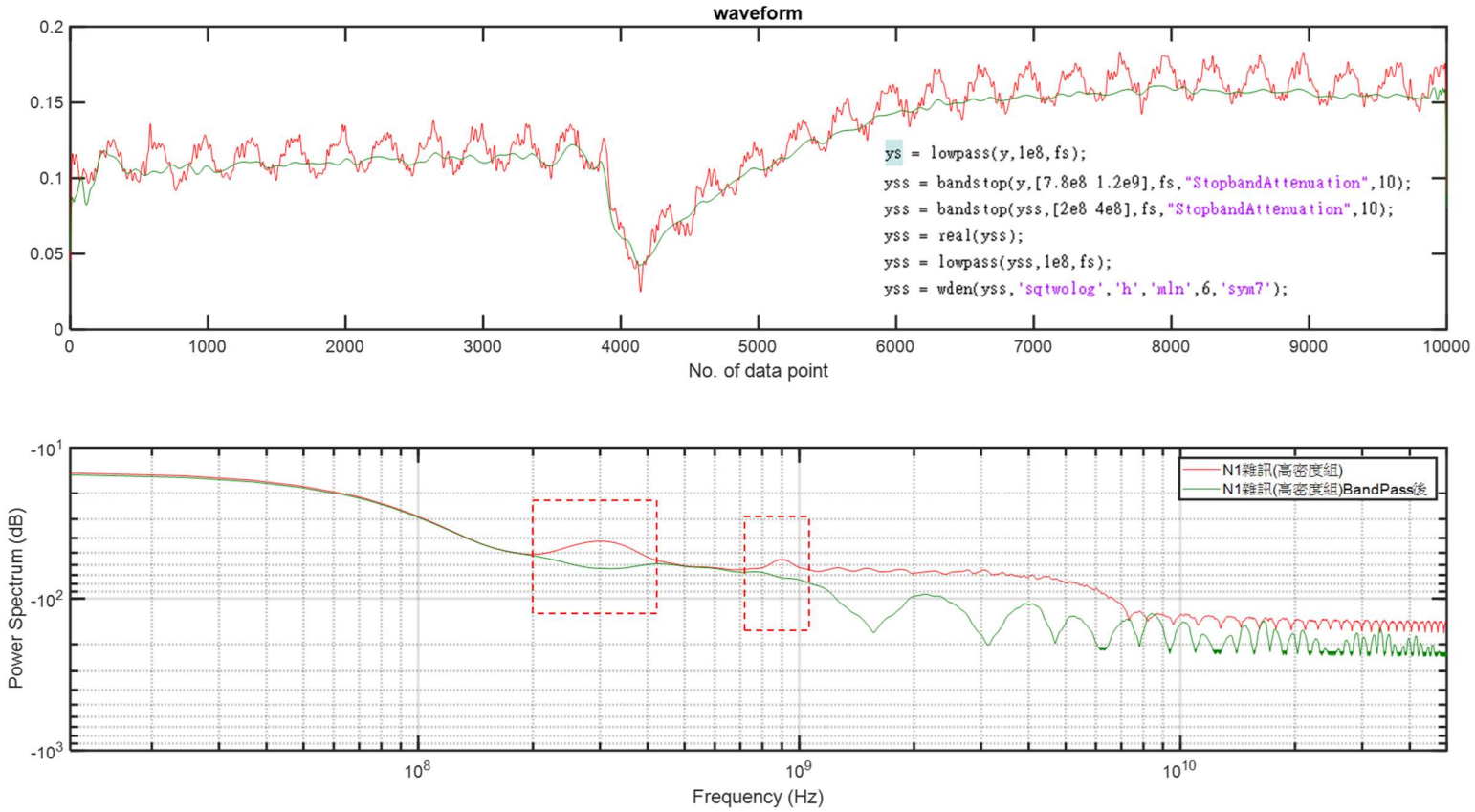


圖 2-127 N1 感測器含雜訊訊號(y)與率掉雜訊頻率訊號(ys)對比圖(右上角為程式碼)

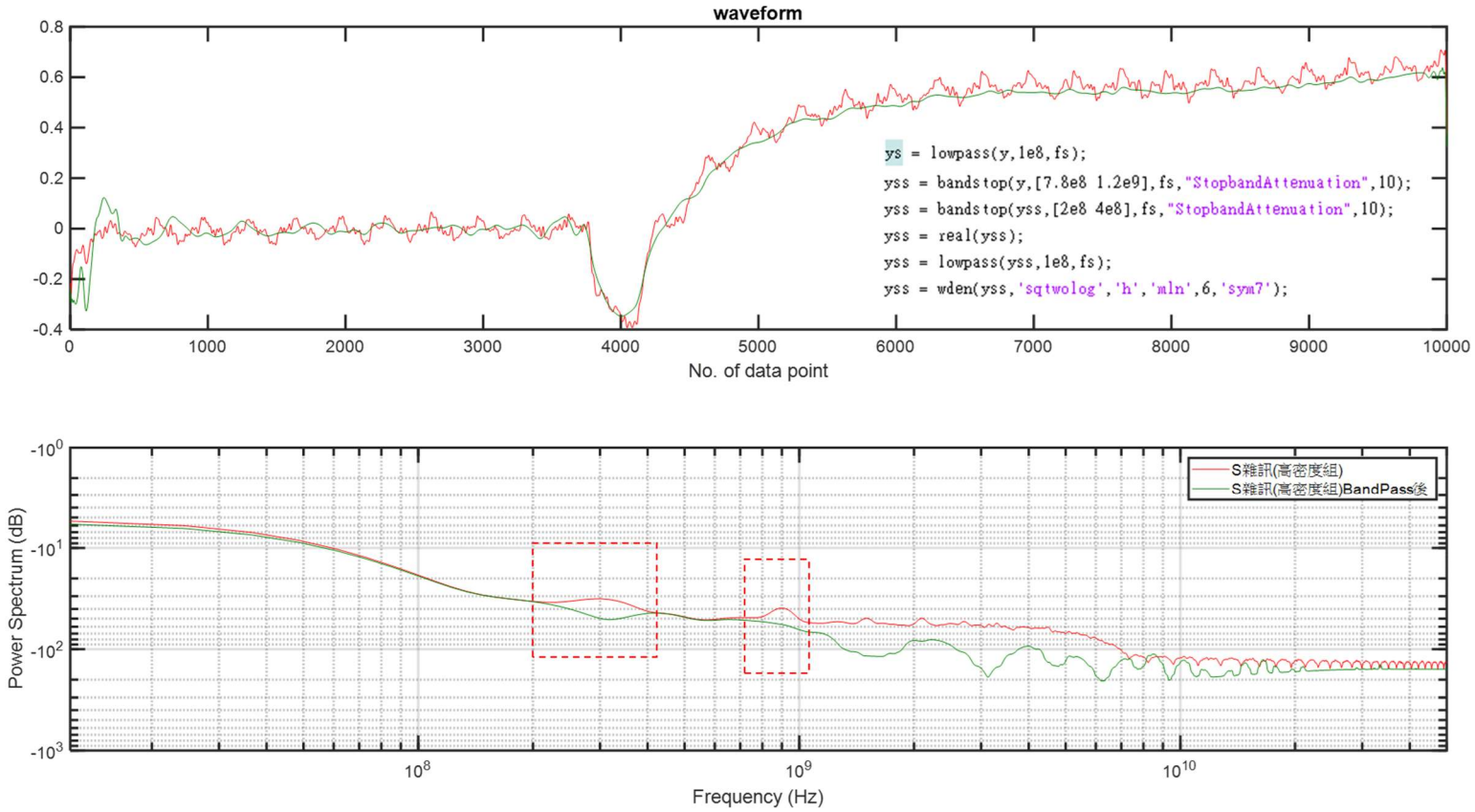


圖 2-128 S 感測器含雜訊訊號(y)與率掉雜訊頻率訊號(ys)對比圖(右上角為程式碼)

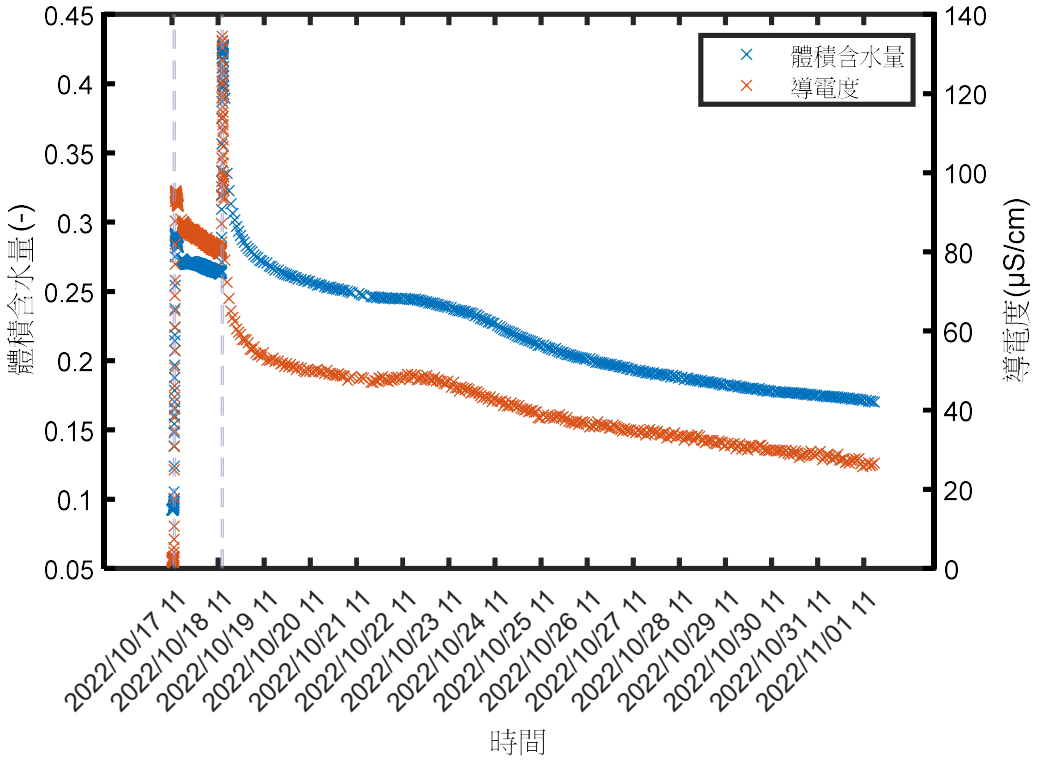


圖 2-129 3 電極感測器體積含水量與導電度歷時圖

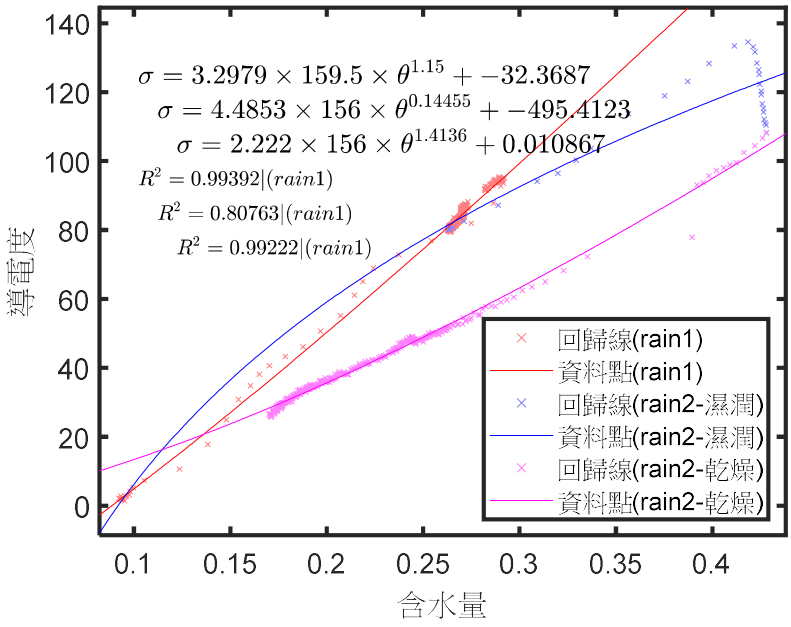


圖 2-130 3 電極感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearchband 求解)

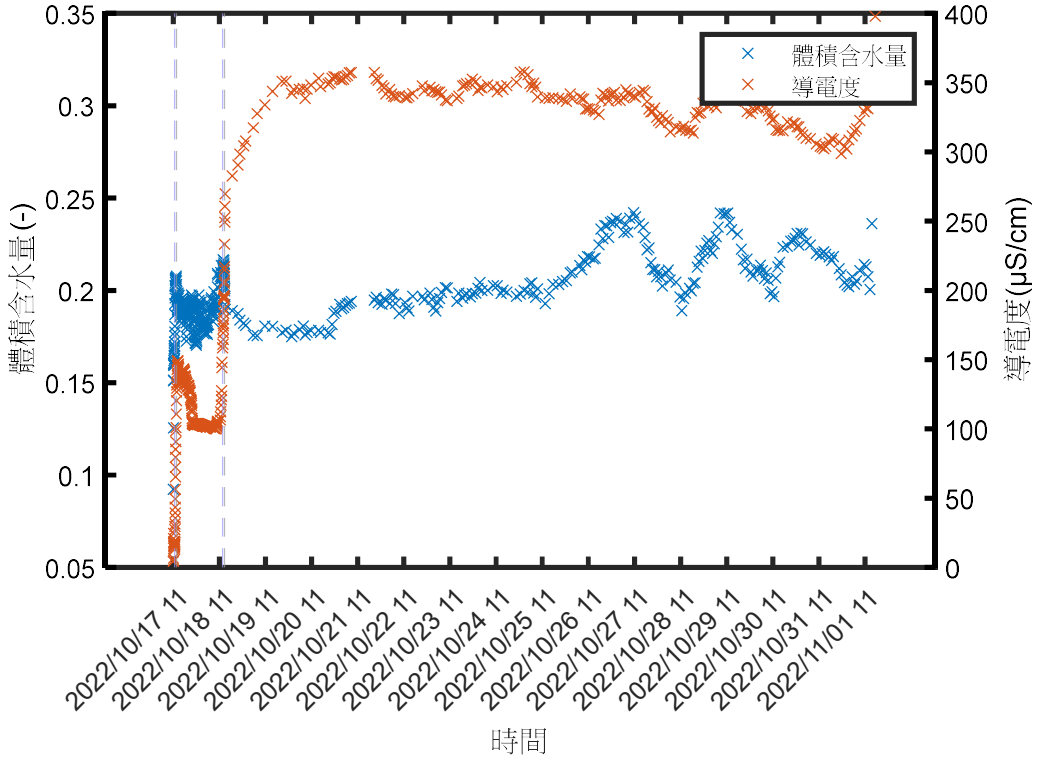


圖 2-131 N1 感測器體積含水量與導電度歷時圖

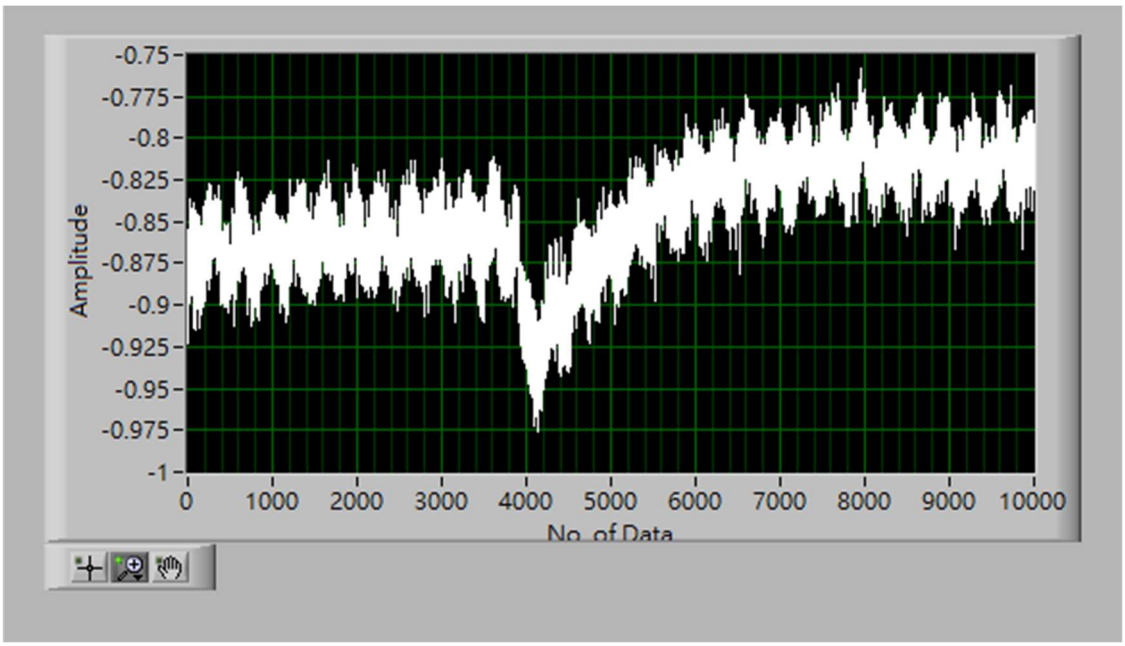


圖 2-132 N1 感測器雜訊圖

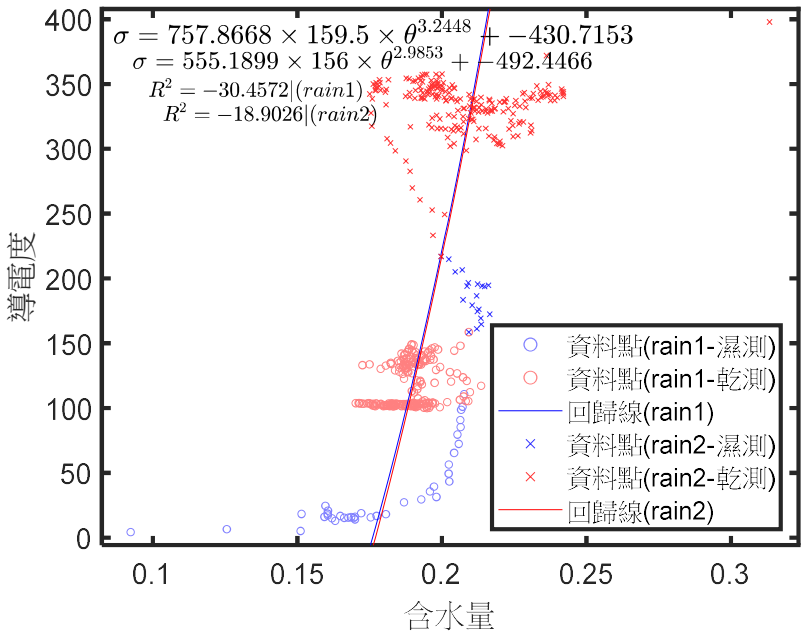


圖 2-133 N1 感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearch 求解)

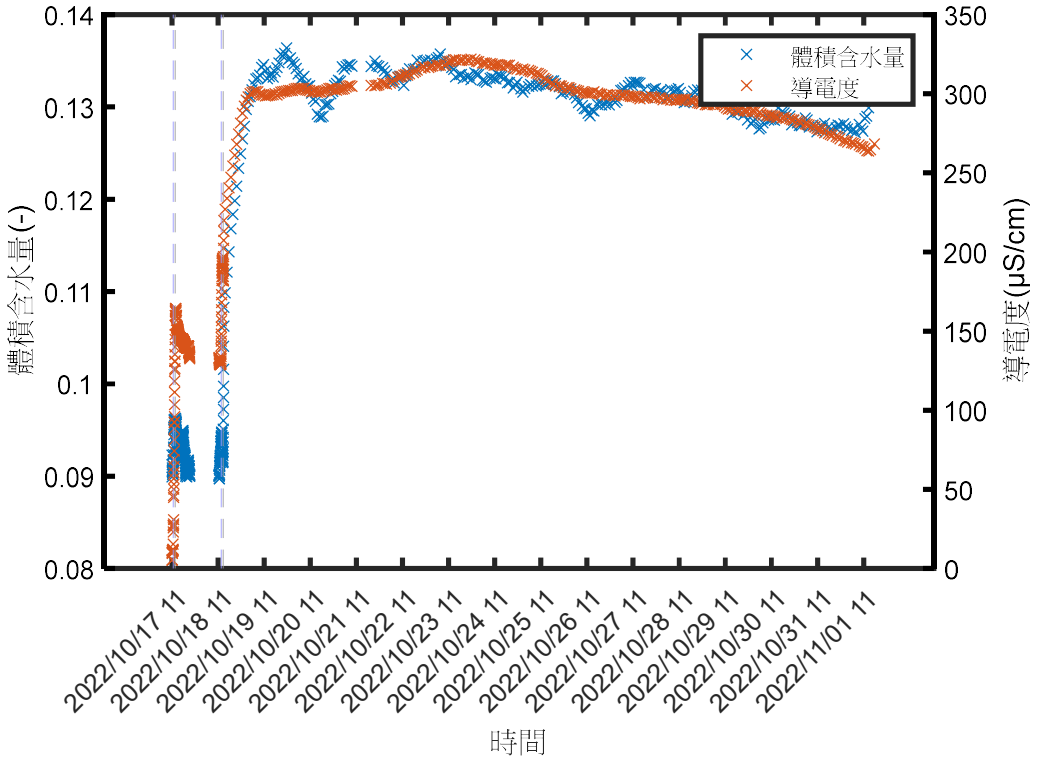


圖 2-134 N2 感測器體積含水量與導電度歷時圖

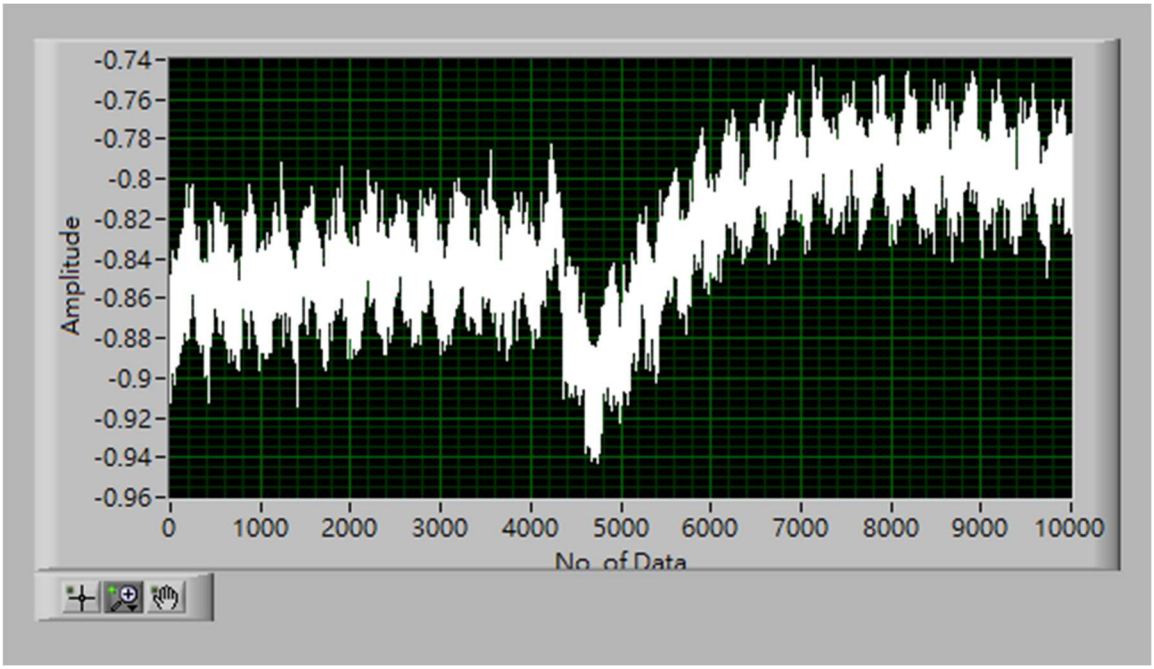


圖 2-135 N2 感測器雜訊圖

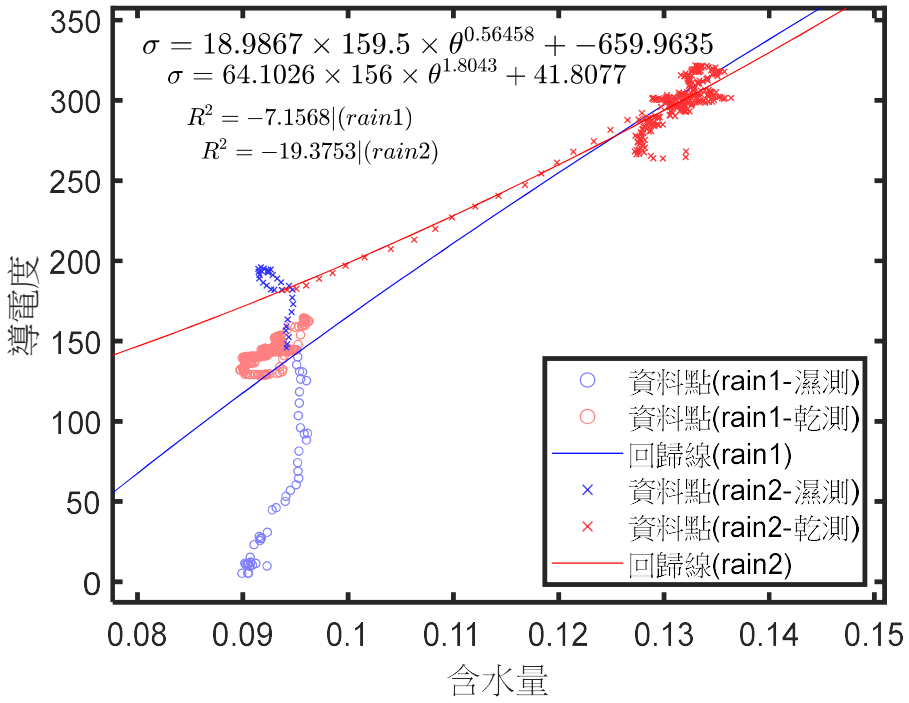


圖 2-136 N2 感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearch 求解)

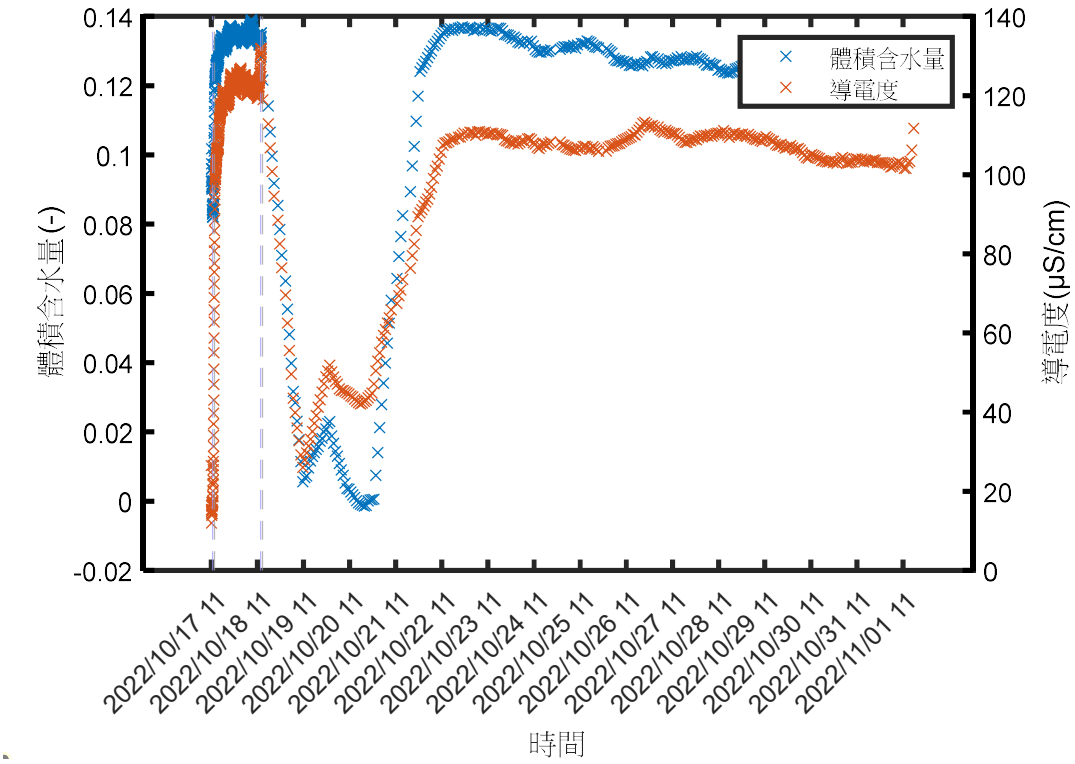


圖 2-137 S 感測器體積含水量與導電度歷時圖

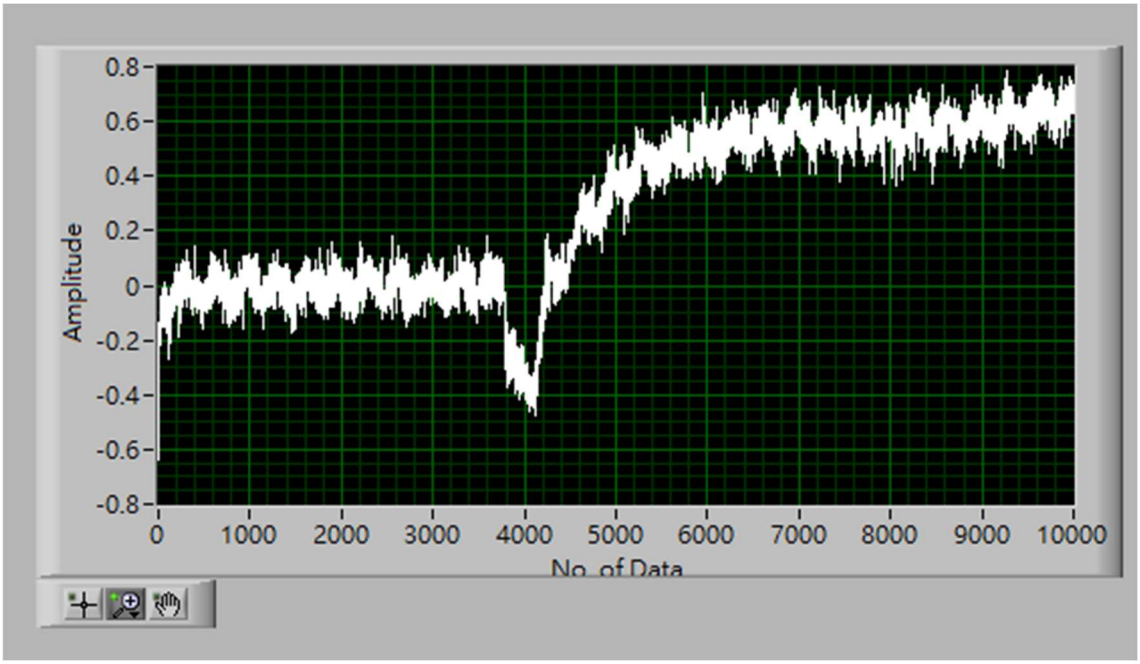


圖 2-138 S 感測器雜訊圖

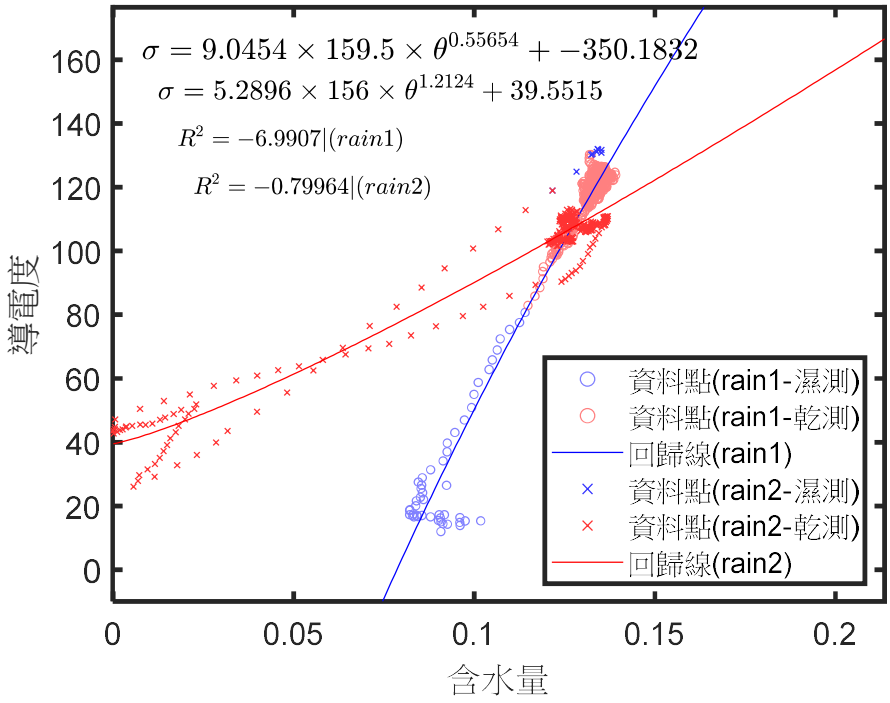


圖 2-139 S 感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearch 求解)

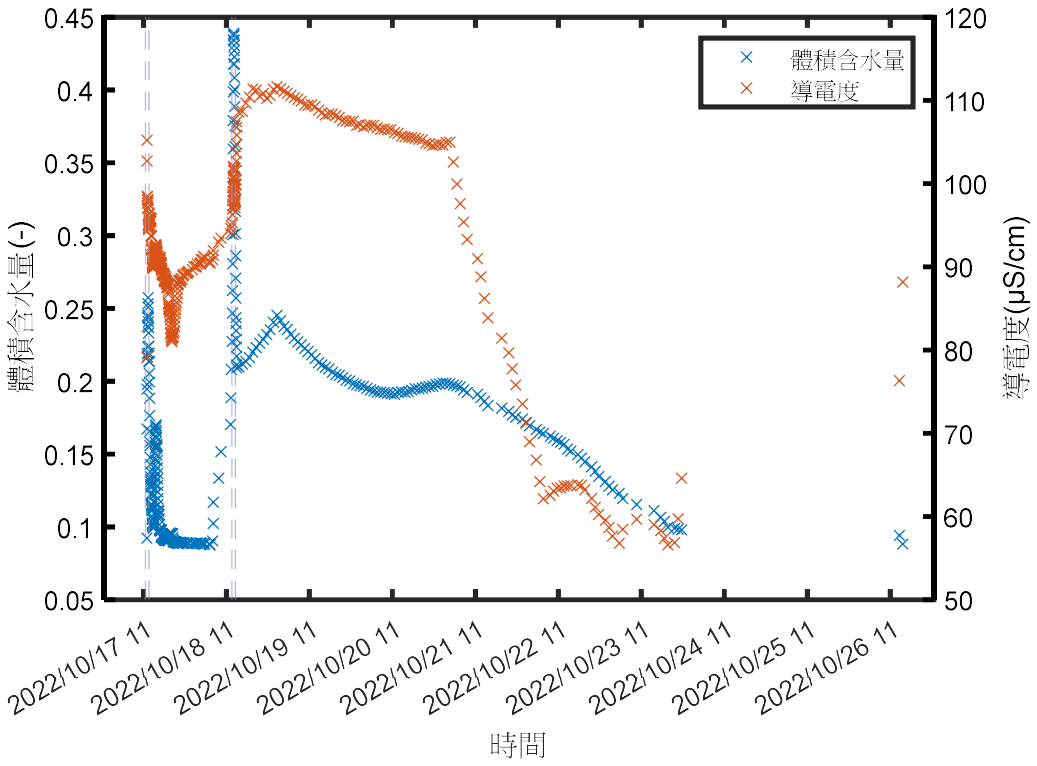


圖 2-140 M 感測器體積含水量與導電度歷時圖

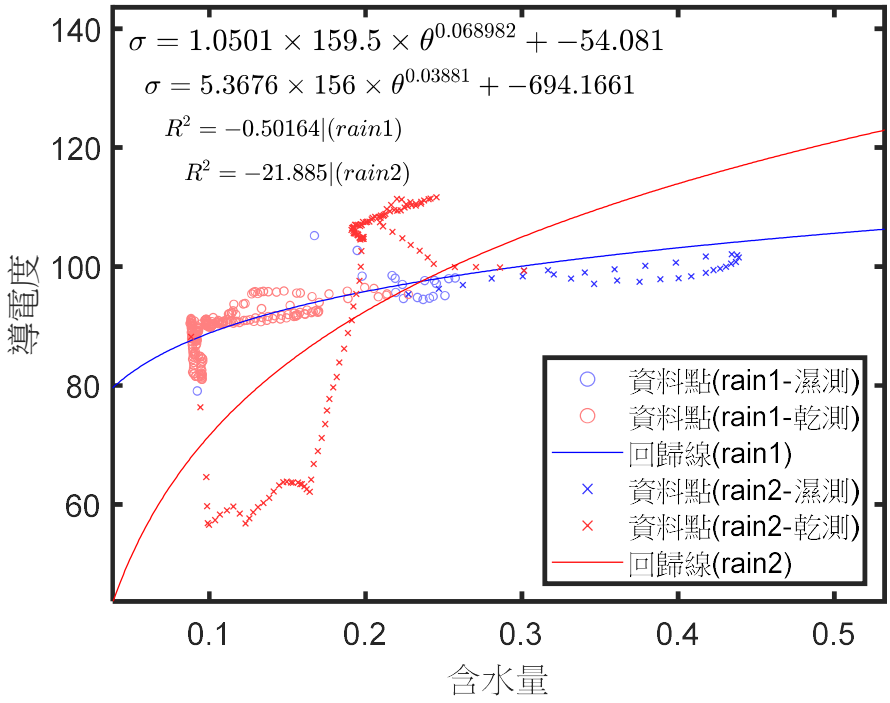


圖 2-141 M 感測器體積含水量與導電度之 Archie’s law 加常數項回歸(由 fminsearch 求解)

7. 第五組(酸雨組—pH = 5)測試成果

第四組除了三電極感測器的資料(圖 2-148)以外，其他的資料(圖 2-150、圖 2-152、圖 2-154、圖 2-156)都有使用 Matlab 進行移動平均的處理。

在實驗開始前，在 S 感測器觀察到反射訊號有一個類似 Sin 波震盪(如圖 2-144)，經由 S 感測器的原始訊號與 4 個訊號加總平均的訊號對比，發現在 2×10^8 Hz 至 4×10^8 Hz、0.8×10^8 Hz 至 1×10^9 Hz、1.4×10^9 Hz 至 1.6×10^9 Hz 與 2×10^9 Hz 至 2.2×10^9 Hz 之間的頻率有些許區別，之後經由濾掉此頻寬的波形加上低通濾波濾掉低於 10^8 Hz 的波形，以及使用小波濾波，獲得明顯無雜訊的波形(圖 2-147)。因此，使用帶通濾波去除 2×10^8 Hz 至 4×10^8 Hz、0.8×10^8 Hz 至 1×10^9 Hz、1.4×10^9

Hz 至 1.6×10^9 Hz 與 2×10^9 Hz 至 2.2×10^9 Hz 之間的頻率之訊號。

由於 N1 與 N2 新式雙側感測器(圖 2-142)的反射訊號偏低(圖 2-143)如上一組實驗，之後對於含水量的反射訊號給予空氣穩態值校正，空氣穩態值假定為-0.9(N1) 與 -0.975(N2)；導電度的反射訊號也給予空氣導電度校正，空氣穩態值假定為-0.9(N1) 與 -0.975(N2)。

除了三電極感測器的資料之外，其他的資料顯得有較多的雜訊。在觀察三電極感測器的體積含水量與導電度之關係圖(圖 2 130)，與乾密度組(1.3 g/cm^3)相比，發現到明顯的遲滯迴圈，但二次迴圈的發生原因不明，但依據文獻孔係水分佈應不同於乾密度組，需要更多組實驗來證明較低的 pH 能誘發遲滯效應，並且需考慮誘發遲滯效應之原因，是因為孔係水分佈或者是其他原因。

而新式雙側感測器 N2(圖 2-152)與舊式單側感測器 S(圖 2-155)的體積含水量與導電度之關係圖其變化路徑左右顛倒的 L 型。並且新式雙側感測器 N1(圖 2-151)與小型雙側感測器 M(圖 2-157)的變化路徑過於雜亂，是由於訊號品質不佳。

表 2-19 實際物理參數

Precipitation per hour(mm/hr)[1]	68.31492966
Precipitation per hour(mm/hr)[2]	65.64424189
Conductivity for rainwater(μs/cm)[1]	168.6(20.6℃)
Conductivity for rainwater(μs/cm)[2]	161.4(19.7℃)
PH[1]	5.1
PH[2]	4.9
Dry density(g/cm^3)	1.34

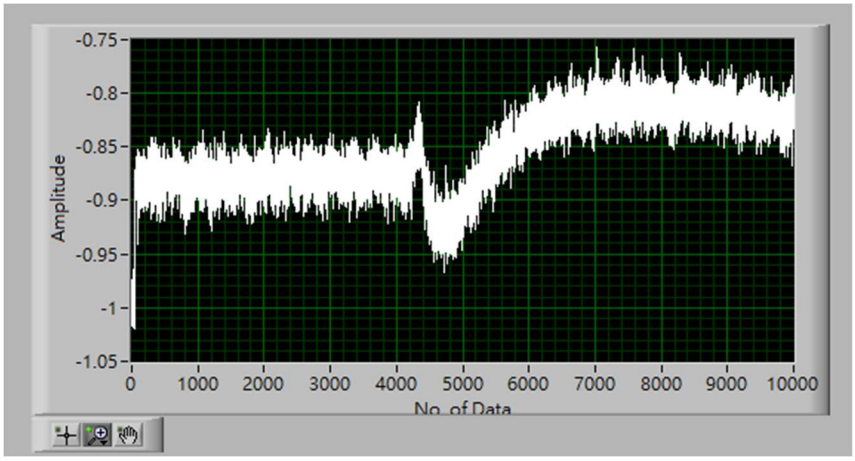


圖 2-142 N1 感測器雜訊圖

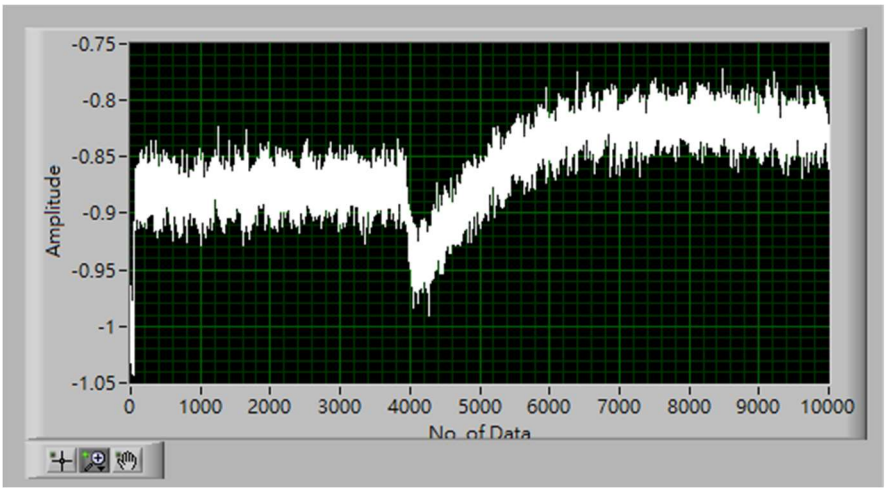


圖 2-143 N2 感測器雜訊圖

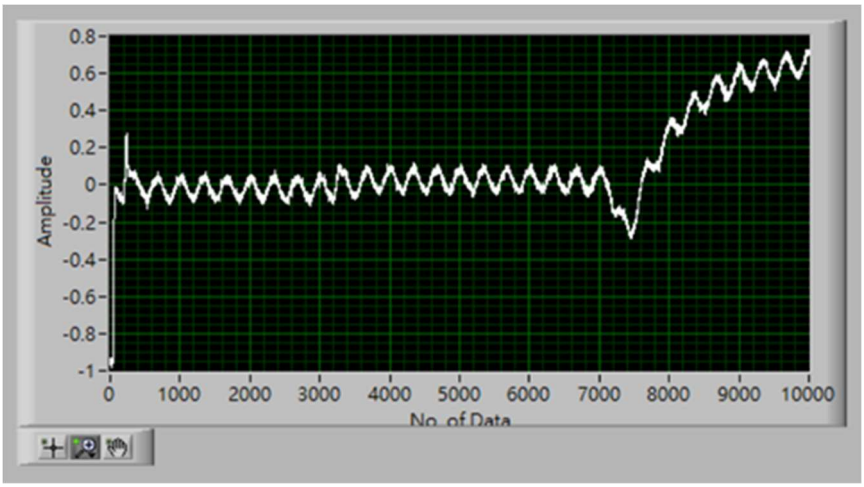
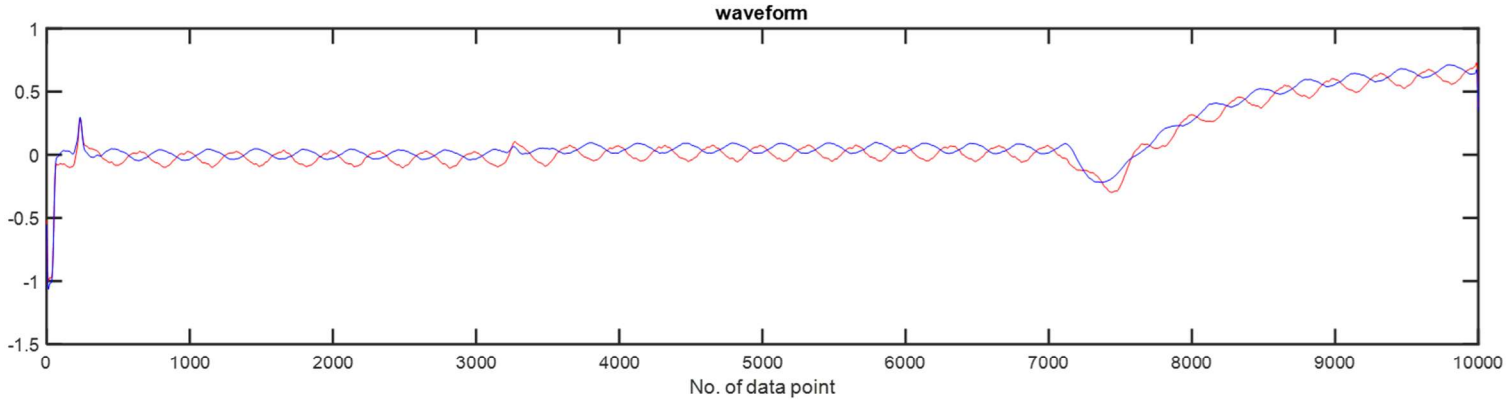


圖 2-144 S 感測器雜訊圖




```
yss = bandstop(y,[2e8 4e8],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = bandstop(yss,[0.8e9 1e9],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = bandstop(yss,[1.4e9 1.6e9],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = bandstop(yss,[2e9 2.2e9],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = real(yss);
yss = lowpass(yss,1e8,fs);
yss = wden(yss,'sqtwolog','h','mln',6,'sym7');
```

圖 2-145 S 感測器的原始訊號與 4 個訊號對比圖(左下角為濾波所使用的 Matlab 程式)

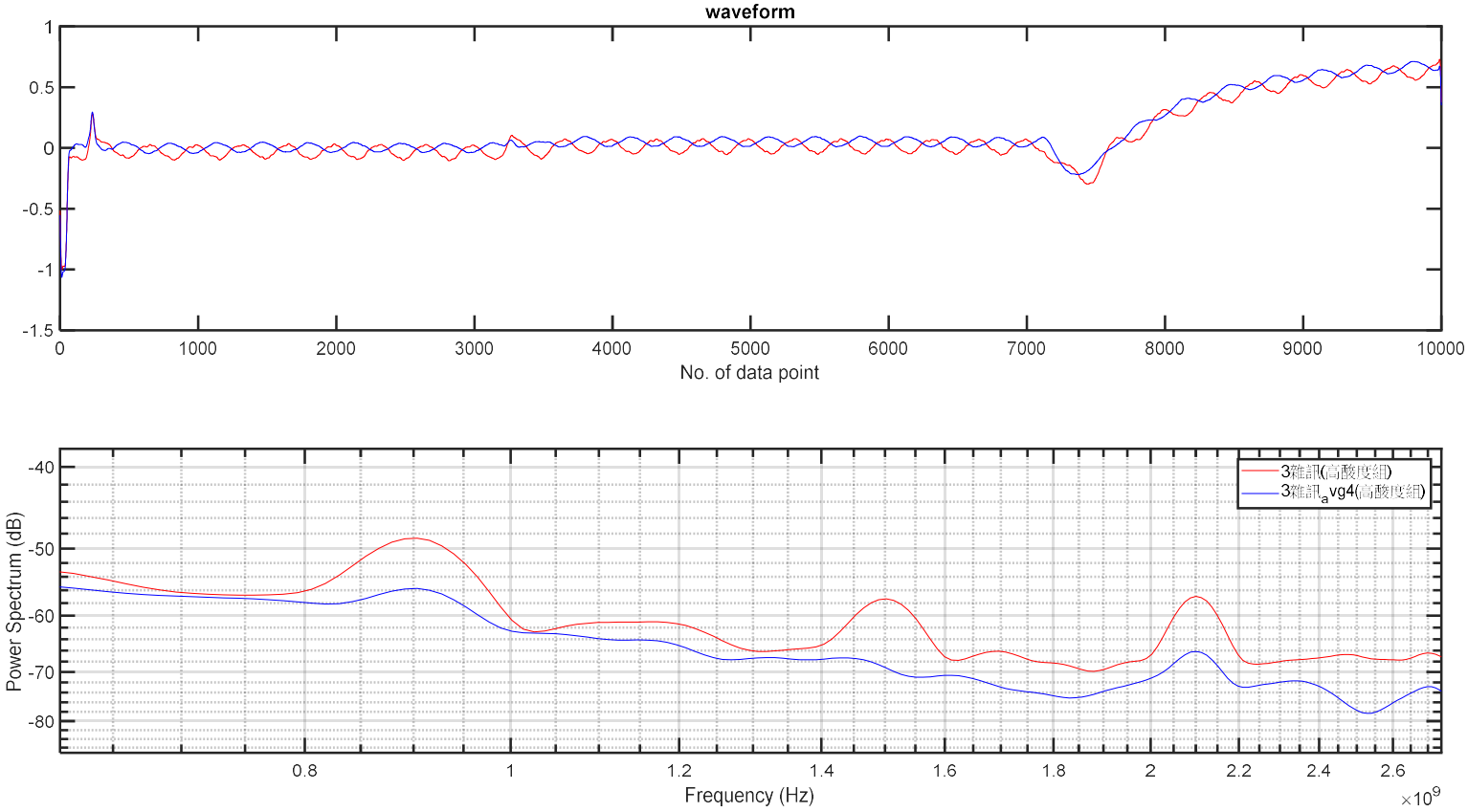
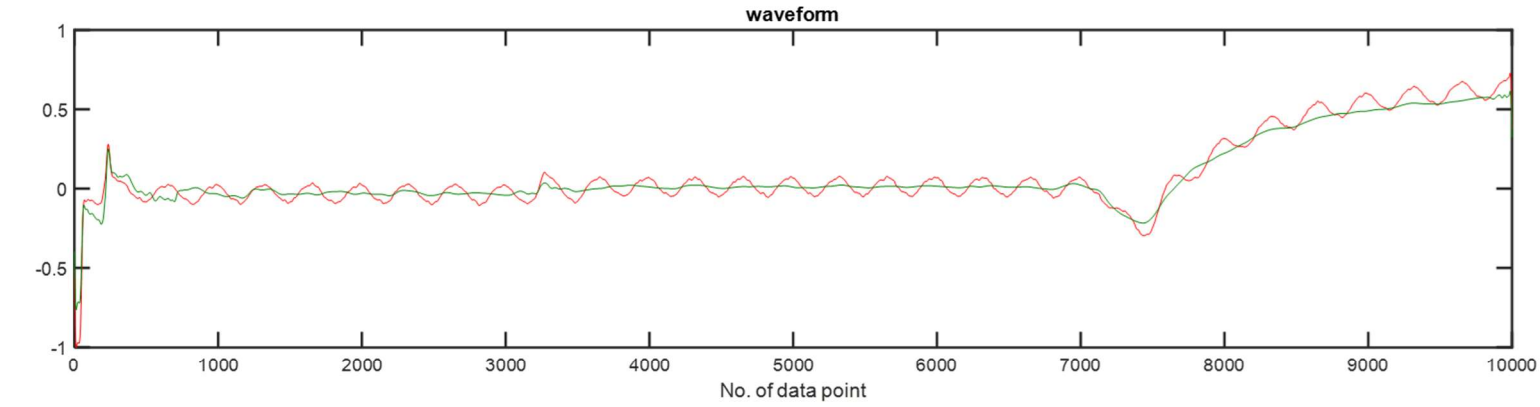
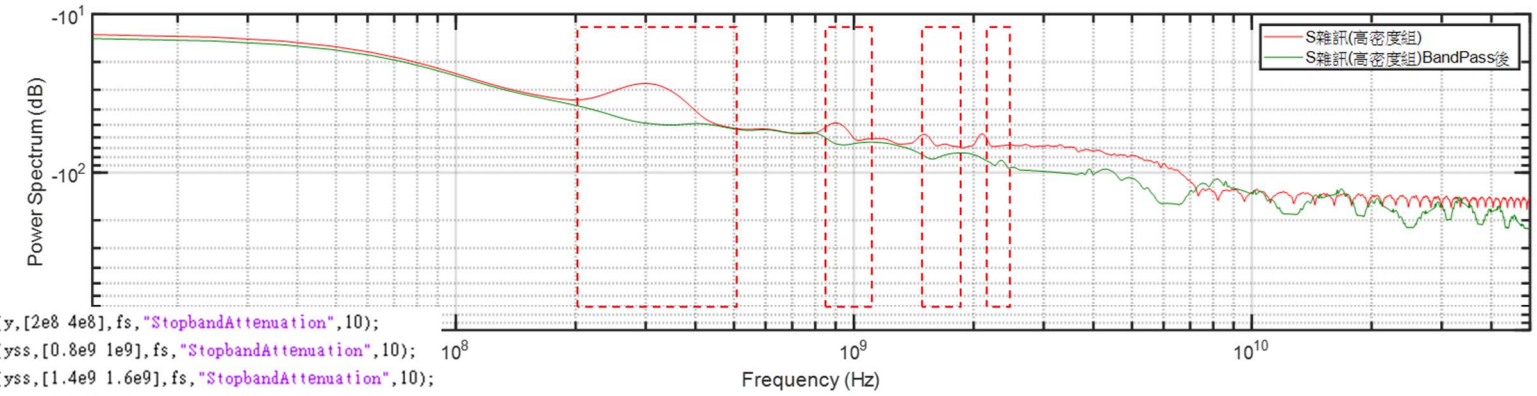


圖 2-146 S 感測器的原始訊號與 4 個訊號對比圖(頻率預放大)






```
yss = bandstop(y,[2e8 4e8],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = bandstop(yss,[0.8e9 1e9],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = bandstop(yss,[1.4e9 1.6e9],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = bandstop(yss,[2e9 2.2e9],fs,"StopbandAttenuation",10);
yss = real(yss);
yss = lowpass(yss,1e8,fs);
yss = wden(yss,'sqtwolog','h','mln',6,'sym7');
```

圖 2-147 S 感測器的原始訊與濾波後的訊號對比圖(左下角為濾波所使用的 Matlab 程式)

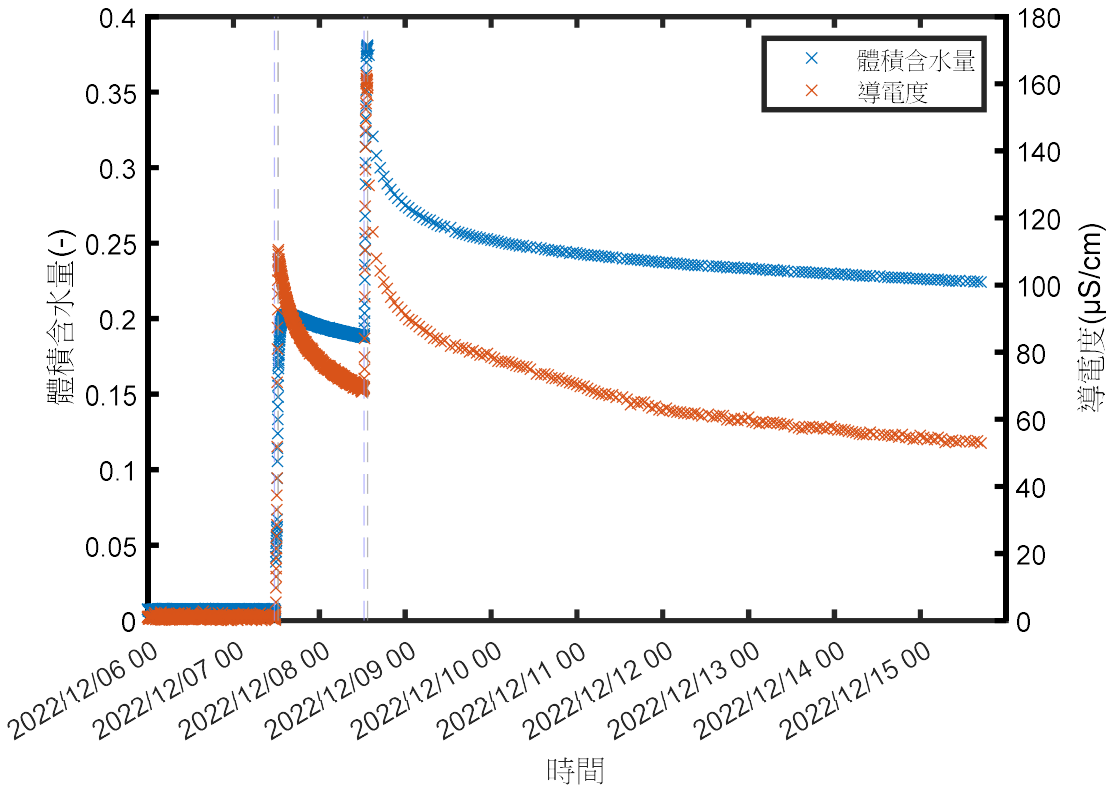


圖 2-148 3 感測器體積含水量與導電度歷時圖

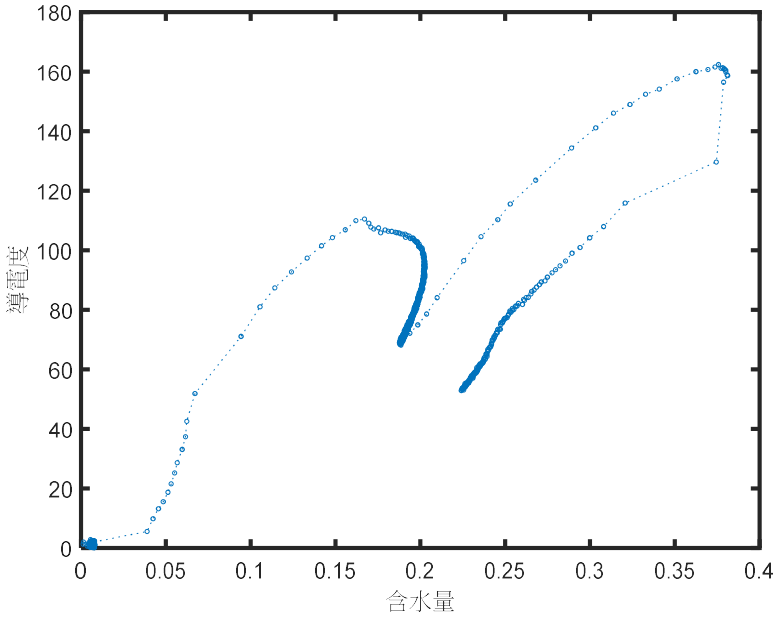


圖 2-149 3 電極感測器體積含水量與導電度關係圖

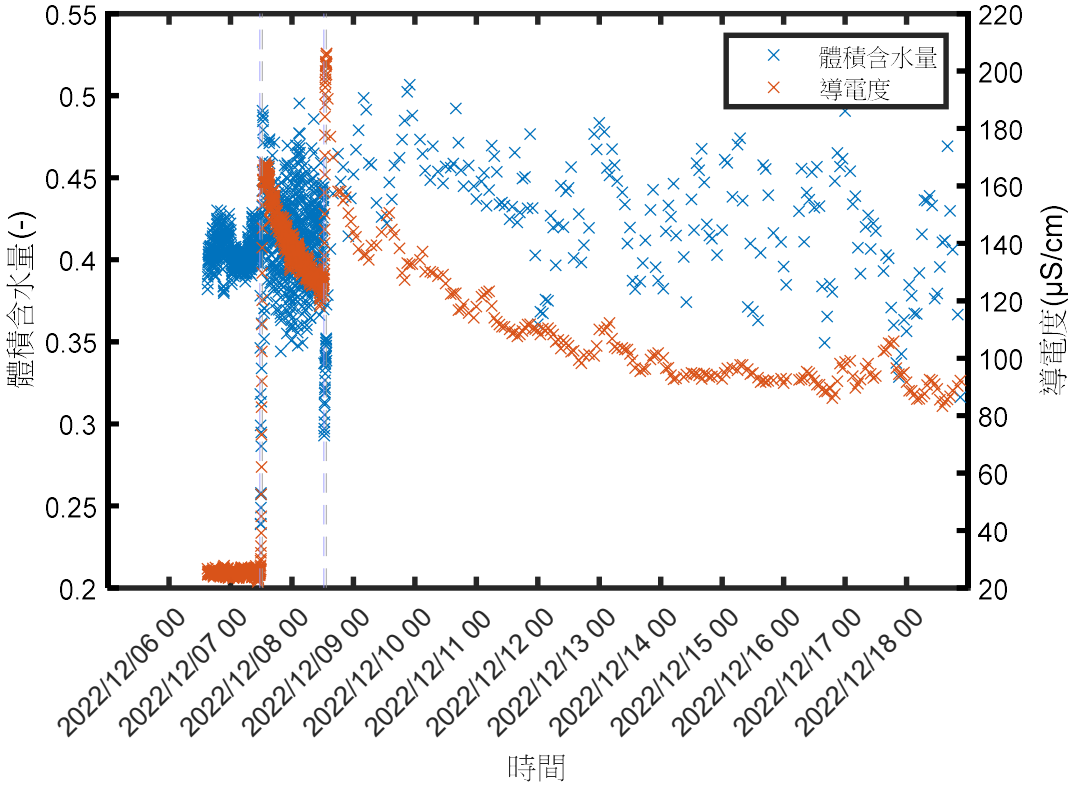


圖 2-150 N1 感測器體積含水量與導電度歷時圖

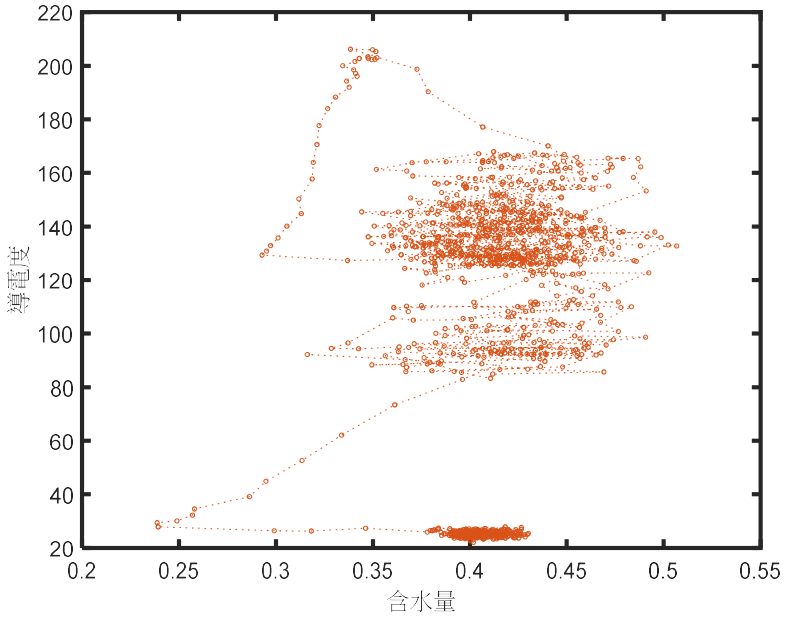


圖 2-151 N1 電極感測器體積含水量與導電度關係圖

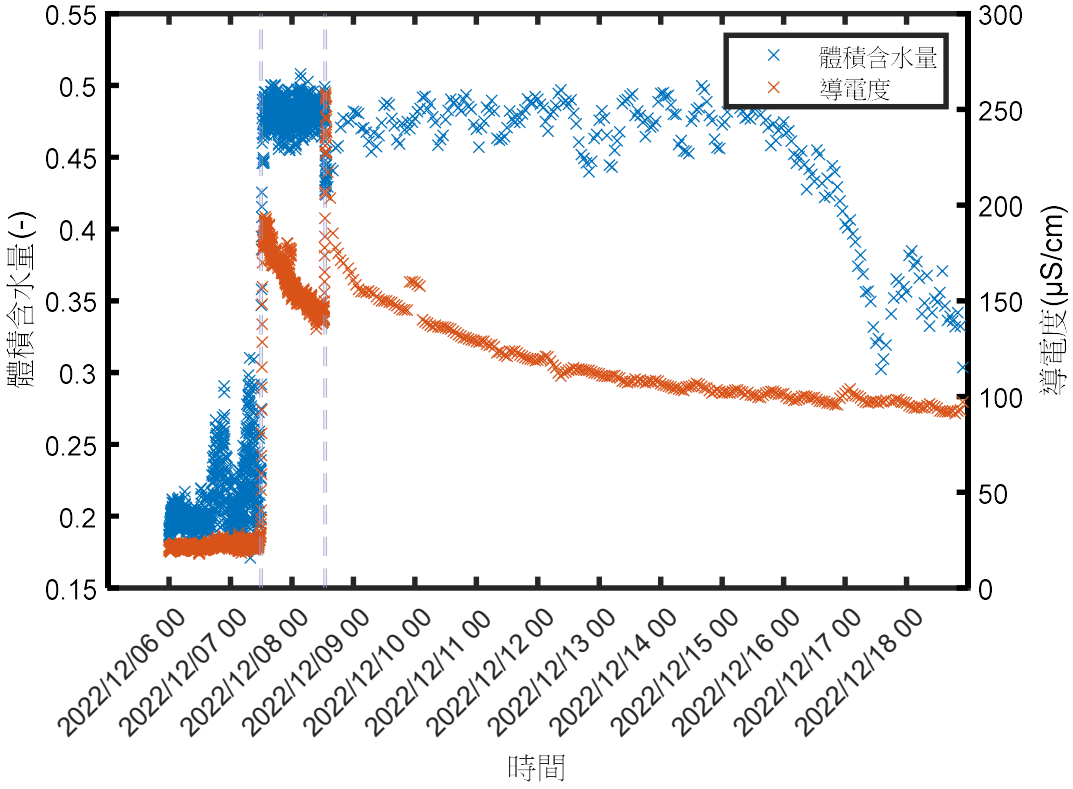


圖 2-152 N2 感測器體積含水量與導電度歷時圖

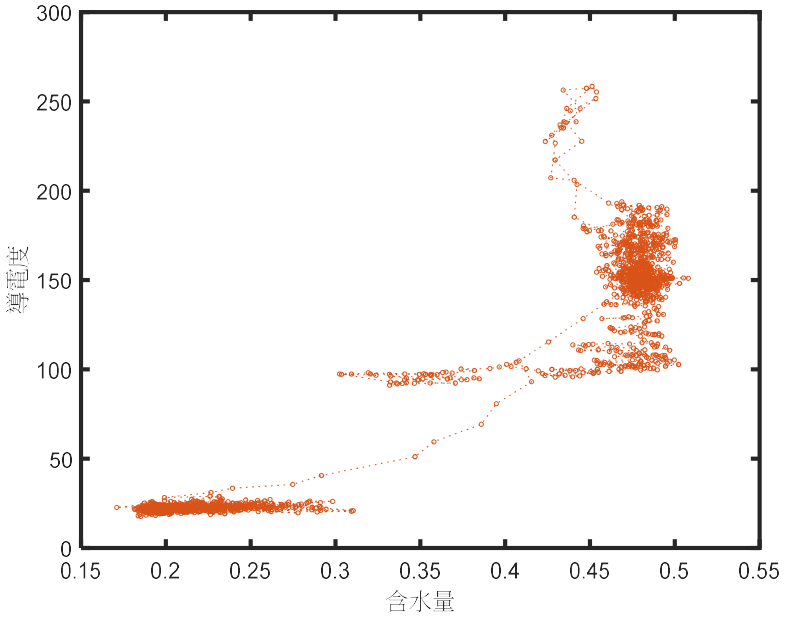


圖 2-153 N2 電極感測器體積含水量與導電度關係圖

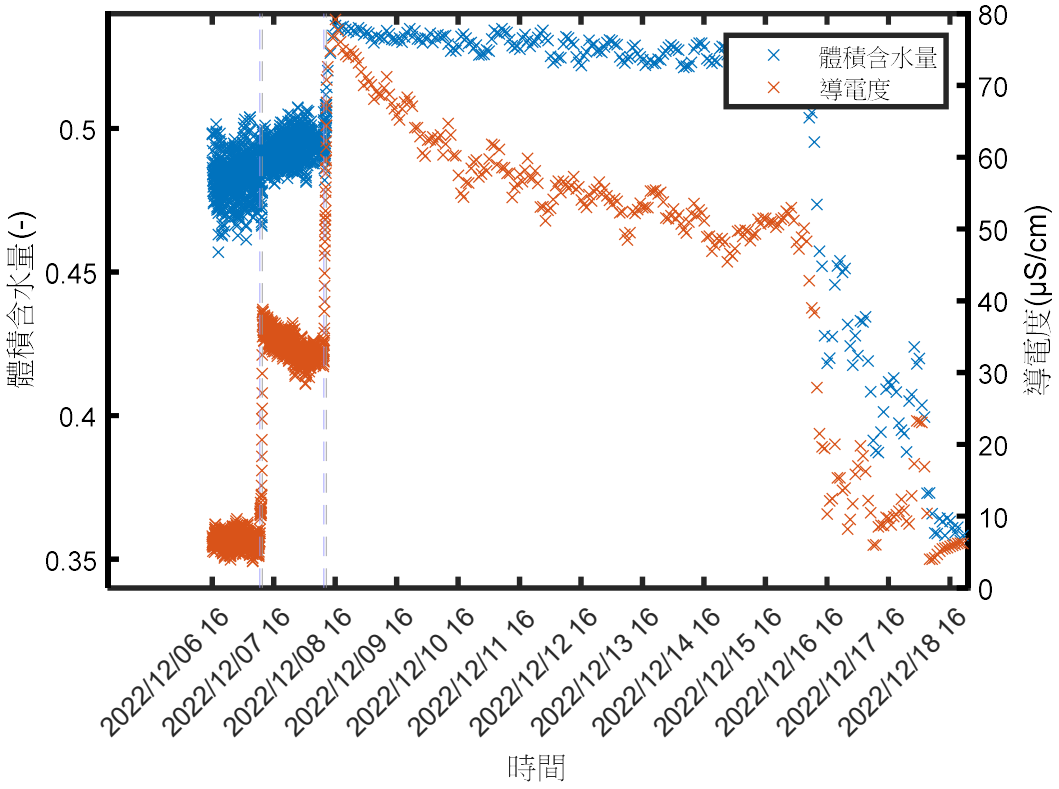


圖 2-154 S 感測器體積含水量與導電度歷時圖

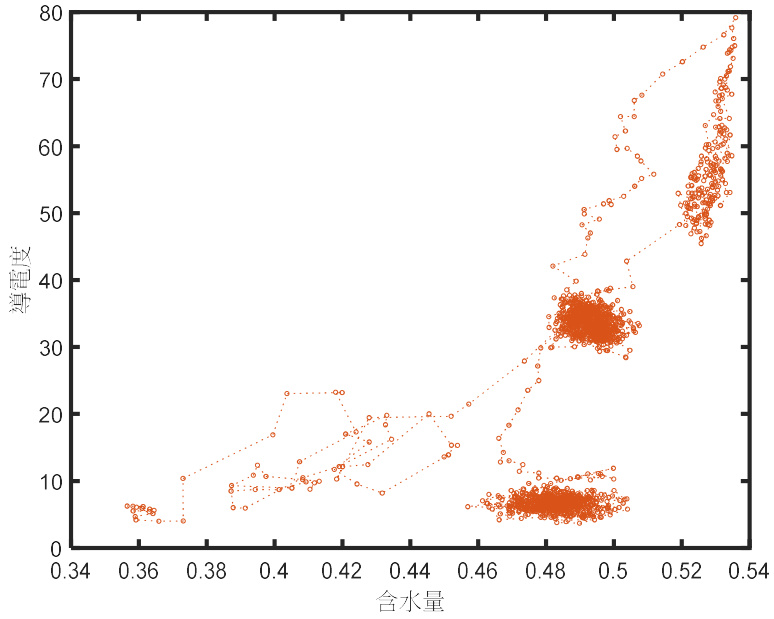


圖 2-155 S 電極感測器體積含水量與導電度關係圖

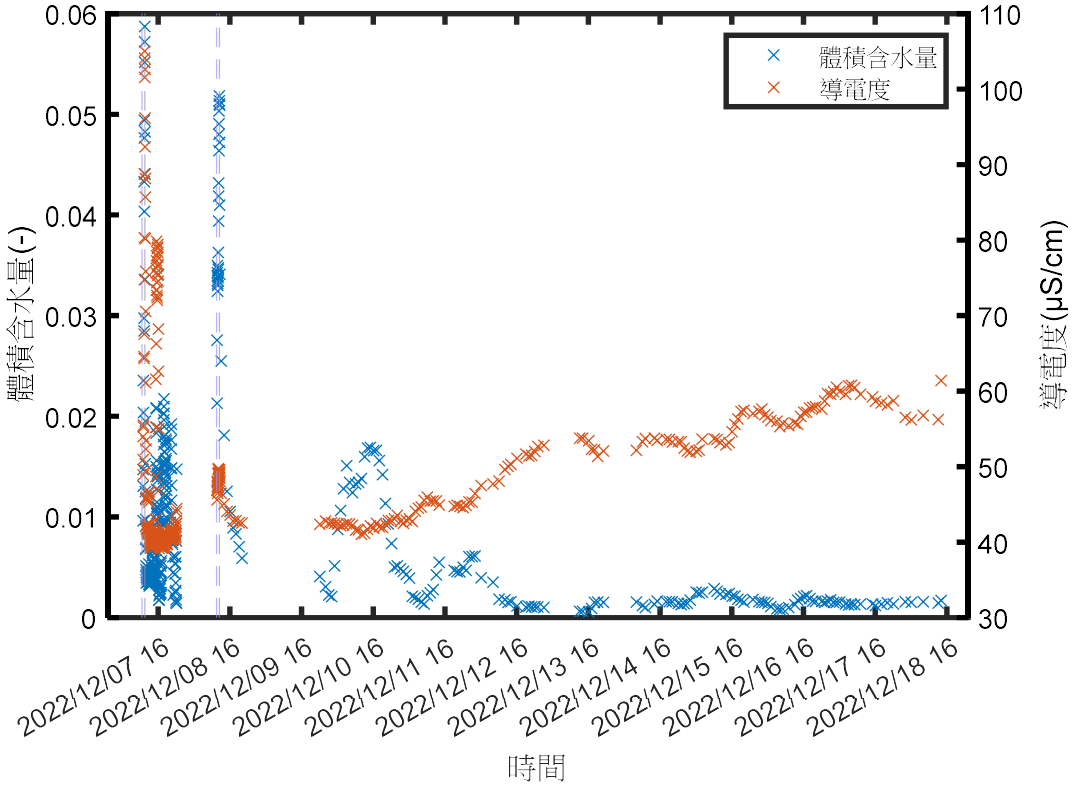


圖 2-156 M 感測器體積含水量與導電度歷時圖

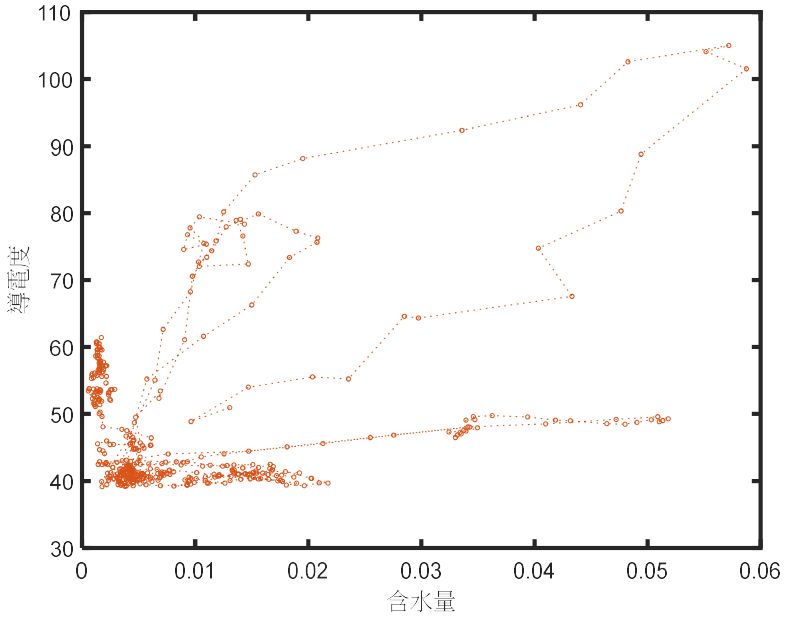


圖 2-157 M 電極感測器體積含水量與導電度關係圖

二、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)主要透過拆解 TDR 量測系統，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 表示如下：

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon_r^*} = \alpha + j\beta \tag{31}$$

$$Z_c = \frac{\ln(b/a)}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r^*}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\varepsilon_r^*}} \tag{32}$$

若考慮傳輸線的 skin effect，傳遞常數γ與特徵阻抗 Z_c 需乘上衰減 A 因子進行修正，修正式如下，

$$\gamma' = \frac{j2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon_r^*} \times A \tag{33}$$

$$Z_c' = \frac{Z_p}{\sqrt{\varepsilon_r^*}} \times A \tag{34}$$

$$A = \sqrt{1 + (1-j)\left(\frac{\eta_0}{Z_p}\right)\frac{\alpha_R}{\sqrt{f}}} \tag{35}$$

其中，A(無因次)為電阻修正因子(Resistance correction factor)，$\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 120\pi$ (Ω)為自由空間的內在阻抗(Intrinsic impedance of free space)，α_R ($\sec^{-0.5}$)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 31 與 32 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 2-158 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：

$$
\begin{aligned}
&Z_{in}(z_n) = Z_L \\
&Z_{in}(z_{n-1}) = Z_{c,n}\frac{Z_L + Z_{c,n}\tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L\tanh(\gamma_n l_n)} \\
&Z_{in}(z_{n-2}) = Z_{c,n-1}\frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1}\tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(z_{n-1})\tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\
&\quad\vdots \\
&Z_{in}(0) = Z_{c,1}\frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1}\tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1)\tanh(\gamma_1 l_1)}
\end{aligned}
\tag{36}
$$

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：

$$
V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_S}V_S = HV_S \tag{37}
$$

其中 V(0)是 TDR 輸入波形的富立葉轉換，Vs 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 Ω，$H=Z_{in}(0)/(Z_{in}(0)+Z_S)$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。

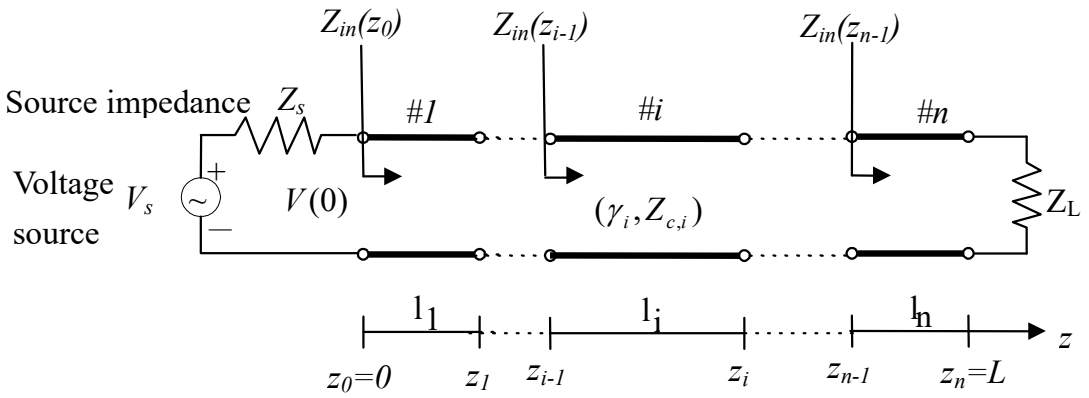


圖 2-158TDR 之等效電路(Equivalent circuit)模式(修改自 Lin, 2003a)

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

$$S_{\hat{m}} = \left[\frac{\partial \left[abs\left(S_{11}\right) \right] / abs\left(S_{11}\right)}{\partial m / m} \right]_{\hat{m}} = \frac{\partial \left[abs\left(S_{11}\right) \right]}{m} \frac{m}{abs\left(S_{11}\right)} \tag{38}$$

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 $S_{\hat{m}}$ 分析。圖 2-159 為靈敏度 $S_{\hat{m}}$ 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 2-160 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。

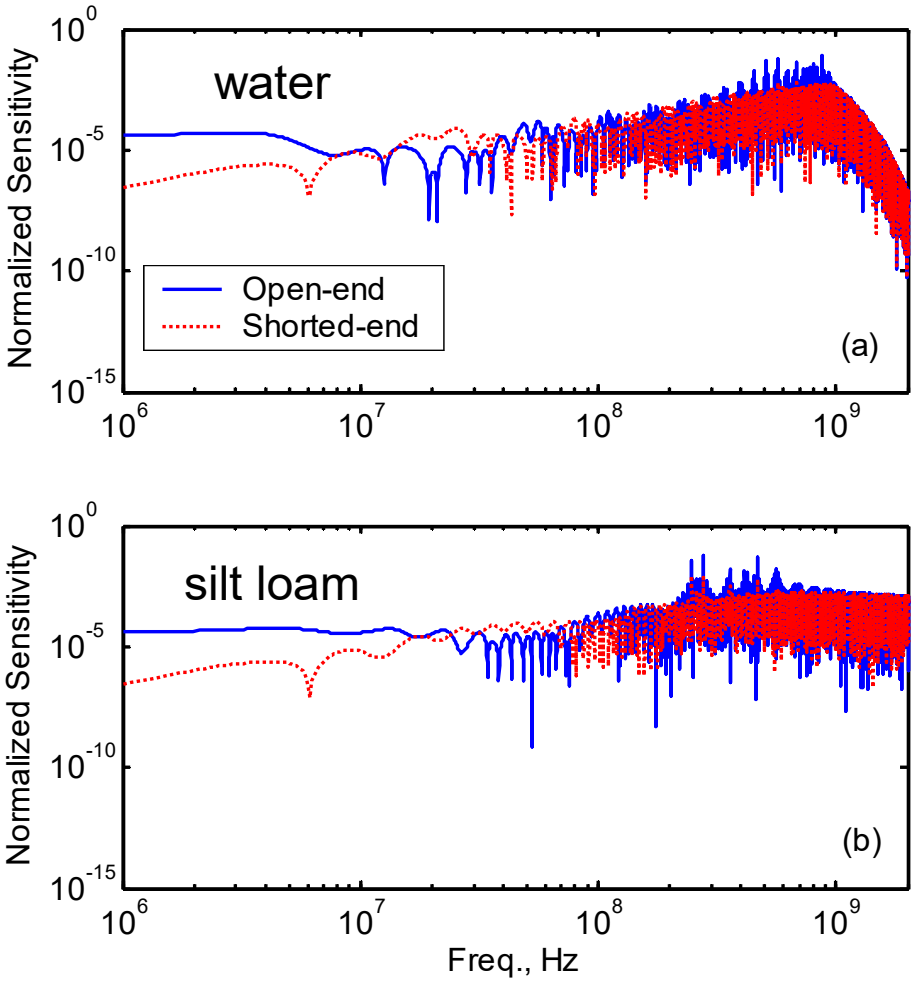


圖 2-159 靈敏度 $S_{\hat{m}}$ 受感測器長度 L 影響

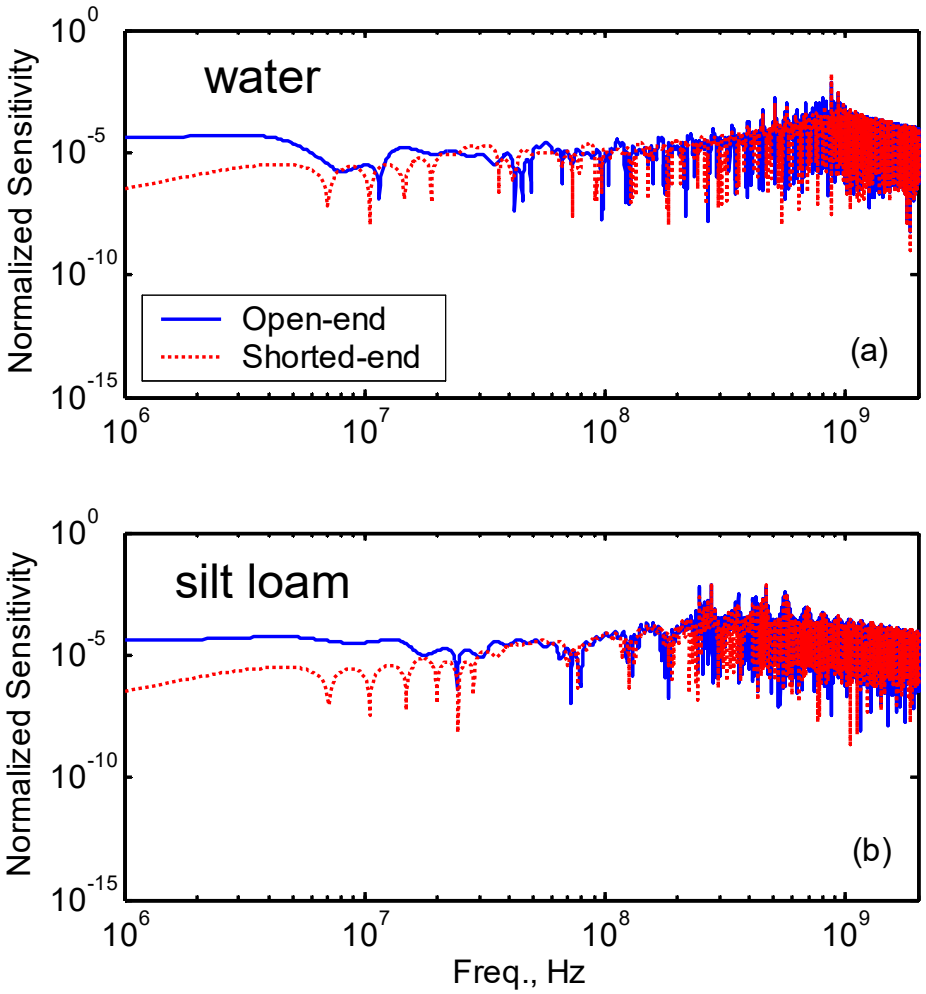


圖 2-160 靈敏度 $S_{\hat{m}}$ 受感測器阻抗 Z_p 影響

(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

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i L_i) & -Z_c \sinh(\gamma_i L_i) \\ -\frac{1}{Z_c}\sinh(\gamma_i L_i) & \cosh(\gamma_i L_i) \end{bmatrix} \tag{39}$$

則整體多段式傳輸線理論模型之 ABCD 矩陣Φ為

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \Phi_n \Phi_{n-1} \cdots \Phi_1 \tag{40}$$

一旦獲得Φ矩陣後，TDR 波形在頻率域反應便可由下式獲得

$$V(0) = \frac{Z_L D - B}{(Z_L D - B) - Z_s (Z_L C - A)} V_s \tag{41}$$

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

$$V(0) = \frac{Z_{in}(z_{n-1}) D - B}{(Z_{in}(z_{n-1}) D - B) - Z_s (Z_{in}(z_{n-1}) C - A)} V_s \tag{42}$$

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

$$V(0) = \frac{Z_{in}(z_{n-1}) - \frac{B}{D}}{(Z_{in}(z_{n-1}) - \frac{B}{D}) - Z_s (Z_{in}(z_{n-1}) \frac{C}{D} - \frac{A}{D})} V_s \tag{43}$$

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 波型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 2-161 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：

$$\Delta\phi(f)=\phi_2(f)-\phi_1(f)=Angle\left[CSD\left(u_1(t),u_2(t)\right)\right] \quad (44)$$

$$V_{ph}=\frac{2\pi f(2L)}{\Delta\phi(f)} \quad (45)$$

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(100 MHz–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。

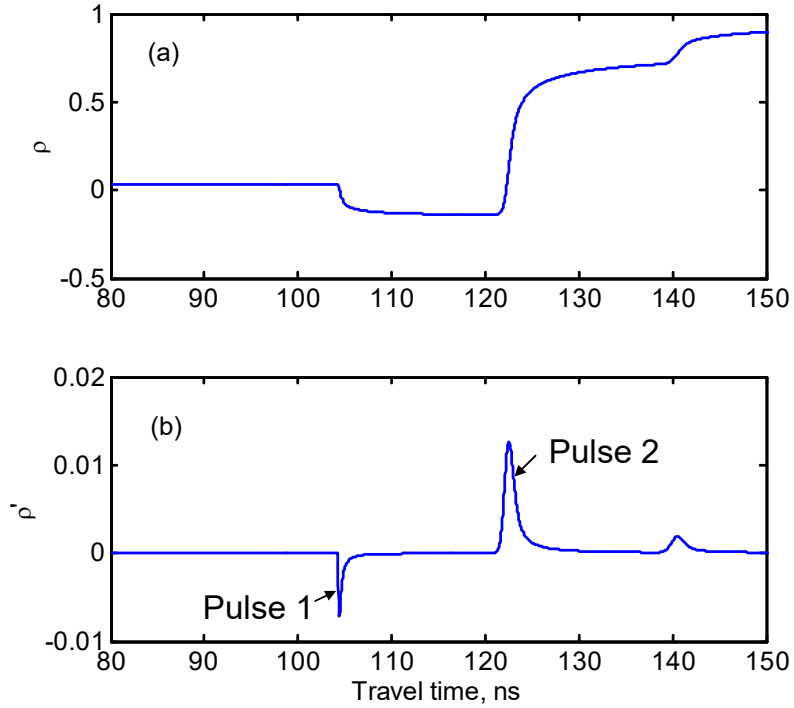


圖 2-161(a)典型 TDR 波型,以及(b)微分波形之特徵回波

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 2-162 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 2-163 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 As 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 2-164 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。

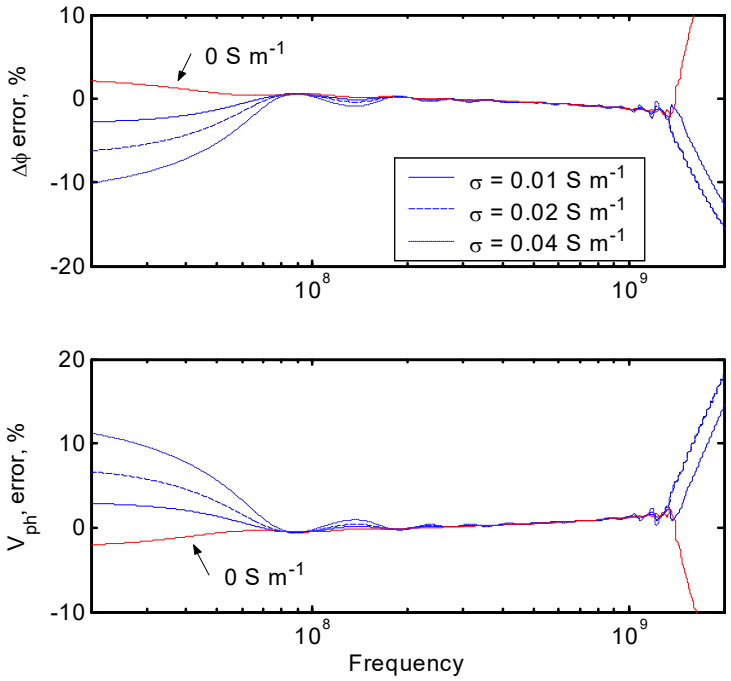


圖 2-162 (a) PVA 相位受導電度影響誤差以及 (b) PVA 速度誤差

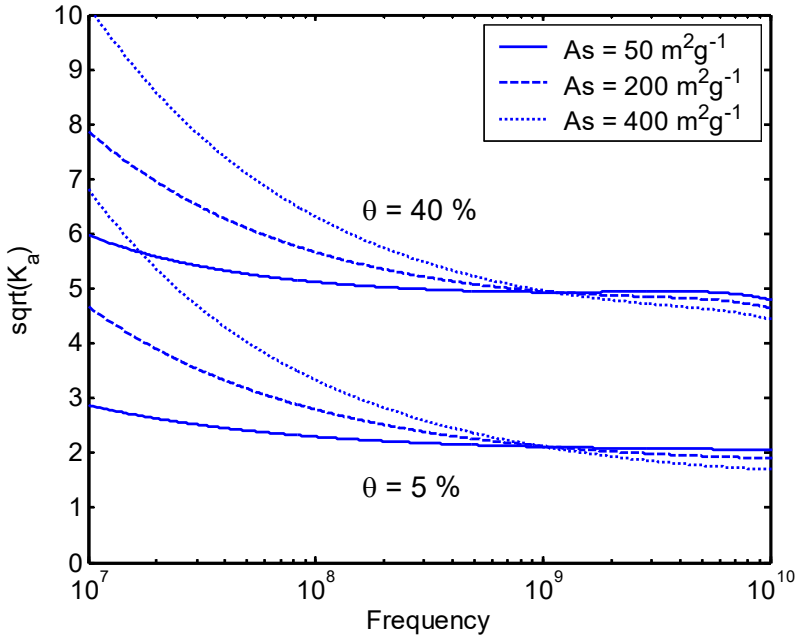


圖 2-163 PVA 介電度於不同土壤與含水量之差異

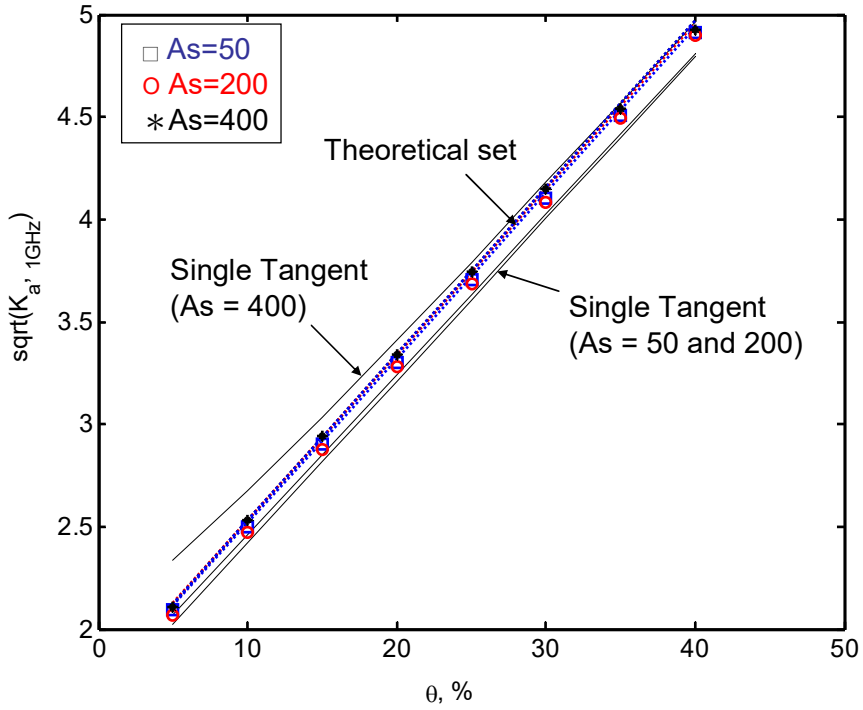


圖 2-164 PVA 介電度(1 GHz)以及傳統 TDR 分析於不同含水量差異

基於上述成果，本研究進一度探討 PVA 介電度(1 GHz)及傳統 TDR 分析於 EC 影響，如圖 2-165 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 2-166 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。

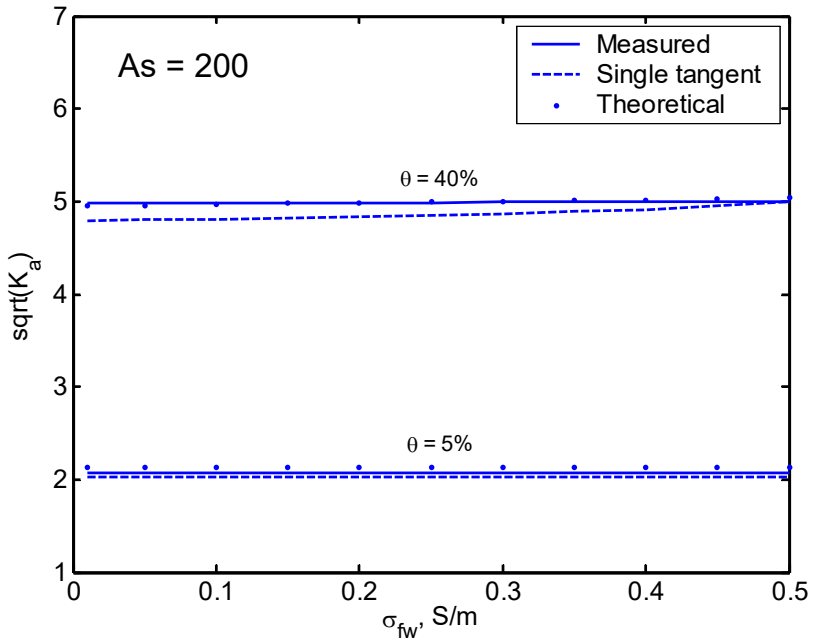


圖 2-165PVA 介電度(1 GHz)及傳統 TDR 分析於 EC 影響

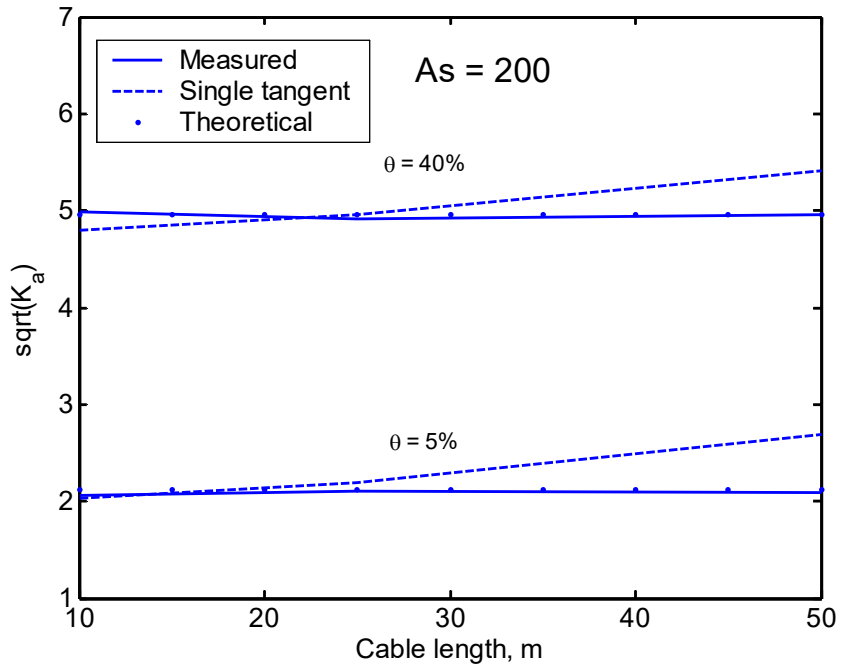


圖 2-166PVA 介電度(1 GHz)及傳統 TDR 分析於纜線長度影響

(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 2-167 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 1 MHz–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 2-168 進行系統率定與量測建議。

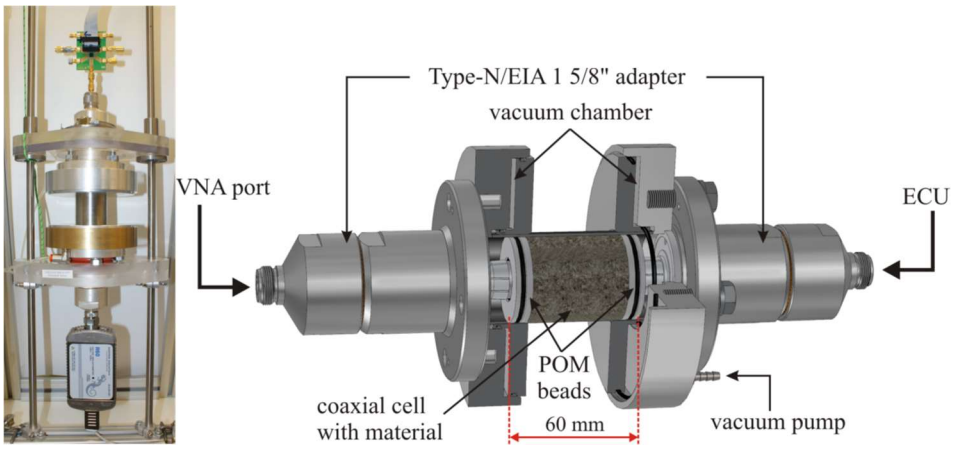
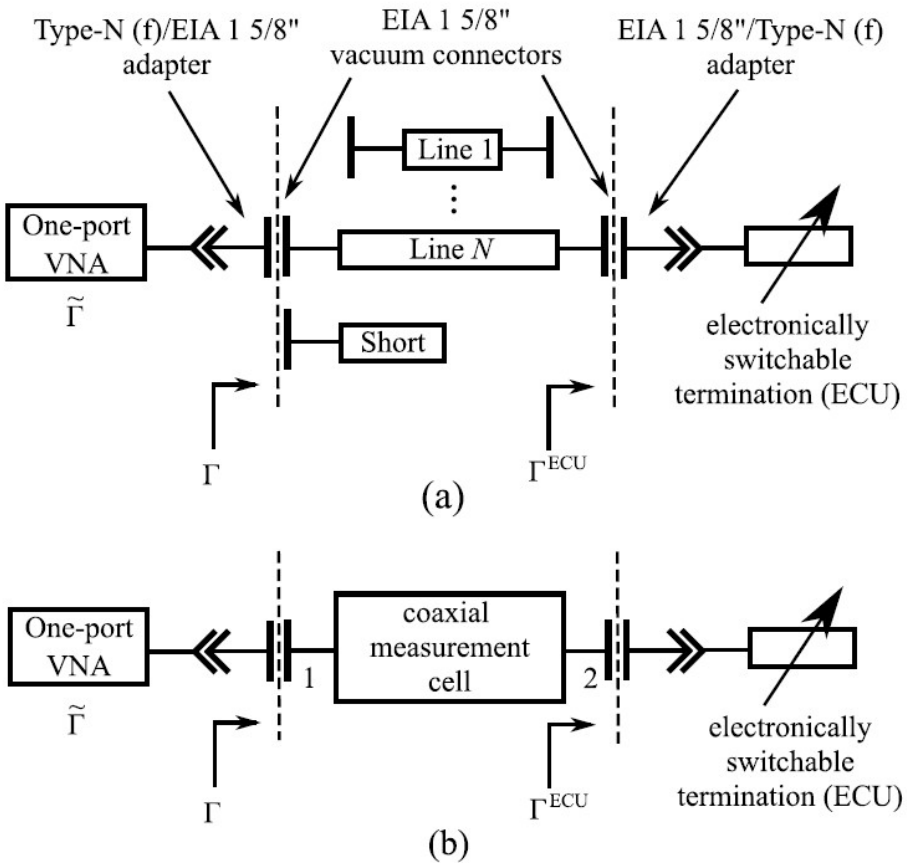


圖 2-167 以 VNA 進行土壤介電頻譜分析(Lewandowski et al. 2019)



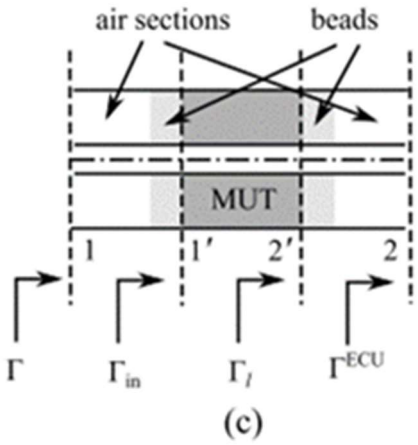


圖 2-168 以 VNA 進行土壤介電頻譜之系統標定與實際量測程序

(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 VNA 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 2-169 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 mm，內導體外徑為 16.9+0.05 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℃至+108℃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)15/8"是 Revoton Machinery 的產品。它將內部適配器 Type-N/EIA15/8"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 2-172 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. 外導體的外徑為 35 mm，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。

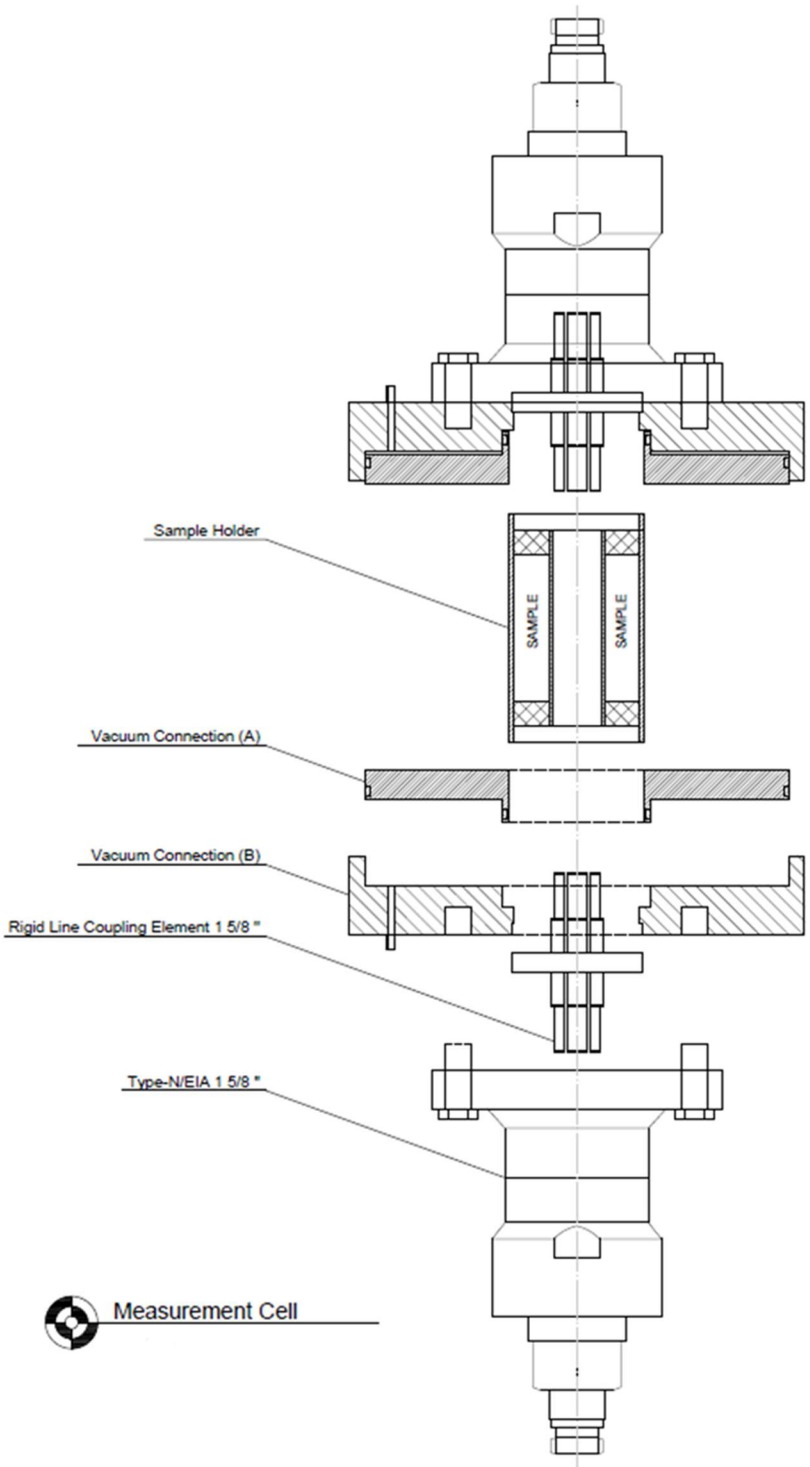


圖 2-169 向量網路分析儀(VNA)量測模具單元

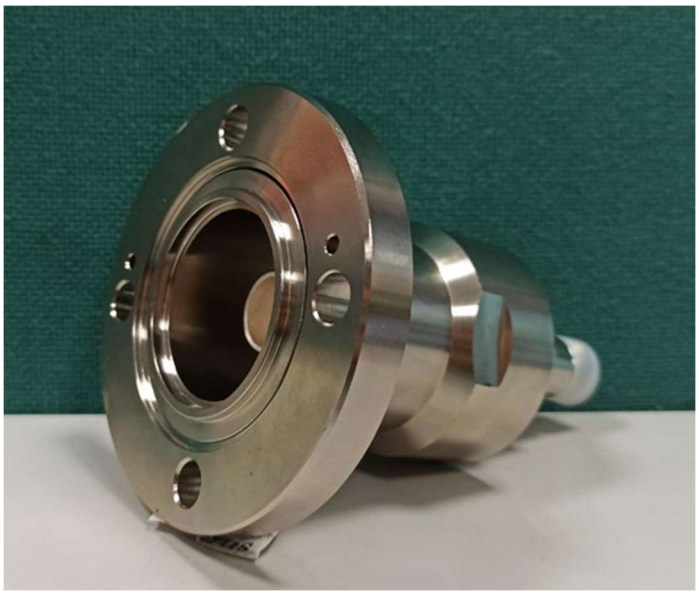


圖 2-170 Type-N/EIA 1 5/8’’元件



圖 2-171 Rigid line coupling element 1 5/8"

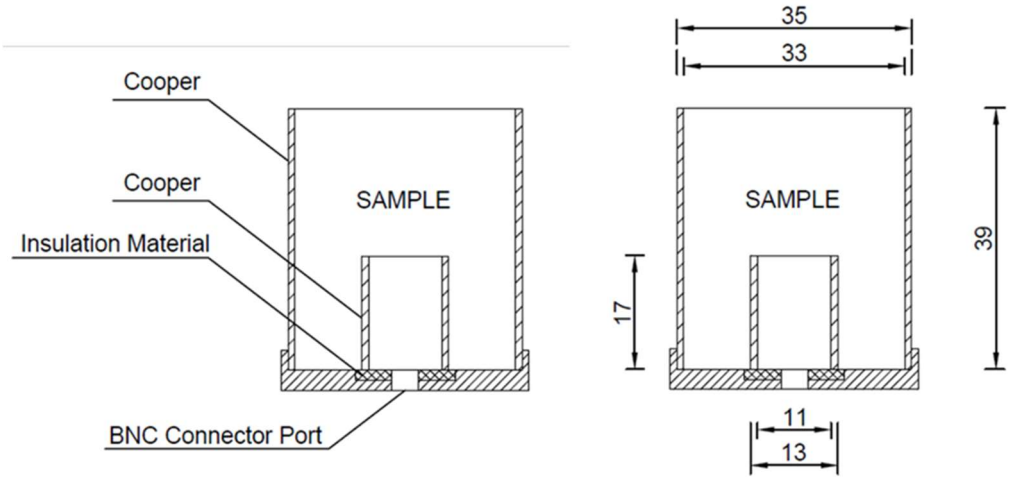


圖 2-172 同軸模具(coaxial sample holders)示意圖(單位為 mm)

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 2-168 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 2-168)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,...,M 是電子可切換終端電子校准單元(ECU).

$$\Gamma = \frac{\tilde{\Gamma} - E_2}{E_1 + E_3\Gamma} \tag{46}$$

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 2-168(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。

$$\Gamma = \frac{S_{11} - \Delta\Gamma^{ECU}}{1 - S_{22}\Gamma^{ECU}} \tag{47}$$

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 2-168(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)。

miniVNA PRO Lite 之校正：

本報告中使用的矢量網絡分析儀(Vector Network Analyzer, VNA)為 miniVNA PRO Lite 和 miniVNA Tiny。miniVNA PRO Lite 的測量頻率為 100 kHz 至 200 MHz，miniVNA Tiny 的測量頻率為 1 MHz 至 3 GHz，且均支持 S11 和 S21 的 S 參數測量。VNA 的校准設置包含 BNC 校準套件開路、短路和負載(圖 2-173)的常數，並在設置中排除電纜效應。此 VNA 的輸出數據位於(*.s1p)文件中，其中包含每步驟的測量的頻率、S11 幅度和相位角，測量設置如圖 2-175 所示。該設置的目的在於最大限度地減少土壤測量期間的電纜干擾。



圖 2-173(a) mini VNAPRO Lite，和(b) mini VNA Tiny

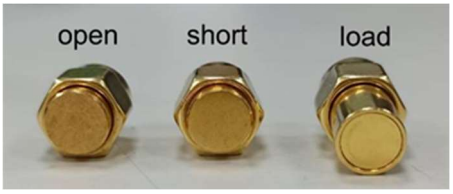


圖 2-174SMA 校正元件(開路 open,短路 short,負載 load)

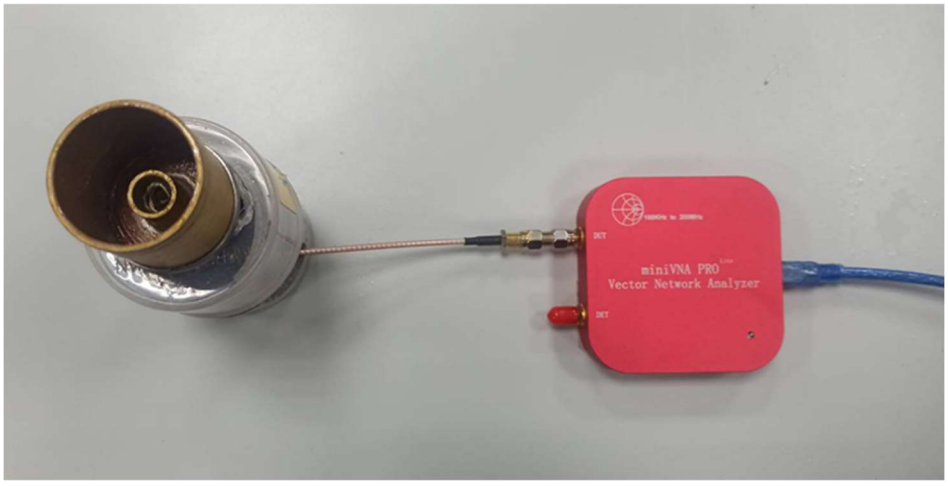


圖 2-175 測量期間的測量設置，分別使用：(a)空氣(air)、(b)正丁醇(1-butanol)、和(c)乙醇(ethanol)

(1)校正過程：

校準過程從使用校準套件(open、short、和 load)。通過將開路、短路和負載套件連接到電纜並在 VNA 軟件上交替讀取來開始校準過程。校準過程如圖 2-175 和圖 2-177 所示。

(2)校正之實際軟體操作步驟：

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

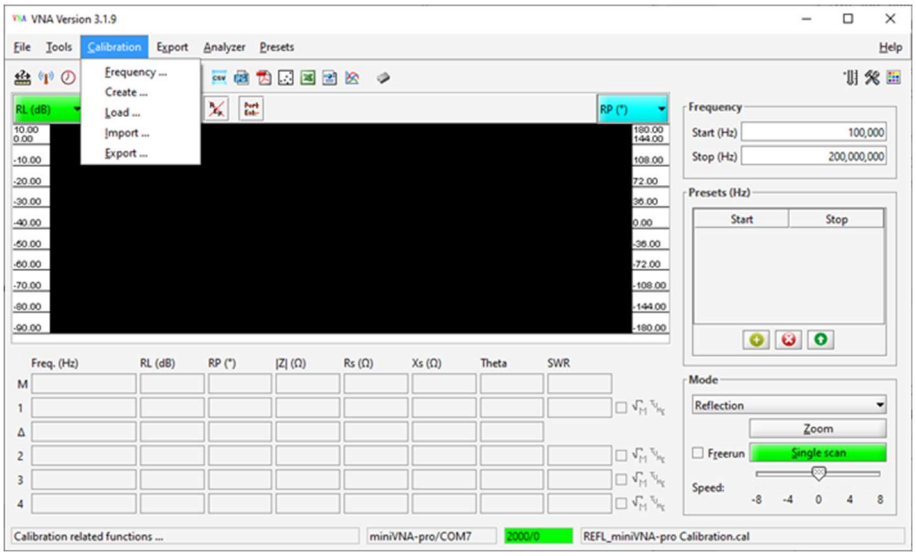


圖 2-176 建立校正介面

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。

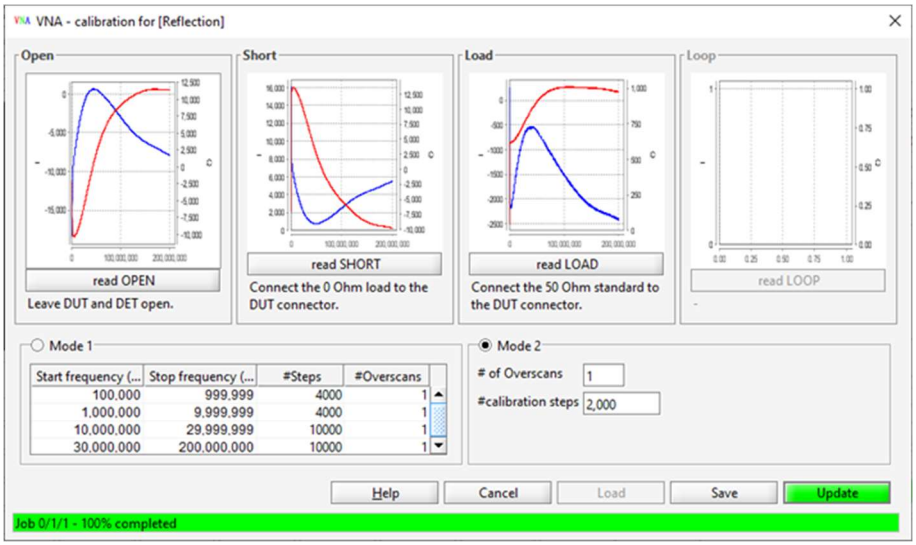
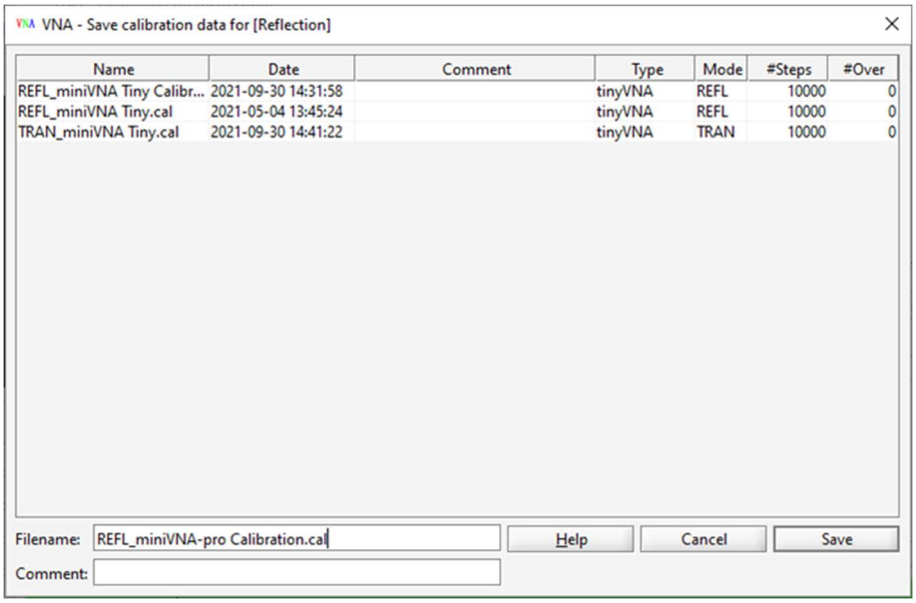


圖 2-177 讀取開路、短路和負載校正元件資料

iii. 點擊更新以更新校正資料並保存校正圖。



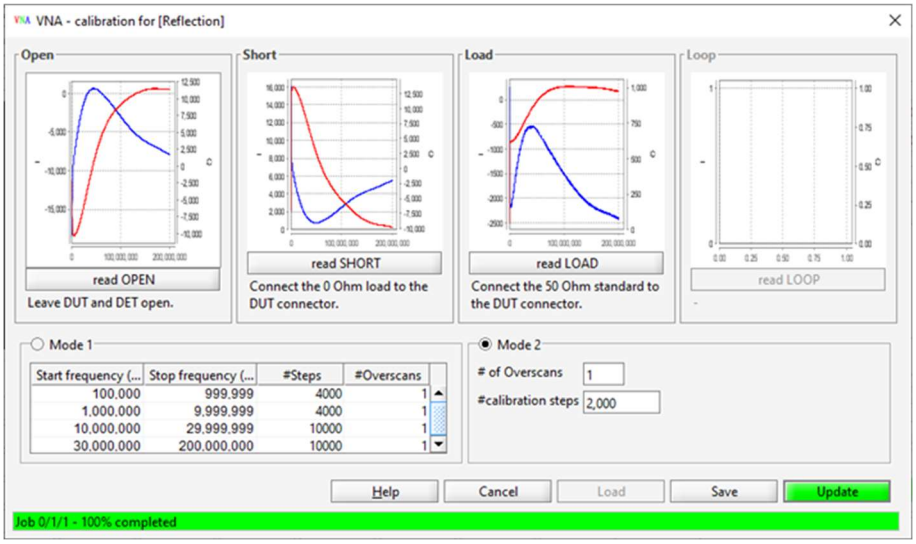


圖 2-178 保存和更新校正圖

<u>miniVNA Tiny 產品之校正：</u>

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 2-174 所示)。

(1)校正過程：

校準過程從使用校準套件(open、short、和 load)。通過將開路、短路和負載套件連接到電纜並在 VNA 軟件上交替讀取來開始校準過程。校準過程如圖 2-175 和圖 2-180 所示。

(2)校正之實際軟體操作步驟：

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

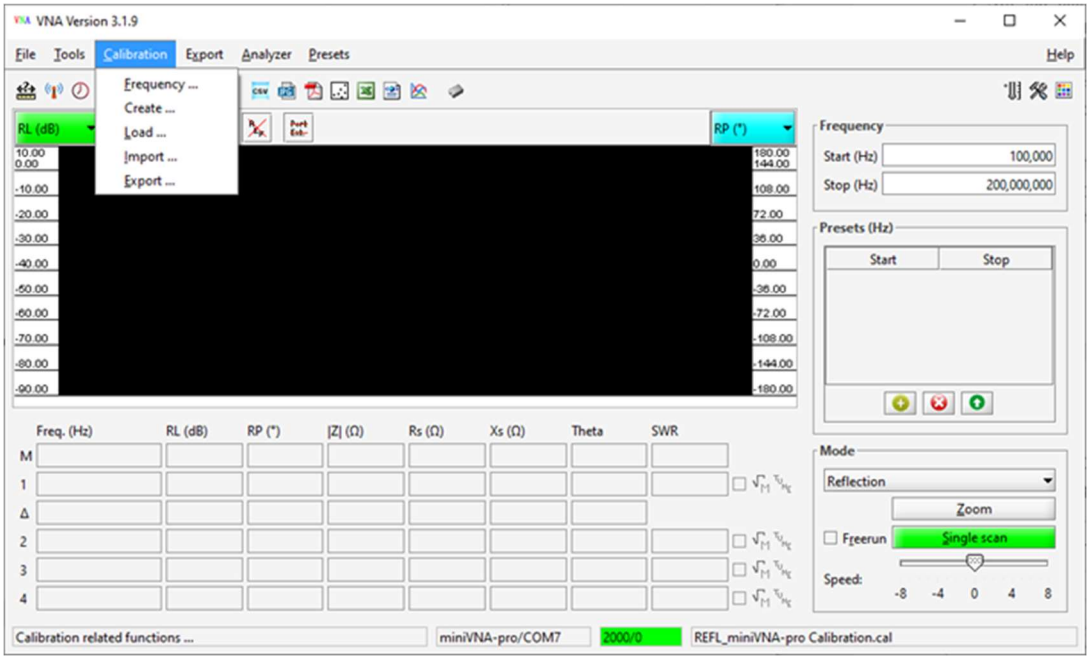


圖 2-179 建立校正介面

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。

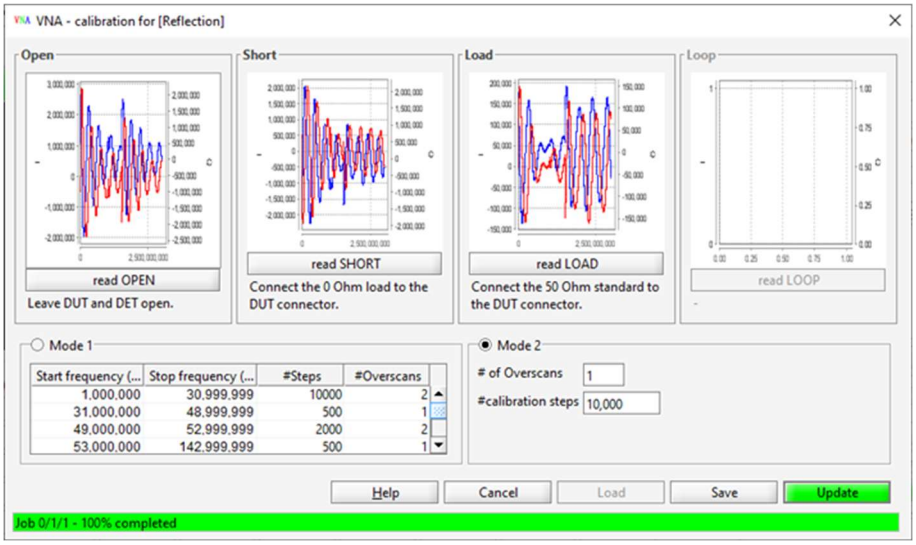
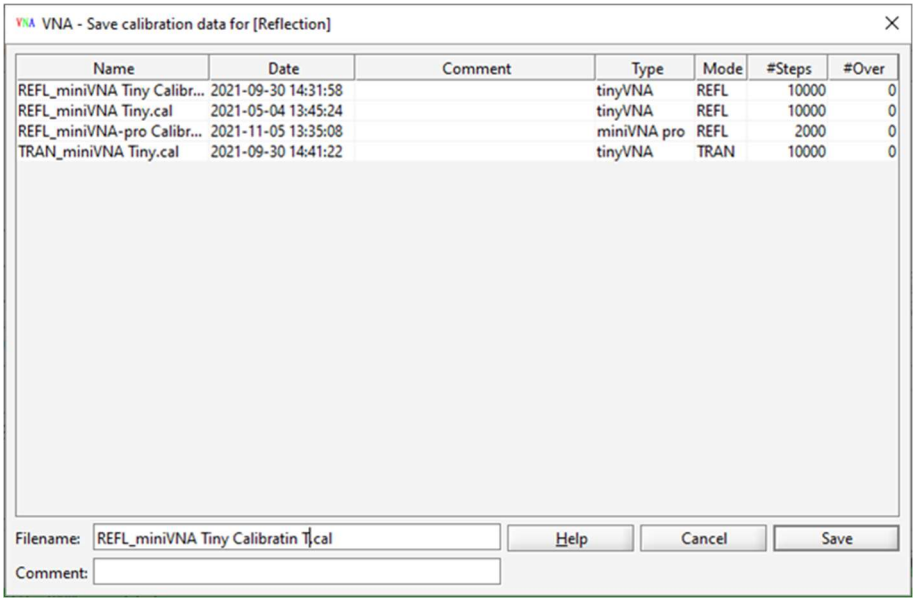


圖 2-180 讀取開路、短路和負載校正元件資料

iii. 點擊更新以更新校正資料並保存校正圖。



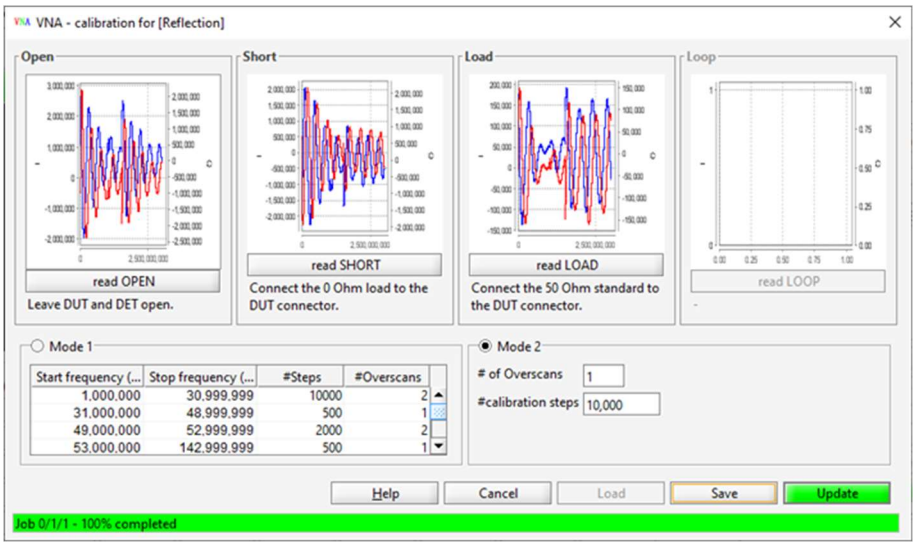


圖 2-181 保存和更新校正圖

Cooper Mountain Technology (CMT) R60 Vector Reflectometer 校正：

Cooper Mountain Technology (CMT) R60 Vector Reflectometer(圖 2-182)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 2-182 R60VectorReflectometer 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。

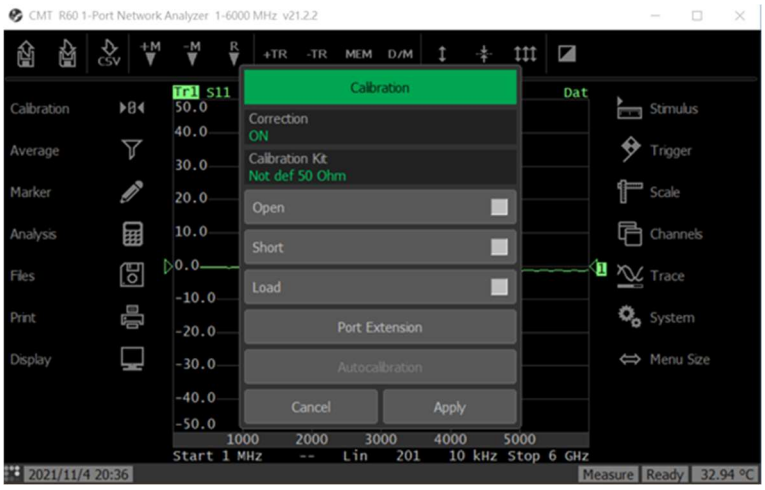


圖 2-183 校正介面

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。

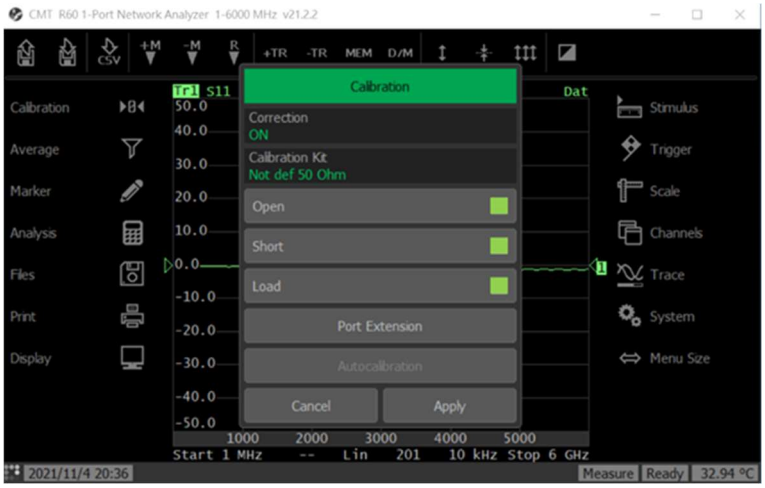


圖 2-184 校正完成之介面

iii. 將校準結果應用至程式中

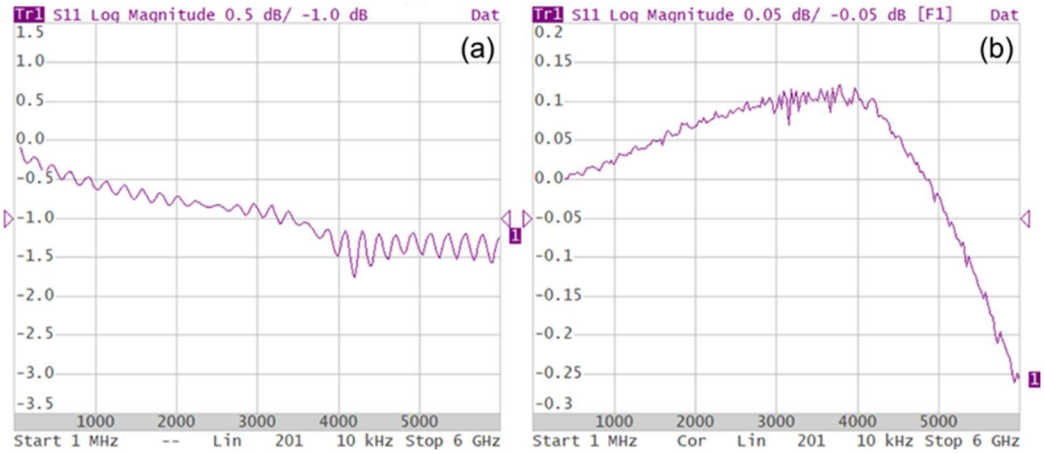


圖 2-185 S11 訊號(a)校正前(b)校正後

如上所述，有必要估計模具的電氣長度和阻抗。在本報告中用於校準的材料分別是空氣(空模具)、丁醇和乙醇。校準過程使用頻率為 1 MHz 至 3 GHz 的 miniVNATiny 進行，如圖 2-175 所示。過程中測量重複十次並取其平均值，空氣、丁醇和乙醇的平均 S11 和相位角如圖 2-186 所示。通過使用

前述流程將 VNA 的測量結果繪製到圖 2-187。圖 2-187 中回歸線的斜率是模具的電氣長度，其中 L＝0.03889m。由於本報告中使用的材料不同，本次校準的結果與 Logsdon (2005) 略有不同。

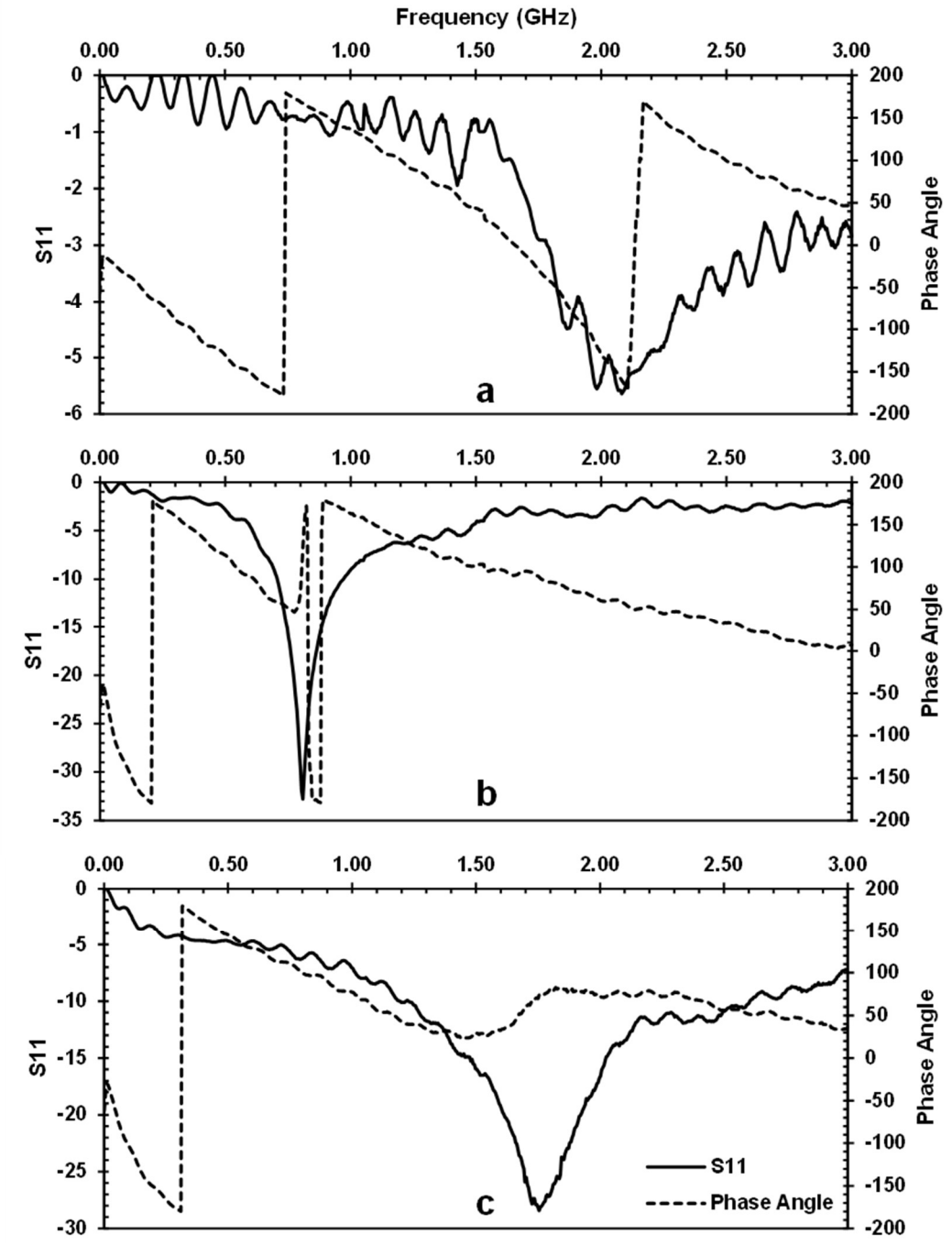


圖 2-186 平均 S11 和相位角：(a)空氣(air)、(b)正丁醇(1-butanol)、和(c)乙醇(ethanol)

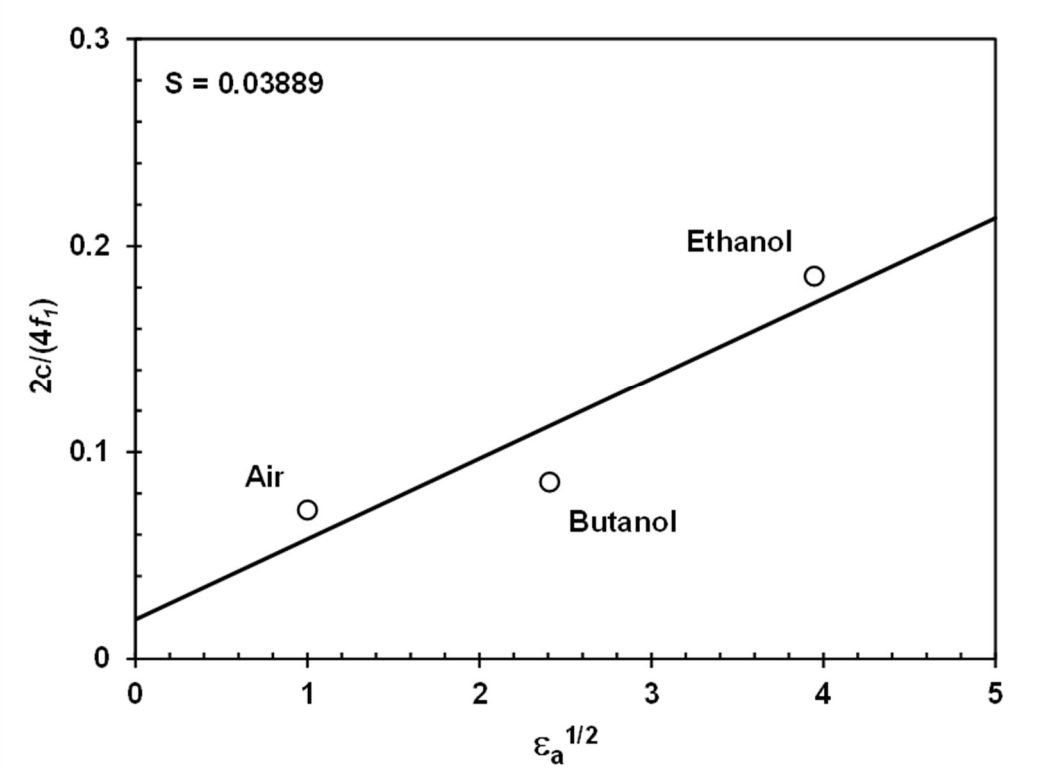


圖 2-187 電氣長度，定義為$2c/4f_1$的斜率，作為預測$\varepsilon_a^{1/2}$(視介電常數的平方根)的函數。

正如Kraft (1987)所建議的，由於計算程序對於高於 50 到 100 MHz 的頻率不可靠，因此測量結果僅限於 1 MHz 到 100 MHz 之間的頻率。將測量結果與 Gregory and Clarke (2013)的介電參考液進行了比較。Gregory and Clarke (2013)提供了頻率高達 5 GHz 的幾種液體的介電參考複介電常數表。表 2-20 的資料使用公式 19 合複介電常數。

表 2-20 方程式 19 中的參數(正丁醇(1-butanol)與乙醇(ethanol)

Liquids Type	ε_s	f_r	ε_H	Γ
Ethanol	25.16	0.829	4.531	0.059
Butanol	16.89	0.397	3.418	0.061

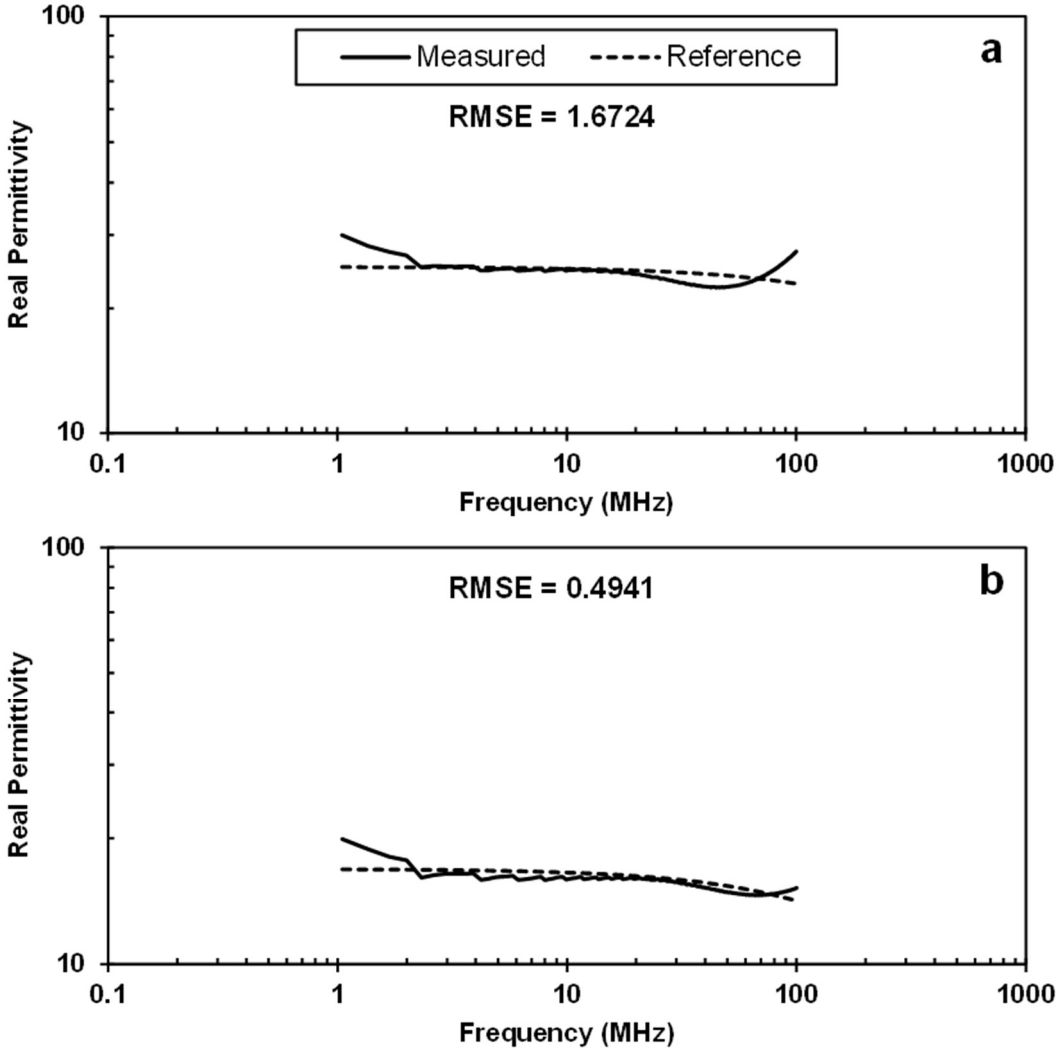


圖 2-188 測量結果與比較：(a)乙醇(ethanol)，和(b)正丁醇(1-butanol)

3.VNA 介電分析成果

(1)NCU 紅土物性

該測試使用 NCU 紅土，與砂箱實驗使用的紅土相同，其土壤的粒徑分佈如圖 2-189 所示。土壤最大乾密度為 1.69、最佳含水量為 17.6%，如圖 2-190 所示。測試時使用乾燥土壤，用烤箱(110 ± 5℃)乾燥 24 小時。在室溫下靜置後，再將水加入土壤中以達到設計含水量。樣品的詳細參數如表 2-21 所示。

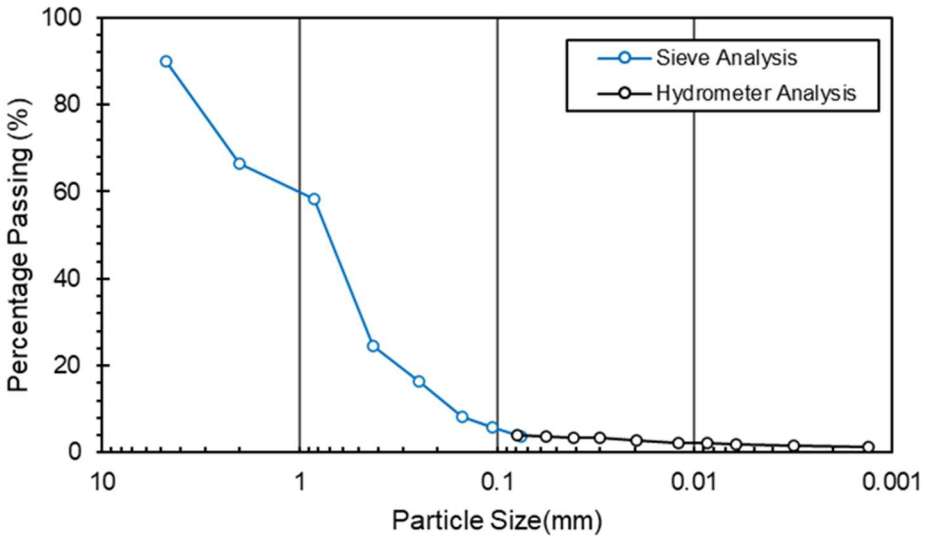


圖 2-189NCU 紅土粒徑分布曲線圖

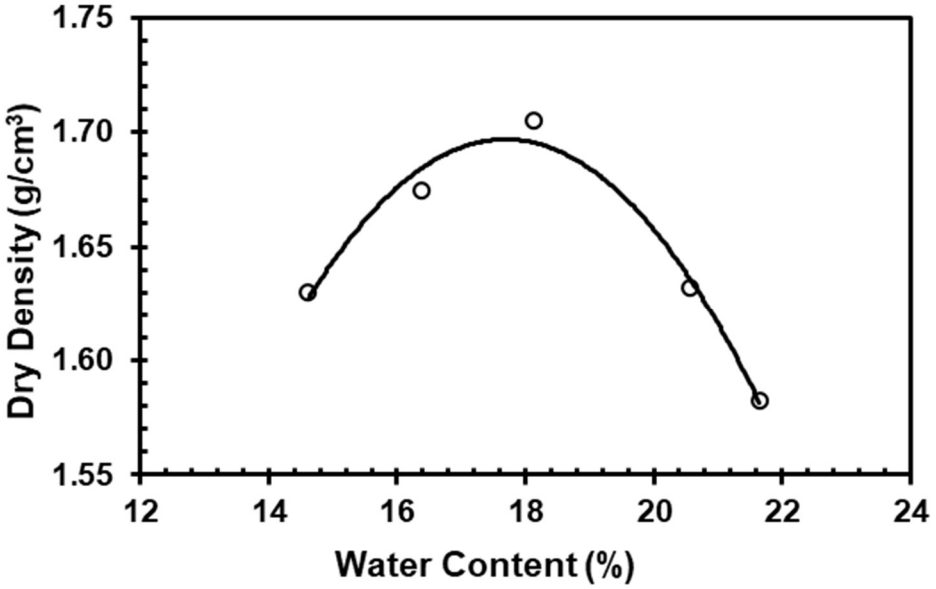


圖 2-190NCU 紅土最佳含水量曲線圖

(2)測試組成果

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 2-191 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 2-192 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 Ka 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。

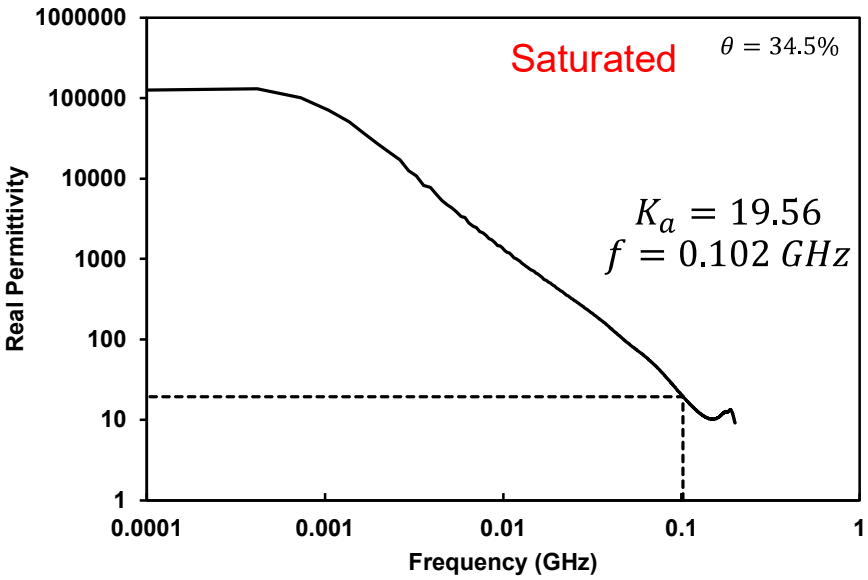


圖 2-191 VNA 於飽和土壤之介電頻譜計算結果

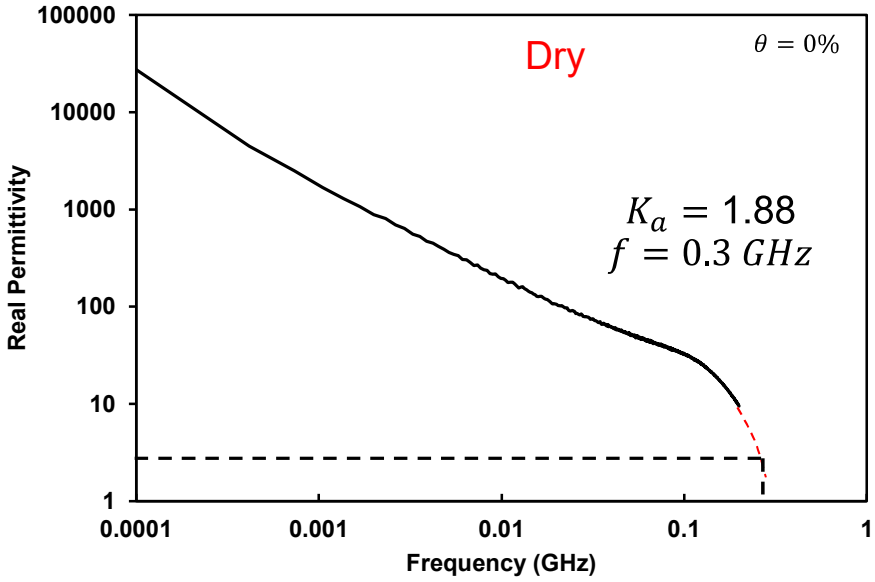


圖 2-192 VNA 於乾土之介電頻譜計算結果

圖 2-196、圖 2-197 與圖 2-198 顯示同密度不同含水量與不同密度同含水量之介電頻譜計算結果，由於本研究採用之 VNA 範圍高頻有限，目前仍嘗試透過不同之設備擴展頻寬，分析不同頻率之介電常數。

表 2-21 土壤試體參數

Soil Parameters			Water Parameters	
Dry Density g/cm^3	Gravimetric Water Content $\%\,(g/g)$	Volumetric Water Content $\%\left(cm^3/cm^3\right)$	Conductivity μS	pH
1.4	10.7	15.0	0	5.5
	14.3	20.0	0	5.5
	17.9	25.0	0	5.5
1.5	13.3	20.0	0	5.5
	16.7	25.0	0	5.5
	20.0	30.0	0	5.5
1.6	12.5	20.0	0	5.5

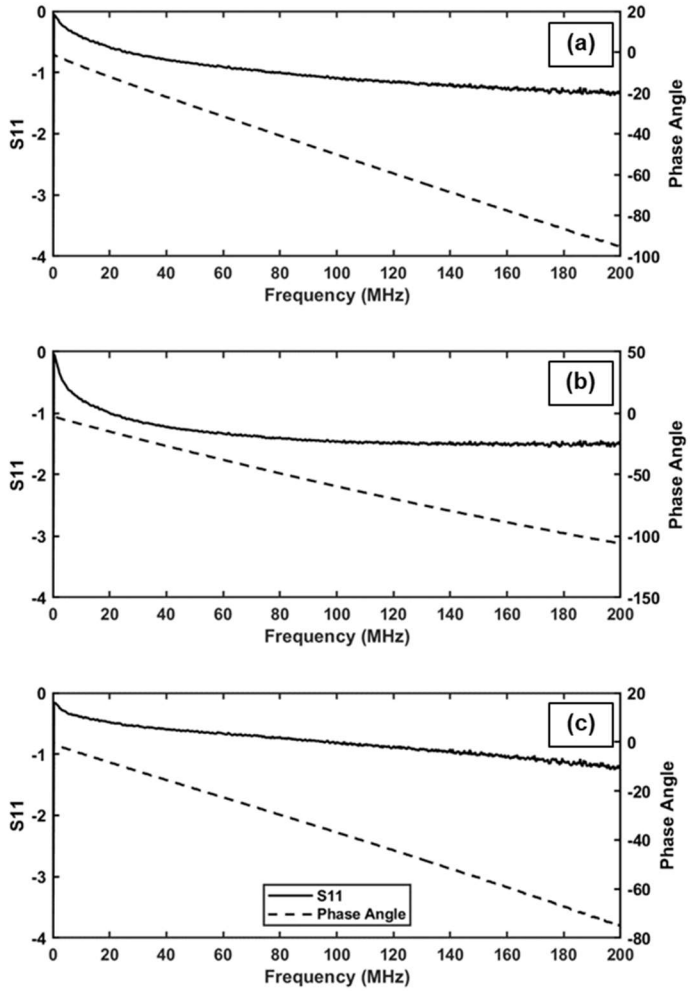


圖 2-193 不同體積含水量的 S11 與相位角(土壤乾密度 $1.4g/cm^3$)(a)15%，(b)20%，和(c)25%

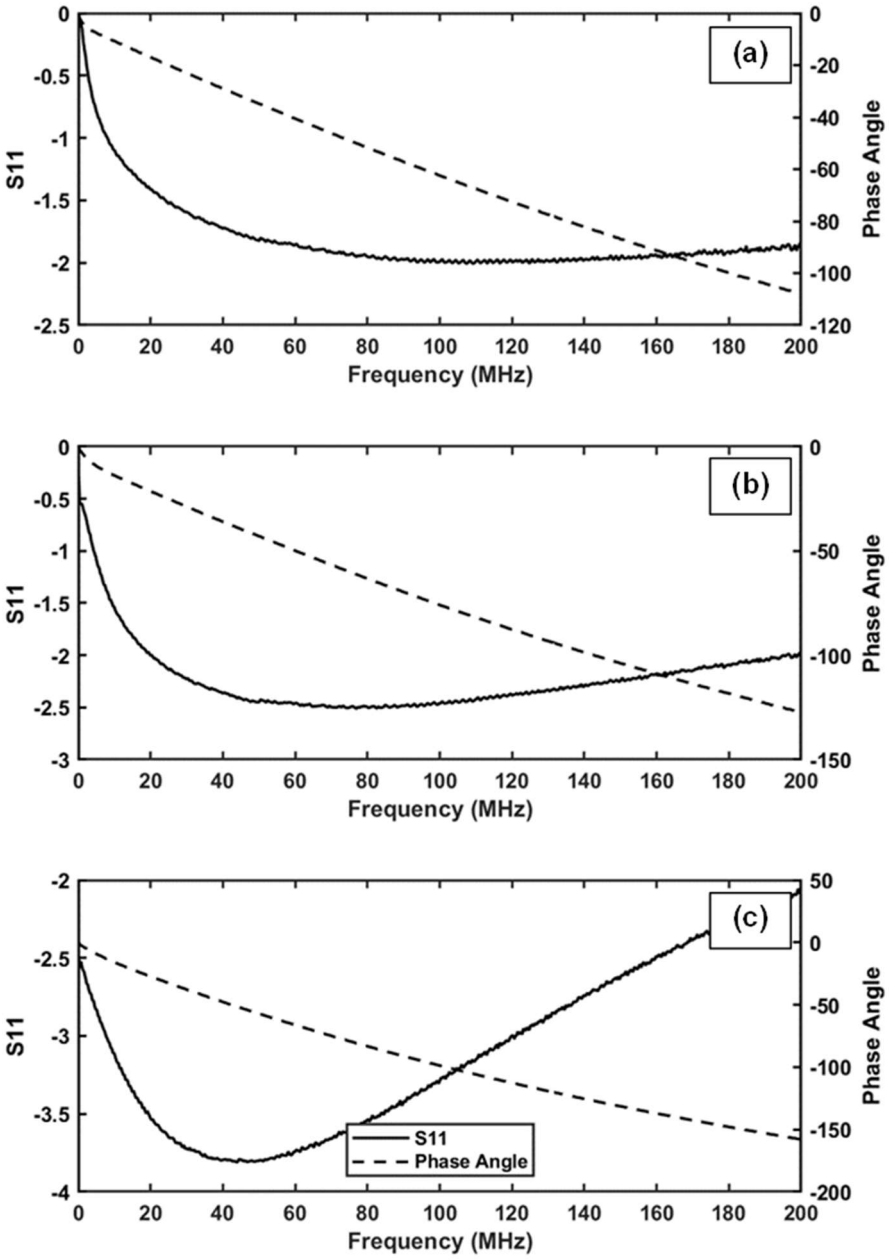


圖 2-194 不同體積含水量的 S11 與相位角(土壤乾密度 $1.5g/cm^3$)(a)20%，(b)25%，和(c)30%

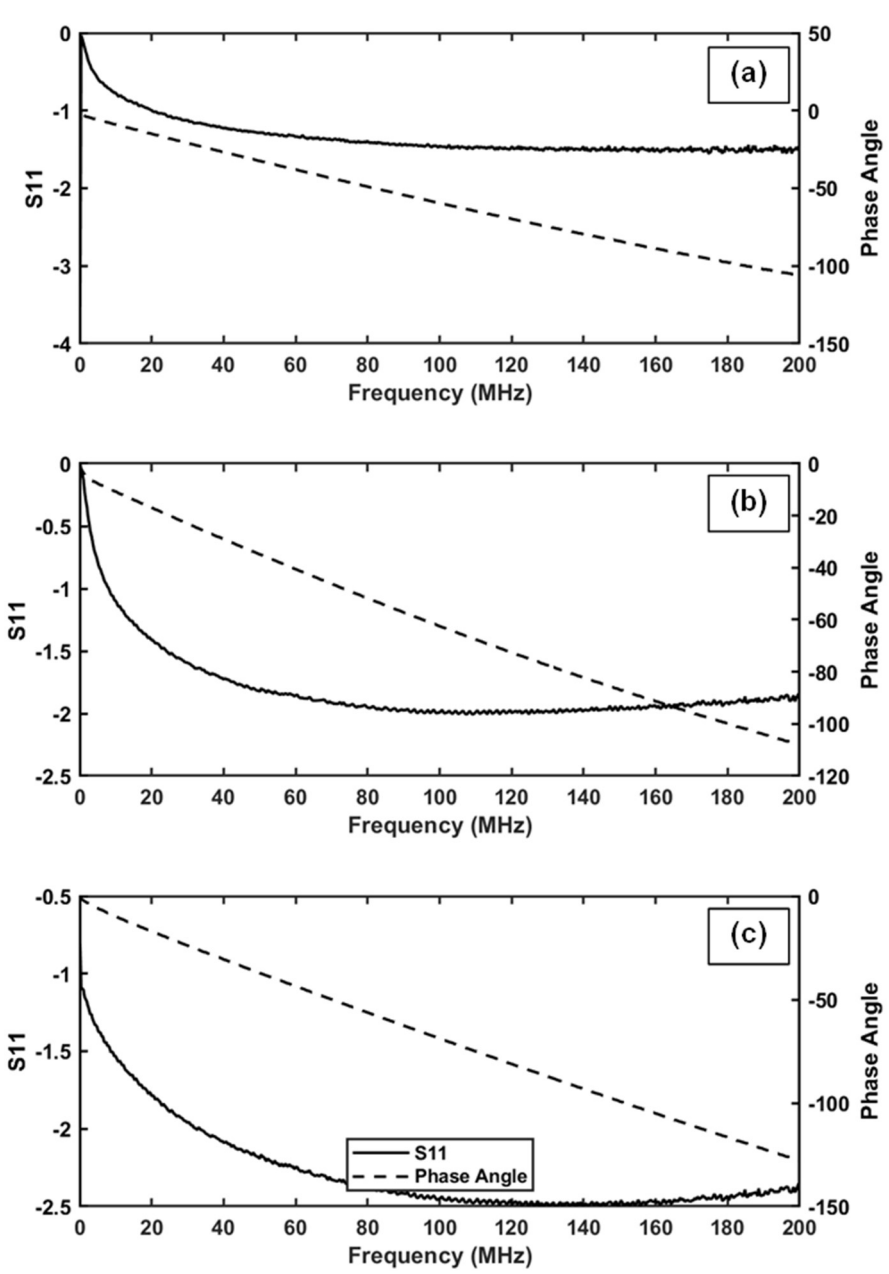


圖 2-195 S11 與相位角：(a)1.4g/cm^3，(b)1.5g/cm^3和(c)1.6g/cm^3乾密度

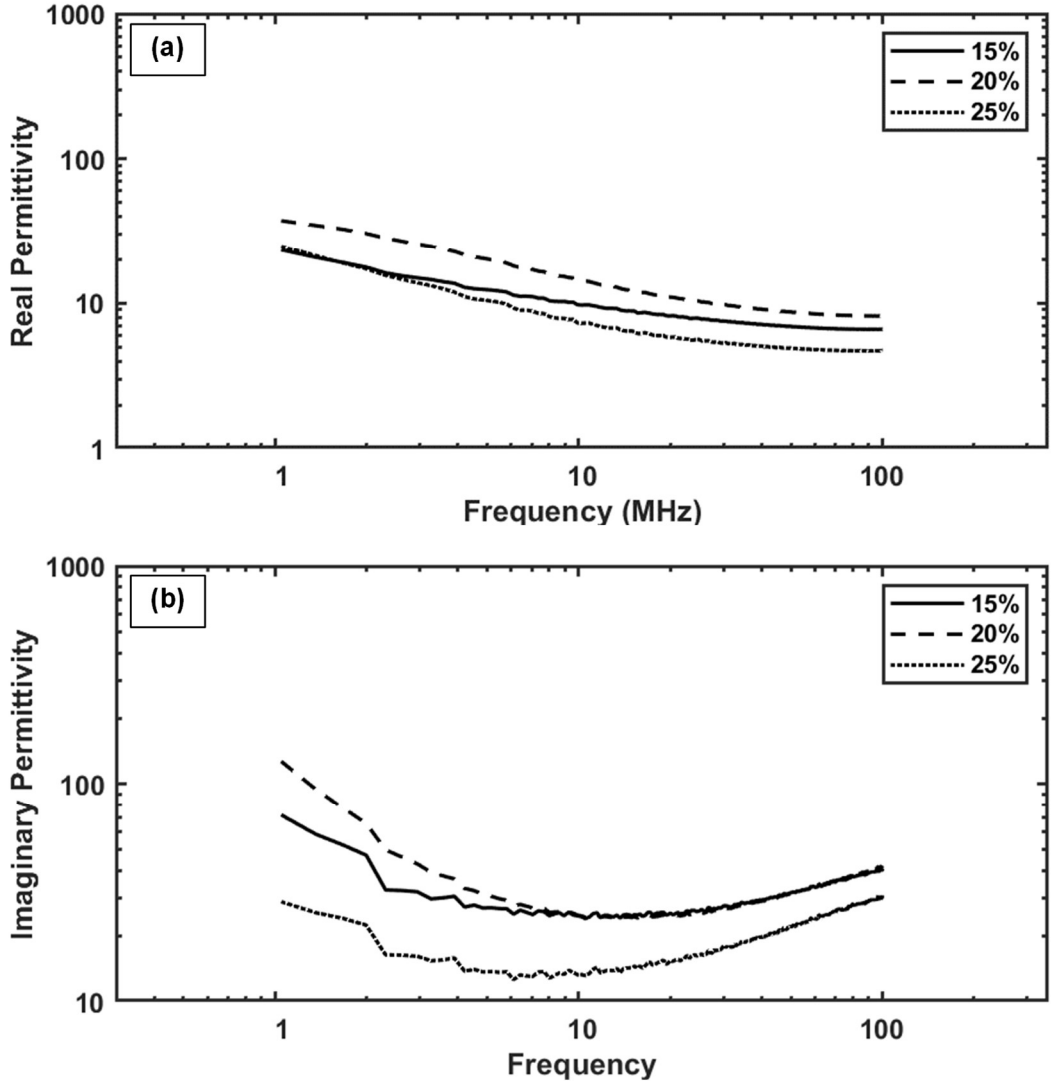


圖 2-196(a)實部介電常數，(b)虛部介電常數(1.4g/cm^3乾密度與不同體積含水量)

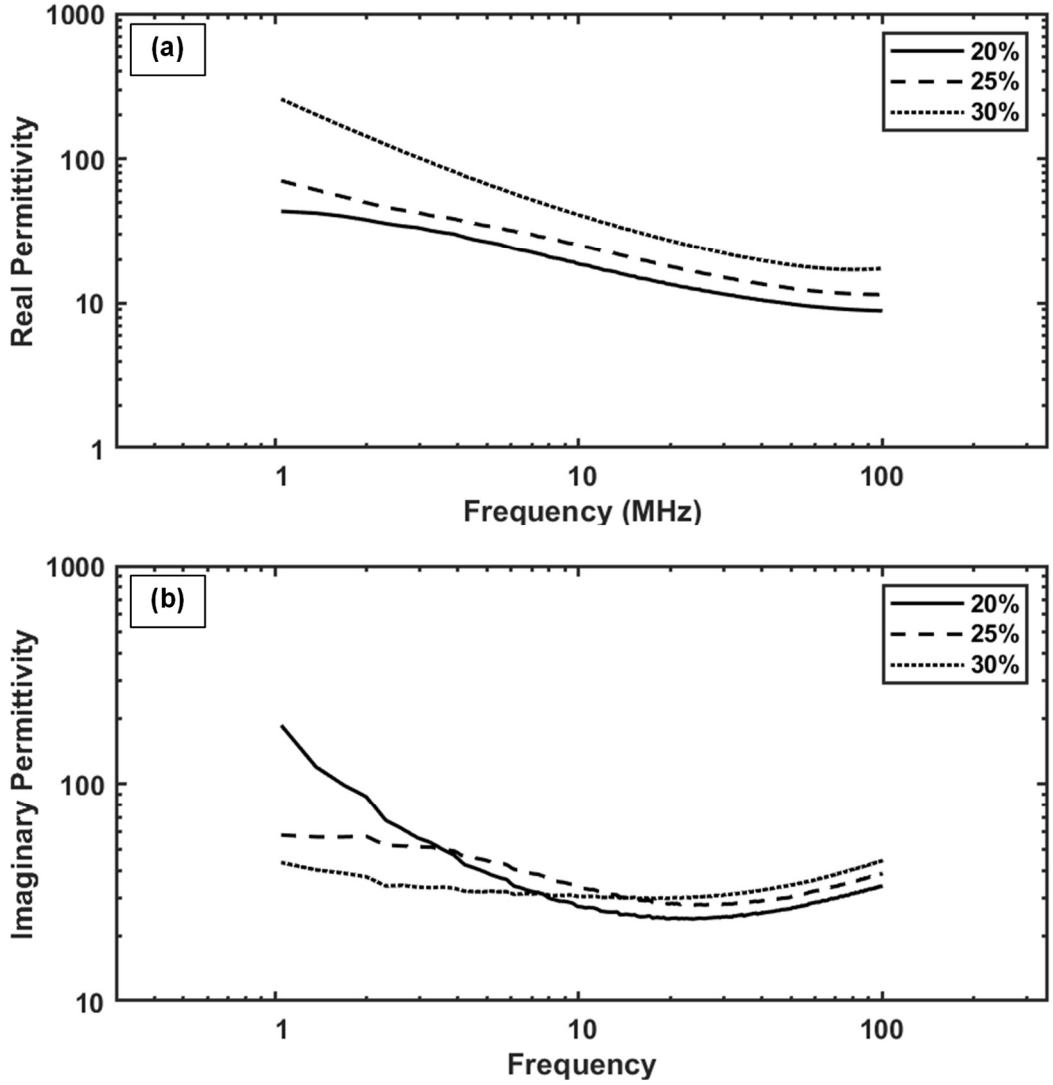


圖 2-197(a)實部介電常數，(b)虛部介電常數(1.5g/cm^3乾密度與不同體積含水量)

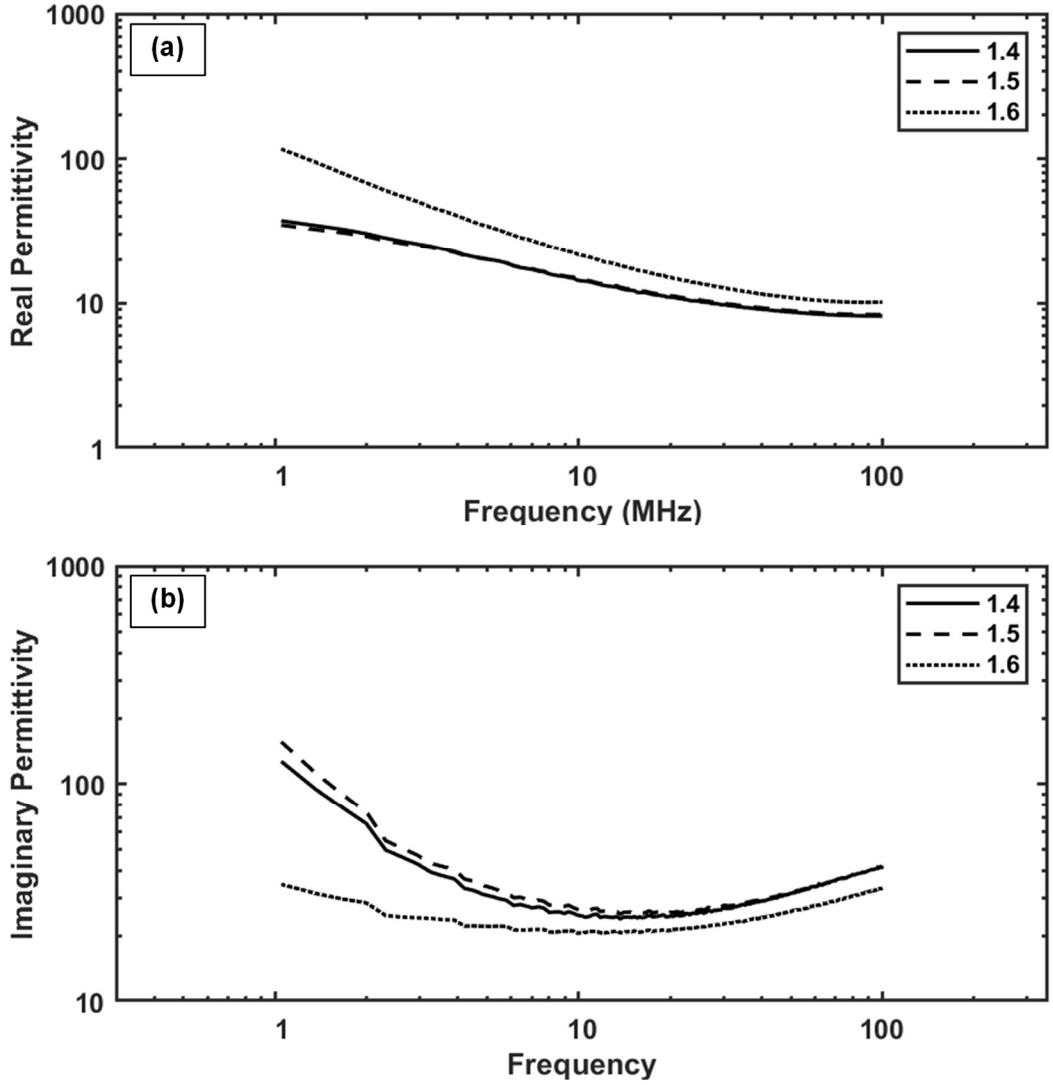


圖 2-198(a)實部介電常數，(b)虛部介電常數(20%體積含水量與不同乾密度與)

(3)NCU 紅土實驗結果

使用 Logsdon (2005)提出的程序測量乙醇和丁醇的介電頻譜。S11 散射參數的測量重複 10 次，結果取平均值。然後比較來自測量和參考的乙醇和甲醇的電解光譜(electrolytic spectra)如圖 2-199，再使用 RMSE 分析來檢查 Logsdon (2005)程序的性能，如圖 2-200 所示，其乙醇和甲醇的 RMSE 很小，其中乙醇的 RMSE 為 1.6724，丁醇的 RMSE 為

0.4941。這表明測量結果可以用於初步比較。但是此過程的結果僅在 1 MHz 至 100 MHz 頻率範圍內可靠。

根據表 2-21 測量土壤繼續測量。圖 2-200 顯示乾密度 1.35 g/cm^3 且體積含水量不同的土壤的 S11 散射參數值和 10 次測量的平均相位角。後續本研究參考與乙醇和丁醇的計算相同方法，乾密度為 1.35 g/cm^3 的土壤介電頻譜如圖 2-203，其結果沒有一個清晰的邏輯。

圖 2-201 顯示乾密度為 1.45 g/cm^3 的土壤 S11 散射參數和 10 次測量的平均相位角。圖 2-204 顯示乾密度為 1.45 g/cm^3 的土壤的介電常數。該結果表明含水量較低的土壤具有較高的介電常數值。

圖 2-202 顯示土壤乾密度為 1.35 g/cm^3 且導電度不同之 S11 散射參數和 10 次測量的平均相位角。圖 2-205 顯示該土壤的介電常數。該結果表明導電度較低的土壤在 1MHz 至 100MHz 的頻率範圍內具有較低的介電常數值。

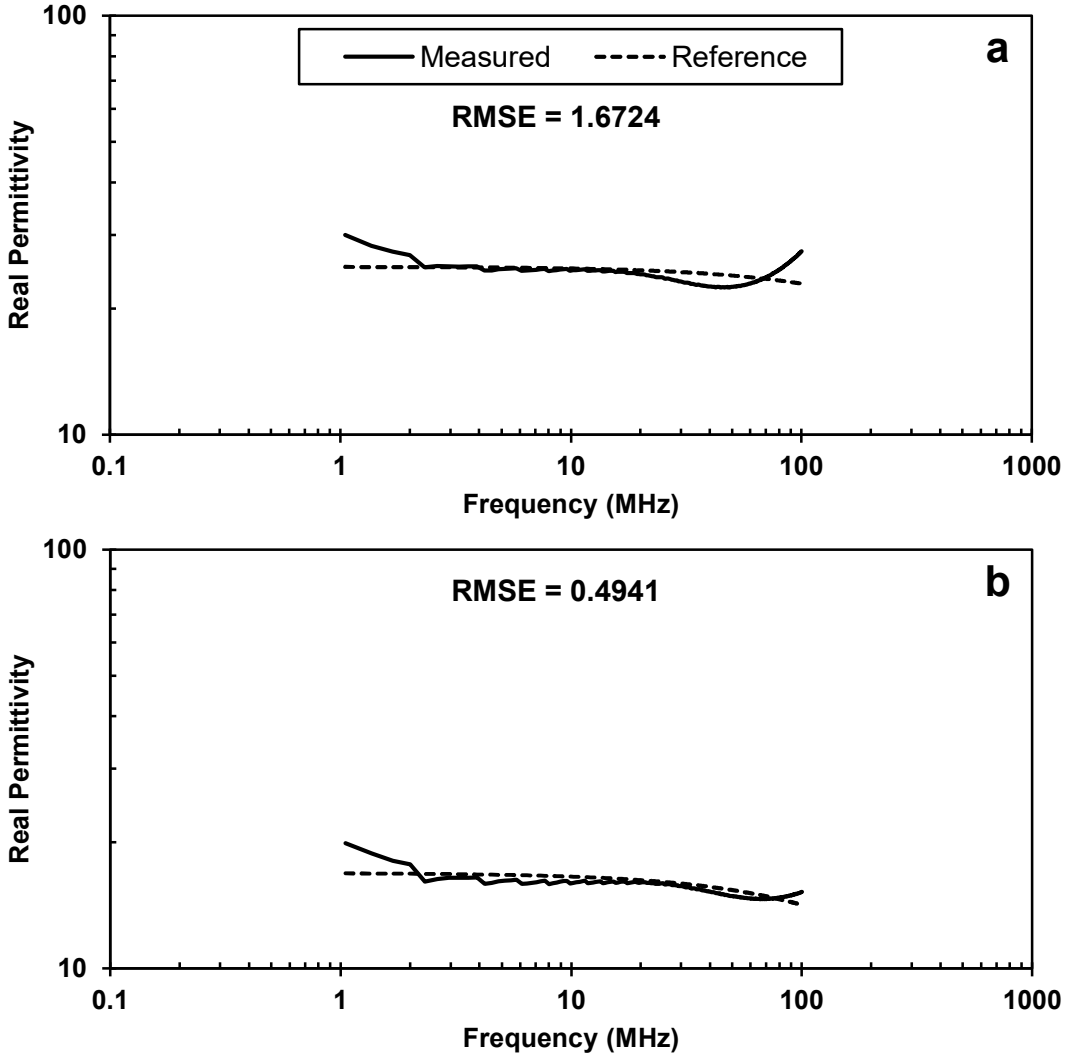


圖 2-199 測量結果與參考值的比較：(a) 乙醇和 (b) 丁醇

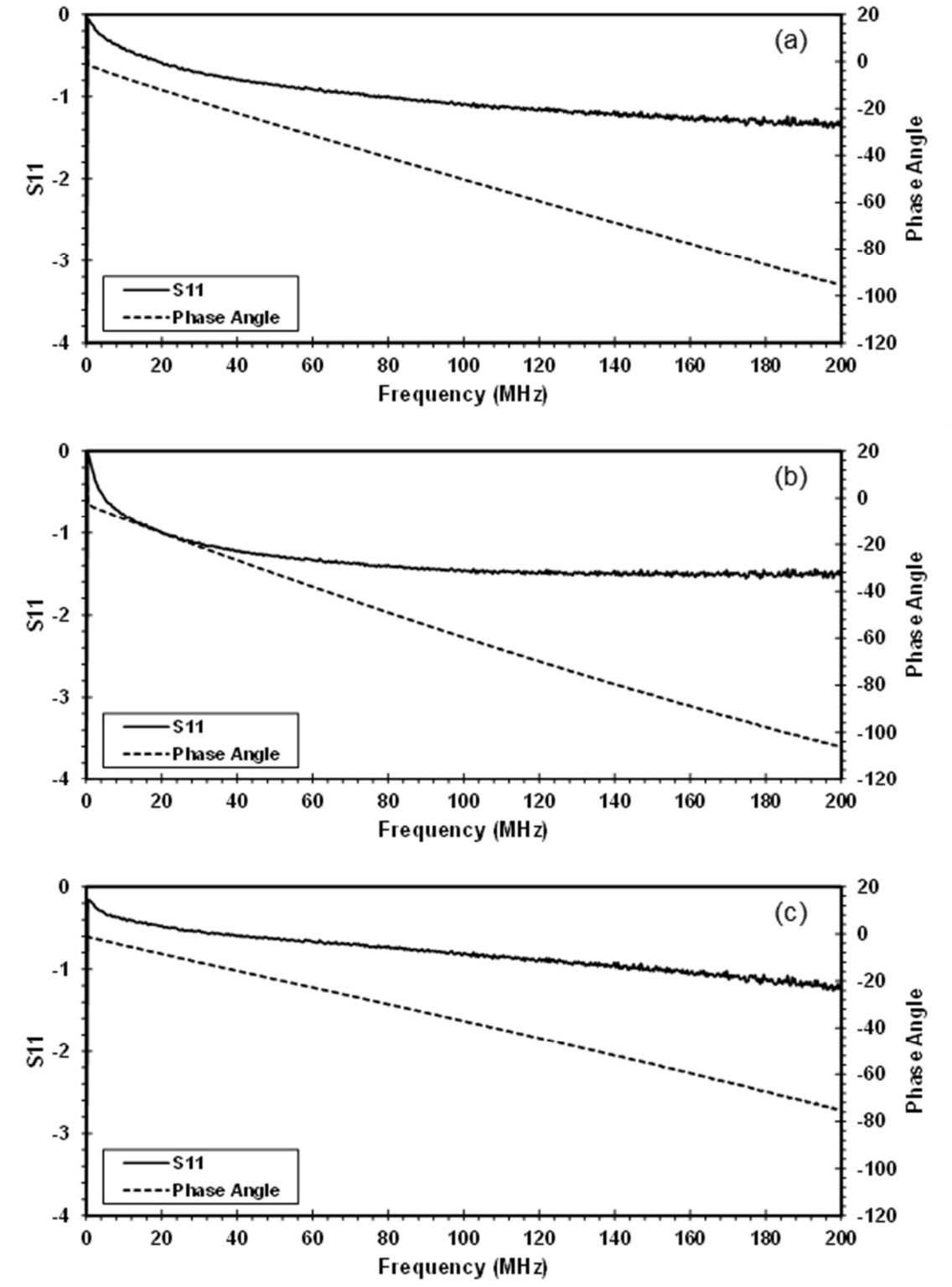


圖 2-200 在 1.35 g/cm^3 乾密度不同體積含水量之 S11 和相位角：(a) 15% (b) 20% (c) 25%.

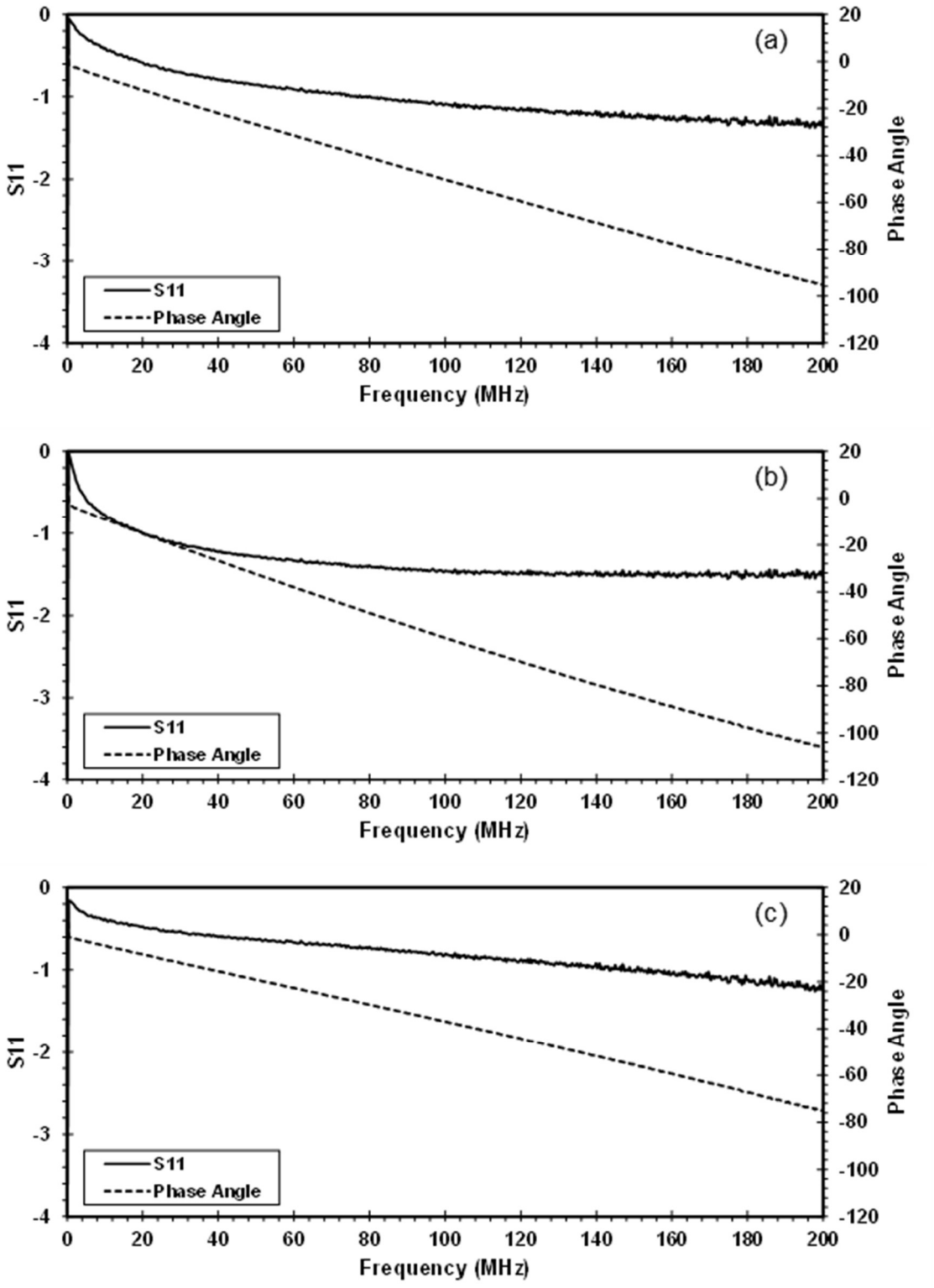


圖 2-201 在 1.45 g/cm^3 乾密度不同體積含水量之 S11 和相位角：(a) 20% (b) 25% (c) 30%.

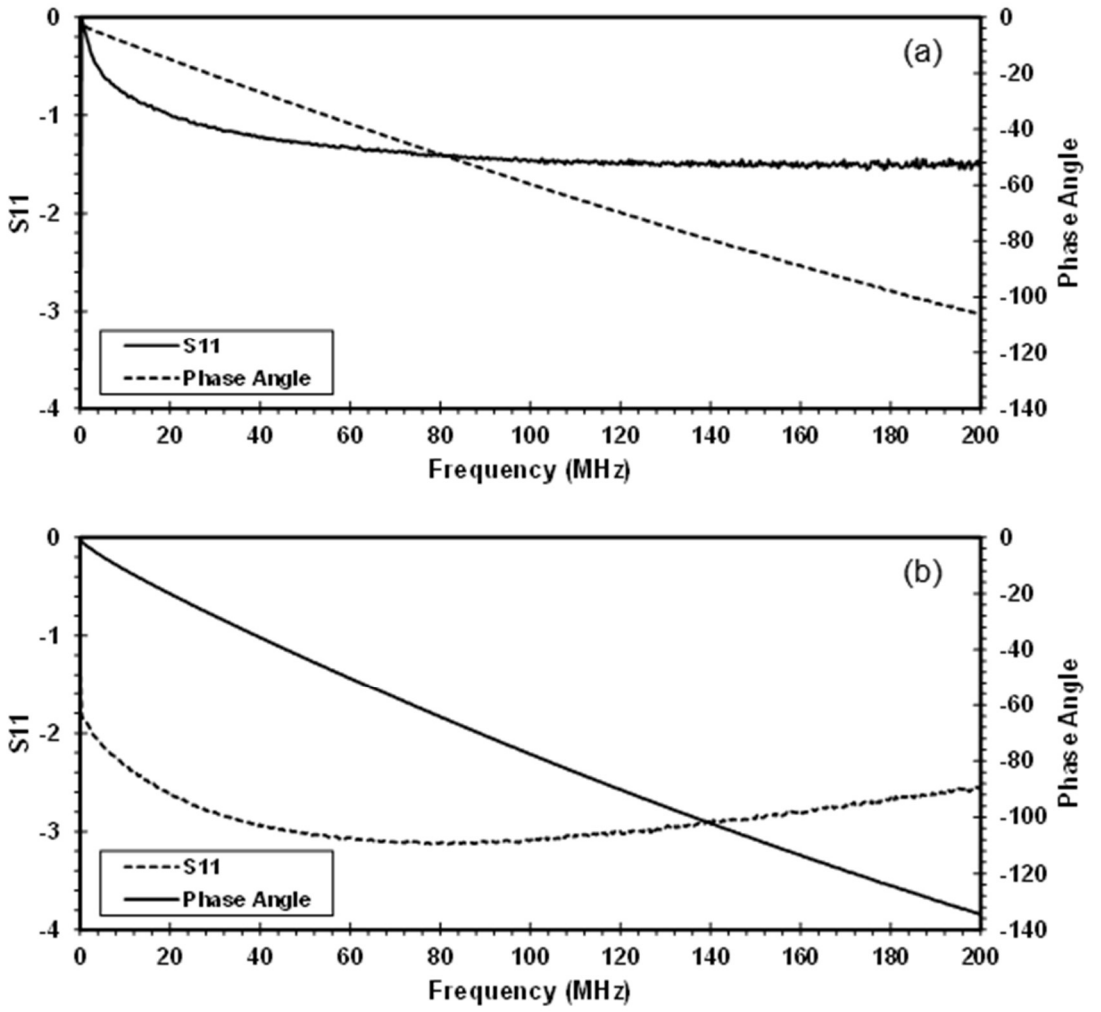


圖 2-202 在 1.35 g/cm^3 乾密度和 20%體積含水量與不同導電度之 S11 和相位角：(a) 169 μS/cm (b) 651 μS/cm 入滲水導電度

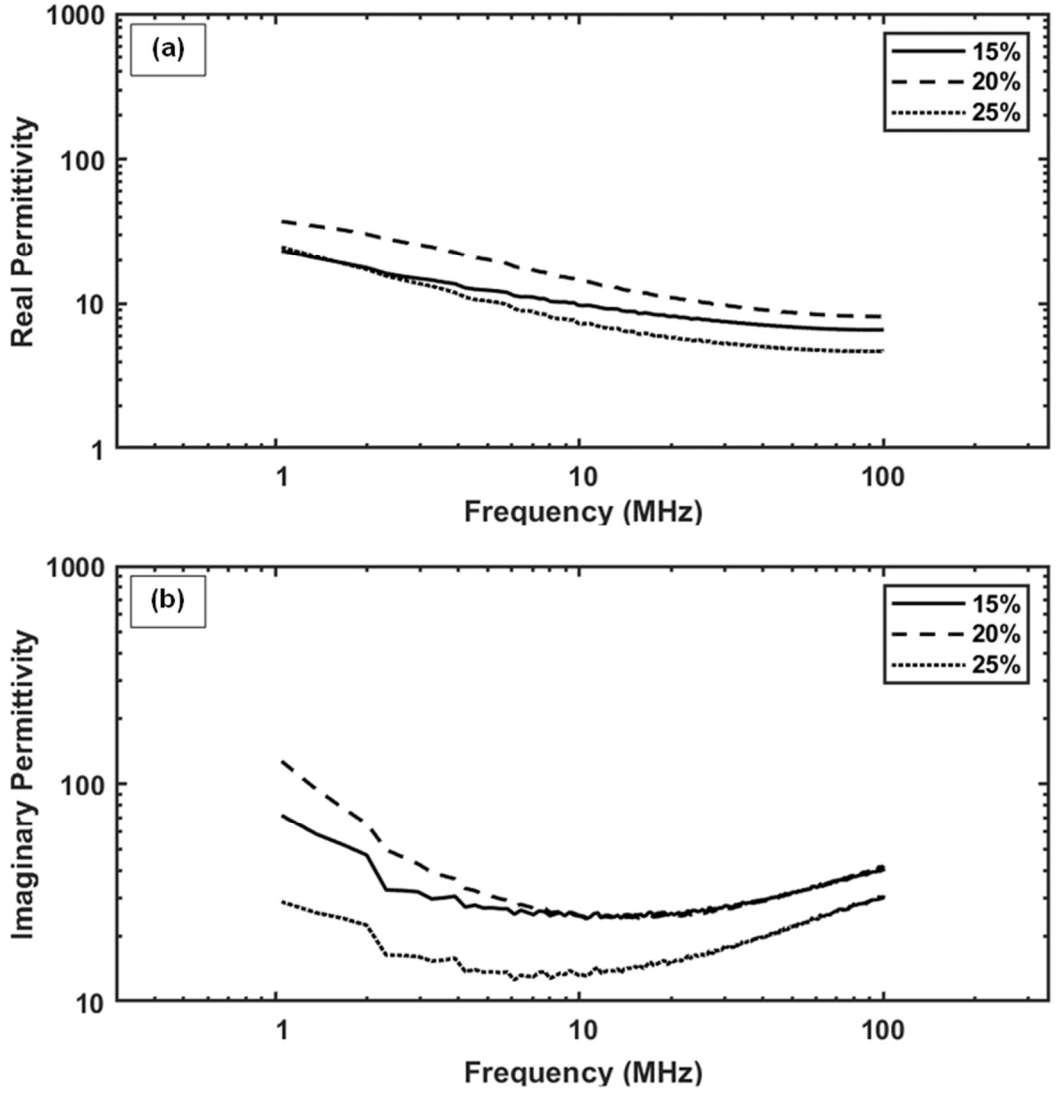


圖 2-203 (a)實數介電常數 (b)虛數介電常數(乾密度為 1.35 g/cm^3 與各不同體積含水量)

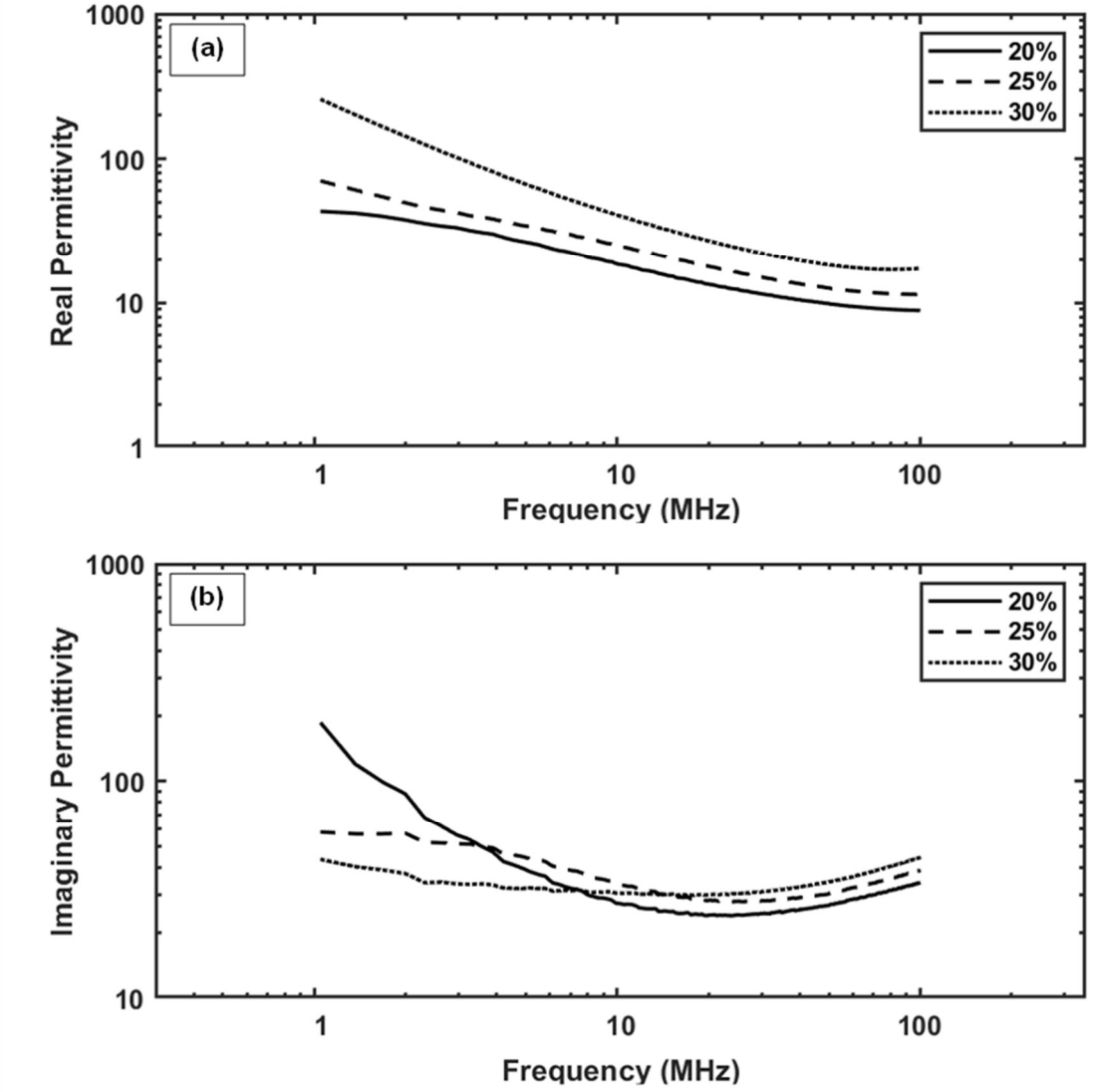


圖 2-204 (a)實數介電常數 (b)虛數介電常數(乾密度為 1.45 g/cm^3 與各不同體積含水量)

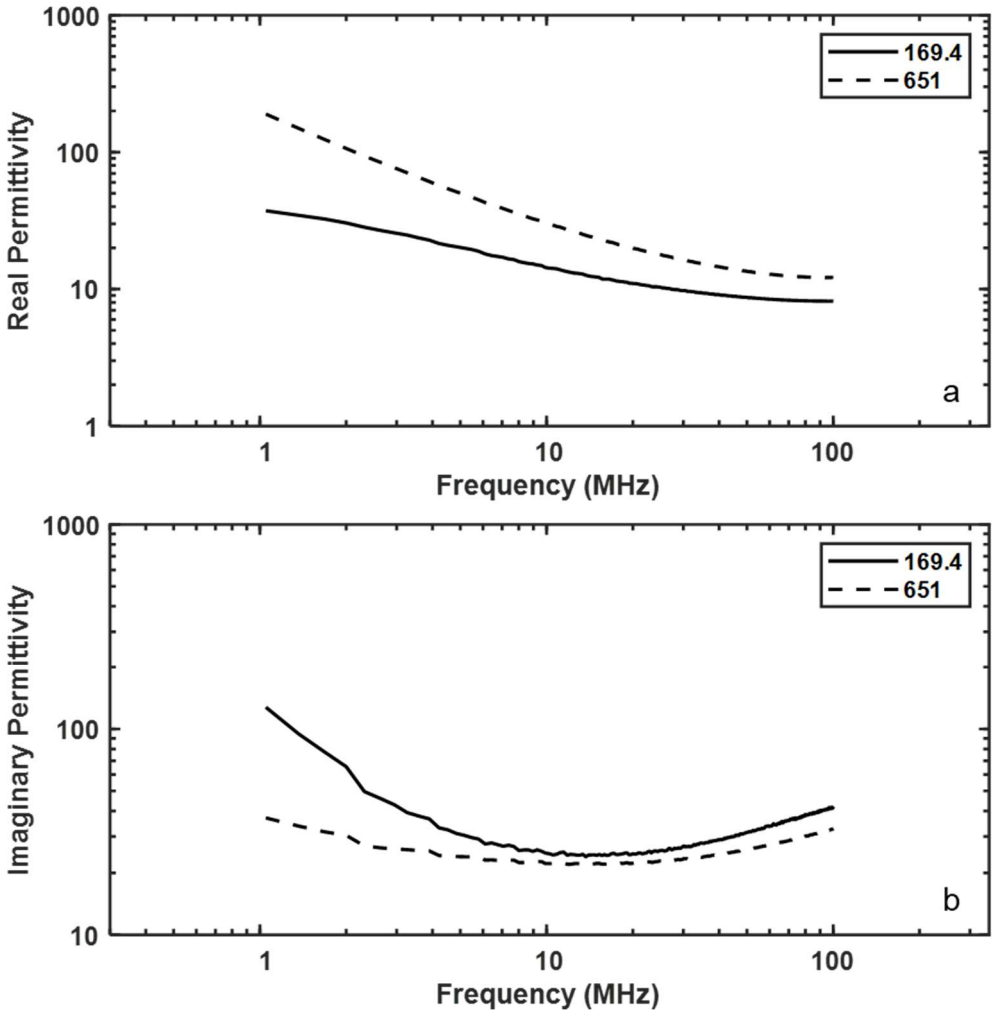


圖 2-205 (a)實數介電常數 (b)虛數介電常數(乾密度為 1.35 g/cm^3 與各不同導電度)

(五)TDR 壓力鍋實驗-介電頻譜分析

表 2-22 顯示 TDR 壓力鍋各傳輸線參數，圖 2-206 顯示了 TDR 建模結果，然後使用這些參數來模擬土壤波形。圖 2-207 至 圖 2-212 為樣本 1 原始波形與 TDR 全波形反算分析法之模擬波形結果，含水量分別為 30%、25%和 20%。數據僅在乾燥過程中獲取，因為此過程之數據比潤濕過程中的變化更穩定。由於潤濕過程中數據變化非常快，因此初步

選擇樣本 1 中 30%、25% 和 20% 的含水量作為實驗目標，另外主要因為 VNA 實驗中土壤也使用該含水量。該樣本的 TDR 全波形反算分析法結果如表 2-23。樣本 1 的土壤 TDR 全波形反算分析法介電頻譜和相速度分析法 PVA 介電頻譜之結果如圖 2-221 至圖 2-223 所示。

對於樣本 2，TDR 全波形反算分析法之模擬波形結果如圖 2-213 至 圖 2-218。與前一個樣本一樣，數據僅在乾燥過程中獲取。圖 2-224 至圖 2-226 分別為樣本 2 含水量為 30%、25%、20%的 TDR 全波形反算分析法之模擬波形結果。測試結果的土壤參數如表 2-24。以及高導電度樣本 3 的 TDR 全波形反算分析法之模擬波形結果如圖 2-219。測試結果的土壤參數如表 2-25，以及土壤的介電頻譜圖 2-227。

表 2-22 測量空氣時各段的 TDR 全波形反算分析法參數

Section	Length (m)	ε_{dc}	ε_{∞}	f_{rel}	σ	β
Cable	2.01500	2.225	2.225	1	0	0
Connector	0.02850	3.000	3.000	1	0	0
Probe	0.09445	1	1	1	0	0

表 2-23 樣本 1 在乾密度為 1.35g/cm^3的各體積含水量之 TDR 全波形反算分析參數

時間點	體積含水量	ε_{dc}	ε_{∞}	f_{rel}	σ	β
Drying – Cycle 1	25	54.04	16.40	4.69 × 106	0.549	0.01009
Drying – Cycle 1	20	38.48	15.88	1.16 × 107	0.388	0.00859
Drying – Cycle 1	15	30.21	13.28	1.53 × 107	0.339	0.00648
Drying – Cycle 2	25	42.33	20.48	1.84 × 107	0.204	0.01156
Drying – Cycle 2	20	36.30	16.99	1.84 × 107	0.207	0.00857
Drying – Cycle 2	15	37.12	11.65	5.45 × 106	0.516	0.00466

表 2-24 樣本 2 在乾密度為 1.45g/cm^3的各體積含水量之 TDR 全波形反算分析參數

時間點	體積含水量	ε_{dc}	ε_{∞}	f_{rel}	σ	β
Drying – Cycle 1	30	50.02	11.90	4.00 × 106	0.681	0.00748
Drying – Cycle 1	25	38.52	17.68	2.72 × 107	0.046	0.00730
Drying – Cycle 1	20	28.80	13.71	3.08 × 107	0.281	0.00649
Drying – Cycle 2	30	57.61	10.14	1.08 × 106	0.802	0.00695
Drying – Cycle 2	25	31.91	14.86	5.52 × 107	0.074	0.00803
Drying – Cycle 2	20	28.54	9.29	5.25 × 107	0.212	0.00744

表 2-25 樣本 1 164.5 µS/cm 導電度與樣本 3 657 µS/cm 導電度在 20%體積含水量的 TDR 全波形反算分析參數

時間點	體積含水量	ε_{dc}	ε_{∞}	f_{rel}	σ	β
Sample 1 - 164.5 µS/cm	20	38.48	15.88	1.16 × 107	0.388	0.00859
Sample 3 - 657 µS/cm	20	44.61	15.43	1.23 × 106	0.521	0.00406

表 2-26 樣本 1 pH = 6.9 導電度與樣本 4 pH = 5.0 導電度在 20%體積含水量的 TDR 全波形反算分析參數

時間點	體積含水量	ε_{dc}	ε_{∞}	f_{rel}	σ	β
Sample 1 - 164.5 µS/cm, pH = 6.9	20	38.48	15.88	1.16 × 107	0.388	0.00859
Sample 4 – 164.5 µS/cm, pH = 5.0	20	37.66	13.09	9.93 × 106	0.363	0.00938

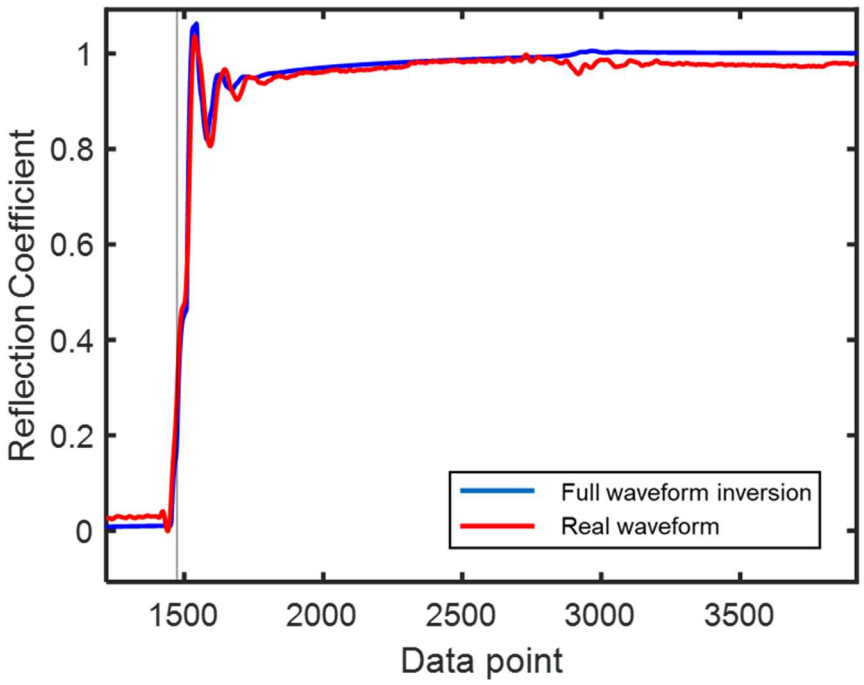


圖 2-206 TDR 全波形反算分析的模擬波形結果

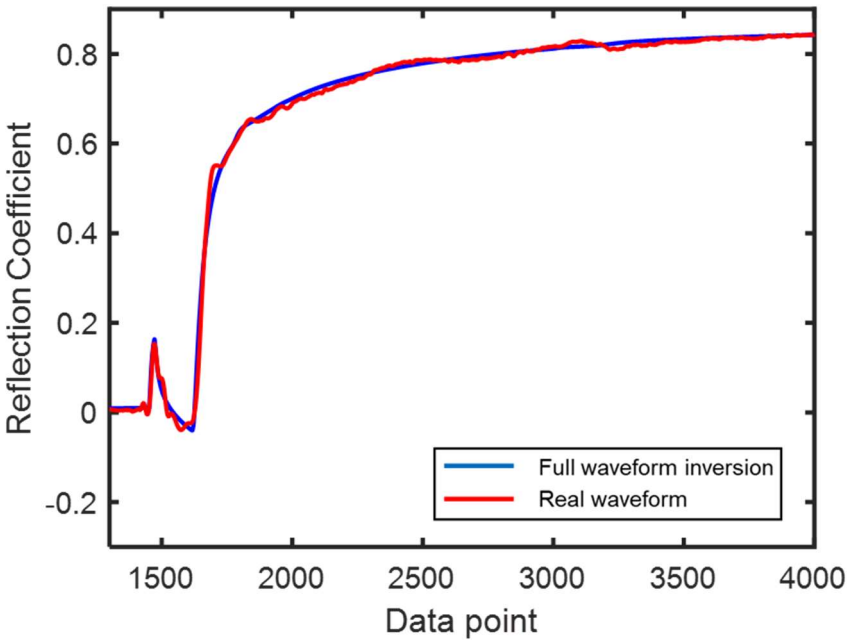


圖 2-207 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

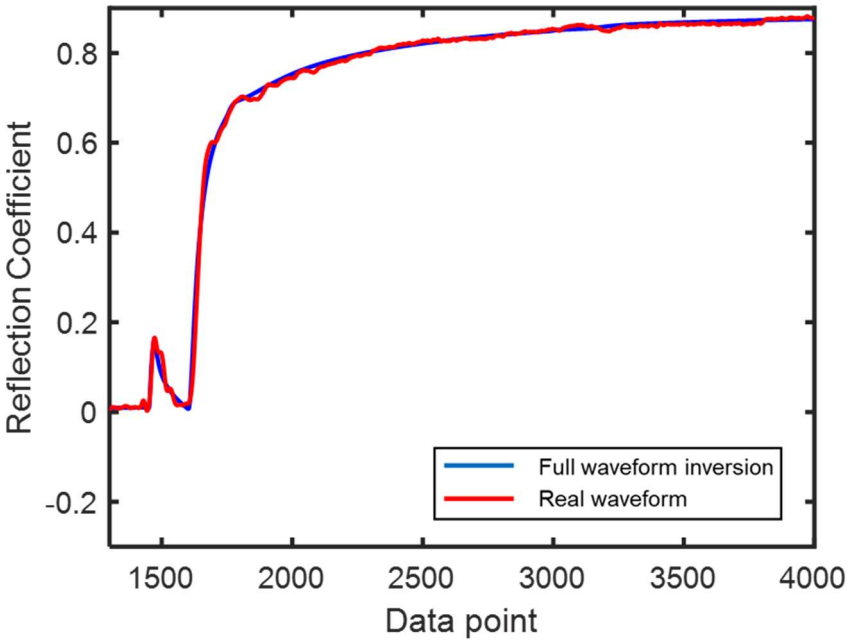


圖 2-208 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

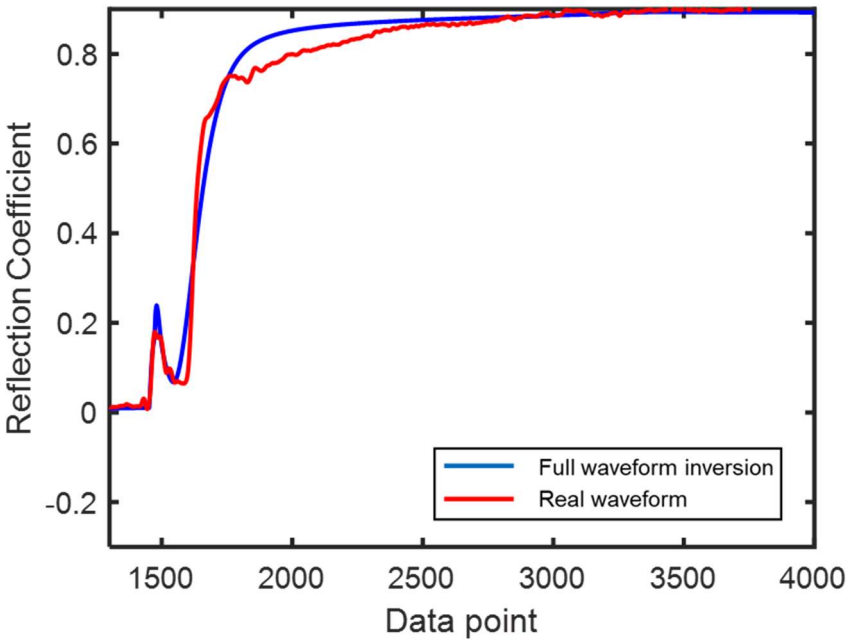


圖 2-209 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 15% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

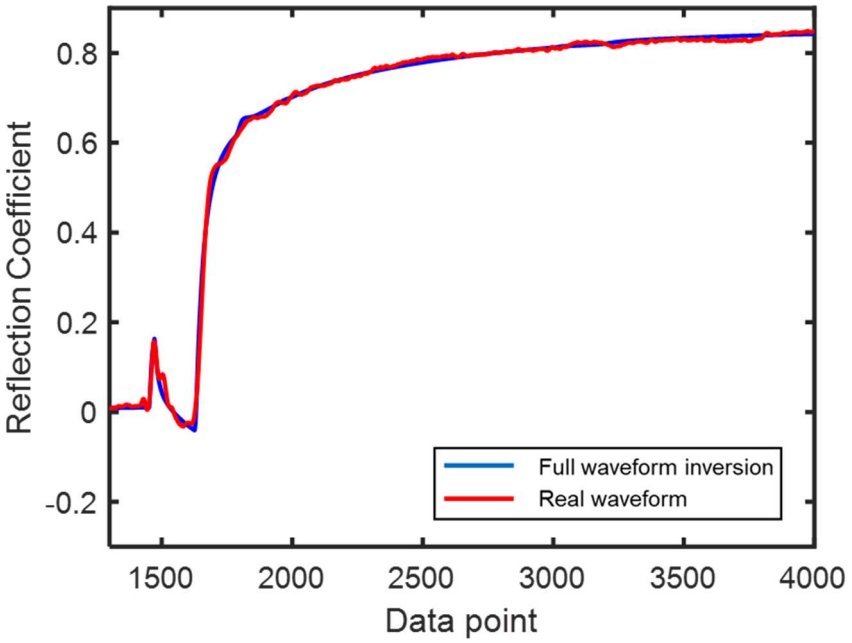


圖 2-210 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

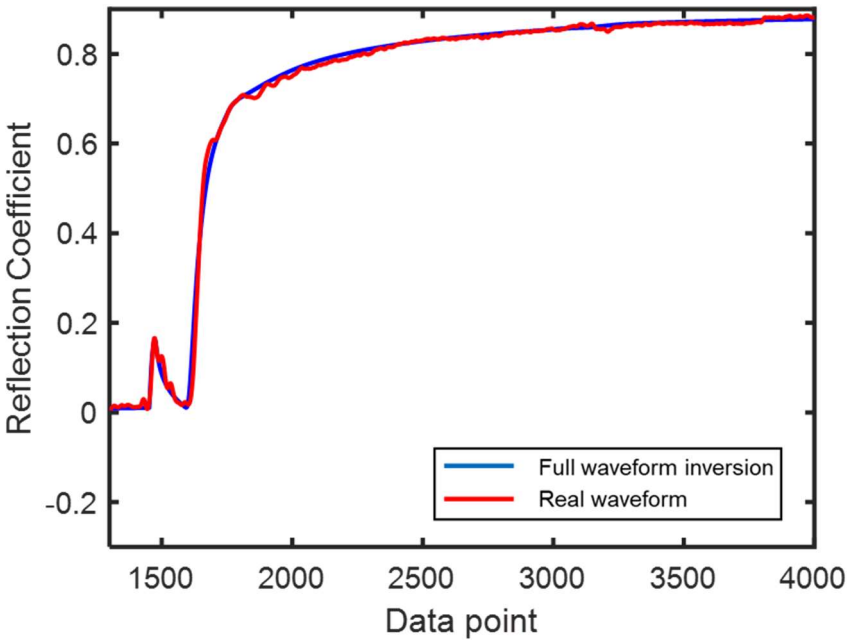


圖 2-211 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

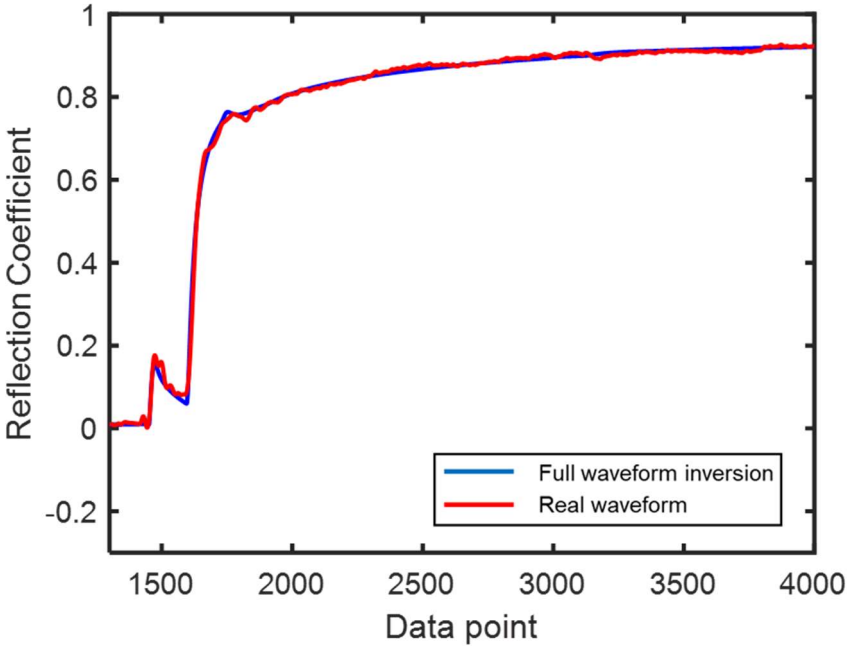


圖 2-212 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度和 15% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

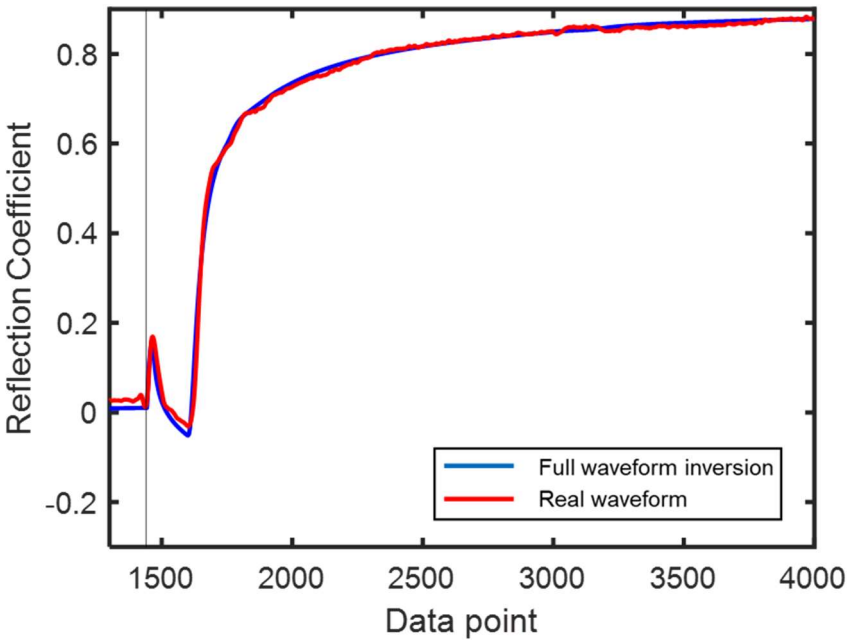


圖 2-213 循環 1 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 30% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

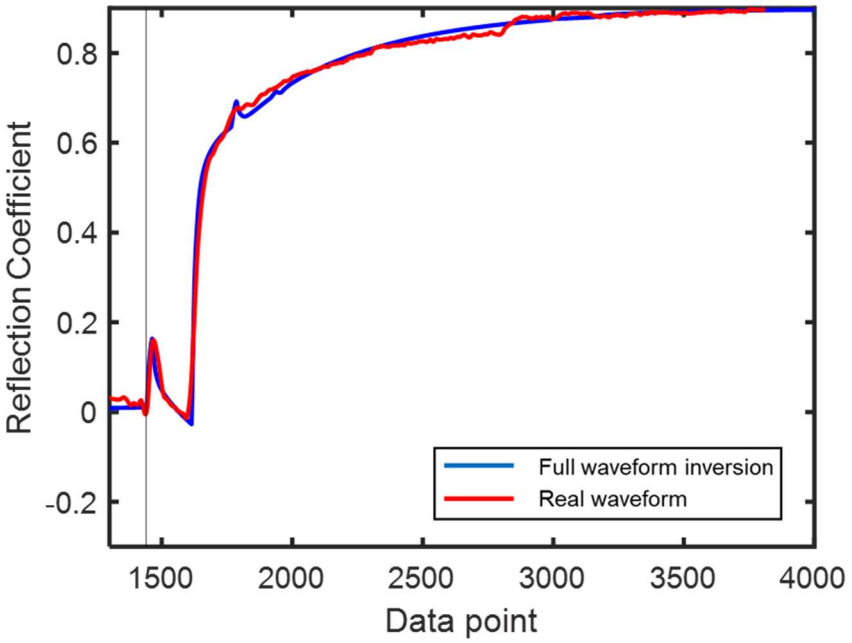


圖 2-214 循環 1 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

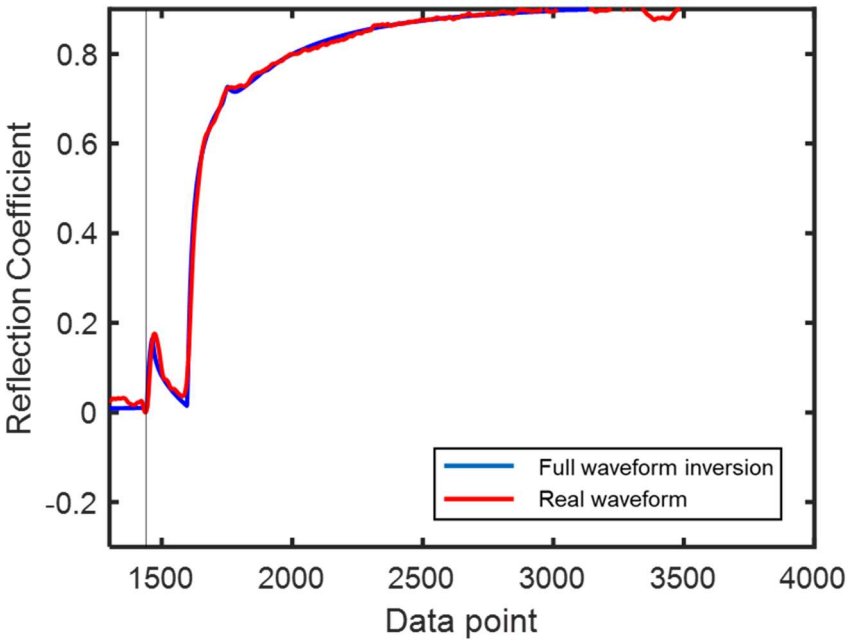


圖 2-215 循環 1 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

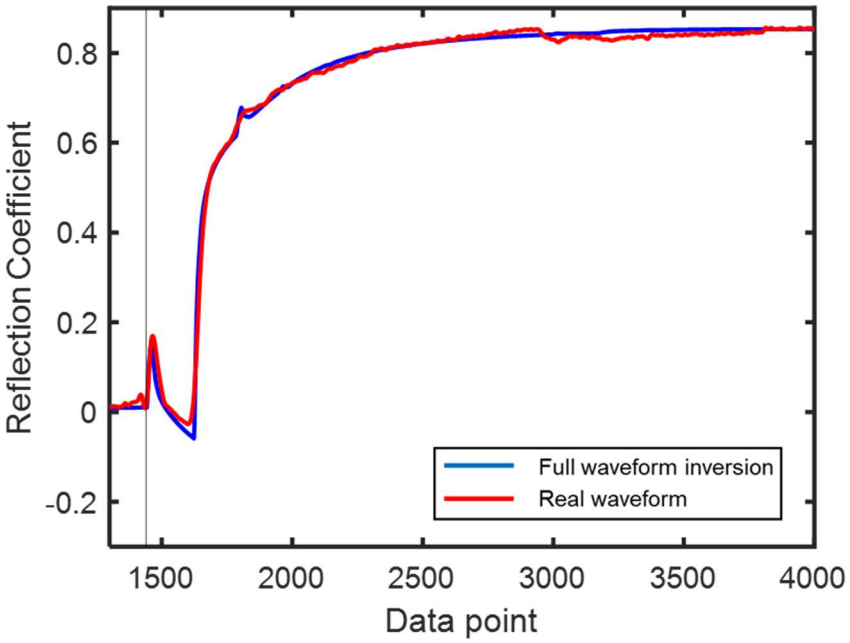


圖 2-216 循環 2 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 30% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

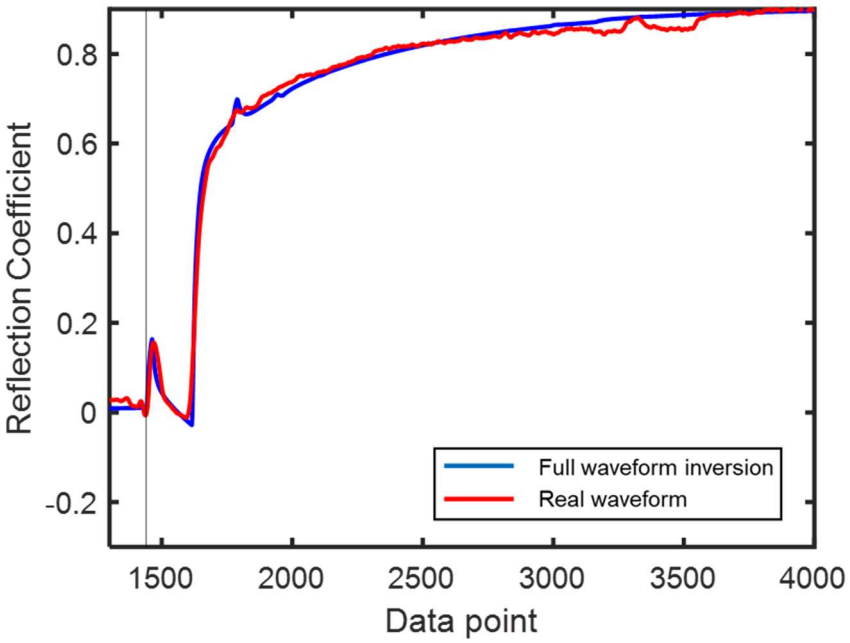


圖 2-217 循環 2 乾燥過程中體積含水量為 1.45 g/cm^3 乾密度和 25% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

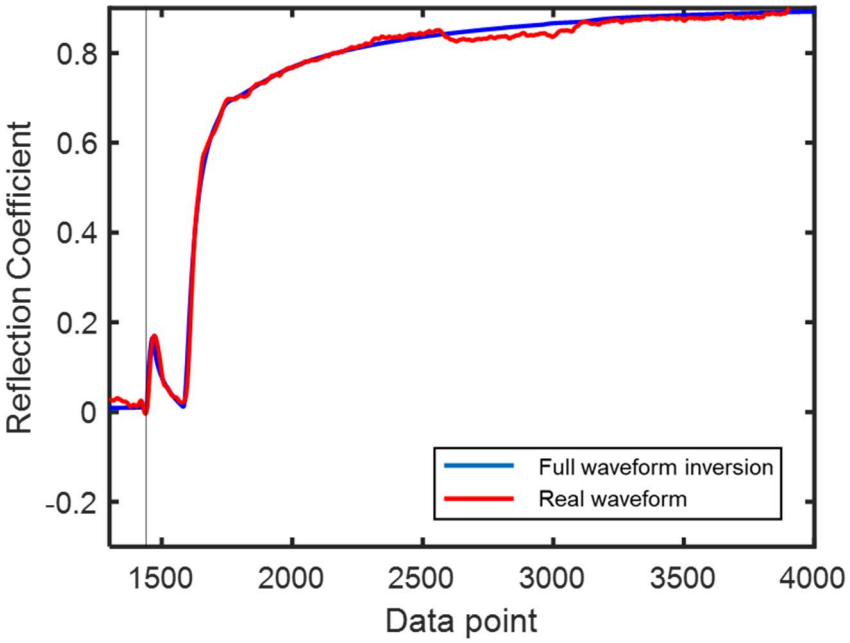


圖 2-218 循環 2 乾燥過程中 1.45 g/cm^3 乾密度和 20% 體積含水量的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

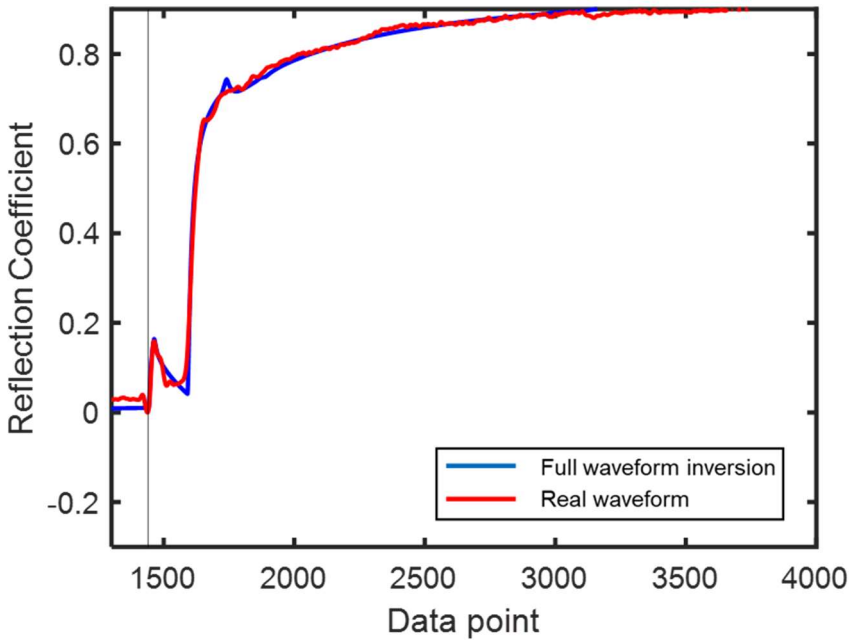


圖 2-219 循環 2 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度、20% 體積含水量和 657 μS/cm 導電度(樣本 3)的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

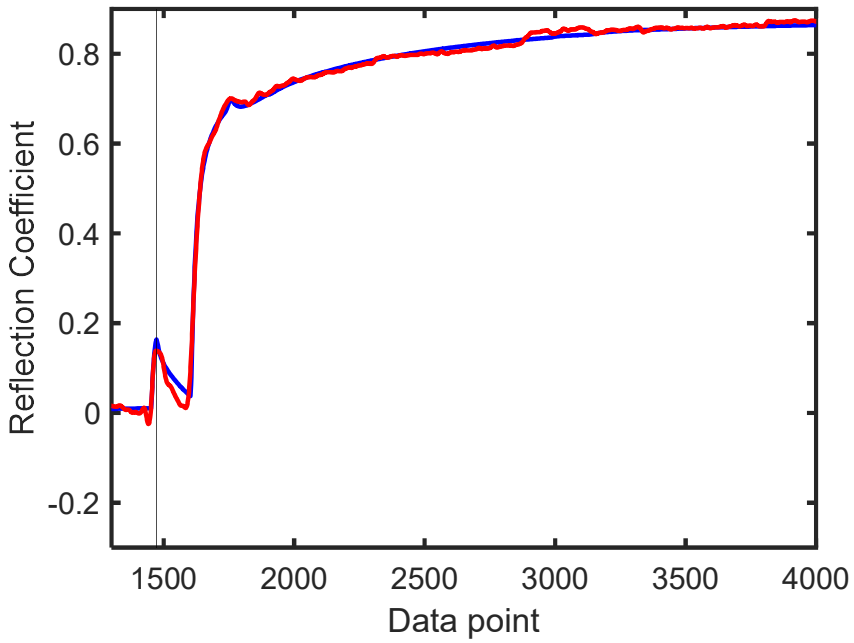


圖 2-220 循環 1 乾燥過程中 1.35 g/cm^3 乾密度、20%體積含水量和 pH = 5 酸鹼值(樣本 4) 的 TDR 全波形反算分析模擬波形結果

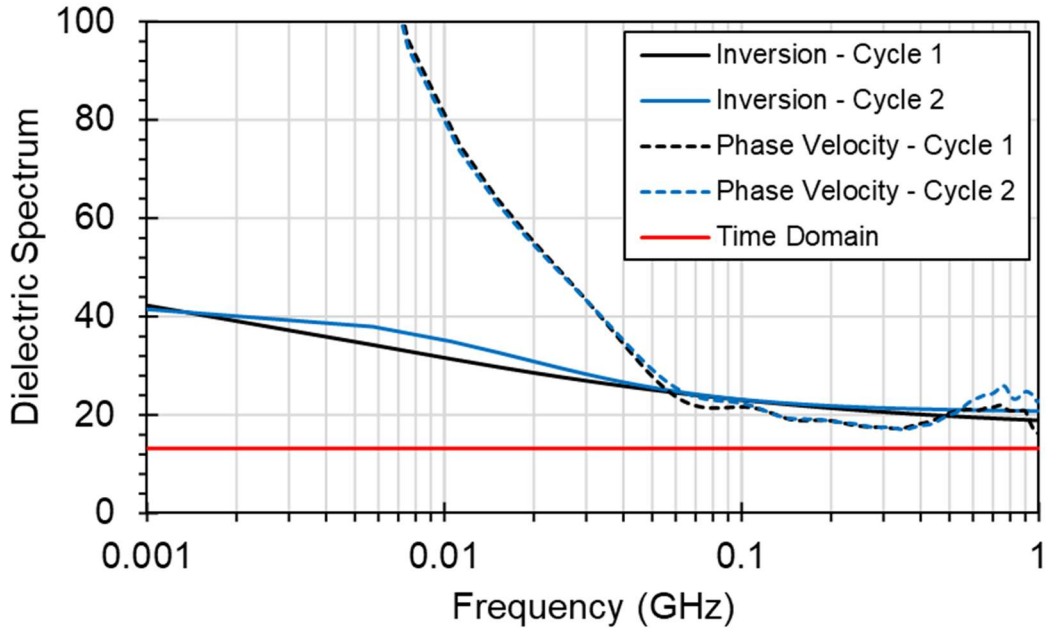


圖 2-221 樣本 1 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(1.35 g/cm^3 乾密度和 25%體積含水量)

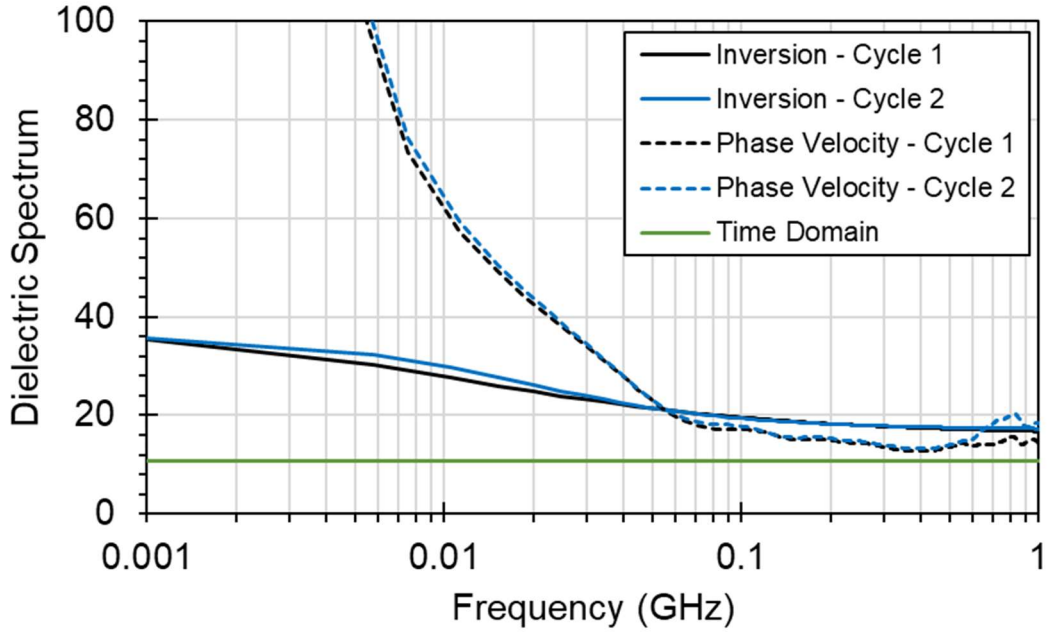


圖 2-222 樣本 1 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(1.35 g/cm^3 乾密度和 25%體積含水量)

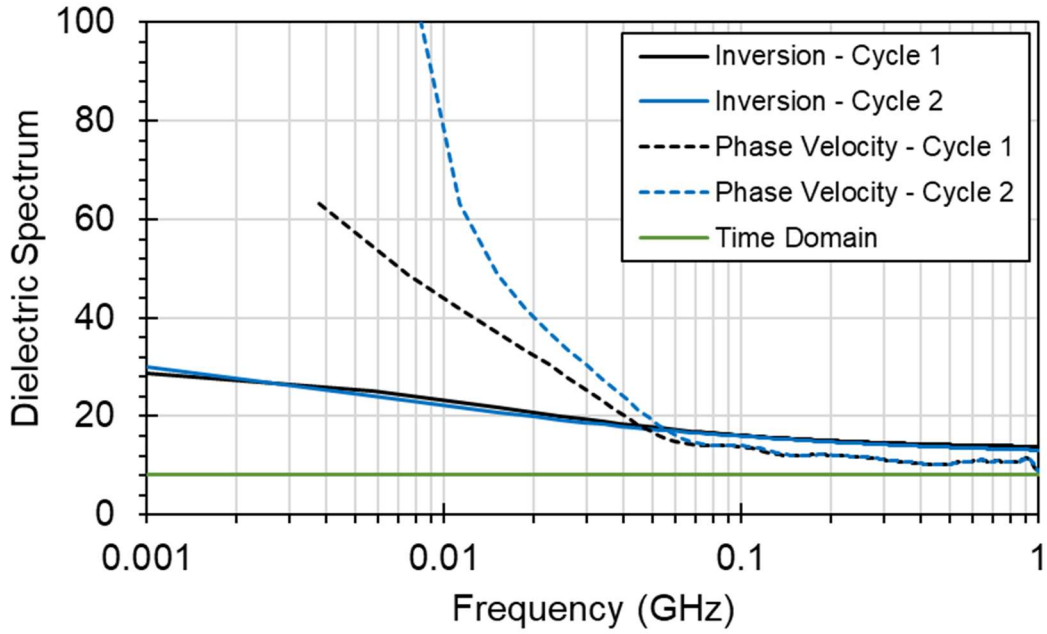


圖 2-223 樣本 1 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(1.35 g/cm^3 乾密度和 15%體積含水量)

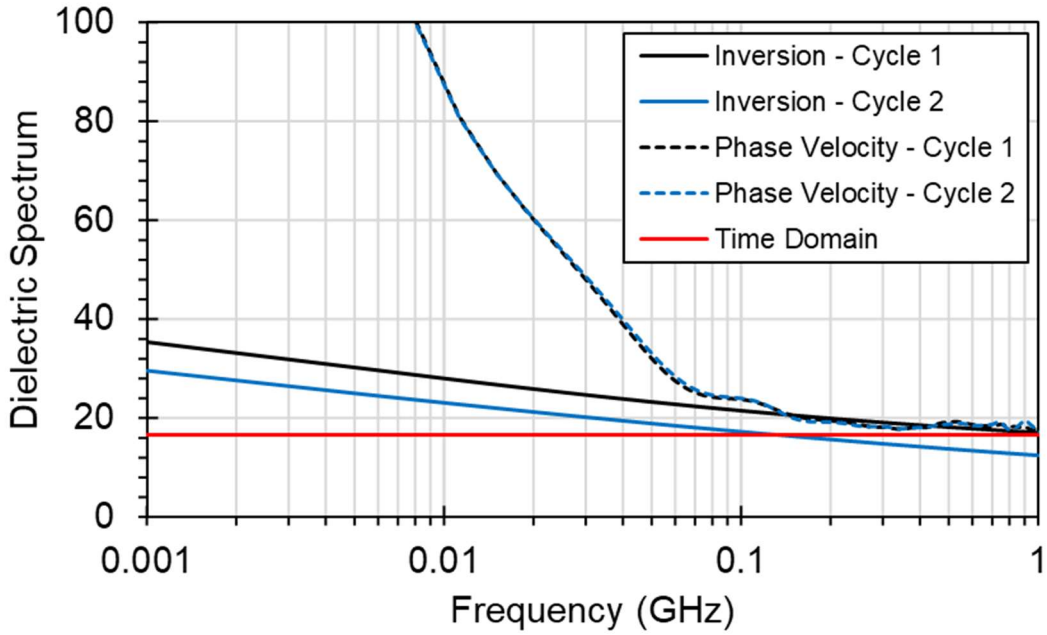


圖 2-224 樣本 2 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(1.45 g/cm^3 乾密度和 30%體積含水量)

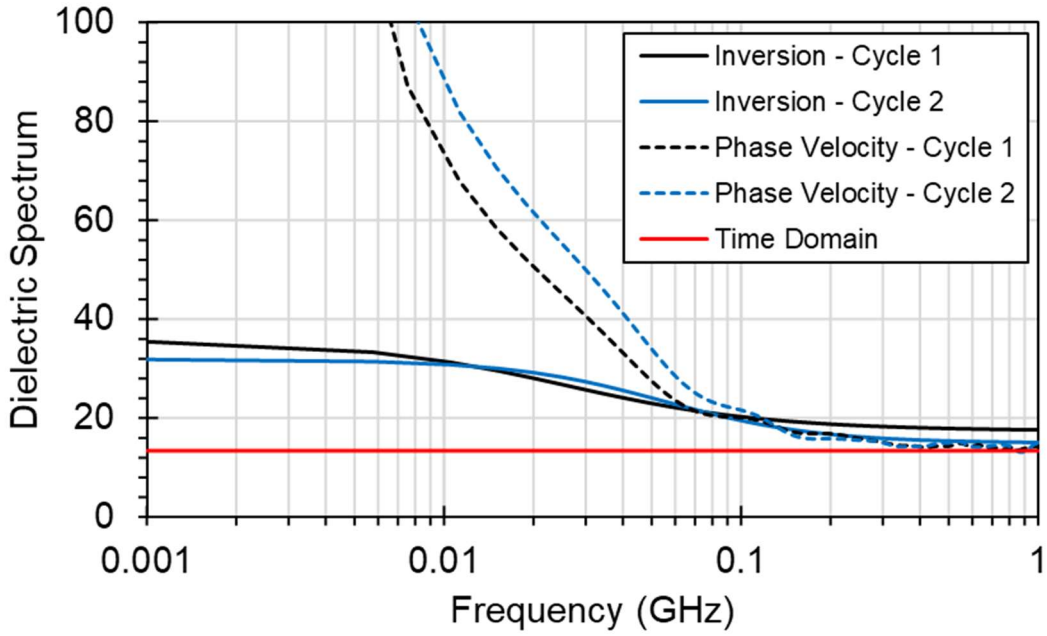


圖 2-225 樣本 2 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(1.45 g/cm^3 乾密度和 25%體積含水量)

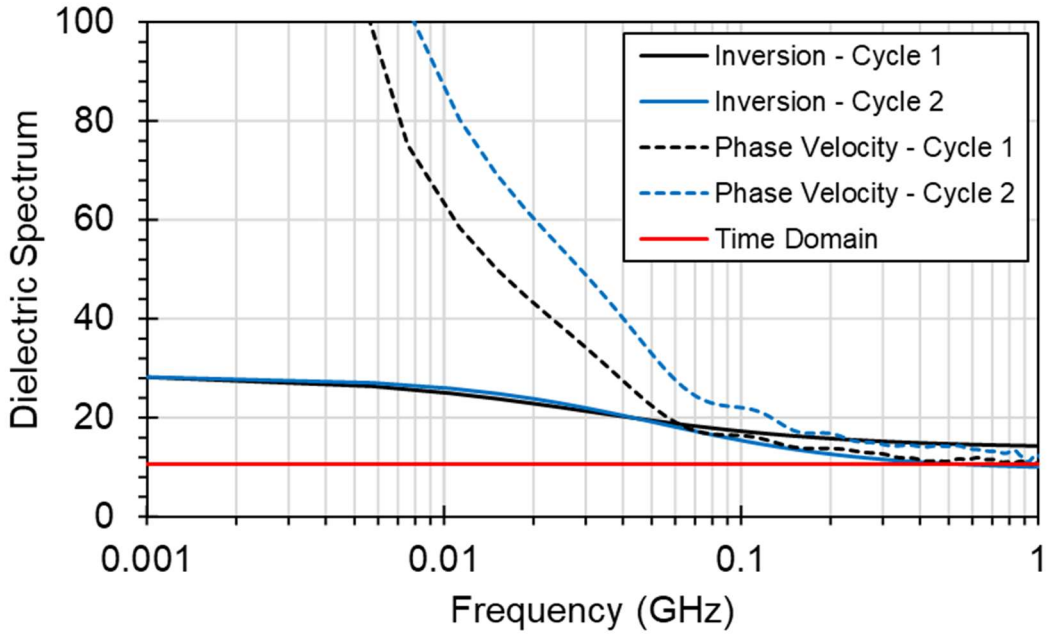


圖 2-226 樣本 2 的 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(1.45 g/cm^3 乾密度和 20%體積含水量)

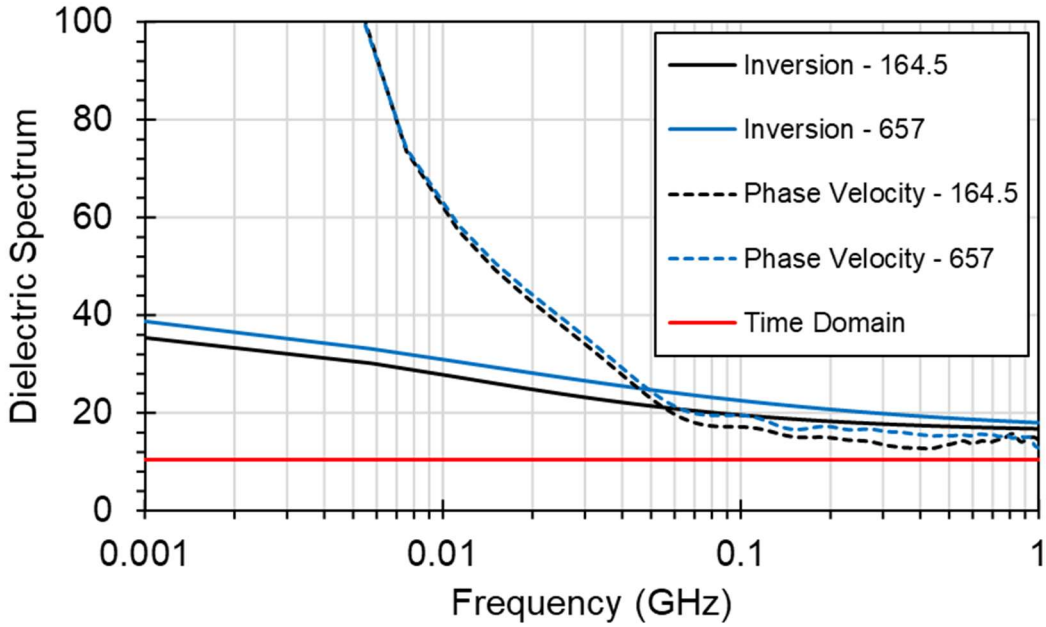


圖 2-227 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(樣本 1 164.5 µS/cm 導電度和 20%體積含水量 與 樣本 3 657 µS/cm 導電度和 20%體積含水量

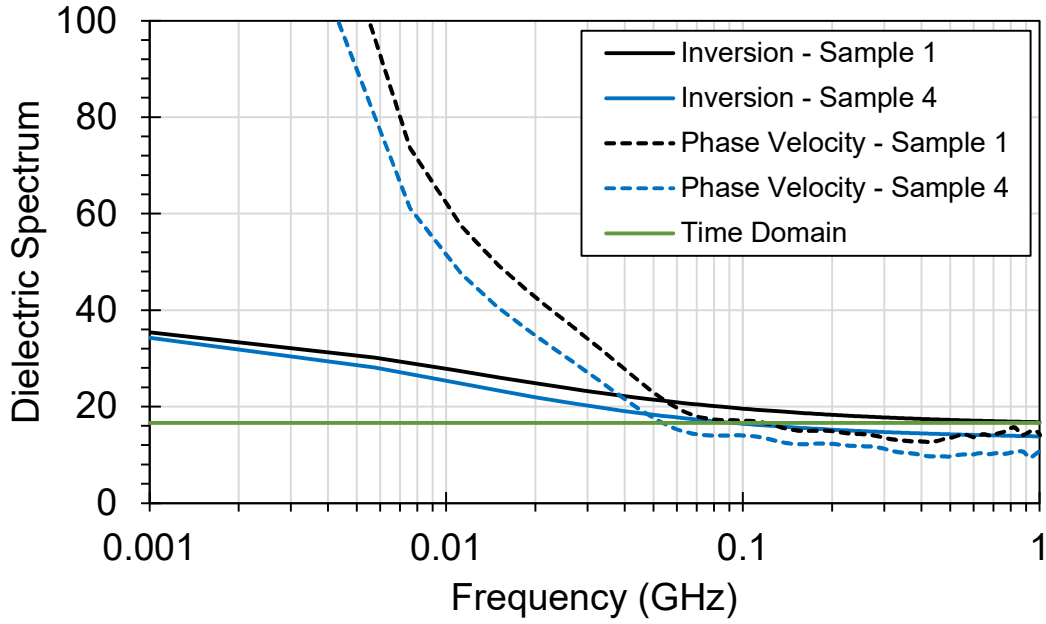


圖 2-228 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的介電頻譜(樣本 1 pH = 6.9 酸鹼值和 20%體積含水量 與 樣本 4 pH = 5 酸鹼值和 20%體積含水量)

(六)TDR 全波形反算分析、相速度分析法、時域視介電常數與 VNA 頻譜比較探討

圖 2-229、圖 2-230 和圖 2-231 為 1.35g/cm^3乾密度與 164.5 μS/cm 導電度之介電頻譜。土壤介電頻譜僅在 1 MHz ~ 1 GHz 頻率範圍內顯示。在乾燥過程開始時，在含水量為 30% 時(圖 2-229)，從 TDR 全波形反算分析得到的土壤介電頻譜的差異在循環 1 和 2 之間，比在乾燥過程結束時有更大的差異，例如 25% 和 20% 的含水量。如圖 2-230 當含水量為 25% 時，差異會減小。在 15% 水分含量下趨於相同，且差異越來越小 (圖 2-231)。而在相速度分析法 PVA 的結果上，於較低的頻率時，會高於 TDR 全波形反算分析。但是在 0.1 GHz ~ 1GHz 頻率下，結果通常較好。相速度分析法的所有結果通常與樣本 1 中所有含水量的更高頻率(0.1 GHz to 1 GHz)下的 TDR 全波形反算分析相符。

在樣本 2 (1.45g/cm^3乾密度)中也可以找到該測試的結果，在乾燥過程開始時與 TDR 全波形反算分析結果的差異較大，例如 30 % 含水量，然後差異逐漸降低如 25% 和 20% 含水量。相速度分析法結果在 0.1 GHz 到 1GHz 頻率範圍內與全反演分析基本吻合。樣本 2 的介電頻譜如圖 2-232、圖 2-233 和圖 2-234 所示。

這一結果表明，乾燥速率較高的土壤與乾燥速率較低的土壤相比，每個乾溼週期之間的介電頻譜差異較大。然而，這項研究無法比較潤濕過程的結果，因為過程中含水量的快速變化導致數據不穩定。

相同乾密度(1.35 g/cm^3) 下 164.5 μS/cm 導電度和 657

μS/cm 導電度土壤介電頻譜比對如圖 2-235。具有較高導電度的土壤具有較高的介電頻譜。65 μS/cm 導電度的 TDR 全波形反算分析在 0.001 GHz 至 1GHz 的所有頻率範圍內具有更高的介電常數，相速度分析法在 0.1 GHz 到 1 GHz 頻率範圍內的高頻非常吻合與樣本 1 和 2 相同。該結果表明具有較高導電度的土壤將具有較高的介電頻譜。然而，這個結果只是比較了兩個樣本；需要更多的導電度變化的試體來確認結果。

然而，時域視介電常數始終低於 TDR 全波形反算分析和相速度分析法的結果。這可能是由於不是最佳化的校準和建模過程導致介電常數升高。對於 pH 值較低的土壤，相同含水量(20%)和乾密度為 1.35 g/cm^3的土壤(樣本 1 和 4)比對如圖 2-236。從該圖中可以看出，pH 值較低的土壤在頻率範圍內具有較低的介電頻譜。此外，該結果僅比較了兩個不同 pH 值 6.9 和 5 的結果。需要更多具有不同 pH 值的樣品來證實這一點。Dong and Wang (2008)證實嶺石-水混合物帶有較高的 pH 值比較低的 pH 值具有更長的弛豫(relaxation)時間。

圖 2-237 比較 Lewandowski et al. (2017)、Logsdon (2005)、TDR 全波形反算分析和相速度分析法之結果。在實驗中，Lewandowski et al. (2017)程序給出的結果不是最佳的。

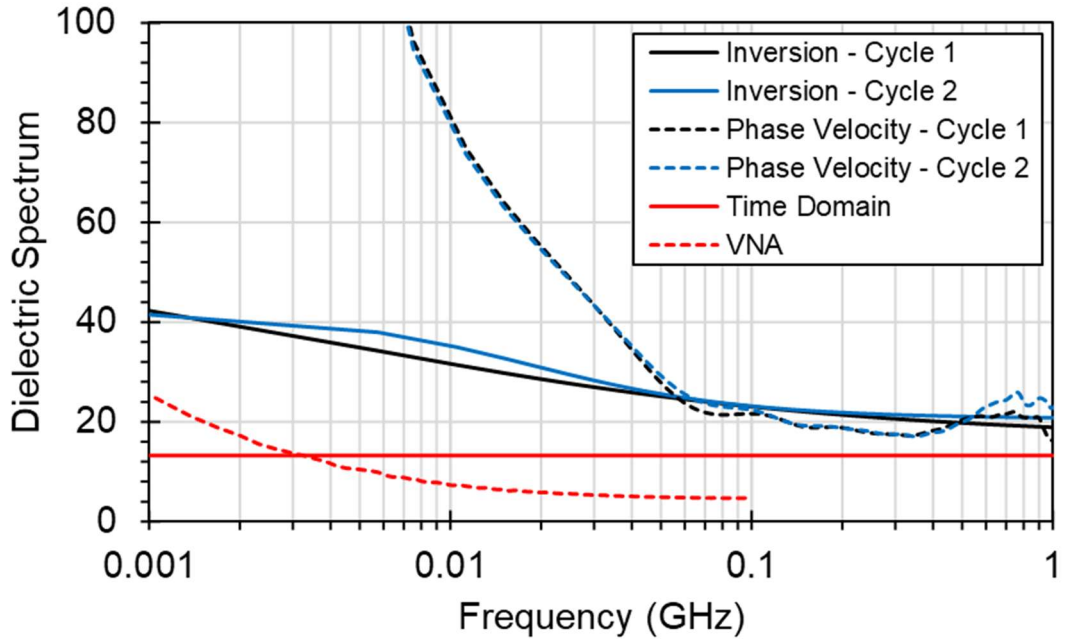


圖 2-229 樣本 1TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 和 25% 體積含水量)

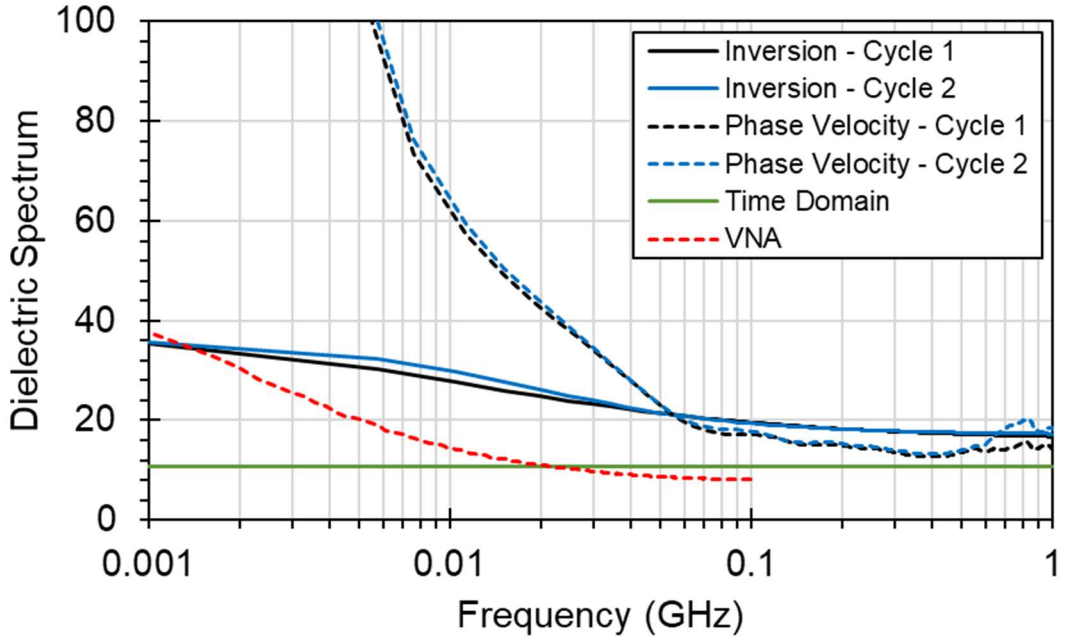


圖 2-230 樣本 1TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 和 20% 體積含水量)

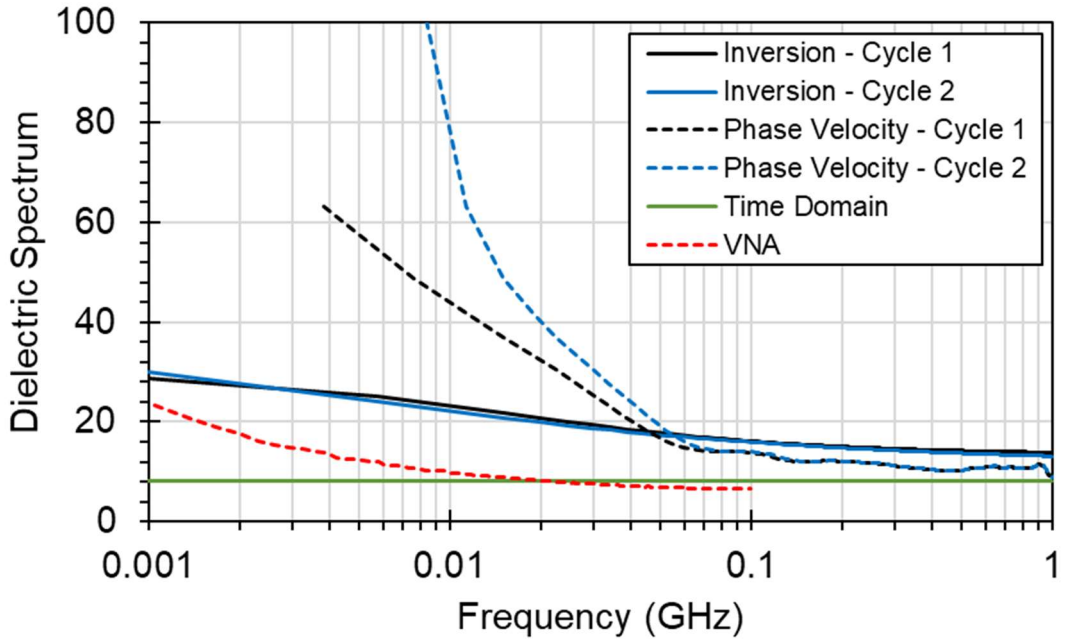


圖 2-231 樣本 1TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.35 g/cm^3 和 15% 體積含水量)

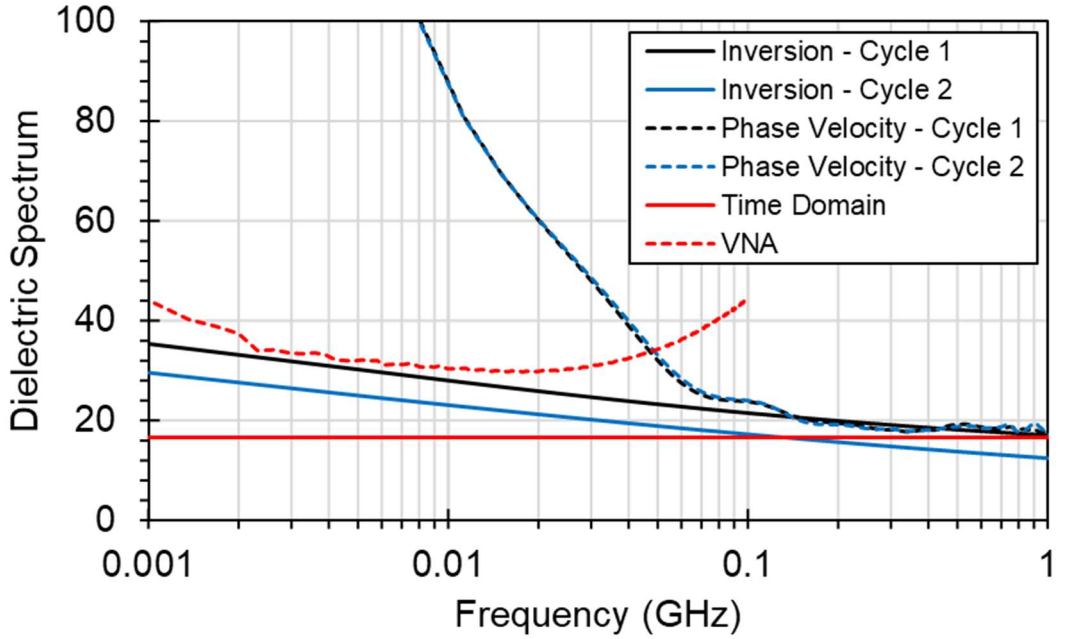


圖 2-232 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜(1.45 g/cm^3 和 30% 體積含水量)

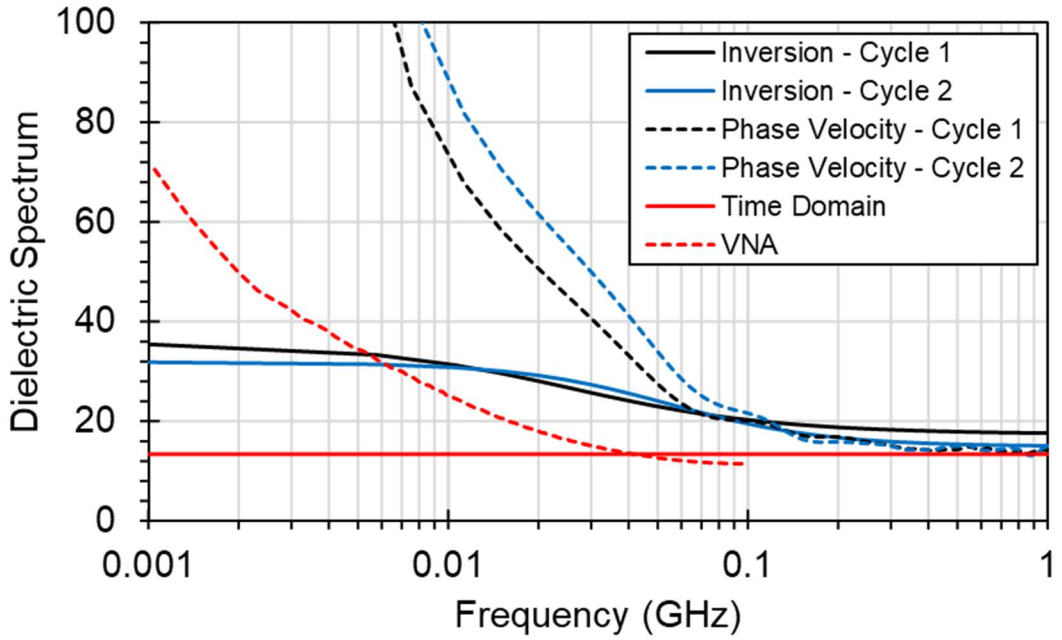


圖 2-233 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜 ($1.45\ g/cm^3$ 和 25% 體積含水量)

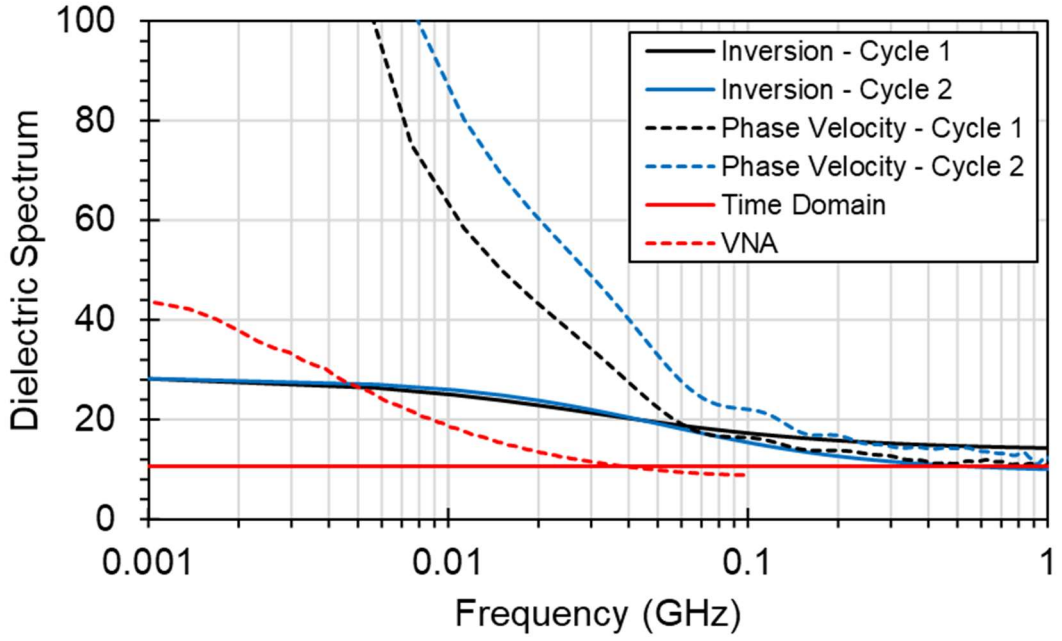


圖 2-234 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜 ($1.45\ g/cm^3$ 和 20% 體積含水量)

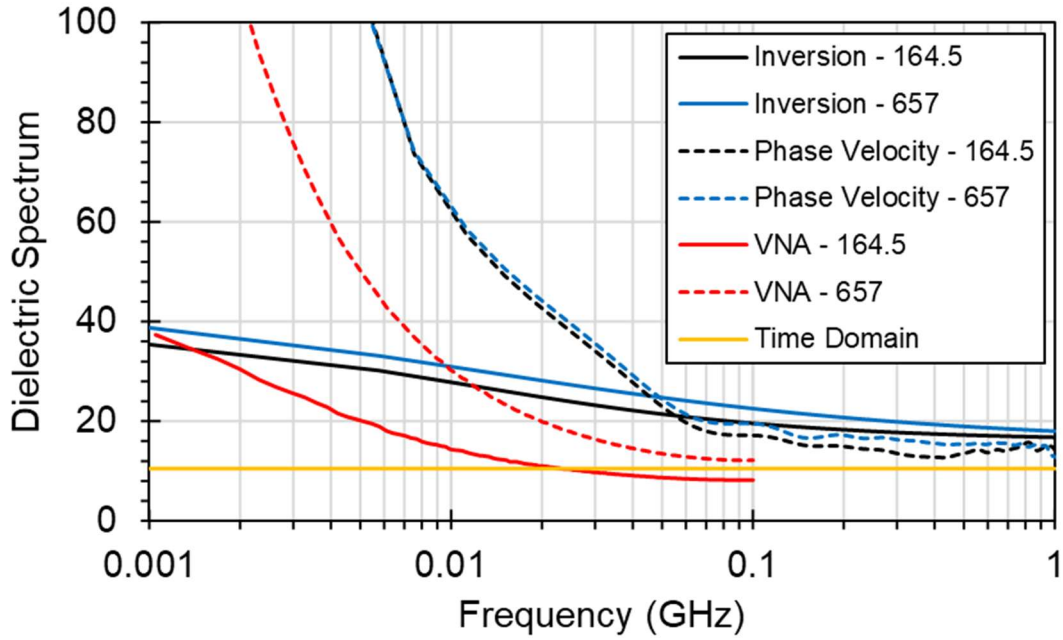


圖 2-235 TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜 (樣本 1 164.5 μS/cm 導電度和 20% 體積含水量 與 樣本 2 657 μS/cm 導電度 20% 體積含水量)

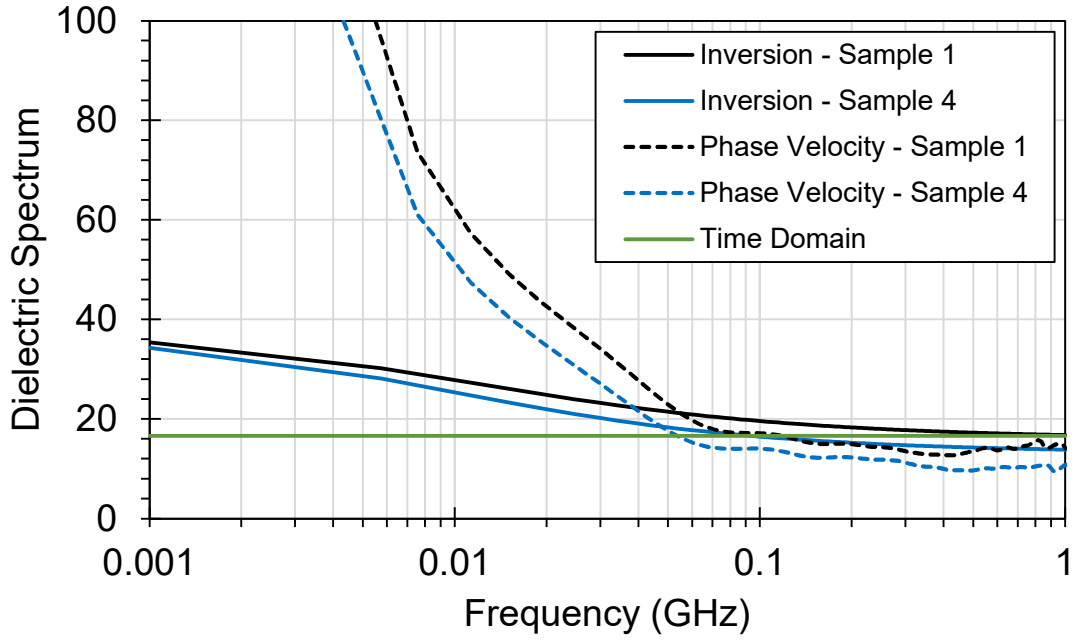


圖 2-236TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜 (樣本 1 pH = 6.9 和 20% 體積含水量 與 樣本 4 pH = 5 和 20% 體積含水量)

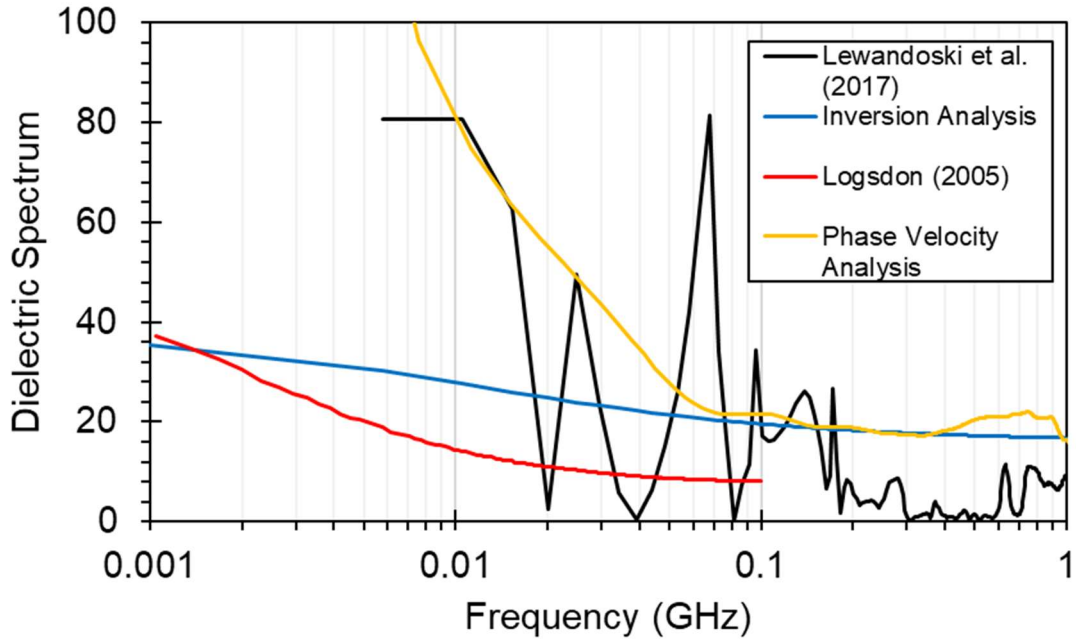


圖 2-237 Lewandowski et al. (2017) 程序、 Logsdon (2005) 程序、TDR 全波形反算分析、相速度分析法和 VNA 的介電頻譜 (1.35 g/cm^3 乾密度、20% 體積含水量和 64.5 μS/cm 導電度)

(七)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 2-238 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 31~37)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、32、35)所衍生的 7 大參數(ε_s, ε_∞, f_{rel}, 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。

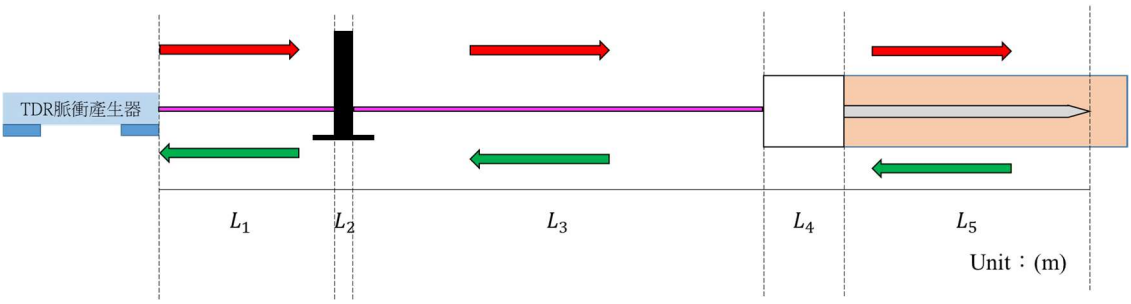


圖 2-238 砂箱實驗之電磁波傳播路徑簡化模型(第一纜線段、多工器、第二纜線段、感測器 AB 膠段、感測段(紅土試體中))

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 2-239 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10^1(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)。

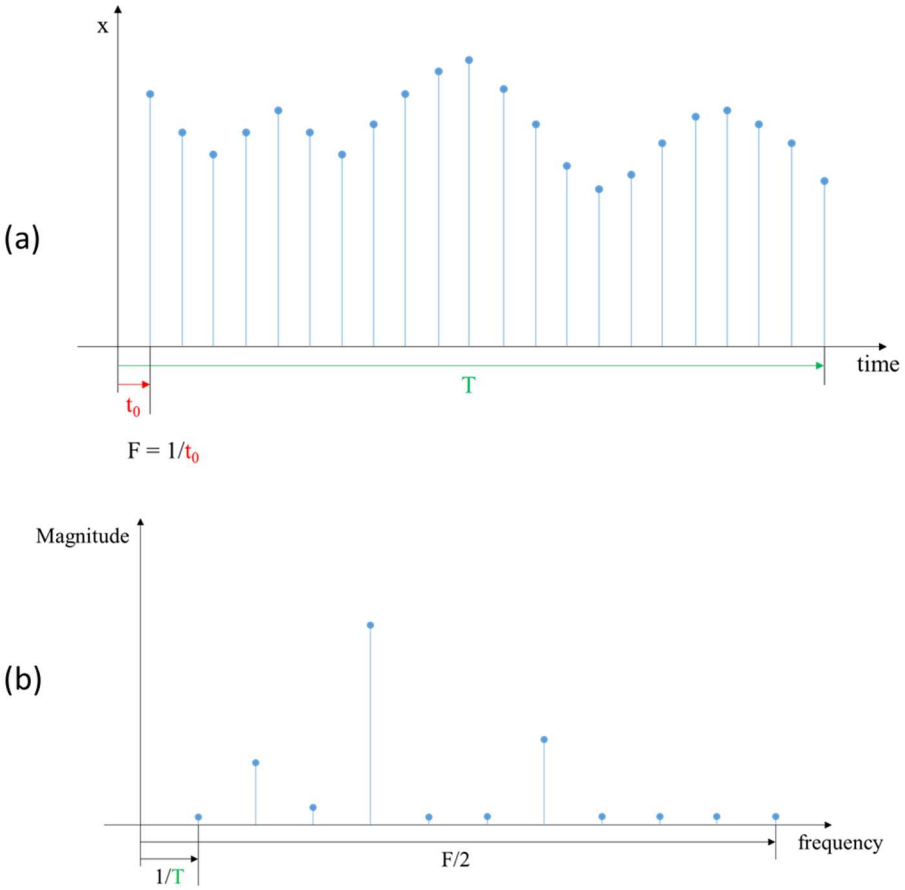


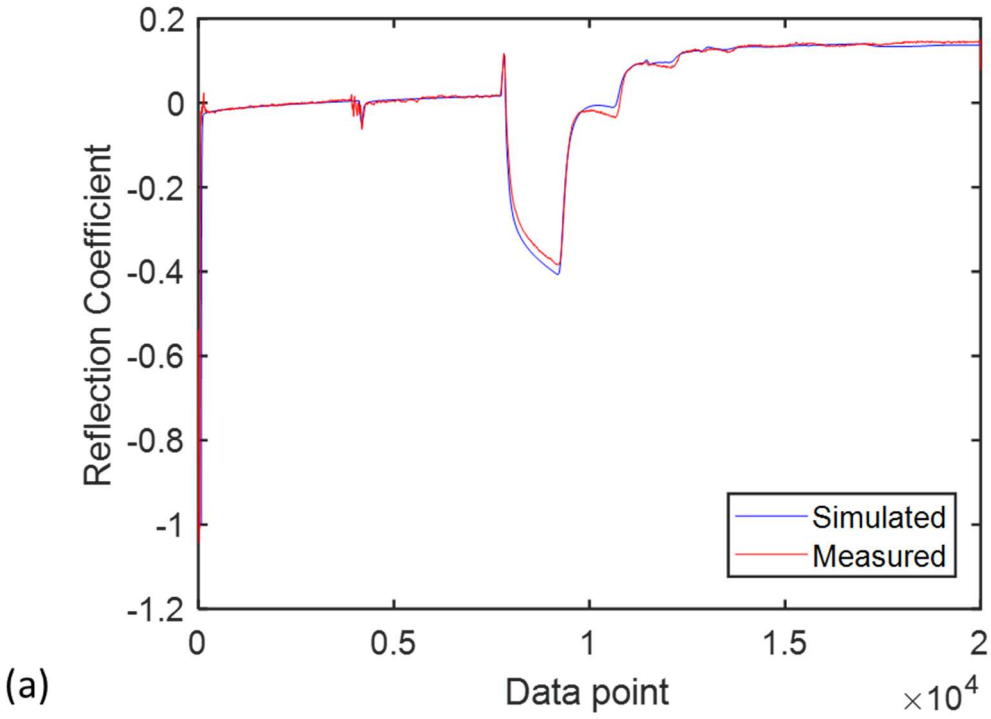
圖 2-239 奈奎斯特採樣定理之頻率解析度示意圖

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、感測器 AB 膠段、感測段的 TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數($\varepsilon_s, \varepsilon_\infty, f_{rel}, \xi, \mathrm{EC}_{dc}, Z_p, \alpha_R$)。之後將第一纜線段、多工器、第二纜線段、感測器 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 2-27 所示，圖 2-240 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 2-241 為 Cole-Cole 參數反算後的結果進行理論值的繪製。

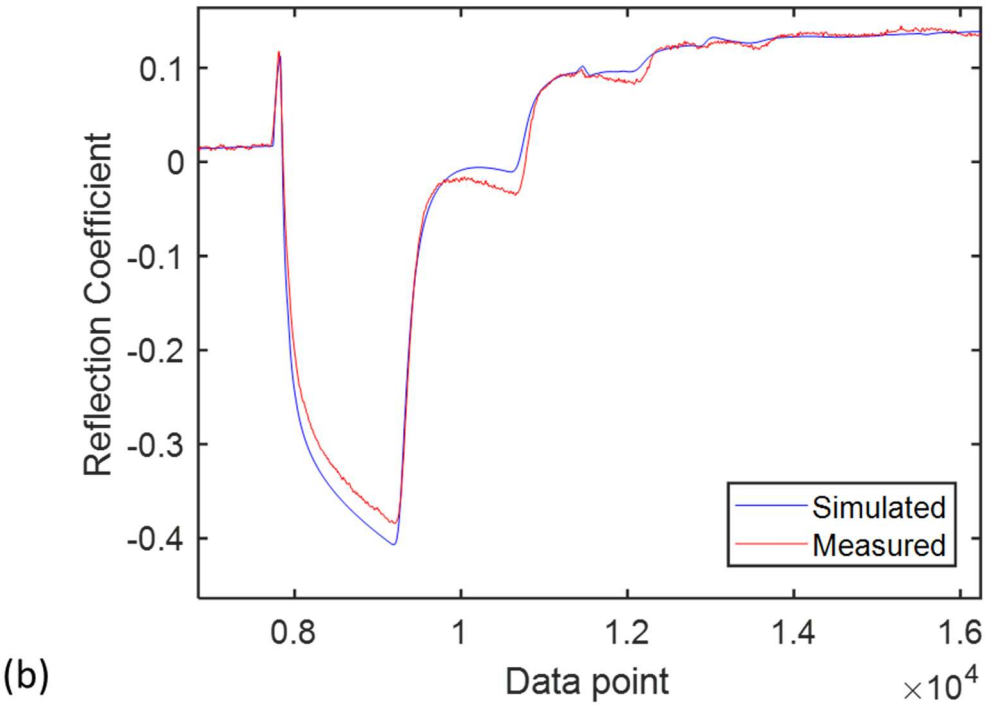
表 2-27TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數(ε_s,ε_∞,f_{rel},ξ,EC_{dc},Z_p,α_R)

反算結果

	第一纜線段	多工器	第二纜線段	感測器 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_{rel}, (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



(a)



(b)

圖 2-240 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

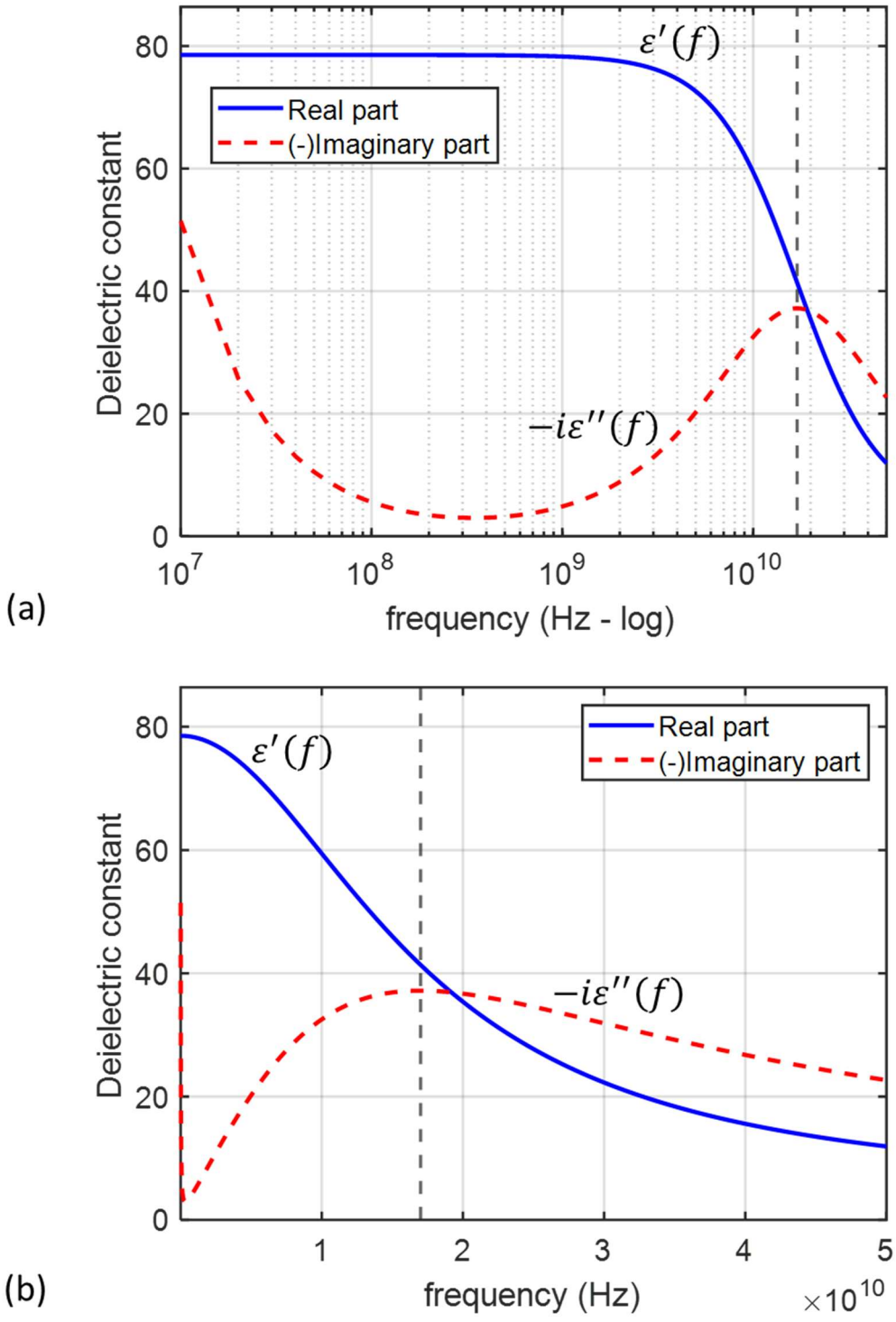


圖 2-241 自來水之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)

(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

i. (第一組-試驗組)分析結果：

本研究將取出砂箱試驗圖 2-89 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、感測器 AB 膠段的 TDR 系統與傳輸線材料 Debye 參數固定不動如表 2-28 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 2-29 所示。反算後的模擬波型與實際量測值如圖 2-242、圖 2-248、圖 2-251、圖 2-254 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 2-243 至圖 2-256 所示。

Chung(2008)表明 PVA 在 100 MHz 與 1 GHz 的介電頻譜相對於其他頻率具有可靠度，高於 1 GHz 的部分介電常數有發散的現象，低於 100 MHz 的部分與高於 1 GHz 的部分之介電常數會受到導電度之影響。在圖 2-244 中可以看到 PVA 介電頻譜與在 100 MHz 與 1 GHz 與 TDR 全反算分析有顯著差異，所以在於低含水量的土壤試體不適合使用 PVA 進行分析。圖 2-247 為土壤濕潤時期，也相對於其他時間點導電度為最高，在 100 MHz 的部分與高於 1GHz 雖然比起圖 2-244 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 2-250、圖 2-253、圖 2-256 的相對於圖 2-244 與圖 2-247，其 PVA 在 100 MHz 與 1 GHz 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。

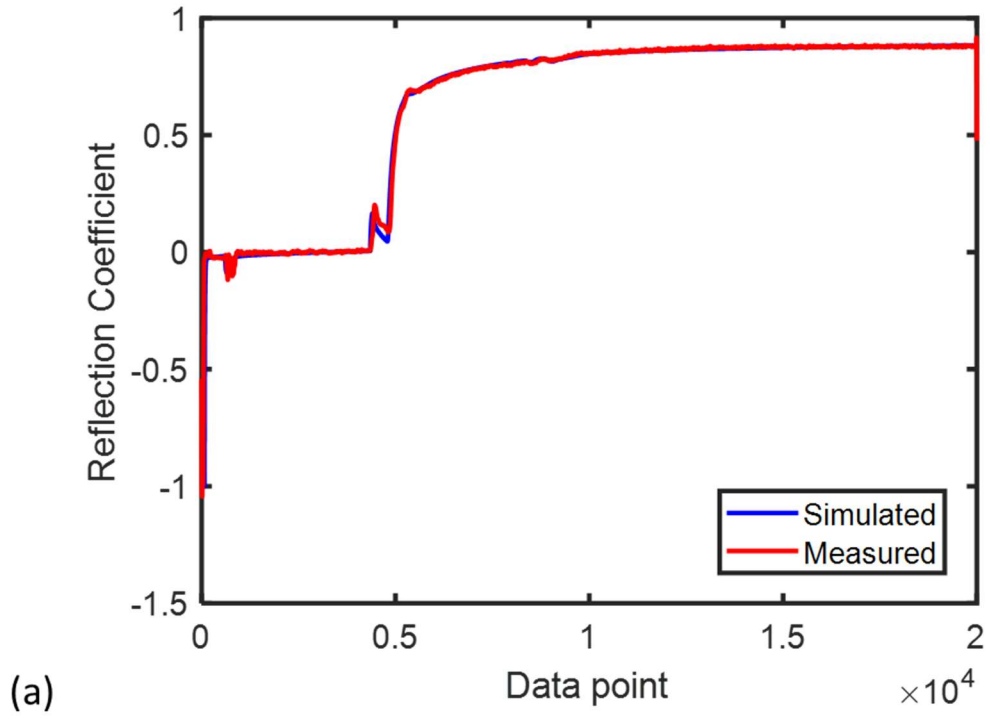
表 2-28(第一組)TDR 系統與材料 Cole-Cole 參數(ε_s,ε_∞,f_{rel},ξ,EC_{dc},Z_p,α_R)反算結果(感測段參數由下表帶入)

	第一纜線段	多工器	第二纜線段	感測器 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_{rel}, (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 2-29(紅土)各時間點之試體相關帶入參數

(L_n =0.24，Z_p (Ω)=167，α_R =522)

時間點	ε_s	ε_∞	f_{rel}, (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



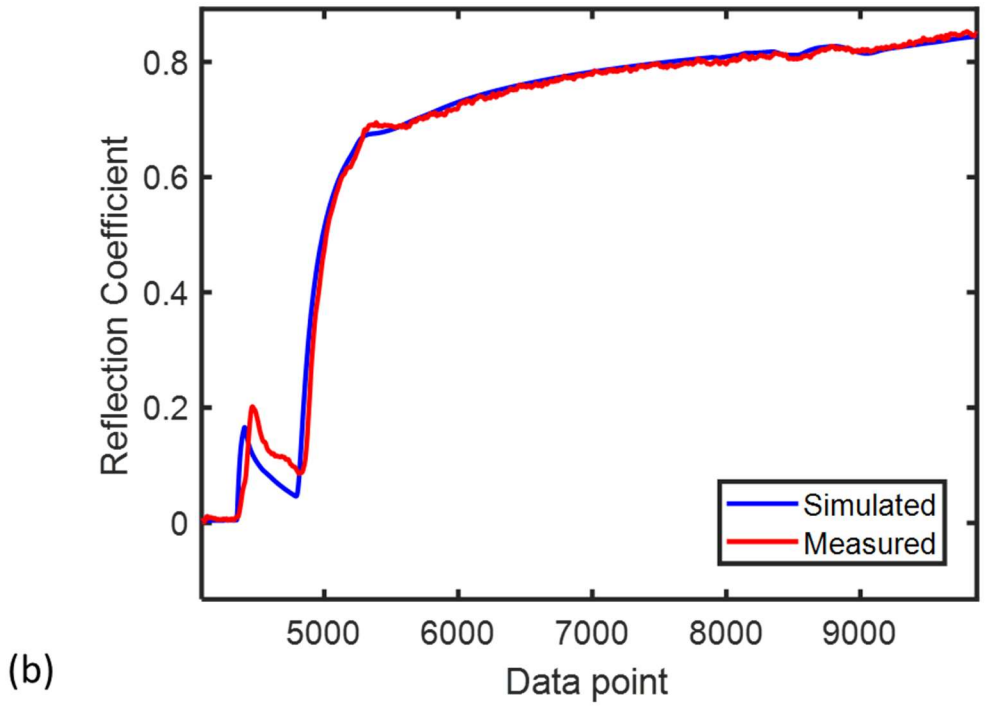
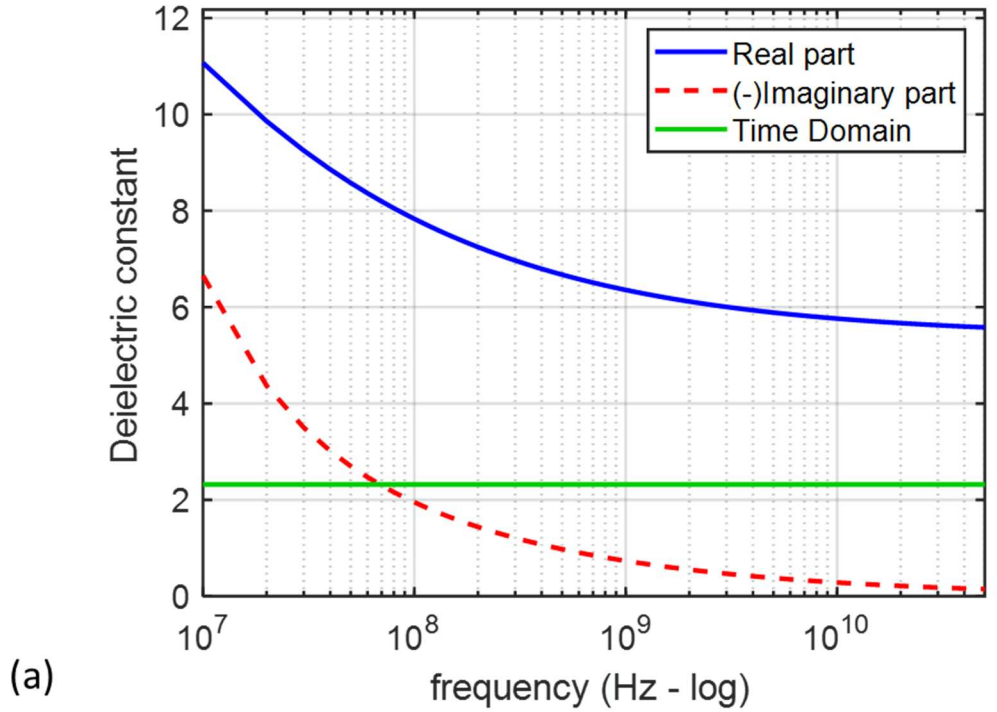


圖 2-242(第一組，2021/9/600:02:05)模擬與量測值對照圖(1×10^{11}Hz 之擷取頻率)(a)完整波型，(b)放大感測段之波型



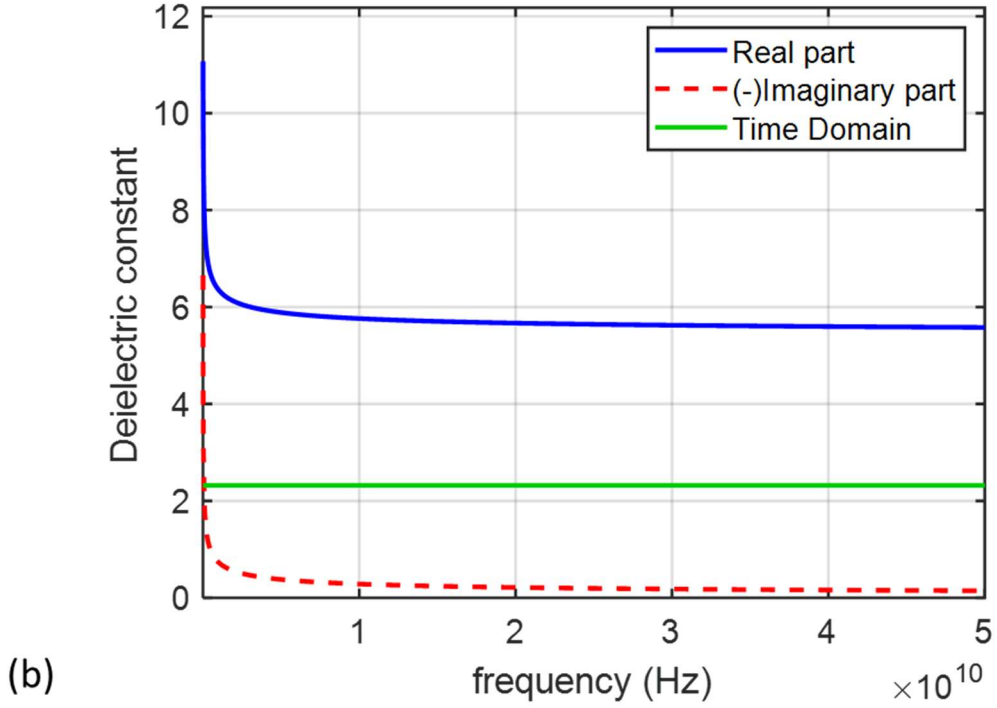


圖 2-243(第一組，2021/9/600:02:05)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)(a)x 對軸為對數刻度，(b)x 對軸為正常刻度

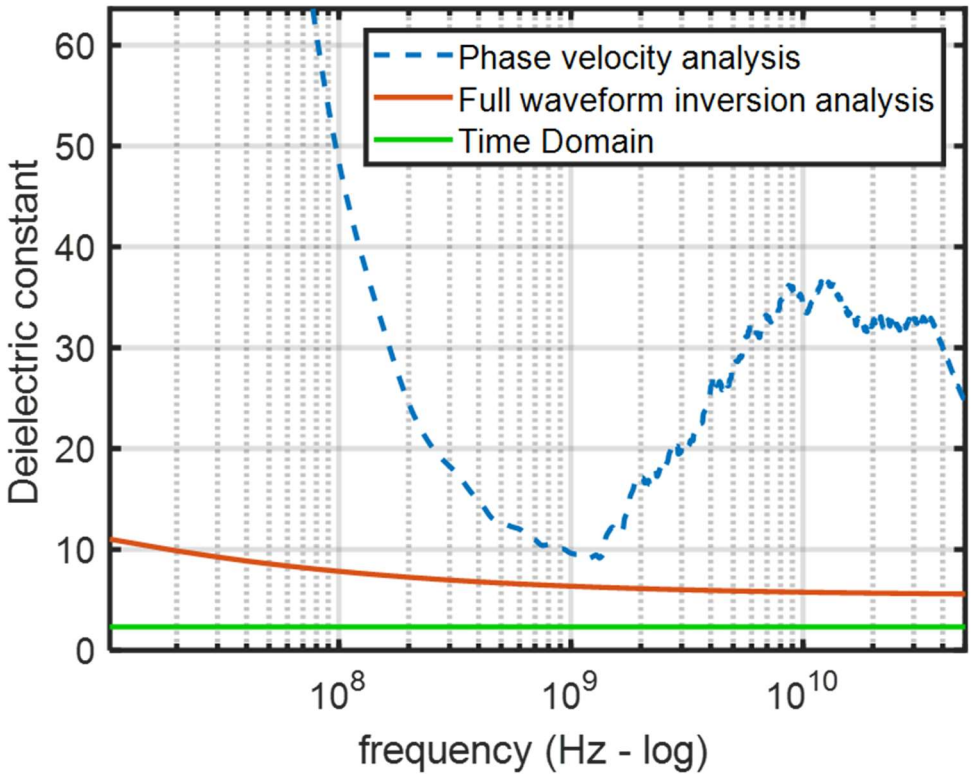


圖 2-244(第一組，2021/9/600:02:05) Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

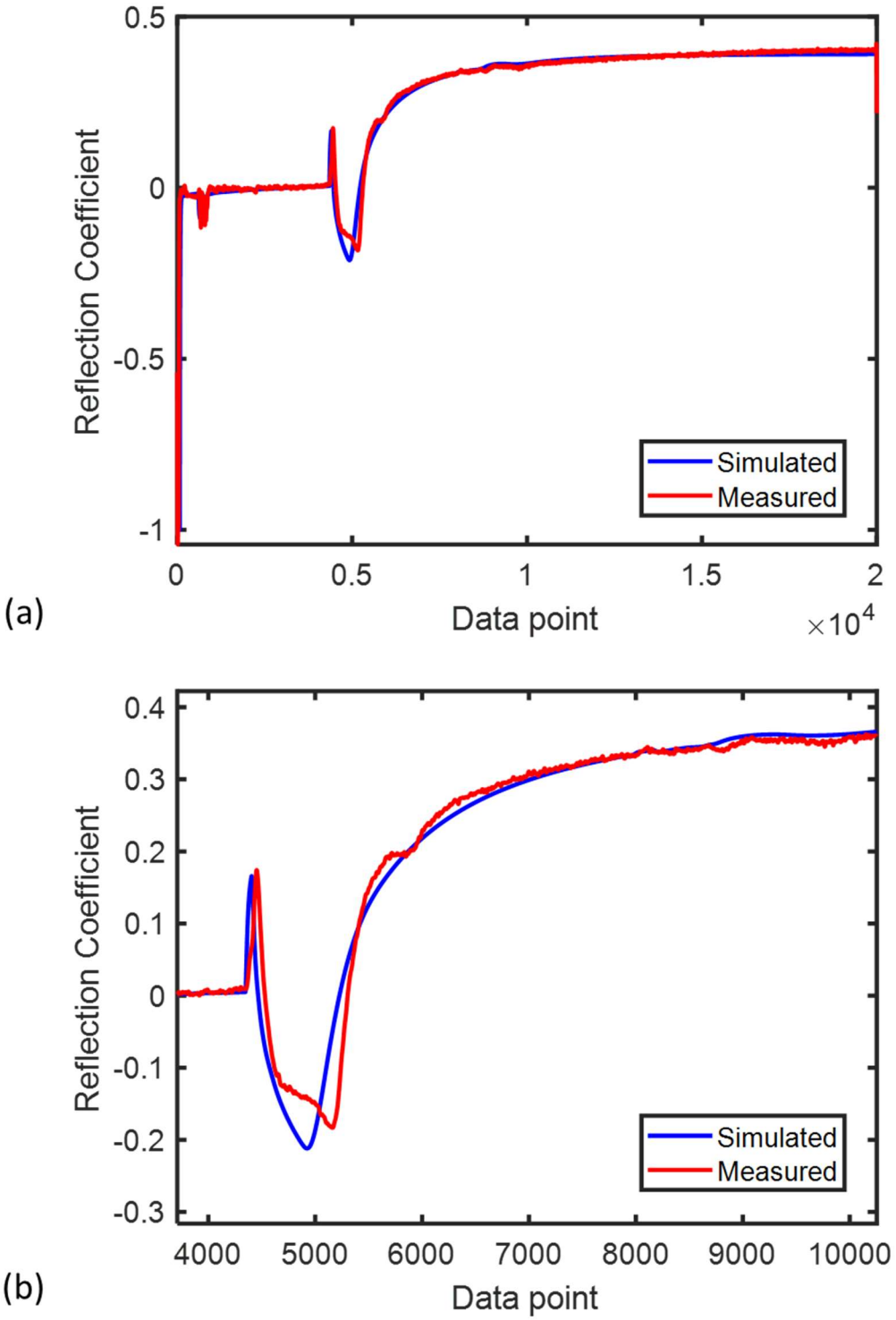
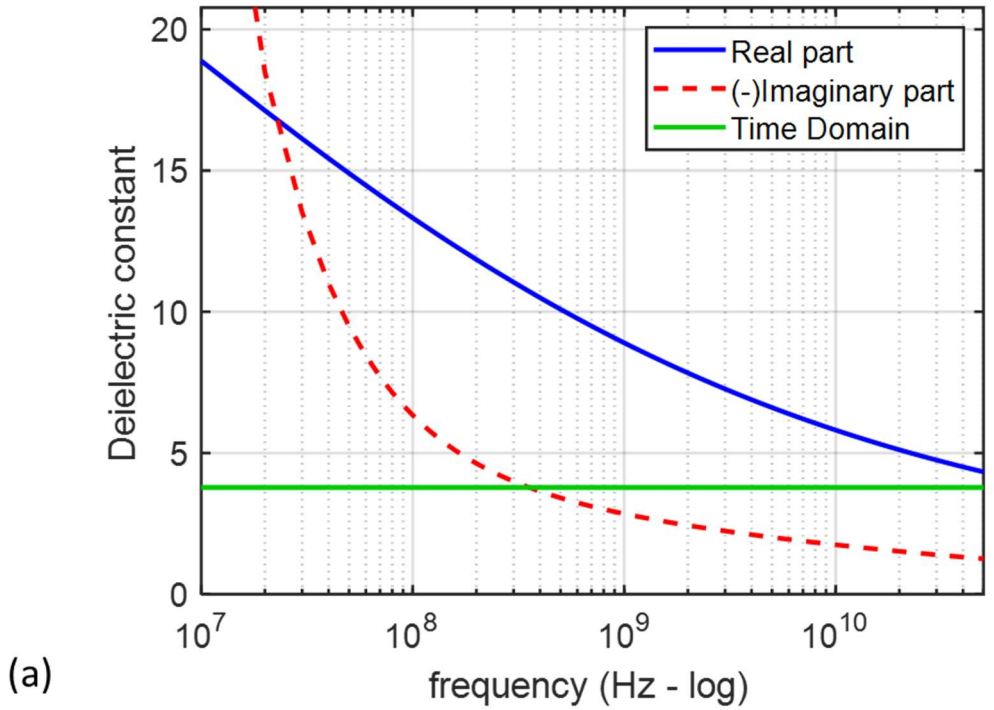


圖 2-245(第一組，2021/9/715:52:13)模擬與量測值對照圖(1×10^{11}Hz 之擷取頻率)(a)完整波型，(b)放大感測段之波型



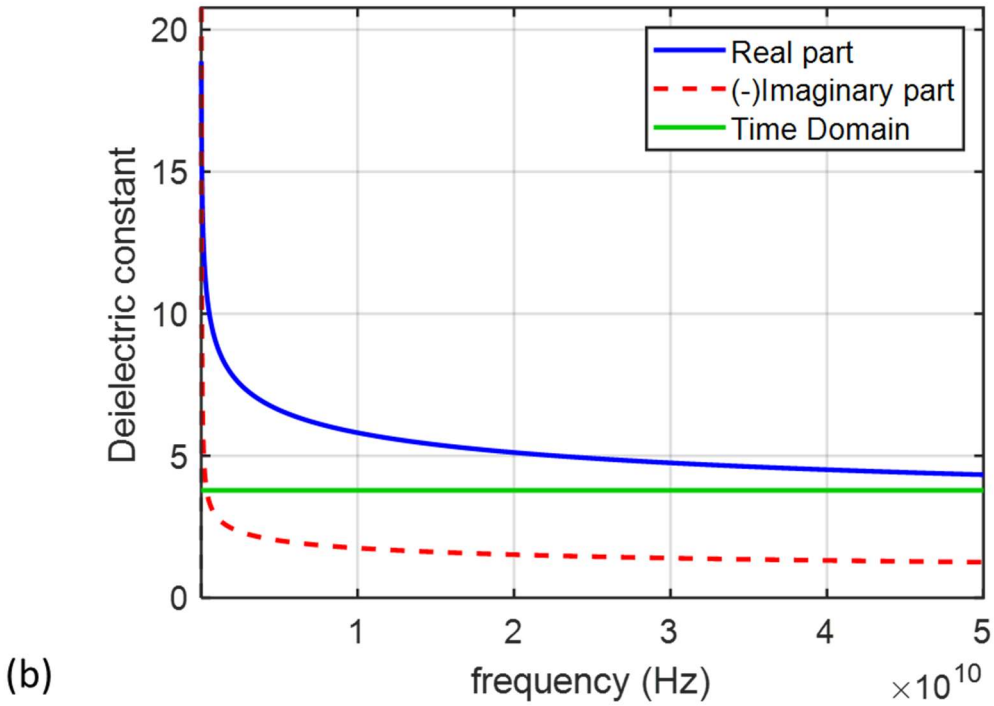


圖 2-246(第一組，2021/9/715:52:13)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)(a)x 對軸為對數刻度，(b)x 對軸為正常刻度

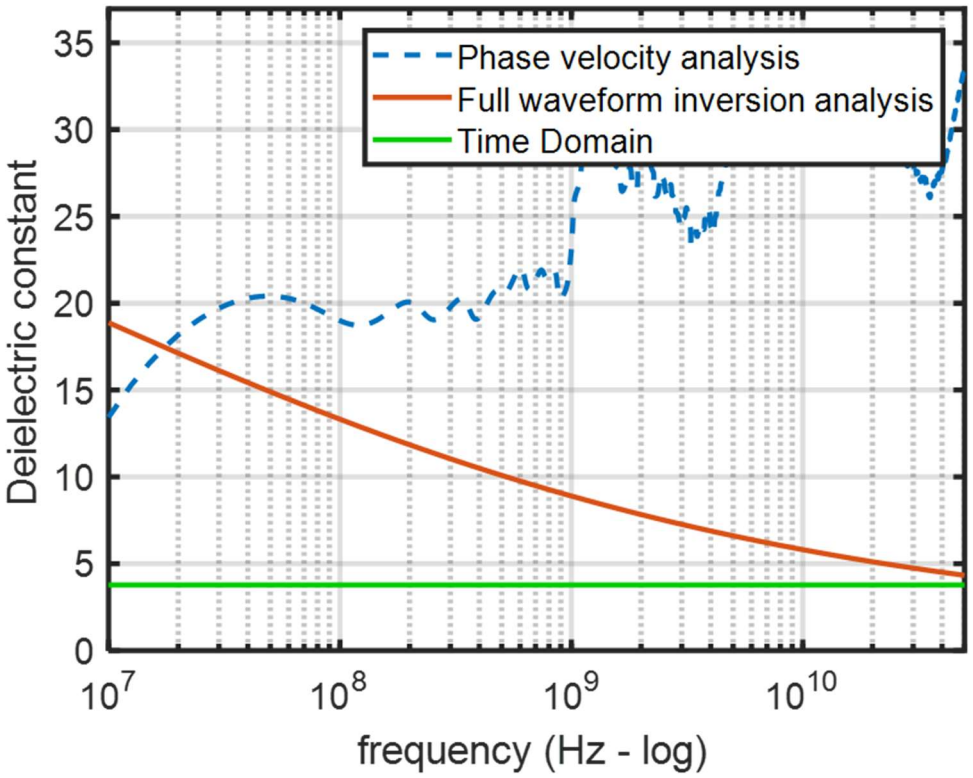


圖 2-247(第一組，2021/9/715:52:13) Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

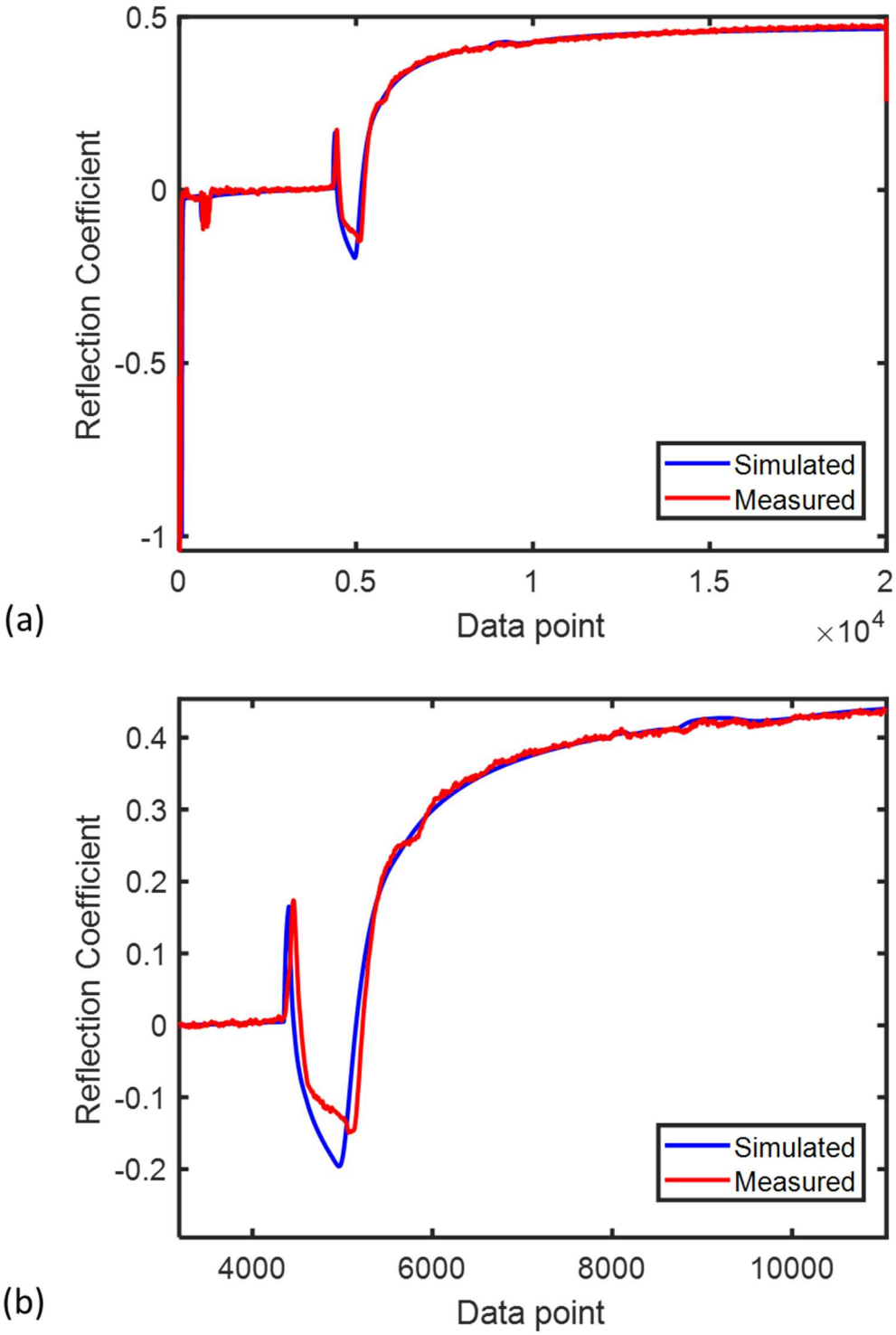
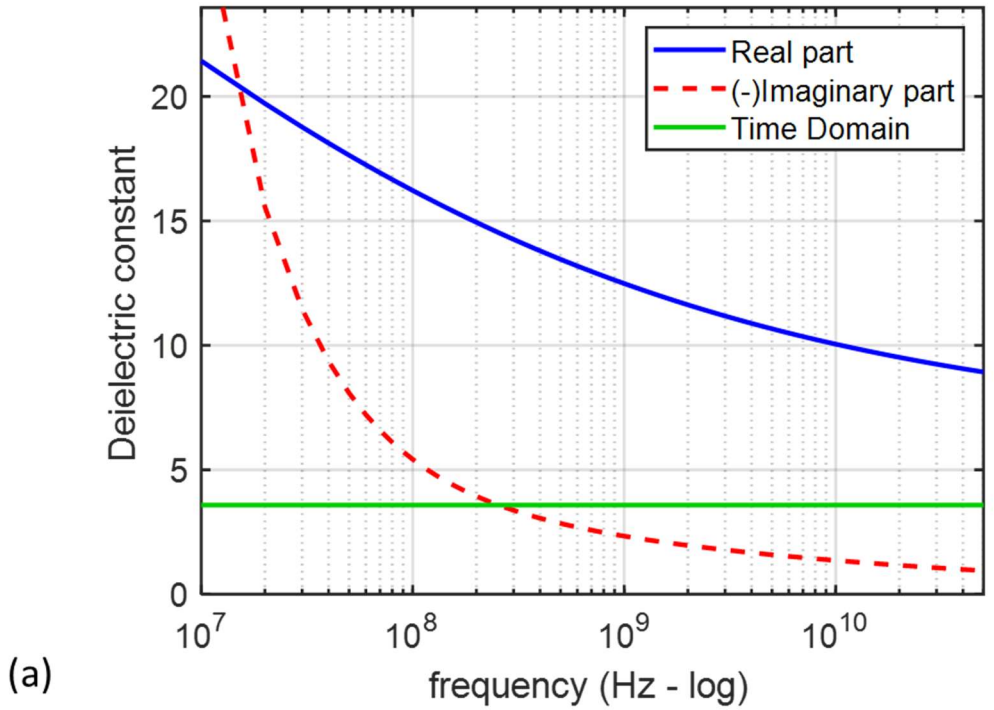


圖 2-248(第一組，2021/9/808:23:41)模擬與量測值對照圖(1×10^{11}Hz 之擷取頻率)(a)完整波型，(b)放大感測段之波型



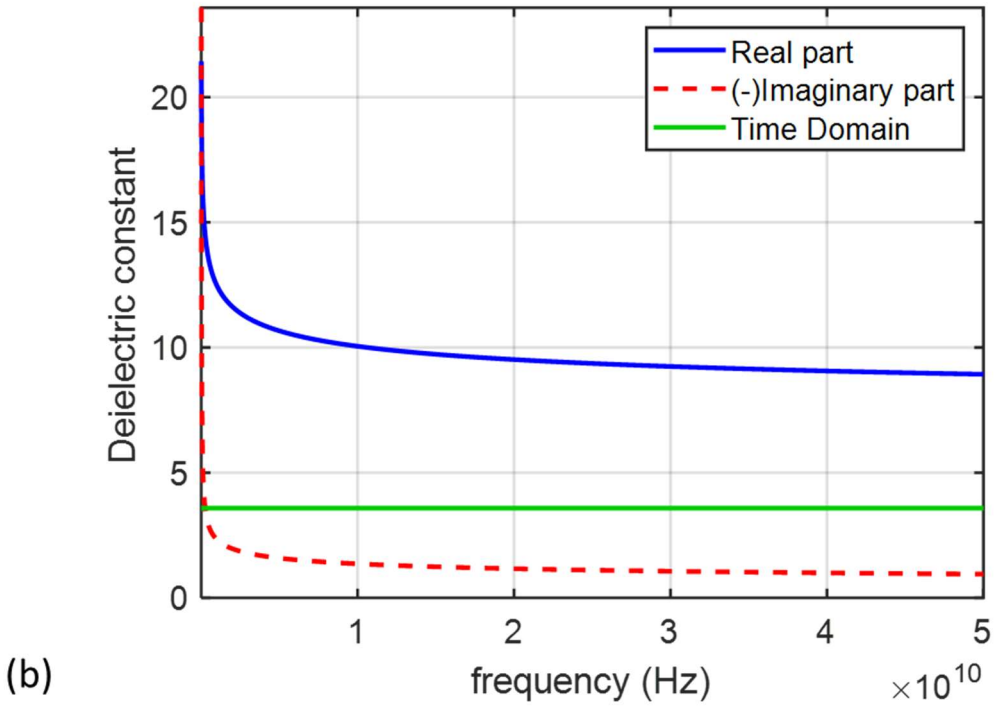


圖 2-249(第一組，2021/9/808:23:41)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)(a)x 對軸為對數刻度，(b)x 對軸為正常刻度

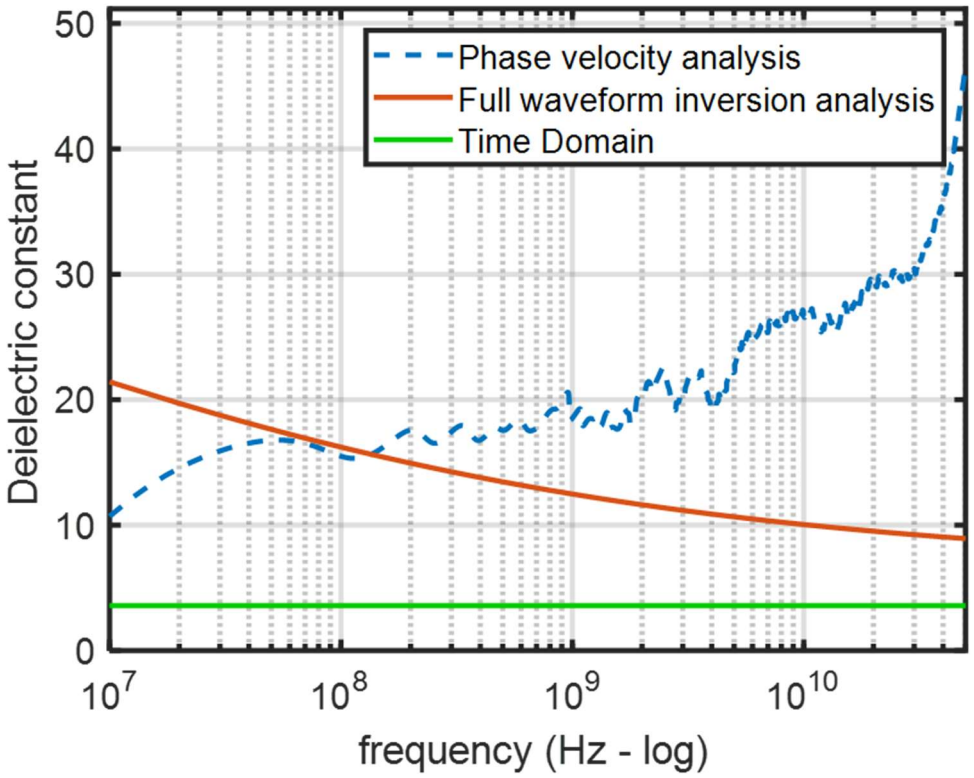
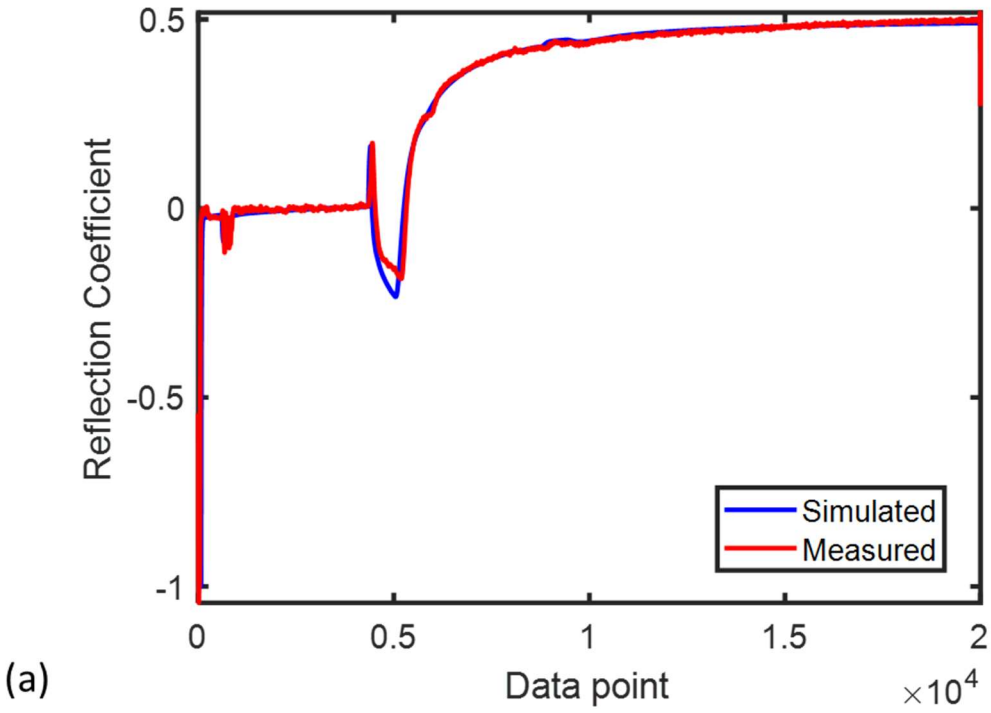


圖 2-250(第一組，2021/9/808:23:41)Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖



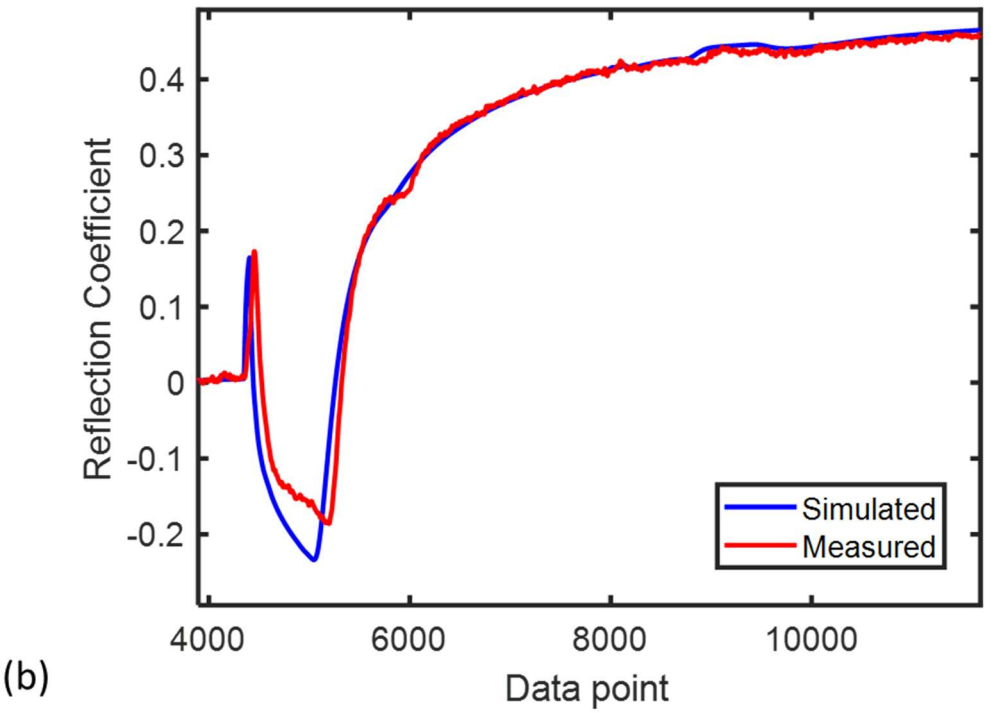
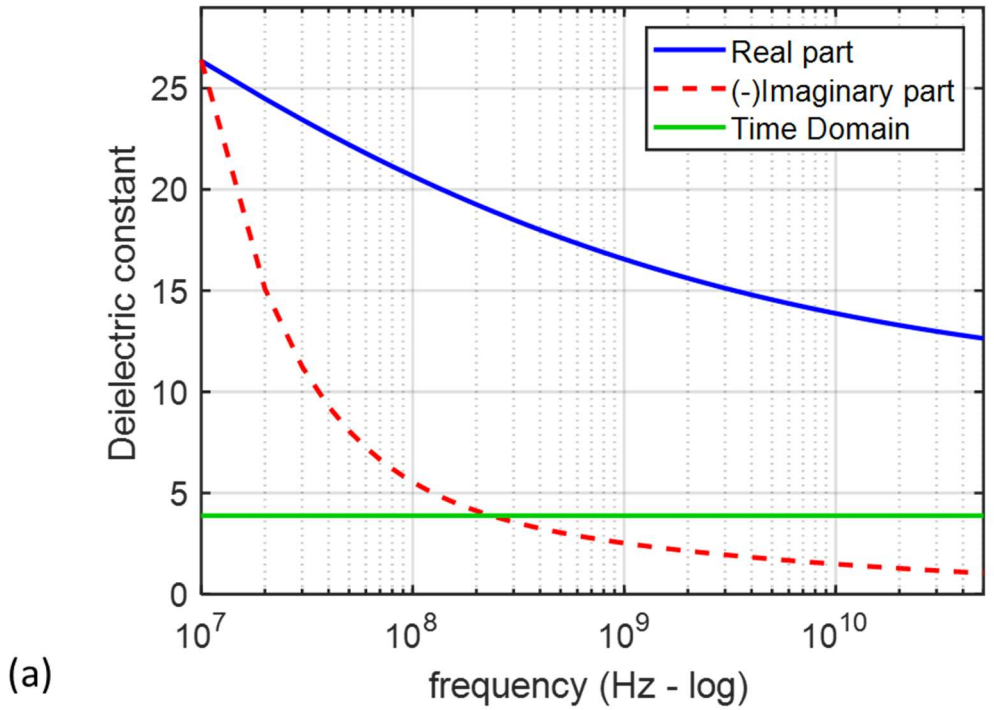


圖 2-251(第一組，2021/9/815:27:02)模擬與量測值對照圖(1×10^{11}Hz之擷取頻率)(a)完整波型，(b)放大感測段之波型



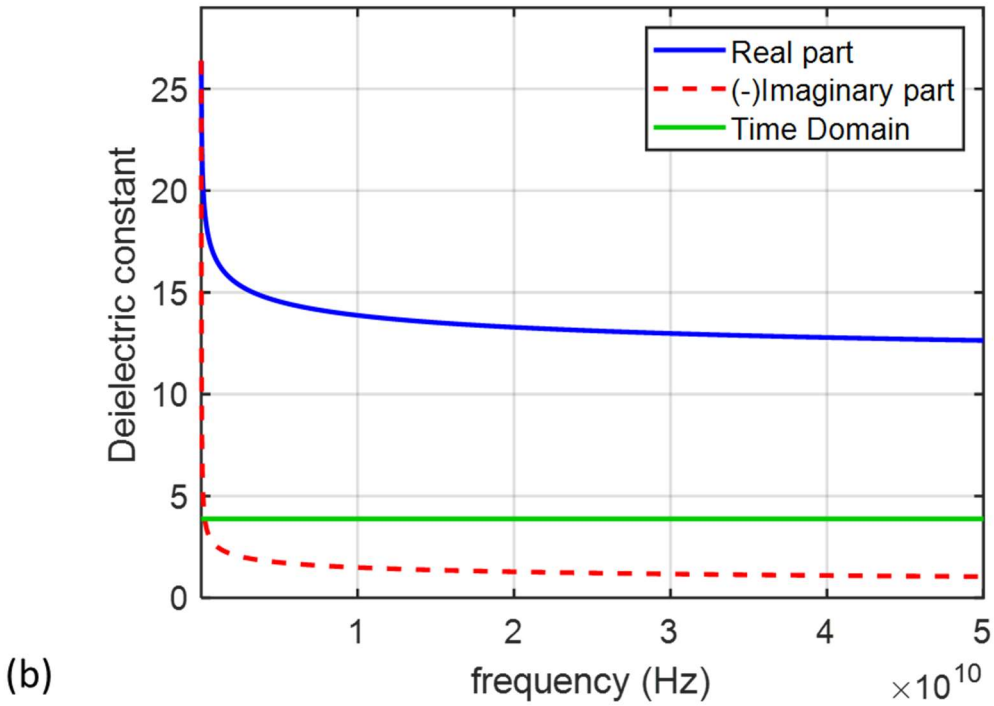


圖 2-252(第一組，2021/9/815:27:02)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)(a)x 對軸為對數刻度，(b)x 對軸為正常刻度

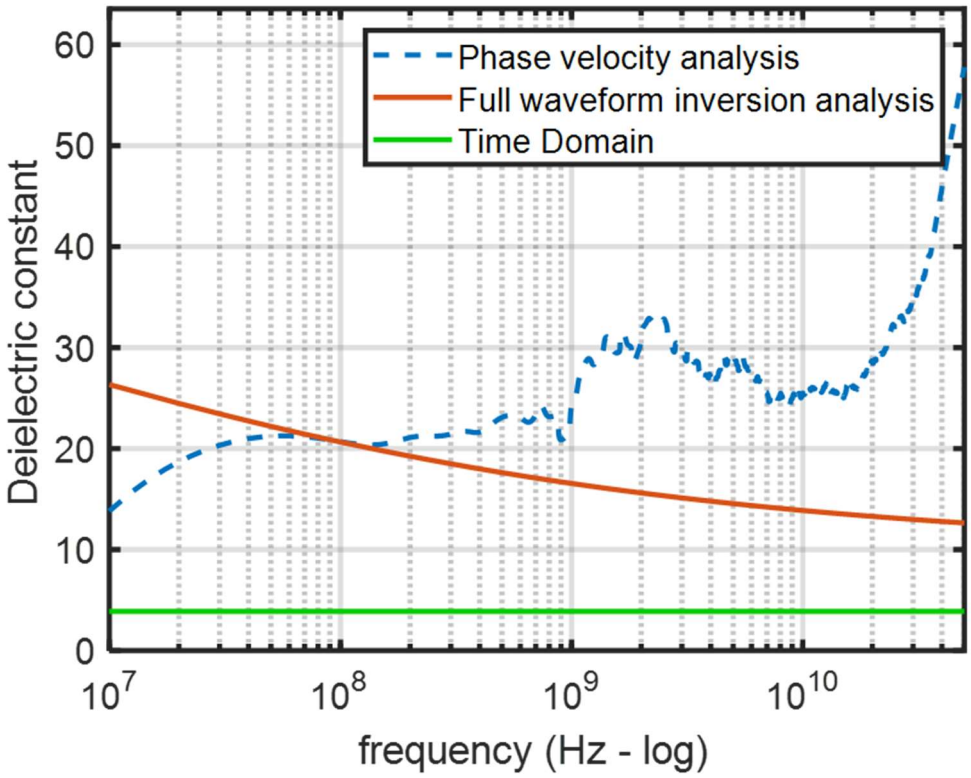


圖 2-253(第一組，2021/9/815:27:02)Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

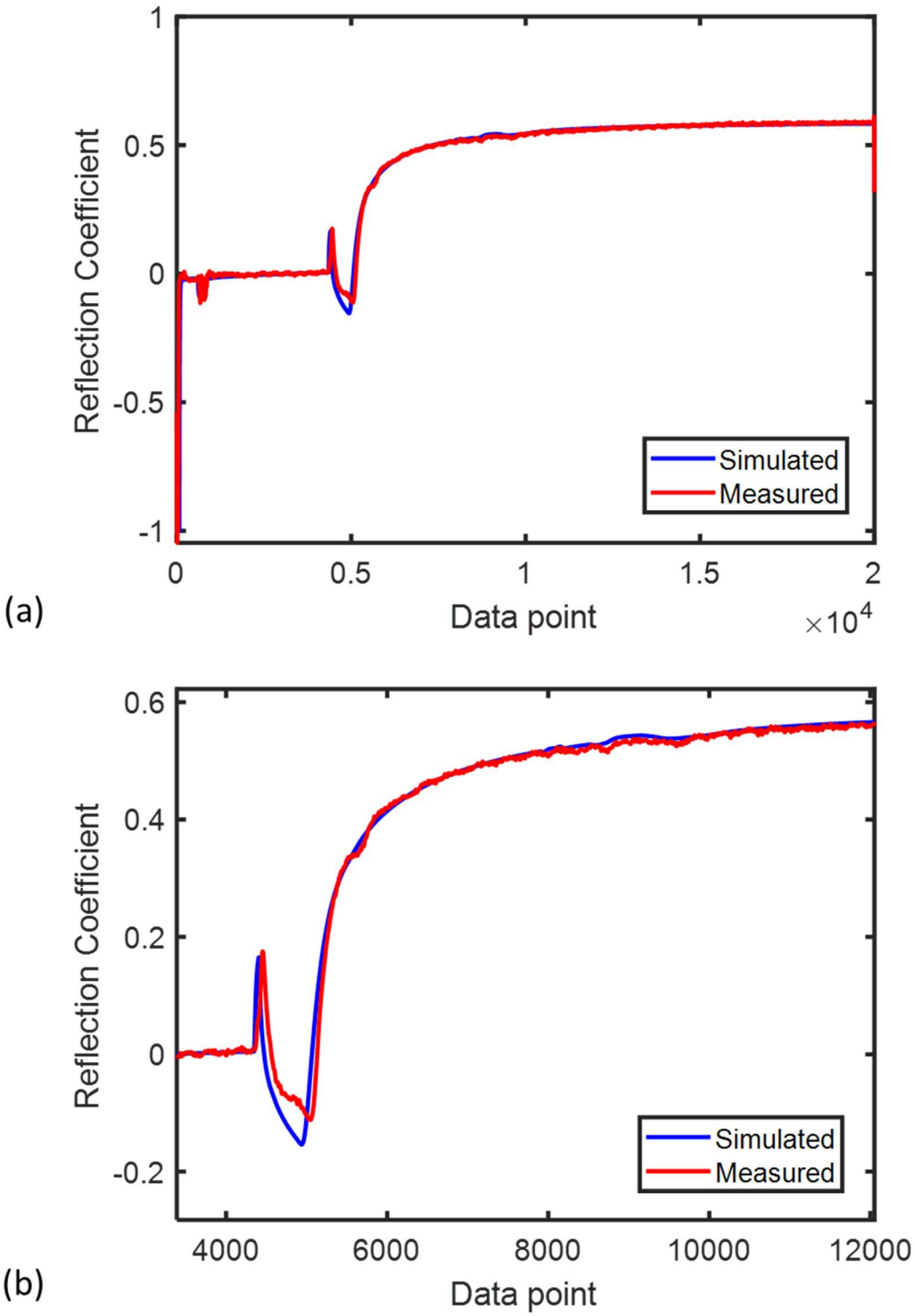
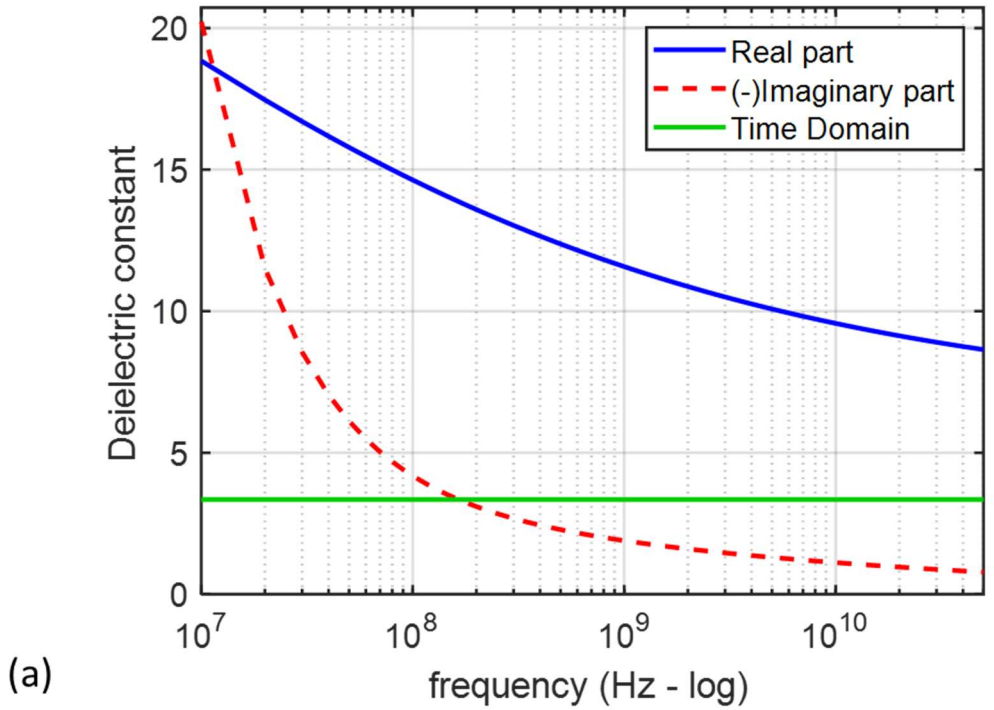


圖 2-254(第一組，2021/9/1601:03:32)模擬與量測值對照圖(1×10^{11}Hz之擷取頻率)(a)完整波型，(b)放大感測段之波型



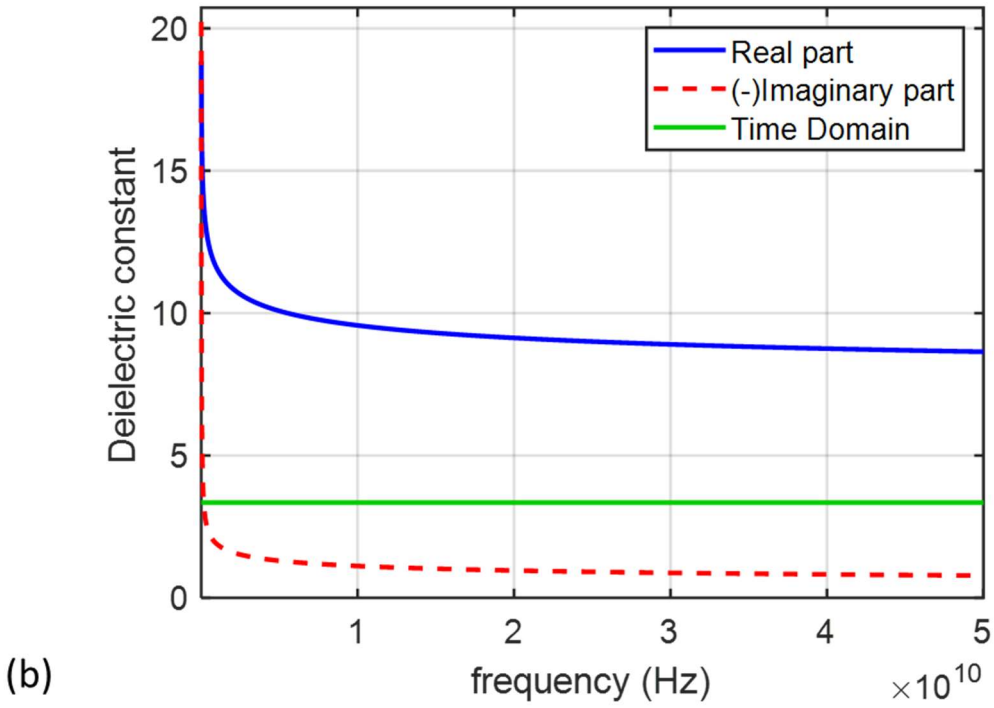


圖 2-255(第一組，2021/9/1601:03:32)(紅土)試體之介電頻譜(Cole-Cole function 理論值)(a)x 對軸為對數刻度，(b)x 對軸為正常刻度

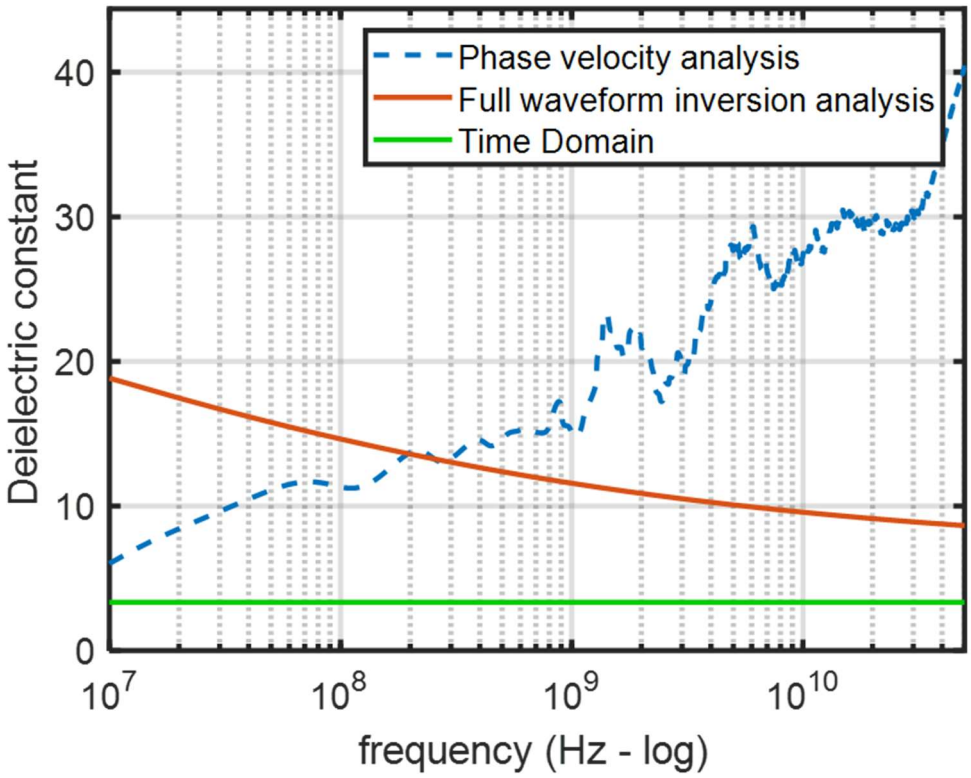


圖 2-256(第一組，2021/9/1601:03:32)Phase velocity analysis 介電常數頻譜理論值與 Cole-Cole function 之介電常數頻譜理論值對照圖

ii. (第二組-乾密度組-鬆-1.3g/cm^3)分析結果：

圖 2-257 為實驗結果，並取出降雨前、第一次降雨最高體積含水量、第一次降雨最低體積含水量、第二次降雨最高體積含水量、乾燥期最低體積含水量等資料進行 TDR 全波形反算分析法與 PVA 的介電頻譜分析。

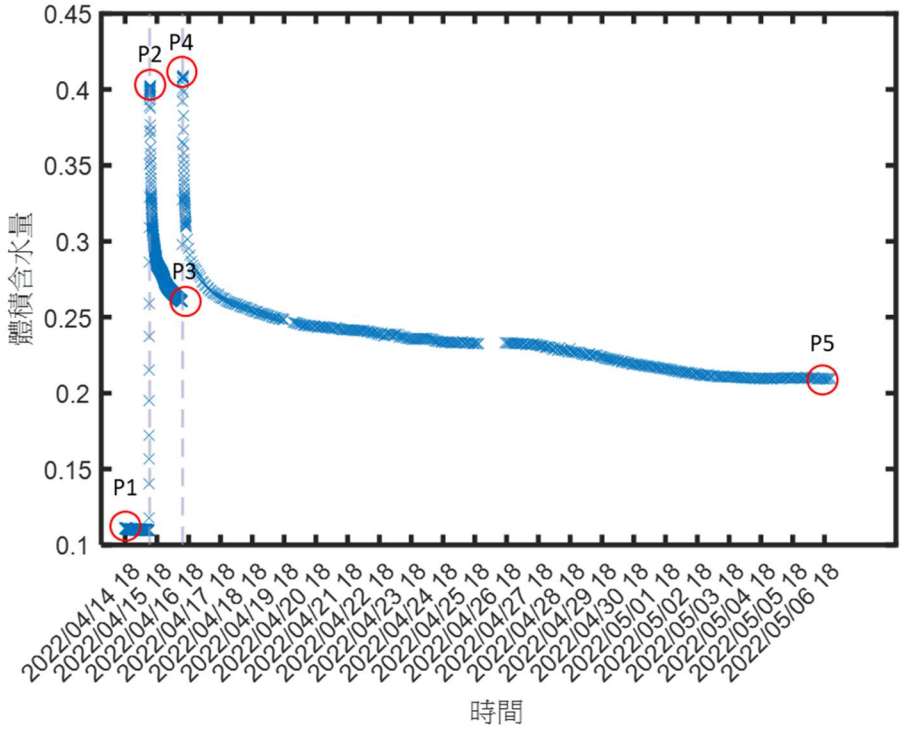


圖 2-257 分析時間點(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)

傳輸線系統的分段區域分別為纜線段、AB 膠段與感測段，並定義其分段長度(3.6 m、0.068 m 與 0.24 m。)。降雨前(P1)與乾燥期最低體積含水量(P5)之波形可以明顯看到分層，上土層較乾於下土層，所以在分析降雨前之介電頻譜時在感測段在特別分成 2 段(各為 0.123 m)，使模擬波形更加擬和。在分析實驗數據之前，使用自來水率定三重電極感測段Z_p與α_R，率定結果其值分別為 167.143(Ω)與 420.364($sec^{-0.5}$)。

在兩次乾溼循環中，低含水量的 TDR 全波形反算分析法之參數結果(表 2-30 與表 2-34)相比於高含水量之結果(表 2-31、表 2-32 與表 2-33)，ε_s、ε_∞與ξ具有較高的值，而f_{rel} 弛豫頻率(Relaxation

Frequency)具有較低的值。

在 P1、P2、P3、P4、P5 的分析範圍如圖圖 2-258、圖 2-261、圖 2-264、圖 2-267、圖 2-270。在介電頻譜方面，TDR 全波形反算分析法分析出來的 Cole-Cole function 介電頻譜與時域介電常數的交點在於 MHz 左右和幾 GHz 頻段(TDR 測量到的頻段)之內，所以 Cole-Cole function 參數屬於合理範圍(圖 2-259、圖 2-262、圖 2-265、圖 2-268、圖 2-271)。

而 PVA 頻譜在於 100 MHz 到 1 GHz 為可信頻段， PVA 頻譜與時域介電常數的交織區域或碰觸到的區間大部分在於 100 MHz 到 1 GH 左右，屬可信頻段範圍內(圖 2-259、圖 2-262、圖 2-265、圖 2-268、圖 2-271)。當土壤有大量的水入滲時(P2 圖 2-262、P3 圖 2-265、P4 圖 2-268)，PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜在 10 MHz 到 1 GH 左右高度相似，而 P1(圖 2-259)的 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜在 200 MHz 到 1 GH 左右部份重疊，而 P5(圖 2-271)的 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜則在 100 MHz 重疊，以及在 10 MHz 到 100 MHz 的部份成相同的下降趨勢。

目前可以看見在土壤較為濕潤時，由於 TDR 全波形反算分析法頻譜在反算時，感測段並沒有進行分段的動作，表示土壤屬於較為均值的狀態，使得 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜可以非常好的相互驗證彼此的可靠性(圖 2-262、圖 2-265、圖 2-268)。

表 2-30 (P1)TDR 全波形反算分析法反算結果

P1	纜線段	AB膠段	感測段1	感測段2	感測段平均
ε_s	2.225	1.2	35.055	35.058	35.0568
ε_∞	2.225	1.2	2.0011	2.0004	2.0008
f_{rel} (Hz)	1	1	1.482×10^3	2.626×10^4	1.387×10^4
ξ	0	0	0.831	0.831	0.831
EC_{dc}	0	0	0.000809	0.000809	0.000809
Z_p	70.233	88	167.143	167.143	167.143
α_R	183.259	20	420.364	420.364	420.364
L	3.6	0.068	0.12	0.12	0.24

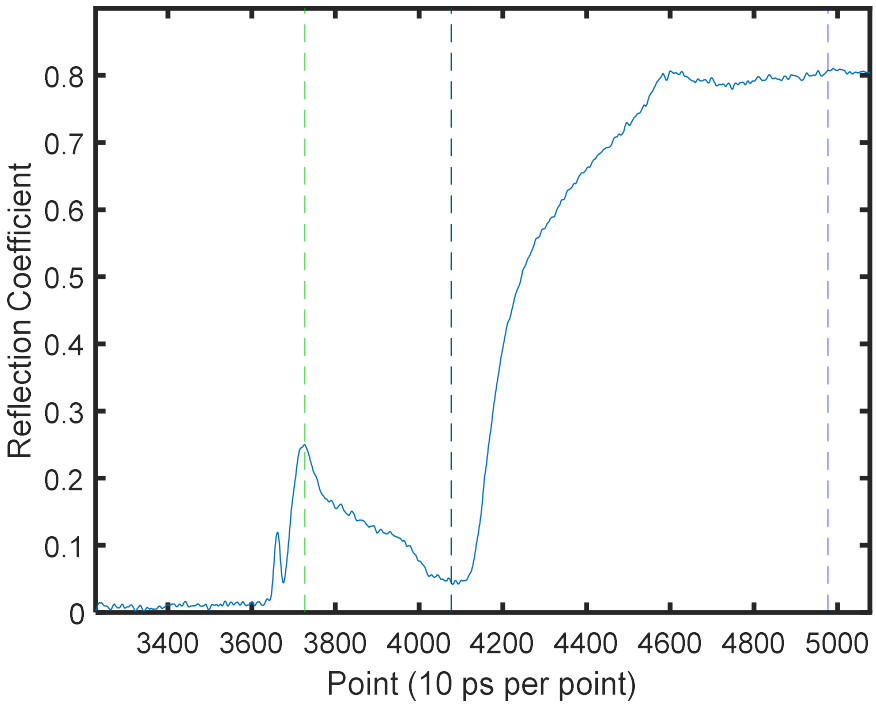


圖 2-258 (P1) PVA 波形微分範圍

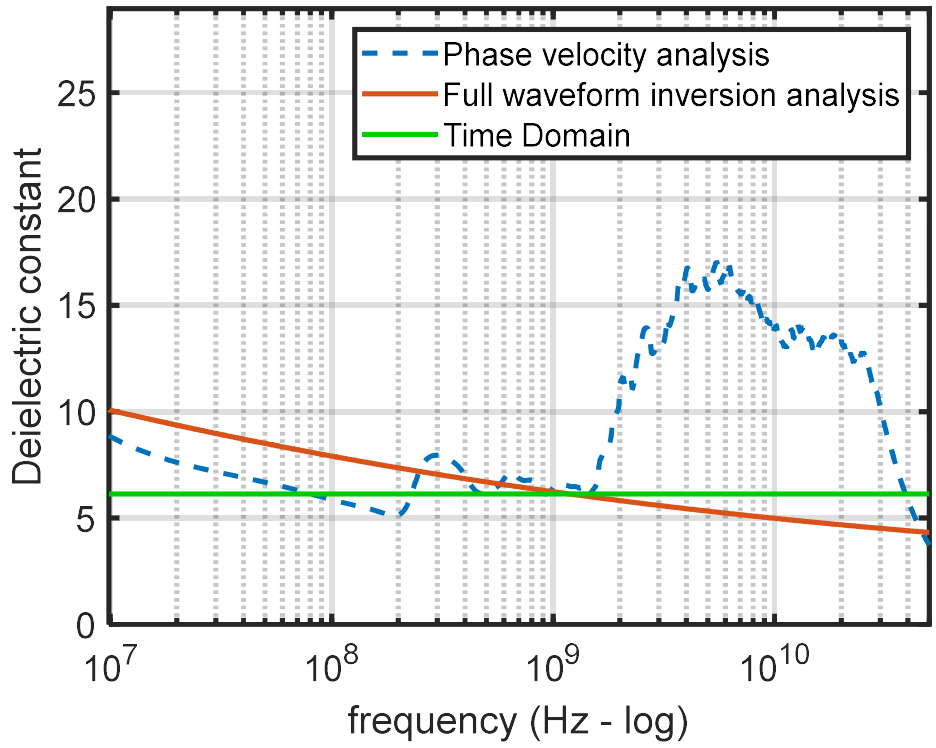


圖 2-259 (P1)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

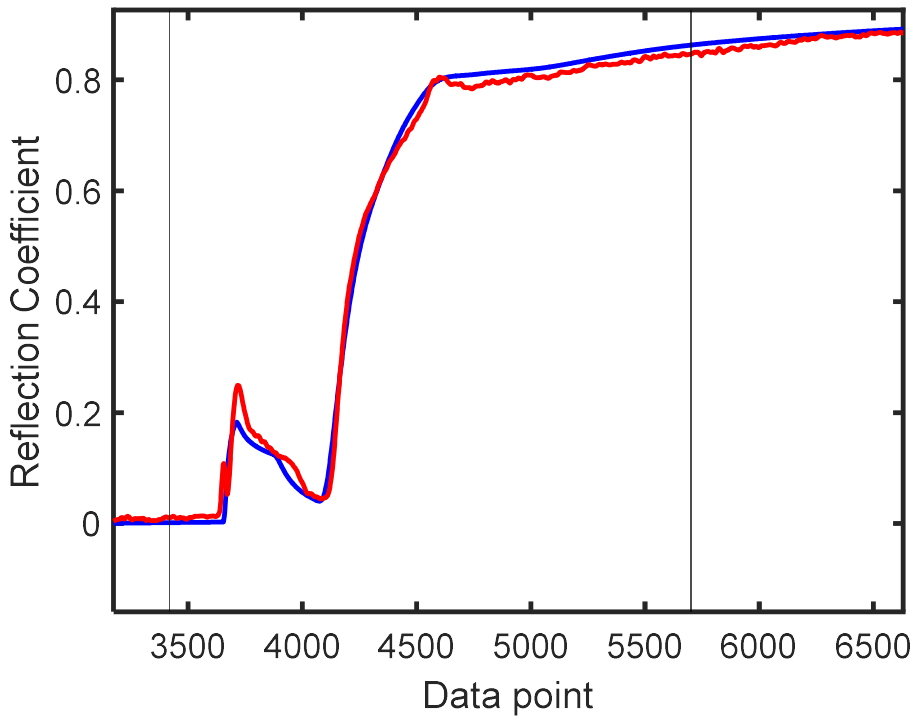


圖 2-260 (P1)模擬與實際波型對照圖

表 2-31 (P2)TDR 全波形反算分析法反算結果

P2	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	78.687
ε_∞	2.225	1.2	21.675
f_{rel} (Hz)	1	1	1.79×10^6
ξ	0	0	0.789
EC_{dc}	0	0	0.0055
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.24

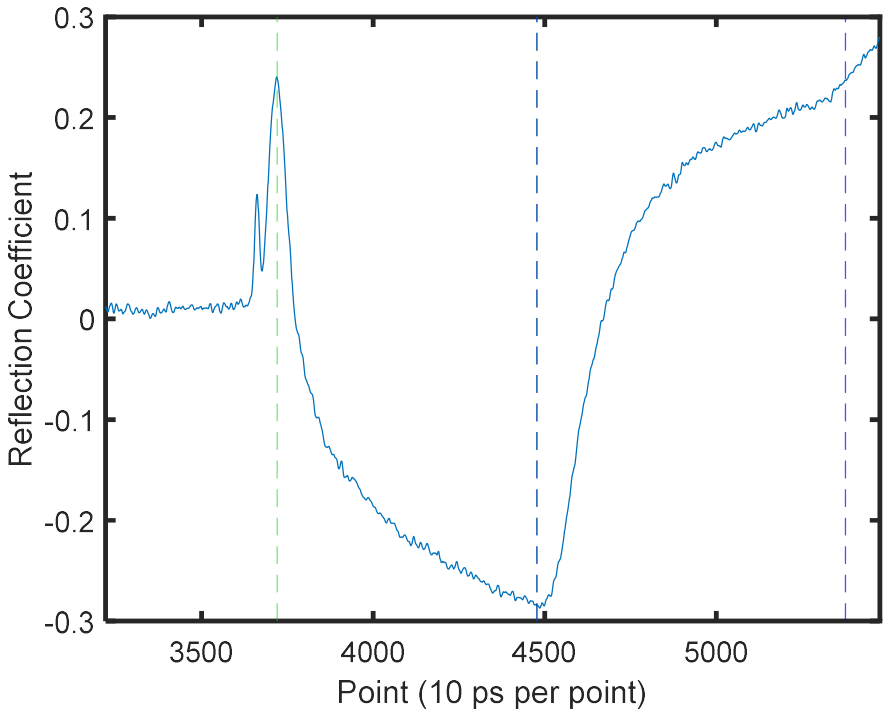


圖 2-261 (P2) PVA 波形微分範圍

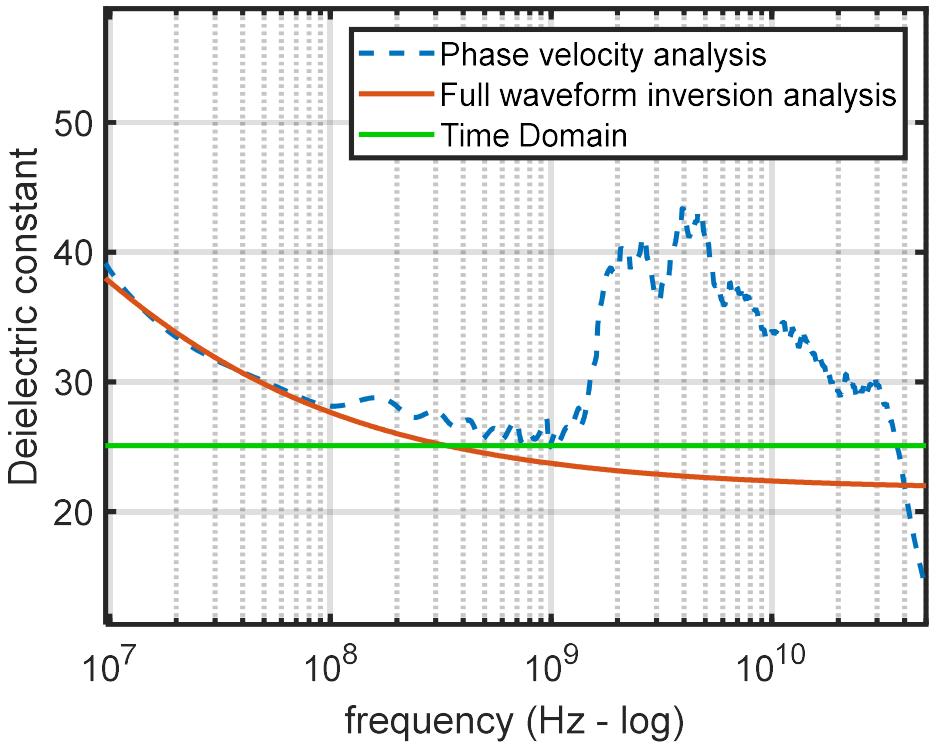


圖 2-262 (P2)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

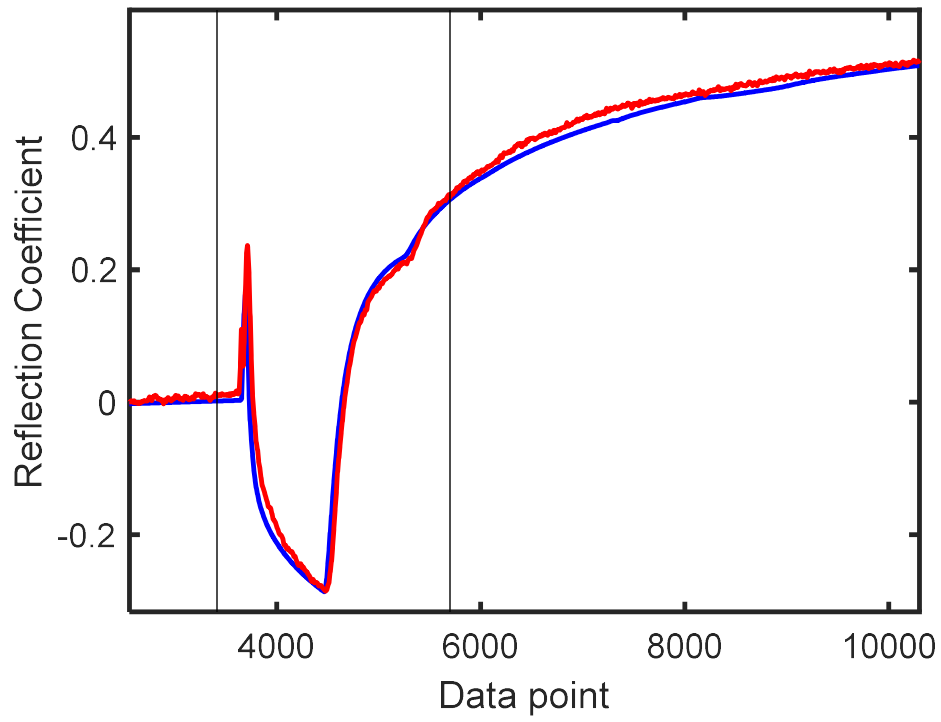


圖 2-263 (P2)模擬與實際波型對照圖

表 2-32 (P3)TDR 全波形反算分析法反算結果

P3	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	52.269
ε_∞	2.225	1.2	12.975
f_{rel} (Hz)	1	1	1.534×10^6
ξ	0	0	0.555
EC_{dc}	0	0	0.0055
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.24

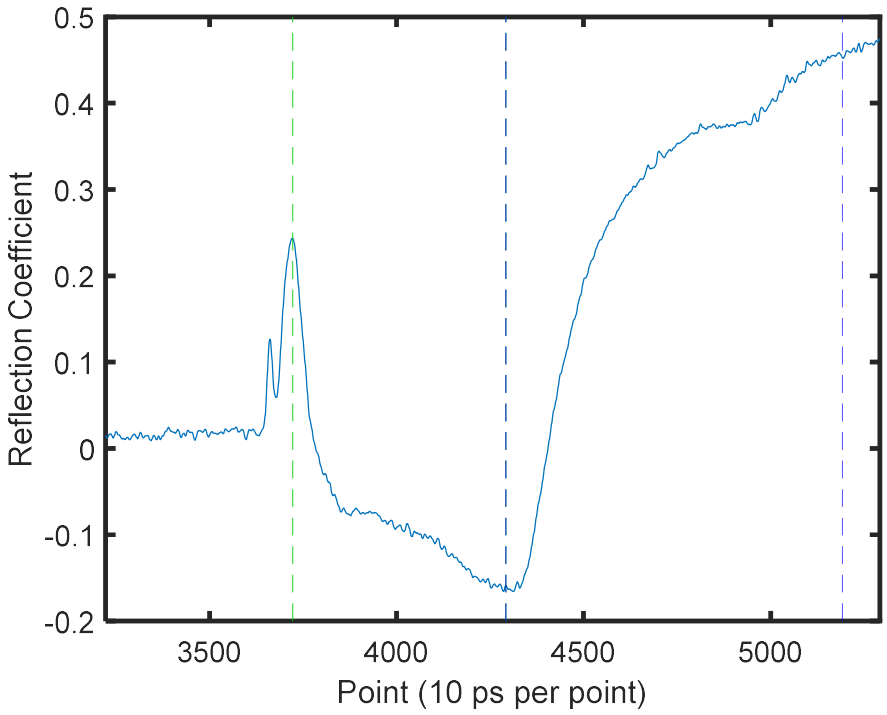


圖 2-264 (P3) PVA 波形微分範圍

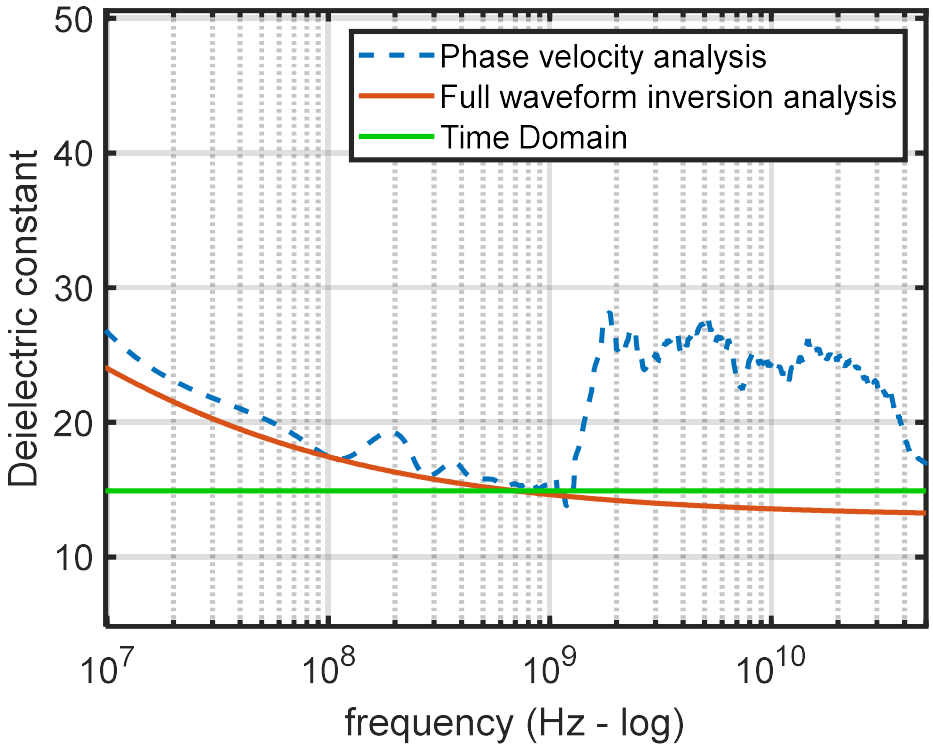


圖 2-265 (P3)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

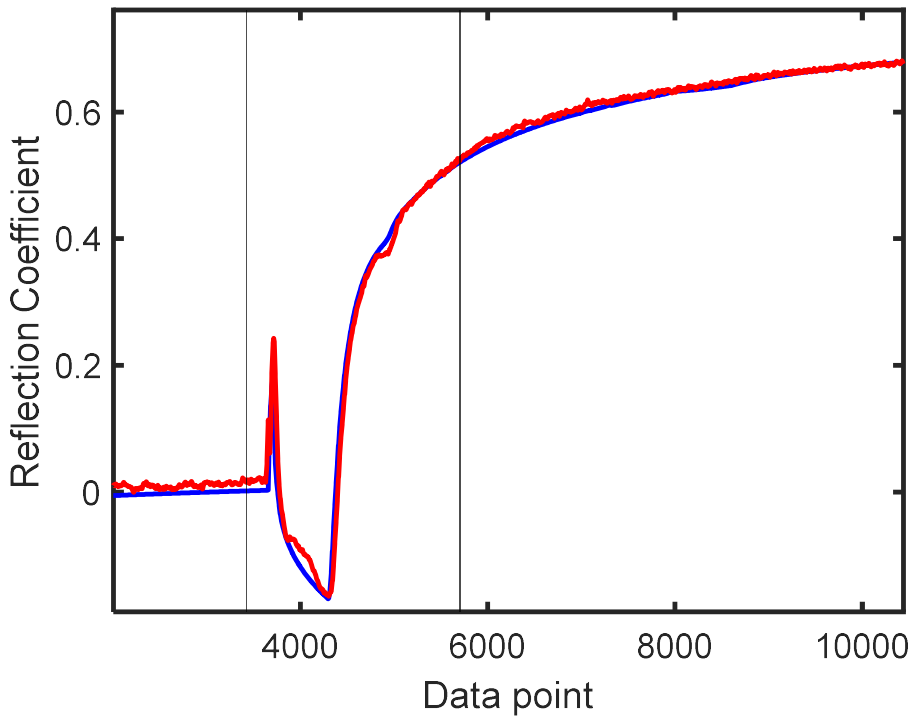


圖 2-266 (P3)模擬與實際波型對照圖

表 2-33 (P4)TDR 全波形反算分析法反算結果

P4	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	79.936
ε_∞	2.225	1.2	22.203
f_{rel} (Hz)	1	1	1.777×10^6
ξ	0	0	0.518
EC_{dc}	0	0	0.009
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.24

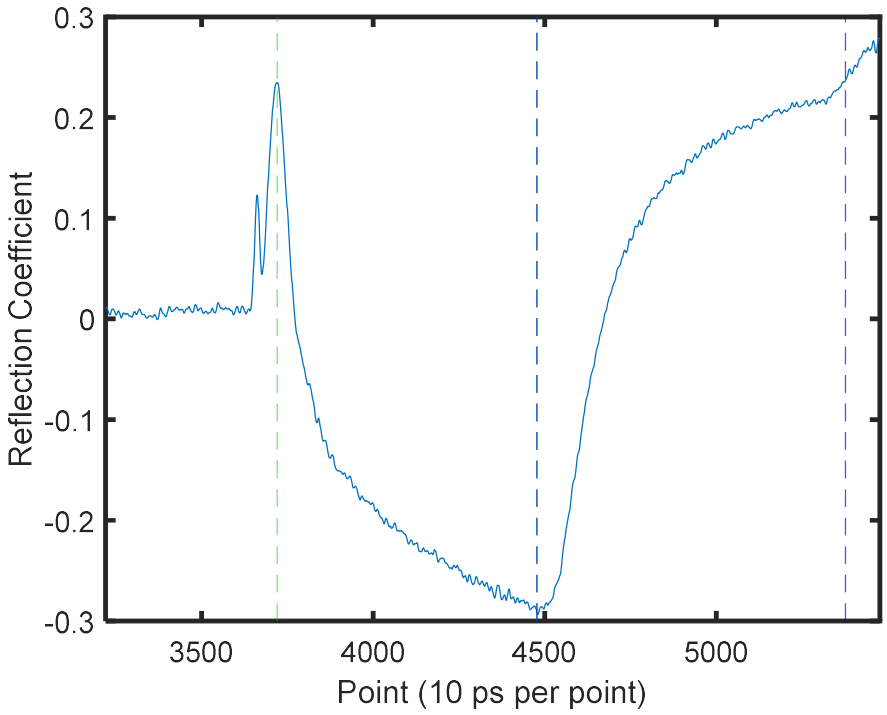


圖 2-267 (P4) PVA 波形微分範圍

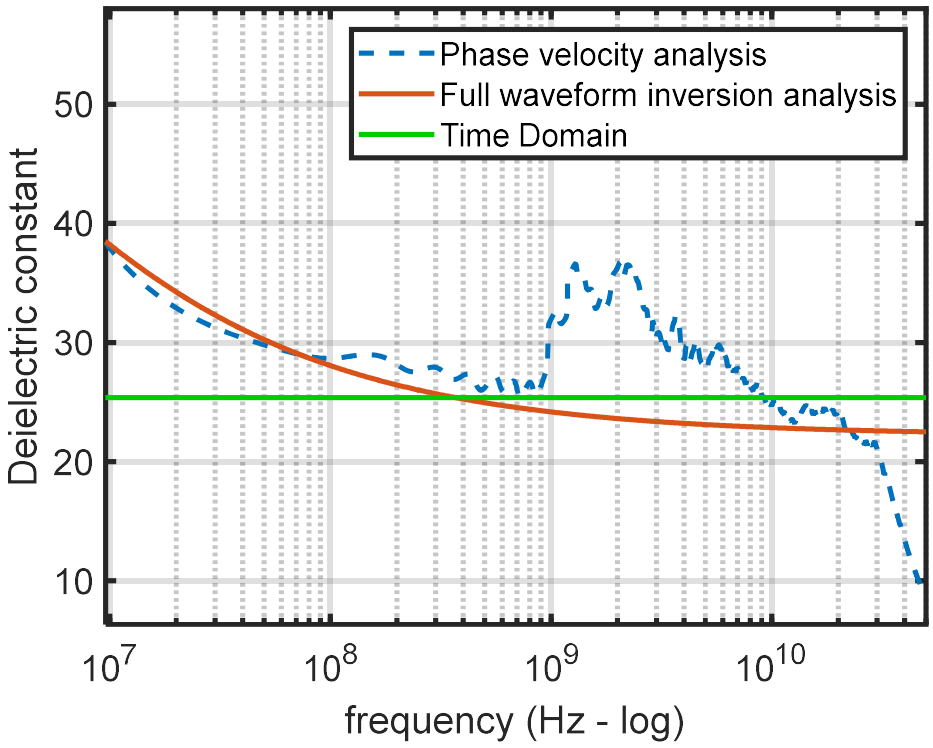


圖 2-268 (P4)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

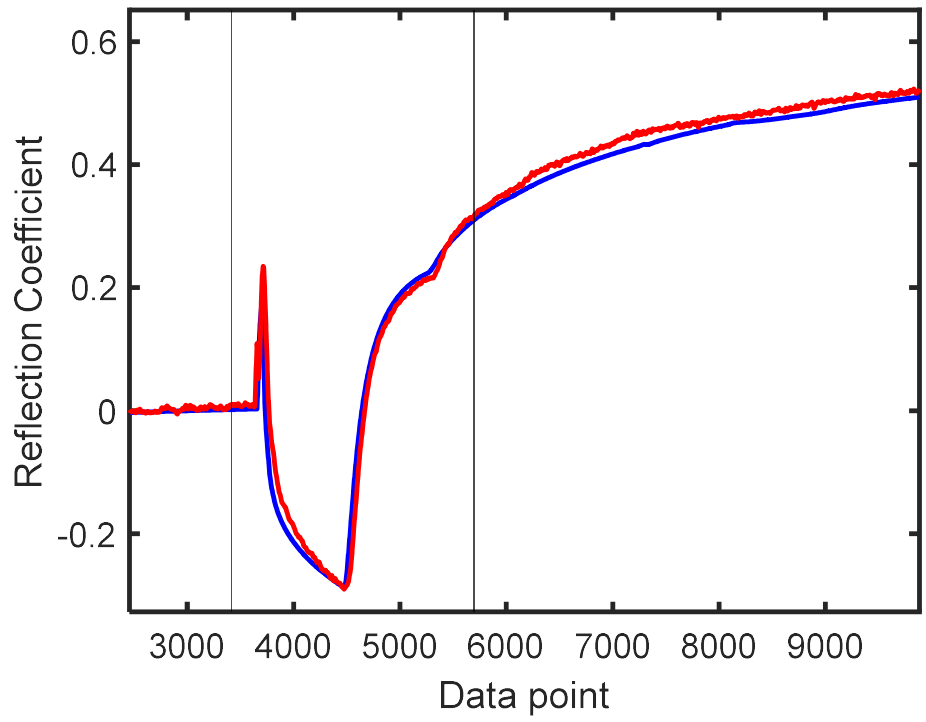


圖 2-269 (P4)模擬與實際波型對照圖

表 2-34 (P5)TDR 全波形反算分析法反算結果

P5	纜線段	AB膠段	感測段1	感測段2	感測段平均
ε_s	2.225	1.2	35.055	35.058	35.0568
ε_∞	2.225	1.2	2.0011	2.0004	2.0008
f_{rel} (Hz)	1	1	1.482×10^3	2.626×10^4	1.387×10^4
ξ	0	0	0.831	0.831	0.831
EC_{dc}	0	0	0.000809	0.000809	0.000809
Z_p	70.233	88	167.143	167.143	167.143
α_R	183.259	20	420.364	420.364	420.364
L	3.6	0.068	0.12	0.12	0.24

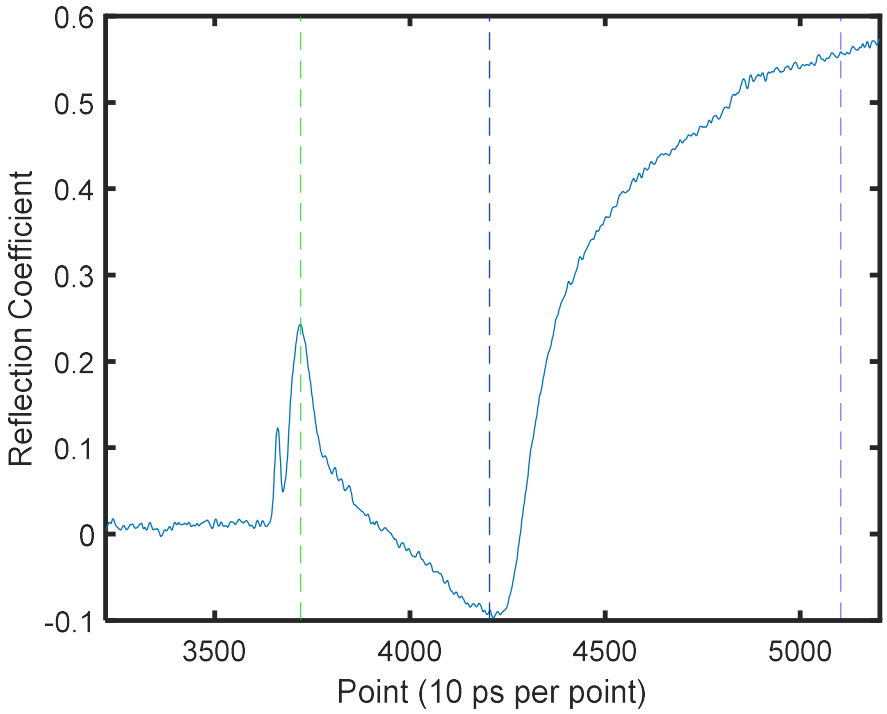


圖 2-270 (P5) PVA 波形微分範圍

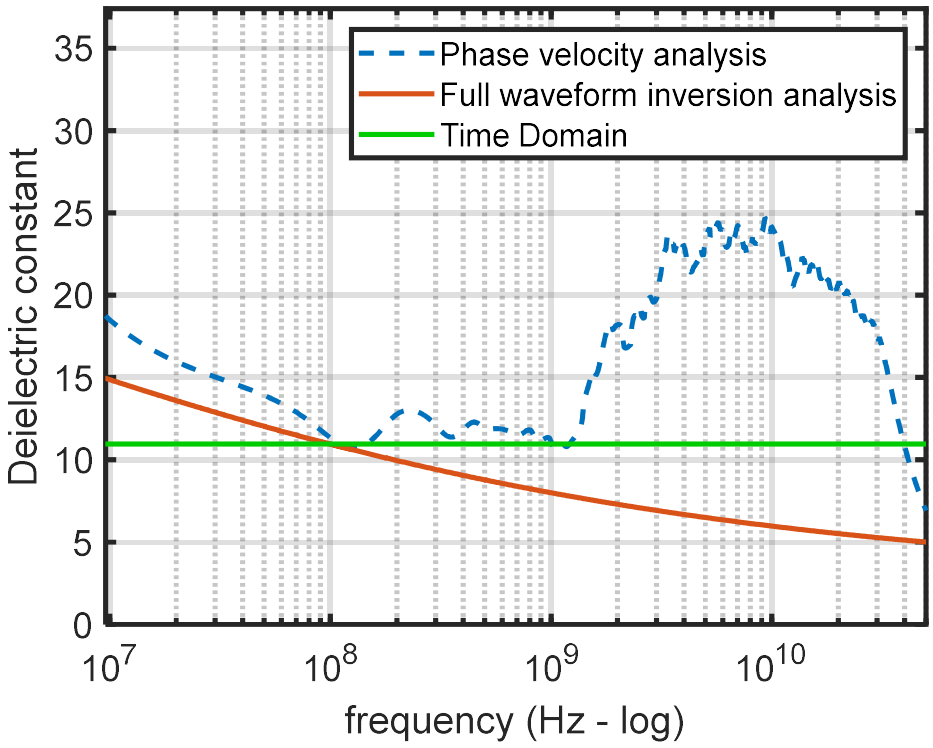


圖 2-271 (P5)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

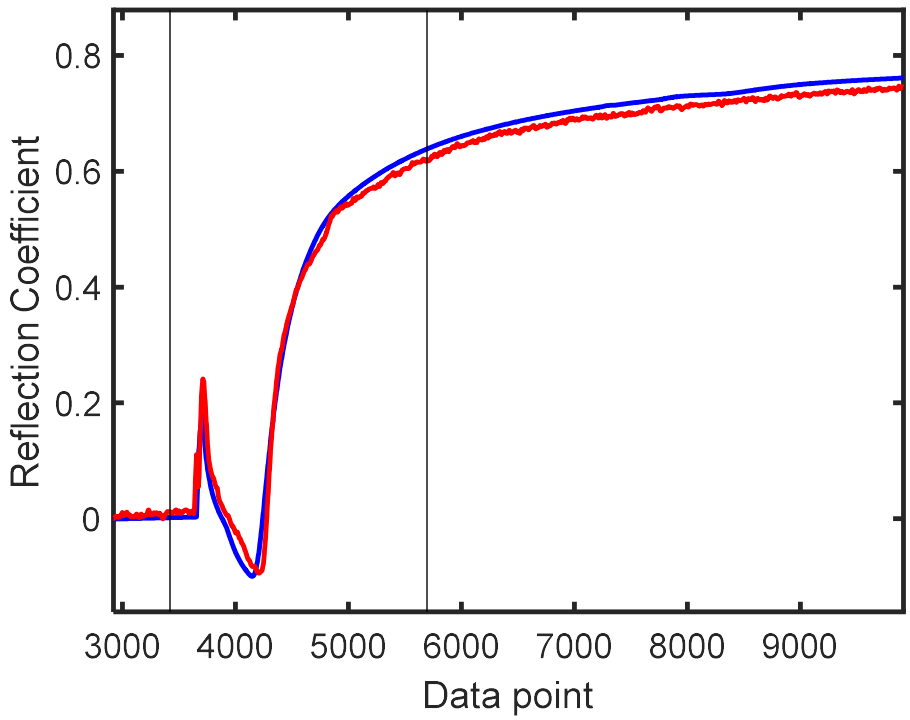


圖 2-272 (P5)模擬與實際波型對照圖

iii. (第三組-自然高導電度組-240 μS/cm)分析結果：

圖 2-273 為實驗結果，並取出降雨前、第一次降雨最高體積含水量、第一次降雨最低體積含水量、第二次降雨最高體積含水量、乾燥期最低體積含水量等資料進行 TDR 全波形反算分析法與 PVA 的介電頻譜分析。

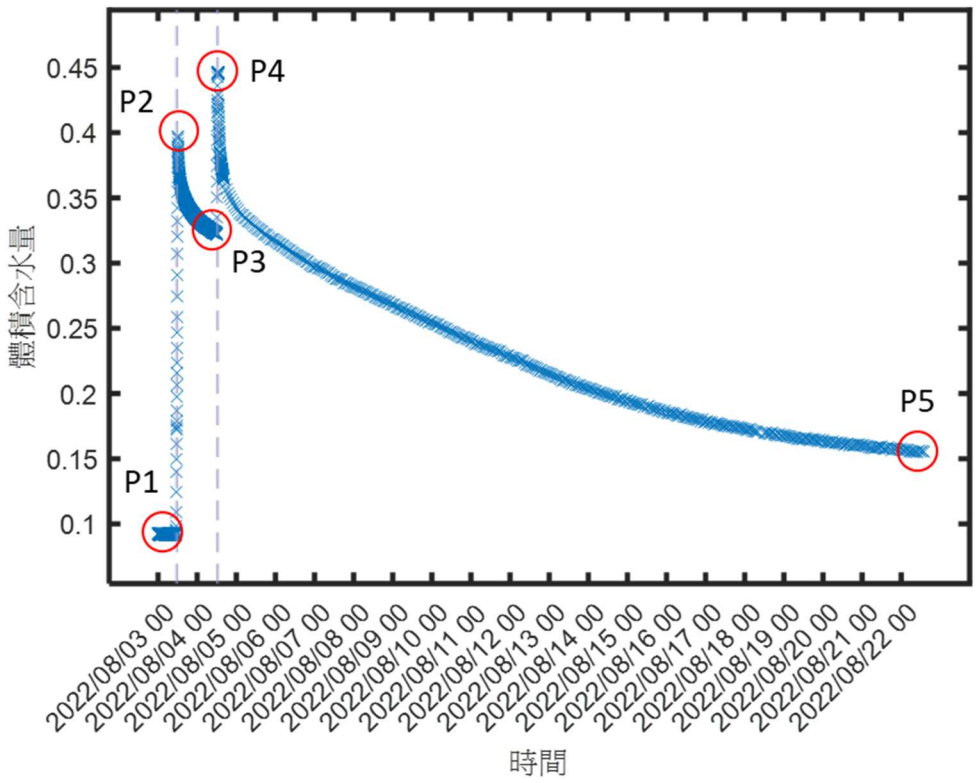


圖 2-273 分析時間點(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)

傳輸線系統的分段區域如同乾密度組 1.3 g/cm^3，分別為纜線段、AB 膠段與感測段，並定義其分段長度(3.6 m、0.068 m 與 0.24 m。)。由於降雨前(P1)與乾燥期最低體積含水量(P5)

之波形可以明顯看到分層，上土層較乾於下土層，所以在分析降雨前之介電頻譜時在感測段在特別分成 2 段(各為 0.123 m)，使模擬波形更加擬和。在分析實驗數據之前，使用自來水率定三重電極感測段Z_p與α_R，率定結果其值分別為 167.143(Ω)與 420.364($sec^{-0.5}$)。

在兩次乾溼循環中，低含水量的 TDR 全波形反算分析法之參數結果(表 2-35 與表 2-39)相比於高含水量之結果(表 2-36、表 2-37 與表 2-38)，ε_s與ε_∞具有較高的值，而f_{rel}弛豫頻率(relaxation frequency)在經過兩次乾溼循環後些微變動，而ξ在表 2-39 乾燥期未如預期下降，是否為試體浸泡高導電度水有待觀察。

在 PVA 頻譜的方面，P1、P2、P3、P4、P5 的分析範圍如圖 2-274、圖 2-277、圖 2-280、圖 2-283、圖 2-286。在介電頻譜方面，如同乾密度組 1.3 g/cm^3，TDR 全波形反算分析法分析出來的 Cole-Cole function 介電頻譜與時域介電常數的交點在於 MHz 左右和幾 GHz 頻段(TDR 測量到的頻段)之內(圖 2-275、圖 2-278、圖 2-281、圖 2-284、圖 2-287)。而 PVA 頻譜與時域介電常數的交織區域或碰觸到的區間大部分在於 100 MHz 到 1 GH 左右，屬可信頻段範圍內(圖 2-275、圖 2-278、圖 2-281、圖 2-284、圖 2-287)。

在 P2、P3 與 P4 的 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜(圖 2-278、圖 2-281、圖 2-284)在 10 MHz 到 1 GH 左右高度相似，而 P1 的 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜(圖 230)在 100 MHz 到 3 GH 左右部份重疊，而 P5 的 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜(圖 2-287)則在 200 MHz

重疊，以及在 10 MHz 到 100 MHz 的部份成相同的下降趨勢。

依大致上頻譜的趨勢，如同乾密度組 1.3 g/cm^3，在土壤較為濕潤時(P2 圖 2-278、P3 圖 2-281、P4 圖 2-284)， PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜可以非常好的相互驗證。

表 2-35 (P1)TDR 全波形反算分析法反算結果

P1	纜線段	AB膠段	感測段1	感測段2	感測段平均
ε_s	2.225	1.2	28.429	30.563	29.496
ε_∞	2.225	1.2	1.943	2.766	2.355
f_{rel} (Hz)	1	1	1.514×10^5	1.0613×10^6	$6..0633 \times 10^5$
ξ	0	0	0.738	0.738	0.738
EC_{dc}	0	0	0.000797	0.000797	0.000797
Z_p	70.233	88	167.143	167.143	167.143
α_R	183.259	20	420.364	420.364	420.364
L	3.6	0.068	0.1488	0.0912	0.24

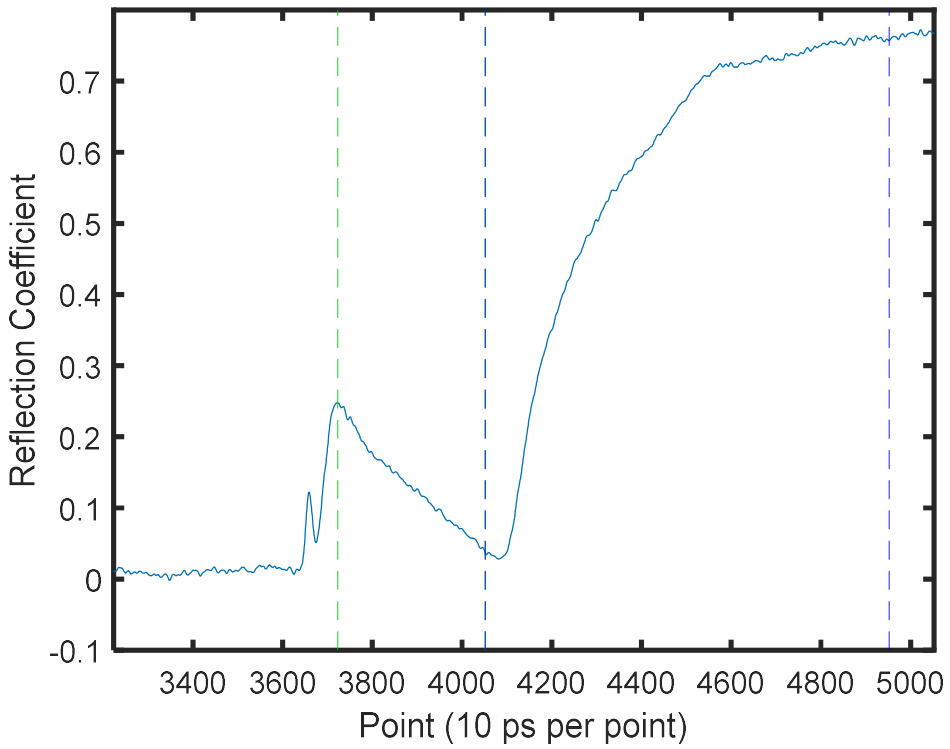


圖 2-274 (P1) PVA 波形微分範圍

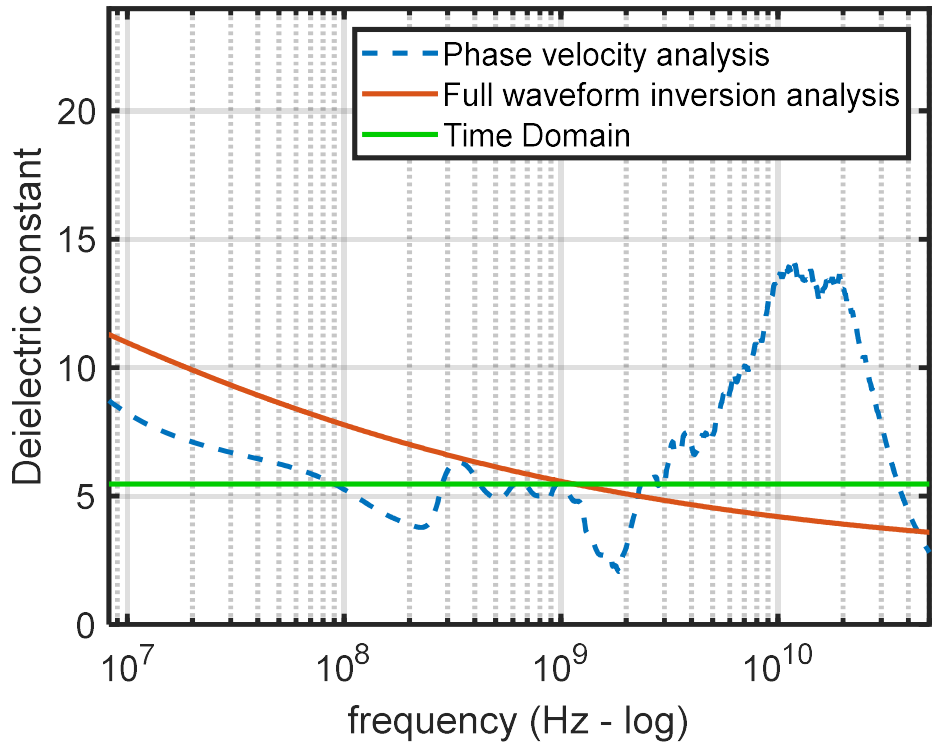


圖 2-275 (P1)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

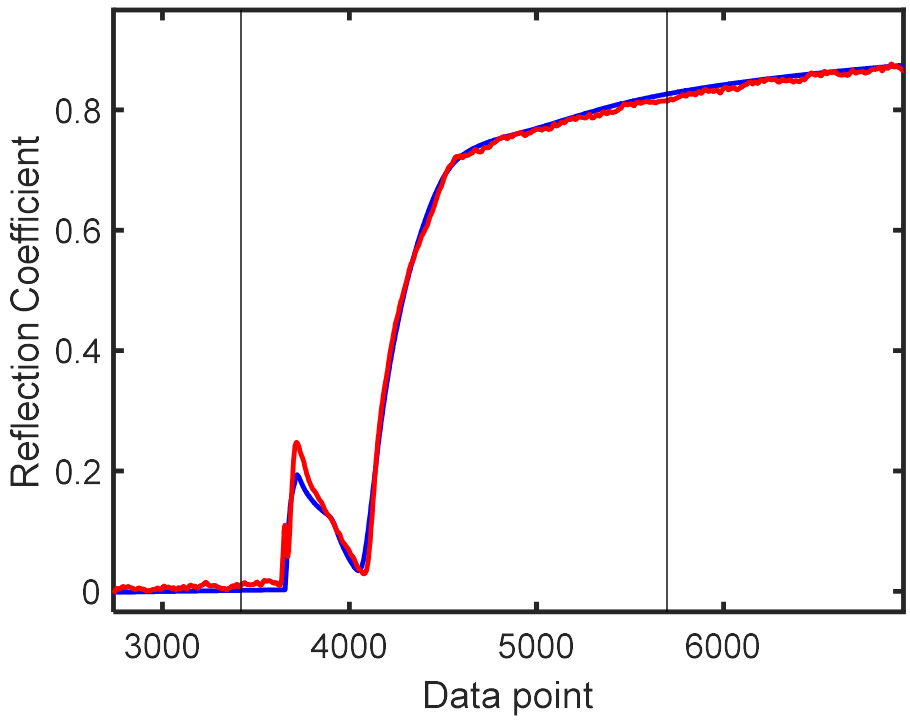


圖 2-276 (P1)模擬與實際波型對照圖

表 2-36 (P2)TDR 全波形反算分析法反算結果

P2	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	80
ε_∞	2.225	1.2	19.665
f_{rel} (Hz)	1	1	2.641×10^6
ξ	0	0	0.522
EC_{dc}	0	0	0.0176
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.24

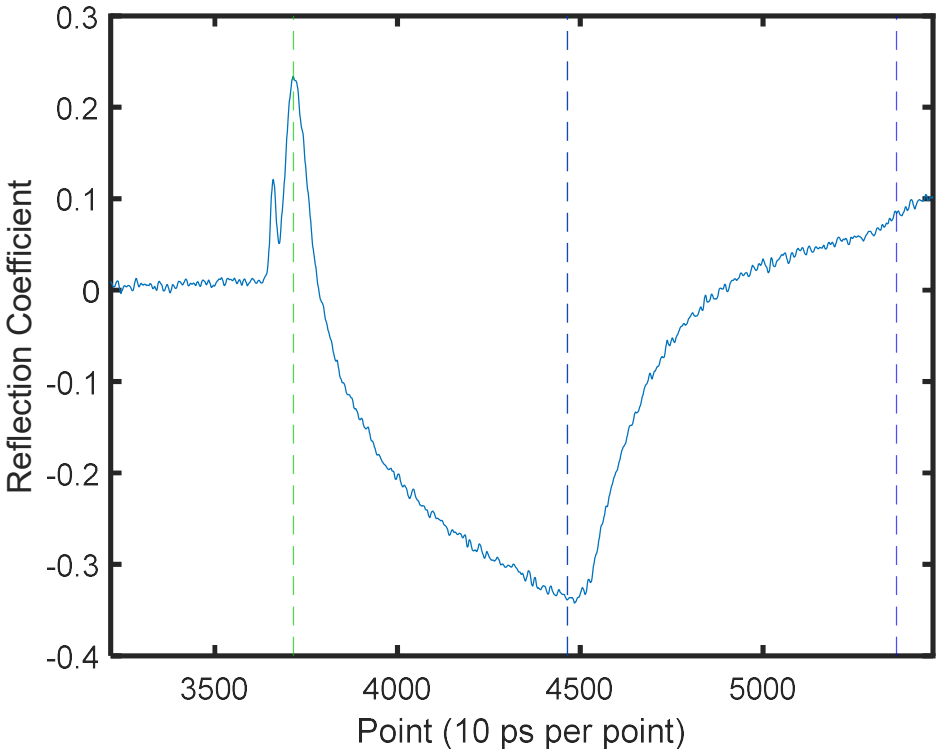


圖 2-277 (P2) PVA 波形微分範圍

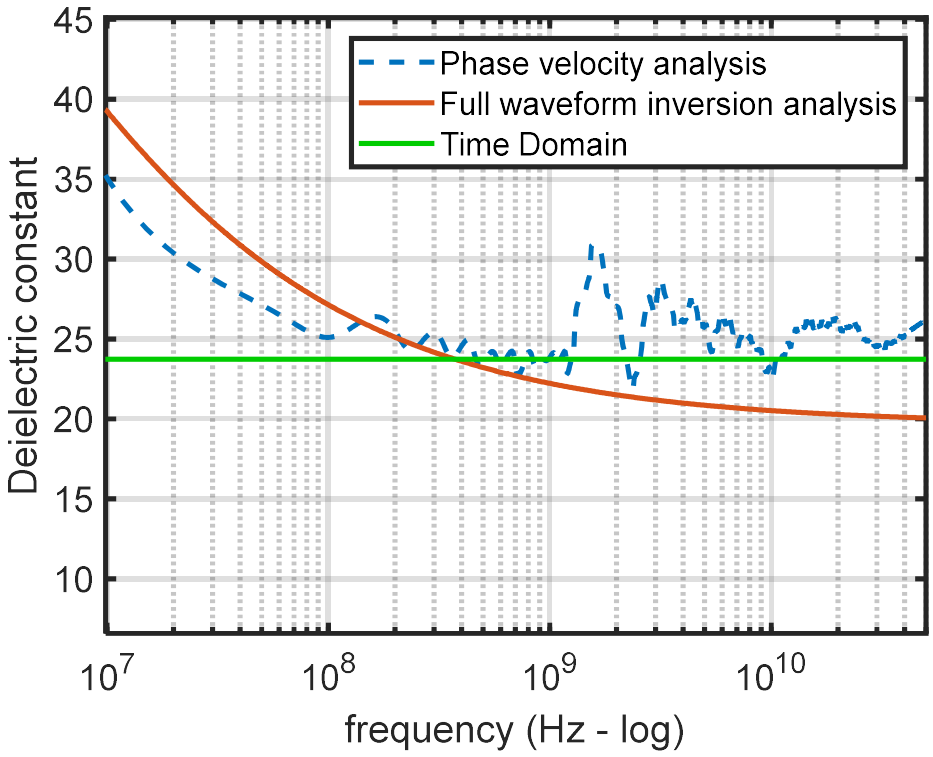


圖 2-278 (P2)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

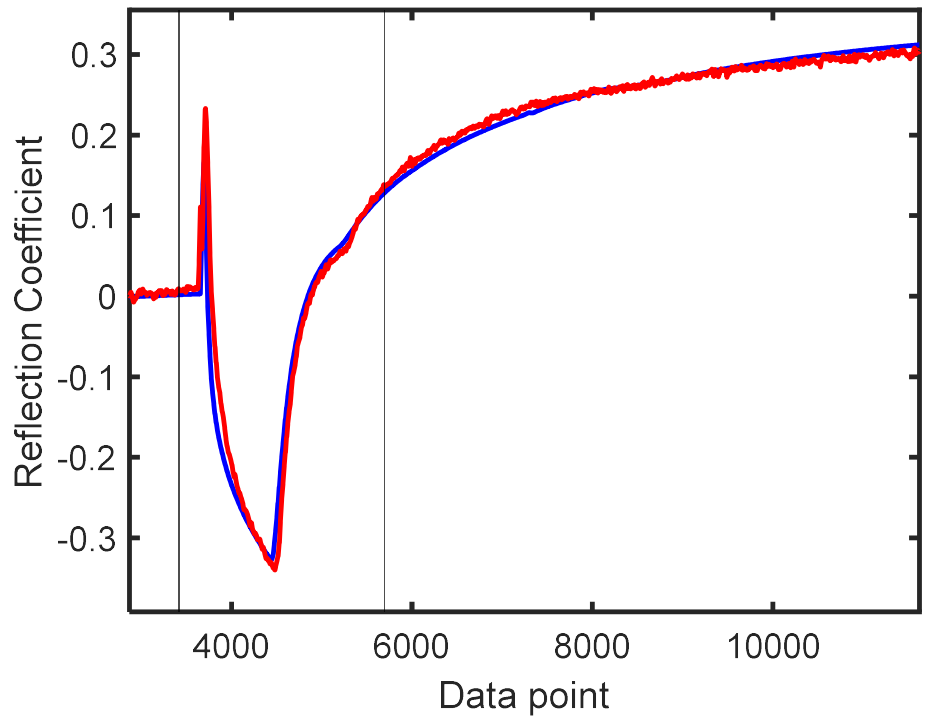


圖 2-279 (P2)模擬與實際波型對照圖

表 2-37 (P3)TDR 全波形反算分析法反算結果

P3	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	70.604
ε_∞	2.225	1.2	12.462
f_{rel} (Hz)	1	1	1.603×10^6
ξ	0	0	0.591
EC_{dc}	0	0	0.0133
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.24

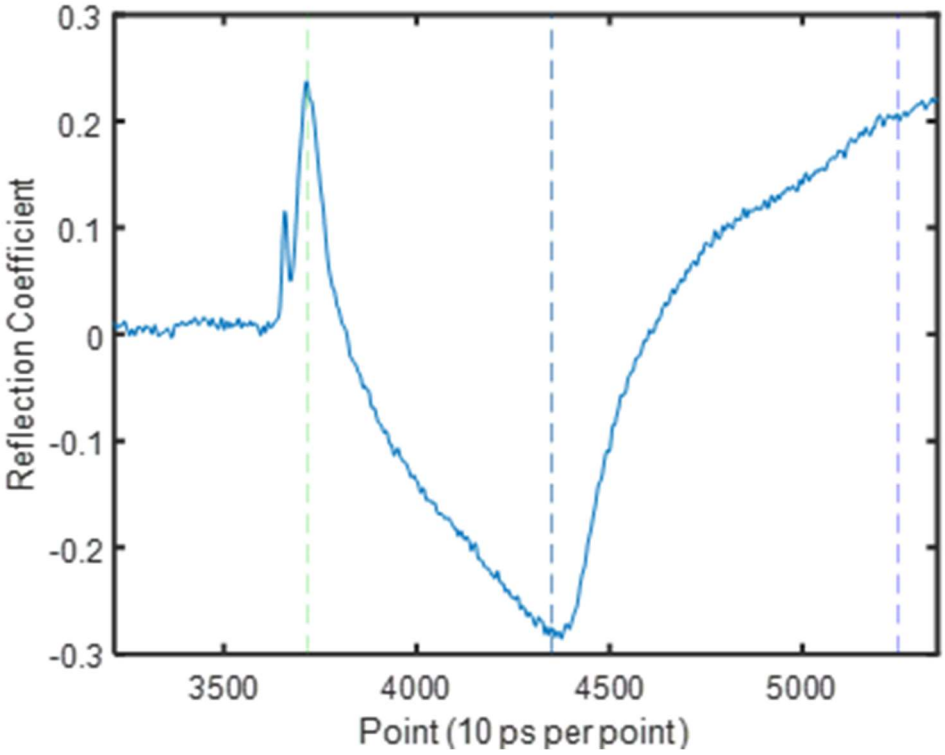


圖 2-280 (P3) PVA 波形微分範圍

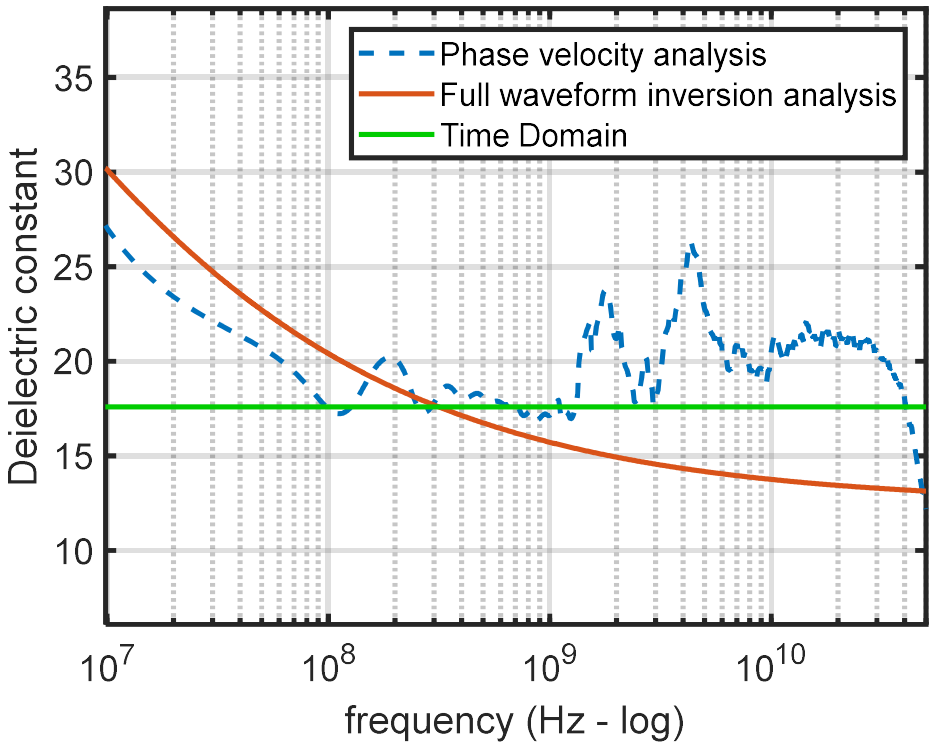


圖 2-281 (P3)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

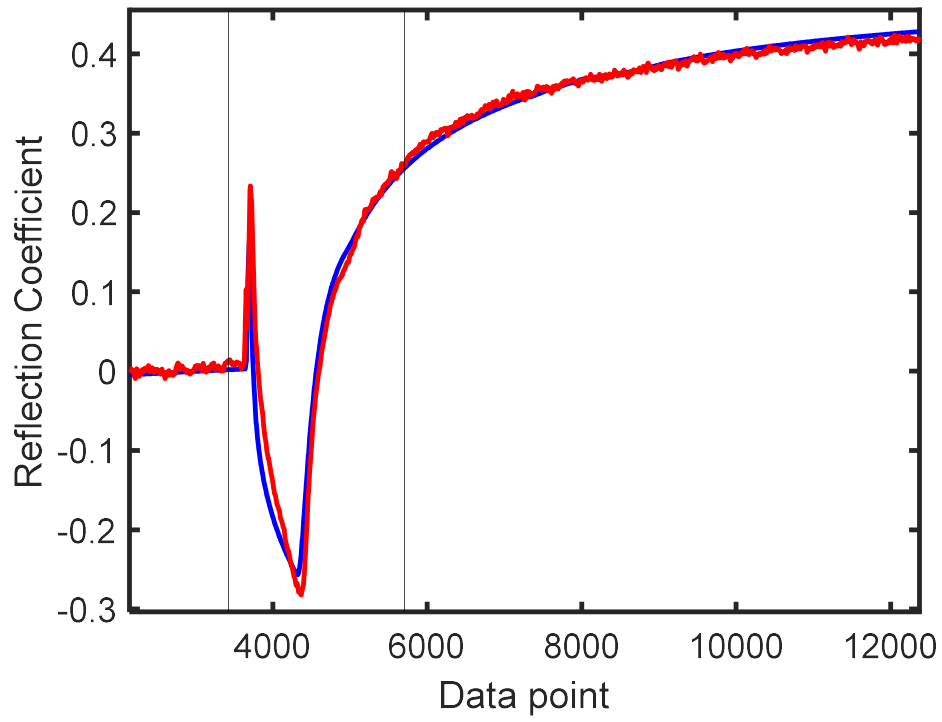


圖 2-282 (P3)模擬與實際波型對照圖

表 2-38 (P4)TDR 全波形反算分析法反算結果

P4	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	80
ε_∞	2.225	1.2	26.191
f_{rel} (Hz)	1	1	3.694×10^6
ξ	0	0	0.487
EC_{dc}	0	0	0.0199
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.24

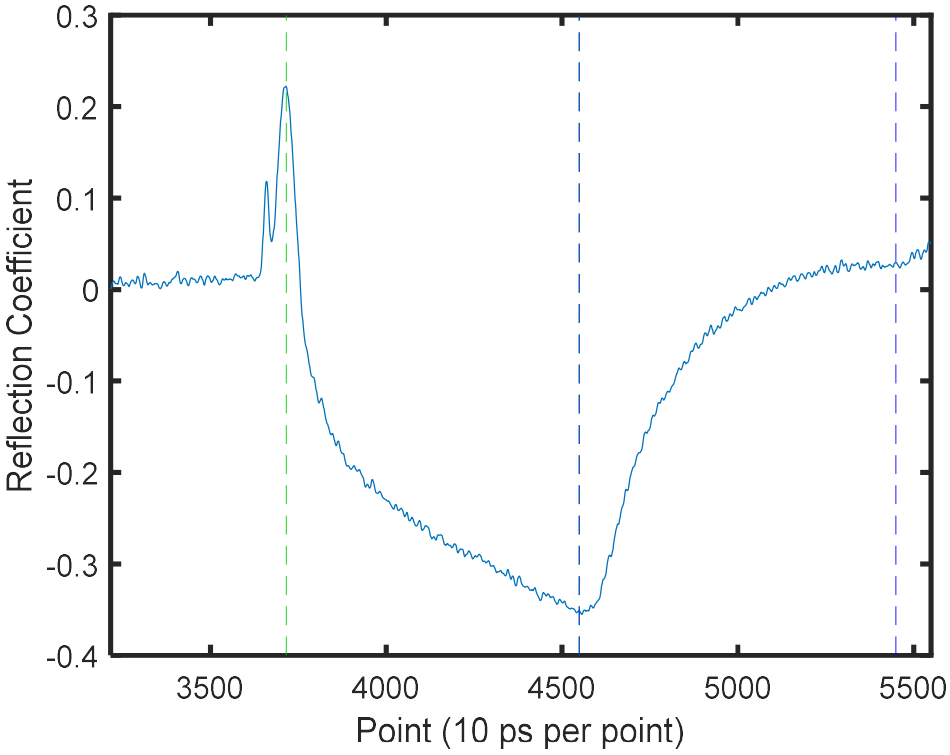


圖 2-283 (P4) PVA 波形微分範圍

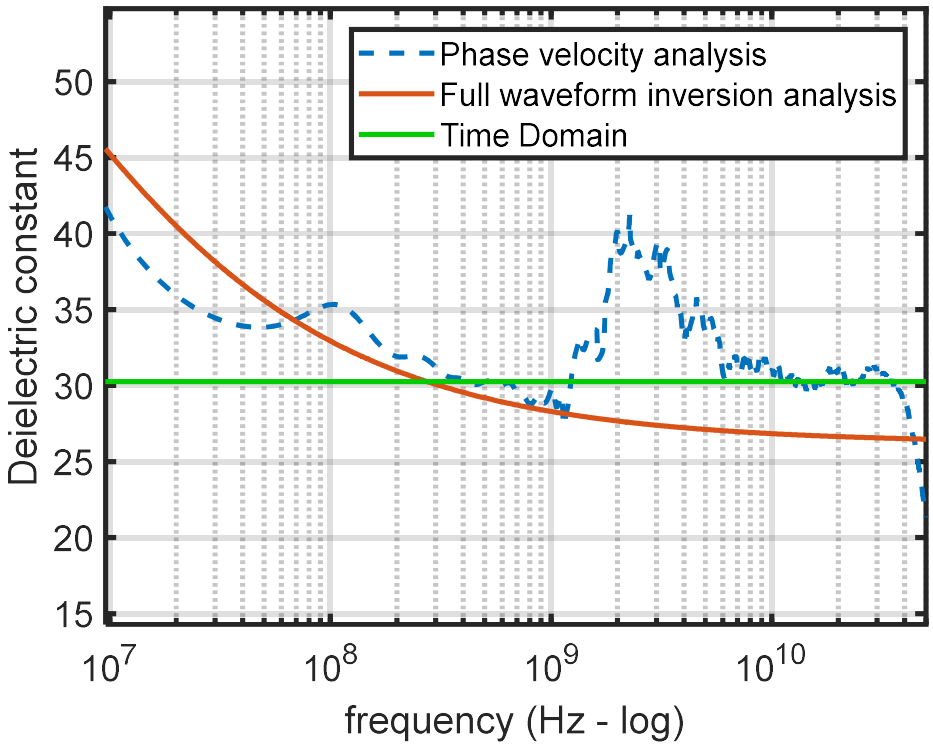


圖 2-284 (P4)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

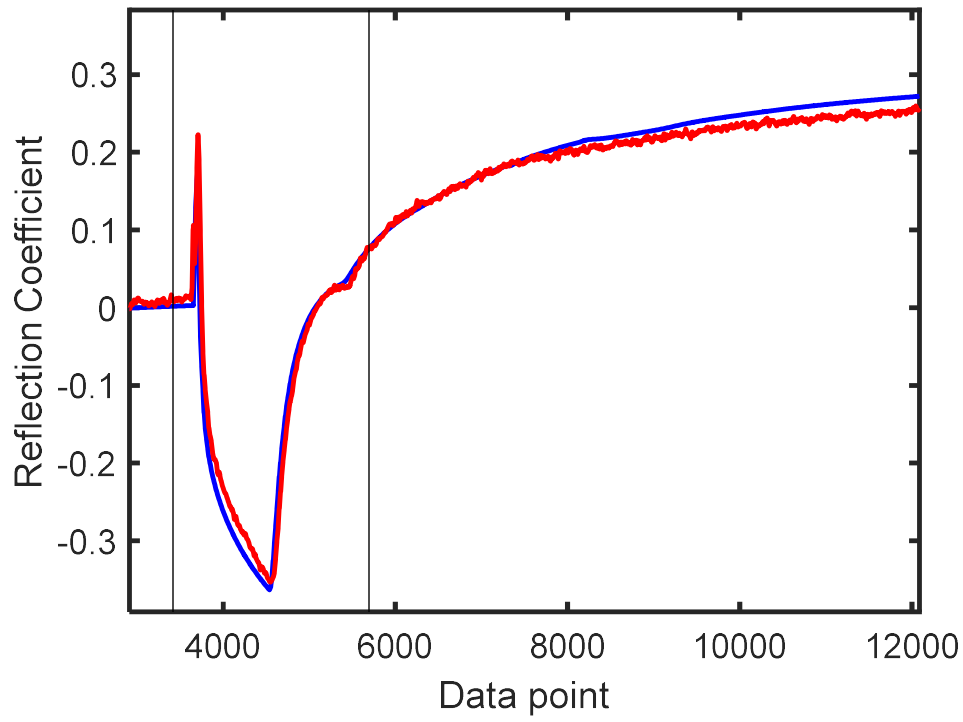


圖 2-285 (P4)模擬與實際波型對照圖

表 2-39 (P5)TDR 全波形反算分析法反算結果

P5	纜線段	AB膠段	感測段1	感測段2	感測段平均
ε_s	2.225	1.2	35.267	30.11	32.689
ε_∞	2.225	1.2	5.0953	6.673	5.884
f_{rel} (Hz)	1	1	7.159×10^6	9.799×10^6	5.821×10^6
ξ	0	0	0.599	0.695	0.571
EC_{dc}	0	0	0.0038	0.0034	0.0036
Z_p	70.233	88	167.143	167.143	167.143
α_R	183.259	20	420.364	420.364	420.364
L	3.6	0.068	0.1488	0.0912	0.24

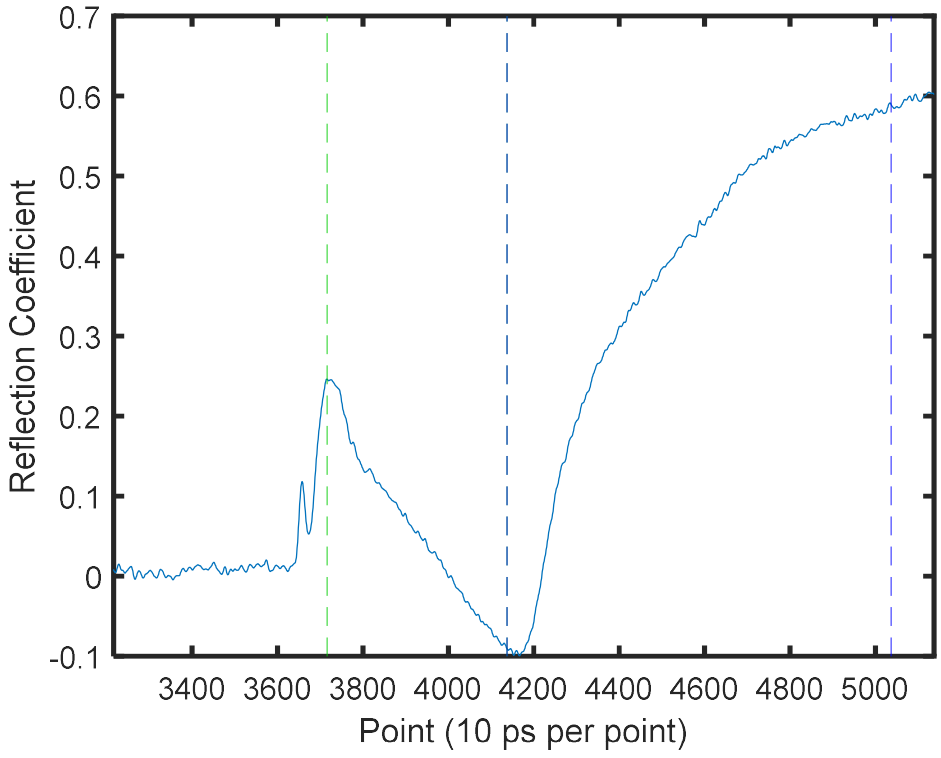


圖 2-286 (P5) PVA 波形微分範圍

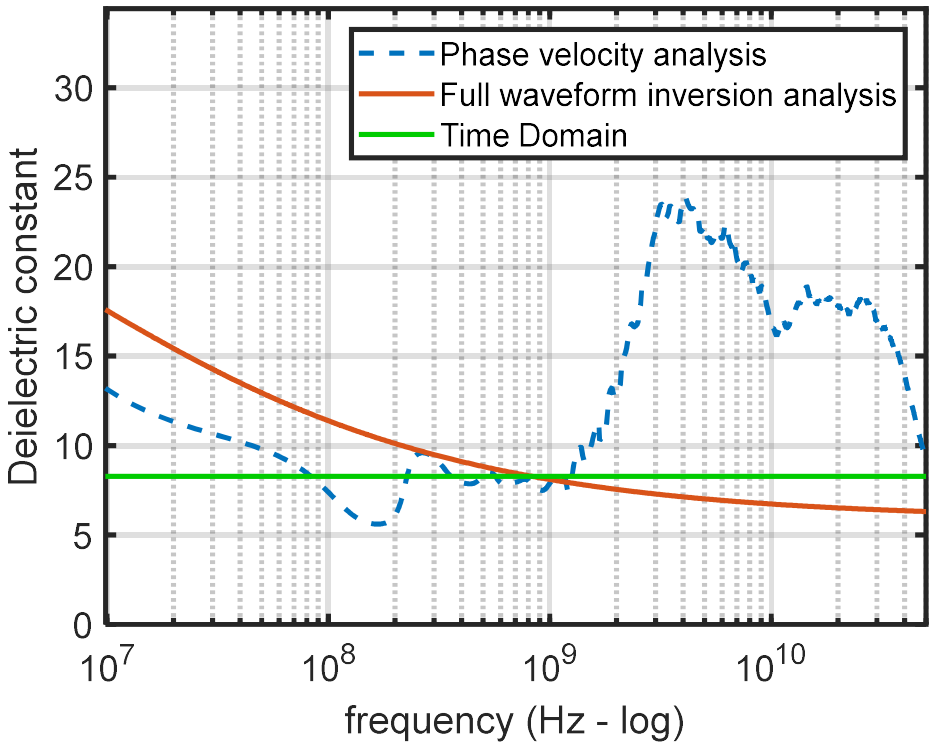


圖 2-287 (P5)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

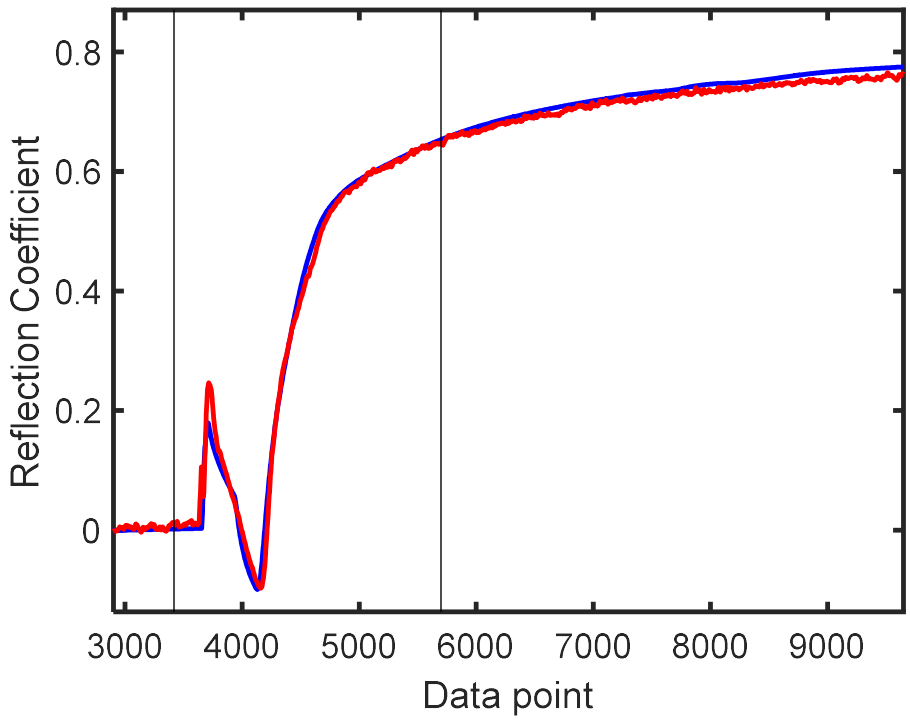


圖 2-288 (P5)模擬與實際波型對照圖

iv.　(第四組-高密度組-1.7 g/cm^3)分析結果：

圖 2-289 為實驗結果，並取出降雨前、第一次降雨最高體積含水量、第一次降雨最低體積含水量、第二次降雨最高體積含水量、乾燥期最低體積含水量等資料進行 TDR 全波形反算分析法與 PVA 的介電頻譜分析。

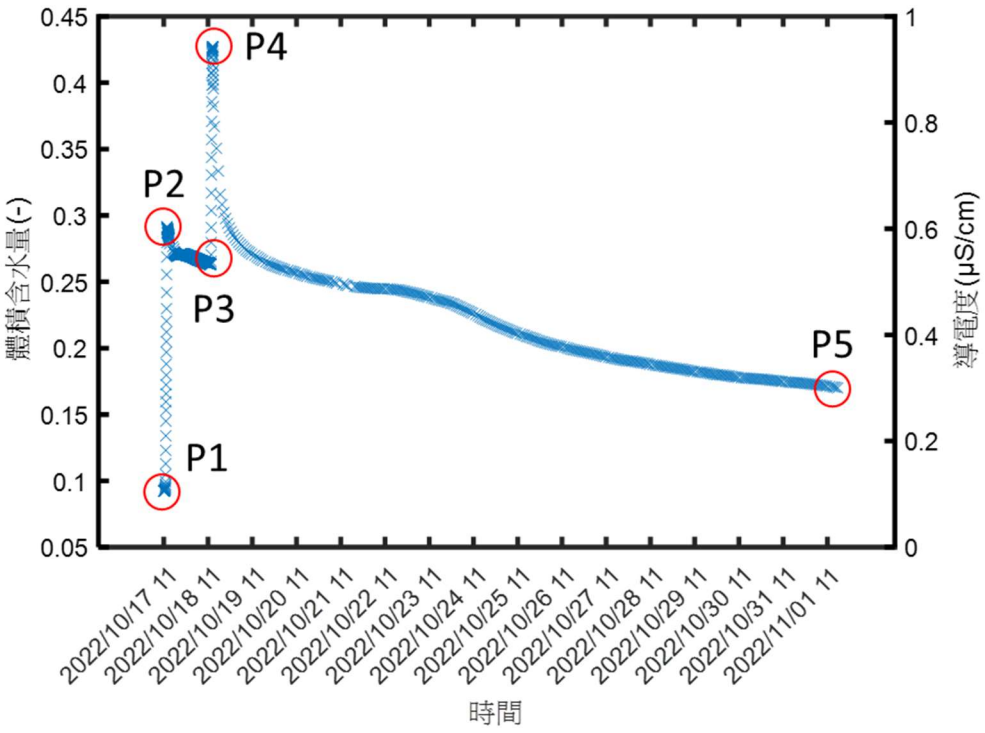


圖 2-289 分析時間點(P1：降雨前、P2：第一次降雨最高體積含水量、P3：第一次降雨最低體積含水量、P4：第二次降雨最高體積含水量、P5：乾燥期最低體積含水量)

傳輸線系統的分段區域分別為纜線段、AB 膠段與感測段，並定義其分段長度(3.6 m、0.068 m 與 0.246m，不同於前面兩組為了使模擬波型更加貼合)。降雨前(P1)與乾燥期最低

體積含水量(P5)之波形可以明顯看到分層，上土層較乾於下土層，所以在分析降雨前之介電頻譜時在感測段在特別分成2段(P1：第一段為0.115m，第二段為0.131m；P5：第一段為m，0.18 第二段為0.066m)，使模擬波形更加擬和。在分析實驗數據之前，使用自來水率定三重電極感測段Z_p與α_R，率定結果其值分別為167.143(Ω)與420.364($sec^{-0.5}$)。

在兩次乾溼循環中，低含水量的TDR全波形反算分析法之參數結果(表2-40與表2-44)相比於高含水量之結果(表2-41、表2-42與表2-43)，ε_s與ε_∞具有較高的值，而f_{rel}弛豫頻率(relaxation frequency)在經過兩次乾溼循環後些微變動，在表2-44乾燥期的f_{rel}弛豫頻率再度上升，可能是第一段的波型不太吻合導致第一段f_{rel}偏高使兩段f_{rel}平均值偏高(圖2-304)，而ξ在表2-44乾燥期未如預期下降反而上升，是否為高密度試體的原因有待觀察。

在PVA頻譜的方面，P1、P2、P3、P4、P5的分析範圍如圖2-290、圖2-293、圖2-296、圖2-299、圖2-302。在介電頻譜方面，如同乾密度組1.3 g/cm^3，TDR全波形反算分析法分析出來的Cole-Cole function介電頻譜與時域介電常數的交點在於MHz左右和幾GHz頻段(TDR測量到的頻段)之內(圖2-275、圖2-278、圖2-281、圖2-284、圖2-287)。而PVA頻譜與時域介電常數的交織區域或碰觸到的區間大部分在於100 MHz到1 GHz左右，屬可信頻段範圍內(圖2-275、圖2-278、圖2-281、圖2-284、圖2-287)。

在P1、P2、P3與P4的PVA頻譜與TDR全波形反算分析法頻譜(圖2-275、圖2-278、圖2-281、圖2-284)在10 MHz

到 1 GHz 左右高度相似，而 P5 的 PVA 頻譜與 TDR 全波形反算分析法頻譜(圖 2-303)則在 3 GHz 以上部份重疊。

表 2-40 (P1)TDR 全波形反算分析法反算結果

P1	纜線段	AB膠段	感測段1	感測段2	感測段平均
ε_s	2.225	1.2	15.132	15.136	15.134
ε_∞	2.225	1.2	6.0132	6.345	6.179
f_{rel} (Hz)	1	1	5.0428×10^6	1.0172×10^7	7.607×10^6
ξ	0	0	0.441	0.441	0.441
EC_{dc}	0	0	0.0015	0.0015	0.0015
Z_p	70.233	88	167.143	167.143	167.143
α_R	183.259	20	420.364	420.364	420.364
L	3.6	0.068	0.115	0.131	0.246

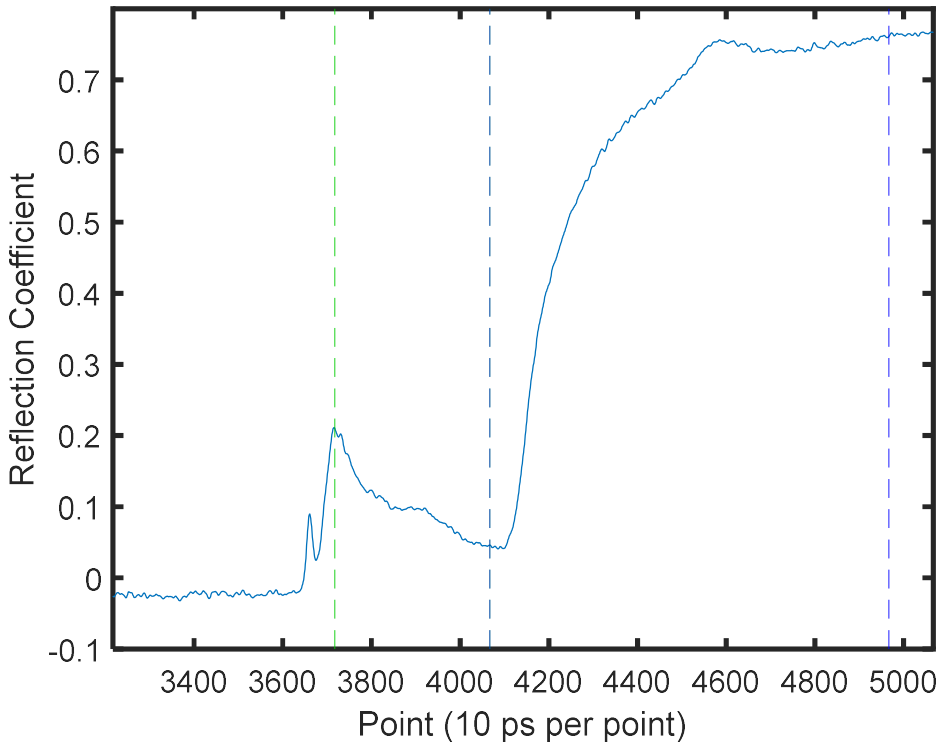


圖 2-290 (P1) PVA 波形微分範圍

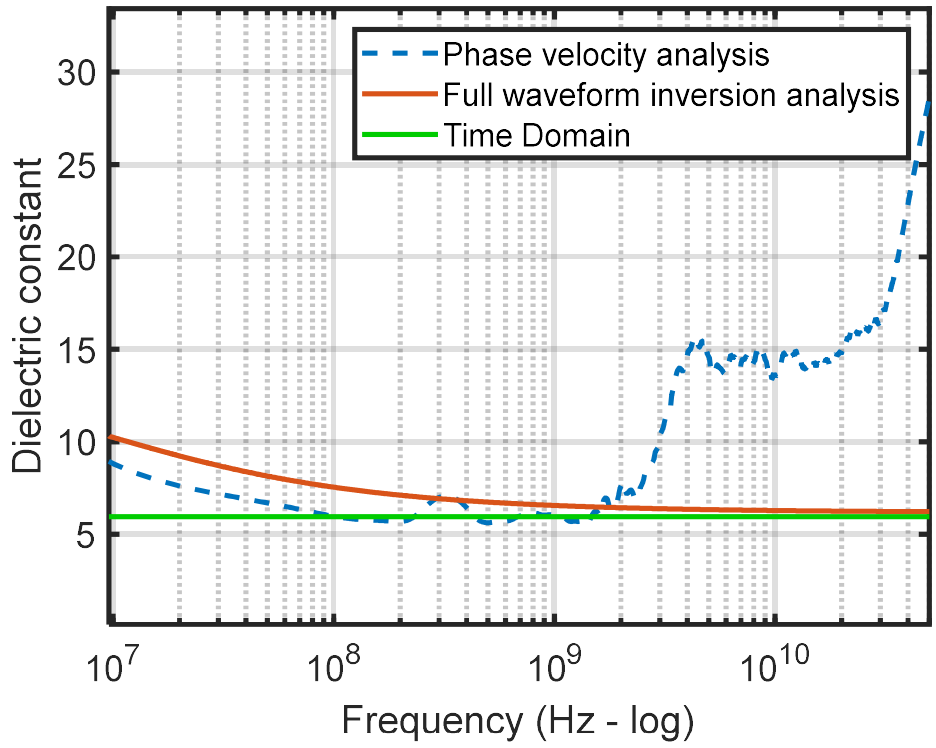


圖 2-291 (P1)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

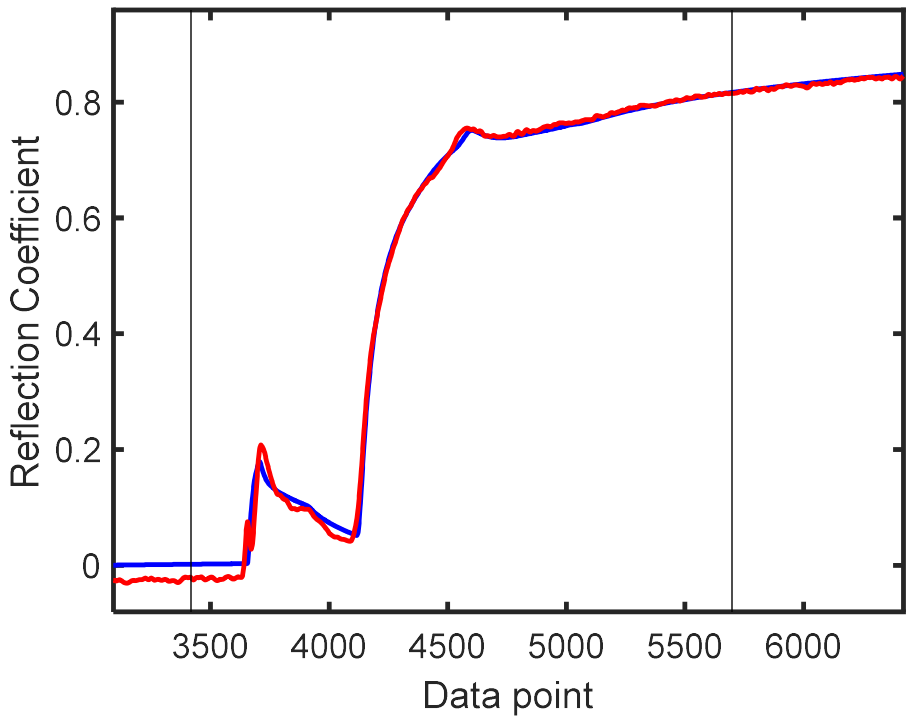


圖 2-292 (P1)模擬與實際波型對照圖

表 2-41 (P2)TDR 全波形反算分析法反算結果

P2	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	61.0321
ε_∞	2.225	1.2	13.98
f_{rel} (Hz)	1	1	2.351×10^6
ξ	0	0	0.577
EC_{dc}	0	0	0.0137
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.246

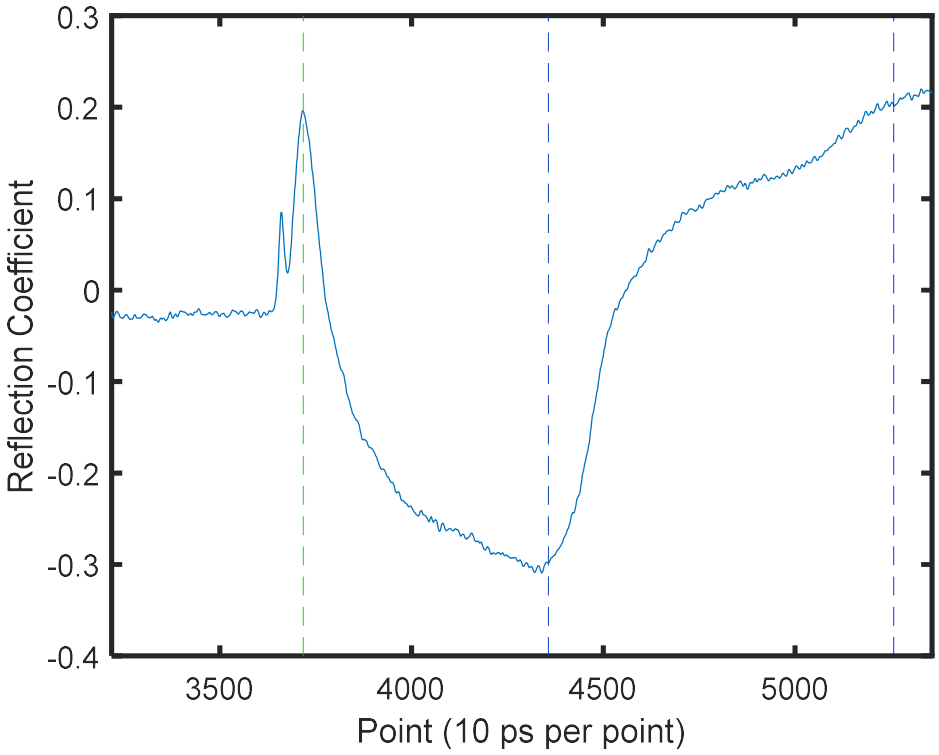


圖 2-293 (P2) PVA 波形微分範圍

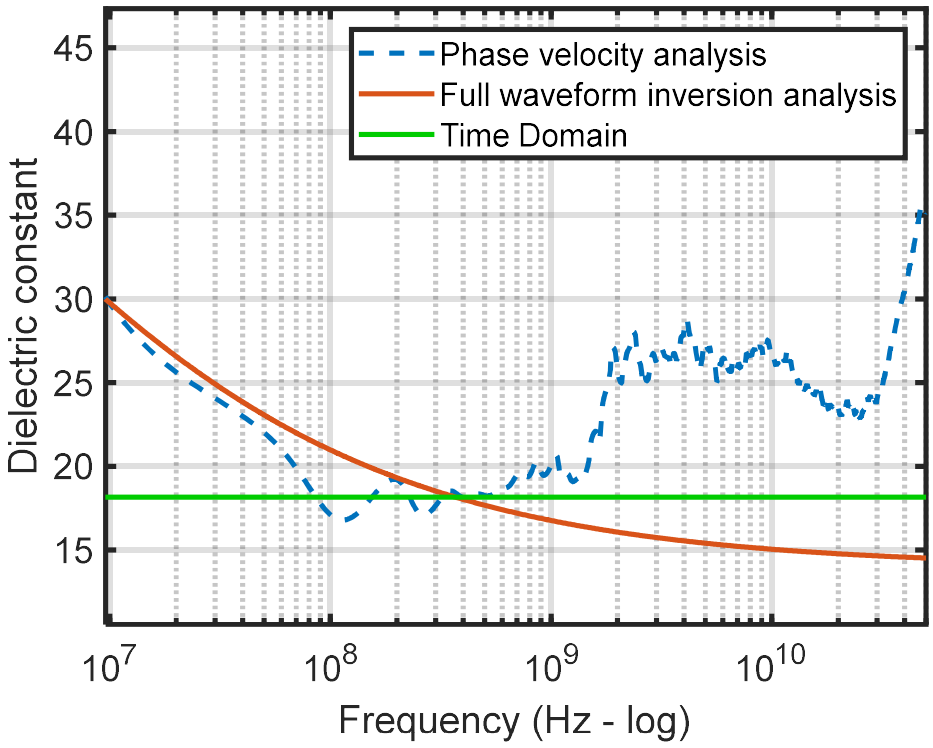


圖 2-294 (P2)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

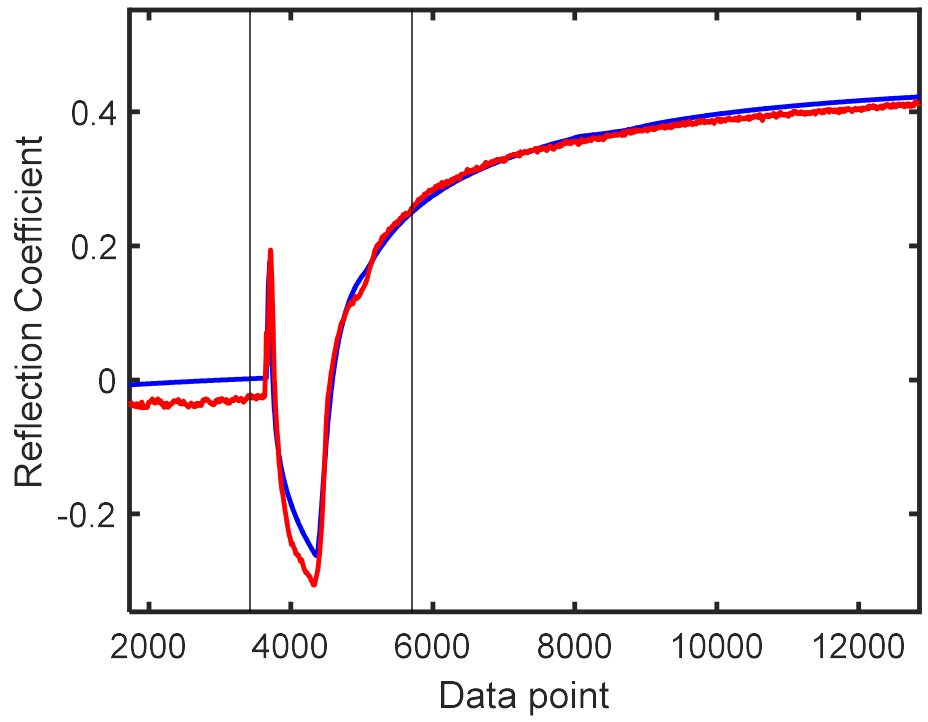


圖 2-295 (P2)模擬與實際波型對照圖

表 2-42 (P3)TDR 全波形反算分析法反算結果

P3	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	67.506
ε_∞	2.225	1.2	12.657
f_{rel} (Hz)	1	1	8.557×10^5
ξ	0	0	0.579
EC_{dc}	0	0	0.0113
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.246

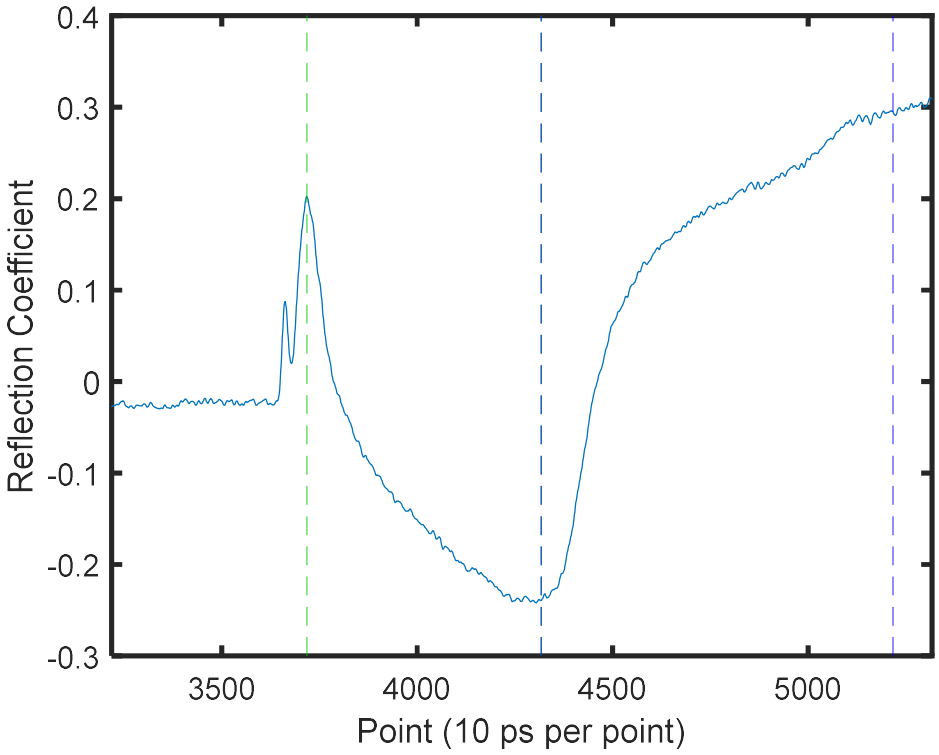


圖 2-296 (P3) PVA 波形微分範圍

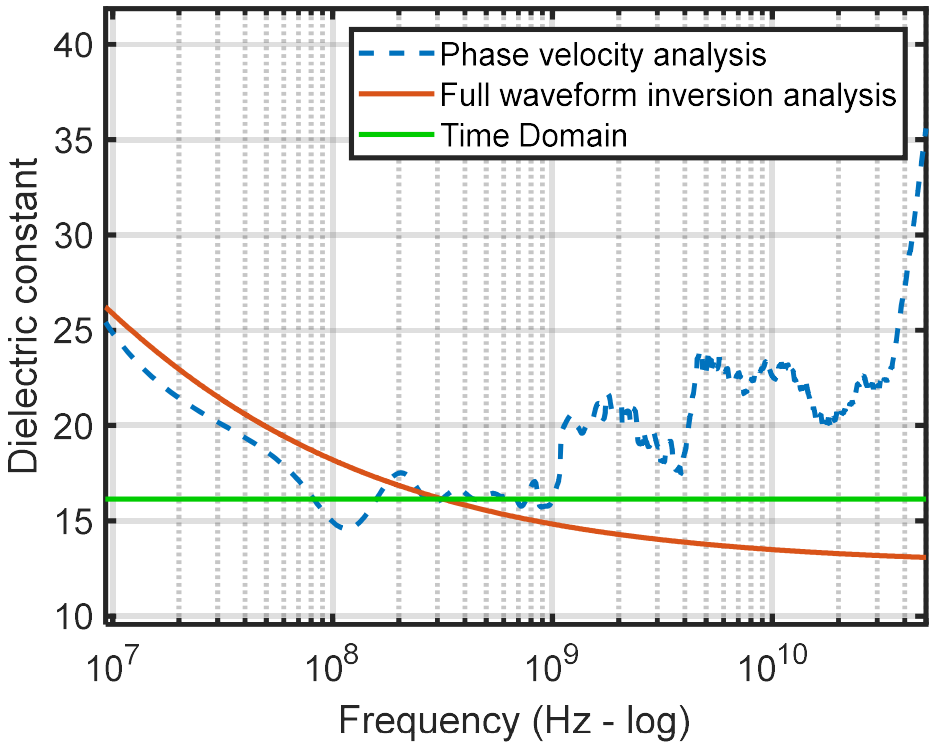


圖 2-297 (P3)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

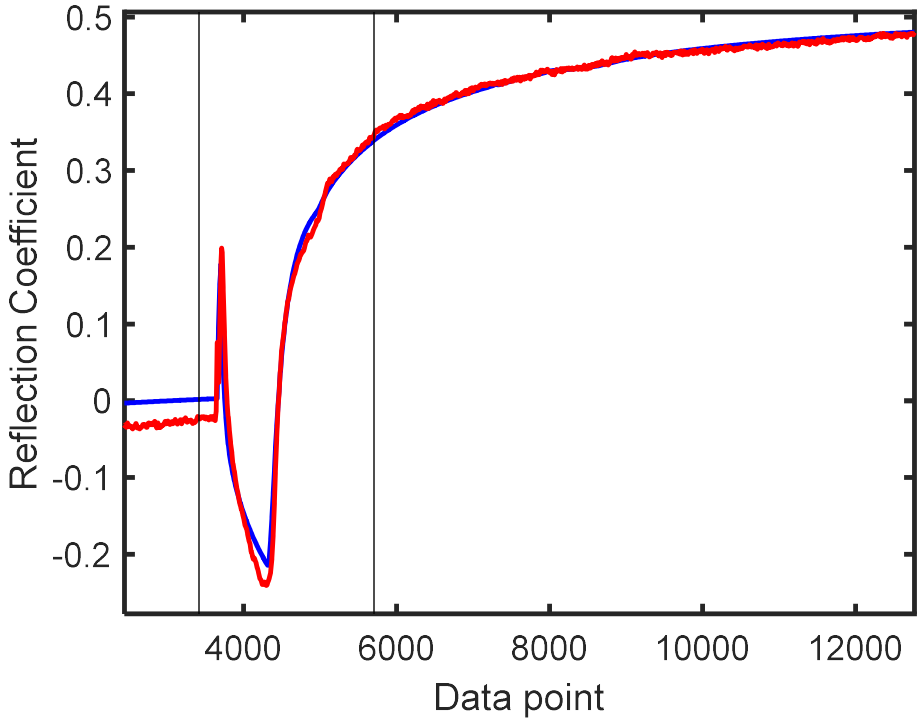


圖 2-298 (P3)模擬與實際波型對照圖

表 2-43 (P4)TDR 全波形反算分析法反算結果

P4	纜線段	AB膠段	感測段
ε_s	2.225	1.2	56.911
ε_∞	2.225	1.2	25.419
f_{rel} (Hz)	1	1	1.23×10^7
ξ	0	0	0.311
EC_{dc}	0	0	0.0156
Z_p	70.233	88	167.143
α_R	183.259	20	420.364
L	3.6	0.068	0.246

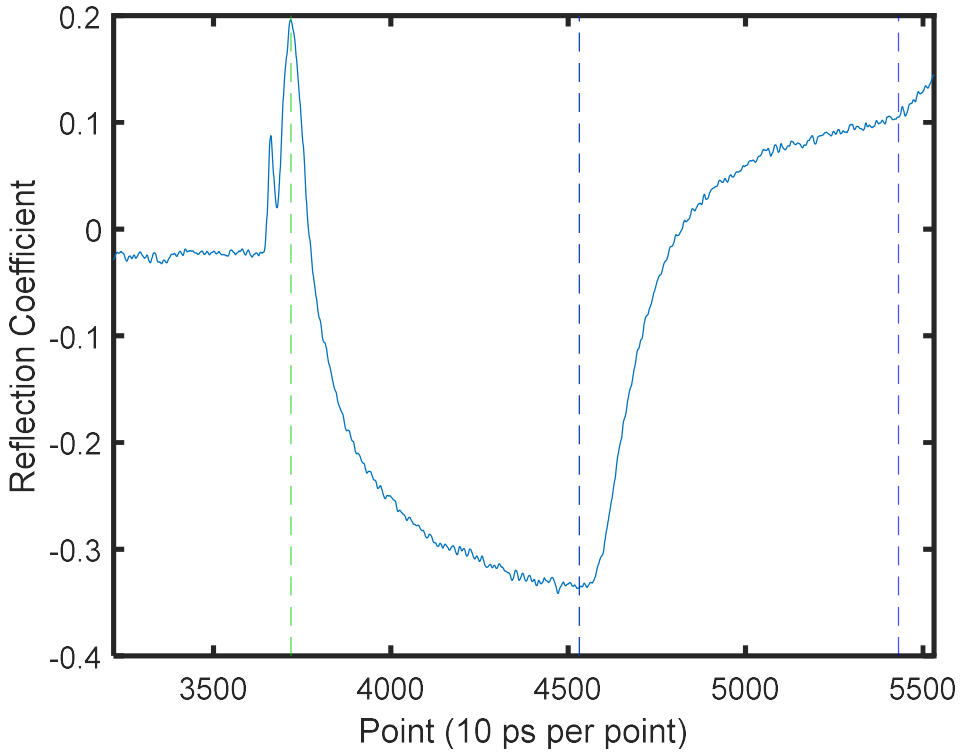


圖 2-299 (P4) PVA 波形微分範圍

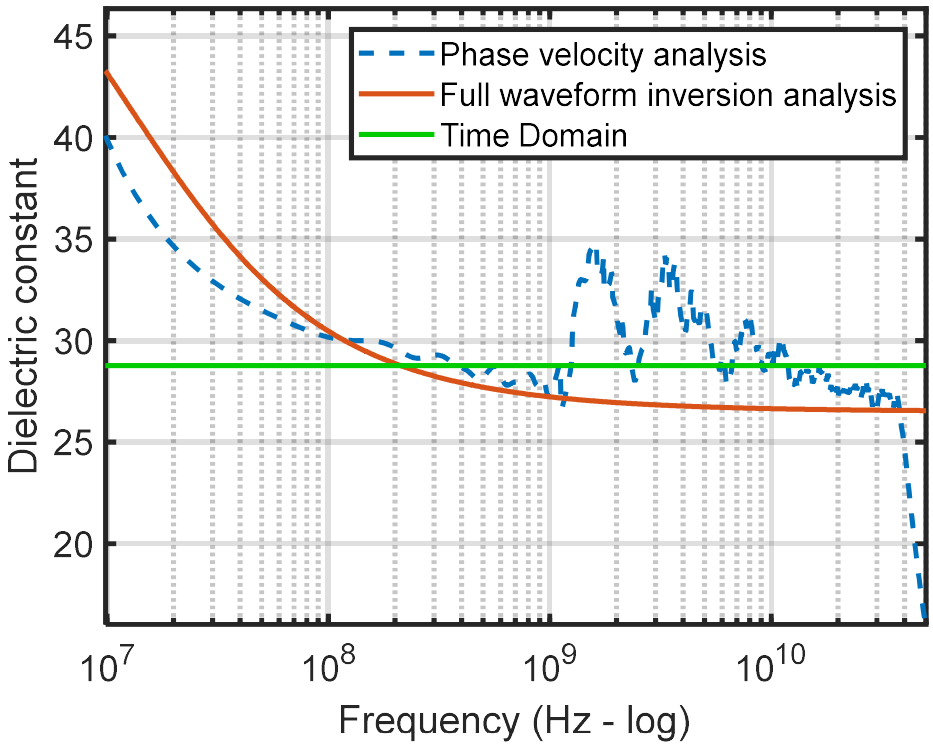


圖 2-300 (P4)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

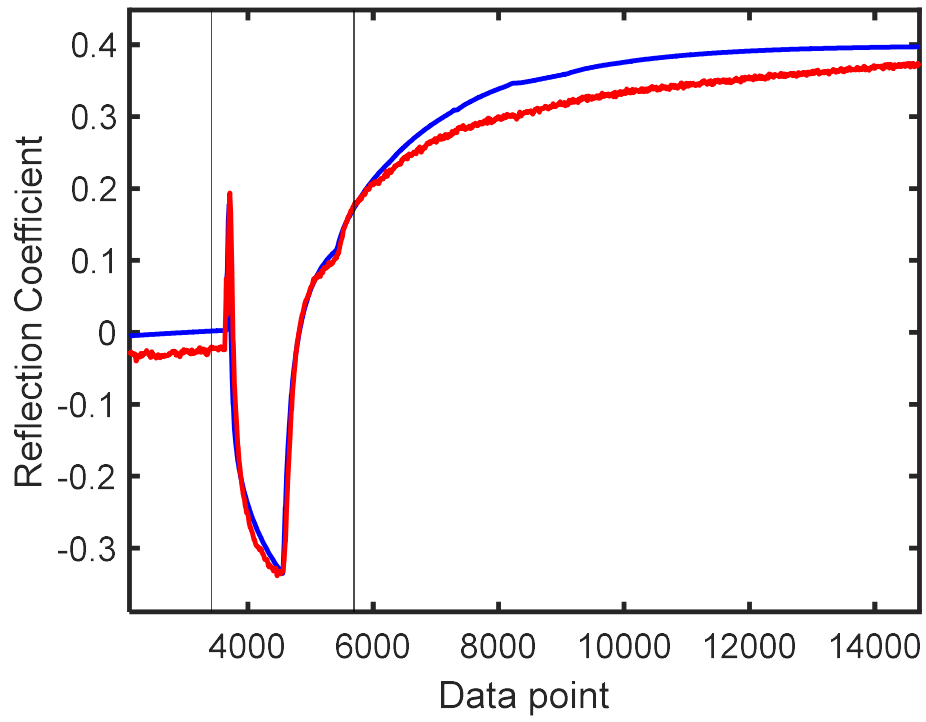


圖 2-301 (P4)模擬與實際波型對照圖

表 2-44 (P5)TDR 全波形反算分析法反算結果

P5	纜線段	AB膠段	感測段1	感測段2	感測段平均
ε_s	2.225	1.2	6.908	64.214	35.561
ε_∞	2.225	1.2	1.71	5.95	3.83
f_{rel} (Hz)	1	1	1.909×10^8	3.182×10^6	9.705×10^7
ξ	0	0	0.743	0.693	0.718
EC_{dc}	0	0	0.00535	0.00119	0.00327
Z_p	70.233	88	167.143	167.143	167.143
α_R	183.259	20	420.364	420.364	420.364
L	3.6	0.068	0.18	0.066	0.246

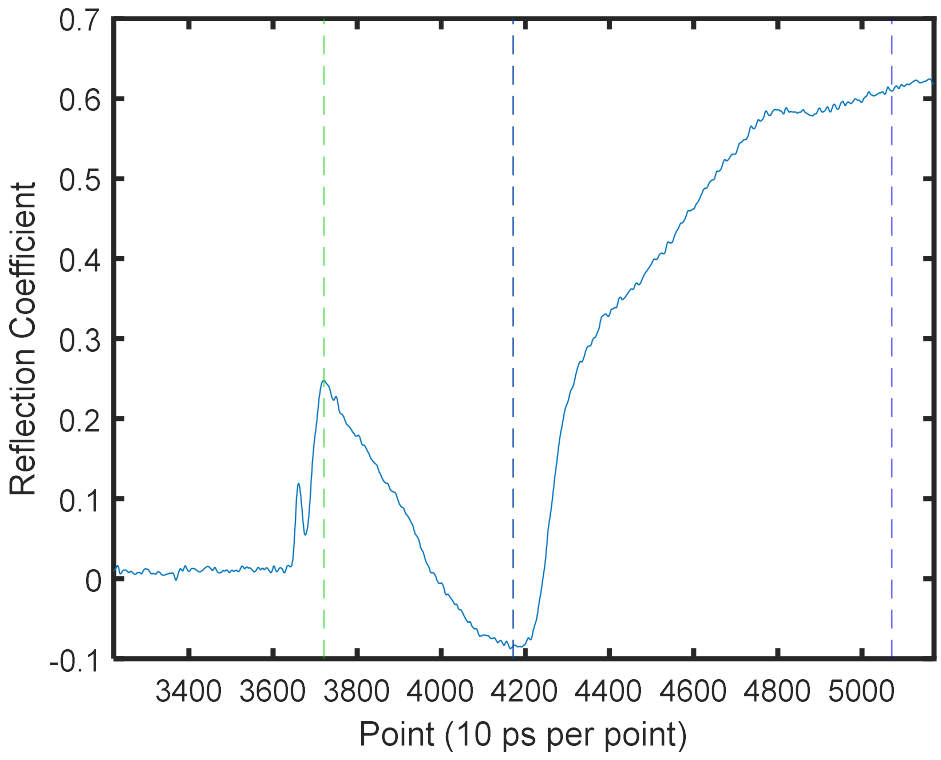


圖 2-302 (P5) PVA 波形微分範圍

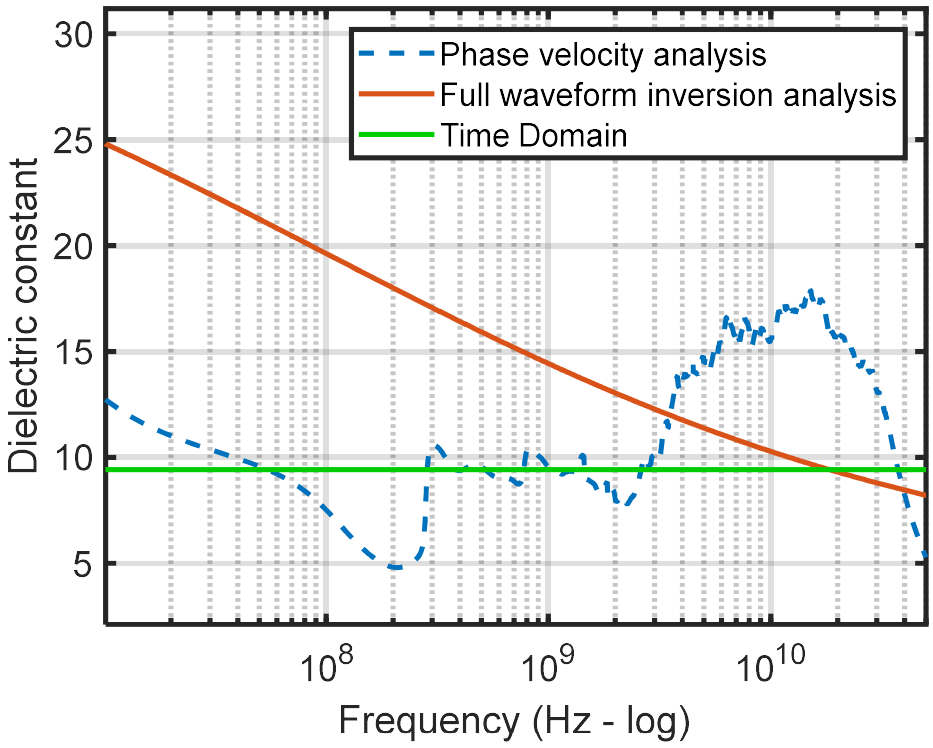


圖 2-303 (P5)介電頻譜(TDR 全波形反算分析法、PVA 與時域介電常數的對照圖)

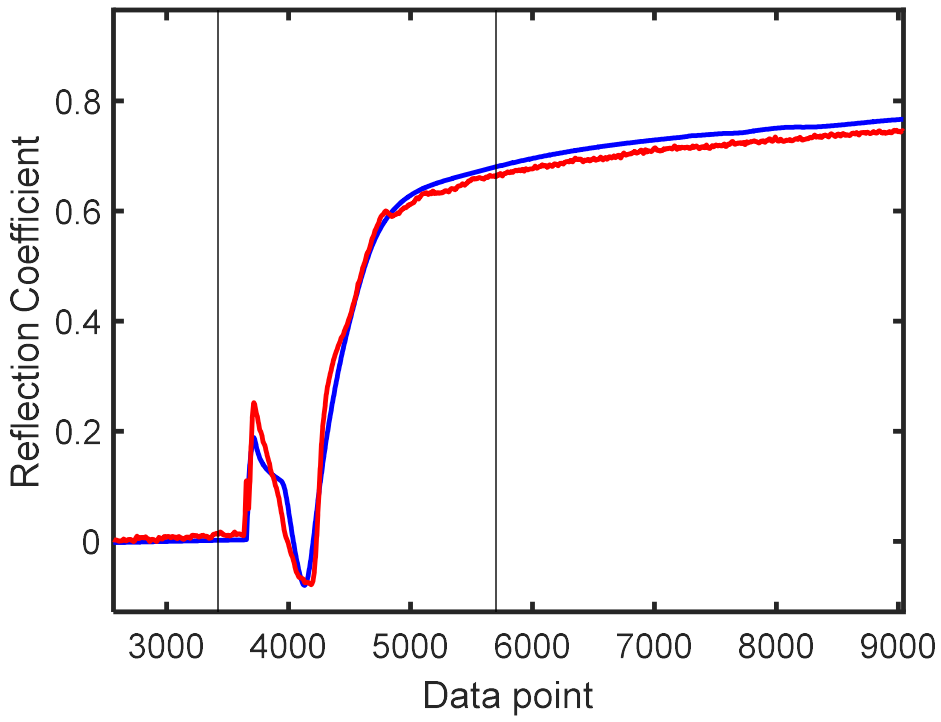


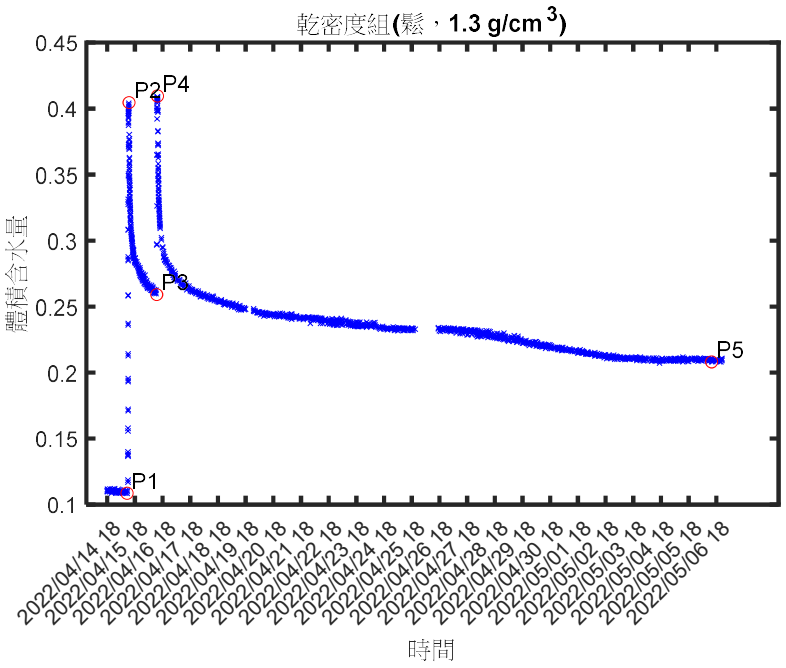
圖 2-304 (P5)模擬與實際波型對照圖

v. 乾密度組-160 μS/cm v.s.自然高導電度組-240 μS/cm | 同含水量頻譜對比：

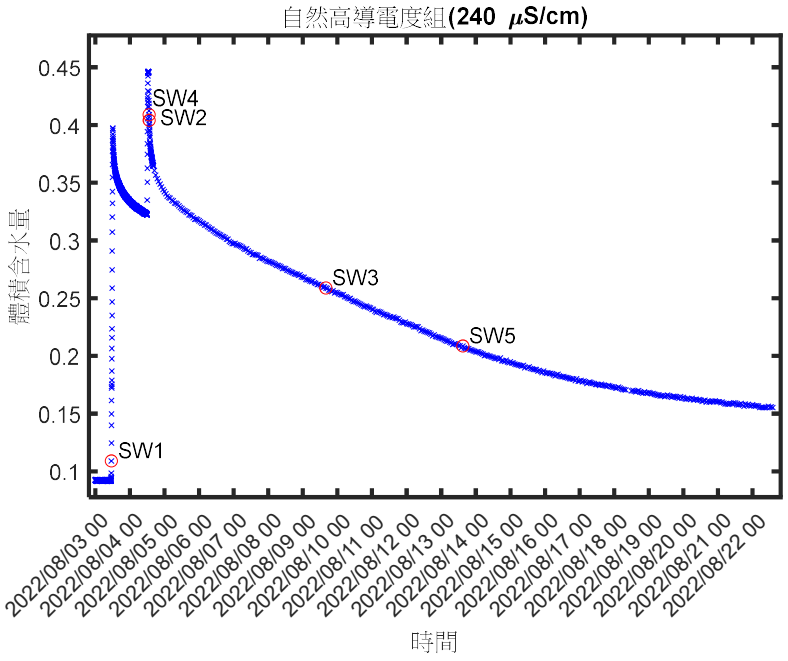
本實驗藉由頻譜的視角觀察，比較不同的某種變因與同含水量是否在頻譜上有明顯的不同。本對比依據乾密度組 1.3g/cm^3 作為基底，首先尋找降雨前第一次降雨最高體積含水量、第一次降雨最低體積含水量、第二次降雨最高體積含水量、乾燥期最低體積含水量作為分析頻譜的資料，並命名為 P1、P2、P3、P4 與 P5(時間點如圖 2-305(a))。之後，在第三組-自然高導電度組-240 μS/cm 尋找與 P1、P2、P3、P4、P5 同含水量的資料，並命名為 SW1、SW2、SW3、SW4 與 SW5(時間點如圖 2-305(b))。最後分析各資料的 TDR 全波形反算分析法、PVA 的介電頻譜分析與時域介電常數，並且將各事件同含水量(如 P1 與 SW1)繪製在同一張圖並進行探討。

在 PVA 的介電頻譜分析方面，除了 P1-SW1(圖 2-306(a))的 10^{10} Hz 高頻區以上與 P5-SW5(圖 2-306(e))的 10^9 Hz 高頻區以上些許不同，其他事件對比都相當吻合(圖 2-306(b), (c), (d))。

在 TDR 全波形反算分析法方面，大部分在較低頻區域(約 10^8 Hz 以下)有差異(圖 2-306)，推測應該是在弛豫頻率(fel)有所區別。在時域介電常數方面由於本實驗使用切線法分析含水量，所以應在同含水量有相同的時域介電常數，於實驗結果相同(圖 2-306)。



(a)



(b)

圖 2-305 分析時間點(P1：降雨前(與 SW1 同含水量)、P2：第一次降雨最高體積含水量(與 SW2 同含水量)、P3：第一次降雨最低體積含水量(與 SW3 同含水量)、P4：第二次降雨最高體積含水量(與 SW4 同含水量)、P5：乾燥期最低體積含水量(與 SW5 同含水量))

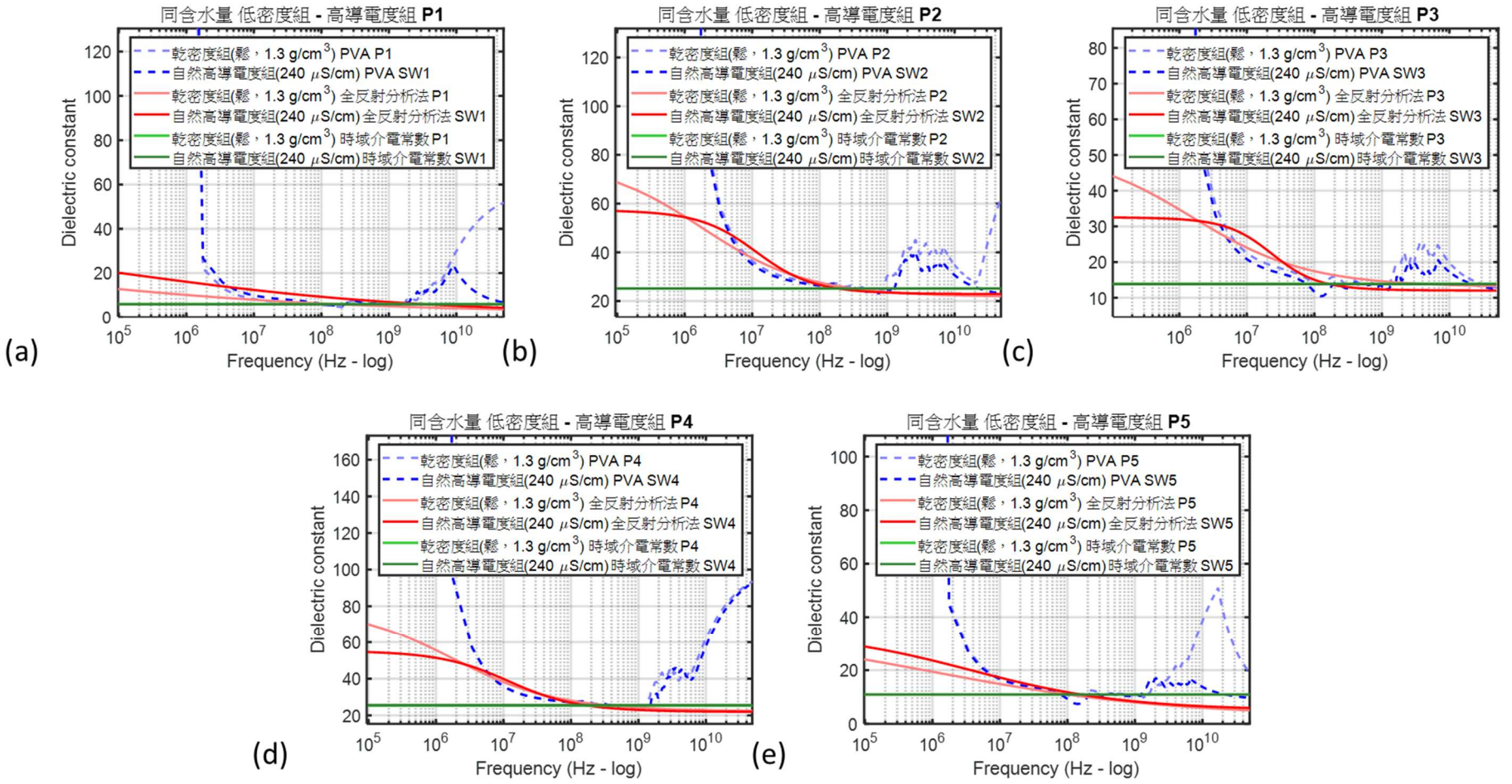


圖 2-306 各事件同含水量對照圖

vi. 乾密度組-1.3 g/cm^3 v.s.高密度組-1.7 g/cm^3|同含水量頻譜對比：

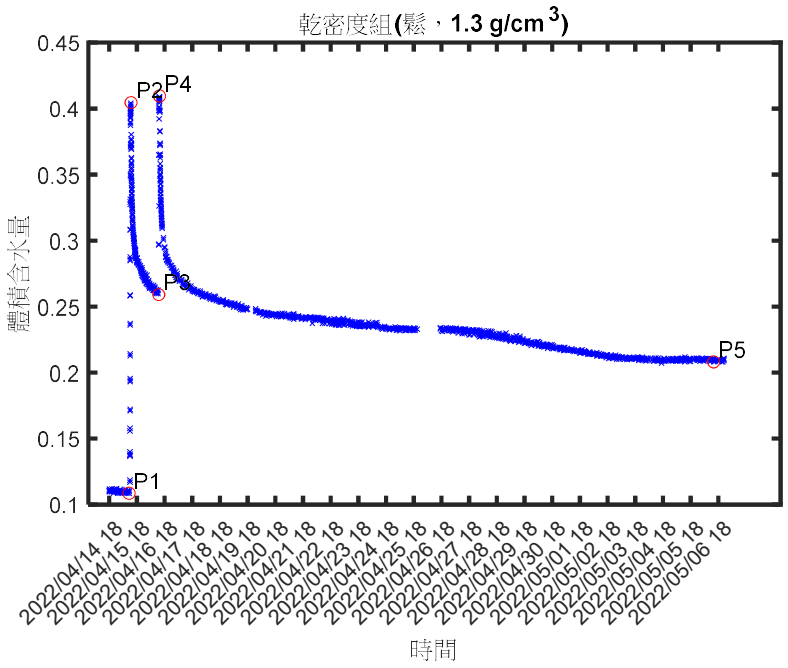
如同乾密度組 160 μS/cm v.s.自然高導電度組 240 μS/cm |同含水量頻譜對比，本對比依據乾密度組-1.3g/cm^3 作為基底，首先尋找降雨前第一次降雨最高體積含水量、第一次降雨最低體積含水量、第二次降雨最高體積含水量、乾燥期最低體積含水量作為分析頻譜的資料，並命名為 P1、P2、P3、P4 與 P5(時間點如圖 2-307(a))。之後，在第四組-高密度組-1.7 g/cm^3 尋找與 P1、P2、P3、P4、P5 同含水量的資料，並命名為 SW1、SW2、SW3、SW4 與 SW5(時間點如圖 2-307(b))。最後分析各資料的 TDR 全波形反算分析法、PVA 的介電頻譜分析與時域介電常數，並且將各事件同含水量繪製在同一張圖並進行探討。然而，在高密度組 1.7 g/cm^3 的部分相對於乾密度組 1.3 g/cm^3 有明顯的遲滯效應。

在 PVA 的介電頻譜分析方面，P1-SW1(圖 2-306(a))的 SW1 PVA 介電譜高於 P1 介電譜，但趨勢是相同的，SW1 PVA 介電譜像是 P1 的上移，而 P2-SW2、P3-SW3 與 P4-SW4 (圖 2-306(b), (c), (d))的 10^9 Hz 高頻區以上又明顯不同，P5-SW5 則在 10^9 Hz 高頻區以上 SW5 PVA 介電譜相對於 P5 有些許下移(圖 2-306(e))。目前發現，在 PVA 介電頻譜的有效區間(100 MHz 到 1 GHz 左右)，除了未降雨的時間點，其他事件都沒有明顯的區別。

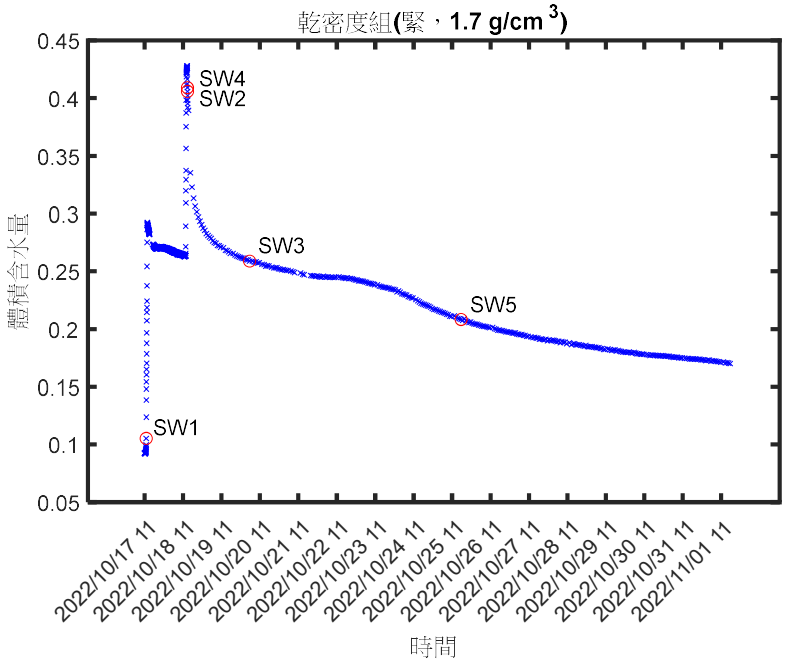
在 TDR 全波形反算分析法方面，P1-SW1 與 P3-SW3 頻

譜大致重疊(圖 2-306(a), (c))，P2-SW2 的 SW2 介電譜像是 P2 的下移(圖 2-306(b))，P5-SW5 的 SW5 介電譜像是 P5 的上移(圖 2-306(d))，P5-SW5 的介電譜大部分在較低頻區域(約 10^8 Hz 以下)有差異(圖 2-306(d))，推測應該是在弛豫頻率(fel)有所區別。目前發現，在濕潤時，高密度組有頻譜下移的現象，在乾燥時，有頻譜上移的現象。

在時域介電常數方面由於本實驗使用切線法分析含水量，所以應在同含水量有相同的時域介電常數，於實驗結果大致相同(圖 2-306)。



(a)



(b)

圖 2-307 分析時間點(P1：降雨前(與 SW1 同含水量)、P2：第一次降雨最高體積含水量(與 SW2 同含水量)、P3：第一次降雨最低體積含水量(與 SW3 同含水量)、P4：第二次降雨最高體積含水量(與 SW4 同含水量)、P5：乾燥期最低體積含水量(與 SW5 同含水))

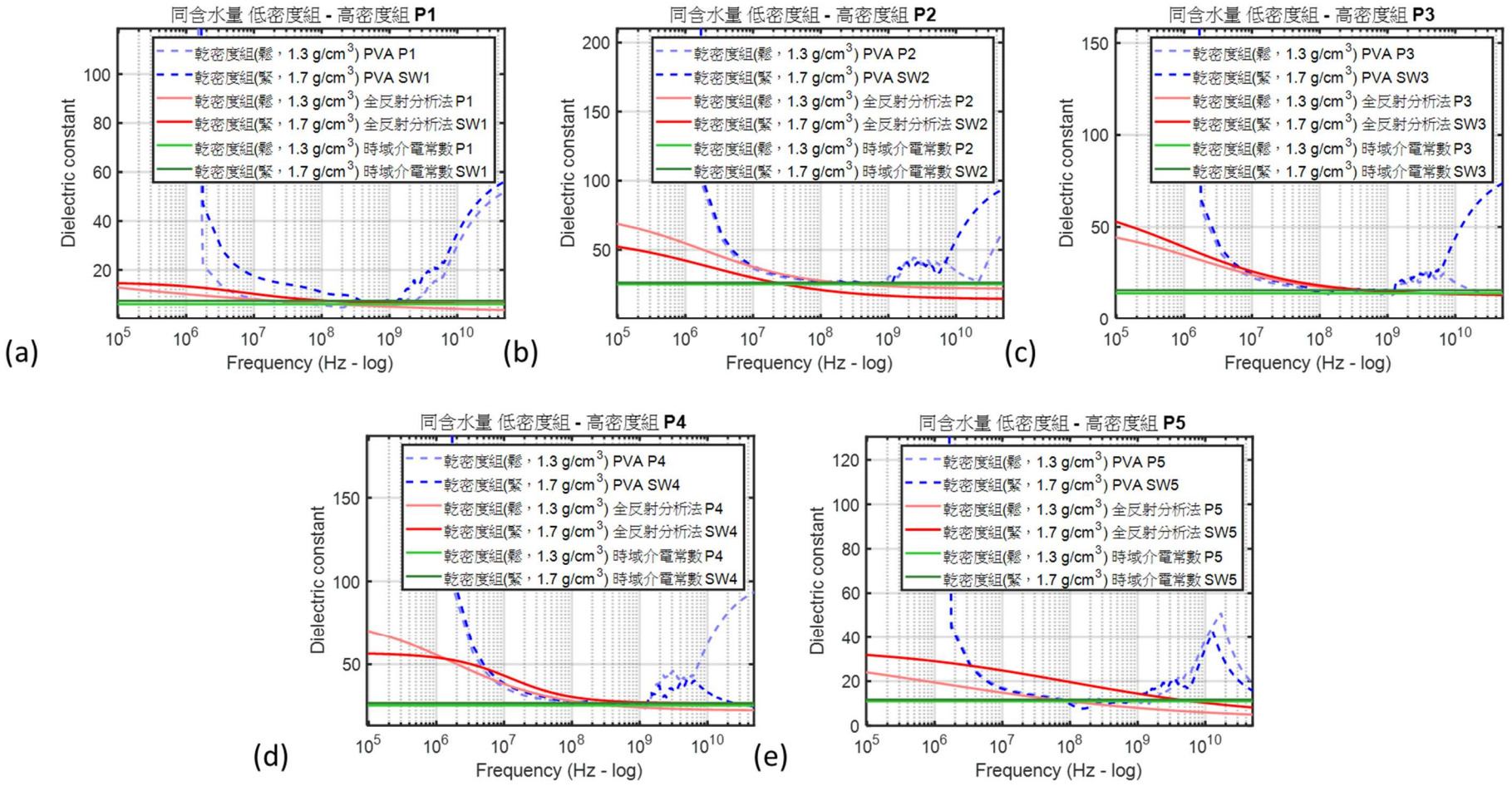


圖 2-308 各事件同含水量對照圖

第三節 TDR 與離心機物理模型研究規劃

一、TDR與離心機物理模型整合

圖 2-309 是國立中央大學土木系的地工離心機(NCU Centrifuge)，其容量為 100g-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 2-45。

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 2-310 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 2-310 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、1 0cm 以及 100 cm 的模型試驗會有尺寸效應。圖 2-310 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 2-45 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(LinearDimension)	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(UnitWeight)	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 2-309 中央大學土木系之地工離心機

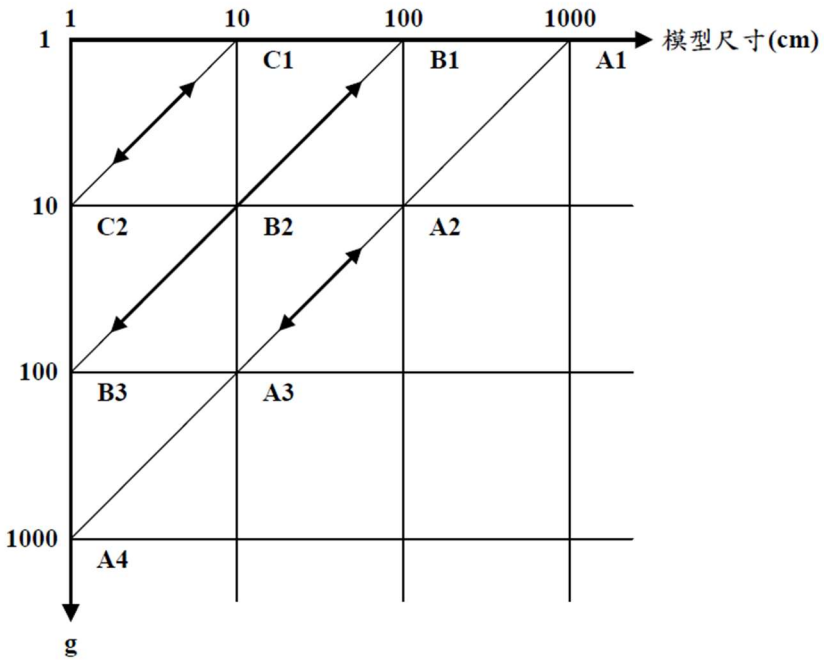


圖 2-310 離心機模型模擬概念圖

二、重力影響因子探討

試體製作利用空氣霣降法製作砂土模型試體，以移動式霣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，以此為砂土霣降高度。

3. 將試驗用砂土，倒入霣降儀漏斗內，待裝入足夠之砂土後，開啟鋼管管口開始進行霣降。

4. 霣降路徑採用 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 2-311 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，前期研究已初步建立國內首座 TDR 於離心機之整合測試，如圖 2-312 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 2-313 與圖 2-314 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 2-315，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)所提出之感測器率定方法，應可探討土壤電學與水文物理性質關係精進評估，包含從 1g 至高倍重力加速度之影響。**

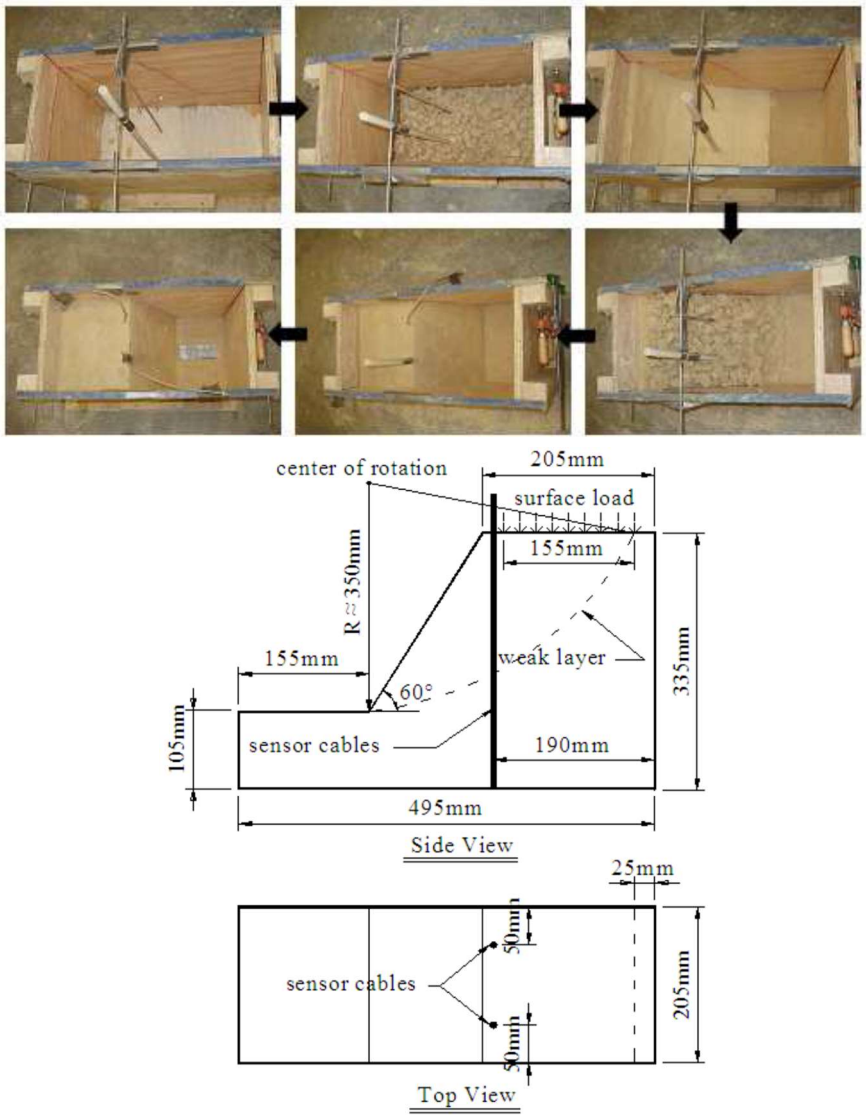


圖 2-311TDR 纜線於離心機坡地滑動模擬配置(Xu and Pierce, 2013)



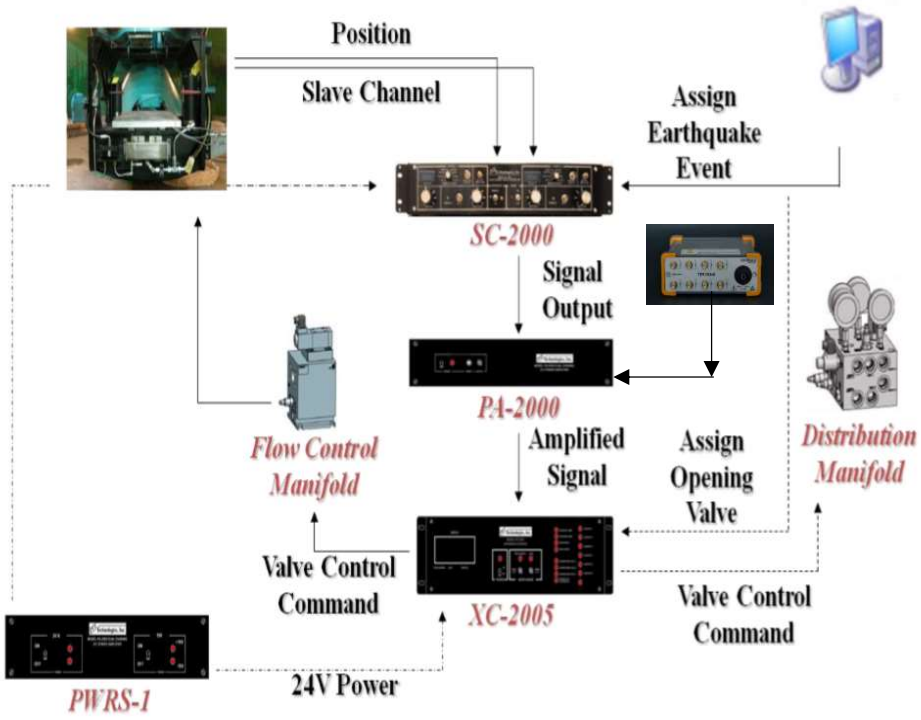


圖 2-312TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱(鐘志忠，2019)

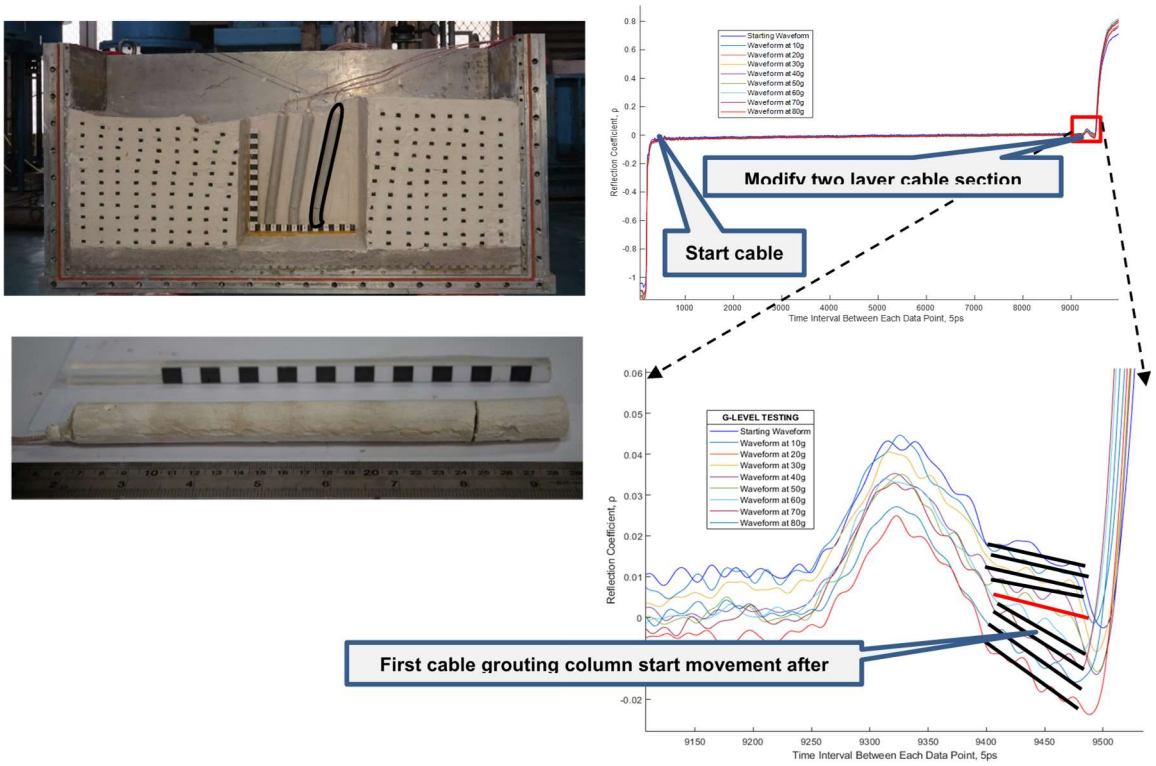


圖 2-313 河堤模型試驗之基礎於不同離心機重力下之 TDR 波形結果

(鐘志忠，2019)

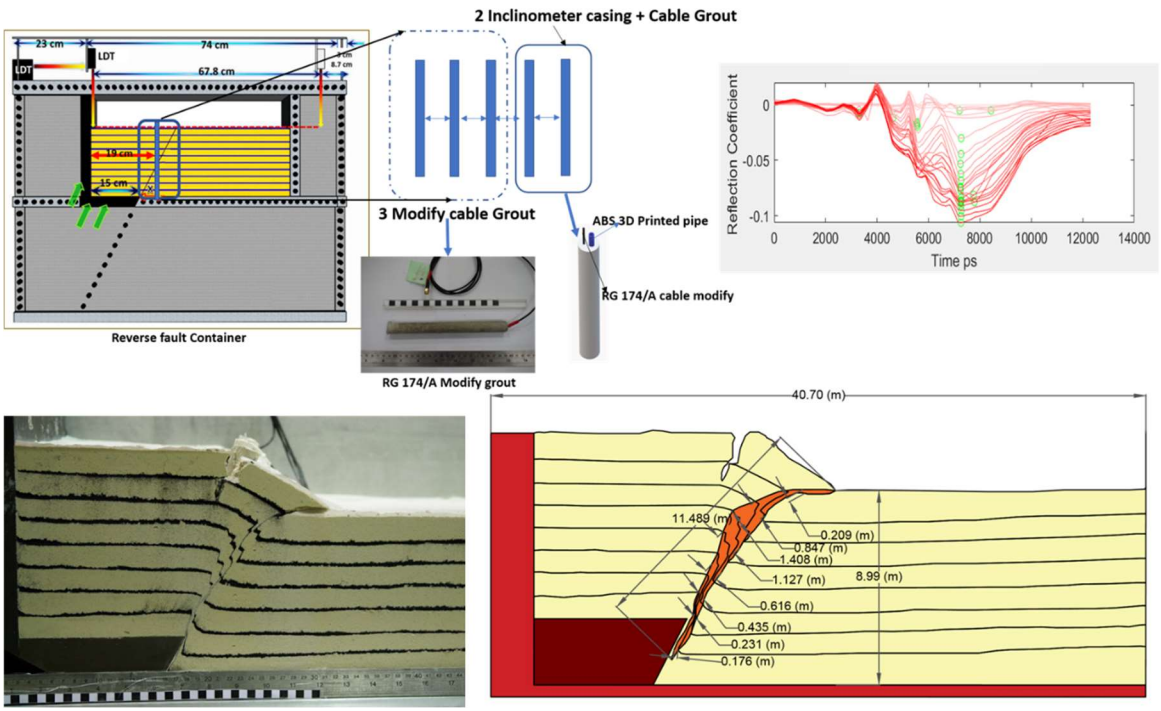


圖 2-314 剪力模型試驗於 55g 離心機重力下之結果(Tran，2020)

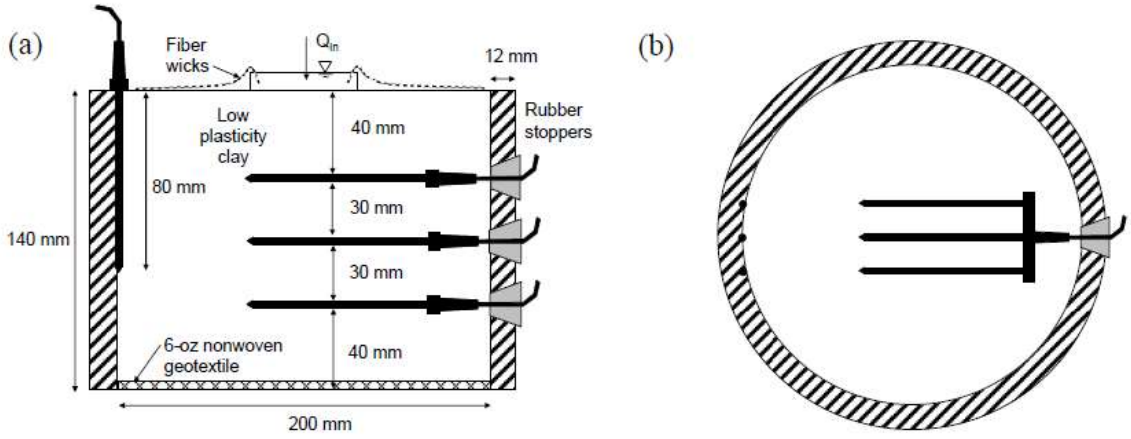


圖 2-315TDR 於離心機滲透模型之配置(McCartney and Zornberg, 2006)

三、TDR於離心機滲透模型之配置

1. 建模注意事項：

離心機模型對飛行過程中的降雨產生了一些影響，例如雨滴的重量、科里奧利效應(Coriolis effects)以及水在土壤上滲透(流動)的時間。

i. 滲流：

根據達西定律，滲流速度可以描述成式 39

$$v = ki \tag{48}$$

其中，

v ＝ 滲流速度

k ＝ 滲透係數

i ＝ 水力梯度

水力梯度在圖 2-316 和式 40 中描述

$$i = \frac{h_A - h_B}{L} = \frac{\Delta h}{L} \tag{49}$$

h_A, h_B ＝ 海拔

L ＝ 距離

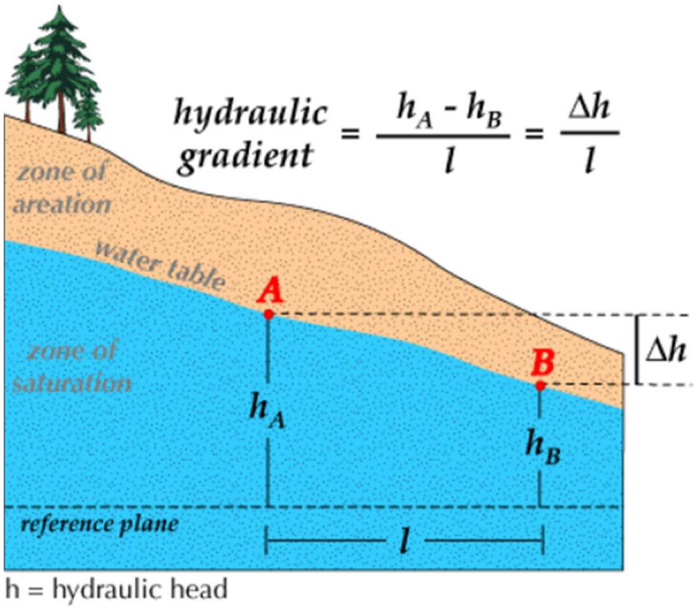


圖 2-316 水力梯度

達西滲透係數是重力加速度的函數，其含義是：

$$k_m = N k_p \tag{50}$$

其中，

k_m ＝ 模型尺度上的滲透係數

k_p ＝ 原型尺度上的滲透係數

N ＝ 加速度是地球重力的 N 倍

水力梯度是無量綱的並且不隨加速度成比例：

$$i_m = i_p \tag{51}$$

因此，

$$v_m = i_m k_m = i_p N k_p = N v_p \tag{52}$$

其中，

v_m ＝ 模型尺度上的滲流速度

v_p ＝ 原型尺度上的滲流速度

i_m ＝ 模型尺度上的水力梯度

i_p ＝ 原型規模的水力梯度

2. 儀器

i. 實驗容器：

離心機建模測試在圖 2-317 中內部尺寸為 736 mm x 385 mm x 200 mm (LxHxW)的容器中進行壓實。背面和透明面的厚度分別為 15 mm 和 20 mm。該容器由鋁材料設計，一側透明，用於觀察測試過程，並記錄測試前後模型的視頻和照片。在模型的準備過程中，塑料板被貼在牆壁上，以盡量減少容器和土壤之間的摩擦力。

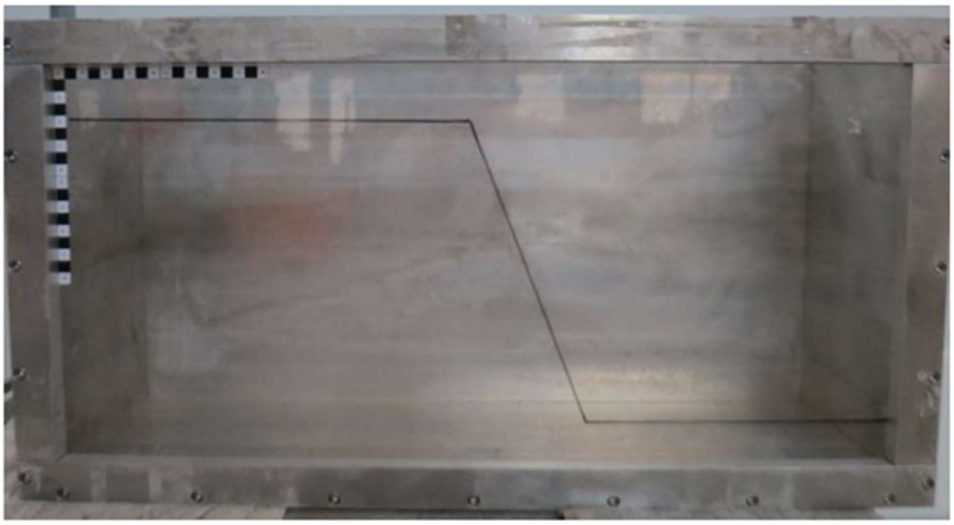


圖 2-317 帶透明窗口之容器(736 mm x 385 mm x 200 mm)

ii. 降雨系統：

降雨系統用於提供水以通過噴嘴模擬降雨。它由孔徑為 0.3 mm 的噴嘴連接，如圖 2-318 所示，流量為 48 至 110 cc/min。噴嘴允許通過改變噴嘴數量或氣壓來控制降雨強度。圖 2-319 給出了降雨強度和一個噴嘴與氣壓變化的關係。該系統安裝在鋁製容器的蓋子下圖 2-320。在離心旋轉過程中，噴嘴通過塑料管與外部的水箱連接，然後從離心室向水箱提供氣壓以進行降雨模擬。

iii. 張力計：

本研究使用的張力計感測器如圖 2-322 所示，並與 PVC 管、透水陶瓷頭組成張力計，張力計拼裝後如圖 2-323 所示，而感測器的工作範圍從 0 到 100 kPa、-40

~ 8125 °C 的工作溫度與 2.5%的最大誤差，本感測器的輸出電壓與壓力成正比，呈現性關係(如圖 2-324)。

iv. LVDT：

LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)藉由由內部線圈(分初級線圈與次級線圈)與桿件頂部的鐵芯的相對位置變化，所產生的電磁感應產生感應電壓而輸出電壓。本研究率定所使用的 LVDT，建立其輸出電壓大小與桿件位移，如圖 2-326 所示。

v. 空壓機：

本研究藉由氣閥(圖 2-327 的 Panel)控制氣壓大小。為氣壓大小與降雨強度之關係圖，本研究藉由圖上所率定的回歸線決定氣壓大小。

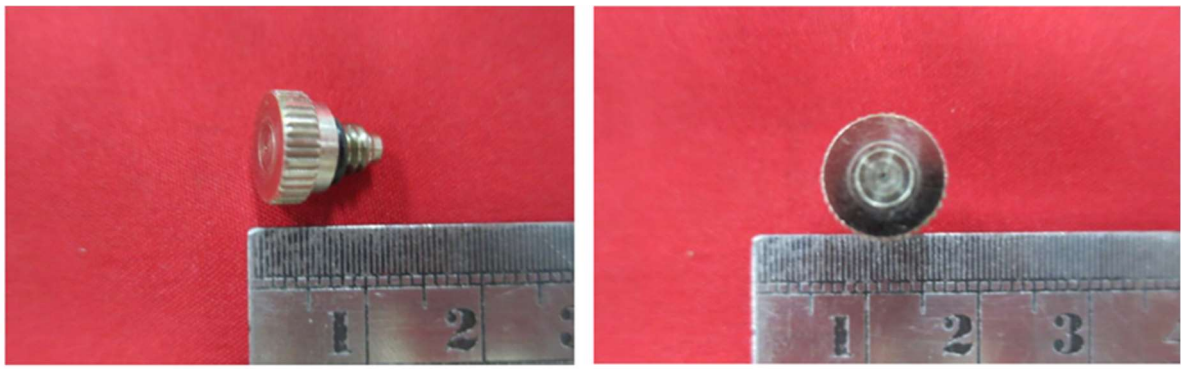


圖 2-318 降雨系統的噴嘴

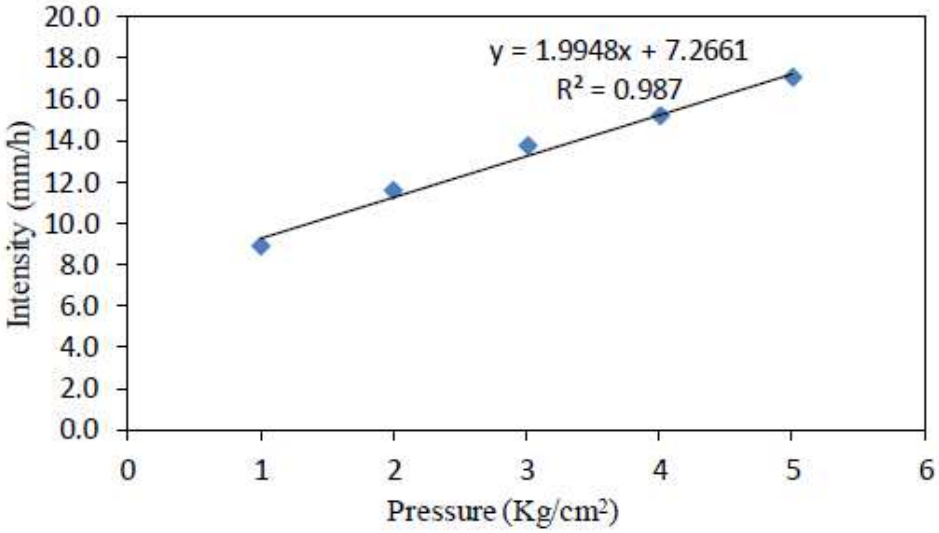


圖 2-319 單一噴嘴的降雨強度

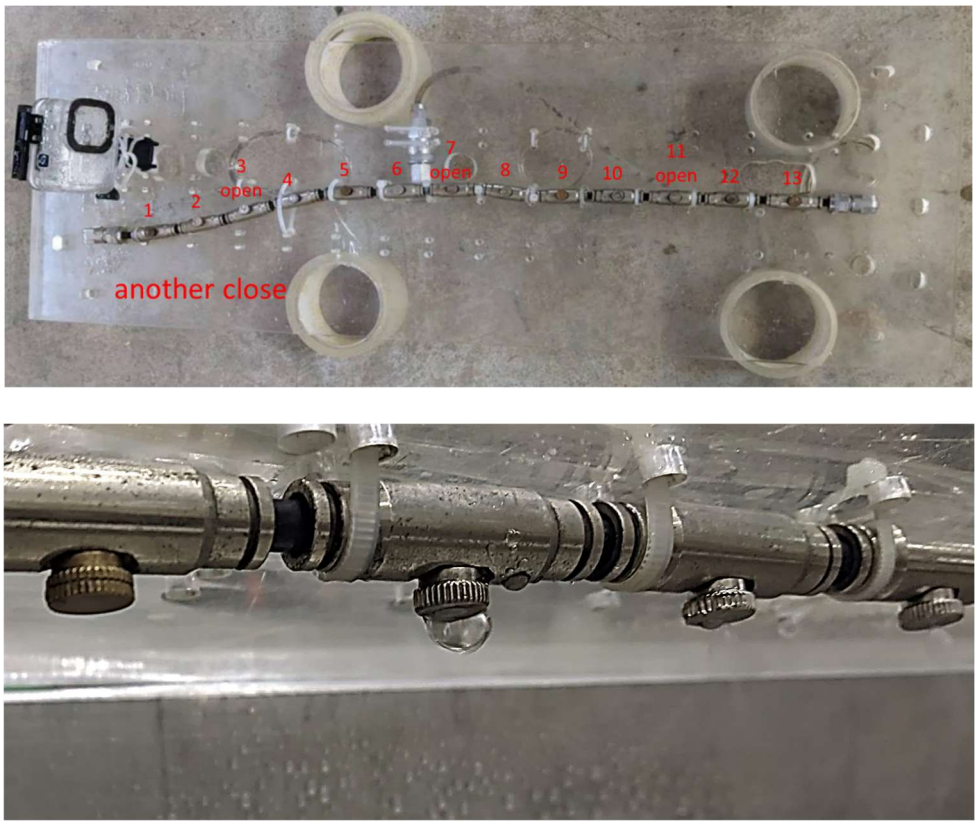


圖 2-320 組裝後降雨系統與噴嘴

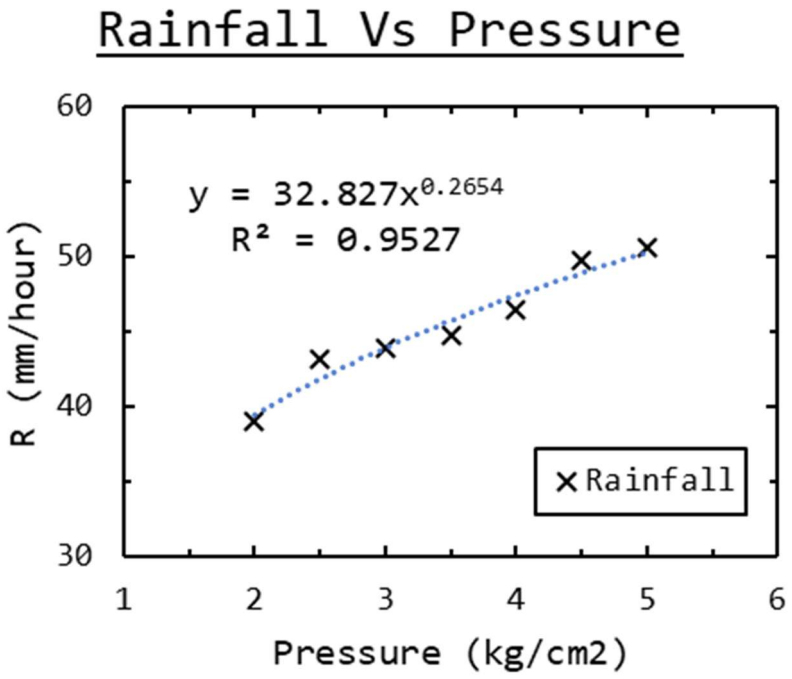


圖 2-321 實驗噴嘴率定後降雨強度(預設 3 組噴嘴可灑水)

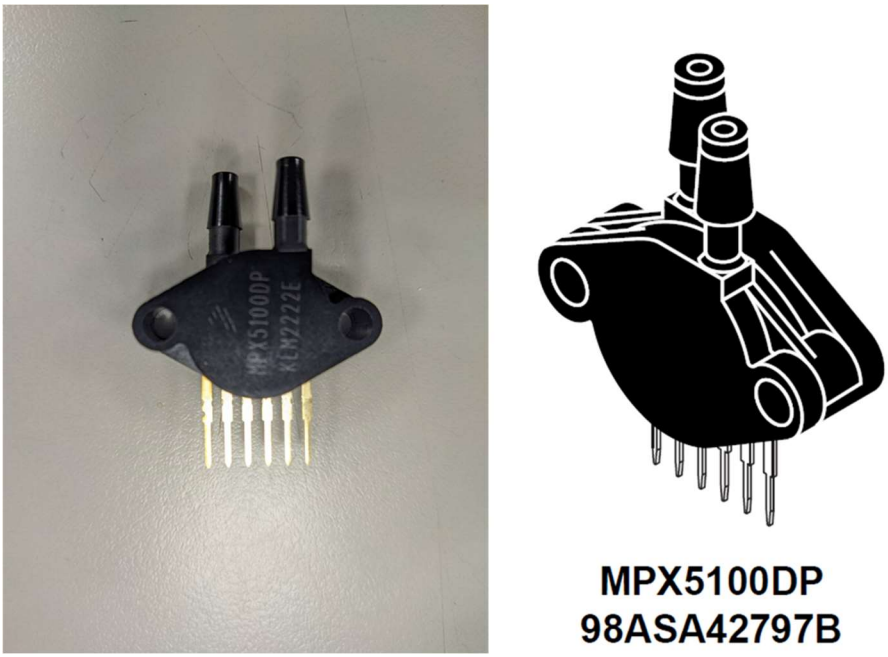


圖 2-322 張力計實際照片與示意圖

(https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5100.pdf)

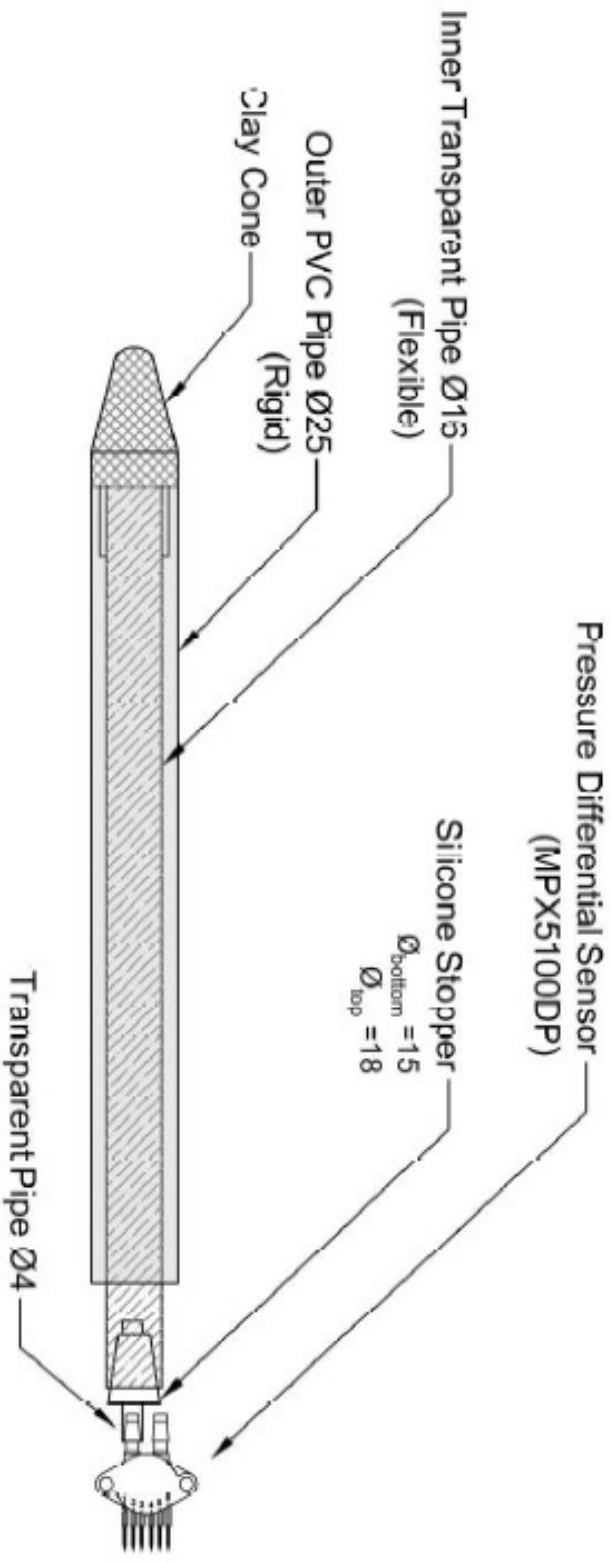


圖 2-323 組合後張力計示意圖

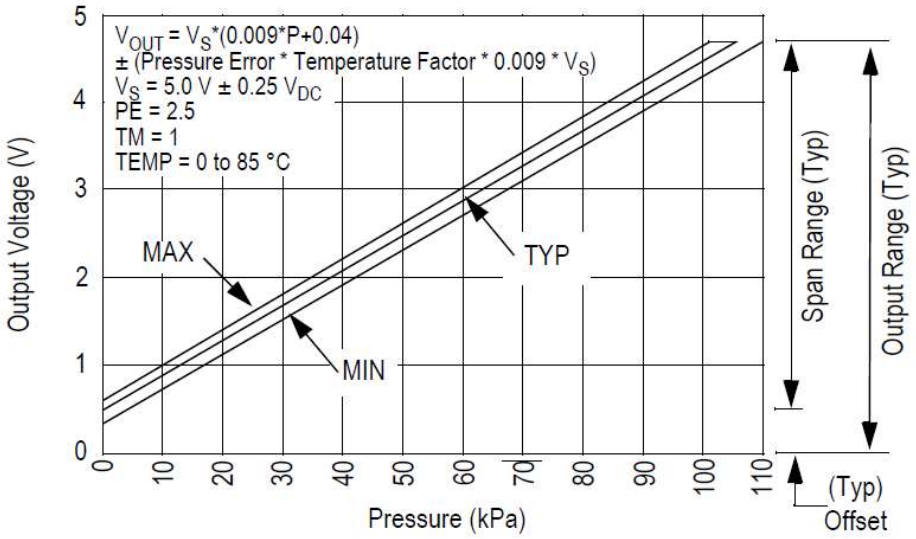


圖 2-324 張力計輸出電壓與壓力關係圖

(https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5100.pdf)

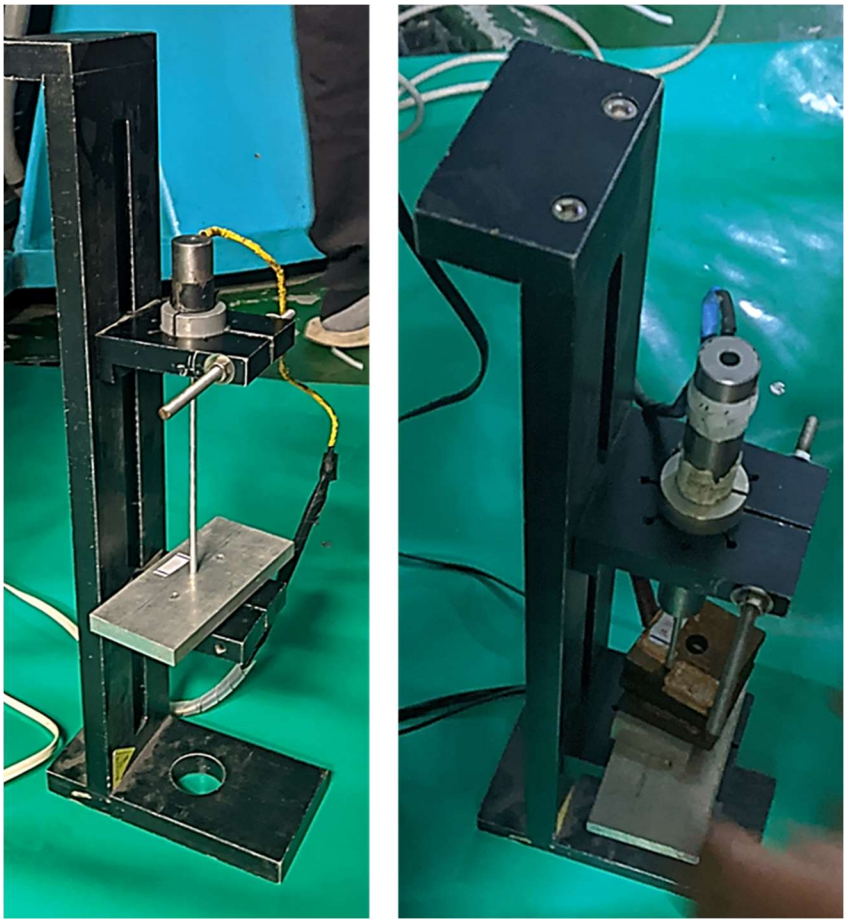


圖 2-325 LVDT 實際照片

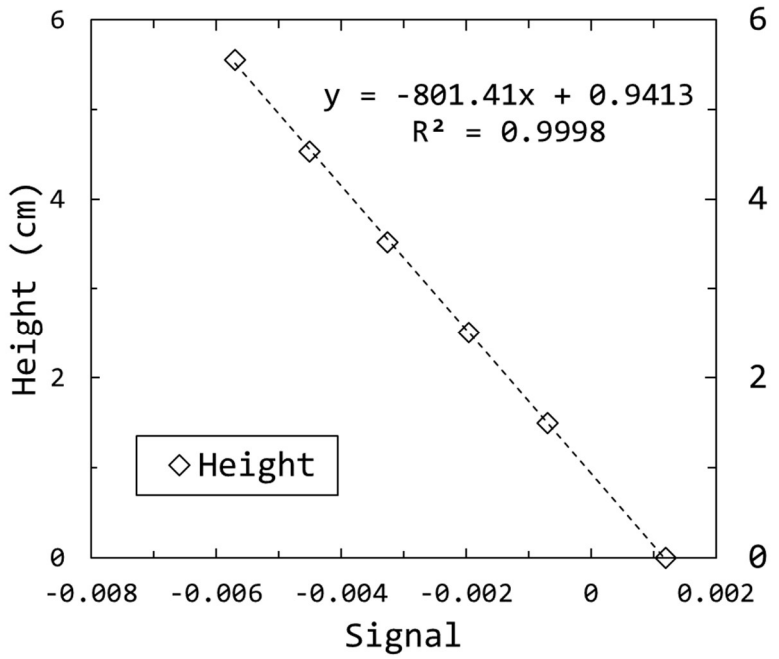


圖 2-326 LVDT 輸出電壓與實際位移的關係圖

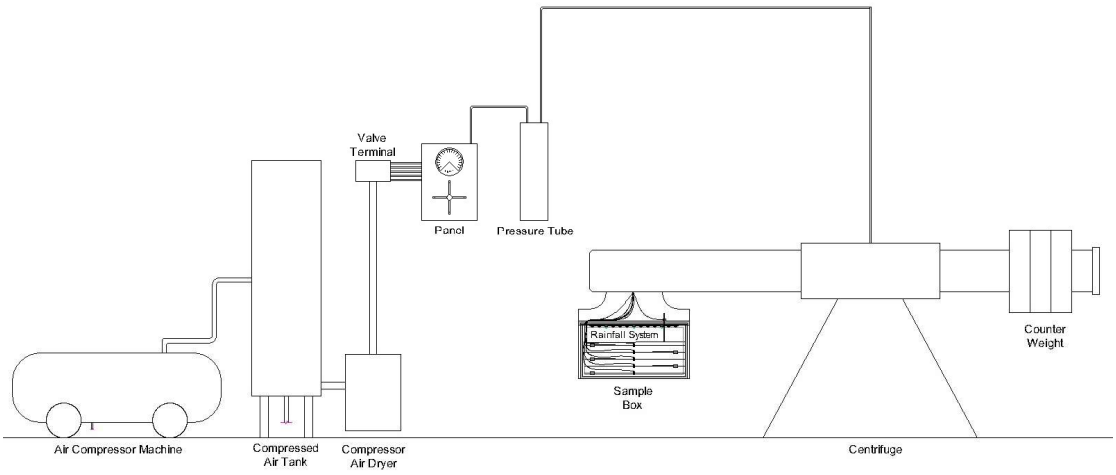


圖 2-327 降雨系統、空壓機、試體與離心機相對位置示意圖

vi. 試體材料

本研究離心機模型試驗之試體材料為 80% 的矽砂(silica sand)和 20% 的粉土(高嶺土，fines content)，並在 10% 的含水量下壓實。根據 USCS 分類，這種

混合物可被視為粘土砂。根據標夯壓實試驗(the standard proctor compaction test)，該土壤混合物的比重($\boldsymbol{G_s}$) 為 2.70，最大乾單位重量為 18.87 $\boldsymbol{kN/m^3}$，最佳含水量為 9.5%。根據含水量為 10% 的直剪試驗，該材料的表觀凝聚力與摩擦角分別為 13.2 $\boldsymbol{kN/m^2}$ 和 47.4°。

表 2-46 矽砂、高嶺土與混和材料的基本物性實驗之實驗結果

Properties	Silica Sand	Kaolinite	Mixing Material
Specific gravity, G_s	2.65	2.72	2.70
$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	16.30	14.52	18.87
Optimum water content (%)		28.20	9.50
Plastic limit (%)		29.80	
Liquid limit (%)		53.40	
Plastic index (%)		23.60	

vii. 實驗感測器在離心機容器中的配置：

在 736 mm x 385 mm x 200 mm (LxHxW)的容器中需要配置 TDR 感測器(TDR Probe)、張力計(Tensiometer)、與 ERT 電極(ERT Pole)。各感測器與容器的相對位置如圖 2-328 所示。實驗模型試體在鋁製容器且具有透明窗口內準備，通過影片和照片觀察該試體在飛行過程中的變化。根據計劃，本研究將材料(矽砂與粉土的混合物)與 10% 或 12% 的含水量混合。該試體通過夯壓的方式製備，每層 25 mm，總

共 10 層。在試體內各 2.5 cm、7.5 cm、12.5 cm、17.5 cm、22.5 cm 的深度放置 15 cm 感測長的 TDR 感測器與水壓計，並鋪上黑色細砂方便觀察之後的變形，並且，最試體最上層鋪上地工織物防止降雨雨水因在高 g 力下產生的衝擊力道，使試體表面產生坑洞，以及在箱子上方安裝 LVDT 來量測試體某點表面的位移，並在實驗前後使用來雷射測距儀掃描表面高度。

未來規劃搭配地電阻影像剖面法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)的感測電極分別以 50 cm 的間距放置在模型的頂部。本實驗使用孔徑為 0.3 mm 的噴嘴系統來模擬降雨條件。該系統單一噴嘴提供 48 – 110 cm^3/min 的流量。通過改變噴嘴數量或改變氣壓供應大小來改變降雨強度。降雨系統安裝在容器的蓋子上並連接到外部水箱。為了模擬降雨，從離心機室向水箱施加氣壓。當離心機達到 20g 的人工加速度時，根據設計配置啟動降雨模

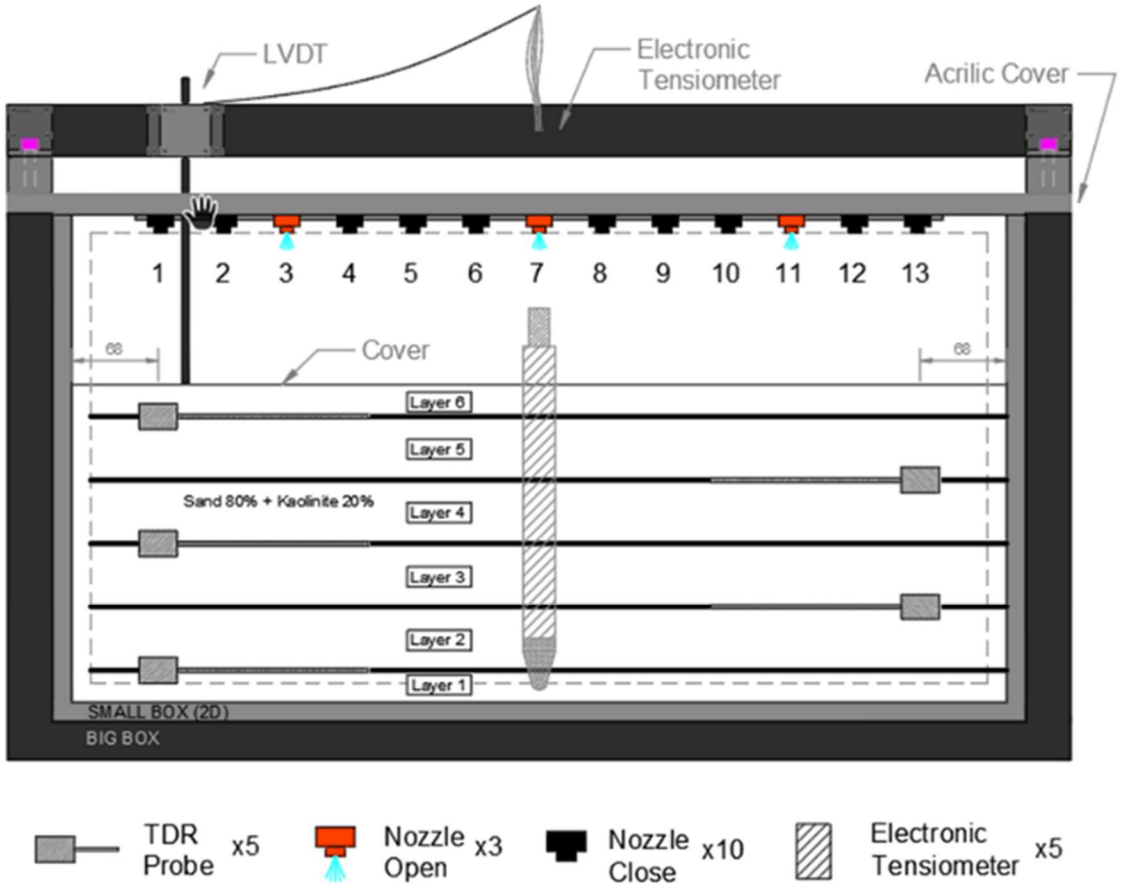


圖 2-328 原尺度(1g)下的模型尺寸(model scale-正視圖)

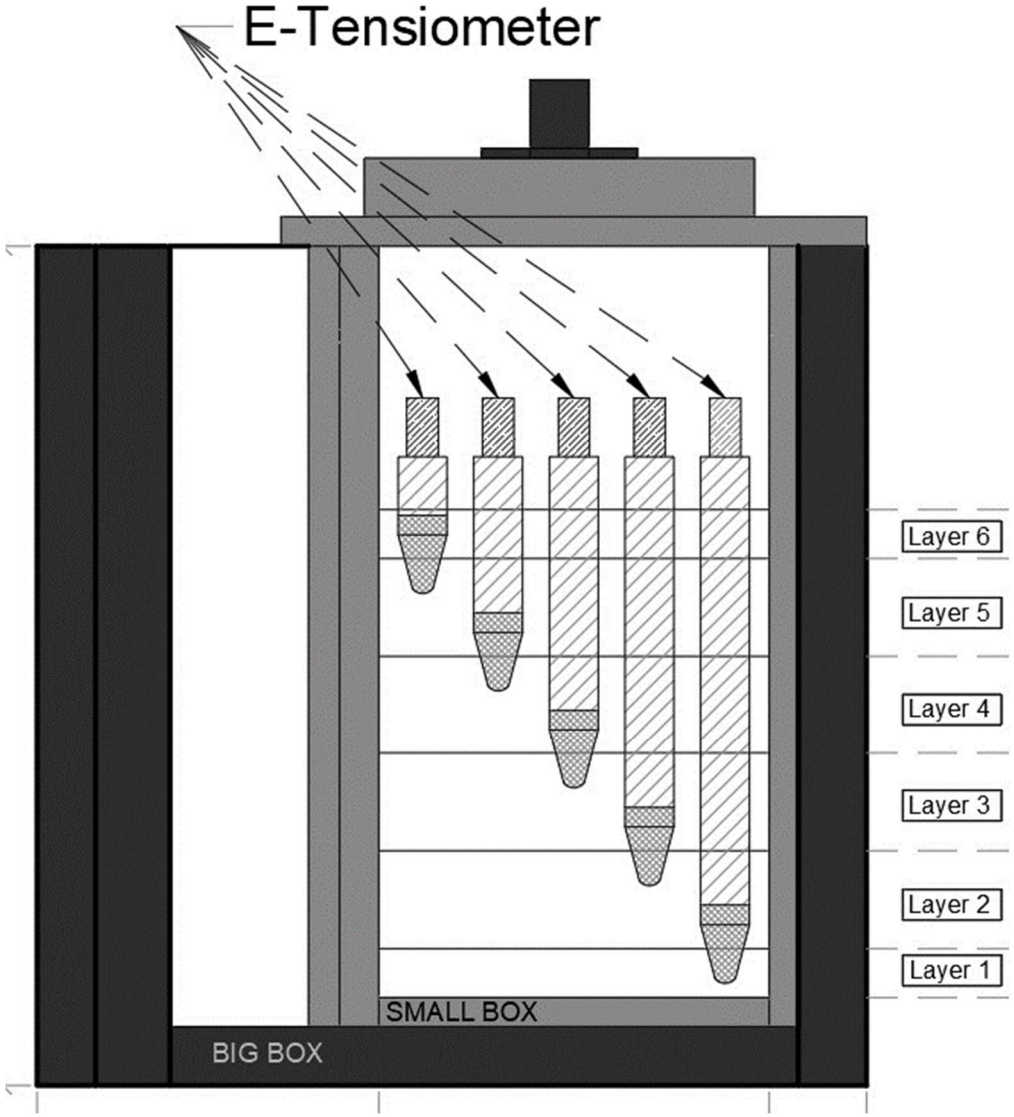


圖 2-329 原尺度(1g)下的模型尺寸(model scale-側視圖)

3. 實驗規劃與相關設定

i. 實驗流程：

本研究分別在 1g、1g 至 2g、2g 至 5g、2g 至 5g、5g、5g 至 10g 、10g、10g 至 15g、15g、15g 至 20g、20g 重力場下進行實驗，並在停止上升 g 力所停留的時間為 10 min，且在實驗中每 2 分鐘記錄 5 組 TDR 感測器反射訊號，最後在重力場達到 20 g 下進行兩次降雨模擬實驗。每一次降雨

實驗視作為一降雨事件，在一事件內的時間切分為降雨期與入滲期。在實驗中降雨期預計花費 0.6 min，入滲期花費 2 min，回推到實際模型尺度降雨期花費 12 min，入滲期花費 40 min，稍後對於降雨量設計的推估進行說明。

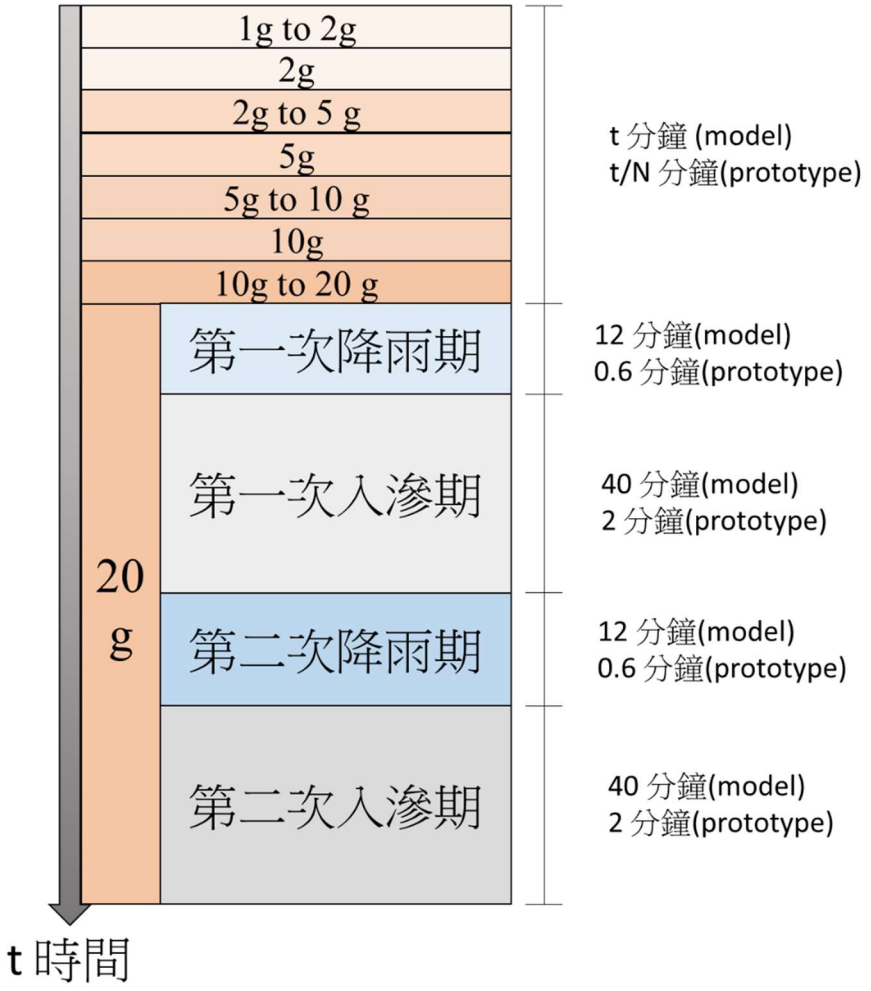


圖 2-330 2 各加速度條件與降雨事件的時間順序示意圖

ii. 降雨量設計：

為了使土壤飽和且不讓水滿出試體外，且加上土壤試體在高壓下其自重壓密後乾密度未知，所以假設在 20 g 重力場下，其壓縮後水可填滿的空間等於在初始 1g 的狀態下

飽和度 Sr＝0.75 的水含量，依此推測其可增加的水重量為 2855 g。依據圖 2-321 氣壓與降雨量率定的結果，而各降雨事件所降下的水重量為 1427 g，轉換成降雨量為 49.3 mm/hr，氣壓須達到 4.57 kg/cm^2。

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 2-331 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、暗灰色矽質砂岩、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，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 2-332 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 2-333 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 感測器，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 2-334 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 2-47 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

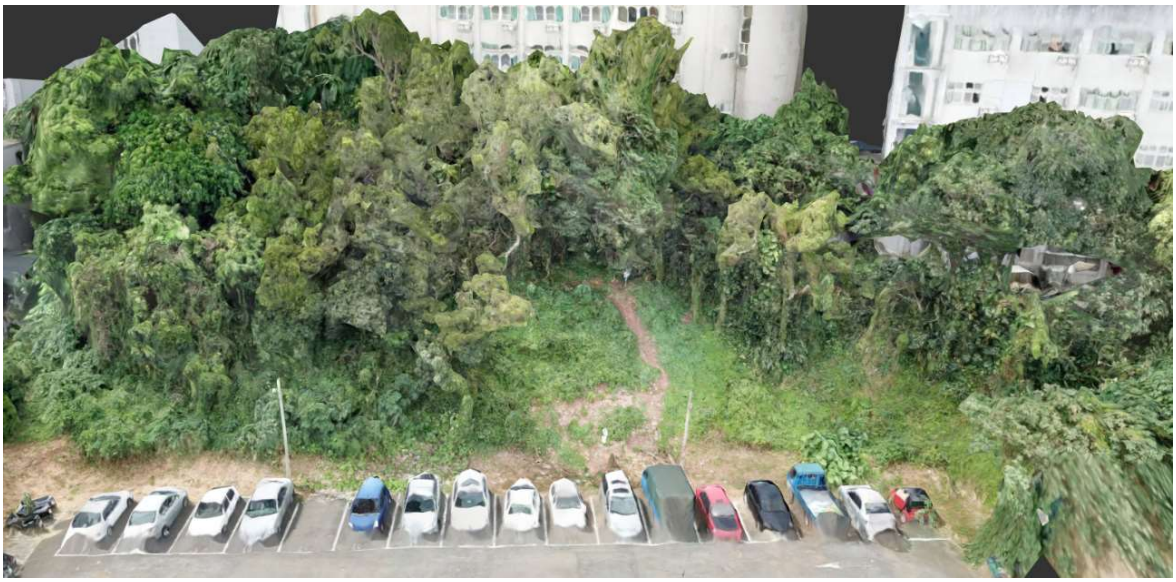


圖 2-331 中央大學宵夜街停車場無人機建模(簡濟豪 2019)



圖 2-332 現地 Arduino 三軸加速度計測站(簡濟豪 2019)

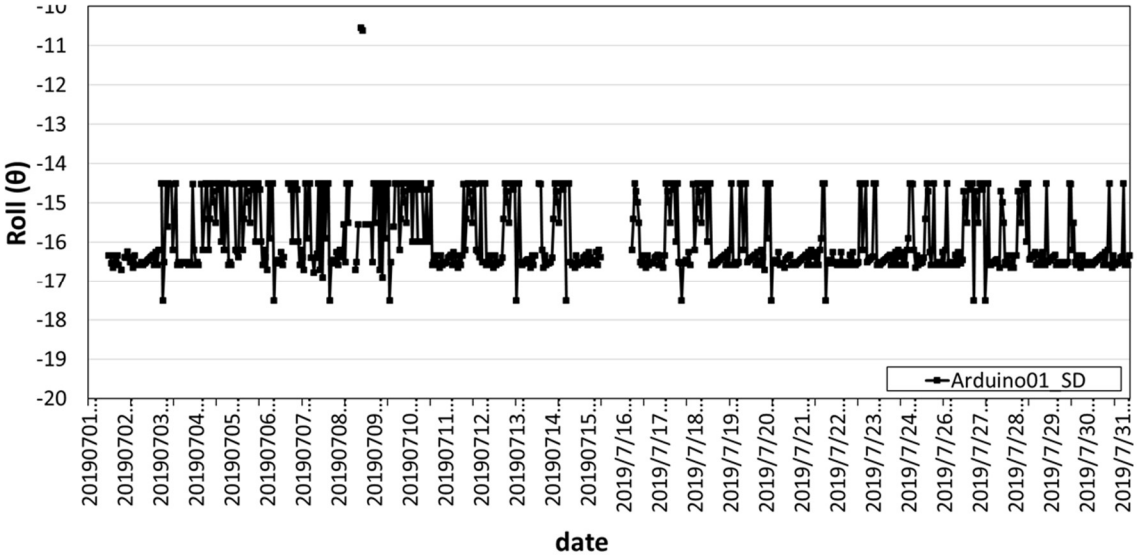


圖 2-333 現地 Arduino 測站 1 之 Roll 監測資料

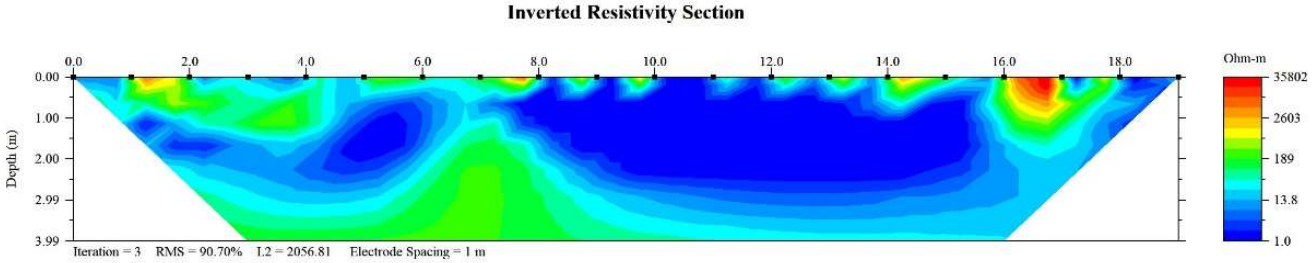


圖 2-334 現地 ERTSchlumberge 方法成果

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：

$$LFS = \frac{2\cos\phi'}{q'}\left(c' + p'\tan\phi'\right) \tag{53}$$

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 2-335 所示，其公式整理如下

$$\begin{cases} p' = \dfrac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma^s \\ q' = \sigma_1' - \sigma_3' = \sigma_1 - \sigma_3 \end{cases} \tag{54}$$

其中有效主應力可改寫為：

$$\begin{cases} \sigma_1' = \sigma_1 - u_a - \sigma^s \\ \sigma_3' = \sigma_3 - u_a - \sigma^s \end{cases} \tag{55}$$

而土壤基值吸力σ_s則為：

$$\begin{cases} \sigma^s = -\left(u_a - u_w\right) & as\ u_a - u_w \le 0 \\ \sigma^s = -\dfrac{\left(u_a - u_w\right)}{\left(1 + \left[\alpha\left(u_a - u_w\right)\right]^n\right)^{(n-1)/n}} & as\ u_a - u_w \ge 0 \end{cases} \tag{56}$$

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(Trasientun saturated flow)之 Richard’ s 方程式：

$$\nabla \cdot K(h)\nabla H + W = \frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial H}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial z}K(h) = \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \tag{57}$$

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：θ(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：

$$K(h)=K_{sat}\frac{\left\{1-(\alpha|h|)^{n-1}\left[1+(\alpha|h|)^{n}\right]^{\frac{1}{n}-1}\right\}^{2}}{\left[1+(\alpha|h|)^{n}\right]^{\frac{1}{2}-\frac{1}{2n}}} \tag{58}$$

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：

$$\nabla\cdot(\sigma)+\gamma(\theta)b=0 \tag{59}$$

其中σ為 2 維平面下之應力張量(stresstensor)，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，參考Σηαo 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 2-336 所示。

本研究預計之不確定性分析流程如圖 2-337 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 2-336 所示。

綜合以上各項流程，圖 2-337 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。

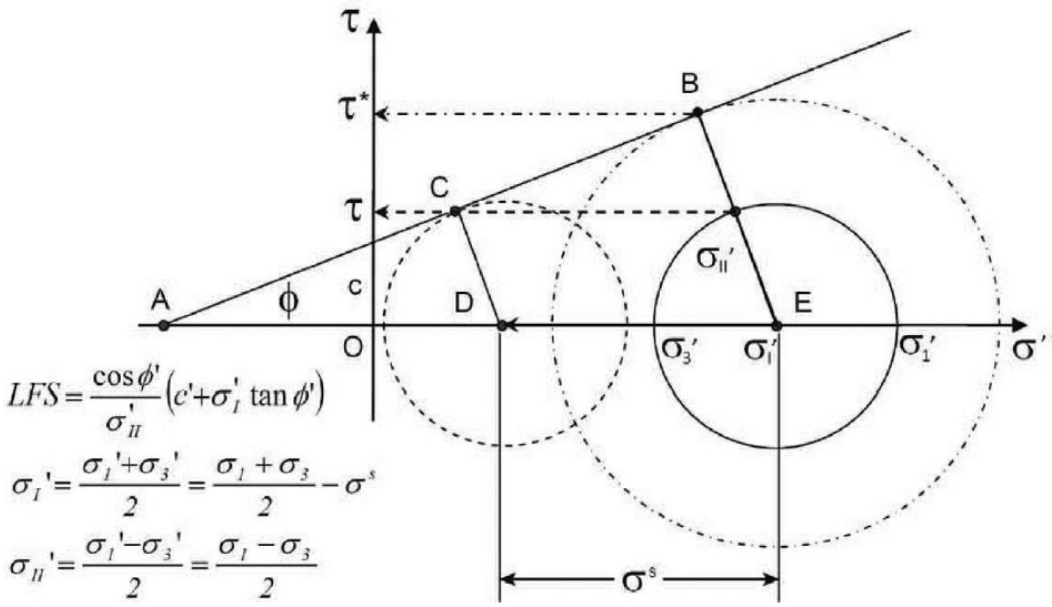


圖 2-335LFS 莫爾庫倫應力圖(Lu et al. 2012)

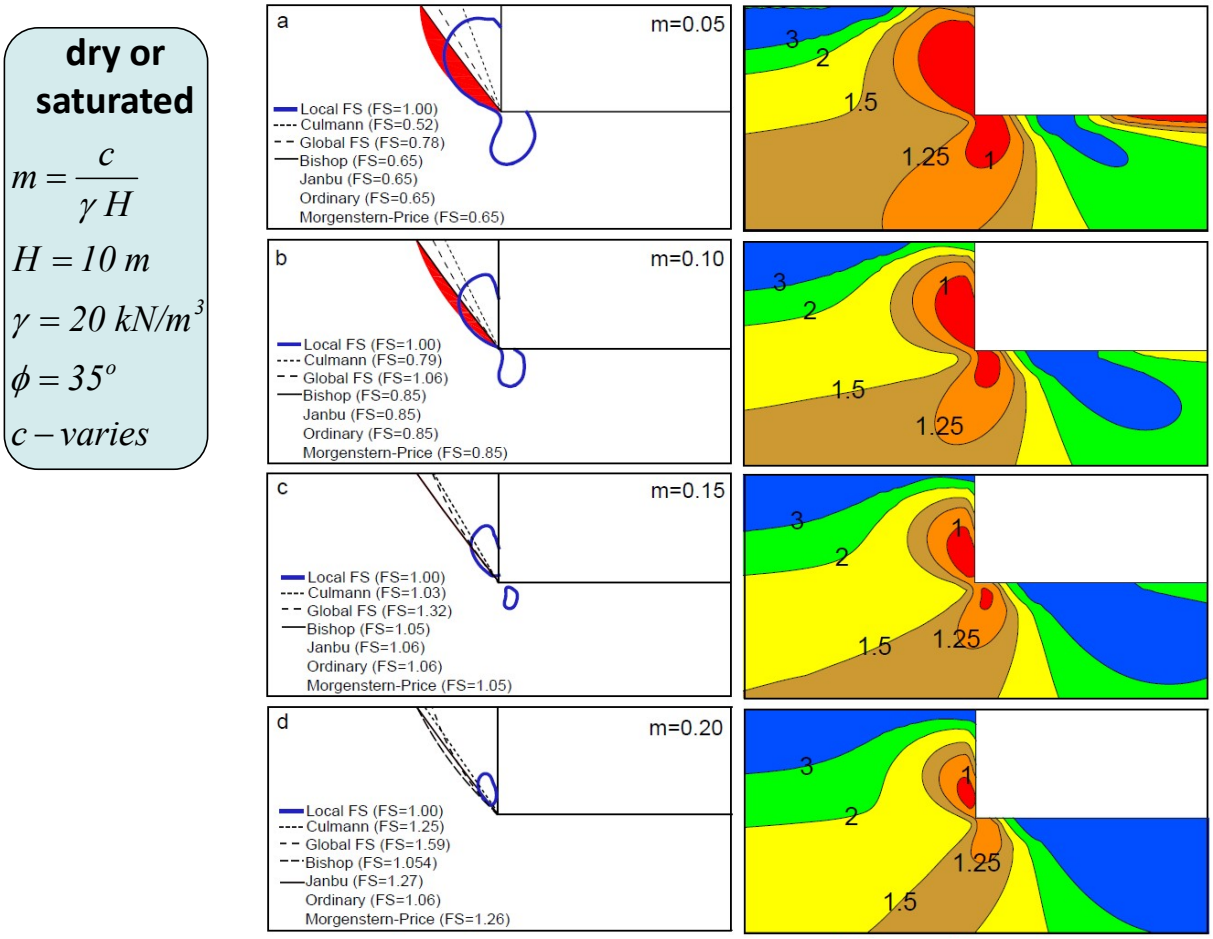


圖 2-336 極限平衡法與 LFS 分析結果比較(Lu et al. 2012)

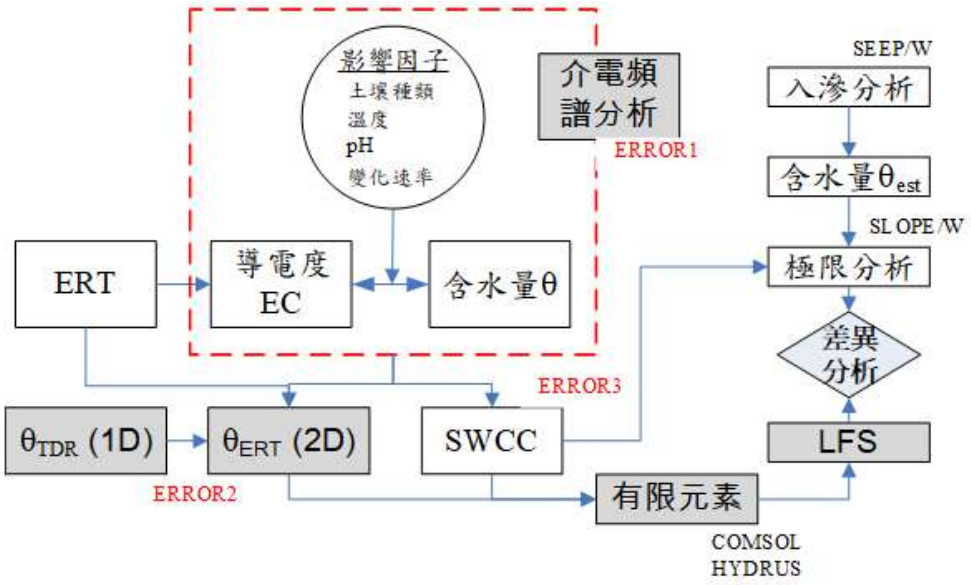


圖 2-337 不確定性分析流程(灰色區塊為本研究研發項目)

第五節 結論與建議

一、結論

在壓力鍋試驗與 VNA：

1. 使用(Topp et al,. 1980)提出的體積含水量方程估算含水量，在高潤濕速率的情況下會與實際測得(水室)比較下有延遲的現象。在滲透率大、含水量變化快速的土壤中經常發生淺層應用 TDR 時必須考慮這一現象。在規劃早期預警系統時需要考慮結果估算的延遲效應。
2. 在導電度與體積含水量關係中，與較低的乾濕速率相比，乾濕速率較高的土壤具有較高的遲滯現象。此外與較低的潤濕速率相比，較高的土壤潤濕速率會產生較小的斜率。主要因在潤濕過程中水分含量的快速變化，由於土壤的孔隙被水充滿，導電度值會急劇增加。
3. 在本研究中，根據 TDR 波形計算土壤的介電頻譜以及乾濕速率使用兩種分析類型，即 TDR 全波形反算分析(Full waveform inversion analysis)和相速度分析法(Phase velocity analysis)並進行比較。TDR 全波形反算分析的結果與 0.1GHz 至 1GHz 頻率範圍內的 PVA 相速度分析法結果非常吻合。
4. 結果表明，與乾燥速率較低的土壤相比，乾燥速率較高的土壤的介電頻譜在每個週期之間的差異較大。
5. VNA 測試結果不是很好，是因為測試的過程不是最佳化的，計算過程還是不佳。現在仍在努力使結果更合理。

在砂箱實驗的部份：

1. 乾密度組(試前)(1.5 g/cm^3)的看到類似於遲滯效應的現象，推測是高密度導致水分在孔隙中的分布在乾燥期與濕潤期不同。

2.乾密度組(鬆，1.3 g/cm^3)與自然高導電度組(240 μS/cm)並未發現到明顯的遲滯效應。

3.高密度組(高密度組--1.7 g/cm^3)可以在 3 電極感測器看到明顯的遲滯迴圈，證實了試前組的現象。

4.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。

二、建議

壓力鍋試驗：

1. 需要對 TDR 壓力鍋目前的設計進行修改，使達到更進一步的測試的要求。需要進行潤濕速率完整的控制，以充分觀察乾濕速率對導電度與體積含水量關係之遲滯現象的影響。
2. 未來可進行超過兩次乾濕循環的樣品以研究遲滯現象的影響。
3. 在目前的壓力鍋的設計中，乾燥速度是通過控制土壤中的氣壓來控制的。尤其是在第二個循環中，藉由水室很難觀察到體積含水量的變化。在水室上放置一個更精確的刻度或放置到一個可以直接測量水重量的裝置方便觀察。

在砂箱實驗的部份：

1. 目前尚進行水質 pH 值影響試驗，後續補充試驗結果。

2. 目前因調快擷取時間時造成電腦記憶體不足，迫使調慢擷取時間，未來能改善擷取 TDR 資料的程式。

目前本研究正在重新設計離心機降雨系統上的壓克力板，由於原先的壓克力板會阻礙到 LVDT 固定鐵架的螺絲孔使無法鎖緊，因此擬定於期末簡報時更新相關離心機試驗成果。

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 111 年 01 月至 111 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	1	1	280	0	國立中央大學	TDR 與離心機物理模型整合，以新式 TDR 之設備透過目前光纖資料擷取系統進行資料整合
科技創新	項	1	1	1	190	0	國立中央大學	離心機重力影響因子探討，配置小型 TDR 感測器與基值吸力感測器，探討土壤電學與水文物理性質關係精進評估
研究報告	本	1	1	1	42	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	TDR 加工	離心機構通介面	TDR 於離心機測試	TDR 於離心機測試	TDR 與離心機物理模型整合，以新式 TDR 之設備透過目前光纖資料擷取系統進行資料整合
		累計百分比	30	55	80	100	
科技創新	50	工作量或內容	砂箱配置	感測器率定	模型試驗	資料分析	離心機重力影響因子探討，配置小型 TDR 感測器與基值吸力感測器，探討土壤電學與水文物理性質關係精進評估
		累計百分比	30	55	80	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	25	55	80	100	
累計總進度	百分比		27	55	80	100	

第四章　預算經費分配

第一節預算總表

計畫名稱：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
計畫編號：108 保發-10.1-保-01-06-001(28)單位：千元

預算科目代號	預算科目	水保局			地方政府配合款	其他配合款	合計
		經常	資本	小計			
20-00	業務費	512	0	512	0	0	512
21-10	租金	166	0	166	0	0	166
23-00	按日按件計資酬金	67.2	0	67.2	0	0	67.2
25-00	物品	194	0	194	0	0	194
26-10	雜支	56.8	0	56.8	0	0	56.8
28-10	國內旅費	28	0	28	0	0	28
合計		512	0	512	0	0	512

第二節預算分配明細表

機關別			國立中央大學	合計
收入預算	水保局撥款		512	512
	合計		512	512
支出預算	預算代號	預算科目		
	21-10	租金	166	166
	23-00	按日按件計資酬金	67.2	67.2
	25-00	物品	194	194
	26-10	雜支	56.8	56.8
	28-10	國內旅費	28	28
	合計		512	675

第三節預算明細表

1. 國立中央大學

單位：千元

預算科目代號	預算科目	水保局			地方政府配合款	其他配合款	合計	說明
		經常	資本	小計				
20-00	業務費	512	0	512	0	0	512	
21-10	租金	166	0	166	0	0	166	詳如下表
23-00	按日按件計資酬金	67.2	0	67.2	0	0	67.2	主持費(6,000 元/月*11.2 月)
25-00	物品	194	0	194	0	0	194	詳如下表
26-10	雜支	56.8	0	56.8	0	0	56.8	詳如下表
28-10	國內旅費	28	0	28	0	0	28	詳如下表
合計		512	0	512	512	0	512	

2.預算明細表補充說明

單位：千元

預算科目代號	預算科目	水保局			地方政府配合款	其他配合款	合計	說明
		經常	資本	小計				
21-10	租金	166	0	166	0	0	166	說明如下

整合計畫開會、現勘、現地調查觀測、監測儀器安裝等租車差旅租車*10 次*2000 元/次

基於國立中央大學貴重儀器使用中心收費標準

物理模型(離心機)試驗掛台租用費(學術單位)：25000 元/日*3 次=75000

其他設備租用費：試驗箱(試驗箱租每日 2000 元*10=20000)、實降儀(每日 2000 元*3=6000)。

感應器租用費用，雷射位移計、壓電式加速度規、光纖光柵水壓計、線性差動變壓器、土壓力計、單軸向應變規預計 15 處*每一感應器每次租 1000 元*3 次=45000。

單位：千元

預算科目代號	預算科目	水保局			地方政府配合款	其他配合款	合計	說明
		經常	資本	小計				
25-00	物品	194	0	194	0	0	194	說明如下

離心機開發費用

TDR 儀器固定鐵件加工 10 項*3000=30000，

低損同軸電纜線 500 件*20=10000

傳輸電纜與光纖接頭 100/組*40 組=4000;

離心機模具壓克力加工 10 件*8000=80000，

TDR 感測器加工 5 組*12000=60000

SMA 同軸電纜線 100m*100=10000

單位：千元

預算科目代號	預算科目	水保局			地方政府配合款	其他配合款	合計	說明
		經常	資本	小計				
26-10	雜支	56.8	0	56.8	0	0	56.8	說明如下

資料印刷 5000 黑白頁*1+2000 彩色頁*6+裝訂 682.4*10=23824

文具紙張一式 6076

論文投稿英文編輯一篇 8000 字*2.375=19000

會議便當 50*80 元=4000

郵資一式 3900

單位：千元

預算科目代號	預算科目	水保局			地方政府配合款	其他配合款	合計	說明
		經常	資本	小計				
28-10	國內旅費	28	0	28	0	0	28	說明如下

整合計畫開會、現勘、現地調查觀測、監測儀器安裝等差旅雜費，預計 30 人/次，共 400*30=12000，

另外考量住宿 1600*10 人/次=16000

第四節計畫經費分攤明細表

1.國立中央大學

單位：千元

序號	單位名稱	金額	備註
1	水保局	675	
計畫總經費		**675**	

第五節薪俸、研究主持人費明細表

機關名稱姓名職稱費用	姓名	職稱	費用代碼	月支(元)	月支(元)*期限(月)
國立中央大學土木工程學系	鐘志忠	副教授	2	6,000	67,200
小計	1.薪俸00		0		0
	2.研究主持人費167,200		1		67,200
總計				1	67,200

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. 辜炳寰，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載力影響因子探討-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. Szypłowska, J. Szerement, and W. Skierucha, "Zł¸acze 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 Mechan. 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. Chung, C.-C.,* Wang, Y.-K. (2022) Practical Assessment of Real time Suspended Sediment Load Monitoring using TDR, Water Resources Research, 58, e2022WR032289. https://doi.org/10.1029/2022WR032289. (SCI, EI)
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons.
43. 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.
44. Hasted, J. B., 1973, Aqueous Dielectrics, Chapman and Hall, London.
45. Heimovaara, T. J., (1994), Frequency domain analysis of time domain reflectormetry waveforms: 1 measurement of the complex dielectric permittivity of soils, Water Resources Research, Vol. 30, No. 2, pp. 189-199.
46. 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.
47. Hollywood, P. M. (1997). "TDR level measurement," Meas. Control, 31(6), 94–98.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. Klein, K. and Santamarina J.C. (2003), Electrical Conductivity in Soils: Underlying Phenomena, Journal of Environmental Engineering Geophysics, 8, 4, 263-273.
52. Knight, R., (1991), Hysteresis in the electrical resistivity of partially saturated sandstones: Geophysics, 56, 2139–2147.
53. Lewandowski, A., Szypłowska, 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.
54. Lewandowski, A., Szypłowska, 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.

55. Lin, C. -P. (1999). Time domain reflectometry for soil properties. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. 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
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. 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. Shammas, Handbook of Environmental Engineering, Volume 17, Springer Science, USA.
65. 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.

66. 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.
67. Logsdon (2005). Soil Dielectric Spectra from Vector Network Analyzer Data, Soil Sci. Soc. Am. J., 69, 983–989.
68. Lu, N., Godt, J., (2008). Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. Water Resour. Res. 44(11), doi: 10.1029/2008WR006976.
69. 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.
70. 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
71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. 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.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. Xu, Z. Pierce, C.E., (2013). TDR-based shear deformation measuring system for slope failure modeling. Advanced Materials Research, 639-640, 1155-1161.
83. Xu, J., Jones, S.B., Sheng, W. (2019) Factors influencing minivna-based dielectric measurements using bilinear analysis, EGU General Assembly 2019, Vienna, Australia.
84. 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.
85. 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
86. 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.
87. 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 512,000 元內調整編列。 2. 執行期限請修正為自 111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日(11.2 個月)。主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 11.2 個月內編列。 3.「按日按件計資酬金」應低於業務費 35%。 4. 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。 5.「物品」項下之 TDR 儀器固定鐵作加工、離心機模具壓克力加工、TDR 感測器加工等是指加購材料加工嗎？若是，請量化材料說明。 6.「雜支」項下資料印刷，圖書雜誌論文索引與編輯請量化說明。	1. 整體經費已調整。 2. 期限已修訂。 3.「按日按件計資酬金」已修正。 4. 薪俸、研究主持人費明細表已修正。 5. 已補充量化材料說明。 6. 已修正成論文投稿編輯一式 19000
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. 利用中央大學全國唯一的離心機進行模型實驗與利用中大紅土礫石邊坡不飽和土壤邊坡淺層浸潤面往坡中發展的特性，預期成果具一定的實用性。實地案例	1. 感謝委員意見，預期邊坡在研究期間應有降雨事件，若後續無顯著降雨，則將採用人工方式進行試驗。 2. 目前離心機試驗預計仍著重 TDR 於地下水文特性量測評估，並加入部分重力影響，但整體實務上仍以淺層崩塌行為為優先，但不排除

邊坡在研究期間，如果沒有適當的雨事件，或許可以考慮利用人工灑水(降雨)的方式進行研究，如此可以控制變因。 2. 本研究探討地下水特性與淺層崩塌之關係，是否能在離心機試驗中探討 TDR 能量測地下水文特性的深度？有助於建立崩塌(淺或深)的關係。 3. 現地樣態複雜程度遠高於實驗室，應儘快探討現地地下水文特性。	相關成果可延伸至深層水文特性之應用。 3. 感謝委員意見，的確現地樣態複雜程度遠高於實驗室，但為逐步驗證本技術，目前將先透過中大實地案例邊坡先進行實務評估，後續再推展到現地觀測。

A2 期中報告意見回覆

審查意見	意見回覆
1. 本研究題目既是在作應用探討，英文題目不宜用 investigation 一字，請斟酌，另英文摘要之第一句有語病，宜精確呈現本主題之題意。(注意”特性”一詞)	感謝委員建議，“Investigation” 已改成”Characterization”。
2. P30，在第三步驟時，如何使用溫度計保持土壤試體溫度？(溫度計有此功能否？)	感謝委員建議，溫度計沒有保持溫度的功能，已更新錯誤的地方。
3. 圖 2-26，圖面以黑線呈現，無法分辨空氣或水之傳輸？	感謝委員建議，圖 2-26 為 TDR 感測器分別放置在空氣與水量測的示意圖(藍線為量測水之結果，黑線為量測空氣之結)，在圖 2-26 的 X 軸 Travel Time 約 2000 的位置為訊號變化的地方，此訊號位置約為感測段的地放，由於水的介電常數高於空氣(水的介電常數約等於 81，空氣約等於 1)，使 TDR 感測器感測段放置在水時的特徵阻抗小於放置在空氣中，造成 TDR 感測器感測段放置在水時 X 軸 Travel Time 約 2000 的位置後的訊號低於放置在空氣。
4. 圖 2-28~圖 2-38，圖例所示之觀測值與計算值之符號是否正確？(何以公式計算不連續？)	感謝委員建議，計算值是分析每分鐘記錄一次的 TDR 反射訊號所得出來的體積含水量，加上水分在孔隙中的分布與雜訊的問題，使計算值為離散(分析每分鐘資料)且上下浮動(水分分布與雜訊問題)。
5. 圖 2-41 之各符號代號應註明係何種樣態？	感謝委員建議，各符號代號為對應砂箱中不同的感測器，其中”Three electrode” 為傳統三電

	擊感測器(如圖 2-72 的編號 3)，”D1” 為新式雙側感測器(如圖 2-72 的編號 N1)，”D2” 為新式雙側感測器(如圖 2-72 的編號 3)，”S” 為舊式單側感測器(如圖 2-72 的編號 S)，”M” 為小型雙側感測器(如圖 2-72 的編號 3)，並在圖標表明。
6. P7 之σ符號應屬正向應力，而 P46 之圖 2-4，則為導電度，各符號應前後一致，又 P46 之（式 23）的“ρ “，即使是常用代號，亦應註明，以免誤解。	感謝委員建議，已更正。
7. P56，文中用”下面兩張表””下面等圖”等文字說明不妥，應指明表號、圖號。	感謝委員建議，已更正。
8. 圖 2-1023（P85）之迴歸式為指數迴歸，何以圖面為直線相關？該座標是否正確？其他各圖亦是？	感謝委員建議，更新前為指數迴歸，更新後將表明圖中回歸公式為線性或是指數，更新前後各圖亦是。
9. P169，文中何以要用“本申請人”之主觀用語？科學研究強調客觀的論述與主體，若屬作者所開發之儀器、方法、技術、理論等，則直接名之即可。	感謝委員建議，已更正。
10. 本期中報告是否可作一初步之結論，以概括總結期中研究之成果？	感謝委員建議，已更正。
11. 建議於期末報告中說明本研究計畫土壤介電行為與水文持性於淺層崩塌穩定能於實務應用，尚有那些課題需進行研究。	目前離心機試驗預計仍著重 TDR 於地下水文特性量測評估，並加入部分重力影響，但整體實務上仍以淺層崩塌行為為優先，但不排除相關成果可延伸至深層水文特性之應用。

12. 本研究規劃第三年現場試驗場址為中大附近坡面，建議可考慮選擇目前水土保持局架設較多觀測儀器之現場，如宜蘭蘭台、南投九份二山、新竹秀巒崩塌地、桃園光華崩塌地等，以驗證本計畫發展之軟硬體模擬成效。	感謝委員意見，的確現地樣態複雜程度遠高於實驗室，但為逐步驗證本技術，目前將先透過中大實地案例邊坡先進行實務評估，後續再推展到現地觀測。
13. 建議報告書增列結論及建議相關章節。	感謝委員建議，已更正。
14. 建議具體說明本計畫成果未來如何應用於建立全國尺度之淺層崩塌預警機制。	感謝委員建議，目前本研究正持續進行離心機相關試驗，待完成後提供可能之全國尺度之淺層崩塌預警機制建議。

A3 期末報告意見回覆

審查意見	意見回覆
1. 研究結果有關土壤與岩層中的含水量估算的誤差或是不確定範圍大約是多少？	依照現有 TDR 技術，可有效掌握約正負 1%體積含水量。
2. 對於崩塌地現場使用地電阻量測資料有什麼建議？	依照文獻回顧，需依照現場量測的大小來決定施測時”電極排列方式”，依訊號衰減程度最小的 Wenner array 和 Pole-Pole array ，Wenner 探測深度淺但解析度最好，Pole-Pole 則探測深度最深但解析度差且量測幅員廣大，所量測到的雜訊最多。並且，佈線時應避免起幅過大的地形與橫跨障礙物，測線旁有障礙物時應記錄下來，以方便在分析資料時注意是否受障礙物影響。 但如需要進行地電阻轉換為含水量剖面，依本研究成果，建議需另外有 TDR 感測器進行包含含水量與導電度之關係建立，藉以提供正確之轉換公式，避免過度樂觀或保守之含水量剖面。
3. 是否考量過運用於實務情形下，受人類活動（如農業施肥）的影響。	目前可預見相關人類活動將可能影響導電度變化，因此對於含水量剖面轉換之不確定性大幅提升。
4. 介電常數與電導度成正比？請問這二個參數提供的不同資訊為何？	無直接正比或反比關係，一般來說單一元素的物質(如水 H_20)的介電常數與導電度沒有直接關係，例如純水的介電常數約為 80，但導電度極小(部分的氫離子和氫氧根離子)。但是在宏觀的土壤，由於雨水常帶有一定程度的

	電解質，並且，土壤的主要成分是硅鋁氧化物與各種有機物、礦物質與電解質所組成，所以當雨水進入土壤時，導電度上升(由於雨水自身的電解質加上土壤內的電解質，以及土壤雙電層，使土壤顆粒表面的第一層帶正電(電離的 Si-0-Si+)，第二層最外長層帶鬆散自由的負電(Si-O-H-))，以及介電常數的上升(由於水分子的介電常數為 81 與土壤顆粒本身的介電常數 3~5 程相當大的差距，並且越多的水使"土壤整體"的混和介電常數上升)。所以單就土壤而言，會有介電常數與電導度成正比的錯覺。 就大部分種類的土壤而言，如同上述原因，土壤的介電常數與導電度的上升都是由於雨水或其他來源的水分入滲所導致。但由於土壤的成分復雜，介電常數與導電度之間的關係會有所不同，或者是的水分的多寡，不同種類的土壤所導致的介電常數與導電度的值會有所不同，這也是本研究建議須進行現地 TDR 感測器監測，建立含水量與導電度之關係建立，藉以提供正確之轉換公式，
5. 水文特性隨時間改變，TDR需要後處理，若要用在崩塌分析，不同時間，地點的介電性質是否能用資料庫方式儲存供後續分析使用。	可以，未來將可透過大量的土壤種類資料庫建立，以可快速進行初步評估與可能特徵行為判釋。

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