

# 國立交通大學

## 土木工程學系

### 碩士論文

時域反射法於土釘工程品質檢測技術研發

Development of Soil Nail Quality Control Using

Time Domain Reflectometry

1896

研究生：林志昇

指導教授：林志平 博士

中華民國一百零一年七月

# 時域反射法於土釘工程品質檢測技術研發

Development of Soil Nail Quality Control Using Time Domain  
Refletometry

研究生：林志昇

Student: Chih-Sheng Lin

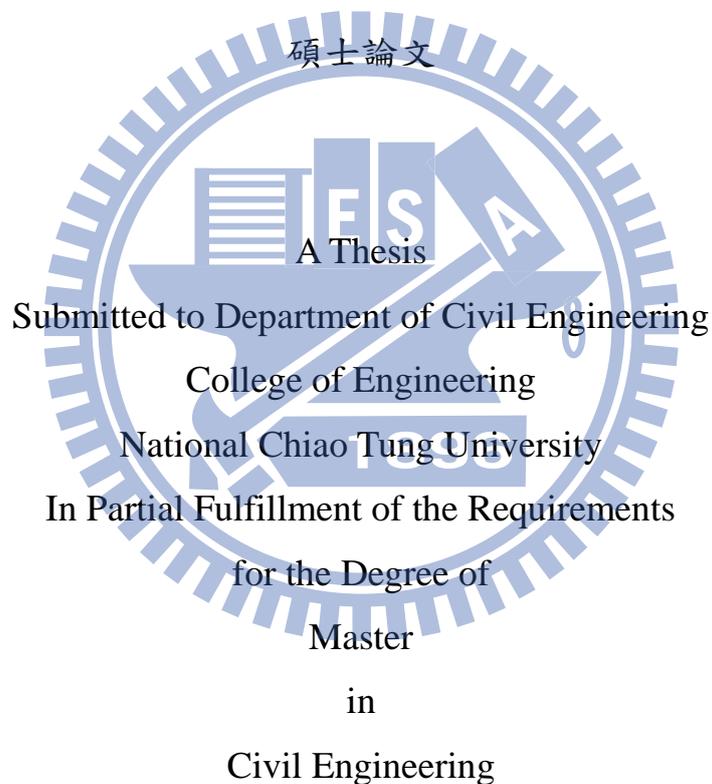
指導教授：林志平 博士

Advisor: Dr. Chih-Ping Lin

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文



July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

# 時域反射法於土釘工程品質檢測技術研發

學生：林志昇

指導教授：林志平 博士

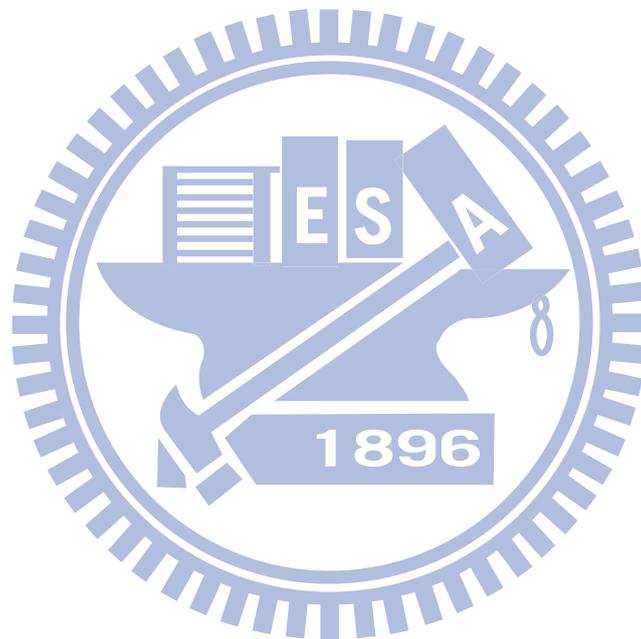
國立交通大學土木工程學系

## 中文摘要

近年來台灣地區使用土釘來加強邊坡穩定上較為頻繁，但國內尚無一套簡易的土釘檢測方法以檢測土釘施工品質，包含土釘長度與灌漿的品質。因此，本研究為提供一土釘檢測方法，並提升其可靠、效率與經濟性，嘗試利用時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 傳輸線式之優勢，同時參考香港之經驗，企圖研發改善適用於土釘工程品質檢測方法。依香港相關文獻建議，其係利用一單心電纜線平行固定於土釘側邊，以單心電纜線與土釘形成 TDR 的導線，藉以檢測土釘長度與回填品質，但其技術經本研究評估仍其有纏繞弊端以及無法區分長度和孔洞限制。為此，本研究改採同軸纜線替換既有單心電纜線，除利用預埋之同軸纜線可確實且快速檢核土釘的長度，並可藉由纜線的外導體與鋼筋形成之 TDR 導線，檢核混凝土灌漿品質是否完整，有無包含孔洞情形。目前相關的室內試驗長度量測的部分設計三組不同長度的試體，其量測誤差百分比結果均在百分之一以內，結果相當準確，而在回填灌漿的部分，設計兩組不同孔洞大小的試體，其量測的結果均在百分之五以內，結果顯示透過預埋之同軸纜線可確

實且快速的檢測土釘長度及其回填灌漿的品質。目前已有現場初步案例應用測試。本研究冀後續改善能落實工程實務應用，並提供一標準土釘檢測方法與作業程序，藉以提升相關工程施工品質。

關鍵字：時域反射技術 (TDR)、土釘檢測



# Development of Soil Nail Quality Control Using Time Domain Reflectometry

Student : Chih-Sheng Lin

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

Soil nail method is frequently employed to enhance slope stability in Taiwan in recent years. But there is no simple method to verify the soil nails quality in domestic constructions area. Therefore, this study aims to provide a soil nail inspection method to meet the requirements of reliability, efficiency and economic feasibility. This research is based upon the time domain reflectometry (TDR) method and refers to the experiences of Hong Kong researches in order to improve the quality of the soil nail works. According to the Hong Kong researches suggestions, the standard configuration of the TDR soil nail inspection is analogous with a parallel transmission line if the single electric core wire is pre-installed along a steel soil nail. The twin conductors act as the TDR transmission line to detect the soil nail length and grouted quality simultaneously. However, the preliminary technical evaluation revealed by this study points out the practical limitations from the Hong Kong existing method. To solve the aforementioned problems, this study proposes using a coaxial cable to replace the single electric core wire. The development can provide the quick soil nail length check by measuring the coaxial cable length. Meanwhile, it also can use the outer conductor of the coaxial cable and steel bar to form a TDR waveguide and detect soil nail grouted quality. Our research trial have shown that the three different length soil nails measurement error are all in less than one percent and the two different void sizes soil nails measure result are all less than five percent, the results show that the embedded-through coaxial cable can reliably and quickly detect soil nail length and its backfill grouting quality. We have some initial test case in field. Based on these verifications, this study provide a standard TDR soil nail testing method in order to enhance the quality of related constructions.

Keywords: Time Domain Reflectometry (TDR), Soil quality control

## 致謝

本文得以順利完成，首先要感謝指導教授在於研究的兩年期間悉心指導，每當遇到研究上有困難時總是細心指導並提供意見，給予學生研究上莫大的幫助，此外在研究之餘，在求學態度與做人處事的方面，亦給予學生許多的啟發，使得我在研究所求學期間更加成長，在此致上最誠摯的謝意。

求學期間，承蒙潘以文教授、廖志中教授、單信瑜教授、方永壽教授、黃安斌教授於學識上的指導，在此至上萬分的謝意。

口試期間，承蒙蔡光榮教授、葛宇甯教授、余騰鐸教授、鐘志忠博士，對於本文的指正與建議，使得本文能趨於完備，於此表示由衷的感謝。

研究期間承蒙俊宏、志忠、柏林、瑋晉等學長兩年的照顧與協助。尤其感謝志忠學長總是幫我解決研究上的問題，指導我的簡報與論文，實在感激不盡。也感謝王凱、士輝、逸倫學長在碩一時，帶領我們認識實驗室，也在研究上給予莫大的幫助。感謝同門成泓兩年來的互相幫助與包容，以及其他同甘共苦同學們，也感謝友誠、昶笙、滢郁等學弟妹在實驗上的幫忙，讓我能順利完成我的論文研究。最後要感謝家人對我的栽培以及支持，這二十年來如果沒有您們的鼓勵與惇惇教誨，便不能成就今天的我，謝謝您們。

# 目錄

中文摘要 .....	I
ABSTRACT.....	III
致謝.....	IV
目錄.....	V
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
第一章、前言 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	3
第二章、文獻回顧 .....	4
2.1 土釘/地錨工法的簡介 .....	4
2.1.1 土釘簡介 .....	4
2.1.2 地錨機制與施工說明 .....	11
2.1.3 土釘/地錨工法評析 .....	17
2.2 土釘非破壞性檢測方法回顧 .....	18
2.2.1 電阻法 .....	20
2.2.2 電勢能法 .....	24

2.2.3	磁向量法 .....	28
2.2.4	敲擊回音法 .....	30
2.2.5	表面電磁波時域反射法 .....	32
2.2.6	各種土釘非破壞性檢測方法評析 .....	35
2.3	時域反射法的基本原理 .....	36
2.4	時域反射法於土釘檢測-以香港經驗為例 .....	37
2.4.1	香港案例回顧 .....	37
2.4.2	香港研發案例評析 .....	40
<b>第三章、研究方法</b>	<b>.....</b>	<b>42</b>
3.1	時域反射法於土釘檢測之配置改良 .....	43
3.1.1	香港 TDR 土釘檢測測試評估 .....	43
3.1.2	新式 TDR 土釘檢測配置研發 .....	45
3.1.3	新式 TDR 土釘波速量測原理 .....	46
3.2	土釘檢測試驗規劃 .....	47
3.2.1	量測設備硬體配置 .....	47
3.2.2	土釘長度檢測驗證 .....	51
3.2.3	土釘回填灌漿品質測試 .....	54
<b>第四章、試驗結果與討論</b>	<b>.....</b>	<b>56</b>

4.1 波傳速度參數率定 .....	56
4.2 土釘長度檢測的驗證 .....	58
4.3 土釘回填灌漿品質測試 .....	61
4.3.1 TDR100 於回填灌漿品質測試 .....	61
4.3.2 TDR20 於回填灌漿品質測試 .....	66
4.4 實務案例驗證與評析 .....	71
4.5 實務作業建議與限制條件說明 .....	76
4.5.1 TDR 量測的安裝作業流程 .....	76
4.5.2 限制條件 .....	78
<b>第五章、結論與建議 .....</b>	<b>79</b>
5.1 結論 .....	79
5.2 建議 .....	80
<b>參考文獻 .....</b>	<b>81</b>

## 表目錄

表 2-1 土釘工法適用與不適用之地質條件(Byrne et al. , 1998) .....	7
表 3-1 QR320 纜線基本規格 .....	45
表 3-2 TDR100 基本規格(Campbell scientific Inc. 2008).....	49
表 3-3 TDR20 基本規格(AEA technology INC. 2011).....	50
表 4-1 為 TDR100 量測鋼筋埋設長度的結果.....	59
表 4-2 為 TDR20 量測鋼筋埋設長度的結果.....	59
表 4-3 TDR100 量測二組土釘試體-回填灌漿評估結果 .....	63



## 圖目錄

圖 1-1 美國德克薩斯州某坡地 (a)擋土牆崩塌(b)僅灌漿在土釘頭部(c)土釘未回填灌漿(d) 土釘僅一半回填灌漿(Gong et al.,2007).....	2
圖 2-1 土釘穩定邊坡擋土牆示意圖(Byrne et al. , 1998).....	5
圖 2-2 土釘施工流程圖(洪勇善, 2003).....	8
圖 2-3 土釘三種受力機制(何嘉浚, 1996).....	10
圖 2-4 地錨結構示意圖(廖洪鈞等, 2004).....	12
圖 2-5 地錨工程作業程序之示意圖(廖洪鈞等, 2004).....	14
圖 2-6 地錨於邊坡滑動各種破壞模式(BSI, 1989).....	16
圖 2-7 土釘拉出試驗設備示意圖(洪勇善, 2000).....	19
圖 2-8 現地影響土釘電阻因子(Cheung,2005).....	21
圖 2-9 典型地電阻法量測配置(Cheung,2005).....	22
圖 2-10 電阻法量測土釘結果示意圖(Cheung,2005).....	23
圖 2-11 理論上半無限域均質的土層分布(Cheung,2003).....	25
圖 2-12 現場量測電位的電極分布圖與量測結果電位圖.....	26
圖 2-13 電勢能法電極佈設(Cheung,2003).....	27
圖 2-14 磁向量法量測配置示意圖(Cheung ,2003).....	29
圖 2-15 使用磁力儀量測土釘終點(Cheung ,2003).....	30

圖 2-16 音波回音法檢測設備和其檢測波形之結果 (Lee ,2007).....	32
圖 2-17 表面波時域反射法(Tang ,2004) .....	34
圖 2-18 TDR 量測系統配置(Lin et al.,2007).....	37
圖 2-19 香港採用之 TDR 土釘長度檢測安設方法(Cheung, W.M., 2006 ) .....	38
圖 2-20 香港採用之 TDR 土釘長度檢測安設方法 (Cheung and Lo, 2011 ) .....	39
圖 2-21 內嵌導體的灌漿管 (Cheung et al, 2008 ) .....	40
圖 2-22 國外相關 TDR 土釘長度檢測佈設(Zostrich Geotechnical ,2011 ) .....	41
圖 3-1 研究流程圖 .....	42
圖 3-2 室內規劃兩組試體測試(a)平行放置於鋼筋側邊(b)纏繞方式於 鋼筋上.....	44
圖 3-3 TDR 量測結果於試驗 1.平行放置電纜線於鋼筋側邊.....	44
圖 3-4 配置改良研發實體圖 .....	46
圖 3-5 時域反射法於土釘長度檢測與回填灌漿檢測改良.....	46
圖 3-6 Campbell TDR 100 量測儀.....	48
圖 3-7 AEA TDR 20 量測儀.....	49
圖 3-8 試驗規劃三組不同土釘長度物理模型.....	52
圖 3-9 土釘模型製作過程 .....	53

圖 3-10 試驗規劃二組不同土釘不同長度灌漿率物理模型.....	55
圖 3-11 土釘模型完成圖 .....	55
圖 3-12 土釘夾泥試驗過程.....	55
圖 4-1 TDR 鋼筋與纜線外導體量測空氣率定分析-單切線法 .....	57
圖 4-2 TDR 鋼筋與纜線外導體量測回填灌漿率定分析-單切線法 ...	57
圖 4-3 TDR100 量測三組土釘物理模型之結果.....	60
圖 4-4 TDR20 量測三組土釘物理模型之結果.....	60
圖 4-5 TDR100 量測結果於 1.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實 土釘(b) 圖 4-5-(a)的微分.....	64
圖 4-6 TDR100 量測結果於 2.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實 土釘(b) 圖 4-6 -(a)的微分.....	65
圖 4-7 TDR100 測試土釘孔隙填充不同土壤含水量狀況.....	66
圖 4-8 TDR20 量測結果於 1.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實土 釘(b) 圖 4-8-(a)的微分.....	69
圖 4-9 TDR20 量測結果於 2.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實土 釘(b) 圖 4-9-(a)的微分.....	70
圖 4-10 TDR20 測試土釘孔隙填充不同土壤含水量狀況.....	71
圖 4-11 土釘及自由樑護坡現地工程施工狀況.....	73
圖 4-12 土釘及自由樑護坡現場施工完成圖.....	74

圖 4-13 左側土釘 TDR100 量測結果.....74

圖 4-14 右側土釘 TDR100 量測結果.....75

圖 4-15 標準安裝斷面圖 .....77

圖 4-16 纜線末端防水施作 .....77



# 第一章、前言

## 1.1 研究動機

近年來土釘應用於邊坡穩定逐年增加，其主要工法係於現地預定的位置施作一鑽孔，再用一鋼筋植入土壤中，且穿過預估的邊坡滑動面位置，最後使用水泥砂漿回填鋼筋與土壤間的空隙，主要利用加勁材料的張力作用來改善土壤的剪力阻抗。因土釘具有便利經濟、施工快速、對鄰近結構物及地表的影響較小、安裝機具設備輕巧、機動性高等優點，且能有效地增強邊坡土壤整體的穩定性，故其在台灣邊坡穩定上使用頻率越來越廣泛。而台灣較有名的案例為集集大地震後，暨南大學校門口產生大規模的崩塌破壞，事後部分邊坡工程整治採用大量打設土釘，使得在較疏鬆的土層邊坡形成一整體化的加勁區域，來防止邊坡崩落與滑動。

而地滑區邊坡穩定工程常用之土釘結構物，對其之埋設長度與回填品質等，台灣目前仍尚無有效之工程品質檢測方法。圖 1-1 為美國德克薩斯州某坡地擋土牆破壞的情形，開挖之後發現有許多土釘回填灌漿不實或部分灌漿，使得握裹力不足，造成土釘擋土牆破壞。而香港在 90 年代末在圓周角發生短樁事件，即當

地居屋因沉降情況嚴重，立即進行調查，結果發現 36 之大口徑鑽孔樁有 32 隻比標準短 2m 至 15m，進而引起社會大眾對公共工程品質的關注，故為了減少相關災害的發生，以降低生命財產的損失，實有必要發展更有效率及經濟可行的工程品質檢核技術。

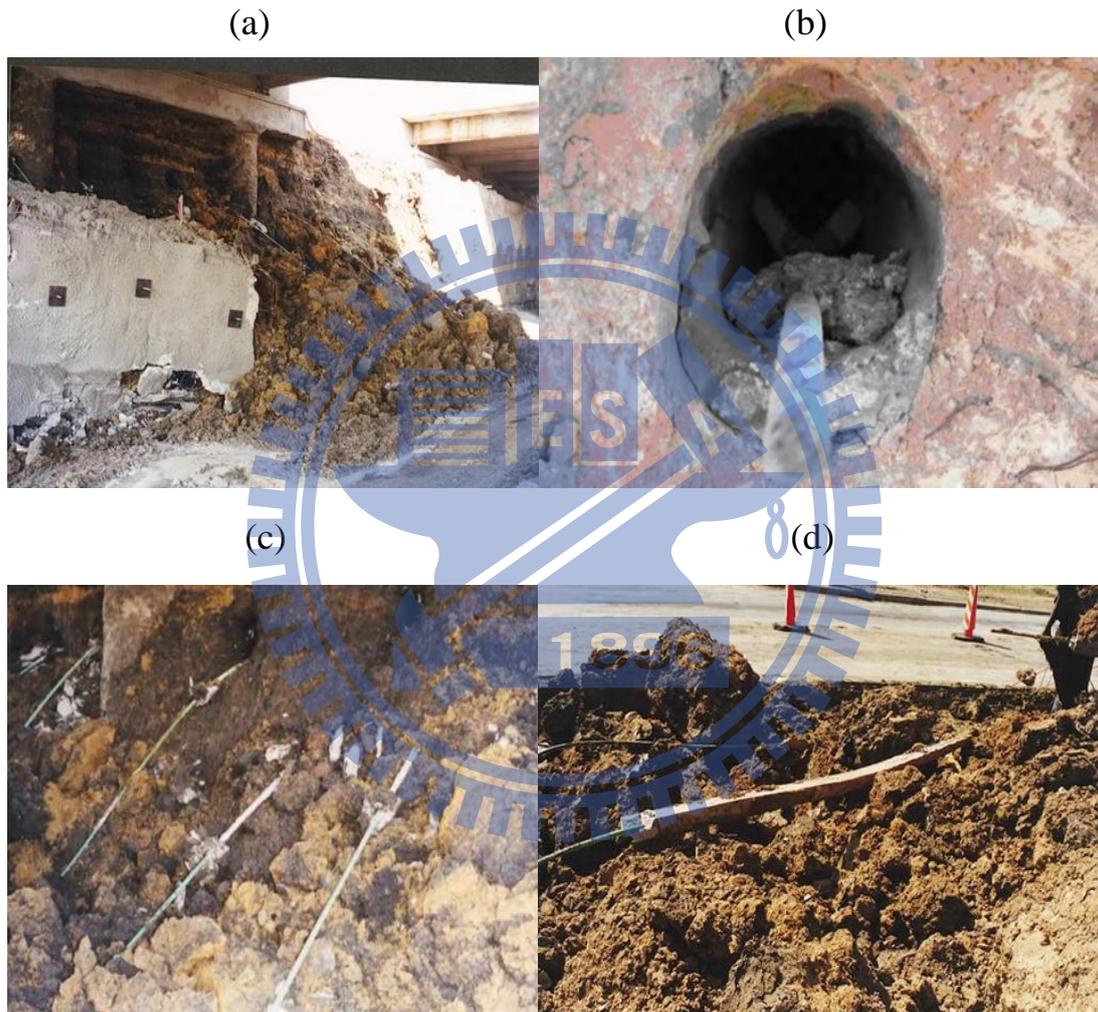


圖 1-1 美國德克薩斯州某坡地 (a)擋土牆崩塌(b)僅灌漿在土釘頭部(c)

土釘未回填灌漿(d) 土釘僅一半回填灌漿(Gong et al.,2007)

## 1.2 研究目的

土釘工法屬於地下結構物，其常因現場施工灌漿不實或包商未按圖施工，使得土釘因混凝土與土壤之間的連結力不足，或鋼筋長度不足造成加勁不足，使得土釘工法失去其質效益。

時域反射法 (Time domain reflectometry, TDR) 的傳輸線式監測技術在近幾年有重要的發展。此一方法基於纜線雷達 (Cable radar) 的概念，可利用導波纜線監測地滑錯動變形。目前 TDR 地層錯動監測在國外已有相當多案例可尋，而香港土力工程處已於近年評估並實際推廣 TDR 技術於土釘長度與品質檢測應用，其相關工程案例與基本檢測流程均可提供台灣地區參考使用。而本研究欲藉由時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 傳輸線式之優勢，並根據香港土力工程處之研究經驗，企圖研發改善適用於土釘工程品質檢測方式，並藉以檢測土釘長度和其回填灌漿的品質，並助益未來大地工程監測發展。

## 第二章、文獻回顧

### 2.1 土釘/地錨工法的簡介

本節將描述土工結構常見之土釘工法與地錨工法簡介及其差異與優缺點。因土釘與地錨同屬地下結構物，其鋼筋長度與回填灌漿等施工品質都將會大大影響土釘與地錨工法的功能性，本研究將先針對新製作土釘，對其的鋼筋長度的埋設與回填灌漿品質的檢測進行研究，如可行，未來希望可將本研究所提出之檢測方法，延伸應用於地錨工法的檢測，如鋼筋尺寸的長度、回填灌漿品質與鋼筋鏽蝕的檢測等。

#### 2.1.1 土釘簡介

土釘工法的加勁技術發展至今已約三十多年，最早由法國 1972 年應用在鐵路邊坡土釘擋土牆工法所使用，隨後西方國家廣泛應用於現有邊坡的邊坡穩定與基礎開挖的開挖面穩定。因其工法之便利性與其經濟性，近年來在國內的應用規模也有越來越廣的趨勢。

孫介文與姚大鈞(2003)說明土釘之施工方式為將特製的鋼棒或或碳纖維棒已通過預估可能破壞面的位置植入土中，以產生一

加勁土體。植入方式一般先在預定位置施作一鑽孔，鑽孔完成後再將特製之鋼棒或碳纖維棒插入鑽孔內，之後再以混凝土砂漿充填鑽孔與鋼棒或碳纖維棒間之空隙，通常以低壓完成填充過程。加勁後土釘能合理利用土體的自身承載能力，將土體作為支撐結構不可分割的部分而形成類似一擋土牆的形式，如圖 2-1，可有效抵擋牆後的土壓力，因此可有效達到邊坡穩定的目的。

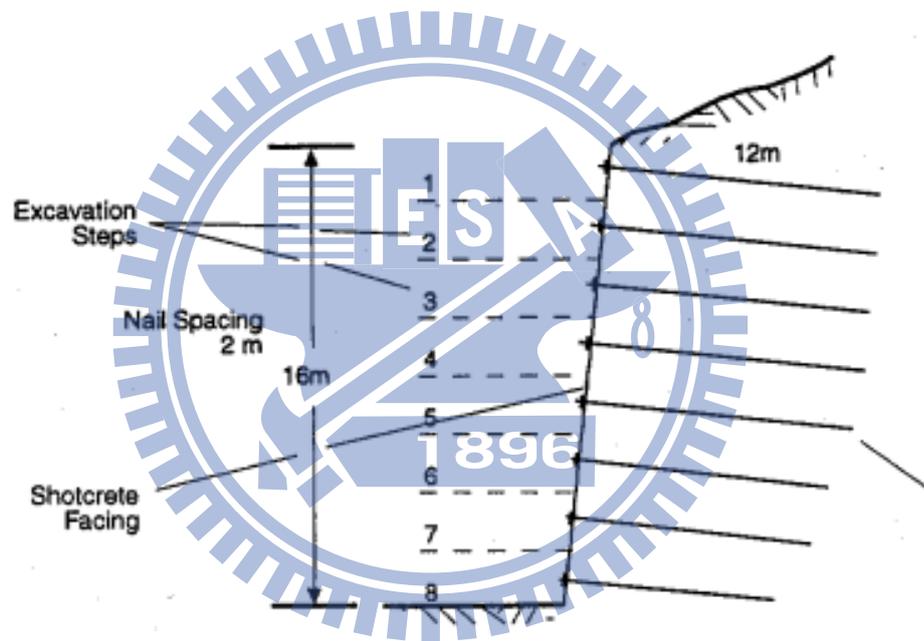


圖 2-1 土釘穩定邊坡擋土牆示意圖(Byrne et al. , 1998)

### 2.1.1.1. 土釘適用範圍

土釘工法雖然良好，但其所擁有的適用與不適用之地層，故須先了解其使用的限制條件。

洪勇善等(2005)提出土釘工法應用於加勁邊坡的適用土壤包括：

1. 具有毛細張力的中細砂土、含天然膠結能力的砂土礫石；
2. 具有凝聚力的沈泥及低塑性黏土與風化岩層等。

而 Byrne et al. (1998)曾提出土釘工法之適用與不適用地層條件，整理如表 2-1。故在使用土釘工法前需深入了解土層的狀況，了解其土壤的物性，並觀察地下水型態，方能施作土釘，也才能有效發揮土釘工法的功效。

表 2-1 土釘工法適用與不適用之地質條件(Byrne et al. , 1998)

<p>適用之地層條件</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 殘餘土壤或沒有不利傾向的風化岩層的低強度結構。</li> <li>2. 堅實的沈泥或具低塑性的黏土且不具潛變。</li> <li>3. 自然沉積或具有低凝聚力之緊密砂層或礫石層。</li> <li>4. 細沙到中細砂且凝聚力至少 <math>5 \text{ kN/m}^2</math>，且自然含水量大於 5% 以上。</li> <li>5. 需位於地下水位以上。</li> </ol>
<p>不適用之地層條件</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 現地標準貫入試驗其 <math>N</math> 值低於 10，或相對密度小於 30% 之鬆散潔淨砂，因其自立性不足</li> <li>2. 顆粒大小均勻之不良級配礫石或砂或其均勻係數(Cu)低於 2 者(除非常緊密的狀況下)。</li> <li>3. 含水量極高或含有含水袋(wet pocket)之地層。</li> <li>4. 有機質土壤或黏土其液性指數大於 0.2，及不排水剪力強度低於 <math>50 \text{ kN/m}^2</math> 者。</li> <li>5. 具高度膨脹性之土壤。</li> <li>6. 高度破碎且具有開口節理或孔洞之岩石。</li> <li>7. 急劇傾斜，不連續的結構弱面之岩層或礦渣等開挖面。</li> </ol>

### 2.1.1.2. 土釘設計與施工流程簡介

依據陳榮河與何嘉浚(2003)所提到土釘擋土工法之基本設計原則

共有以下 4 點，而土釘工法的基本施工流程圖如圖 2-2 所示：

1. 土釘擋土結構一般適用高度小於 15 m 之地下開挖或邊坡穩定，常用高度為 6 m~12 m，開挖面的角度為 70 度~90 度。
2. 土釘之打設長度，若為鑽掘式，一般為開挖高度 H 的 0.5~1 倍，若為貫入式則為 0.5~0.6 倍。
3. 選用作為土釘之抗張材，須為具有螺紋之鋼筋，鋼筋一般大小為 16(#5)~32(#10)，常用 25(#8)；鑽孔直徑一般為 7~12 cm，常用 10 cm。
4. 土釘之施工順序為逐階開挖，逐階打設。

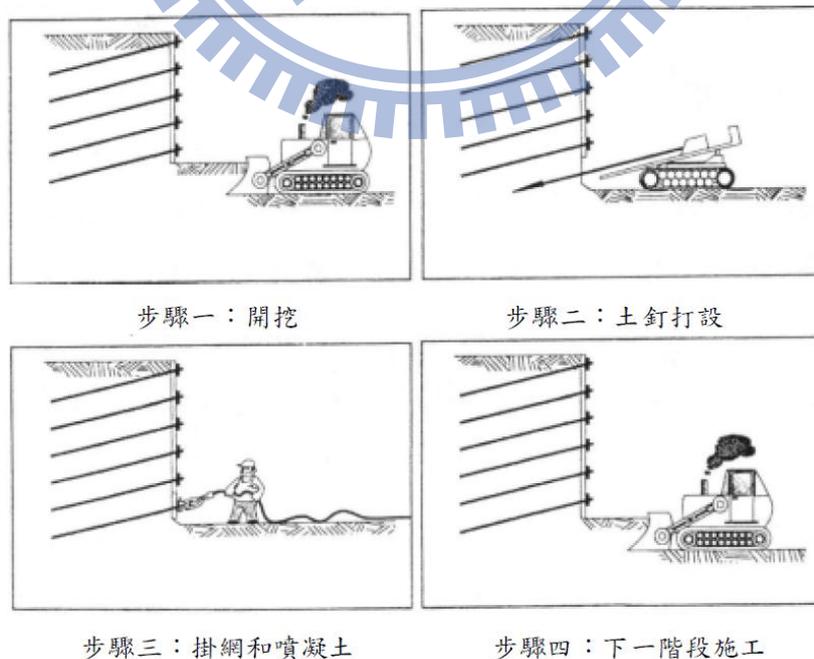


圖 2-2 土釘施工流程圖(洪勇善，2003)

### 2.1.1.3.土釘受力機制

一般而言，土釘結構在土壤中承受軸向力、剪力及彎矩等三種力量，而土釘結構力量發揮之大小，主要與土壤和土釘間之相對勁度和強度有關。又土釘擋土結構依其受力狀態可分為主動區及抗阻區，如圖 2-3 (何嘉浚，1996)所示。主動區即為邊坡潛在的危險滑動區，抗阻區則為邊坡中相對穩定的區域。當主動區發生下滑時，經由土釘結構傳遞力量至土層中的抗阻區，藉由抗阻區土壤與土釘間之錨定力抵抗該驅動力，因此土釘擋土結構設計的要求，乃是確保土釘與土壤間能有效發揮互制作用，以抵抗主動區之位移，並確保擋土結構局部與整體之穩定性。另外 洪勇善 (1999) 也指出土壤與土釘之互制作用包含兩種機制，一為沿著土釘之摩擦力，另一為作用於土釘上之被動土壓力所產生之承載阻抗。

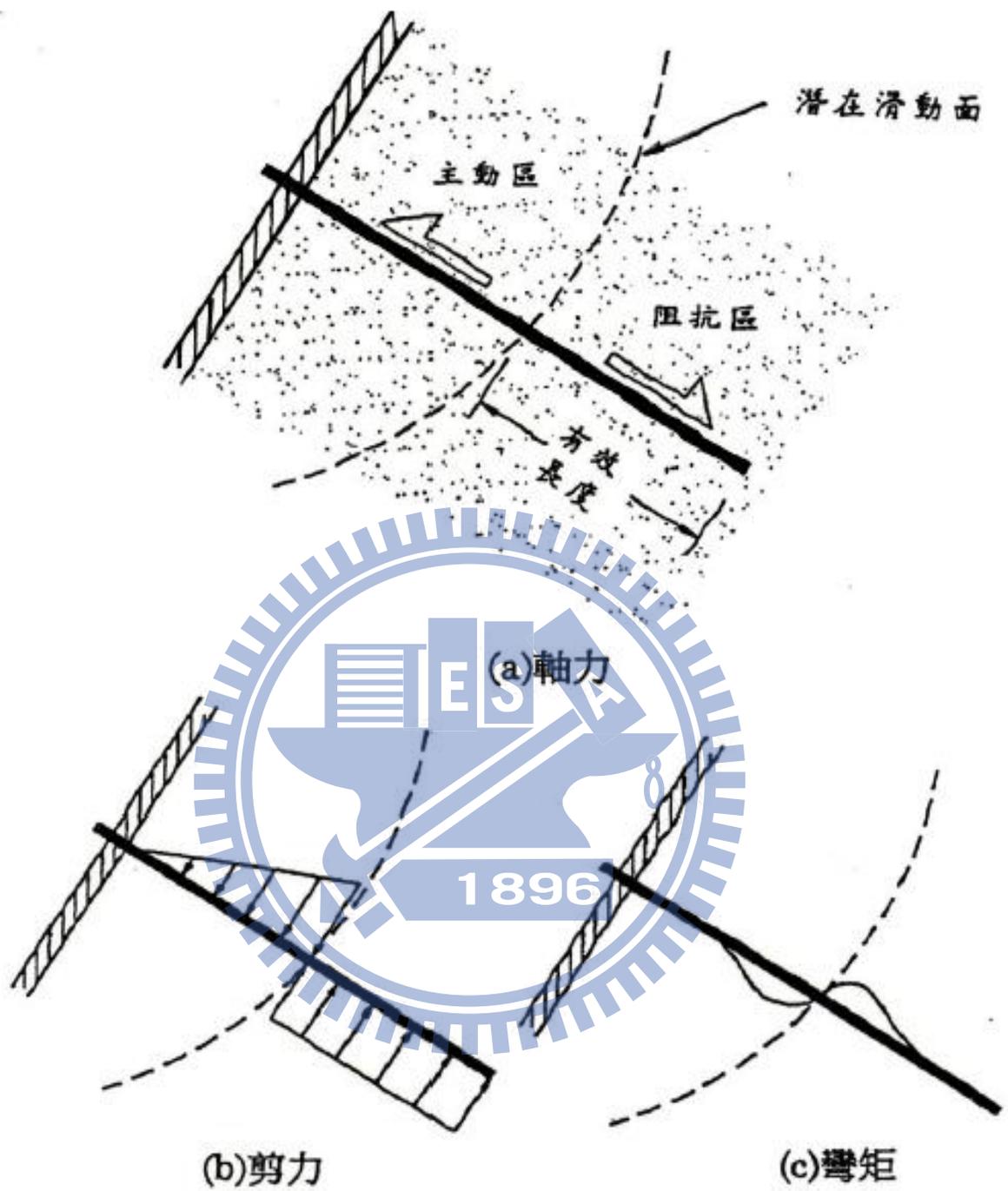


圖 2-3 土釘三種受力機制(何嘉浚，1996)

## 2.1.2 地錨機制與施工說明

### 2.1.2.1 地錨簡介

1969 年時台灣首次引進地錨工法於德基水庫大壩工程，至今已廣泛運用於邊坡穩定、基礎開挖穩定、地下室抗浮力、水庫壩體穩定、隧道開挖穩定等相關工程。地錨為土錨與岩錨的統稱，土錨和岩錨是依據其錨碇段所在地層的種類不同加以區分。原則上地錨與土釘工法相似，其示意圖如圖 2-4 所示。其除了回填灌漿的錨碇段來提供錨碇力的部分外，還多了一段自由段用以提供抗張材受拉伸張及傳遞錨碇力至錨頭的部分。錨頭又稱為鎖定器，負責將地錨所承受的力量傳遞至結構體上，其整組構件包含承壓板，錨頭握線器及鋼鍵夾片等。而地錨結構物的主要功能為透過地錨的自由段部分提供所需拉力由主要結構體傳遞至周圍緊密地層中，由地層之抗剪強度提供足夠之摩擦阻抗，使地錨、主要結構體及錨碇段周圍地層三者達到平衡狀態，同時，主要結構體及錨碇段周圍地層之變位量能夠維持在合理範圍之內。

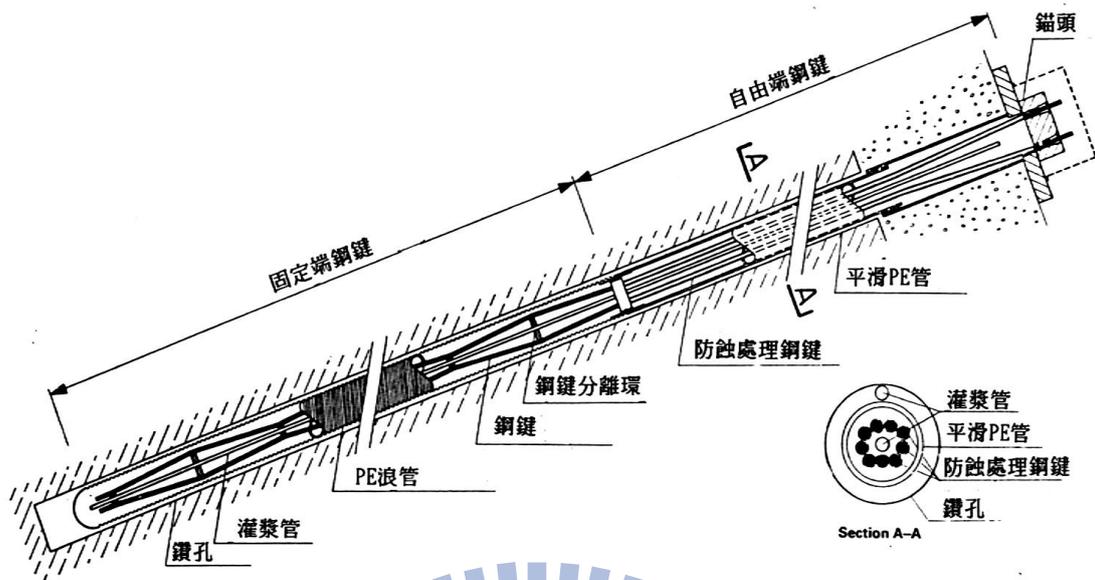


圖 2-4 地錨結構示意圖(廖洪鈞等，2004)

### 2.1.2.2 地錨設計與施工流程簡介

根據倪至寬(2005)之建議，地錨施工原則主要分為 5 大部分，分別在下述討論：

#### 1. 鑽孔：

- (1) 鑽孔應依地層狀況不同選擇適當之鑽掘工法，以滿足地錨設計之孔徑、深度和方向，並使地層之錨碇力能充分發揮。
- (2) 鑽孔施工時，應視地層實際的狀況，決定是否使用套管保護及套管長度，以維持孔壁穩定避免孔壁崩塌。
- (3) 鑽孔完成後，應將附著於孔壁之殘渣清除，以免影響地錨錨碇力。

## 2. 鋼鍵組立與安裝

- (1) 鋼鍵應按設計之數目及各部分長度組立外，尚需預留適當長度以供施拉預力之用。
- (2) 封漿器要確實填塞防水材料，以免漿液流入自由段。
- (3) 鋼鍵組立應使用適當之間隔器，以確保鋼鍵間有足夠之保護層及適當的間距。

## 3. 灌漿

- (1) 主要灌漿:目的在形成錨碇段，亦能保護鋼鍵抵抗腐蝕。在砂土層、礫石層或破碎岩盤等，亦可藉由加壓灌漿提高地層緊密度，以增加錨碇力。
- (2) 二次灌漿:永久性地錨施拉預力完成後，應再進行二次灌漿，以免自由段鋼鍵腐蝕

## 4. 施拉預力

- (1) 施拉預力之目的在拉伸鋼鍵而產生預力，並將地錨錨碇於鎖定荷重。
- (2) 地錨需經驗收試驗確認符合標準後才能鎖定。

## 5. 錨頭處理

- (1) 永久性地錨之孔口應在承壓板鋪設前妥善處理，以達防止銹蝕及止水之目的。
- (2) 錨頭應做防銹處理，以防錨頭因銹蝕失去功能。

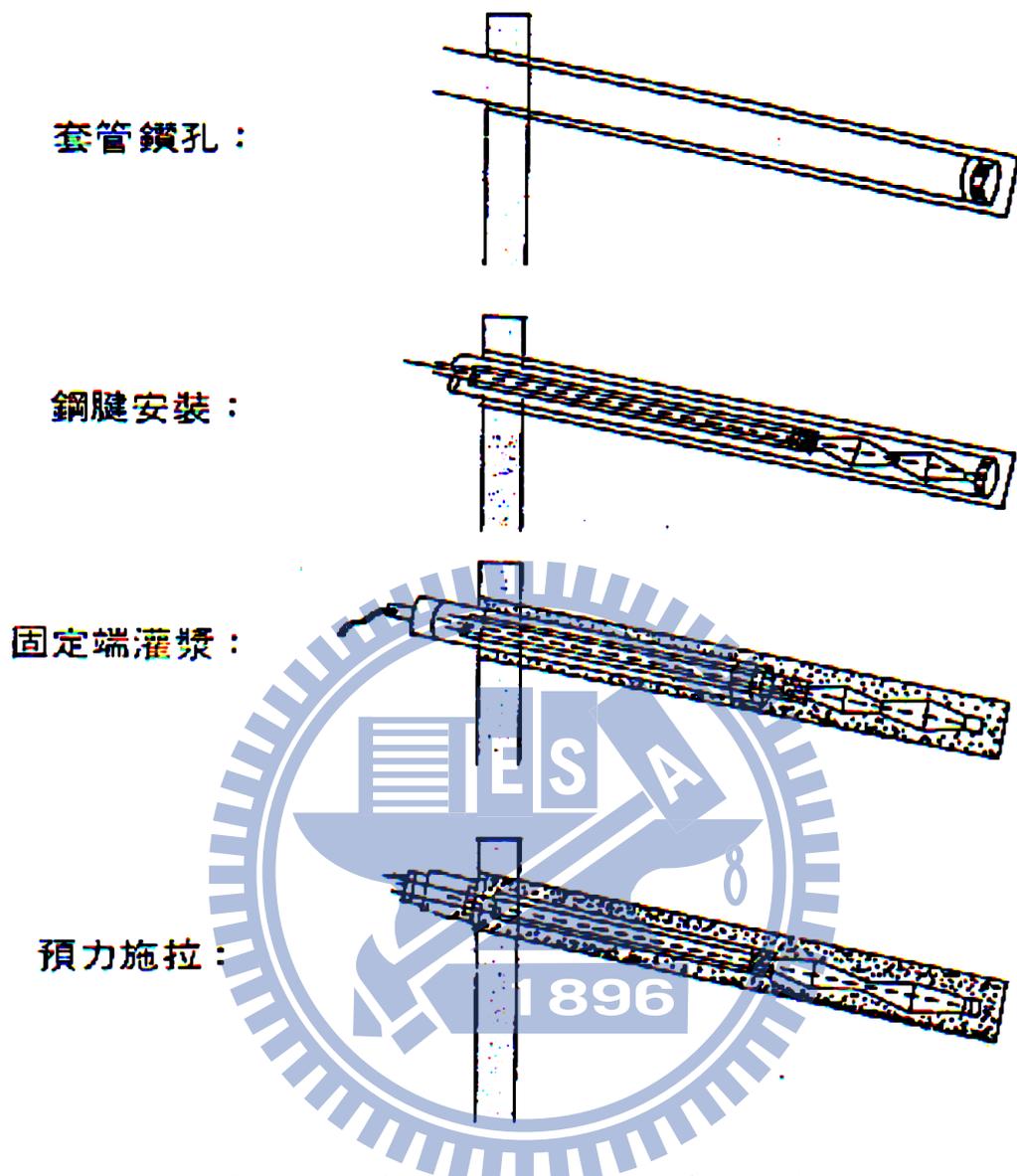


圖 2-5 地錨工程作業程序之示意圖(廖洪鈞等，2004)

### 2.1.2.3 地錨破壞形式

地錨藉由自由段提供所需拉力由主要結構體傳遞至周圍緊密地層中，藉由地層之抗剪強度提供足夠之摩擦阻抗，使地錨與周圍土壤能達到邊坡穩定的功效。而根據英國標準協會 BSI(1989)，地錨邊坡破壞主要分為五種形式，如圖 2-6 所示，且各種破壞模式可能同時發生，分別為：通過軟弱岩石的轉動破壞、沿著節理或不連續面的平面破壞、相交的不連續面造成楔型破壞、沿著接縫或剪裂帶破壞、陡峭的不連續面造成傾倒破壞。

而依結構物本身的破壞形式，根據李雅玲(2010)所述可分為以下幾點，分別為：預力鋼鍵斷裂破壞、預力鋼鍵與回填灌漿握裹力破壞、錨碇體與周圍地層之摩擦阻抗破壞、錨碇地層強度不足而產生之滑動破壞、承壓式地錨之漿體壓縮破壞、或是地錨的預力因鋼索鏽蝕而損失等，皆可能造成地錨結構物的功能失效，進而使得邊坡失去其穩定性。

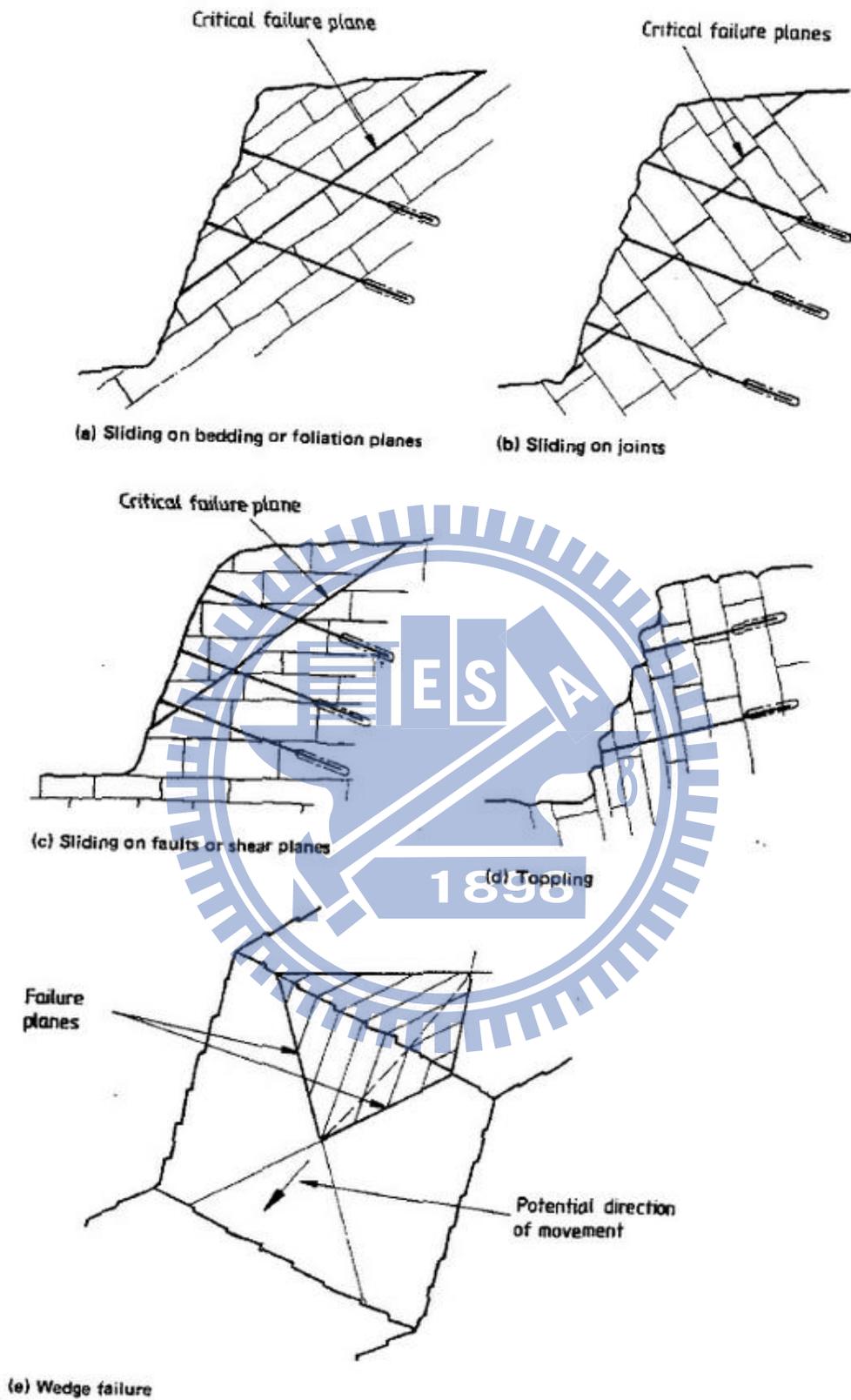


圖 2-6 地錨於邊坡滑動各種破壞模式(BSI, 1989)

### 2.1.3 土釘/地錨工法評析

土釘和地錨同屬地下結構物，土釘工法具有施工時間短、施工成本較低、施工簡易快速，有良好的抗震性和延性且能作為永久性的結構物等因素，使得土釘在台灣越來越被廣泛的使用。而因其施工不需要使用到大型的機具和複雜的技術，對周圍的結構物和環境的擾動較小，且在施工場地較狹小或在市中心等無法使用大型的施工設備時，土釘工法的技術更能突顯其獨特的優越性。而 Bruce 與 Jewell (1986) 曾指出歐洲等專家針對開挖深度為 10m 的開挖面且其地層為適用土釘工法的場址而言，其相對於傳統剛性擋土牆支撐可省下百分之十到百分之三十的施工費用。而其施工彈性高，在面對各種不規則的開挖面時，可因應現場各種土層狀況、或施工條件去改變土釘的設計位置及所需的數量。

土釘工法在施工時必須施作一鑽孔，再用一鋼筋植入土壤中，且穿過預估的破壞面位置，所以開挖面的土體必須擁有基本自然的自立性，否則則需以灌漿來輔助施工，但則會因此造成多餘的花費與施工的複雜性，故此工法較適用於砂層、岩層、卵礫石層等擁有較高摩擦阻抗的土層；而對於黏土土壤等黏性較高的土層，其土釘的拉出阻抗能力較低，則需要較長的鋼鍵長度，施工成本也相對提高許多。土釘與地錨工法也受限於含水量極高及擁有含

水袋或是土層相對破碎地層。

而地錨工法和土釘工法最大之不同在於其需使用較長的鋼鍵，且有自由段施加預力，在長時下地錨可能因鏽蝕問題而損失其預力，而應力集中的部分可能造成錨碇段回填灌漿的水泥砂漿破碎，進而失去其與土層的握裹力。

本研究範疇將以土釘的埋設長度與回填灌漿品質進行探討，希望相關研究成果未來能進一步延伸應用在地錨工法的檢測，藉由檢測的目的來提升國內公共工程的品質。

## 2.2 土釘非破壞性檢測方法回顧

目前國內使用的土釘，絕大多數屬於重力灌漿式土釘，因此土釘與土壤間之握裹強度，直接影響加勁結構體穩定。然而土釘屬地下結構物，其內部回填灌漿與土壤握裹情況無法直接判釋。目前國內較傳統破壞性檢測土釘的方法為拉出試驗(Pull Out Method)，其現地試驗配置如圖 2-7。其方法主要透過階段性固定荷重的方式記錄土釘隨時間拉出的位移量，直到土釘破壞發生，其拉出破壞的定義為 60 分鐘其位移量大於 2mm 時。如其阻抗不符合，再重新調整土釘設計參數。其檢測方法在土釘牆土釘數量龐大時無法一一檢測，較費工費時，且需破壞土釘本身結構物。

而國內目前使用非破壞性檢測於山坡地工程安全檢測較少，

大部分皆應用於一般建築結構、水庫壩體工程、隧道工程、電廠等工程之安全性評估，而國外有許多研究使用各種非破壞性檢測的方法應用於檢測土釘結構物的可用性，為發展非破壞性的檢測技術(Nondestructive Testing, NDT)，實有必要評估現有的各種方法的優點、缺點及其限制。

透過本章節之文獻回顧，藉以了解各種方法的原理與檢測方法，並考量各種方法的可靠性、檢測時間、經濟上的可行性和人員操作等，選出適合本研究使用之方法，以下說明各種非破壞性檢測的方法。

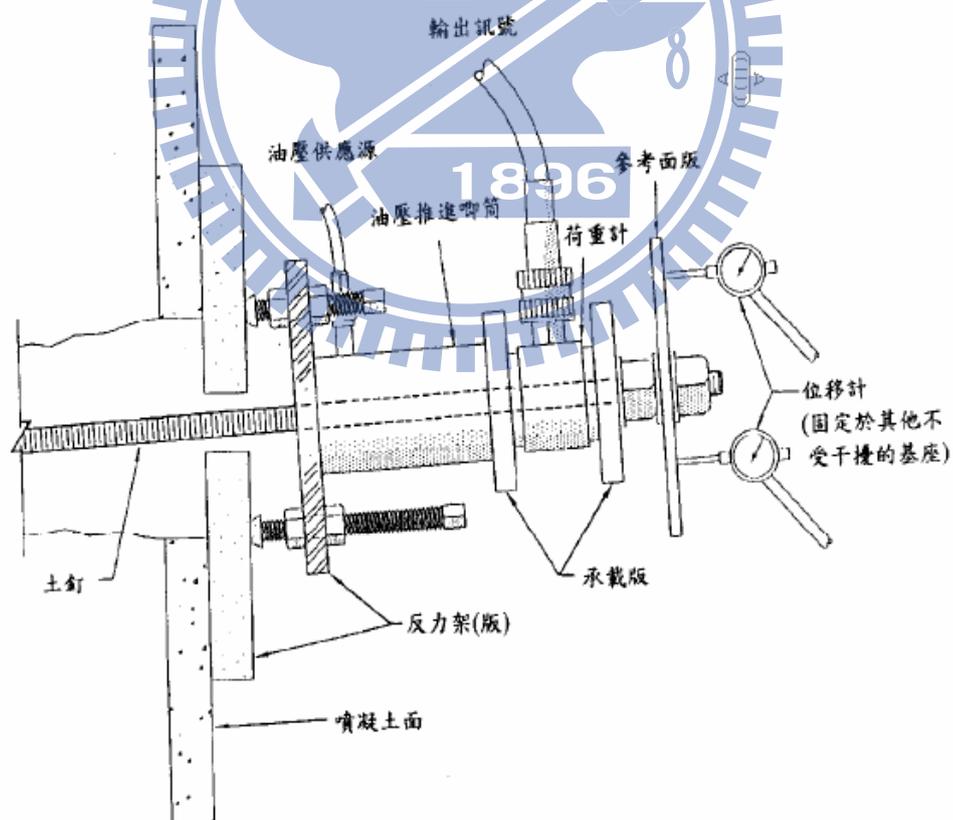


圖 2-7 土釘拉出試驗設備示意圖(洪勇善，2000)

## 2.2.1 電阻法

### 2.2.1.1 基本原理

電阻法的基本原理主要是量測埋設在土壤中土釘和其周遭的影響因子總和的電阻值，其影響的其電阻的參數如所示圖 2-8，主要影響的因子包括土釘鋼筋本身、土釘本身長度、回填灌漿的尺寸及周遭地層電阻率的變化，而通常土釘鋼筋的電阻值與其他因子相比可忽略不計。根據 GEO (2006) 所測得的電阻值影響，回填灌漿的電阻值大約為 10 ohm、地下水的電阻值大約為 100 ohm，而空氣的電阻值則為無限大。因此當土釘中有回填灌漿不實而造成土釘中有孔隙時，其對整體量測的電阻率影響甚大，而根據歐姆定律電阻值  $R$  基本上與長度  $L$  成反比。

### 2.2.1.2 量測方法

電阻法的典型施測配置如圖 2-9 所示，利用土釘鋼鍵作為一共用的電流電極，並另外在較遙遠的距離放置一小電流電極(通常距離為 60~80 m 之間)，而第三個電極放置在土釘與遠電流電極之間，用來量測電壓。透過量測數十個土釘的電壓、電流值，並通過歐姆定律可得到各個土釘的電阻值  $R$ ，並透過整個土釘周遭的背景值的建立，即可產生各個土釘的殘餘電阻值。

透過比較量測所得的土釘電阻可判斷，在電阻值相對較高的情況可能造成的原因為回填灌漿有孔隙產生或是土釘長度較短；相反的在電阻值相對較低的情況下通常是灌漿量過多，但此種情況發生的較少。在所有的量測結果中，其有必要定義出一個土釘為異常的電阻門檻值，用來判斷各個施測場址的異常土釘，圖 2-10 說明各個土釘量測到電阻值後扣掉背景值得到殘餘電阻值，而透過線性回歸得到一合格土釘之標準包絡線，判定土釘 NO.4 和 NO.8 為不合格之土釘。

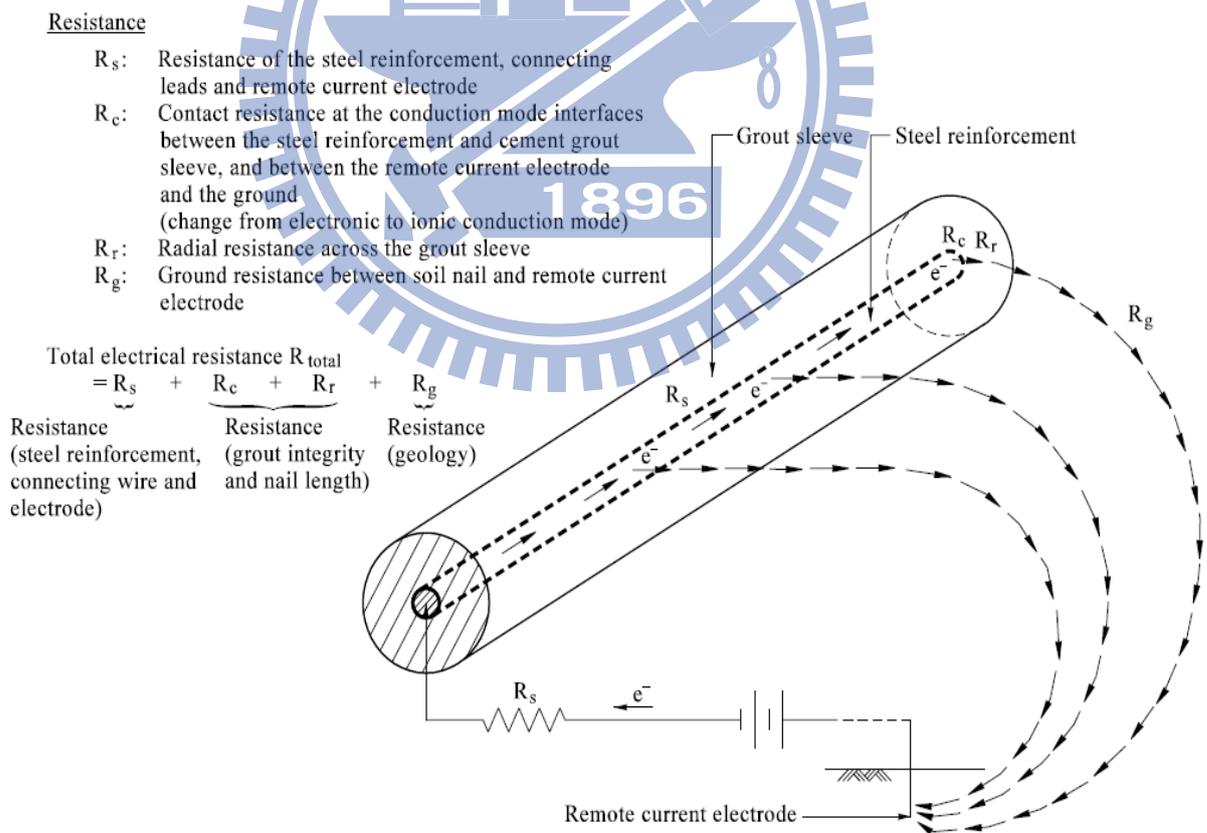
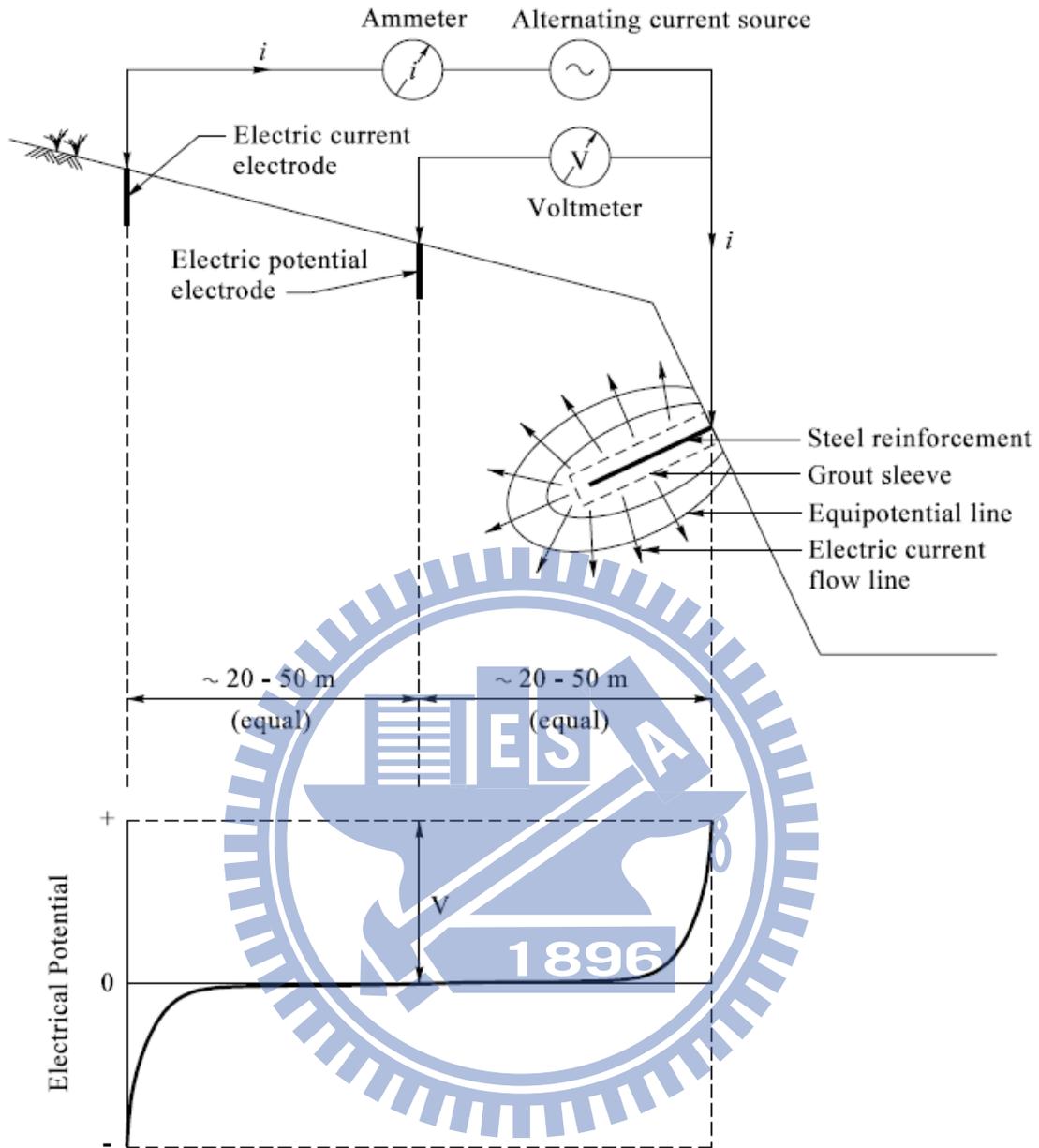


圖 2-8 現地影響土釘電阻因子(Cheung,2005)



Note:  $R_{\text{total}} = \frac{V}{i}$   
 where  $R_{\text{total}}$  is the total electrical resistance associated with the soil nail and the ground between the soil nail and the electric potential electrode (ohm)  
 V and  $i$  are voltage (volt) and current (ampere) respectively

圖 2-9 典型地電阻法量測配置(Cheung,2005)

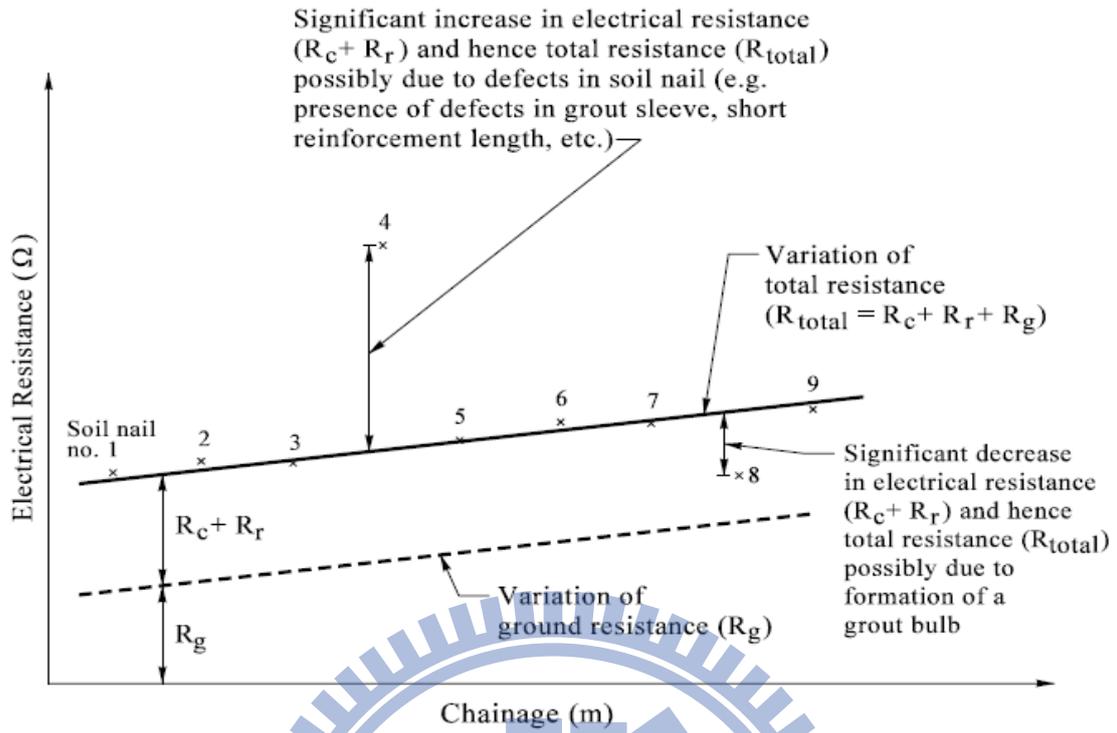


圖 2-10 電阻法量測土釘結果示意圖(Cheung,2005)



## 2.2.2 電勢能法

### 2.2.2.1 基本原理

電勢能法早期主要是用在採礦探勘使用(ASCE, 1998)，其原理是利用礦物內的導電物質當作一個電流電極，而應用在土釘則是將土釘作為電流電極。根據 Cheung (2003)所示，此方法的基本原理為當電能可通過在地面的兩處電極時，在此兩電極間會因為電位差而有電流的流動。如果假設兩電極間的土層是均勻分布的，其電勢能會呈現像等高線狀的向外分布如圖 2-11，則電流和電壓隨深度的分布可通過理論計算出來。但若使用土釘鋼鍵取代原來的電極或是土層的分布是不均勻的，電場的分布將會被扭曲失真，透過已知長度的土釘校準標定，並量測同一場址待測土釘周遭的電位變化，則理論上待測土釘的長度可透過理論估計。

### 2.2.2.2 量測方法

電勢能法的量測配置如圖 2-12 所示和圖 2-13，其量測的工具與電阻法相同，但須佈設較多的電極，以獲得表面的電位分布。量測時電流必須要能通過土釘鋼鍵，並以土釘鋼鍵為中心，將電極以放射形狀向外布置，並透過附近的電壓電極量測期間各個電

極的電位變化，其主要目的為在已知的土釘長度中建立其周遭電位的變化量，並透過理論上的反算計算出如圖 2-12 右下角的電位分布圖，用來推估土釘的長度。但在實務上，因為土釘邊坡的斜率改變和土層的電阻率變化，使得此種方法的靈敏度非常的低，且須佈設大量的電極在土釘周圍，其經濟上可行性不高。

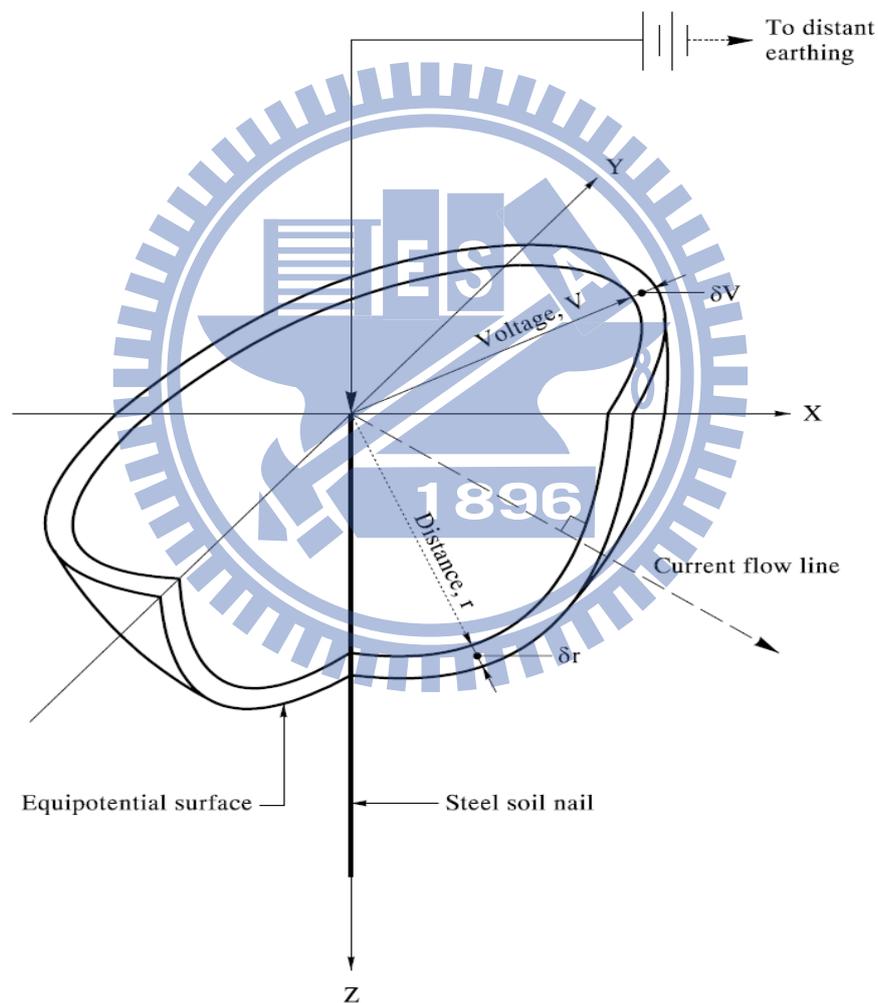


圖 2-11 理論上半無限域均質的土層分布(Cheung,2003)

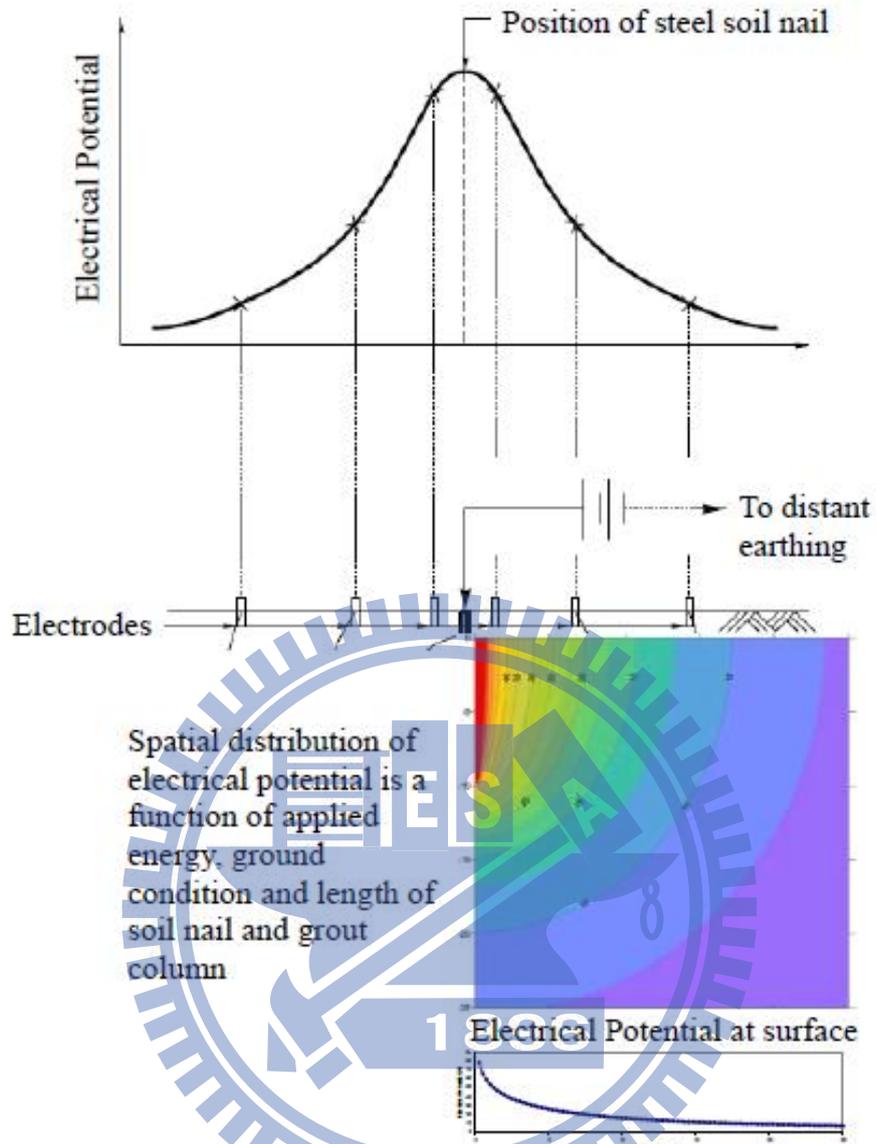
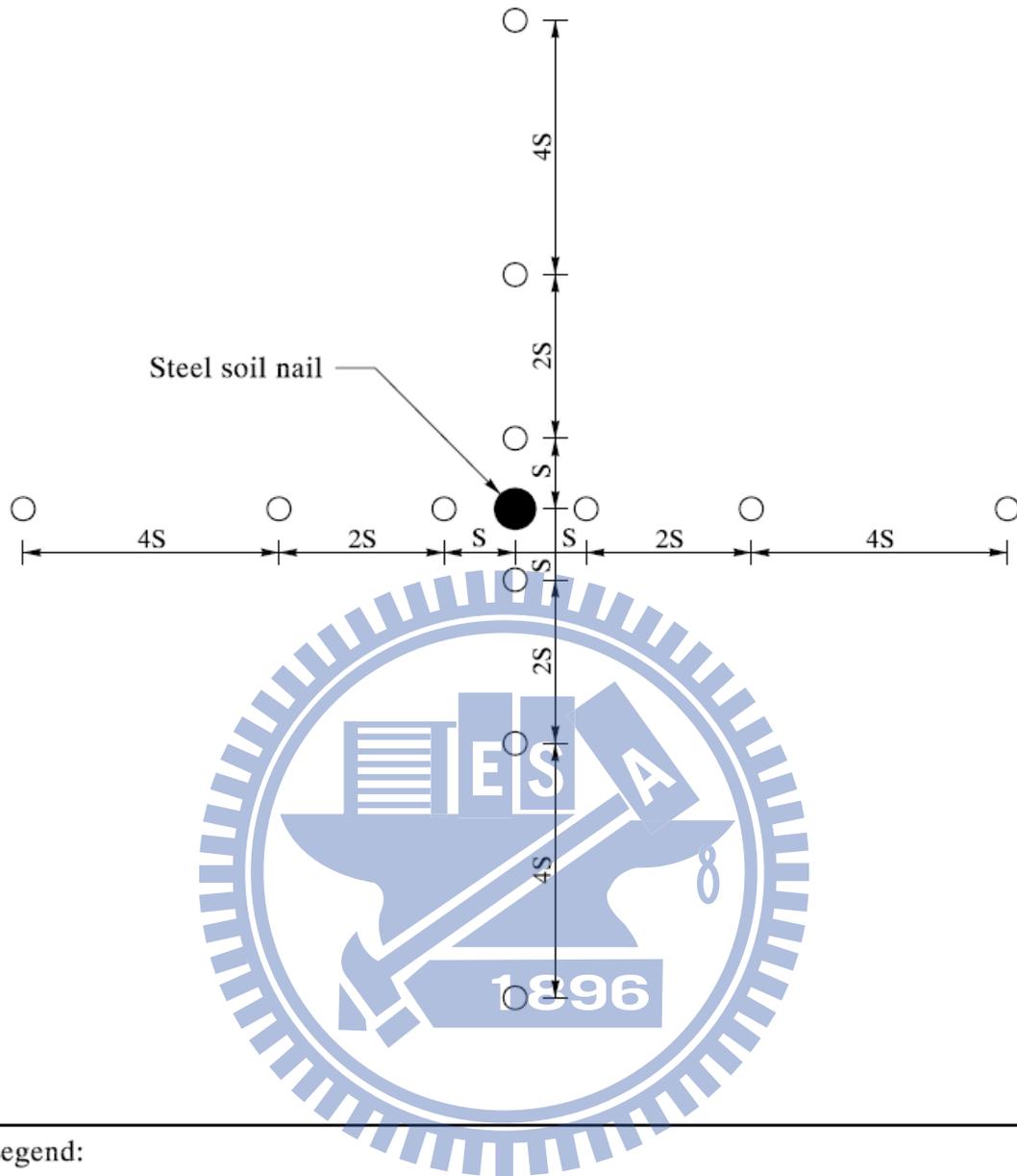


圖 2-12 現場量測電位的電極分布圖與量測結果電位圖  
(Cheung, 2003)



Legend:

○ Electrodes

Note: The spacing and the number of electrodes required depend on the variability of ground condition. In general, S varies between 200 mm and 500 mm.

圖 2-13 電勢能法電極佈設(Cheung,2003)

## 2.2.3 磁向量法

### 2.2.3.1 基本原理

土釘鋼筋在工廠熱軋加工時往往會使得鋼筋產生一永久的磁場。因此如果在現地存在一土釘，則可通過測量地球磁場的波動找到鋼筋存在的位置。每個土釘都有各自主導磁場的鋼筋段，一開始假設其在鋼筋的頭尾地方為磁極，即磁場最大處。此方法為了量測到鋼筋埋測在土裡的終點位置，必須土釘附近施作另兩鑽孔，以提供磁力儀的發射和接收的感測器平行進入，以量測感測磁場隨深度的變化(Cheung, 2003)，實務上因此種方法須在土釘周遭施作兩個套管，需有足夠空間且需要花較多的成本以供量測。

### 2.2.3.2 量測方法

磁向量法量測配置如圖 2-14 所示，量測時必須要在鋼筋附近施作兩個鑽孔，用來放置磁力儀的感測器，理想的鑽孔深度需比土釘結構長度深兩米，以便磁力感測儀的量測。磁力感測儀感測時會量測三個正交的方向分別為  $m_x$ ， $m_y$  和  $m_z$ ，其中一個方向平行於土釘本身，另外兩個方向垂直於土釘方向，透過記錄隨深度變化的磁力大小來找到相對應的土釘終點，如圖 2-15 所示。當磁

力發射波與接收波的波形振幅接近時，及判斷為土釘終點，但實務上此種方法受限於鋼筋兩端的磁極可能不是最大值，但量測準確度相對較上述兩個章節方法較為精準。

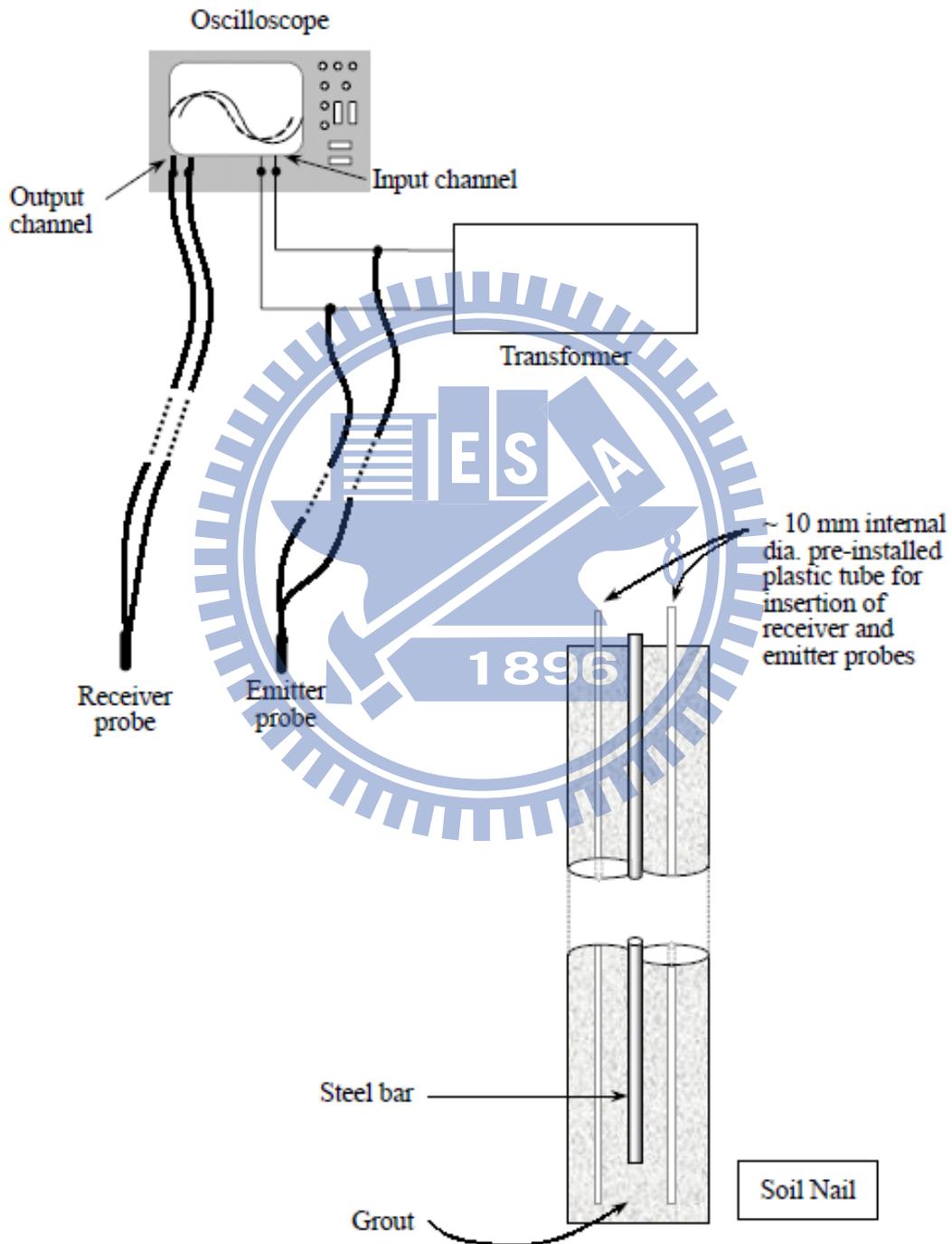


圖 2-14 磁向量法量測配置示意圖(Cheung ,2003)

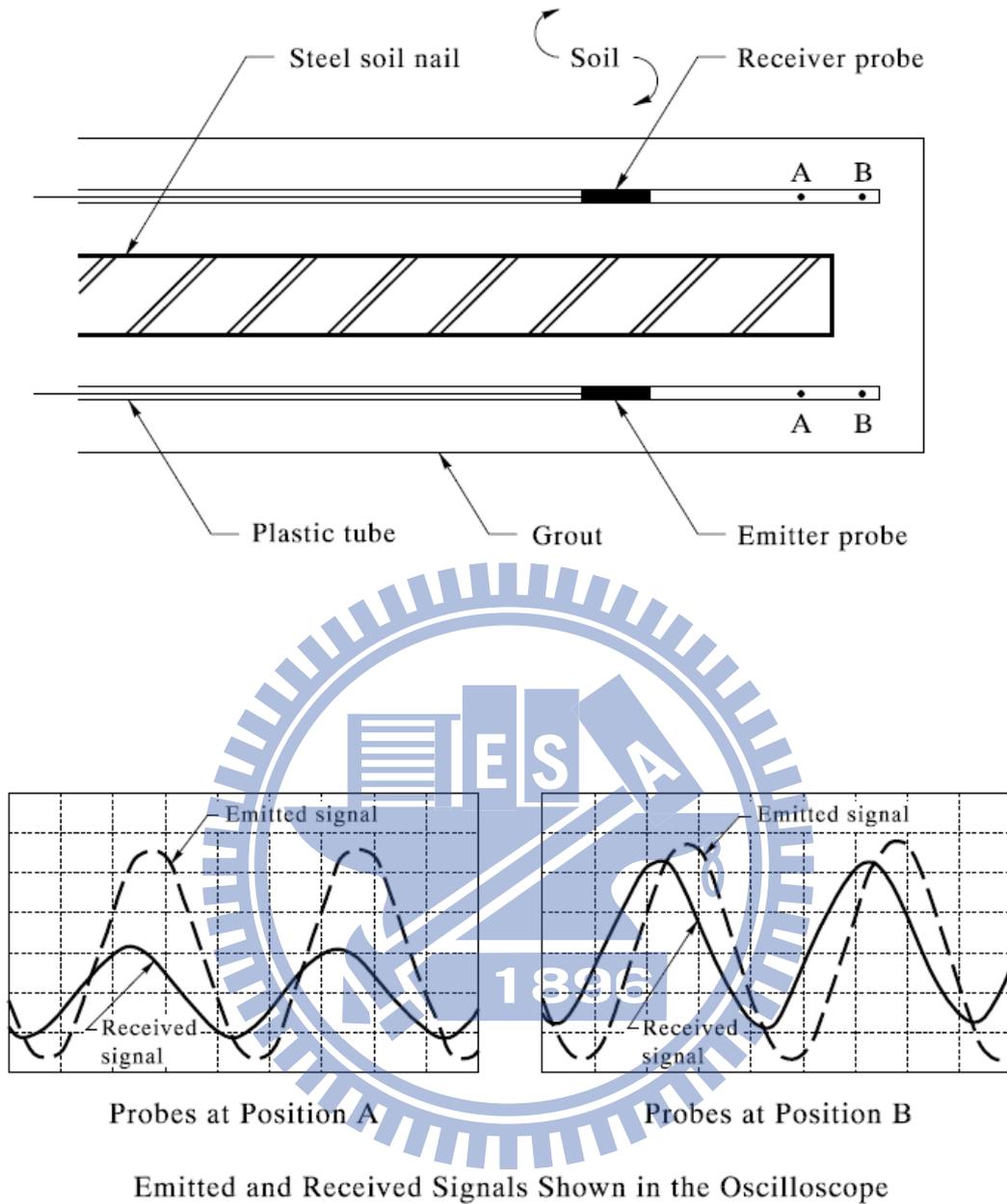


圖 2-15 使用磁力儀量測土釘終點(Cheung ,2003)

## 2.2.4 敲擊回音法

### 2.2.4.1 基本原理

敲擊回音法起源於 1983 年，由美國國家標準及科技院

(National Institute of Standards and Technology) 針對超音波在混凝土材料上使用的限制 (例如高頻波的散射衰減、激發能量不足及訊號辨識不易等) 加以改良, 研發一種較低頻率的暫態應力波用來檢測土釘內部瑕疵的方法。

敲擊回音法是利用機械性的敲擊方法將應力波導入待測試的物體內, 再利用訊號接收器來接收應力波因待測物體內部材料的變化或是有瑕疵而造成的反射波訊號。假設波速已知, 利用分析此應力波在待測物體內從敲擊表面與反射介面來回所需的時間, 則可得知該從敲擊表面到內部材料變化或是有瑕疵的位置以及待測物的長度。

#### 2.2.4.2 量測方法

敲擊回音法檢測設備如圖 2-16(a)所示, 該技術採用標準試驗樁的音波反射儀作為量測設備, 量測時將一個套頭連接在鋼筋前端, 以提供足夠的面積用來承受輕槌的敲擊和連接感測器的元件。圖 2-16(c)為 Chak 與 Shen (2006)選出較適合現場土釘量測的套敲擊設備。敲擊的瞬間在套頭上的感測元件紀錄初始受到的脈衝, 和隨後進入土釘遇到不連續材料的反射訊號, 在大多數的情況下所接受到的訊號需要經過訊號處理, 以便能分辨從土釘底部的反射訊後, 且須人員經驗判斷, 最終得到反應的總走時長, 並透過

以之長度土釘所標定得到的波速來計算土釘的長度。



圖 2-16 音波回音法檢測設備和其檢測波形之結果 (Lee, 2007)

## 2.2.5 表面電磁波時域反射法

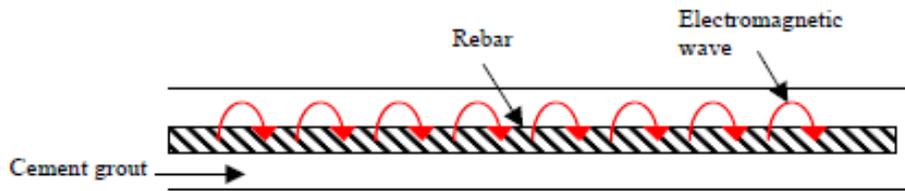
### 2.2.5.1 基本原理

表面電磁波時域反射法(Electromagnetic Surface Wave Time Domain Reflectometry, SW-TDR)，利用電磁波脈衝交替的訊號來檢測土釘鋼鍵，量測時其脈衝波傾向於在導體的表面傳遞，如圖 2-17(a)所示。這個現象在地球物理的應用中被稱作 Skin Effect，其性質被導體之導電度、電感和頻率三者所影響。因此當此種電

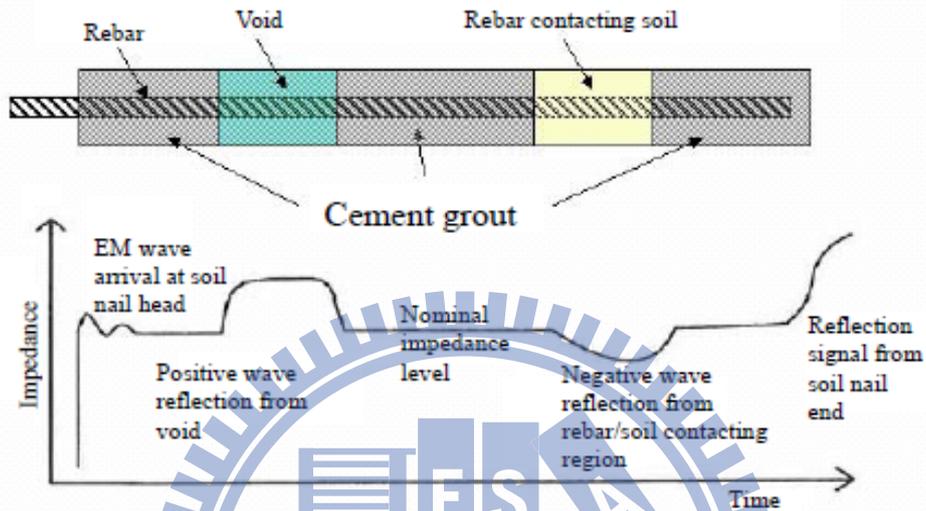
磁波脈衝應用在土釘的檢測上，在傳遞的時候會被相鄰的灌漿套管或土釘中回填灌漿不實的孔隙所造成電感和電容的變化所影響。電感和電容變化特性成可呈現一沿著土釘鋼鍵變化的阻抗剖圖。圖 2-17(b) 為 Tang (2004) 所提出一個當表面電磁波在土釘鋼鍵傳遞時的理想阻抗示意圖。

#### 2.2.5.2 量測方法

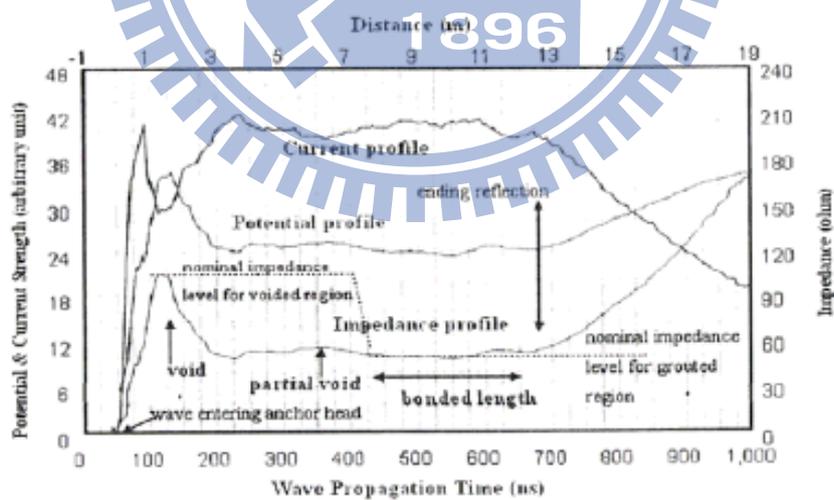
表面電磁波時域反射法其量測的系統細節目前並沒有太多詳細的資料，基本上其量測的系統與目前所發展的時域反射法應用在土釘量測的系統類似，其最大的不同是其不須使用兩個導體來傳遞電磁波的訊號，因此不須預埋一條平行於土釘的導線，可直接使用一電磁脈衝波打入待測的土釘鋼鍵中，而其量測的工具被設計成可同時量測電壓與電流的變化，兩者可進而直接轉換成阻抗的變化，如同時域反射法量到對周圍環境的阻抗變化，而圖 2-17(c) 為 Tang(2004) 研究團隊所實際量測土釘的結果。



(a) Surface Electromagnetic Waves Propagating along a Conductor (Tang, 2004)



(b) Soil Nail with Anomalies along Rebar (above) and Corresponding Idealistic Impedance Profile (below) (Tang, 2004)



(c) Example of Surface Wave TDR Result Diagram Comprising Potential, Current and Impedance Profiles (Tang, 2004).

圖 2-17 表面波時域反射法(Tang, 2004)

## 2.2.6 各種土釘非破壞性檢測方法評析

上述各種土釘非破壞性檢測方法皆可辨識出不正常的土釘，但有關長度和回填灌漿的兩個因素皆無法分離。而電阻法雖可大量的檢測該地區土釘的異常土釘，但當鋼筋長度越長時其對回填灌漿不實的反應越不佳，且需要透過統計的方法設定一門檻值來鑑定土釘的合格性。

電勢能法受到現場的土層條件及土釘的特性其結果不一，檢測結果也易受到相鄰的土釘影響，且須佈設較大規模的電極用以量測土釘周遭的電位變化，費工費時。

磁力向量法雖然量測結果較為準確，但現場必須施作兩鑽孔，放置兩塑膠套管，以供磁力儀量測，在經濟的考量上不佳。敲擊回音法的量測結果重複性較低，且波形也可能因人員經驗的判斷而有不同的結果。

表面波時域反射法受到集膚效應 Skin Effect 的影響，電磁波僅在土釘鋼筋表面傳遞，量測的結果會因受到相鄰土釘的影響，而無法忠實的反映本身土釘的實際長度狀況，

## 2.3 時域反射法的基本原理

基於上述相關文獻回顧評估的結果，香港大地工程處（Geotechnical Engineering Office, GEO）提出時域反射法（Time Domain Reflectometry, TDR）為最有發展潛力的方法。然而目前香港採用之 TDR 方法仍有其限制，因此本研究決定以時域反射法為主，改善既有 TDR 土釘埋設長度與回填灌漿品質的評估方法。

時域反射儀（Time Domain Reflectometer）主要由階躍脈衝電磁波產生器（Step generator）、訊號採樣器（Sampler）與示波器（Oscilloscope）組成。電磁波之傳輸系統包括延長同軸纜線（Coaxial cable）與感測導波器（Sensing waveguide），如圖 2-18 所示。導波器為同軸纜線之延伸，同時作為訊號傳輸與感測元件。TDR 之基本原理與一維雷達相近，由階躍脈衝電磁波產生器發射一電磁脈衝進入同軸電纜及感測導波器，並由示波器記錄由於感測導波器內阻抗（Impedance）不連續所造成之反射。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。

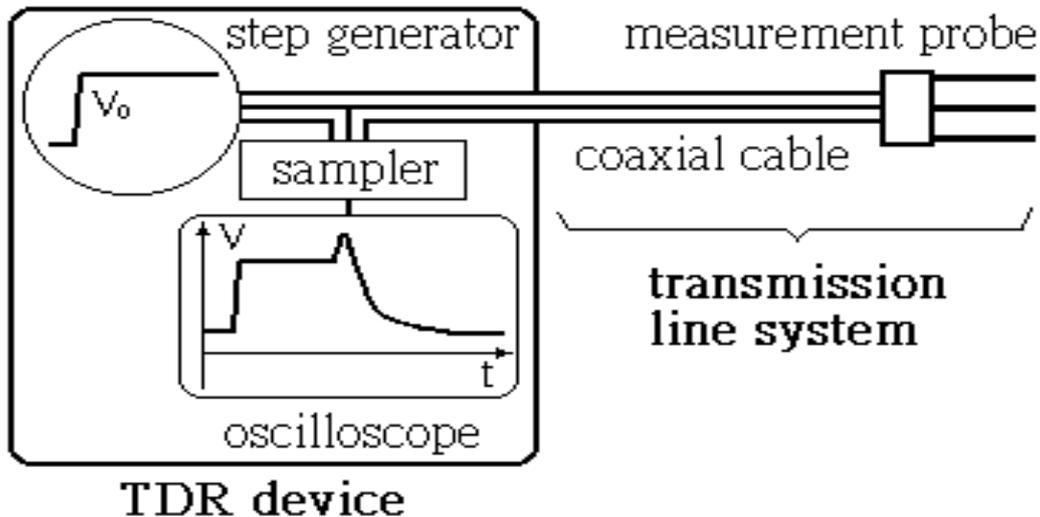


圖 2-18 TDR 量測系統配置(Lin et al.,2007)

## 2.4 時域反射法於土釘檢測-以香港經驗為例

### 2.4.1 香港案例回顧

90 年代末期，香港之短樁事件引起社會對於地下工程的品質之關注，加上香港邊坡已開始大量採用土釘工法進行邊坡穩定的工程，為瞭解相關工程品質，以能達到安全至上，因此在 2001 年香港大地工程處（Geotechnical Engineering Office, GEO）便啟動相關研究，尋找各種檢測土釘長度的技術。而在 2004-2007 年間，經過各種方法現地實際測試後，考慮各種技術優劣（可靠性、人員要求、檢測時間），TDR 的檢測技術被認為最具有發展潛力(Tang and Yeung, 2006； Cheung, 2006； Cheung and Lo, 2011)。

上述香港採用之 TDR 土釘檢測方法，係利用一單心電纜線平

行固定於土釘側邊，利用單心電纜線與土釘作為 TDR 兩條導線，藉以檢測土釘長度與土釘回填灌漿品質，其標準安設設計如圖 2-19 所示，而土釘長度與土釘回填灌漿品質的典型檢測波形如圖 2-20 所示，主要是透過標定已知長度的土釘來計算該場址土釘的長度，並透過波形的判釋評估回填灌漿的完整性，而在評估回填灌漿波速方面，Cheung et al.(2011)指出回填灌漿養護天數方面在量測上變異細數差異極小，即在灌漿完成後養護天數的多寡不影響其量測。

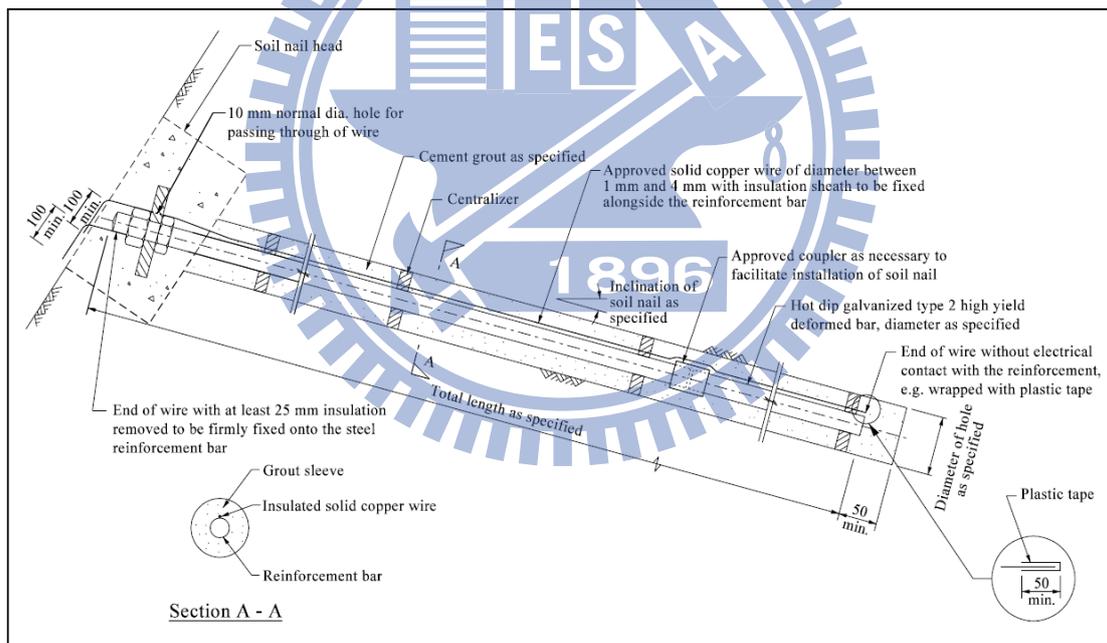


圖 2-19 香港採用之 TDR 土釘長度檢測安設方法(Cheung, W.M., 2006)

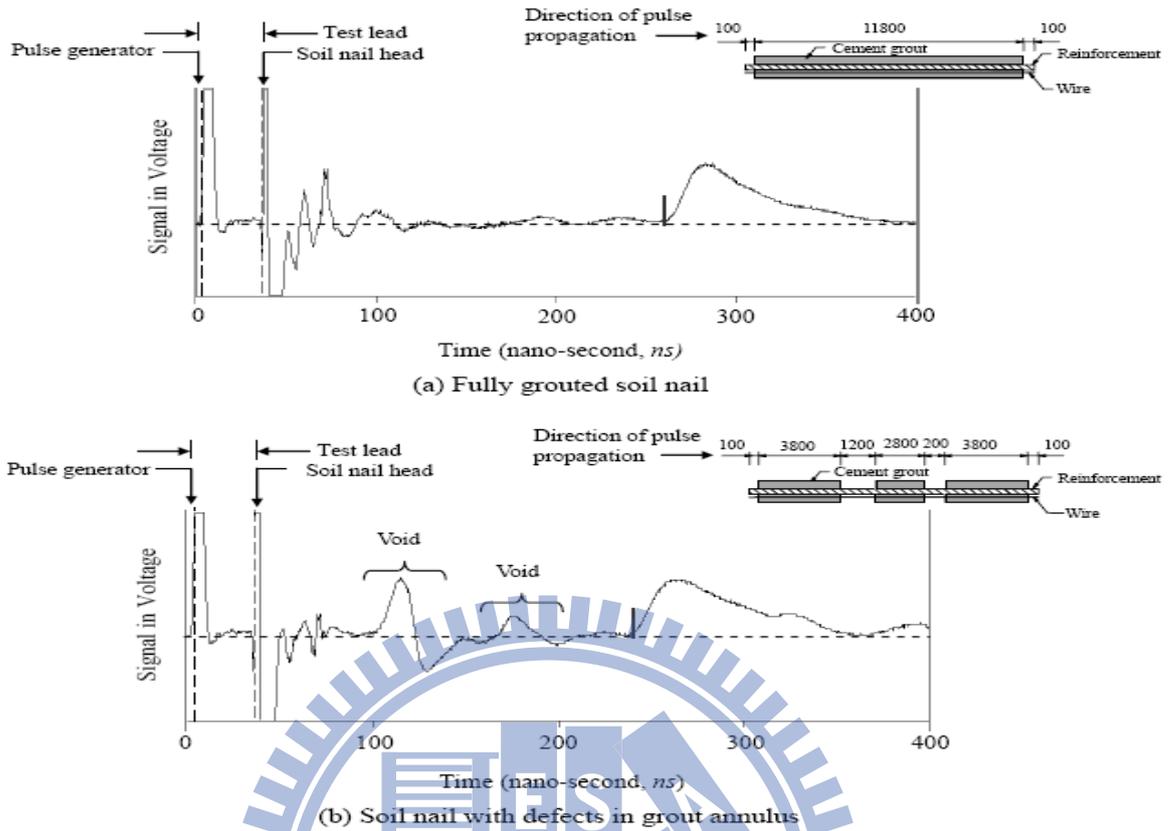


圖 2-20 香港採用之 TDR 土釘長度檢測安設方法 (Cheung and Lo, 2011)

而除上述使用單心電纜線放置於土釘側邊的方法外，其考慮實務上施作的方便性，另使用灌漿管內嵌兩金屬線作為導體，如圖 2-21 所示，其兩導線呈對邊 180 度的做法主要是用來減少土釘施工時所造成的誤差。透過施作土釘時直接將灌漿管放入，隨灌漿完成後，不拔除灌漿管以作為 TDR 的導體以供量測，其造價相當於一般灌漿管的 2~3 倍。測試結果顯示雖然直接使用灌漿管作為導體在實務上方便性較高，且在量測上因量測所得到的波形反射較傳統單心電纜線較為尖銳，故可使的波形的判釋較明顯，但

施作時其較易因灌漿影響而造成內嵌導線的損壞而失去土釘檢測的功用。

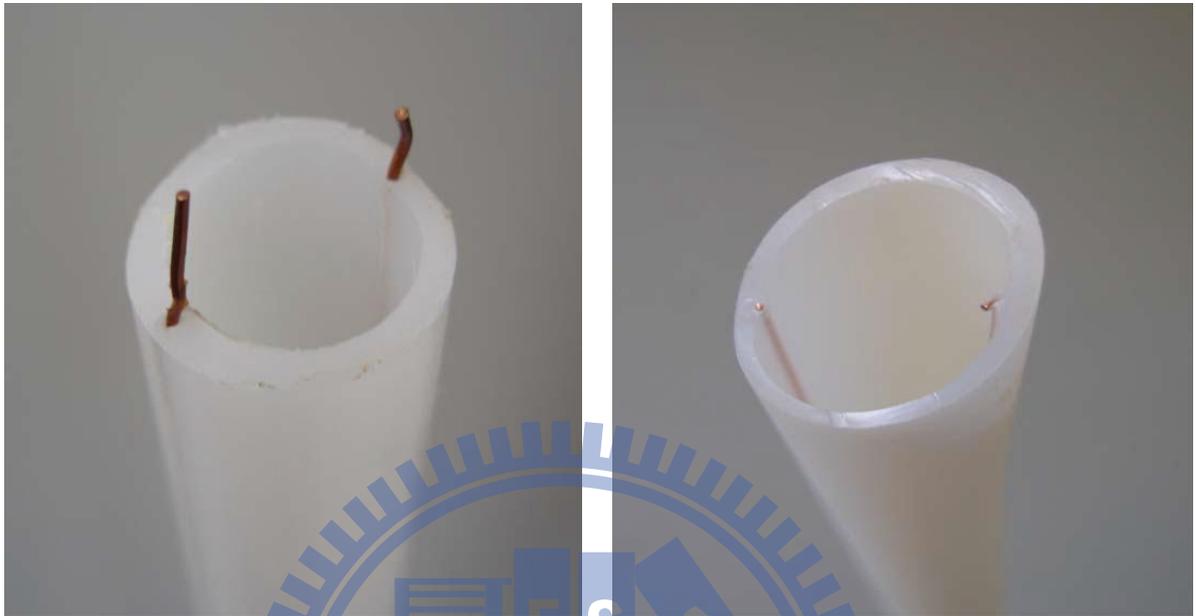


圖 2-21 內嵌導體的灌漿管 (Cheung et al, 2008)

#### 2.4.2 香港研發案例評析

根據香港文獻所建議之安設方法於回填灌漿品質不良時（混凝土與孔隙位態不明），無法提供一固定之電磁波傳遞速度，意即在標定土釘鋼鍵與一平行放置纜線作為導體時，因導波受到孔隙、土壤及回填灌漿品質三者的影響而有所不同，故無法提供一固定之電磁波傳遞速度。另一方面，平行放置於土釘側邊的單心電纜線可能透過纏繞的方式使得在量測上土釘的長度增長，造成實際短釘長度經檢測後合格，因此其做法於土釘長度檢測上可能有其限制。

因此本研究除參考國外相關文獻與產品（如圖 2-22 所示），另行建議採用一完整同軸電纜，替換既有之單心電纜線，同樣平行固定於土釘側邊，利用獨立之同軸電纜波傳速度，避免回填品質不良影響，另一方面，因同軸電纜徑度較高，無法有效纏繞於土釘，因此可正確檢測土釘長度。本研究另外擬定藉由同軸電纜外導體與土釘形成一 TDR 導線，以檢測土釘回填灌漿品質的完整性。

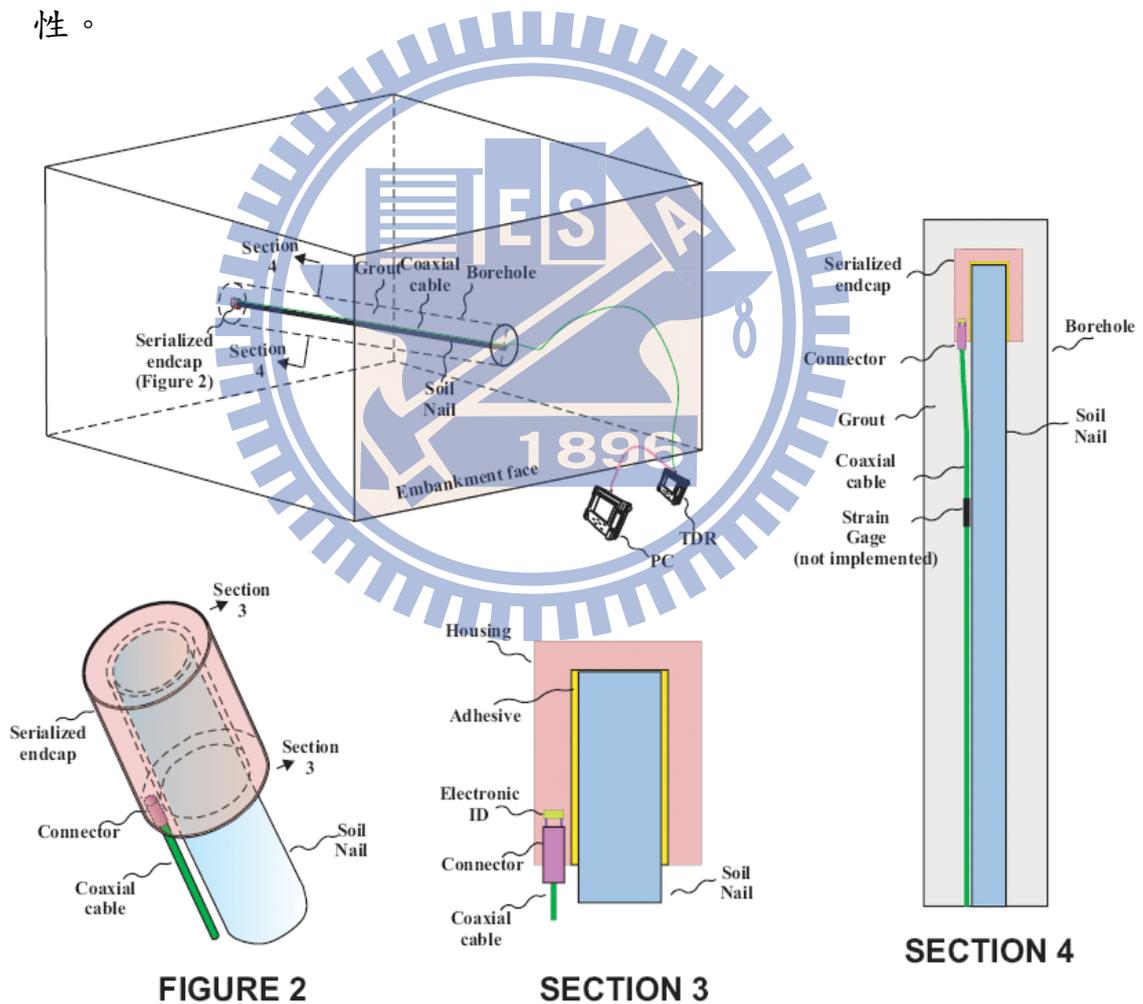


圖 2-22 國外相關 TDR 土釘長度檢測佈設(Zostrich Geotechnical, 2011)

### 第三章、研究方法

基於前述研究動機與目的，本研究嘗試利用時域反射法(TDR)來檢核土釘等地下結構物之埋設長度與回填灌漿品質。其主要方法即利用土釘側邊平行預埋一同軸纜線，相關量測方法與細節如下各節所示，而本研究完整研究流程如圖 3-1。

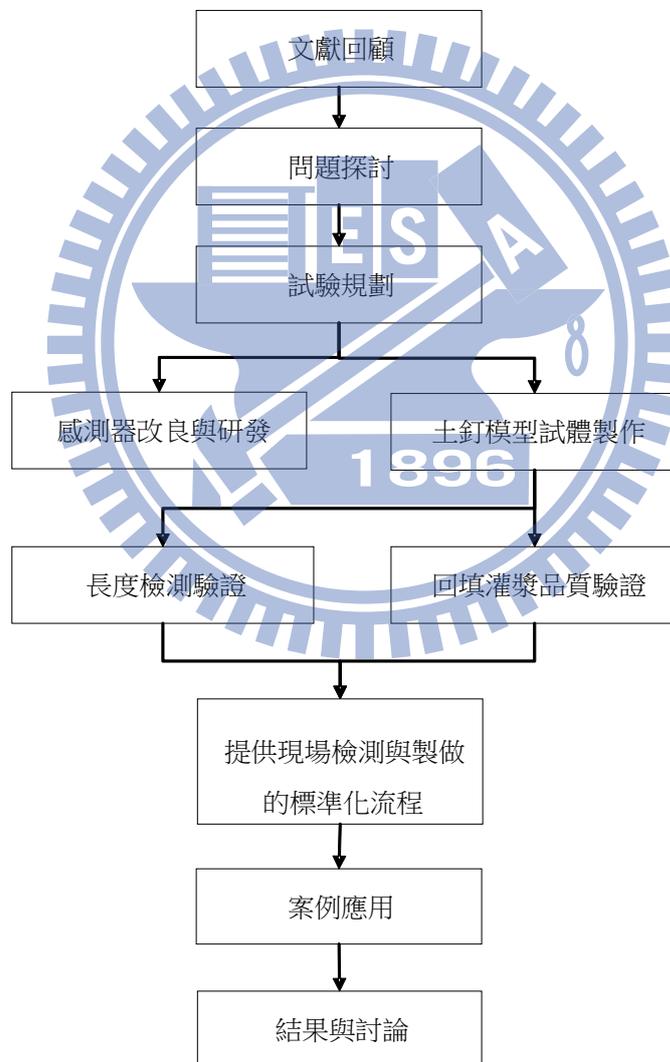


圖 3-1 研究流程圖

### 3.1 時域反射法於土釘檢測之配置改良

#### 3.1.1 香港 TDR 土釘檢測測試評估

依香港相關文獻建議，其係利用一單心電纜線平行固定於土釘側邊，以單心電纜線與土釘形成 TDR 的導線，藉以檢測土釘長度與回填品質，但其技術經本研究評估仍其有限制。因此本研究初步設計兩組試體作比較，如圖 3-2 所示，試體一為長度 1.5m 的單心纜線平行放置於 1.5m 的土釘鋼筋旁，試體二為長度 3m 的單心纜線纏繞於 1.5m 的土釘鋼筋上，分別使用 TDR100 主機量測作測試，其結果如圖 3-3 所示。從量測波形可以看出使用纏繞的方式在現地量測波形時會造成鋼筋長度誤判的情況，即利用試驗一之波形得到走時  $T$ ，和已知長度  $L=1.5\text{m}$ ，可求得波速與光速的比值  $V_p=0.752$ ，再將其結果帶入試驗二所量測之訊號，結果其長度為 3.10 m。即若使用單心電纜線作為 TDR 檢測土釘結構的另一導體，在現地如使用纏繞的方式，則在檢驗的過程中會造成土釘鋼筋長度誤判的情形。



(a)

(b)

圖 3-2 室內規劃兩組試體測試(a)平行放置於鋼筋側邊(b)纏繞方式於

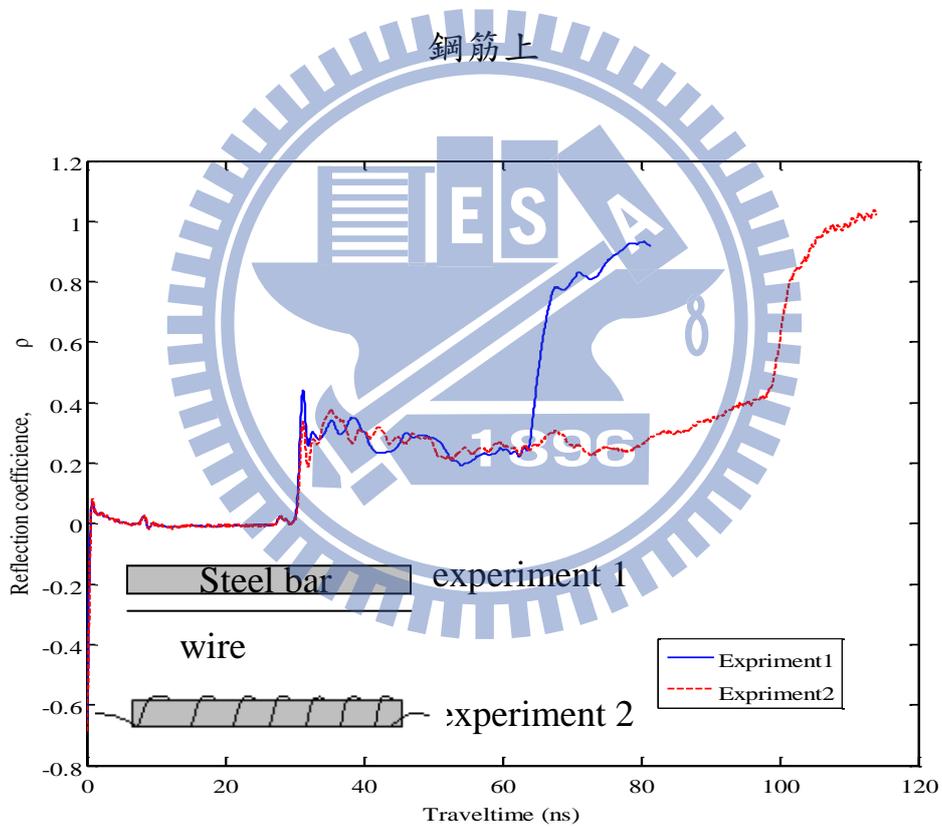


圖 3-3 TDR量測結果於試驗1.平行放置電纜線於鋼筋側邊

試驗2.纏繞放置電纜線於鋼筋側邊

### 3.1.2 新式 TDR 土釘檢測配置研發

本研究仿照香港相關文獻，並考量其限制，本研究提出採用一完整同軸電纜之外導體，替換香港相關文獻既有之單心電纜線，其實體圖如圖 3-4 所示，因其彎曲半徑較小，可以補足香港設計形式不足的地方，而其同軸電纜規格如表 3-1。其佈設概念如圖 3-5 所示，首先，可利用量測同軸纜線以確實得到土釘長度，並利用同軸電纜外導體與土釘本身導體，量測之土釘灌漿完整性。本研究規劃則由模擬現地因回填灌漿不確實而造成有孔洞之土釘及完整灌漿之土釘試體做為測試，企圖提供一混凝土品質檢測方式。

表 3-1 QR320 纜線基本規格

規格	QR320
內導體直徑(center conductor)	0.071"
外徑(jacket)	0.395"
電容容量(capacitance, pf/ft)	15.3
阻抗(impedance, ohms)	75
最小彎曲半徑(minimum bend radius)	2"
最大拉力(maximum pulling tension, lbs)	120
電磁波速度比(VP, velocity of propagation)	0.87



圖 3-4 配置改良研發實體圖

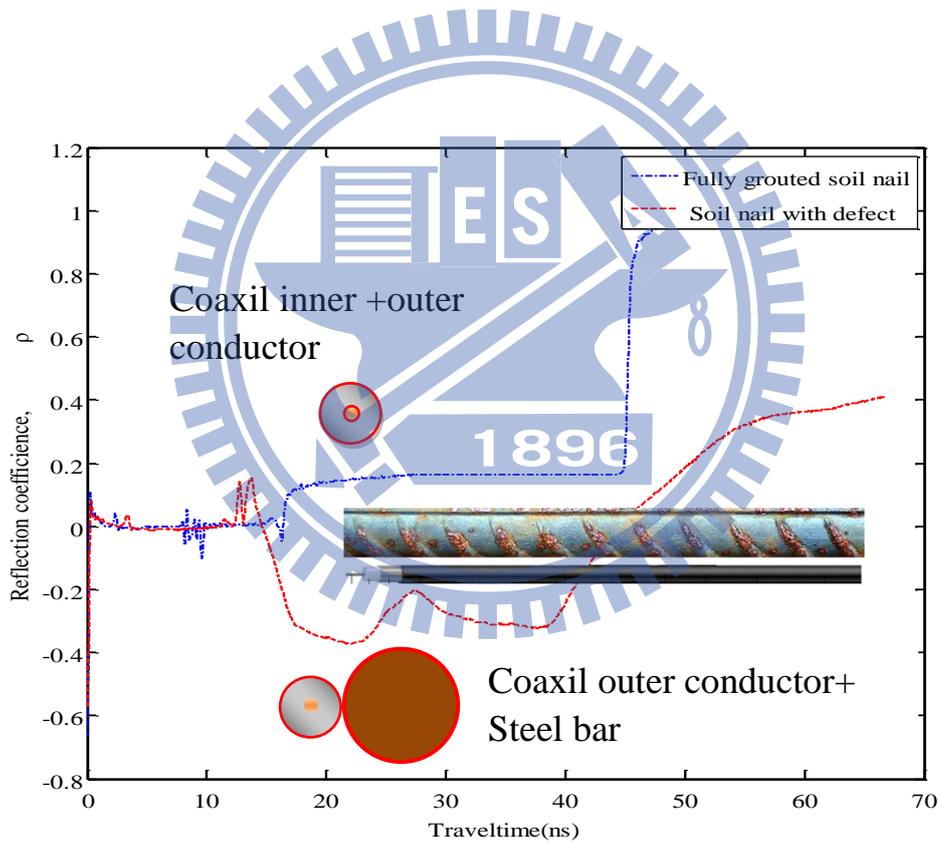


圖 3-5 時域反射法於土釘長度檢測與回填灌漿檢測改良

### 3.1.3 新式 TDR 土釘波速量測原理

基於上述配置，本研究首先經由已知長度的同軸纜線進行量

測，可率定出電磁波在同軸纜線的傳輸速度  $V_p$ ，然後藉由量測現場土釘旁平行放置的同軸纜線可得到走時，帶入  $V_p$  即可得知土釘鋼鍵埋設的長度，接著可藉由室內率定同軸纜線的外導體與鋼筋兩導體傳輸下，TDR 脈衝波在空氣波速  $V_{air}$  和水泥砂漿波速  $V_c$ ，然後藉由量測現場土釘的總走時，利用上述率定的已知波速  $V_{air}$  以及  $V_c$  帶入式 3-1，即可計算出埋設鋼筋的長度及回填灌漿的長度。

$$\frac{T}{2} = \frac{X_c}{V_c} + \frac{L-X_c}{V_{air}} \quad (3-1)$$

其中 T:量測土釘模型的總走時；L:波實際走的距離； $X_c$ :混凝土灌漿長度； $V_c$ :波在混凝土與纜線中傳遞的速度； $V_{air}$ :波在混凝土與纜線中傳遞的速度。

## 3.2 土釘檢測試驗規劃

### 3.2.1 量測設備硬體配置

研究中所使用的 TDR 量測設備為美國 Campbell 公司所生產的 TDR100，如圖 3-6 所示，可配合多工器 (Multiplexer) 同時量測多個 TDR 感測器，並搭配資料擷取器 (Datalogger) 具有可程式化、自動化量測的功能。

另外本研究考量到現地量測方便，其現地儀器機動性良好且不須額外攜帶充電電池需求，因此本研究搜尋相關設備，建議以美國 AEA 公司所生產的 TDR20 設備作為現地手持式 TDR 應用。手持式 TDR20 如圖 3-7 所示，其主要功能包含一顯示螢幕可作設定與波形檢示，並內建記憶體可記憶波形資料，另外還可配合電腦下載記錄波形。而 TDR100 與 TDR20 的主機規格表如表 3-3 所示，兩台主機的主要差別在於 TDR20 的距離解析度較差最小為 2.54 公分，而 TDR100 最小可達 1.8mm，本研究將分別用來評估其量測的可行性。



圖 3-6 Campbell TDR 100 量測儀

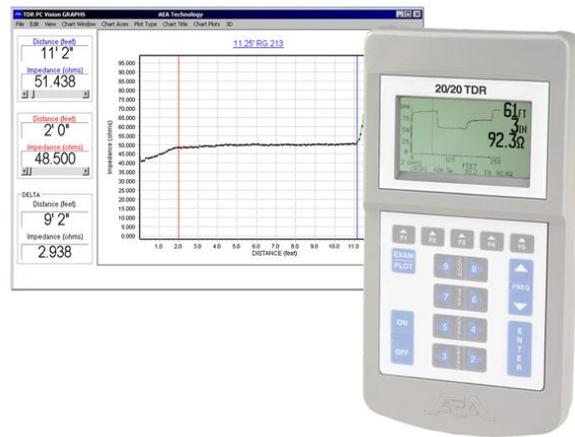


圖 3-7 AEA TDR 20 量測儀

表 3-2 TDR100 基本規格(Campbell scientific Inc. 2008)

規格	TDR100
脈衝產生器輸出(pulse generator output)	250 mV into 50 ohms
輸出阻抗 (output impedance)	50 ohms $\pm$ 1%
脈衝長度(pulse length)	14 microseconds
時間解析度 (timing resolution)	12.2 picoseconds
取樣點數 (waveform sampling)	20~2048
量測範圍(range)	-2~2100m 0~7 microseconds
波形平均次數(waveform averaging)	1~128
電源供應器 (power supply)	12 volt
溫度範圍 (temperature range)	-40°C~55°C
尺寸(dimensions)	210mm×110mm×55mm
重量(weight)	700g

表 3-3 TDR20 基本規格(AEA technology INC. 2011)

規格	TDR20
顯示解析度 (display resolution)	1in(2.54),0-5000ft 5'4inch(1.63m),5000-10000ft
量測速度 (measurement speed)	1-2 updates/sec 依解析度不同
阻抗範圍 ( impedance range)	1-1K Ohms 解析度 0.1Ohms 準確度<2%
阻抗顯示 (impedance plotting scales)	0-20,50,100,200,500&1000 Ohms
波傳遞速度 (velocity of propagation)	0.20-0.99c 解析度 0.003c
量測範圍(range)	0-6,600ft(2010m)
記憶體(memory)	99 張螢幕圖或 15 張詳細資料圖
內部電源(Internal power)	8AA Alkaline,鎳電池
外部電源(External power)	15 voltDC @450mA
尺寸(dimensions)	216 mm×109mm×57mm
重量(weight)	923g

### 3.2.2 土釘長度檢測驗證

本研究初步利用仿照香港相關文獻，初步製作三組不同長度之土釘模型進行測試，其土釘鋼鍵採用#8（直徑 2.54 cm）的竹節鋼筋，灌漿直徑為 10cm，灌漿比例分別為 71.42%、83.33%和 90.90%，即灌漿長度分別為 50cm、100cm 和 200cm，如圖 3-8 所示。而土釘模型澆置的過程如圖 3-9 所示，首先平行放置同軸纜線並以束帶固定接著組裝模具，灌漿時同時敲擊側邊 PVC 管以減少孔隙，最後靜置數天帶水化作用完成即可拆模。而依據香港文獻評估的結果，單心電纜線使用纏繞的方式會使得土釘量測到的長度增長，因同軸電纜的勁度較高不易纏繞，將導體採用一完整同軸電纜，替換香港相關文獻既有之單心電纜線，同樣平行固定於土釘側邊，用完整之同軸電纜內外導體，企圖提供一正確檢測土釘長度方式。

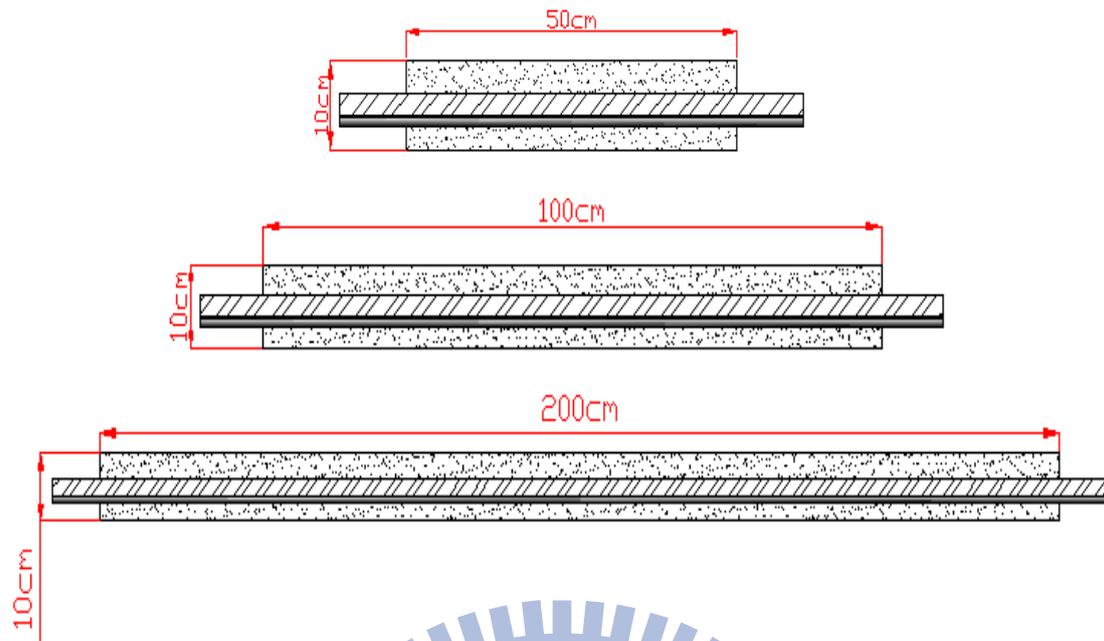


圖 3-8 試驗規劃三組不同土釘長度物理模型





圖 3-9 土釘模型製作過程

### 3.2.3 土釘回填灌漿品質測試

本研究同樣仿照香港相關文獻，初步製作兩組不同回填灌漿孔洞大小之土釘模型進行回填灌漿品質測試，水泥砂漿的水灰比(重量比)為 0.6，使用的水泥為波特蘭水泥其比重為  $3.15 \text{ t/m}^3$ ，而規劃的第一組試驗為模擬現地 120 cm 長之土釘試體灌漿中間段部分有 35 cm 長之孔洞，與完整灌漿未有孔洞之完整土釘試體之比較，如圖 3-10(a)所示。而規劃之第二組試驗為模擬現地 220 cm 長之土釘試體灌漿中間段部分有 50 cm 長之孔洞，與完整灌漿未有孔洞之完整土釘試體之比較，設計配置如圖 3-10(b)所示，其土釘模型完成圖如圖 3-11 所示。

另外考量孔隙有土壤下之配置，使用 220 cm 之土釘模型，規劃以石門砂填充原先 50 cm 孔隙之部分，其比重為  $2.73 \text{ t/m}^3$ ，試驗分別使用兩種不同含水量的配置，分別為  $w=1\%$  與  $w=20.44\%$  之石門砂進行試驗量測，其測試的過程如圖 3-12 所示。

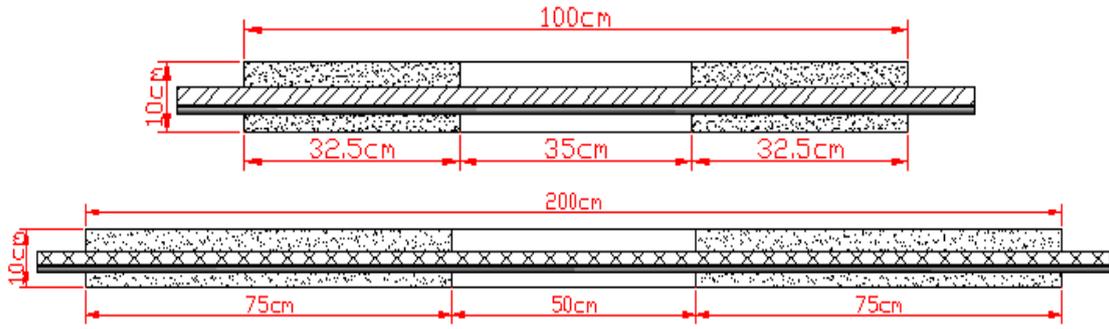


圖 3-10 試驗規劃二組不同土釘不同長度灌漿率物理模型(a)

(b)



圖 3-11 土釘模型完成圖



圖 3-12 土釘夾泥試驗過程

## 第四章、試驗結果與討論

### 4.1 波傳速度參數率定

本研究為探討現場鋼筋埋設長度與回填灌漿情形，因此利用土釘側邊平行預埋一同軸纜線，藉由室內量測 TDR 脈衝波在同軸纜線的外導體與鋼筋兩導體在空氣傳輸下，擷取其 TDR 波形，並進行單切線法走時分析，其結果如圖 4-1，可得到其在空氣傳輸速度  $V_{air}=2.6380*10^8$  m/s，即其與光速的比值為  $V_p=0.877$ ；而藉由室內量測 TDR 脈衝波在同軸纜線的外導體與鋼筋兩導體在水泥砂漿傳輸下，擷取其 TDR 波形進行走時分析，如圖 4-2，可得到其水泥砂漿傳輸速度  $V_c=1.45*10^8$  m/s。上述之波速率定結果，與香港文獻提到之單心線與鋼筋在空氣中的速度為  $V_{air}=2.520*10^8$  m/s，即其與光速的比值為  $V_p=0.841$ ，兩者的靈敏度相接近，故可沿用香港之建議，即回填灌漿的配比與養護時間不影響波速率定的結果。因此基於上述速率定結果，首先藉由量測同軸纜線的本身走時，即可計算實際鋼筋埋設長度（意即灌漿應有長度）；爾後藉由量測土釘物理模型的總走時，代入公式 3-1，即可估算其回填灌漿的長度，而相關計算結果如以下章節所述：

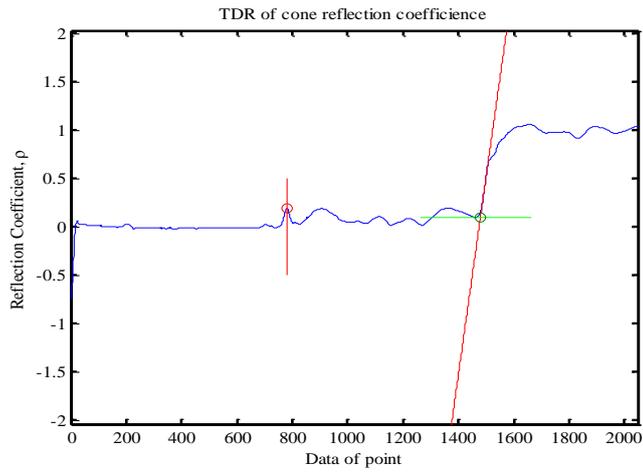


圖 4-1 TDR 鋼筋與纜線外導體量測空氣率定分析-單切線法

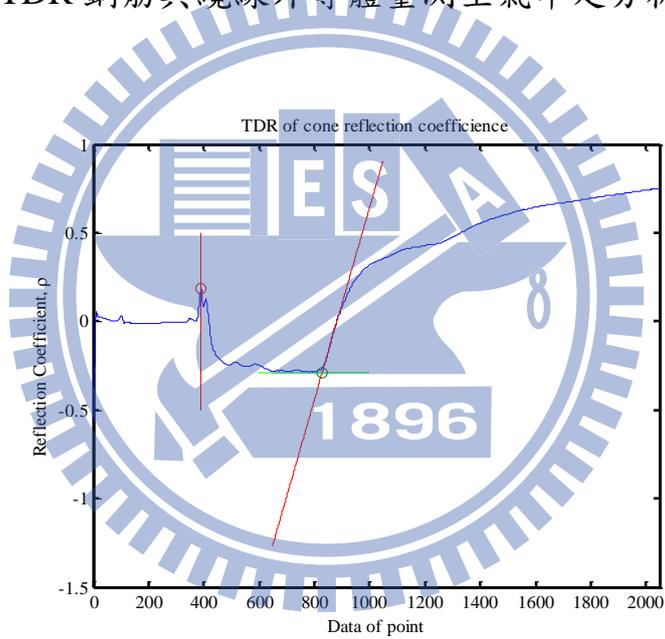


圖 4-2 TDR 鋼筋與纜線外導體量測回填灌漿率定分析-單切線法

## 4.2 土釘長度檢測的驗證

本研究先以 TDR100 儀器做初步探討，其解析度最小為 1.8mm，試驗的土釘物理模型實際長度有三組，分別為 70cm、120cm 和 220cm，個別試體所量測之數據如圖 4-3 所示。由於 TDR100 所送出波形為方波型式，非香港採用之凸波型式，因此波形非如圖 2-20，但可將圖 4-3 波形進行微分即可得到如圖 2-20 型式。因此本研究利用圖 4-3 之波形，初步配合走時分析之單切線法和同軸纜線已知波速  $V_p=0.87$ ，以計算出接頭位置及纜線末端位置。如圖 4-3 中利用接頭末端內外導體相互接觸造成之短路的現象，可發現在距離主機 3.01 m 處為量測波形的初始起點；另外在量測距離主機 3.71、4.21、5.21 m 之處，可發現訊號之阻抗值在此處有明顯之轉折，且此位置之阻抗值漸漸爬升變大，則表示電磁波訊號於此處已由纜線端進入至空氣端因而造成此轉折現象，故利用此特徵訊號反應，使用以上所述之配置狀況下，由量測結果可得知三組土釘模型長度分別為 70cm、120cm 和 220 cm 與實際土釘模型長度相符，其計算結果整理如表 4-1，誤差百分比皆在 99% 以上。

本研究考量現地量測的機動性另以利用手持式 TDR20 進行土釘模型長度測試，其檢測波形如圖 4-4 所示，利用其內建之波形判釋功能，可定訂纜線接頭與末端的位置，由量測結果可得知土釘長度分別為 70cm、120cm 和 220 cm 與實際長度相符，其計算結果整理如表 4-2，而量測的

誤差百分比皆在 1% 以下。誤差百分比的定義為量測值減去實際值再除以理論值。

表 4-1 為 TDR100 量測鋼筋埋設長度的結果

TDR100 result					
實際長度(m)	N (data point)	dt	總走時 T(s)	計算長度 (m)	誤差百分比
0.7	142.66	$3.74 \times 10^{-11}$	$5.34 \times 10^{-9}$	0.697	0.49%
1.2	246.67	$3.74 \times 10^{-11}$	$9.23 \times 10^{-9}$	1.204	0.37%
2.2	452.12	$3.74 \times 10^{-11}$	$1.69 \times 10^{-8}$	2.208	0.35%

表 4-2 為 TDR20 量測鋼筋埋設長度的結果

TDR20 result					
實際長度(m)	N (data point)	dt	總走時 T(s)	計算長度 (m)	誤差百分比
0.7	29.43	$1.840 \times 10^{-10}$	$5.41 \times 10^{-9}$	0.703	0.33%
1.2	50.22	$1.84 \times 10^{-10}$	$9.24 \times 10^{-9}$	1.204	0.55%
2.2	91.84	$1.84 \times 10^{-10}$	$1.69 \times 10^{-8}$	2.204	0.19%

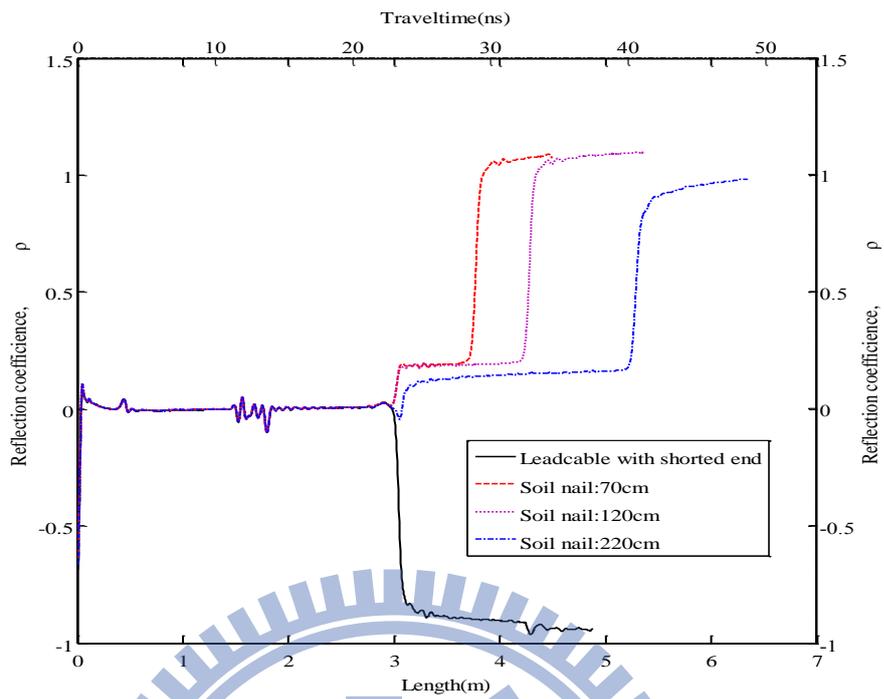


圖 4-3 TDR100 量測三組土釘物理模型之結果

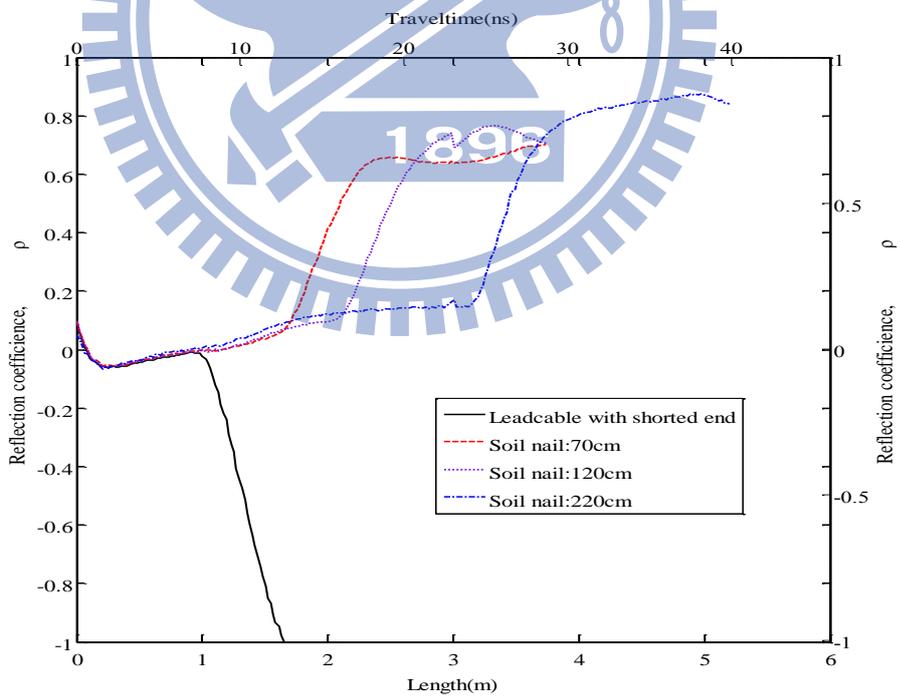


圖 4-4 TDR20 量測三組土釘物理模型之結果

### 4.3 土釘回填灌漿品質測試

#### 4.3.1 TDR100 於回填灌漿品質測試

本研究同樣仿照香港相關文獻，初步製作兩組混凝土之土釘試體進行測試，如圖 3-10-(a)所示，兩組測試結果整理如，第一組試驗為模擬現地 120 cm 長之土釘試體灌漿中間段部分有 35 cm 長之孔洞，與完整灌漿未有孔洞之完整土釘試體之比較。設置視窗大小為 10m，記錄點數為 2048 點，其 TDR100 量測之結果如圖 4-5 所示，由完整灌漿的土釘試體之波型，可以利用單切線走時分析得到總走時  $T$ ，並且藉由率定的空氣波速  $V_{air}$ 、回填灌漿波速  $V_c$  和已知長度  $L_1=1.2m$  代入公式 3-1，其灌漿的長度結果為 64cm，灌漿率為 53%，而設計灌漿長度為 65cm。由結果可看出當模擬現地土釘試體灌漿中間有 35 cm 長之孔洞時，其電磁波在有灌漿孔洞土釘試體走時較短，也就是代表了電磁波速度在有孔洞之土釘試體，比完整灌漿土釘試體要來的快，且另一方面在具有孔洞之土釘，其波形之反射係數之比較上較高。

而規劃之第二組試驗為模擬現地 220 cm 長之土釘試體灌漿中間段部分有 50 cm 長之孔洞，與完整灌漿未有孔洞之完整土釘試體之比較，設計配置如圖 3-10-(b)所示。量測之結果如圖 4-6 所示，從結果數據中能發現與試驗一有相同之狀況，即灌漿中間段部分有 50 cm 長之孔洞試

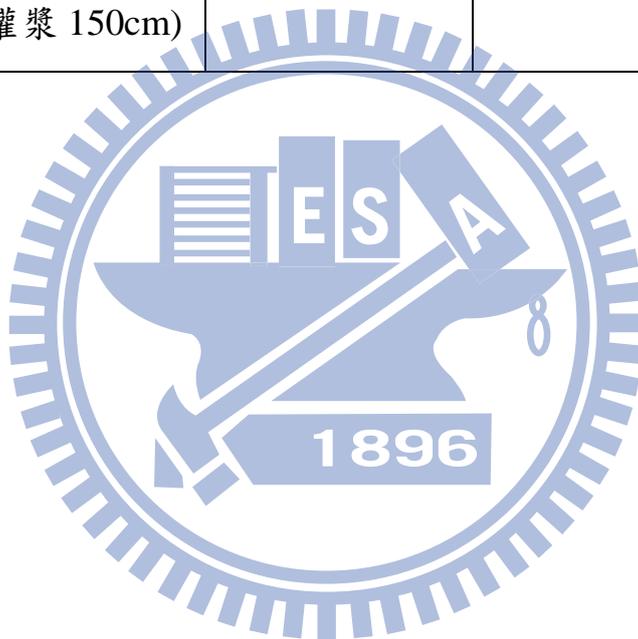
體其量測的走時長度明顯較短，其計算的灌漿長度為 152cm，灌漿率為 69%，而設計灌漿長度為 150cm。兩組試驗的灌漿估算結果皆相當準確。

再者我們可將圖 4-5-(a)與圖 4-6-(a)波形進行微分，即將原來的波形方波經由微分可得到凸波的波形，其結果如圖 4-5-(b)與圖 4-6-(b)所示，可以明顯的看出在灌漿不確實的地方可以看出明顯的尖峰，即因波形在通過孔隙時，因波在空氣傳遞的速度較快，造成波形上有一明顯的反射，可幫助現場人員快速判斷出不正常之土釘。

接著使用石門砂配置兩種不同含水量做為填充，含水量分別為  $w=1\%$  與  $w=20.44\%$ 。接著進行量測，其 TDR100 量測的結果如所示。從波形上看來當含水量為 1% 的情況下其量測結果與尚未填充土壤時差異不大，而從走時計算土壤的  $V_s$  可得到  $V_{s,w1} = 2.16 \times 10^8 \text{ m/s}$  與先前率定 TDR 脈衝波在同軸纜線的外導體與鋼筋兩導體在空氣中傳輸下的波速  $V_{\text{air}} = 2.6380 \times 10^8 \text{ m/s}$  波速接近，而當含水量為 20.44% 的情況下其  $V_{s,w2} = 1.39 \times 10^8 \text{ m/s}$  與先前率定 TDR 脈衝波在同軸纜線的外導體與鋼筋兩導體在水泥砂漿傳輸下  $V_c = 1.45 \times 10^8 \text{ m/s}$  的波速接近，故雖然在進行走時化分析時未填充土壤與填充含水量為 20.44% 之土釘模型走時接近，故從總走時分析無法計算出回填灌漿的長度，但在波形上的判釋即可得知此土釘有回填灌漿不實的情況，即波形因含水量較高的土壤而產生負的反射訊號。

表 4-3TDR100 量測二組土釘試體-回填灌漿評估結果

TDR100result	總走時 T(s)	計算灌漿長度 (cm)	誤差百分比
第一組土釘試體 120cm with defect(灌漿 65cm)	$1.31 \times 10^{-8}$	64.33	1.03%
第二組土釘試體 220cm with defect(灌漿 150cm)	$2.61 \times 10^{-8}$	151.98	1.32%



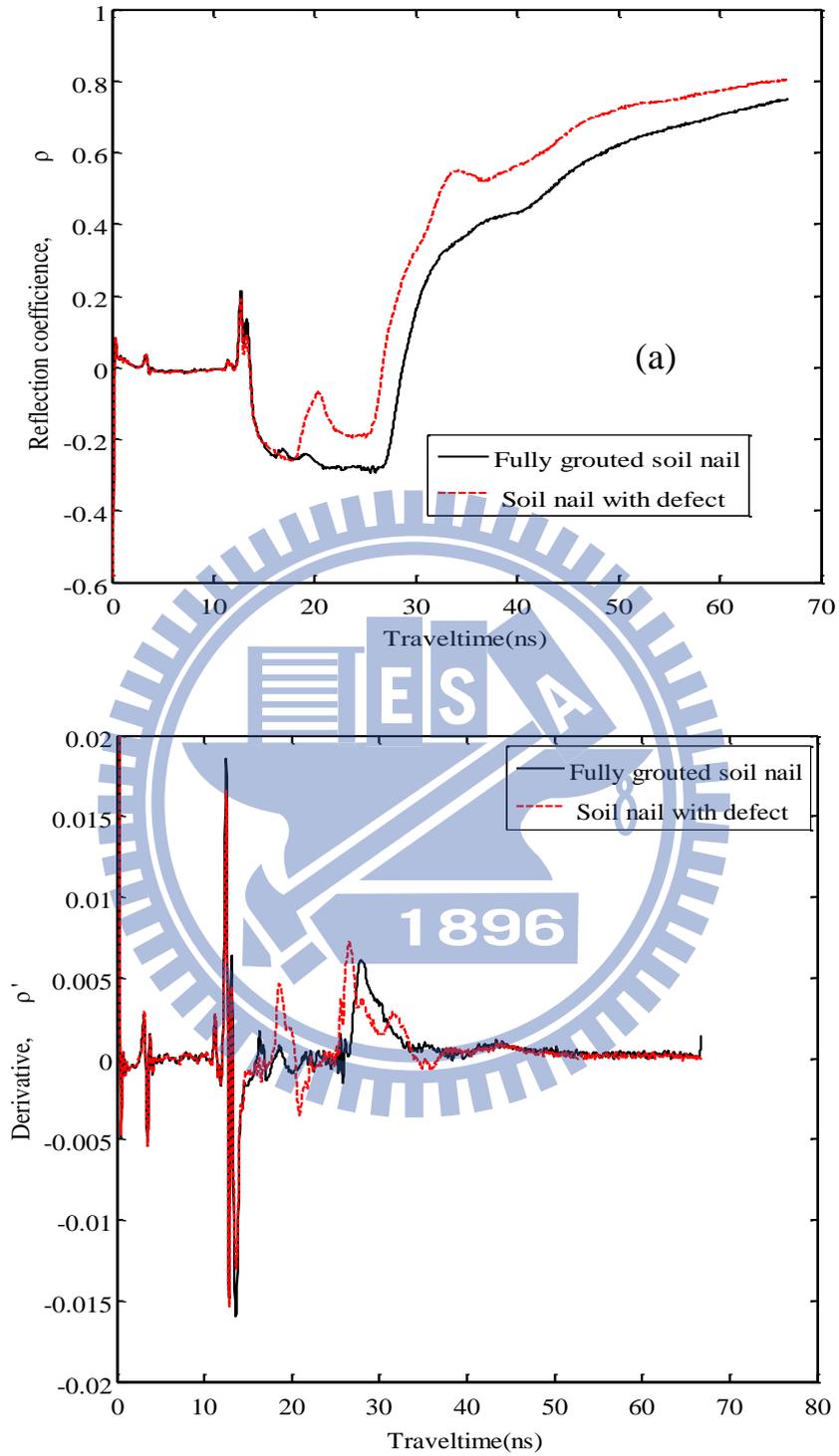


圖 4-5 TDR100 量測結果於 1.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實土釘(b)

圖 4-5-(a)的微分

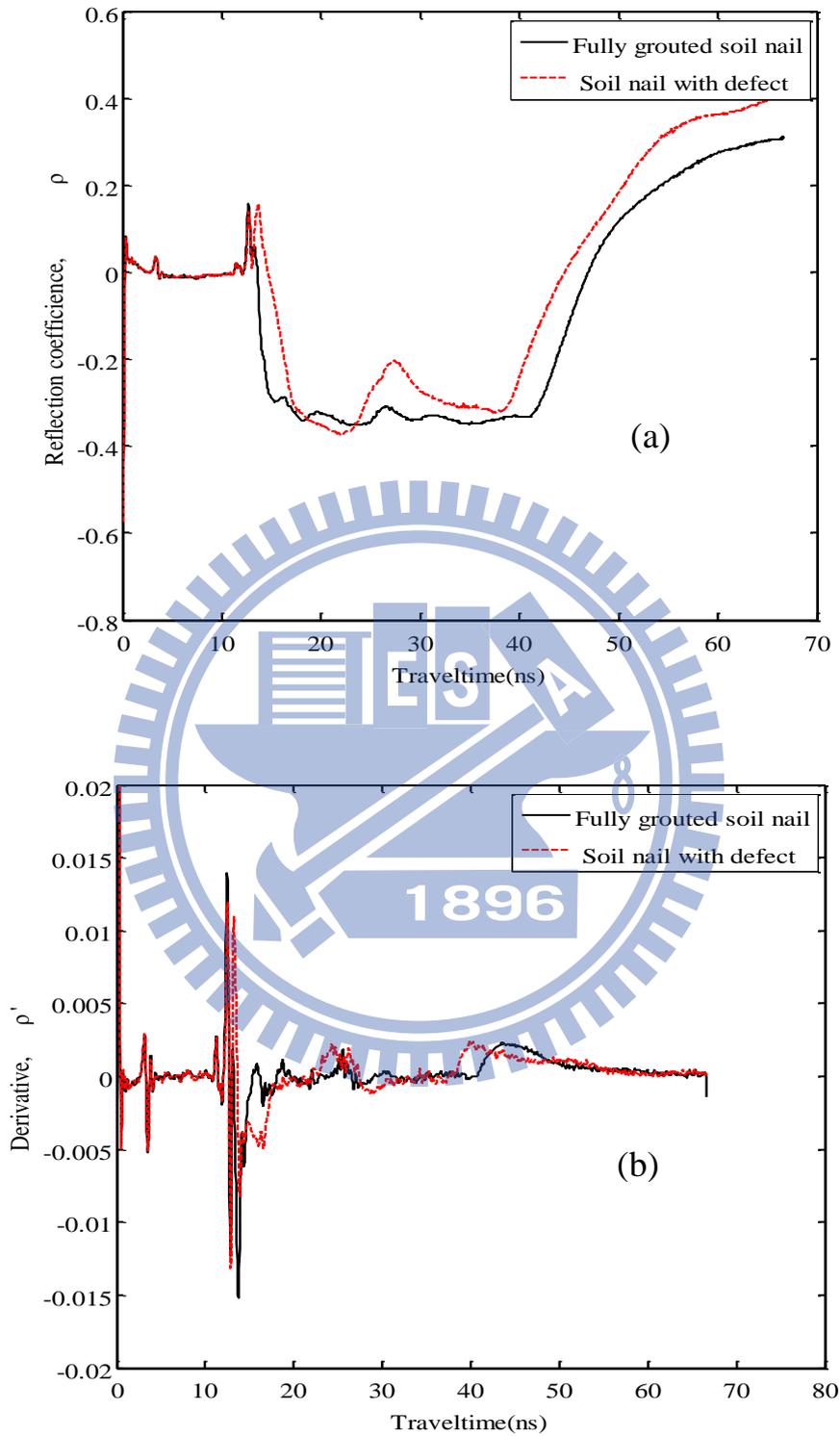


圖 4-6 TDR100 量測結果於 2.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實土釘(b)

圖 4-6 -(a)的微分

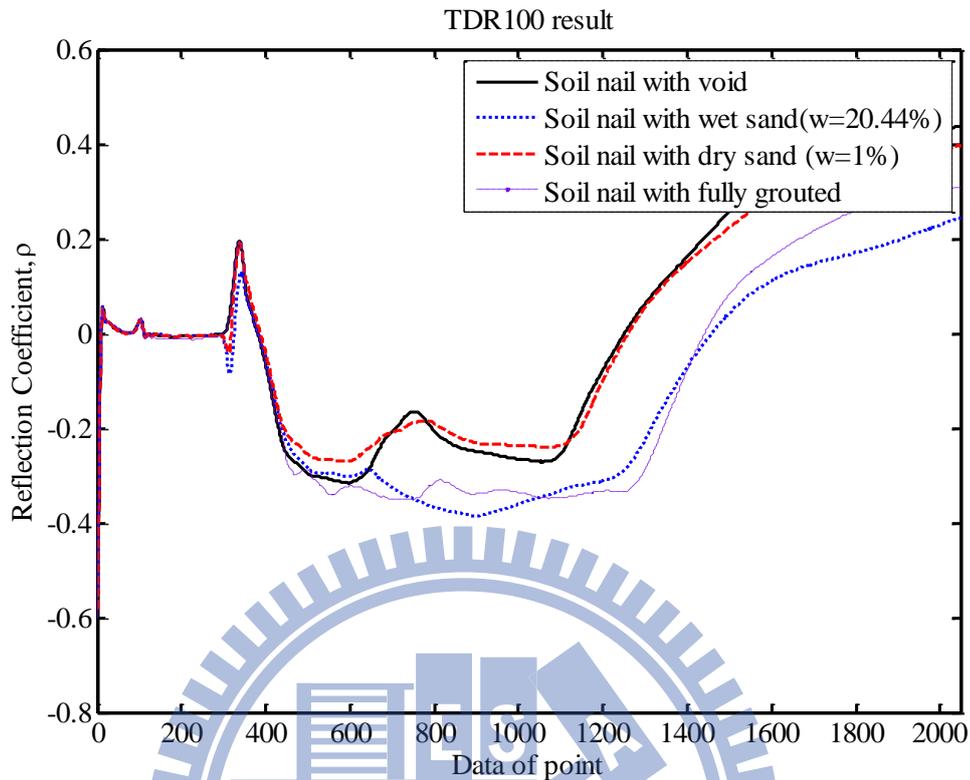


圖 4-7 TDR100 測試土釘孔隙填充不同土壤含水量狀況

#### 4.3.2 TDR20 於回填灌漿品質測試

考慮現地量測的方便性和良好機動性且不須額外攜帶充電電池需求，本研究另使用手持式 TDR20，其解析度最小為 2.54cm，同樣進行兩組試體的檢驗，其量測結果整理如表 4-4。

第一組試驗為模擬現地 120 cm 長之土釘試體灌漿中間段部分有 35 cm 長之孔洞，與完整灌漿未有孔洞之完整土釘試體之比較，如圖 3-10-(a) 所示。TDR20 量測之結果如圖 4-8 示，接著進行波型的走時分析，計算的灌漿長度為 68cm，灌漿率為 57%，而設計灌漿長度為 65cm。

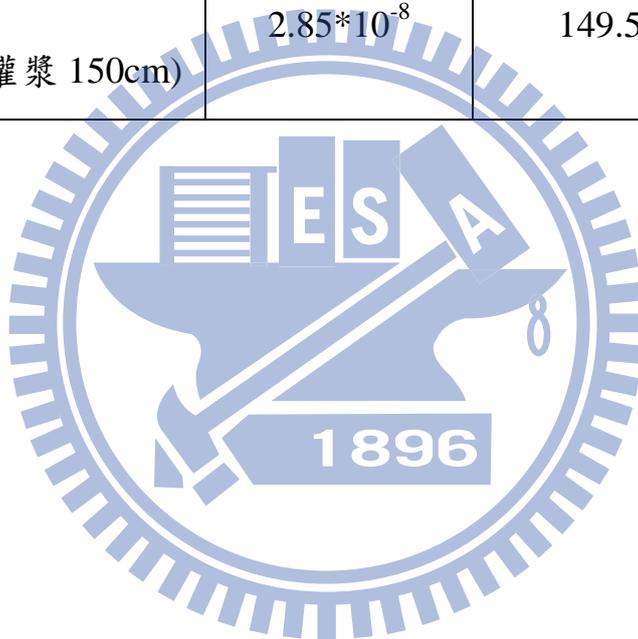
而規劃之第二組試驗為模擬現地 220 cm 長之土釘試體灌漿中間段部分有 50 cm 長之孔洞，與完整灌漿未有孔洞之完整土釘試體之比較，設計配置如圖 3-10-(b)所示。量測之結果如圖 4-9 示，同樣進行走時分析，計算的灌漿長度為 150cm，灌漿率為 68%，而設計灌漿長度為 150 cm。

雖然 TDR20 的時間擷取解析度較差，但從走時分析計算的結果看來，量測結果誤差大至符合原設計灌漿之結果，故未來建議現場也可採用手持式 TDR20 作為灌漿品質檢驗的量測工具。

另外考量孔隙有土壤狀況下的配置，利用試驗二長為 220cm 且中間段部分有 50cm 孔洞之土釘模型，使用石門砂配置兩種不同含水量做為填充，含水量分別為  $w=1\%$  與  $w=20.44\%$ 。接著進行量測，圖 4-10 為 TDR20 量測的結果，其結果與 TDR100 類似，雖然 TDR20 的解析度較差從波形上的判釋較不明顯，從走時計算的結果當填充含水量 1% 的土壤時，計算  $V_{s,w1} = 2.22 \times 10^8$  m/s，而當含水量為 20.44% 的情況下其  $V_{s,w2} = 1.44 \times 10^8$  m/s，故當填充土壤的含水量其波速與回填灌漿之波速接近時，無法從走時分析計算出回填灌漿的長度，但仍可透過波形看出其有負向的反射訊號的發生。

表 4-4 TDR20 量測二組土釘試體-回填灌漿評估結果

TDR20result	總走時 T(s)	計算灌漿長度 (cm)	誤差百分比
第一組土釘試體 120cm with defect(灌漿 65cm)	$1.45 \times 10^{-8}$	68.06	4.71%
第二組土釘試體 220cm with defect(灌漿 150cm)	$2.85 \times 10^{-8}$	149.53	0.31%



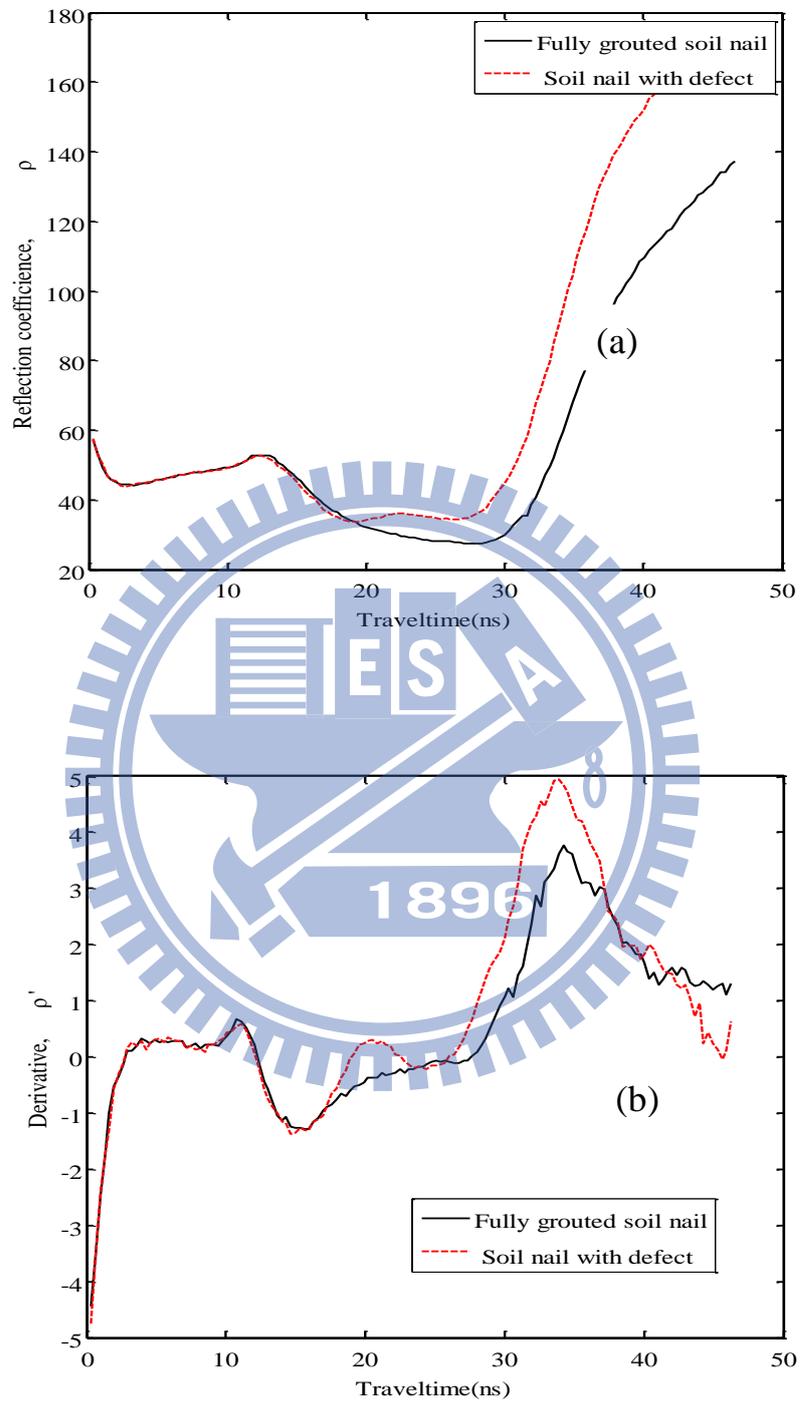


圖 4-8 TDR20量測結果於1.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實土釘(b)

圖 4-8-(a)的微分

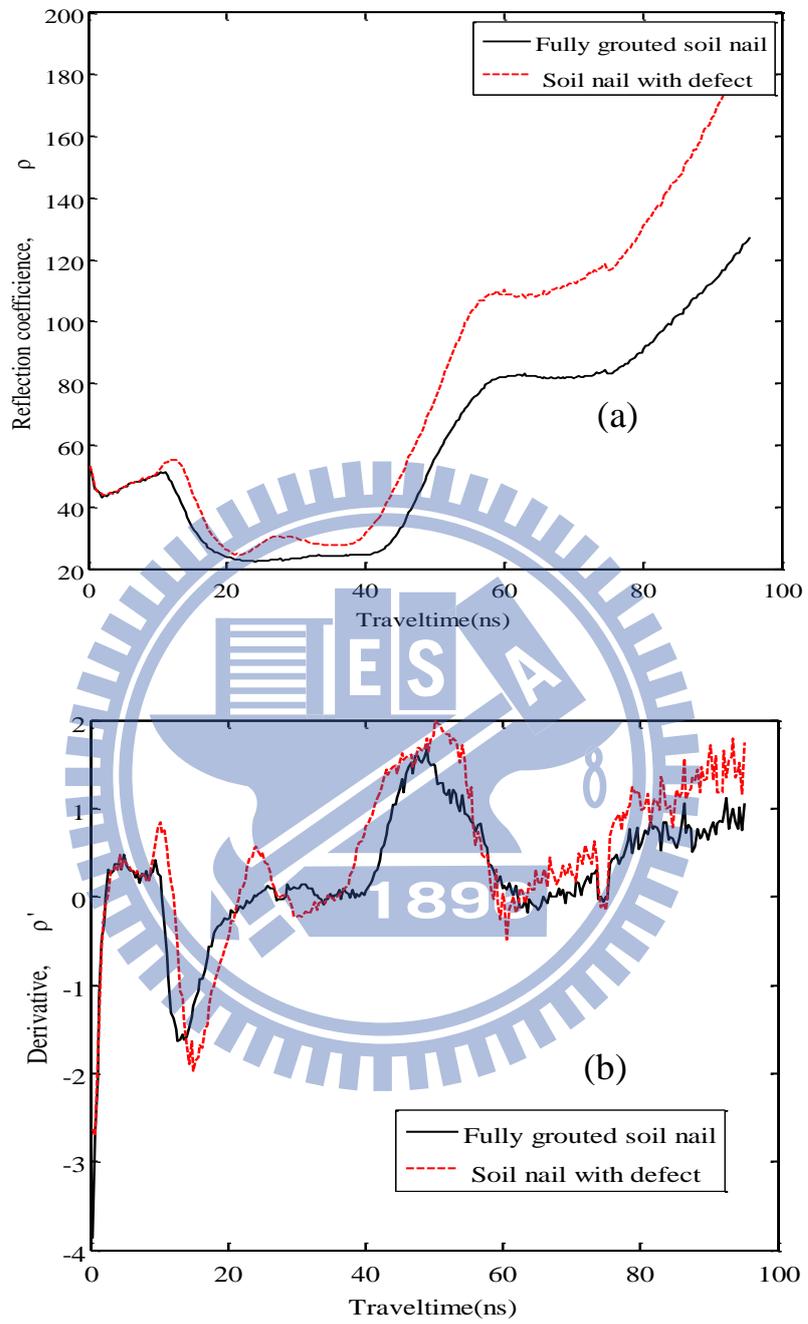


圖 4-9 TDR20 量測結果於 2.2 m(a)完整灌漿土釘與部分灌漿不實土釘(b)

圖 4-9-(a)的微分

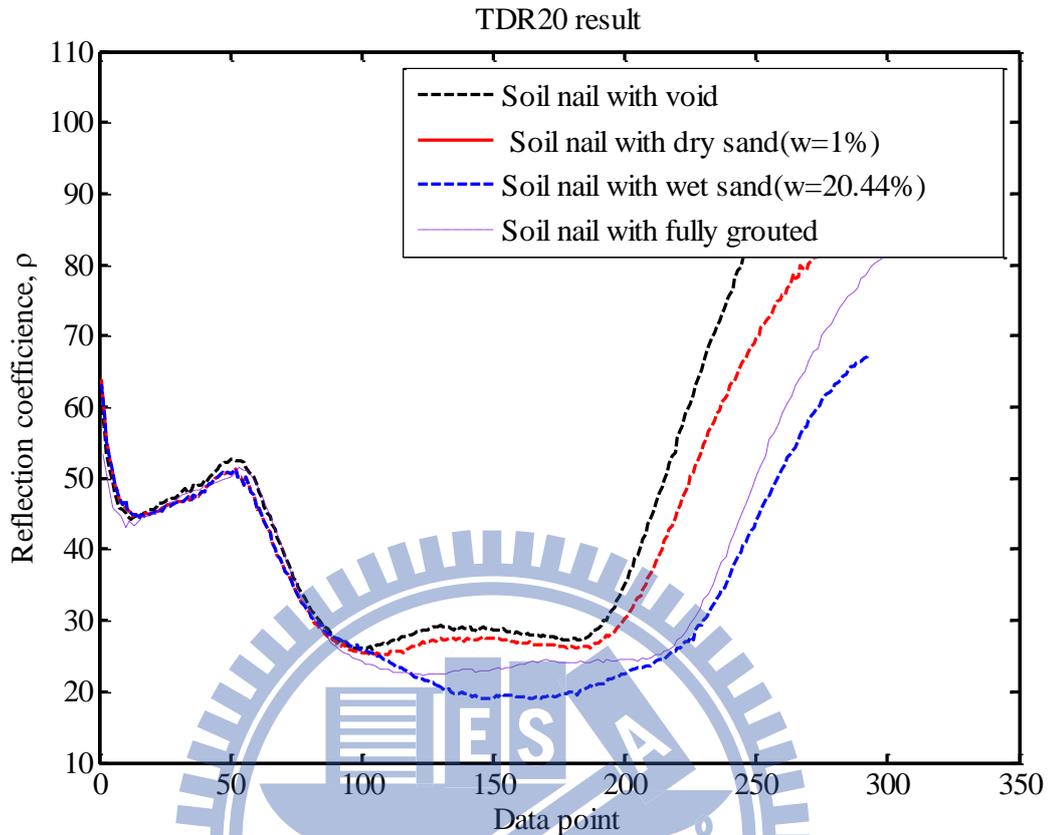


圖 4-10 TDR20 測試土釘孔隙填充不同土壤含水量狀況

#### 4.4 實務案例驗證與評析

本研究配合相關工程作業，於新北市農路改善工程，其工程項目為土釘及自由樑護坡，現場狀況如圖 4-11。本研究利用前述 TDR 工程品質檢核量測方式，其現場纜線安裝施工方法是利用 QR320 同軸纜線平行置放於八號鋼筋旁如圖 3-5 所示，在測量纜線之末端進行防水處理，使其量測之訊號不會因為外在地下水之影響訊號判釋。另外在纜線末端除了防水處理之外，在纜線與鋼筋平行置放時，需利用束帶將鋼筋與量測纜線固定，且纜線末端需對齊鋼筋末端確保量測鋼筋長度的準確性。

土釘工程完成後如圖 4-12 所示。

本研究因施工期程關係，以及現場安全問題，初步裝設兩處 TDR 土釘檢測示範組，如圖 4-12 右下角兩處纜線位置所示。配合 TDR100 初步量測之結果分別如圖 4-13 與圖 4-14 所示。從現地配置圖中可得知用於邊坡護岸之土釘長度約為 2 m，預留於結構體外纜線長度 1.2 m 以及量測儀器本身訊號線(Lead Cable)長度 1.5 m。由圖 4-13 與圖 4-14 可觀察出之反射係數值在距離主機從 0 至 1.5 公尺為 0；而反射係數值在距離主機從 1.5 公尺至 4.7 公尺為 0.2。此反射係數值分別代表了訊號在不同種纜線段傳遞之反映，從距離儀器 0 至 1.5 公尺為量測儀器本身之訊號線(Lead Cable)長度，而 1.5 公尺至 4.7 公尺為平行置放於八號鋼筋旁之 QR320 同軸纜線長度，此長度因已先預量好裸露於土釘長度外距離，故當使用儀器量測得知種段纜線長度後再扣除此段纜線外露之距離即為實際土釘之長度。其檢測長度之結果為 2 m，此數值與單位設計的結構體尺寸符合。

然而因現場施工配置關係，其土釘本身由自由樑披覆，無法利用土釘本身與同軸纜線外導體組合成導線，以作混擬土灌漿品質測試使用，未來建議將配合現場施工方式，仿造香港的製作方式，預留一單心電纜線，藉以接續土釘本身，雖有不連續阻抗的問題，但從波形上的判釋可判斷出進入同軸纜線的位置，量測不受影響，透過直接量測可以讓混擬

土灌漿品質測試得以快速施測。

依日前儀器量測之訊號訊息傳達了電磁波於纜線中傳遞之物理意義，依據此結果判釋出纜線之長度，此訊息亦可進一步反映出待測土釘之實際尺寸。而另一方面由待測土釘量測結果建立初始值後，供後續土釘破壞變形之依據，當未來如有破壞之現象將影響纜線訊號所反映之反射係數，此時依據分析之結果在提出土釘可能損壞之狀況，提供施工單位針對土釘確切需加以補強參考之訊息。

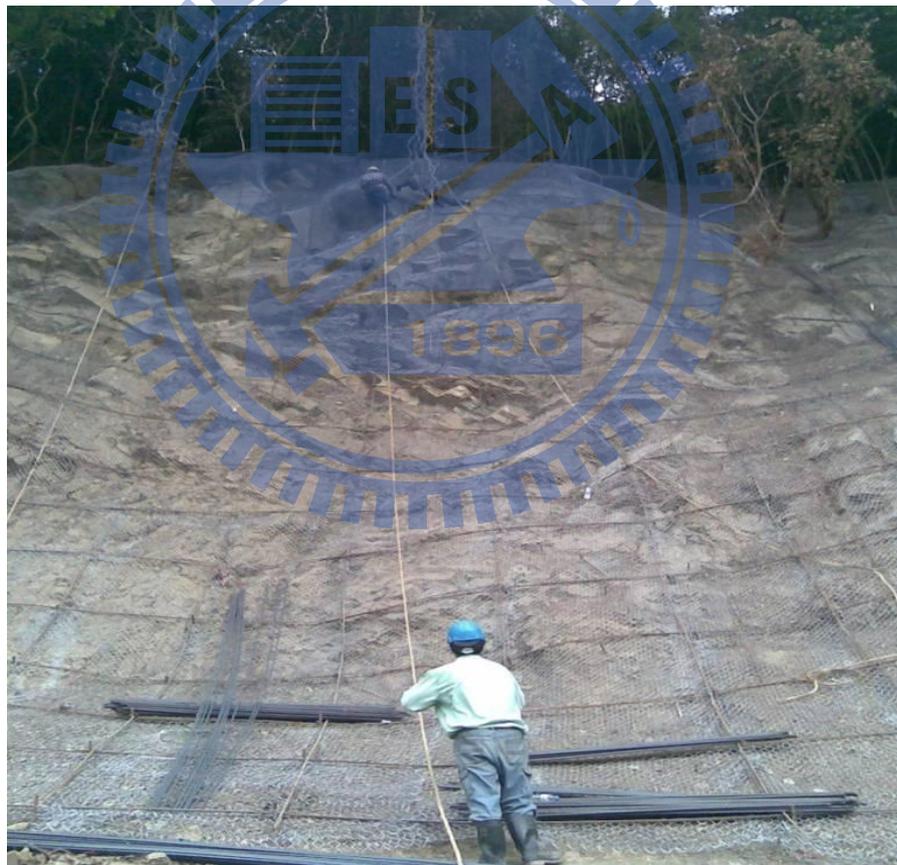


圖 4-11 土釘及自由樑護坡現地工程施工狀況



圖 4-12 土釘及自由樑護坡現場施工完成圖

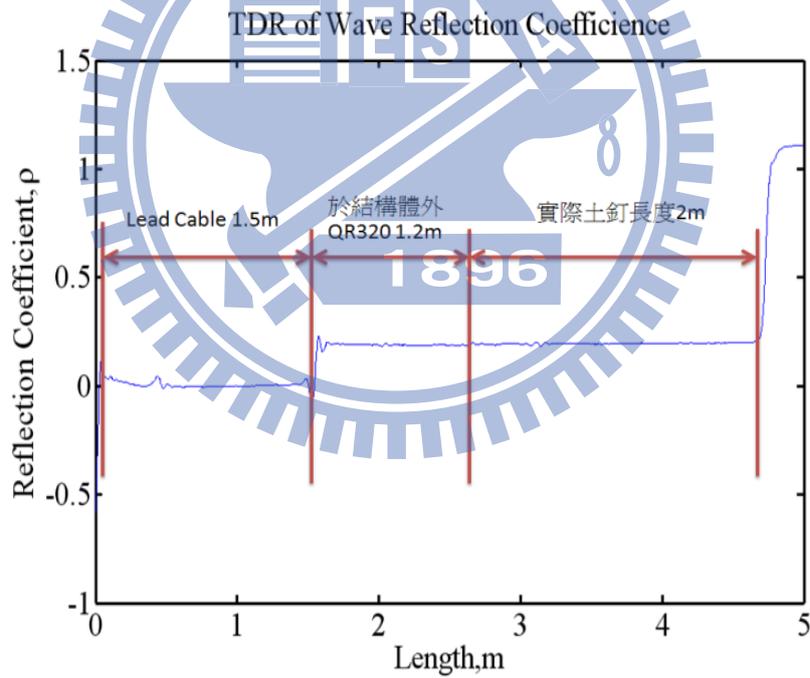


圖 4-13 左側土釘 TDR100 量測結果

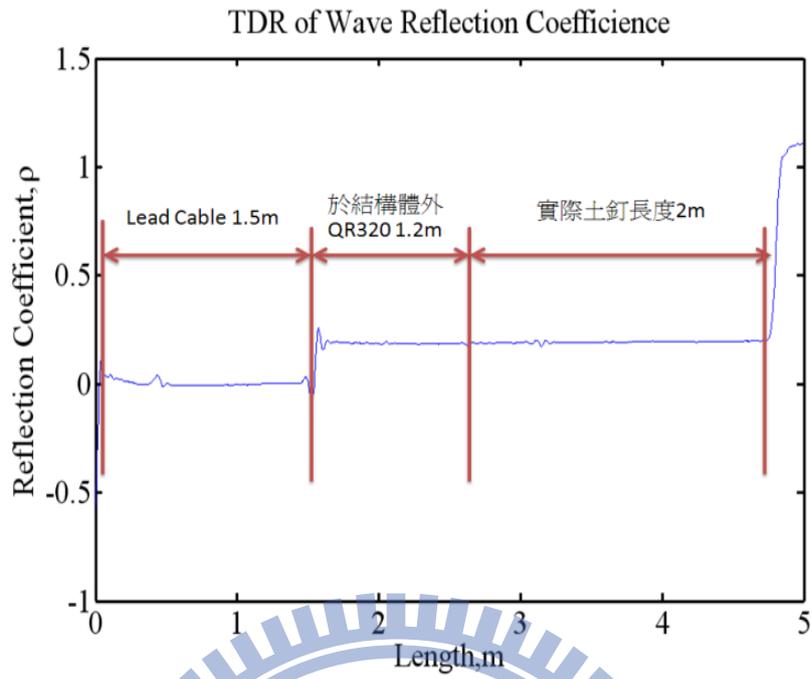
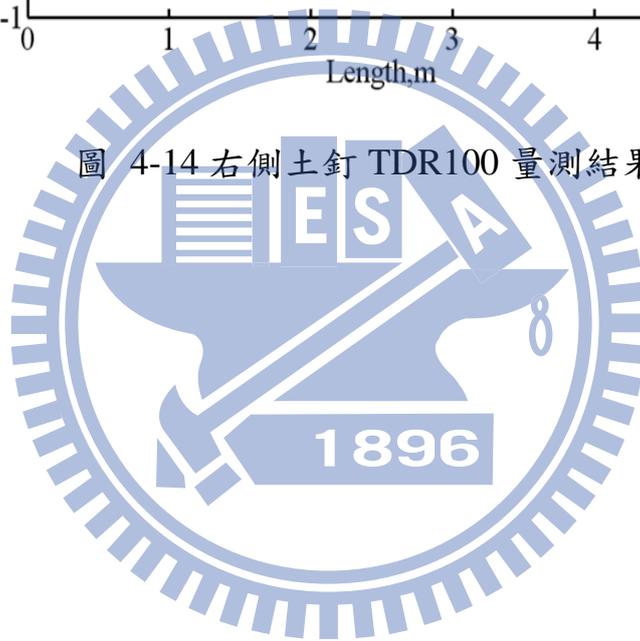


圖 4-14 右側土釘 TDR100 量測結果



## 4.5 實務作業建議與限制條件說明

### 4.5.1 TDR 量測的安裝作業流程

為了使用 TDR 作為量測的工具，必須有兩個導體作為媒介，其安裝斷面完成圖如**錯誤! 找不到參照來源**。所示。而於現場安裝前，首先按照施工設計圖裁減纜線長度，並於纜線後端施作防水，快速防水步驟如下：首先以防水熱縮套膜置於纜線末端，再以熱熔膠填充 PVC 蓋置於纜線末端即可達到良好的防水功效，施作完成如**錯誤! 找不到參照來源**。所示。接著於開挖鑽孔完成後，將纜線平行放置於鋼筋側邊，每間格 1m 使用束帶固定，而纜線長度需外露 10~15cm 以方便後續量測使用。而在鋼鍵和同軸纜線組裝完成後需在施作錨頭時將鋼筋連接一導線外露於錨頭外，以作為量測使用，而導線必須與同軸纜線放置同一側，否則量測時波形會受到因兩導線間距過大而產生較大的阻抗，使得在土釘錨頭起點較不易判釋。

量測時分為兩步驟，首先直接量測同軸纜線的內外導體，可得波在纜線中傳遞的總走時，並透過已知率定的同軸纜線波速可計算出鋼筋長度，接著透量測鋼筋的與同軸纜線的外導體，可得到波在土釘結構物中的波形，並透過走時分析可得到波傳遞的總走時，最後利用先前量測的鋼筋長度與波在纜線和鋼筋兩導體空氣波速和水泥砂漿的波速帶入式

3-1 則可計算出水泥砂漿灌漿的長度。

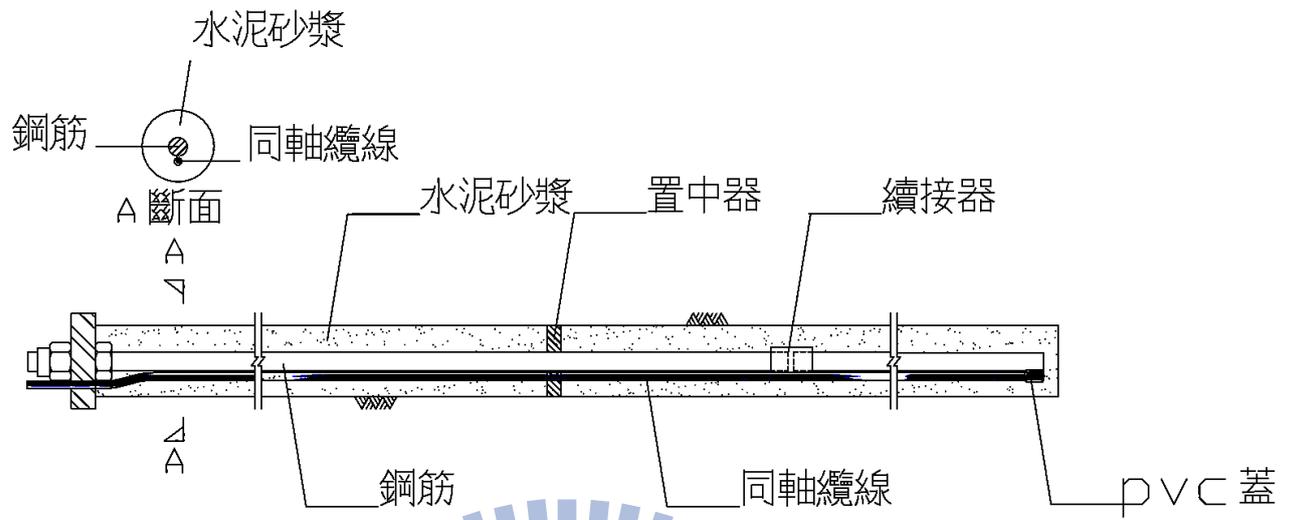


圖 4-15 標準安裝斷面圖



圖 4-16 纜線末端防水施作

#### 4.5.2 限制條件

使用 TDR 檢測方法於現場量測時，若孔洞為夾泥之含水量較高的土壤時，則此 TDR 量測的檢測方法將因高含水量之土壤波速與回填灌漿波速無法區別，而無法透過簡易的量測工具計算出回填灌漿的長度，但仍可透過具高解析度之 TDR 量測工具，並透過複雜的分析計算得到，此法可參考 Lin, C.-P (2003) 所提，利用模擬不同材料在不同介電度下，所得到的波形，來進行全波形的模擬，並透過正反算來分析，但此方法即有失簡易快檢測土釘的目的。且土釘工法本身有其適用性，相關說明於 2.1.1.1 節有相關介紹。土釘工法主要適用之地層條件須位於地下水以上或可施作人工排水之地層較適用於土釘工法，含水量極高、有含水袋之地層或高度膨脹之土壤較不適用，故現場設計使用土釘工法時須注意其地層條件，方可使用此 TDR 方法做為檢測土釘長度與回填灌漿品質的依據。

## 第五章、結論與建議

### 5.1 結論

1. 本研究回顧相關文獻，提出既有時域法射法應用於土釘檢驗之標準作業方法，但經本試驗驗證其在做法上仍有其限制，其方法原先是透過將一單心電纜線平行放置在鋼鍵側邊以量測土釘的長度，但若透過纏繞的方式纏繞在土釘鋼鍵側邊將使得量測到的長度增加，且隨著纏繞的長度越長期量測結果越長，故本研究採用同軸纜線，因其不易纏繞，故可減少作弊的可能性。
2. 既有文獻其時域反射法於土釘的檢測方法量測上無法區分長度或是回填灌漿影響的兩個因素，而本研究利用同軸纜線平行放置於鋼筋側邊之作法，在長度的量測上可以透過直接量測同軸纜線，透過已標定之波速可快速量測鋼筋長度。本研究透過三組試體的測試，其鋼筋長度量測效果良好且準確；而透過同軸纜線之外導體與鋼筋形成之導波器可檢測土釘灌漿回填的部分，透過率定電磁波在空氣的速度與回填灌漿的速度，量測總走時即可反算回填灌漿的比例，效果良好且準確。
3. 本研究同時使用 TDR100 與 TDR20 作為量測評估的工具，TDR20 雖然較經濟且攜帶方便，但其解析度較低，故在回填灌漿不實的土

釘量測上波形較不易判釋，但從總走時分析上計算其不受影響。

4. 在回填灌漿測試的部分，如果為漏漿情況，則可透過走時分析計算出灌漿長度，但本研究另使用石門砂回填 220cm 長中間孔隙為 50cm 之土釘試體，TDR100 與 TDR20 量測結果皆會受到夾泥的影響，即在含水量較低的情況下，仍可透過現有的量測設備量測並計算出灌漿長度，但在高含水量的情況下因土壤含水使得波速下降，使得總走時分析無法計算出差異性，但可使用高解析度的儀器量測並透過模擬全波形，並經由正算與反算來分析，仍可得到結果。

## 5.2 建議

1. 為提供土釘結構物一有效的檢驗方式，建議其在土釘鋼鍵側邊平行放置一同軸纜線，可提供現場人員快速的判釋土釘的合格性，並透過總走時分析可判定是否有回填灌漿不實的情況。
2. 在現場量測的部分建議以手持式 TDR 作為量測工具，雖然其解析度較差，在波形上判釋較不顯著，但在總走時分析上不受影響，且其具有攜帶方便、內建記憶體和液晶螢顯示器等優點。
3. 目前已可量化回填灌漿不確實長度，建議後續針對回填灌漿不確實進行可容許門檻分析，藉以提出回填灌漿品質查核之標準。
4. 未來建議此檢測技術方法可應用至地錨的鋼筋長度或是鏽蝕問題的檢測。

## 參考文獻

倪至寬(2005)，地錨施工原則取自：<http://www.cc.ntut.edu.tw/~ckni/index1.htm>

香港廉政公署，圓洲角短樁案取自(2012):

[http://www.icac.org.hk/new\\_icac/big5/cases/piling/content.html](http://www.icac.org.hk/new_icac/big5/cases/piling/content.html)

洪勇善(1999)，"土釘擋土結構之力學行為"，國立台灣大學土木工程學系博士論文

洪勇善(2000)，"現地坡面土釘加勁工法之應用"，土木技術，第 31 期，第 45-55。

孫介文、姚大鈞(2003)，"土釘工法適用性與設計案例"，土工技術，第 98 期，第 65-70 頁。

陳榮河、何嘉浚(2003)，"土釘擋土工法導論"，土工技術，第 98 期，第 5-16 頁。

廖洪鈞、歐晉德(2004)，"預力地錨之施工品質控制及檢驗"，土工技術雜誌，第 25 期

"非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)"，(2006)，內政部建築研究所委託研究報告

"坡地社區生態防災工法暫行技術手冊暨解說擋土設施及坡面保護工編"，(2005)，內政部建築研究所委託研究報告

AEA Technology, Inc.(2011). Time Domain Reflectometer (TDR):20/20 TDR.

Retrieved from

<http://www.aeatechnology.com/index.php?module=product&id=85ddf38eb3e07d8c43e621da90431a6b>

Bruce, D. A. and Jewell, R. A. (1986), “Soil Nailing Application And Practice Part I”, Ground Engineering, November, PP.10-PP.15,

Byrne, R. J., Cotton, D. Porterfield, J. Wolschlag, C. Ueblacker, G.(1998), “Manual For Design And Construction Monitoring Of Soil Nail Wall,” FHWA-SA-96-069R, Federal Highway Administration.

British Standards Institute (Bsi Dd81) (Bs 8081) (1989) ,British Standard Code Of Practice for Ground Anchorages

Campbell Scientific, Inc.(2008). Time Domain Reflectometer (TDR):TDR100. Retrieved from :<http://www.campbellsci.com/tdr100>

Cheung, W.M. (2003). “Non-Destructive Tests for Determining the Lengths of Installed Steel Soil Nails ”(GEO Report No. 133). Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 54 p.

Cheung, W.M. (2005). “Interim Report On Non-Destructive Tests For Checking The Integrity Of Cement Grout Sleeve Of Installed Soil Nails”(GEO Report No. 176). Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 45 p.

Cheung, W.M. (2006). “Use of Time Domain Reflectometry to Determine the Length of Steel Soil Nails with Pre-installed Wires”(GEO Report No. 198). Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 40 p.

Cheung, W.M. and Cheng, F.K. (2008). “Use Of Time Domain Reflectometry To Determine The Length Of Steel Soil Nails With Grout Pipe With Embedded Copper WireS”(GEO Report No. 228). Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 44 p.

Cheung, R. W. M. and Lo D. O. K.(2011), “Use of time domain reflectometry

for quality control of soil nailing works,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, doi:10.1061/ (ASCE) GT.1943-5606.0000549

Demonstration Project 103(1999), “Design & Construction Monitoring Of Soil Nail Walls” publication No. Fhwa-If-99-026

Gong, J., Jayawickrama, P. W., and Tinkey, Y. (2006). “Nondestructive Evaluation Of Installed Soil Nails.” Journal Of The Transportation Research Board, Vol. (1976), PP.104-PP.113.

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. (SCI, EI).

Lee ,C.-F. (2007). “Independent review of use of non-destructive testing in quality control in soil nailing works” GEO Report No. 219). Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 112 p.

Lin, C.-P., Chung, C.-C., Tang, S.-H., and Lin, C.-H., (2007), “Some innovative developments of TDR technology for geotechnical monitoring,” 7th International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, September 24-27, 2007, Boston, MA.

Tang, T. and Yeung, A. T., (2006), “Full-Scale Field Testing of Surface Waves - TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles, Proc. TDR 2006, Purdue University”, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 45.

Zostrich Geotechnical, USA.(2011). “TDR Verified Rock Bolt And Soil Nail Length”. Retrieved from

[http://www.zostrich.com/Monitoring\\_PDF/tdr\\_bolt\\_length.pdf](http://www.zostrich.com/Monitoring_PDF/tdr_bolt_length.pdf)