

# 非破壞性檢測技術於 山坡地安全檢查之應用(二)

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十五年十二月



PG9502-0214

095301070000G3202

## 非破壞性檢測技術於 山坡地安全檢查之應用(二)

受委託者：財團法人中興工程顧問社

研究主持人：冀樹勇

協同主持人：高憲彰

研究員：葛文忠

研究助理：林金成

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十五年十二月





ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH  
INSTITUTE MINISTRY OF THE INTERIOR  
RESEARCH PROJECT REPORT

**Application of NDT Techniques in  
Safety Investigation of Slopes ( II )**

BY

SHU YUAN CHI  
HSIEN CHANG KAO  
WEN CHUNG KO  
CHIN CHENG LIN

December 15, 2006

## 目次

表次.....	I	V
圖次.....		V
照片次.....		XII
摘要.....		XIV
英文摘要.....		XIX
第一章 緒論.....	1	
第一節 計劃緣起及前期研究成果.....	1	
第二節 本期計劃關鍵問題.....	3	
第三節 計畫目的及內容.....	5	
第二章 文獻蒐集及整理.....	7	
第一節 擋土牆非破壞檢測方法回顧與評估.....	7	
第二節 土(岩)釘非破壞檢測方法回顧與評估.....	12	
第三節 非破壞檢測儀器設備.....	33	
第三章 擋土牆非破壞檢測方法應用驗證.....	45	
第一節 非破壞檢測方法原理與設備.....	45	
第二節 物理模型製作.....	56	
第三節 鋼筋保護層厚度檢測試驗.....	58	
第四節 鋼筋搭接位置檢測試驗.....	81	
第五節 深層鋼筋位置檢測試驗.....	89	
第六節 鋼筋尺寸檢測試驗.....	93	
第七節 震波測勘試驗.....	98	

第八節	鋼筋檢測儀試驗 .....	122
第九節	鋼筋腐蝕檢測應用評估 .....	132
第十節	驗證資料結論 .....	135
第四章	土(岩)釘非破壞檢測方法應用驗證 .....	139
第一節	非破壞檢測方法原理與設備 .....	139
第二節	物理模型製作 .....	142
第三節	土(岩)釘灌漿品質檢測試驗 .....	144
第四節	驗證資料結論 .....	168
第五節	TDR 檢測方法評估 .....	170
第六節	微型樁檢測應用評估 .....	176
第五章	現地試驗工作 .....	183
第一節	擋土牆案例一試驗結果 .....	183
第二節	擋土牆案例二試驗結果 .....	195
第三節	擋土牆案例三試驗結果 .....	199
第四節	土(岩)釘案例試驗結果 .....	204
第五節	現地試驗工作結論 .....	220
第六章	標準作業模式 .....	221
第一節	透地雷達法應用於鋼筋探查 .....	221
第二節	折射震測法應用於鋼筋保護層厚度檢測 .....	230
第三節	敲擊回音法應用於土(岩)釘灌漿完整性檢測 .....	238

第七章 結論與建議.....	247
第一節 結論 .....	247
第二節 建議 .....	250
附錄一 物理模型製作過程照片 .....	253
附錄二 第一次專家座談會專家意見 .....	257
附錄三 第二次專家座談會專家意見 .....	261
附錄四 期中審查專家意見 .....	265
附錄五 期末審查專家意見 .....	271
附錄六 坡地社區防災教育宣導活動 .....	277
參考書目 .....	283

表次

表 2-1	數值分析參數 .....	1 7
表 2-2	灌漿品質分級 .....	2 8
表 2-3	樹脂錨桿分級 .....	2 9
表 3-1	擋土牆物理模型總表 .....	5 6
表 3-2	鋼筋保護層厚度檢測結果(一) .....	8 0
表 3-3	折射震測法檢測結果 .....	10 2
表 3-4	鋼筋保護層厚度檢測結果(二) .....	12 0
表 3-5	鋼筋保護層厚度檢測結果(三) .....	12 6
表 3-6	檢測方法一般說明表 .....	13 5
表 3-7	檢測方法適用範圍說明表 .....	13 8
表 4-1	土(岩)釘物理模型總表 .....	14 3
表 4-2	數值模擬材料參數 .....	14 8
表 4-3	微型樁適用檢測方法說明表 .....	18 1

## 圖次

圖 2-1	X-ray 成像資料.....	8
圖 2-2	鋼筋 tomogram .....	1 1
圖 2-3	裸露鋼筋超音波回波記錄.....	1 3
圖 2-4	土(岩)釘震動形式.....	1 4
圖 2-5	鋼棒頻散曲線.....	1 5
圖 2-6	前人研究數值模型.....	1 6
圖 2-7	土(岩)釘頻散曲線.....	1 7
圖 2-8	土(岩)釘應力波的衰減.....	1 8
圖 2-9	物理模型試驗結果.....	2 0
圖 2-10	土(岩)釘頻散曲線與圍岩強度的關係.....	2 1
圖 2-11	土(岩)釘應力波衰減與圍岩強度的關係.....	2 2
圖 2-12	土(岩)釘頻散曲線與灌漿材料強度的關係.....	2 3
圖 2-13	土(岩)釘應力波衰減與灌漿材料強度的關係.....	2 4
圖 2-14	敲擊回音法案例資料.....	2 6
圖 2-15	敲擊回音法案例資料頻譜.....	2 7
圖 2-16	振動頻率(基頻)與荷載關係圖.....	3 0
圖 3-1	折射震測方式示意圖.....	5 1
圖 3-2	折射震測理論走時-支距圖.....	5 3
圖 3-3	零支距震測方式示意圖 (ASTM C1383) .....	5 4
圖 3-4	擋土牆模型示意圖.....	5 7
圖 3-5	既有一號模型透地雷達剖面.....	6 0

圖 3-6	既有模型透地雷達繞射時間資料 .....	6	1
圖 3-7	既有二號模型透地雷達剖面 .....	6	2
圖 3-8	既有三號模型透地雷達剖面 .....	6	3
圖 3-9	既有四號模型透地雷達剖面 .....	6	4
圖 3-10	既有五號模型透地雷達剖面 .....	6	4
圖 3-11	A 模型透地雷達測線分布圖 .....	6	5
圖 3-12	A 模型橫向測線透地雷達剖面 .....	6	6
圖 3-13	A 模型縱向測線透地雷達剖面 .....	6	9
圖 3-14	A 模型縱向測線鋼筋保護層探查結果 .....	7	0
圖 3-15	B 模型透地雷達測線分布圖 .....	7	1
圖 3-16	B 模型橫向測線透地雷達剖面 .....	7	2
圖 3-17	B 模型縱向測線透地雷達剖面 .....	7	4
圖 3-18	B 模型縱向測線鋼筋保護層探查結果 .....	7	5
圖 3-19	透地雷達三維資料處理程式 .....	7	6
圖 3-20	透地雷達三維資料 .....	7	7
圖 3-21	C 模型透地雷達測線分布圖 .....	7	8
圖 3-22	C 模型橫向測線透地雷達剖面 .....	8	0
圖 3-23	搭接鋼筋理論繞射波 .....	8	1
圖 3-24	A 模型搭接鋼筋透地雷達剖面 .....	8	2
圖 3-25	A 模型鋼筋繞射時間寬度圖 .....	8	3
圖 3-26	D16 鋼筋繞射時間三維分布圖 .....	8	4



圖 3-27	B 模型搭接鋼筋透地雷達剖面 .....	8	4
圖 3-28	B 模型鋼筋繞射時間寬度圖 .....	8	5
圖 3-29	D19 鋼筋繞射時間分布圖 .....	8	6
圖 3-30	C 模型搭接鋼筋透地雷達剖面 .....	8	7
圖 3-31	C 模型鋼筋繞射時間寬度圖 .....	8	7
圖 3-32	D29 鋼筋繞射時間分布圖 .....	8	8
圖 3-33	模型 C 透地雷達剖面 .....	8	9
圖 3-34	資料處理後透地雷達剖面 (D29) .....	9	0
圖 3-35	資料處理後透地雷達剖面 (D19) .....	9	1
圖 3-36	資料處理後透地雷達剖面 (D16) .....	9	2
圖 3-37	鋼筋繞射距離說明圖 .....	9	3
圖 3-38	鋼筋半徑與支距-走時比較圖 .....	9	4
圖 3-39	既有一號模型鋼筋半徑與支距-走時比較圖 .....	9	5
圖 3-40	鋼筋透地雷達剖面比較圖 .....	9	6
圖 3-41	鋼筋繞射波時間-展距擬合圖 .....	9	7
圖 3-42	折射震波試驗探勘佈置圖一 .....	9	8
圖 3-43	折射震波試驗資料一 .....	100	
圖 3-44	折射震波試驗走時-支距資料一 .....	101	
圖 3-45	反射震波試驗探勘佈置圖一 .....	103	
圖 3-46	反射震波試驗資料一 .....	104	
圖 3-47	折射震波試驗探勘佈置圖二 .....	105	

圖 3-48	折射震波試驗資料二 .....	106
圖 3-49	波形紀錄放大比較圖 .....	107
圖 3-50	A 模型折射震波試驗走時-支距資料.....	109
圖 3-51	B 模型折射震波試驗走時-支距資料.....	110
圖 3-52	C 模型折射震波試驗走時-支距資料.....	111
圖 3-53	反射震波試驗探勘佈置圖二 .....	112
圖 3-54	A 模型反射震波試驗資料頻譜 .....	114
圖 3-55	反射震波試驗資料頻譜比較圖 .....	115
圖 3-56	B 模型反射震波試驗資料頻譜 .....	117
圖 3-57	C 模型反射震波試驗資料頻譜 .....	119
圖 3-58	頻譜資料修正係數 .....	121
圖 3-59	A 模型鋼筋檢測儀檢測結果 .....	123
圖 3-60	B 模型鋼筋檢測儀檢測結果 .....	124
圖 3-61	C 模型鋼筋檢測儀檢測結果 .....	125
圖 3-62	A 模型鋼筋尺寸檢測結果 .....	129
圖 3-63	B 模型鋼筋尺寸檢測結果 .....	130
圖 3-64	C 模型鋼筋尺寸檢測結果 .....	131
圖 3-65	前期 F 模型鋼筋腐蝕電位等值圖.....	132
圖 3-66	透地雷達剖面比較圖 .....	133
圖 4-1	土(岩)釘模型示意圖 .....	142
圖 4-2	基樁完整性檢測回波特性和 .....	146

圖 4-3	土(岩)釘數值分析模型 .....	147
圖 4-4	土(岩)釘數值模型回波資料(一) .....	149
圖 4-5	土(岩)釘數值模型回波資料(二) .....	150
圖 4-6	土(岩)釘數值模型回波資料(三) .....	151
圖 4-7	既有土(岩)釘模型檢測結果(3m) .....	152
圖 4-8	既有土(岩)釘模型檢測結果(4m) .....	153
圖 4-9	既有土(岩)釘模型檢測結果(6m) .....	154
圖 4-10	既有土(岩)釘模型檢測頻譜(6m) .....	155
圖 4-11	A 號土(岩)釘物理模型檢測結果 .....	157
圖 4-12	B 號土(岩)釘物理模型檢測結果 .....	159
圖 4-13	C 號土(岩)釘物理模型檢測結果 .....	161
圖 4-14	D 號土(岩)釘物理模型檢測結果 .....	163
圖 4-15	E 號土(岩)釘物理模型檢測結果 .....	165
圖 4-16	F 號土(岩)釘模型檢測結果 .....	167
圖 4-17	前期土釘模型時域反射波形 .....	171
圖 4-18	TDR 現地佈置示意圖 .....	171
圖 4-19	TDR 試驗資料一 .....	173
圖 4-20	TDR 試驗資料二 .....	174
圖 4-21	表面反射法資料 .....	177
圖 4-22	脈波反應法資料 .....	179
圖 5-1	案例一 A 擋土牆透地雷達試驗資料 .....	188

圖 5-2	案例一 B 擋土牆透地雷達試驗資料 .....	190
圖 5-3	案例一 C 擋土牆透地雷達試驗資料 .....	192
圖 5-4	案例一 D 擋土牆透地雷達試驗資料 .....	194
圖 5-5	案例二擋土牆標準設計圖 .....	195
圖 5-6	案例二透地雷達試驗資料一 .....	198
圖 5-7	案例二透地雷達試驗資料二 .....	198
圖 5-8	案例三擋土牆標準設計圖 .....	200
圖 5-9	案例三透地雷達試驗資料 .....	203
圖 5-10	岩釘案例 A 檢測資料 .....	205
圖 5-11	岩釘案例 B 檢測資料 .....	206
圖 5-12	岩釘案例 C 檢測資料 .....	207
圖 5-13	岩釘案例 D 檢測資料 .....	208
圖 5-14	岩釘案例 E 檢測資料 .....	209
圖 5-15	岩釘案例 F 檢測資料 .....	210
圖 5-16	岩釘案例 G 檢測資料 .....	211
圖 5-17	岩釘案例 H 檢測資料 .....	212
圖 5-18	岩釘案例 H 檢測資料頻譜 .....	213
圖 5-19	岩釘案例 I 檢測資料 .....	214
圖 5-20	岩釘案例 I 檢測資料頻譜 .....	215
圖 5-21	岩釘案例 J 檢測資料 .....	217
圖 5-22	岩釘案例 J 檢測資料頻譜 .....	217

圖 5-23	岩釘案例 K 檢測資料 .....	218
圖 5-24	岩釘案例 L 檢測資料 .....	219

照片次

照片 2-1	GSSI 透地雷達系統 .....	3	4
照片 2-2	MALA 透地雷達系統 .....	3	5
照片 2-3	EKKO 透地雷達系統 .....	3	6
照片 2-4	IEI 檢測儀 .....	3	7
照片 2-5	DOCTer 檢測系統 .....	3	7
照片 2-6	PIES 檢測系統 .....	3	8
照片 2-7	OLSON 檢測系統 .....	3	9
照片 2-8	Introsonic 檢測系統 .....	3	9
照片 2-9	iTECS 彈性波檢測系統 .....	4	0
照片 2-10	SINO-NDT-IE 檢測儀 .....	4	1
照片 2-11	Profometer 5 檢測儀 .....	4	2
照片 2-12	Reinforce-BAR Logger 檢測儀 .....	4	2
照片 2-13	PS 200 Ferrosan System 檢測儀 .....	4	3
照片 3-1	SIR3000 透地雷達主機 .....	4	9
照片 3-2	高頻透地雷達天線 .....	4	9
照片 3-3	透地雷達模型試驗過程 .....	5	8
照片 3-4	既有一號模型外觀 .....	5	9
照片 3-5	折射震波試驗過程 .....	9	9
照片 3-6	鋼筋檢測儀試驗過程(一) .....	122	
照片 3-7	鋼筋檢測儀試驗過程(二) .....	127	
照片 4-1	TDR 鋼筋試體 .....	172	
照片 4-2	TDR 檢測設備 .....	174	

照片 4-3	音波反射法試驗過程 .....	178
照片 5-1	案例一社區外觀 .....	183
照片 5-2	案例一 A 擋土牆外觀 .....	184
照片 5-3	案例一 A 擋土牆局部裂縫 .....	184
照片 5-4	案例一 B 擋土牆外觀 .....	185
照片 5-5	案例一 C 擋土牆外觀 .....	185
照片 5-6	案例一透地雷達探查 .....	186
照片 5-7	案例一 D 擋土牆外觀 .....	186
照片 5-8	案例二透地雷達試驗過程 .....	196
照片 5-9	案例三擋土牆外觀 .....	199
照片 5-10	案例三透地雷達試驗過程 .....	201
照片 5-11	岩釘案例 I 拔出驗證照片一 .....	215
照片 5-12	岩釘案例 I 拔出驗證照片二 .....	216

## 摘 要

關鍵詞：擋土牆、土(岩)釘、非破壞性檢測、透地雷達法、敲擊回音法

### 一、研究緣起

國內目前針對山坡地擋土設施之檢查大多以目視檢測為主，惟目視檢查僅能觀察結構物表面的不正常跡象，至於擋土牆厚度及鋼筋量是否足夠、土(岩)釘長度及灌漿是否確實、地錨長度及預力是否依設計圖施工、混凝土老化及鋼筋腐蝕狀況、裂縫深度及擋土牆背填是否產生空洞等資訊，均無法由表面之目視檢測獲得，必須藉由其他的儀器設備或探查方法進行檢測，以便能在短時間內取得更多資料供工程人員研判擋土結構是否有異常狀況發生。

非破壞性檢測(Nondestructive Testing, NDT)係利用電磁波(如透地雷達；簡稱 GPR)、應力波(如敲擊回音法)、超音波、電流(如鋼筋腐蝕檢測)等原理，在不破壞結構體之情況下檢查結構物尺寸、可在短時間內快速評估結構物內部劣化狀況及缺陷的一種方式，在歐美先進國家已廣泛應用於工程品質及材料檢驗。因此若能應用此種檢測技術來檢查擋土設施的狀況，當可有效查知及掌握擋土設施可能存在之安全問題，預先擬訂適當的因應計畫或補強措施，降低山坡地社區災害之風險。

### 二、研究方法與過程

本計畫目的係針對鋼筋混凝土擋土牆及土(岩)釘品質檢驗，就目前檢測技術中選擇較適用者辦理進一步之驗證測試，包括透地



雷達、敲擊回音法等技術，透過物理模型試驗及現地檢測之測試，驗證各項技術應用於山坡地擋土設施檢測之可行性、了解其精度誤差範圍，並對可能影響檢測結果之因素進行探討，建立檢測技術及標準作業模式，以供工程界參考。

前期研究成果顯示包含透地雷達與敲擊回音等非破壞檢測方法可有效了解擋土設施之施工品質與內部現況。惟對於較小的保護層厚度、鋼筋搭接、深層鋼筋、鋼筋尺寸、鋼筋鏽蝕及土（岩）釘內部灌漿完整性等檢測應用仍顯不足。故本期研究方向及內容係針對上述關鍵問題，採用新穎檢測設備或檢測方法進行適用性研究。

### 三、重要發現

- (1) 採高頻透地雷達天線進行擋土牆鋼筋保護層厚度、搭接位置、深層鋼筋等探查應用，可獲得相當準確的檢測資料，特別可適用於極小厚度檢測，且檢測方式不受混凝土表面不平整、粉塵及裝飾材料阻絕等影響。惟鋼筋間距之疏密將影響檢測結果，一般而言，鋼筋間距大於鋼筋保護層厚度時，所得檢測結果較為準確。而緊密的表層鋼筋排列將會干擾雷達入射波，使得深層反射波微弱，影響第二層及第三層鋼筋探查結果。
- (2) 進行鋼筋尺寸檢測時，採用目前商用透地雷達設備仍不足以區分小尺寸鋼筋。而採用渦電流形式鋼筋檢測儀（Covermeter）進行鋼筋保護層探查時，即使鋼筋緊密排列的狀況下，亦可應用於鋼筋尺寸檢測及極小保護層的探查，惟探查資料無法進行鋼筋定位。

- (3) 地球物法探勘方法中的折射震測與零支距反射震測，兩者均可有效地應用於鋼筋保護層厚度檢測，且較小的保護層厚度、緊密排列的鋼筋及較大的鋼筋尺寸等特殊狀況下，折射波及反射波較為顯著，檢測結果準確度較高。
- (4) 透地雷達方法仍無法進行鋼筋腐蝕初期現象檢測，推估因鋼筋腐蝕初期僅表層生成環狀剝離的氧化鐵，而此時環狀氧化鐵尺度相當微小，並非雷達波可辨認，但一但時間較為久遠，鋼筋軸周圍裂縫生成，嚴重時，局部裂縫將彼此穿透連接，形成局部內部裂縫發達區域或水平一致性裂隙，則應可採透地雷達或敲擊回音法進行內部局部破壞範圍或水平裂隙的探查。
- (5) 敲擊回音法應可有效地檢測土(岩)釘灌漿完整性，尤其對於局部灌漿的土(岩)釘，檢測資料可有效地反應漿體包覆情況，可根據時域資料中反射波的時距，並選擇合理回波波速，估算未灌漿段長度及漿體包覆長度。一般而言，灌漿狀況較為簡易時，可獲得較準確的檢測結果，若漿體包覆狀況較為複雜時，則僅能獲得鄰近表面的包覆狀況。
- (6) 既有 TDR 檢測方法需預埋一條與土釘等長度的同軸電纜，並進行同軸電纜長度量測。此方式僅了解電纜長度，無法得知真實土釘長度。香港近期相關研究與本研究均直接檢測土釘本體，此方式可完全杜絕既有方法的缺點，且驗證結果顯示土釘底部的 TDR 回波明顯，回波走時可用以估算土釘埋設長度。惟檢測方式需採預埋

單股線或對鍵體進行處理，仍不適用於既有土（岩）釘檢測。

- (7) 微型樁結構與基樁類似，故可應用基樁檢測方式進行施工品質了解，目前國內較常採用之基樁非破壞檢驗方法為埋管法與表面反射法。惟埋管法需事先在鋼筋籠內裝設數支 PVC 管，對於微型樁而言，並不適合。表面反射法係樁頭以鐵鎚敲擊，在鄰近位置以探頭收錄反射資料，根據反射波形及發生時間位置，研判樁身之長度、斷裂、縮頸與擴頸等缺陷。此方法無須任何前置作業，且施測快速，較適用於微型樁檢測。

#### 四、主要建議事項

##### (一) 立即可行建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：行政院經濟部、交通部、內政部、水保局。

- (1) 建立透地雷達應用於鋼筋混凝土擋土牆檢測技術及標準作業模式，供工程檢測人員有所依循。
- (2) 建立敲擊回音法應用於鋼筋混凝土擋土牆檢測技術及標準作業模式，供工程檢測人員有所依循。

##### (二) 中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：行政院經濟部、交通部、內政部、水保局。

- (1) 本計劃所採用非破壞檢測方法，僅能針對可觸及擋土牆

的部分進行探查。對於被表土覆蓋的擋土牆底板部分，仍無法進行探查，惟此部份對於結構安全檢查亦相當重要，建議未來可蒐集相關探查方法並進行適用性研究。

- (2) 本計劃係應用非破壞檢測方法於鋼筋混凝土擋土牆檢測的可行性研究，目前已證實為透地雷達與敲擊回音等方法適用性應無疑問，且資料準確度亦相當高。惟擋土牆形式相當多樣，且目前國家重大工程中，許多工址擋土設施均採生態工法，建議宜針對各形式擋土構造進行資料蒐集，並了解非破壞檢測技術應用之可行性。
- (3) 對於山坡地社區安全檢查而言，大多數人均了解擋土結構檢測的重要性，但對於發生問題的擋土牆而言，邊坡穩定與地質現況的了解亦為重要項目之一。目前國內幾個較重要的坡地問題案例，除一般結構檢測外，多採長期監測邊坡滑動作為監控手段，針對地質狀況的了解，除鑽探方法外，並無較實用的探查方法，此課題值得進一步探討。
- (4) 對於土(岩)釘的埋設長度及灌漿完整性檢測對於工程品質驗收及安全檢查相當重要。惟目前大規模坡地開發工程及深開挖工程，亦多採用地錨工法作為穩定支撐方式。目前國內外並無適用的非破壞檢測方法，惟本研究認為此需求相當殷切，值得過內工程界重視建議及研究。

## ABSTRACT

Keyword: retaining wall, soil nail, NDT, GPR, Impact Echo

The main purpose of this project is to improve the limitation and restriction of non-destructive technology applied on the quality investigation of the retaining wall and the soil nail. The high frequency GPR antenna and some geophysical methods are adopted as the major survey tools in the study. These methods were applied in the detail investigation of rebar location, concrete cover thickness, rebar size of retaining wall and the grouting quality of soil nail. The test results with the physical models were verified to be useful and accurate. The restrictions and limitations of these methods were thus identified through the in-situ operation. The conclusions can be summarized as:

1. GPR is a useful and efficient tool for locating the rebars. The distinct diffraction wave in GPR profile could be recognized as the rebar. The small rebar spacing would interfere the incident radar wave and result in poor deep reflection and make the interpretation difficult.
2. The GPR test data showed the minor differences of diffraction wave could not provide evidence enough for rebar size recognition. On the contrary, the investigation results using the covermeter showed good consistency with the physical models.
3. The seismic refraction method was applied for investigating the cover depth. The verification results showed this method is quite suitable for the critical condition, like small cover depth, small rebar spacing and large size rebar.
4. Impact echo method is verified to be a suitable method for the grouting quality checking. The reflection from the interface of the grouting boundary could be used for estimating the unbond length.
5. The existing TDR investigation method was revised for checking the soil nail rather than the co-axial cable. The reflection time of pulse from the bottom of the steel bar was verified to be consistency with the model length. This test method is still not suitable for the existing soil nail.



## 第一章 緒 論

### 第一節 計劃緣起及前期研究成果

目前國內針對山坡地擋土設施之檢查大多以目視檢測為主，惟目視檢查僅能觀察結構物表面的不正常跡象，至於擋土牆厚度及鋼筋量是否足夠、土（岩）釘長度及灌漿是否確實、地錨長度及預力是否依設計圖施工、混凝土老化及鋼筋腐蝕狀況、裂縫深度及擋土牆背填是否產生空洞等資訊，均無法由表面之目視檢測獲得，必須藉由其他的儀器設備或探查方法進行檢測，以便能在短時間內取得更多資料供工程人員研判擋土結構是否有異常狀況發生。

非破壞性檢測（Nondestructive Testing，NDT）係利用電磁波（如透地雷達；簡稱 GPR）、應力波（如敲擊回音法）、超音波、電流（如鋼筋腐蝕檢測）等原理，在不破壞結構體之情況下檢查結構物尺寸、可在短時間內快速評估結構物內部劣化狀況及缺陷的一種方式，在歐美先進國家已廣泛應用於工程品質及材料檢驗。目前國內非破壞檢測技術則大多應用於材料檢驗或一般建築結構、隧道、水庫、電廠等之安全評估工作，較少應用於山坡地安全檢查。本研究第一期計劃工作內容包含選定適用之非破壞檢測方法，並分別針對檢測技術應用於鋼筋混凝土擋土牆及土釘檢測的適用性進行相關研究，期在不破壞結構體且在短時間內獲得結構物施工品質、內部劣化狀況及缺陷的快速檢測資料。一般鋼筋混凝土擋土牆進行安全檢核時，評估人員的參考資料除了表面可以目視獲得的外

觀現況外，亦需要了解其中的鋼筋量、混凝土強度、擋土牆內部及背填的狀況，以利進行整體研判。對於上述相關需求，前期擋土牆研究結果顯示：應用透地雷達、敲擊回音法、施密特錘法及鋼筋腐蝕電位法可有效檢測鋼筋混凝土擋土牆內部鋼筋排列位置及深度、擋土牆厚度、表面裂縫深度、擋土牆背填空洞涵水狀況、混凝土內部缺陷與空洞分布的深度與範圍、混凝土破壞強度及鋼筋腐蝕機率等，並透過物理模型試驗結果證實，該等方法檢測資料誤差約在 10% 以內【內政部建築研究所報告，2005】。另土（岩）釘研究結果顯示：應用敲擊回音法及時域反射法可有效檢測埋設土釘長度，該等方法亦透過物理模型試驗結果證實，檢測資料誤差約在 10% 以內。前期工作並完成相關檢測方法的標準作業模式，提供業界作為參考依循。

上述完成驗證之檢測方法，其操作方式、資料解析度及經濟性應可滿足目前一般鋼筋混凝土擋土設施之施工品質檢驗或安全檢查的需求。惟研究結果顯示，目前之檢測技術對於較小的保護層厚度，應用上仍有限制，且無法進行內部鋼筋尺寸及鋼筋搭接長度之判識與第二、三層鋼筋定位等，需進一步選用適當方法、先進之儀器設備及資料處理方法等，進行檢測技術研究。至於前期土（岩）釘長度檢測結果顯示，應用敲擊回音法進行檢測時，檢測資料受土（岩）釘灌漿材料及施工品質影響亦甚大，需進一步釐清。故本期研究內容係為釐清土（岩）釘圍束材料造成檢測資料的影響，期能了解兩者間關係，並進而建立分級，最終達到以檢測資料進行錨固力的評估。



## 第二節 本期計劃關鍵問題

本計劃接續前期研究計劃，針對擋土牆及土（岩）釘非破壞檢測技術關鍵問題進一步探討。對於擋土牆而言，包含擋土牆內埋設鋼筋尺寸、搭接位置與長度、密集排列鋼筋探查、第二、三層鋼筋定位及較小保護層厚度探查等，尋求適用的檢測方法以供進行探查。對於土（岩）釘而言，關鍵問題則在於土（岩）釘設施灌漿品質、TDR 檢測埋設長度之可行性及檢測技術應用於微型樁之可行性等。

### （1）擋土牆內鋼筋探查關鍵問題

依據前期研究顯示，透地雷達相當適用於鋼筋混凝土擋土牆之探查，對於一般擋土牆檢測而言，應用目前國內常用之透地雷達設備及現有解釋方法大多足敷檢測需求，但對於鋼筋尺寸及搭接長度之研判則尚有困難，且當鋼筋排列較緊密或鋼筋保護層較小時，亦因現有透地雷達天線產生的波長過長，造成反射波重疊而無法解析；此外，因目前商用軟體模組功能有限，對於資料之解析能力亦有所不足，故應用國內現有軟硬體於鋼筋混凝土擋土牆之探查時，尚無法獲得令人十分滿意的檢測結果。

針對上述問題，本期研究除採用目前國外發展完成之新穎設備，以改善目前因波長過長導致解析能力不足之缺點外，並引用傳統震波測勘資料處理方法（包含反射震測及折射震測）於透地雷達資料處理，例如採用移位（migration）方法，經過數值計算，將雙

曲線鋼筋繞射訊號收斂成為單一訊號，便於資料展示及研判，並於計算過程，藉由分析反射強度、繞射波幾何分布及雷達波頻率等資料，進而分析混凝土品質、鋼筋埋設深度、鋼筋尺寸、搭接長度及第二、三層鋼筋對於反射波的影響程度，並藉由專業三維資料處理程式協助，建構鋼筋三維分布模型，並透過室內試驗及現地測試結果之檢討予以進一步之釐清。

另本研究另輔以敲擊回音法進行試驗，並採新穎資料蒐集及處理方式，以了解方法可行性。其中資料蒐集方式係藉由傳統折射震測現地施測布置方式，以一對多的方式（一個敲擊位置,多個接收位置）進行資料蒐集，並採首達波資料處理方式，進行混凝土彈性波速及保護層厚度的計算。

## (2) 土（岩）釘灌漿品質探查關鍵問題

前期研究發現：對於土（岩）釘長度檢測而言，鍵體周圍包覆材料及包覆狀況對於檢測結果影響甚鉅，在高強度水泥砂漿材料及完整包覆條件下，採用敲擊回音法進行檢測時，較難以獲得回波據以研判埋設長度，與國外採樹脂砂漿作為灌漿材料的回波有明顯差異，顯示試驗資料的特性，包含反射波強度及頻率內函，與灌漿材料及施工品質關係甚大，故可利用此一特性進行灌漿品質之檢驗，作為研判錨固效果良窳之參考依據。因此本期研究著重於反射波與鍵體圍束材料包覆比例的關係研究，並經由物理模型試驗結果與數值分析的協助，建立兩者間關係，期能了解灌漿品質，達到非破壞檢測實用目的。

另前期研究亦採 TDR 法進行土（岩）釘長度檢測，檢測精度

雖高，惟檢測方式需採預埋電纜方式，最大缺點為無法應用於老舊土（岩）釘檢測，且由於非直接量測土（岩）釘長度，將埋設電纜作為長度檢測結果恐引起爭議，故本期研究將改進量測方式，擬藉由鍵體表面進行特殊材料包覆的電脈衝試驗，了解電波能量衰減及反射的狀況，以探討在不需預埋電纜的方式下，進行直接量測的可能性。

### 第三節 計畫目的及內容

由於非破壞性檢測方法所運用的介質不同，故有不同的應用標準，此外就材料、使用環境、位置而言，也都有其限制性。以透地雷達為例，其探測原理係利用電磁波在結構體內不同性質材料界面處發生部份反射，接收及處理這些反射訊號即可構成雷達波剖面，用來描述結構體內部構造，惟反射訊號之強弱、材料之不均質性、鋼筋之疏密程度將影響資料之正確性，因此於應用前實有必要對各種檢測技術之適用性進行測試與驗證。

前期研究成果顯示，以非破壞性檢測技術(包含透地雷達、敲擊回音、半電池電位等方法)應用於擋土牆及土（岩）釘設施檢測，透過物理模型及工址實際應用，均可獲得良好檢測結果，且檢測方法具良好之操作性及高經濟性，驗證方法可行性極高。惟研究結果亦顯示，上述非破壞檢測技術之方法及儀器設備仍有部份應用上之限制，需透過進一步之研究予以釐清或改進，以擴大其適用範圍。故本期研究目的係針對前期研究成果不足的部分，採用新穎檢測設備及資料處理方法進行物理模型驗證及工址實際應用，以期完備檢

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

測技術的應用範圍。其中應用於混凝土鋼筋擋土牆檢測範圍包含較密集排列的鋼筋探查、較小保護層的探查、鋼筋施工搭接位置及長度探查、第二三層鋼筋定位等。應用於土(岩)釘檢測範圍包含灌漿品質檢測等，並另外針對微型樁進行非破壞檢測方法應用評估。

## 第二章 文獻蒐集及整理

### 第一節 擋土牆非破壞檢測方法回顧與評估

本研究主旨在於應用非破壞檢測方法於鋼筋混凝土擋土牆檢測，以瞭解可行的方法及檢測資料正確性，主要應用範圍包含內部鋼筋尺寸的探查、較密集排列鋼筋的定位，深層鋼筋的定位及鋼筋腐蝕檢測等，以下說明各適用檢測方法。

一般混凝土結構物鋼筋定位多採透地雷達、渦電流（Eddy Current）方法及敲擊回音法。上述各法原理及適用性說明如下：

#### 1、透地雷達

透地雷達對於非導體材質（如混凝土）內之金屬物件反應極為靈敏，故常用於偵測混凝土內鋼筋分布位置，採用透地雷達施測時，其測線需垂直待測鋼筋走向，其所得施測剖面中，鋼筋繞射訊號係以雙曲線方式呈現，雙曲線頂點即為鋼筋位置，因此可藉由合理波速參數換算埋設深度。根據檢測經驗顯示，透地雷達探查結果極易獲得第一層鋼筋位置及深度，但深層鋼筋訊號與內部瑕疵空洞，因受表層鋼筋訊號干擾，不易檢測；且雷達波探查結果受到鋼筋排列密度與深度影響，一般而言，在固定天線頻率下，愈密集排列的鋼筋，且保護層厚度愈大者，因雷達波繞射訊號互相干擾，較不易獲得探查結果。

## 2、渦電流法

渦電流儀器一般簡稱為鋼筋位置探測儀，該檢測方法係將載有交流電之激發線圈（Driver coil）在混凝土上方移動，當接近鋼筋位置上方時，使得鋼筋引發交變磁場，感應產生旋渦狀電流，稱為渦電流。這些渦電流亦感應交變磁場，以改變拾取線圈（pickup coil）之磁場，因此可藉由感應磁場的變化，推估鋼筋的位置及保護層厚度。本法原理簡單且儀器操作簡便，為目前工程界較常採用的方法，市場上部分設備甚至可直接顯示檢測結果，故使用者廣泛。惟因本法亦為電磁法之一種應用，使用在鋼筋排列密集處時（如主筋配置處），由於磁電效應亦受相鄰鋼筋的干擾等限制，因而造成檢測失敗，故目前此類儀器多用於鋼筋定位及保護層厚度檢測，且無法進行較密集排列之鋼筋位置檢測。

## 3、敲擊回音法

敲擊回音法係量測應力波走時，基於鋼筋折射波速大於混凝土波速的特徵，根據不同展距之波到時間，可求得保護層厚度與鋼筋位置，原理類似應用於地層分層厚度及波速檢測的傳統地表折射震測方法。依前人研究結果，在鋼筋較緊密排列下，其應力波折射明顯，且不受相鄰鋼筋影響，與上述兩方法調查結果有顯著不同。惟此法較大缺點在於資料收集時間需時較長，且須應用較多的資料處理並進行解釋，無法即時獲得檢測結果。

#### 4、其他方法

近年來相關研究領域的學者亦有採用放射線法及應力波探查方法等方法進行應用研究。所謂放射線法係採用 X 射線或伽瑪射線作為射源，直接照射被檢測物體，其中部分射線穿透檢測物體，部分射線被檢測物體吸收，而吸收量與物體密度與厚度等物理性質有關。檢測成像原理係以射線穿透被測物，並投影在底片或螢幕上，藉由投影的灰度呈現，研判內部物體尺寸。根據相關試驗結果顯示：內部鋼筋的成像相當清晰，檢測資料準確度大於 95% 以上【彭朋畿等，2006】。使用本法需特別注意放射性元素的操作安全規則及防護措施，另外檢測前需先檢測鋼筋位置及保護層厚度，且鋼筋混凝土結構物的兩側面必須外露以便進行試驗，此點為本法應用於擋土牆的最大限制。



圖 2-1 X-ray 成像資料

(資料來源：摘錄自彭朋畿等，2006)

另一方面，利用應力波探查混凝土結構物的內部組成與分布，目前仍處於研究階段。目前的研究方向大致上可分為兩類，一是採斷層掃描技術 (Tomography)，第二種方式是採應力波折射法檢測方式。斷層掃描的技術已發展多年，當前在醫學診斷方面運用最多、最普遍，同時也能得到最佳的效果，而應用在土木結構的非破壞檢測方面仍是處於發展階段。探查原理是在結構物表面發射應力波穿過物體內部，在另一測由預先裝設的接收器接收回波，取得走時資料，並且使用波線傳遞理論正確的算出波行路徑，並推求物體內部的波速分布，由於混凝土材料與鋼筋材料的波速差異甚大，因此可由成像圖 (Tomogram) 推估內部鋼筋尺寸，參見圖 2-2【張益喧，2001】。近年來此法亦被應用於其他土木構件探查【王仲宇等，2006】，此法最大限制與放射線法相同，鋼筋混凝土結構物的兩側均必須出露，故不適用於擋土牆檢測。

應力波折射法檢測方式近年來被提出作為鋼筋混凝土結構物內部鋼筋定位的新方法【劉宗豪，2002】。其檢測方式與傳統敲擊回音法類似，最大的不同處在於一對多資料，即針對同一敲擊點，必須收集多個不同位置的資料。該原理類似地球物理方法中的震波折射探勘，應力波在向下傳遞的過程，若遭遇傳波速度較高的介質，在入射角大於等於臨界角時，將發生折射，大部分應力波能量將沿著該介質傳遞返回地表，故可藉由地表接收的記錄推估介質深度及材料波速。應力波折射法目的是埋藏鋼筋的位置與深度，根據相關研究結果顯示：在保護層小於 10cm 的狀況下，檢測資料誤差不大於 5%【劉宗豪等，2004】。



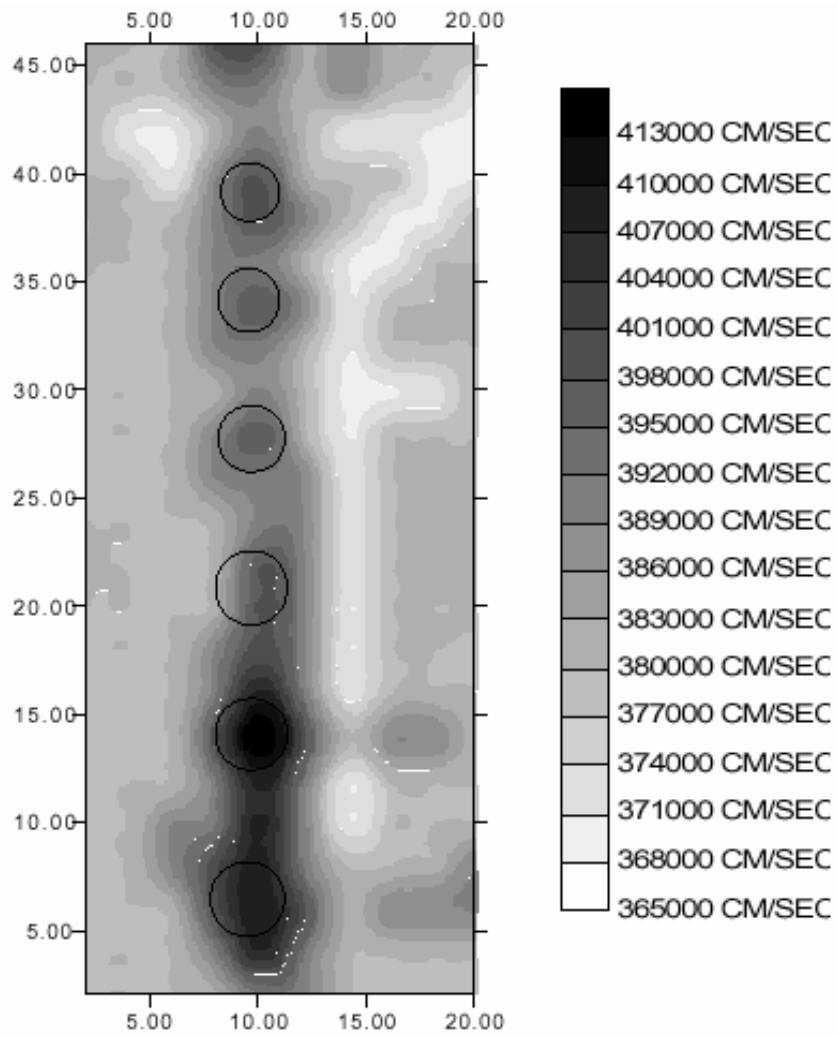


圖 2-2 鋼筋 tomogram

(資料來源：摘錄自張益暄，2001)

## 第二節 土(岩)釘非破壞檢測方法回顧與評估

土釘工法於 1970 年初期由法國開使使用，發展至今已逾三十年，在西方國家已被廣泛應用邊坡穩定及基礎開挖等工程，近十餘年來，國內邊坡穩定工程應用相當普及，對於邊坡保護及深開挖擋土已有相當成效。土釘施工方式係將特殊之鋼棒或碳纖維棒等鍵體依固定間距植入土層，以產生加勁之土體。植入方式一般先於預定位置鑽孔，鑽孔完成後植入鍵體，之後再以水泥砂漿充填即完成，鍵體本身並無特殊防蝕處理。土釘可用為擋土牆修補工法及土釘噴植工法，近年來土釘加勁擋土牆結構使用益見頻繁，其中較有名的案例為暨南大學校門口邊坡整治工程，該邊坡因集集大地震造成大規模崩塌破壞，事後局部整治範圍採用土釘加勁擋土結構施工，密集的打設土釘及完全灌漿將在較疏鬆土層之邊坡形成一體化之加勁區域，防止邊坡之崩落與滑移，因此足夠的土釘埋設長度與灌漿完整性將成為土釘工法成敗的關鍵。

岩釘鍵體材料大多採鋼棒形式，較少使用鋼索，多用於山岳洞室及岩石邊坡開挖支撐。其錨固方式除灌漿外，有時亦採機械方式，如尾端膨脹錨固等。鍵體防蝕處理除灌漿外，可在表面以環氧樹脂進行塗膜及鍍鋅等。但老舊岩栓可能較少防蝕處理。國內岩栓種類大多分為灌漿岩栓、自鑽式岩栓及摩擦式岩栓，但均以全段水泥砂漿包裹作為防蝕方法，並無其他特殊防蝕處理。

上述錨固類結構應用極為廣泛，其施工規範、設計方法及施工機具、工法等研究發展均已完備，且大量應用於工程界，但對於施

工品質檢驗、安全性檢測及功能耐久性等問題，極少提出作為探討的課題。近年來應用非破壞檢測技術進行土（岩）釘埋設長度及灌漿品質檢測，已逐漸受到重視，其中敲擊回音法及超音波法為建議檢測方法【NCHRP report 477，2002】。

本研究前期工作係採敲擊回音法進行土（岩）釘埋設長度檢測適用性研究，相關研究結果顯示：進行裸筋物理模型試驗時，所得歷時記錄裸筋底部重複反射波明顯，其時距用以計算裸筋長度，試驗結果準確度極高。惟第一個回波與重複反射波之間出現一個較小的高頻訊號，參見圖 2-3，根據其走時反算波速約在 2,000m/sec 至 3,500m/sec 間，遠小於鋼棒縱波波速（約 5,000m/sec），其成因並非來自重複反射或內部缺陷反射，可能係其他因素造成。一般狀況下，此訊號並不會造成檢測的困擾，但若土（岩）釘較短時，重複反射波時間間距較小，該訊號可能會干擾底部反射波，影響檢測資料。

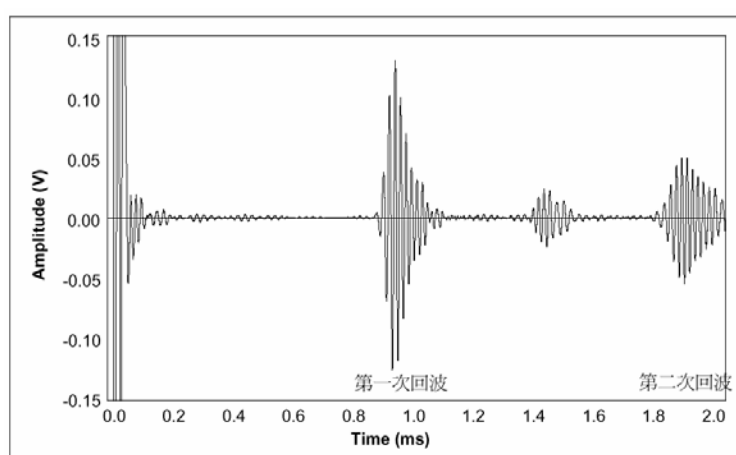


圖 2-3 裸露鋼筋超音波回波記錄

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

超音波導波 (Ultrasonic Guided Wave) 係指在狹長形狀的特定範圍內傳導的超音波，例如在圓柱體結構內沿著軸向傳遞的超音波。前人研究指出導波頻散行為與結構物材料特性的變化有很大的關聯，可藉由其回波分析，了解結構物內部材料變化或腐蝕現況，目前已有成熟的軟硬體設備研製成功並廣泛應用於石化工業及核能工業的管線檢測【Beard 等，2003】。英國倫敦皇家學院非破壞檢測組之 Beard 博士等人首先應用此分析方法於岩釘非破壞檢測相關研究，並採用自行開發完成分析軟體「DISPERSE」進行鋼棒波傳行為分析，分析結果藉由物理模型進行超音波方法測試及驗證。該研究發現在表面光滑的圓柱體鋼棒內部彈性波的傳遞形式相當複雜，依其整體震動形式可歸納為三種，分別為縱波 (Longitudinal Wave)、曲波 (Flexural Wave) 及扭波 (Torsion Wave)，圖 2-4 為縱波與曲波波傳形式示意圖。

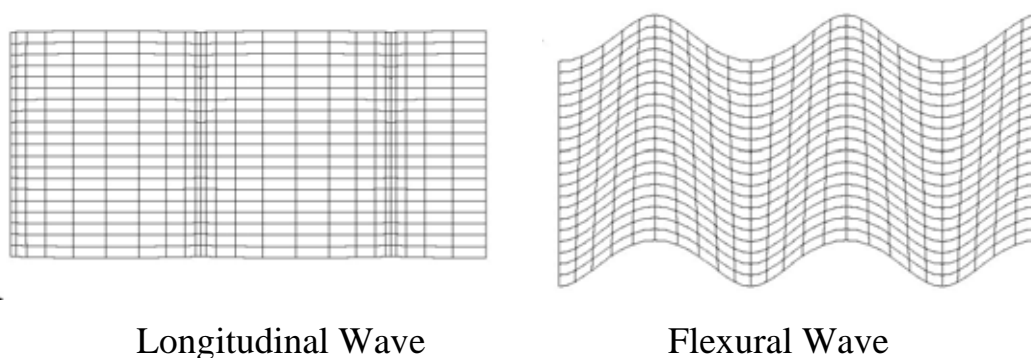


圖 2-4 土 (岩) 釘震動形式

(資料來源：摘錄自 Pavlakovic, 1998)

縱波的介質震動係對稱於圓柱體中心軸，震動形式類似體波中的壓縮波；而曲波介質震動係在圓柱體中心軸兩側有 180 度的相位差，震動形式類似半無線空間中的雷力波，且由於曲波的傳遞速率小於縱波。而一般敲擊回音法及超音波法試驗，係將傳感器裝設於鋼棒頂端截面積上，故量測所得大多為縱波形式。

根據彈性波理論，在層狀介質中傳遞的彈性波具有頻散效應，波的傳遞速度將依頻率而不同。裸露鋼棒亦可視為層狀結構，惟其相鄰的空氣介質勁度與鋼棒性質相去甚大，其頻散效應可能較不明顯，與其他材料分析應用案例較為不同。圖 2-5 為鋼棒波傳行為數值分析結果頻散曲線。圖中縱軸為波速，橫軸為頻率。其中頻率在 100kHz 以下，鋼棒中縱波基本震動模態 L (0,1) 具有最高傳波速度，均約為 5,100m/sec，可視為無頻散效應，所以應用在長度檢測時，此模態之底部回波應最早返回【Beard, 2002】。

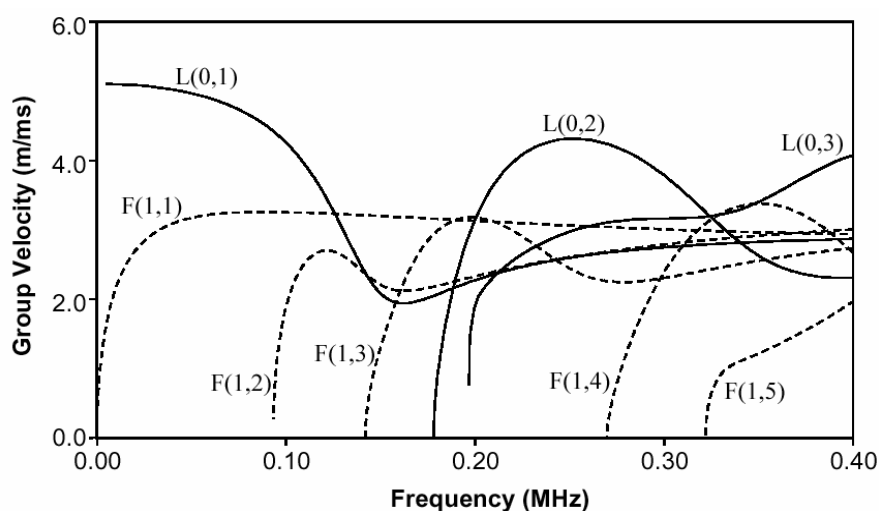


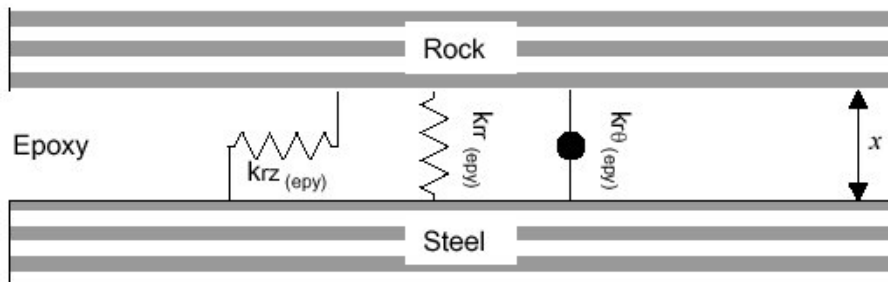
圖 2-5 鋼棒頻散曲線

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

一般敲擊回音法及超音波法檢測資料的底部回波頻率範圍多在 100kHz 以下，故亦屬縱波基本震動模態。超音波法大致上可稱為單頻波，波傳行為較為簡單，並無其他頻率干擾，敲擊回音法的暫態應力波屬多頻波疊加，且主要能量集中在 0 到 50kHz 間，若”這群波”在鋼棒內具明顯頻散效應，則各頻率波將有不同的回波時間，最終將造成分離效應，在檢測資料上就難以挑選明顯波幅的時間間距。

「DISPERSE」係為有限元素分析程式，專用於層狀模型的動態分析，以往曾經成功地應用於模擬金屬管線的震動模態，進而了解管路內部缺陷的影響。圖 2-6 為皇家學院 Beard 博士應用於岩釘的層狀數值模型，分別由鋼材料、灌漿材料 (Epoxy) 及圍岩材料組成。上圖為灌漿完全狀況時，即灌漿材料與鋼棒介面接觸完整時的數值分析模型，圖中簡單地將灌漿材料視為彈簧元素；下圖為考慮實際施工灌漿狀況下，漿液材料與鋼棒間的接觸因材料離析或施工不良，造成彼此間的接觸介面可能有空洞產生，故將灌漿材料與鋼棒介面的接觸狀況以另一個彈簧元素模擬，疊加後將造成彈簧效應折減。表 2-1 為數值分析所使用的參數，其中彈性模數 (E)、密度、波速及博松比等一般的物理參數均可由查表得知；而衰減率則可由物理試驗結果概估，根據前人研究經驗，縱波 (Longitudinal Wave) 的衰減率小於橫波 (Shear Wave)，應力波在混凝土中的衰減又遠大於鋼棒。

(a) Equivalent epoxy layer stiffness:



(b) Equivalent epoxy layer stiffness combined with an interfacial stiffness:

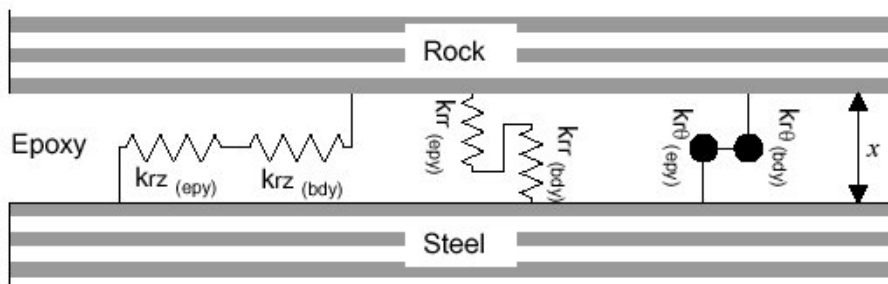


圖 2-6 前人研究數值模型

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

表 2-1 數值分析參數

Property/Material	Steel	Limestone	Rock	Concrete	Epoxy
Modulus, E (GPa)	207.0	40.0	10.0-60.0	30.0	14.0
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7900	2500	2500	2200	2000
Long. Attn. (np/wl)	0.003	0.03	0.03	0.2	0.03
Shear Attn. (np/wl)	0.01	0.1	0.1	0.5	0.1
Long. Vel (m/s)	5845	4360	2190-5370	4100	3070
Shear Vel (m/s)	3180	2520	1265-3100	2300	1640
Poisson Ratio, $\nu$	0.29	0.25	0.25	0.27	0.30

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

圖 2-7 為數值分析結果之頻散曲線。其中鋼棒的直徑為 21.7mm，周圍漿液材料為 epoxy，厚度為 4mm，圍岩為 Limestone。圖中頻率在 100kHz 以下大致上僅存在 L (0,1) 與 F(1,1)兩種震動模態，與裸露鋼棒波傳行為相似，其中縱波基本模態 L (0,1) 在頻率約當 50 至 80kHz 範圍內具最高的波傳速度，且頻散效應不大，波速大約為 4,300m/sec，此值略小於裸露鋼的波速；但小於 30 kHz 之低頻部分，波速可能小於 3,000m/sec，且有嚴重頻散效應，亦即相鄰頻率的波速差異明顯，與圖 2-3 有明顯不同。對於敲擊回音法的暫態應力波而言，因波源為多頻波，且主要頻率集中於低頻，故在土(岩)釘內部傳遞時，各頻率的波群可能以不同速度前進，將造成波群分離，各頻率波先後到達，並無一致性的時間距，將影響判釋結果。

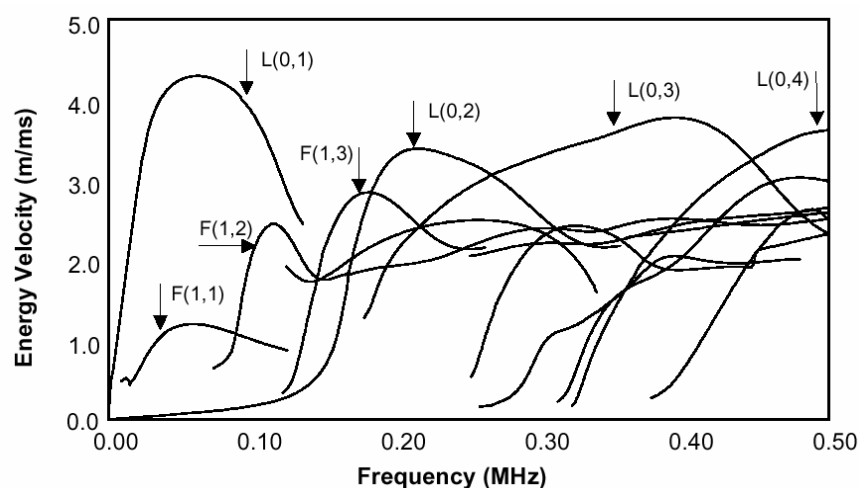


圖 2-7 土(岩)釘頻散曲線

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)



圖 2-8 為數值分析結果之應力波衰減曲線。圖中縱軸為衰減率，代表彈性波每傳遞 1m 的衰減率，其中縱波基本模態  $L(0,1)$  在頻率約當 60 至 70kHz 間，其衰減最小，衰減率約為 50，代表每傳遞 1m，應力波能量降低為原能量的 1/300，故對於 1m 長的岩釘而言，應力波的能量將衰減為激發能量的 1/90,000。在低頻部分的衰減更為嚴重，因此對於敲擊回音法的暫態應力波而言，其激發能量大多集中於低頻部分，故其回波相當微弱。能量衰減最大的因素為應力波經由鋼棒與 epoxy 的介面傳遞至圍岩中，材料本身造成的非彈性衰減效應較低。數值分析結果顯示：在灌漿完全條件下，土（岩）釘內部傳遞的應力波波速與頻率有相當大的關係，且由於能量衰減相當大，使得較低頻的回波能量微弱。

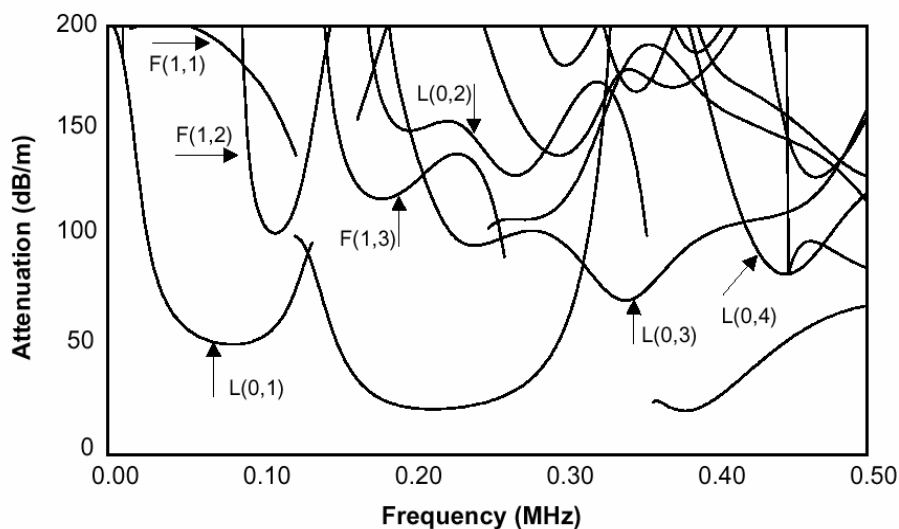


圖 2-8 土（岩）釘應力波的衰減

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

圖 2-9 為物理模型試驗結果。其中 20kHz 波源的試驗資料並無明顯的底部反射波。激發頻率大於 30kHz 之較高頻波源試驗資料顯示底部反射波明顯，根據其走時與模型長度，可反算求得其波傳速度約為 4,300 至 4,400m/sec 間。圖 2-9 中理論波速大致為 3,900 至 4,270m/sec 間，與實測值誤差均小於 10%，顯示該數值分析方法正確，分析結果準確率相當高。

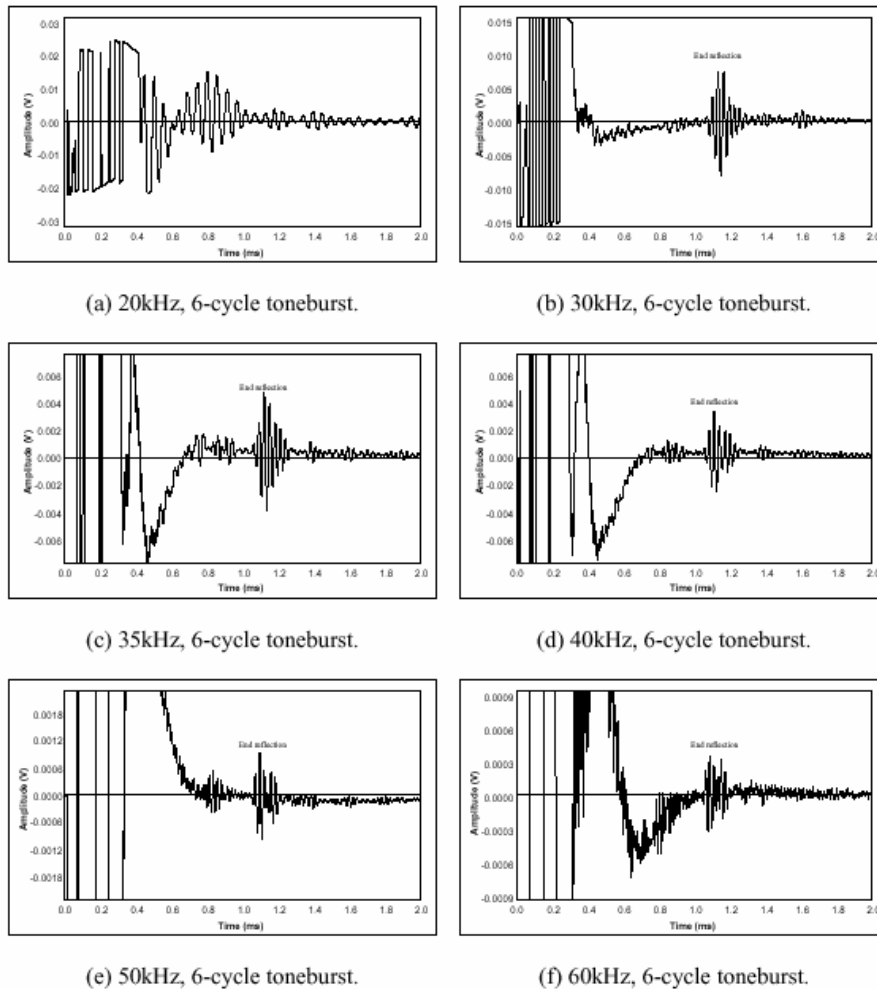


圖 2-9 物理模型試驗結果

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

另為了解圍岩材料對於土（岩）釘波傳的影響，Beard 博士研究小組亦採用數值方法進行波傳速度變異的研究，進一步了解圍岩強度的改變對於岩釘內部傳遞波速及波傳能量衰減的影響。

圖 2-10 顯示當圍岩強度增加時，在低頻部分（約小於 50kHz），土（岩）釘波傳速度將會降低，且小於 20kHz 以下的低頻波速度將會大幅降低，表示頻散效應更加明顯，各頻率回波將會接連出現，不利於檢測應用。惟此效應需在土（岩）釘灌漿完全且漿液強度足夠的條件下，大部分的應力波在鍵體與漿體形成的圓柱體內傳遞，如漿體強度與圍岩材料相似，則傳遞的範圍更大，故形成的整體回波速度更低。

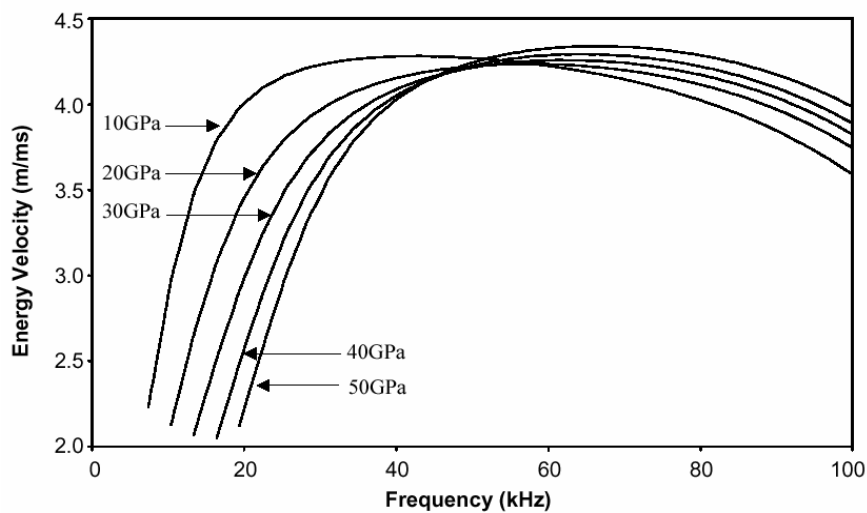


圖 2-10 土（岩）釘頻散曲線與圍岩強度的關係

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

圖 2-11 顯示當圍岩強度增加時，低頻部分（小於 40kHz）之波傳能量衰減將會增加，表示應用應力波法進行檢測時，周圍材料為完整岩盤時之量測條件將遠比土壤者差，終將影響回波能量。但對於大於 40kHz 的高頻波而言，上述物理性質完全相反，波速將隨圍岩強度增加而提昇，而衰減率將隨岩強度增加而減少。本研究採暫態應力波作為波源，其能量多集中於低頻部分，故不利於檢測裝設於完整岩盤且灌漿完全的岩釘。上述回波衰減之主要成因為應力波逸失至周圍岩盤造成。當周圍岩盤材料與灌漿材料、鍵體材料強度相近時，各材料間形成之物理差異性不明顯，故應力波在介面形成之反射能量極小，最終造成回波微弱。

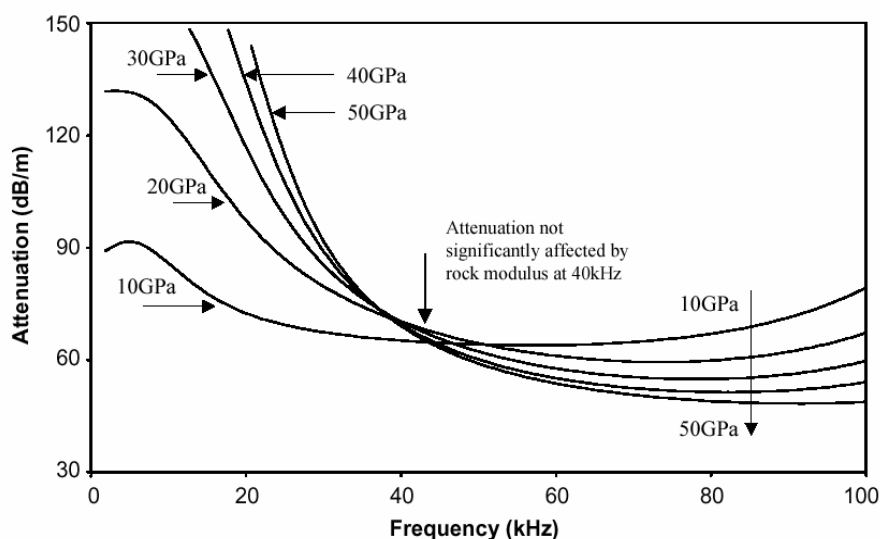


圖 2-11 土（岩）釘應力波衰減與圍岩強度的關係

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

圖 2-12 顯示大致上當灌漿材料強度增加時，回波波速將會降低，且小於 40kHz 以下的低頻波速度將會大幅降低，表示頻散效應更加明顯，各頻率回波將會接連出現，不利於檢測應用。前期研究灌漿材料採水泥砂漿，水灰比分別為 0.5 及 0.6，根據回波估算低頻波速約為 3,600m/sec，與裸露鋼筋波速相去甚遠，顯見有明顯頻散效應，惟因高頻波能量大多已耗散，故未干擾低頻波訊號。上述回波速度降低之主要成因為應力波在灌漿材料與鍵體材料形成之柱狀體中傳遞造成。當灌漿材料、鍵體材料強度相近時，材料間形成之物理差異性不明顯，又因灌漿材料之波速低於鍵體材料，故應力波之波傳速度為兩材料波速綜合效應，最終造成回波速度降低。

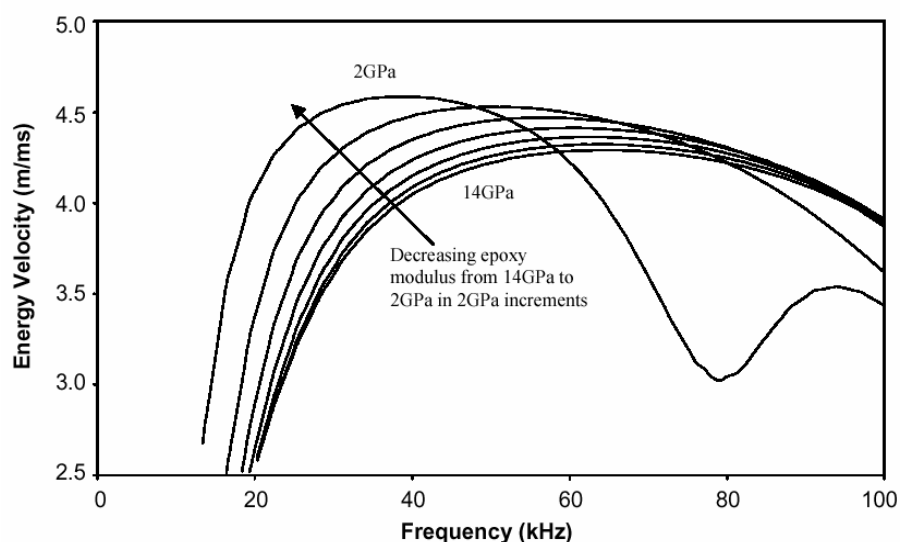


圖 2-12 土（岩）釘頻散曲線與灌漿材料強度的關係

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

圖 2-13 顯示當灌漿材料強度增加時，衰減率將會增加，但是當灌漿材料強度相當低時，在頻率約 20 至 60kHz 間幾乎無衰減效應，波速約為 4,500m/sec，顯示波傳行為相當接近裸露鋼棒。惟國外大多採樹脂砂漿作為灌漿材料，國內土(岩)釘灌漿材料大多為水泥砂漿，兩者材料性質有明顯差別，故水泥砂漿強度之影響仍值得進一步研究。一般而言，高頻波回波衰減較小，此乃因高頻波的波長相對於土(岩)釘幾何尺寸較小，對於材料介面之反應較佳，雖介面物理特性差異較小，對於高頻波而言，仍會形成波導(Wave Guide)作用，應力波被侷限在鍵體內部，僅少量逸失至周圍材料。但對於低頻波而言，波導作用已不存在，故大量逸失至周圍材料，形成嚴重衰減。

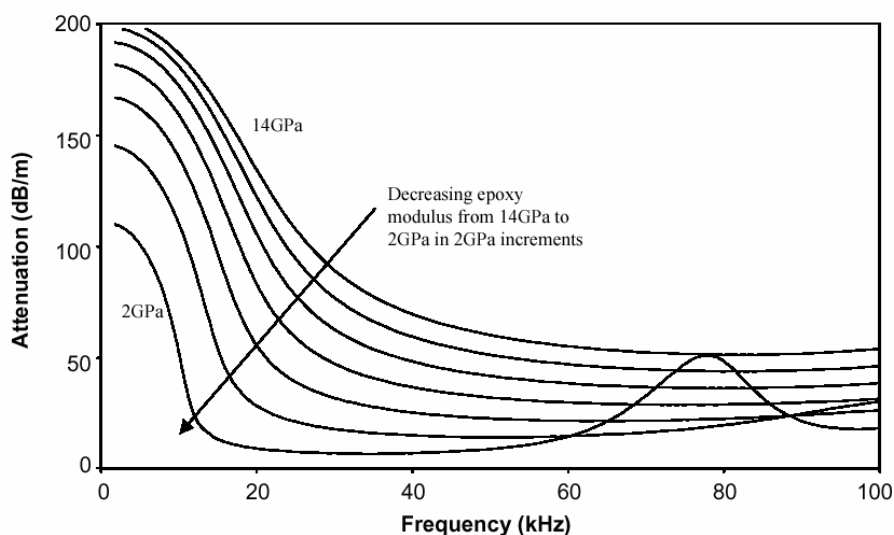


圖 2-13 土(岩)釘應力波衰減與灌漿材料強度的關係

(資料來源：摘錄自 Beard,2002)

### 敲擊回音法相關研究

美國聯邦高速公路局 (the Federal Highway Administration) 與州高速公路與運輸協會 (Association of State Highway and Transportation Officials) 於 2002 年完成的 NCHRP REPORT 477 報告中曾應用敲擊回音法進行岩釘長度及錨固力檢測【NCHRP report 477】。

應用案例係使用達 32 年的預力型鋼棒型地錨，其設計長度為 8.5m，鋼棒表面有 epoxy 防銹塗層。圖 2-14 為三支不同地錨的敲擊回音法試驗資料，圖中標示的  $\Delta t$  係波速採 5,500m/sec 計算求得的理論走時 (約為 0.0031 秒)，記錄中顯示 Bar-1 與 Bar-3 的回波資料較為明顯，Bar-2 的回波雖不清楚，但仍可判釋。

圖 2-15 為三筆試驗資料之傅立葉頻譜，橫軸為頻率，縱軸為正規化振幅。三筆資料在小於 5kHz 以下的低頻部分較為相似，在 4 至 5kHz 之間有一明顯尖峰，應為感應器共振頻率，且三筆資料的特徵頻率間距並不明顯，除此之外，Bar-1 的主要震動頻率約在 16kHz，Bar-2 的主要震動頻率約在 13kHz，Bar-3 的主要震動頻率相當低，約在 3kHz 左右。根據前人研究結果：鋼棒的震動頻率與施加的拉力成正相關，故 Bar-1 的既存預力應為最大，Bar-3 的既存預力應為最小。上述試驗結果並無進一步之破壞試驗證實，惟該報告認為可採用此類方法進行地錨既存預力的初步分類。

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

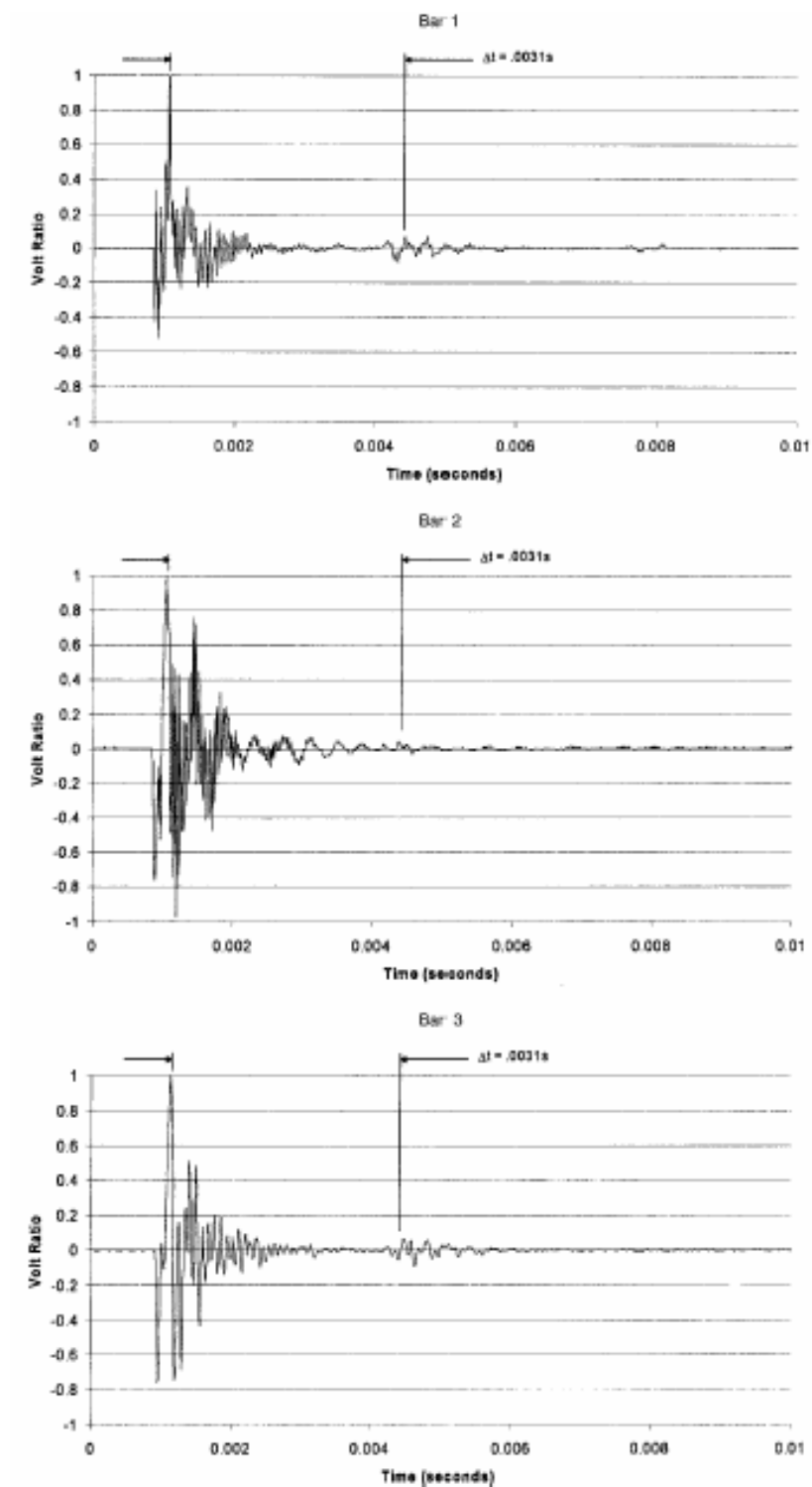


圖 2-14 敲擊回音法案例資料

(資料來源：摘錄自 NCHPR REPORT 477,2002)



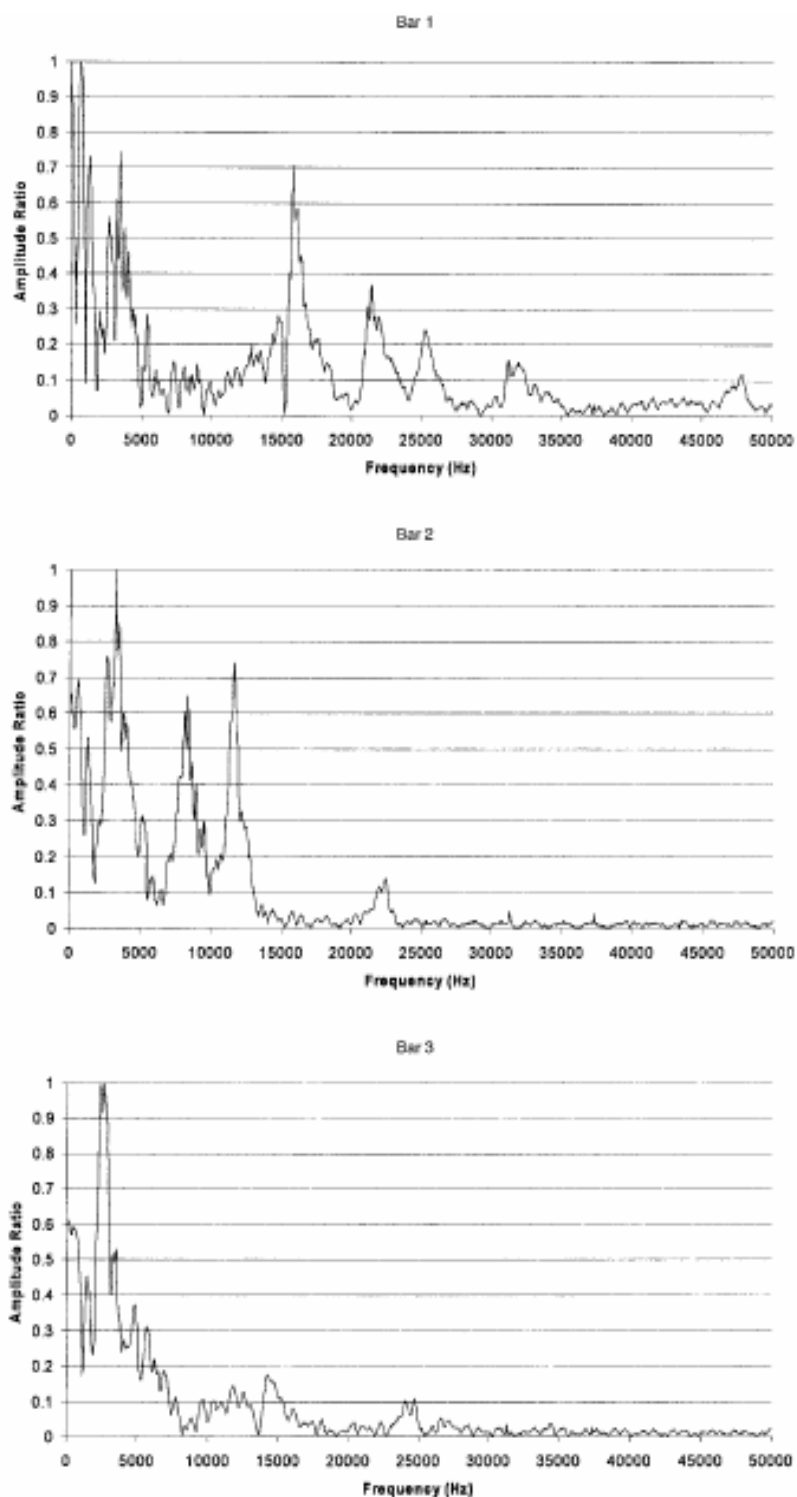


圖 2-15 敲擊回音法案例資料頻譜

(資料來源：摘錄自 NCHPR REPORT 477,2002)

瑞典 Geodynamik 公司於 1980 年即研發出世界第一套岩釘非破壞檢測儀器「Boltometer」，專門用於檢測土（岩）釘灌漿施工品質，目前廣泛應用於歐美地區。該試驗方法與敲擊回音方法類似，試驗資料藉由分析進而推估岩釘長度與周圍漿液包覆狀態。該網站技術資料顯示，漿液材料為聚脂樹脂（polyester resin）時，可檢測岩釘長度達 10 公尺。對於水泥砂漿材料而言，檢測長度因水灰比不同而異，一般而言，水灰比為 0.5 時，可測長度約為 5 公尺，水灰比為 0.28 時，可測長度約為 1 公尺。環氧樹脂（epoxy）可測長度約為 1 公尺。該公司提出之灌漿品質評估參考準則分為四類等級，各類詳細說明參考表 2-2【王文禮等，1988】。該分類採定性描述，依反射波的明顯與否，判定其灌漿品質。因方法簡易，可作為大規模工程施工品質初步檢驗方法，但需輔以其他破壞方法進行驗證。然因波形研判見仁見智，若直接以研判結果進行推估，結果將因人而異，可能較不客觀。

表 2-2 灌漿品質分級

分類	反射波特徵	灌漿品質評估
A	無反射波	灌漿品質最佳
B	微弱反射波	灌漿品質尚可
C	大量反射波	灌漿品質不夠
D	明顯反射波	很差或無灌漿

（資料來源：摘錄自黃文等，1988）

中國大陸諸多學術單位亦從事相關研究工作，其中中國礦業大學以高頻應力波檢測礦坑中錨桿長度與灌漿密實狀況，該研究成果包含研發完成專用硬體設備、試驗及評估方法，可快速進行錨桿施工質量評估工作。研究內容亦採用物理模型進行方法測試及驗證，試驗結果顯示錨桿底部反射波相當明顯，且有重複反射現象，檢測誤差不超過 5%。同時拉拔試驗結果顯示，以樹脂作為灌漿材料，在錨固長度達到 0.59 公尺時，即可達到 50 噸重 (50kN) 的設計錨固力。該研究綜合試驗資料，將應力波反射波形與漿液包覆長度(即錨固長度)的關係，歸納後提出施工灌漿品質分級準則，進行錨固力評估，並分為 A、B、C、D 等四類，各類詳細說明參考表 2-3【朱國維等，2002】。該分類標準與前述方法類似(表 2-2)，仍以波形研判結果作為評估依據，惟不同處在於其評估結果為錨固力與設計值的比較，較具工程應用價值。

表 2-3 樹脂錨桿分級

分類	級別	反射波特徵	質量評估
A	優	無端底反射	超過設計錨固力
B	良	微弱端底反射	達到設計錨固力
C	合格	端底反射明顯	稍低於設計錨固力
D	不合格	端底反射強，有多次底反	錨固力小或無

(資料來源：摘錄自朱國維等，2002)

中國大陸太原理工大學以反射波法進行錨桿錨固質量檢測研究，通過對端錨錨桿在激發應力波作用下，反射信號的時域及頻率域分析，獲得錨固長度、極限承載力及工作荷載等評估資料【李義等，2004】。本研究較特殊處在於分析振動頻率與荷載間的關係。根據前人理論研究，錨桿的荷載力與激發荷載作用下，系統的振動頻率（基頻）成冪函數關係。本研究藉由物理模型量測錨桿在各荷載條件下的應力波反應。試驗資料顯示振動頻率（基頻）與荷載有相當良好，試驗資料參見圖 2-16。該研究價值在於：若能標定荷載與基頻關係，則可藉由應力波的量測，評估錨桿荷載實際狀況，但進需先進行基頻與荷載標定工作。該報告選擇一工址進行實例測試，根據該文案例結果，該應用工址多數（90%以上）錨桿工作荷載不足其極限承載力的三分之一，此數據回饋設計單位後即進行局部設計變更，由原來錨桿間距的 800mm，改變為 1,000mm。

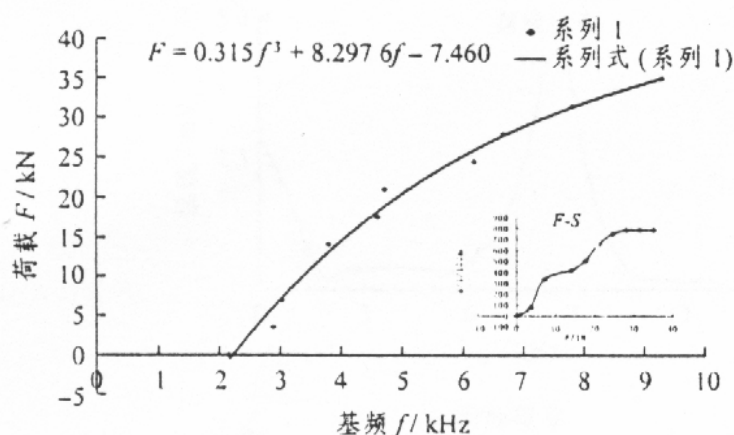


圖 2-16 振動頻率（基頻）與荷載關係圖

(資料來源：摘錄自李義等,2004)

英國亞伯丁大學 (Aberdeen University) 與 AMEC 集團公司 (AMEC Group Ltd) 共同研發的「Granit: nondestructive Anchorage Testing and Monitoring System」係作為岩釘長度、灌漿品質及錨固力等施工品質或功能檢驗。其檢測方式包含現地試驗及資料分析，試驗方法與敲擊回音方法類似，記錄暫態應力波導入土(岩)釘後的反應波形，再以類神經網路模式比對既有資料庫，進而求得最佳解，可提供岩釘未灌漿長度及錨固力等評估資料，該既有資料庫係以數值模擬方式建立，目前該研發小組仍持續進行岩栓波傳模擬及分析工作，以廣泛地了解各種漿液包覆長度、錨固力等對應力波的影響，以建立完整資料庫內容，提供更準確的比對工作。本方法較為科學且客觀，但因該系統於近年內發展完成，目前尚無太多應用案例資料，故仍無法得知有效性與準確性。

國內則於 2003 年開始進行以敲擊回音法應用於土(岩)釘埋設長度檢測之研發工作【葛文忠等，2006】【林喻峰等，2006】。研究內容包含數值分析、物理模型驗證及現地工址測試等。初步研究結果顯示：

1. 以裸露鋼筋進行試驗時，試驗資料雜訊較少，且有相當多個且明顯之底部重複反射波，相當容易進行研判。現地工址試驗資料，因受施工及灌漿因素，試驗資料雖仍可見底部反射波，但多有雜訊，增加研判困難度。
2. 完工土(岩)釘之承壓版及螺帽造成細長體土(岩)釘物理性質改變，形成暫態應力波的散射，嚴重干擾底部反射波。故進行試驗前，必須拆除承壓版及螺帽。

3. 應用於灌漿錨筋長度檢測時，應先切除彎曲出露段及切斷連接鋼絲網，進行試驗時方可獲得底部回波。
4. 在強度較高的水泥砂漿包覆下，土（岩）釘出露段漿形成暫態應力波的區間重複反射，嚴重干擾底部反射波。
5. 土（岩）釘表面不平整嚴重影響記錄資料品質，故試驗前需以砂輪機進行磨平。

上述非破壞檢測方法中，以透地雷達與敲擊回音法之應用範圍最為廣泛，且原理簡單、操作方便，可同時獲得多樣檢測資料供研判，在實務應用上最為經濟可行，故本研究採用為擋土牆及土（岩）釘檢測之主要方法，用以檢測擋土牆鋼筋保護層厚度、鋼筋搭接位置、鋼筋尺寸、深層鋼筋定位及土（岩）釘灌漿品質等，並採用物理模型進行系統化驗證，以了解方法操作性、可行性及資料解析度、正確性等。

### 第三節 非破壞檢測儀器設備

本節簡介國內外常用之透地雷達、敲擊回音法等檢測儀器設備，並比較各廠牌設備之優缺點，以供參考。

#### 一、透地雷達

因透地雷達應用範圍廣泛且原理簡單，故檢測設備之研發較為普及，近年來歐美及亞洲地區均有成熟商業產品問世。以下簡述目前世界上儀器發展現況。

1、美國 GSSI 公司（Geophysical Survey Systems Inc.）係為專業透地雷達設備廠商，硬體設備研發具 30 年經驗，除研製一般透地雷達主機、天線、資料處理軟體等通用設備外（系統名稱為 SIR），並因應各種探查目的發展出特定探查設備，包含 StructureScan、UtilityScan、RoadScan、BridgeScan、HandyScan 及孔內探查天線（borehole antenna）等。應用範圍包含地質探查、管線調查、結構物檢測、古蹟遺址探查及地層污染範圍探查等。由於該硬體設備設計完善，可提供即時資料供現場研判，且具多種商用天線可供選用，頻率自 16mHz 至 1,500mHz 間，探測深度最大可達 35m，故大量用於工址探查。本設備於民國八十年間引進國內，目前包含工研院能資所、中興社、台灣大學、成功大學、海洋大學、嘉義大學、台電公司、中油公司、史前博物館、台灣高鐵公司及多所民間單位均使用作為研發、檢測及探查等用途。



照片 2-1 GSSI 透地雷達系統

(資料來源：摘錄自 GSSI 公司網站 <http://www.geophysical.com/>)

2、瑞典 MALA 公司發展雷達探查設備的歷史較為特別，首先於 1980 年開始研製孔內雷達探查設備，然後 1994 年才進入透地雷達硬體系統研發領域，目前系統名稱為 RAMAC。應用範圍包含地質探查、管線調查、結構物檢測、古蹟遺址探查及地層污染範圍探查等。該硬體設備較為特殊設計在於可提供多頻道應用，最多可使用 16 頻道記錄，大幅縮短現地探查時間，且具多種商用天線可供選用，頻率自 100mHz 至 1,600mHz 間，大量用於工址探查。國內自民國八十年間引進首套設備，目前包含台北科技大學、中正理工學院、中華大學、朝陽科技大學、成功大學、中興大學、高雄大學、華梵大學、水利署、港灣技術研究所、核能研究所及多所民間單位均使用作為研發、檢測及探查等用途。





照片 2-2 MALA 透地雷達系統

(資料來源：摘錄自 MALA 公司網站 <http://www.malags.com/>)

3、加拿大 Sensors & Software 公司於 1988 年開始研製透地雷達探查設備 (EKKO)，並因應各種探查目的發展出特定探查設備，包含 Archaeo-forensic System、Pipes & Cables System、Road & Bridge System 及 Shallow Structure Inspection System 等。該硬體設備較為特殊之設計在於發射與接收天線可獨立分開使用，故可採多種排列方式進行研究或探查工作，增加應用範圍。其商用天線亦有多種頻率可供選用，頻率自 110mHz 至 1,200mHz 間。國內自民國八十年間引進首套設備，目前包含中央大學、清雲科技大學、中正大學、台北市政府養工處、科學博物館及南區水資源局等多所單位均使用作為研發、檢測及探查等用途。



照片 2-3 EKKO 透地雷達系統

(資料來源：摘錄自 Sensor&Software 公司網站 <http://www.sensoft.on.ca/>)

## 二、敲擊回音法

因敲擊回音法應用範圍廣泛且原理簡單，故檢測設備之研發較為普及，近年來歐美及亞洲地區均有成熟商業產品問世。

- 1、美國 IEI 公司的敲擊回音檢測系統 (Impact-Echo Instrument)，係由美國康乃爾大學教授提供設計及技術支援，因其發展較早，世界各地均有使用者，國內亦有學術單位及民間公司應用於混凝土結構瑕疵及裂縫深度等研究發展及非破壞檢測工作。照片 2-4 為檢測儀外觀。系統組成單元為資料擷取器、筆記型電腦、位移訊號接收器、鋼珠敲擊器及訊號線等，應用時需較多連接線串聯各單元，且接收器體積龐大，系統總重量約為 13.6 公斤，故攜帶及操作均較為不便。



照片 2-4 IEI 檢測儀

(資料來源：摘錄自 IEI 公司網站 <http://www.impact-echo.com>)

2、DOCTer 檢測系統為丹麥 Germann 公司研發製造，專門應用於混凝土內部瑕疵及版厚等檢測。本系統組成方式與上述系統相似，需搭配筆記型電腦使用。唯一不同處在於本系統使用 PCMCIA 資料擷取卡，可裝設於筆記型電腦上，總重量僅為 4.5 公斤，故攜帶及操作較為方便，照片 2-5 為檢測系統外觀。



照片 2-5 DOCTer 檢測系統

(資料來源：摘錄自 GERMANN 公司網站 <http://www.germann.org>)

3、加拿大 Tekron 公司係為專業檢監測服務廠商，服務範圍包含以透地雷達及敲擊回音法進行結構物檢測。該公司發展的敲擊回音檢測系統 (PIES)，見照片 2-6，係採 PDA 取代筆記型電腦，可大幅減輕系統重量，且特別設計的工作背心，使得各單元可儲藏於背心口袋內，增加檢測人員移動便利性，但亦因系統單元分散，現地應用時需進行組裝，較為繁瑣。目前國內尚無此系統使用經驗。



照片 2-6 PIES 檢測系統

(資料來源：摘錄自 TEKRON 公司網站 <http://www.tekron.com/>)

4、美國 OLSON 儀器公司為專業儀器製造商，其發展的 CGT 系列檢測儀，見照片 2-7，專門用於混凝土內部瑕疵檢測。該檢測儀優點在於主機體積小（相當於 PDA 尺寸），不需組裝，且具應力波自動敲擊設備，總重量僅為 2 公斤，故現地攜帶及操作方便。且因資料分析軟體功能強，可進行各種濾波處理，提高資料可讀性。缺點在於檢測儀本身無法處理資料，必須將資

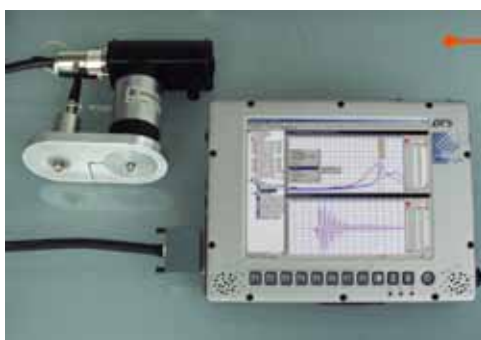
料上傳至 PC 後，在 PC 上執行分析程式，故無法獲得即時檢測結果。



照片 2-7 OLSON 檢測系統

(資料來源：摘錄自 OLSON 公司網站 <http://www.olsoninstruments.com/>)

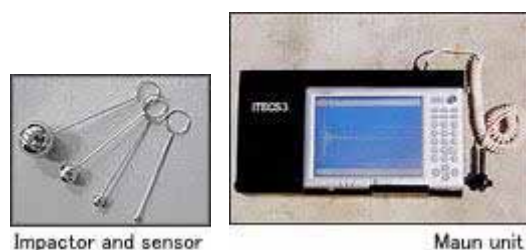
5、德國 develogic 公司發展的 introsonic 檢測系統採防水防震、觸控式螢幕、單一機體設計及自動敲擊裝置，使得現地試驗工作更為簡便，照片 2-8 為檢測系統。本設備相當新穎，目前國內尚無此系統使用經驗。



照片 2-8 introsonic 檢測系統

(資料來源：摘錄自 develogic 公司網站 <http://signal.develogic.de>)

6、日本 OEC 工程顧問公司 iTECS 彈性波檢測系統於 2001 年發展完成，曾於 2003 年年底來台展示及現地示範操作。該系統優點在於整合硬體設備成為單一機體，現地工作時無需再進行單元組裝；且資料分析軟體功能強大，可即時完成資料處理，提供檢測結果。該系統較為特殊處在於進行混凝土結構物表面裂縫深度檢測時，並未遵循傳統之繞射時間檢測法，而係採用相位法，故仍可以單一接收器進行檢測應用，另該接收器採加速度計，波形資料頻率較高，可大幅提昇波到時間與相位研判準確度。照片 2-9 為檢測系統各單元。



照片 2-9 iTECS 彈性波檢測系統

(資料來源：摘錄自 OEC 公司網站 <http://www.applied.co.jp/>)

7、中興工程顧問社於 2003 年研製國內第一套敲擊回音檢測系統 SINO-NDT-IE 檢測儀，並經過不斷的應用及改進，目前已完成第二代產品。本系統優點在於使用專利產品-可感測鋼珠敲擊器，使得傳統儀器採用的雙接收器配置減少一個，大幅降低儀器成本，且採用國內自製接收器，其尺寸遠小於進口設備，目前系統尺寸僅為 30x20x9cm，重量為 3.6kg。上述有利因素使得單人操作成為可行，大幅降低檢測成本。照片 2-10 為檢測儀



外觀。本檢測儀曾應用於國內水庫、隧道等安全檢查工作，包含巨積混凝土裂縫檢測、內部破損檢測及襯砌混凝土裂縫檢測等。

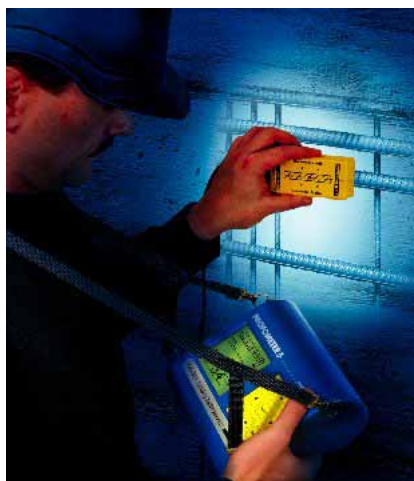


照片 2-10 SINO-NDT-IE 檢測儀

(資料來源：摘錄自中興工程顧問社網站 <http://www.sinotech.org.tw/>)

### 三、渦電流檢測儀

1、瑞士 Proceq 公司為混凝土試驗儀器製造商，包含超音波儀、電阻儀、滲透性量測儀、拉拔試驗儀、反彈錘及鋼筋探測儀等。該鋼筋探測儀 (Profometer 5) 可進行鋼筋定位、保護層厚度探查及估算鋼筋直徑。探查原理採渦電流方式，故仍有相關限制條件，根據其使用手冊顯示：當鋼筋保護層厚度為 5.5cm，鋼筋直徑為 1.6cm (D16) 時，鋼筋間距至少需 7cm 以上方能進行探查，較緊密鋼筋排列將影響檢測準確性。



照片 2-11 Profometer 5 檢測儀

(資料來源：摘錄自 proceq 公司網站 <http://www.proceq.com>)

2、韓國的美勝檢查株式會社 (MISUNG C & S INSPECTION CO., LTD.) 曾於去年透過韓國在台貿易代表，來台展示相關檢測儀器設備，應用範圍包含基樁與混凝土結構物非破壞檢測。其中相當引人注意的是鋼筋檢測儀 (Reinforce-BAR Logger)。據稱該檢測儀內部裝設有八個感應裝置，可獲得更為準確的數據，且後續處理軟體可用以繪製鋼筋排列幾何圖形，惟目前國內仍無使用經驗。



照片 2-12 Reinforce-BAR Logger 檢測儀

(資料來源：摘錄自 MCSCO 公司網站 <http://www.mcscoco.kr/>)



3、歐洲列支敦斯登國的喜得汀公司 (Hilti) 為手工具專門製造商，其 PS 200 Ferroskan System 鋼筋探測器為該公司為一發展的探查設備，專用於鐵鎂金屬及導電金屬的探查，亦可用於鋼筋定位、保護層厚度探查及估算鋼筋直徑。因該設備操作簡易，國內有為數眾多的使用者，唯一般使用者多反應進行鋼筋尺寸檢測時誤差過大，可信度較低。



照片 2-13 PS 200 Ferroskan System 檢測儀

(資料來源：摘錄自 HILTI 公司網站 <http://www.hilti.com/>)

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

## 第三章 擋土牆非破壞檢測方法驗證

### 第一節 非破壞檢測方法原理與設備

#### 一、透地雷達

##### 1、方法原理

透地雷達法係應用數百伏特的激發電壓，產生頻率為 10 至 2,500MHz、歷時為幾十億分之一秒（ns）的脈衝電磁波（雷達波），不斷地由發射天線向結構物表面發射，應用入射之雷達波遇結構體內或地層界面間介電常數（dielectric constant）有差異，造成反射雷達波之相位與振幅與原入射達波不同，在結構體表面（或地面）以接收天線感應反射雷達波，經處理及分析後，依其接收時間快慢、振幅衰減情形及由測點與反射時間構成之影像（稱透地雷達剖面），可描繪出結構體或地層內部狀況。因施測時不會破壞被測物體及其週遭環境，故為一種非破壞性的檢測方法。近年來由於儀器及電腦設備的不斷改進與更新，理論分析又趨於完備，使得此項技術達到更為廣泛實用的地步，應用範圍包含地層探查、地體構造判釋、地下水探查、古跡遺址探查、地下管線探查、鋼筋定位、道路鋪面調查等。

透地雷達傳遞的訊號為高頻電磁波，經由結構體內（或地層內）反射至接收天線，電磁波反射時間差異與能量大小，主要由雷達波速與衰減率決定，此兩參數受介質電容率（permittivity）及導電率（conductivity）所控制。因多數地工材料或地層材料的

電性變化較磁性變化為大，故雷達波傳遞受電性影響較磁性為大。

雷達波係為頻率在 10 至 2,500MHz 間之電磁波，其在介質傳遞時，其速度 ( $V_{\text{radar}}$ ) 為常數，並無頻散效應，可以下列公式表示。

$$V_{\text{radar}} = \frac{C}{\sqrt{K}} \dots\dots\dots \text{(公式 3-1)}$$

其中：

K 為相對電容率 (relative permittivity)

或稱為介電常數 (dielectric constant)

C 為光速 ( $3 \cdot 10^8 \text{m/sec}$ )

一般混凝土介電常數約自 6 至 10 間，空氣為 1，水為 81，土層介電常數變化較大，乾砂約自 3 至 6 間，飽和含水黏土約自 5 至 40 間。故雷達波在各介質內傳遞波速快慢不同，進行資料處理及解釋時需謹慎選擇合適之波速參數。

雷達波在介質內或兩介質交界面，因介電常數差異而發生反射現象，反射率 (r) 與上下介質介電常數有關，以下式表示：

$$r = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}} \dots\dots\dots \text{(公式 3-2)}$$

其中：

$K_1$  為上層介質介電常數

$K_2$  為下層介質介電常數

當上層介質介電常數較大時， $r > 0$ ，表示反射波相位與入射波相位相同；反之，當上層介質介電常數較小時， $r < 0$ ，表示反射波相位與入射波相位相差 180 度。

介電常數的變化除影響反射波能量大小外，亦造成雷達波相位變化，例如雷達波入射混凝土結構物時，由於反射率小於 0，故反射波相位與入射波相位相差 180 度，亦即波形倒轉。

透地雷達剖面中，除部分電子訊號外，大部分波訊來自介質內部之反射波，係為入射波經過介質內部傳遞後，在介電係數變化處發生反射，返回表面，被天線感應記錄而成。故其反射波傳遞距離恰為內部介質變化位置所在深度的兩倍，計算深度或厚度（ $D$ ）時，需先將反射波波到時間（ $T_b$ ）扣除表面波到時間（ $T_a$ ），作為反射波雙程走時，再選用合適波速參數進行計算，以下式表示：

$$D = V_{\text{radar}} \cdot \frac{(T_b - T_a)}{2} \dots\dots\dots \text{(公式 3-3)}$$

一般最大解析度定義為波長的四分之一。雷達波入射頻率係為雷達波中心頻率，在介質中傳遞後，高頻部分衰減較低頻嚴重，故接收記錄中，雷達波中心頻率大多向低頻移動，波長增加，導致解析度較原先估計為低。目前商用儀器中，發射天線頻率多在 100mHz 至 1,500mHz 間，但仍有少數儀器商發展更高頻或更低頻的天線。一般而言，進行結構物探查時，因探查深度較小且要求精度較高，多採較高頻天線，進行地質探查，因探查深度較大，多採低頻天線。由於高頻波易衰減的特性，探深能力與資料精度無法同時滿足，因此需視個別案例情況決定。

## 2、儀器設備

本研究採用美國 GSSI 公司 SIR3000 透地雷達主機作為檢測儀器，檢測系統包含控制主機及天線等。

- (1) 控制主機：此控制主機為一整合式硬體，內含數位運算器、資料擷取器、硬碟及螢幕等，主要作為資料操控中心，藉由操控程式進行參數設定，將重複產生之電脈衝送至發射天線以產生雷達波，並同時接收由天線內感應之反射雷達波信號，此信號經內部晶片處理後，成為數位記錄顯示於監控螢幕上，供即時研判並儲存於內部硬碟中。主機外觀參見照片 3-1。



照片 3-1 SIR3000 透地雷達主機

(資料來源：摘錄自 GSSI 公司網站 <http://www.geophysical.com/>)

- (2) 天線：主機以掃描速率約 50kHz 左右頻率，重複發射雷達波至地下或結構體，同時接收由目標體或層面反射回之電磁波信號。天線產生之雷達波中心頻率有數種，大致在 80mHz 至 1,000mHz 間。本研究採用高頻天線，中心頻率為 1,500mHz。天線外觀參見照片 3-2。



照片 3-2 高頻透地雷達天線

(資料來源：摘錄自 GSSI 公司網站 <http://www.geophysical.com/>)

### 3、檢測步驟

#### (1) 測線佈置

依據欲探測之目標物之性狀，決定測線之走向、位置及間距，一般若目標物為線形時，測線方向規劃垂直於線形方向；而其他形狀待測物，測線規劃為縱橫格線，格線密度依待測物尺寸而定。進行鋼筋定位時，因資料準確度需求較高，一般均在混凝土表面以噴漆標示測線位置，再以 10cm 或其他間距進行標示，作為空間定位使用。

#### (2) 設備組裝

將主機、天線、電源及訊號電纜連接，並開機暖機進行功能測試。

#### (3) 天線測試

依據待測物之大小以及深度，並考慮介質電性特性後選取適當頻率天線。一般在高壓電塔附近，或施測位置附近有廣播電台，透地雷達資料將受嚴重干擾，施測時需特別慎選天線頻率。

#### (4) 設定參數

進行雷達波數位資料設定，包含記錄時間 (Range)、採樣個數 (Sample)、掃描速率 (Scan Rate)、放大倍率 (Gain)、濾波設定 (Filtering)、介電參數等。

#### (5) 測試

上述參數初步設定完成後，將天線置於待測物體表面並移動進行波形記錄，若雷達剖面中白色或黑色比率過多，表示反射強度過大或過小，需再行設定放大倍率，以使得各時間點波



形記錄強度大約一致。

### (6) 正式試驗及記錄

將天線以等速沿測線移動，經過噴漆標示位置上方時，以天線手把上之標示器 (Marker) 輸入電子訊號，作為空間定位使用。移動天線時系統自動記錄雷達掃描資料，另需人為記錄天線移動速度變化、施測物表面狀況，積水範圍及鄰近土層狀況、含水量等。

## 二、震波探勘方法

### 1、折射震測方法

因鋼筋波速 (大於 5,000m/sec) 大於混凝土波速 (大多小於 4,200m/sec)，故導入混凝土結構物的震波，除了沿表面傳遞的直達波外，亦在鋼筋深度位置發生反射波與折射波，參見圖 3-1。

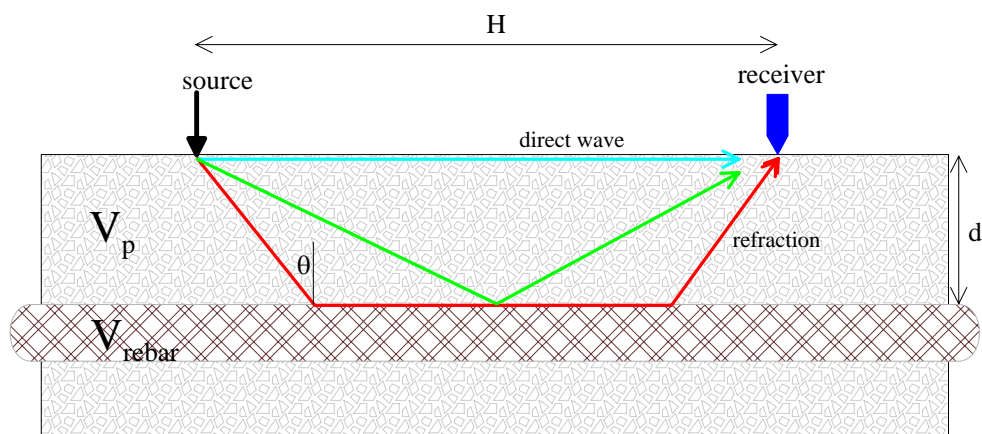


圖 3-1 折射震測方式示意圖

(資料來源：本研究整理)

下列公式 3-4 為直達波傳遞時間 ( $T_1$ )，公式 3-5 為折射波傳遞時間 ( $T_2$ )，當  $T_1 = T_2$  時，該支距為臨界距離，可據以計算鋼筋保護層厚度。 $V_R$  為混凝土表面波波速， $H$  為支距， $V_p$  為混凝土表面波波速， $d$  為保護層厚度， $\theta$  為折射角， $V_{rebar}$  為鋼筋縱波波速。

$$T_1 = \frac{H}{V_R} \dots\dots\dots(\text{公式 3-4})$$

$$T_2 = \frac{2d}{V_p \cos(\theta)} + \frac{H-2d \tan(\theta)}{V_{rebar}} \dots\dots\dots(\text{公式 3-5})$$

以下進一步以案例說明折射震波探勘原理及資料處理步驟。假設鋼筋波速為 5,080m/sec ( $V_{rebar}$ )，混凝土縱波波速為 3,800m/sec ( $V_p$ )，表面波波速為 2,200m/sec ( $V_R$ )，鋼筋保護厚度為 10cm， $\theta$  為折射角可藉由司涅耳定律 (Snell's Law) 計算。故可根據公式 3-4 與公式 3-5 計算求得不同支距之直達波與折射波走時。圖 3-2 中直線表示直達波理論走時，其斜率為混凝土波速的倒數，虛線表示折射波理論走時，其斜率為鋼筋波速的倒數，兩線段交點支距位置稱臨界距離 (Critical Distance)，表示在此距離的直達波與折射波走時相同，大於此距離時，折射波走時小於直達波走時。簡單的說，在臨界距離以內的首達波 (First Arrival) 為直達波，在臨界距離以外的首達波為折射波。

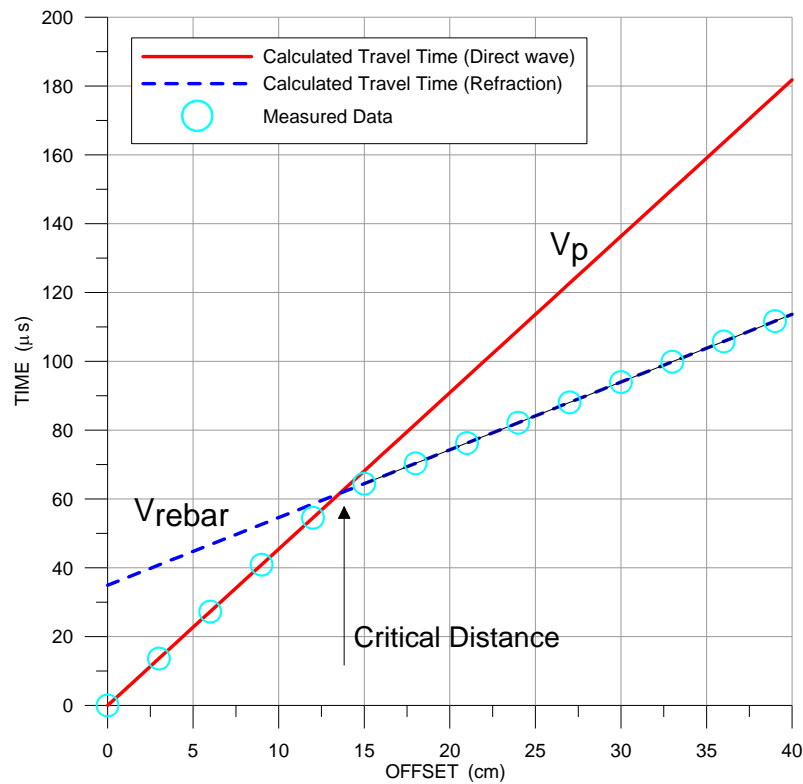


圖 3-2 折射震測理論走時-支距圖

(資料來源：本研究整理)

一般在震測波形紀錄上第一個明顯波訊稱首達波，最容易採人為方式挑選其波訊及走時，所以在進行折射震測時，每間距固定距離即可獲得一筆首達波走時資料，並將所有量測資料繪製於走時-支距圖。在依據資料分布型態，進行回歸分析，以獲得兩段不同的斜率，即混凝土波速與鋼筋波速，兩段回歸線段的交點即為臨界距離。故在已知  $V_R$ 、 $H$ 、 $V_p$ 、 $\theta$ 、 $V_{rebar}$  等參數及條件下，可根據公式 3-4 與公式 3-5 計算求得鋼筋保護層厚度 ( $d$ )。

## 2、反射震測方法

美國國家標準及科技院（National Institute of Standards and Technology）在 1983 年即提出一項類似零支距反射震測的方法，用以探查混凝土結構物厚度（參見圖二），目前已建立標準試驗規範（ASTM C 1383）。該探查方式乃利用機械性的敲擊方法將應力波引入待測物，然後在鄰近位置接收因應力波被內部材質變化或瑕疵等介質界面造成之反射波，此一波形可用來決定縱波來回敲擊表面與反射界面來回所需的時間，重複反射在頻率域內形成特徵頻率（ $f_d$ ），若波速已知（ $V_p$ ），則可推求該界面深度（ $d$ ），參見公式三。本研究擬採用此方式進行鋼筋保護層厚度探查。

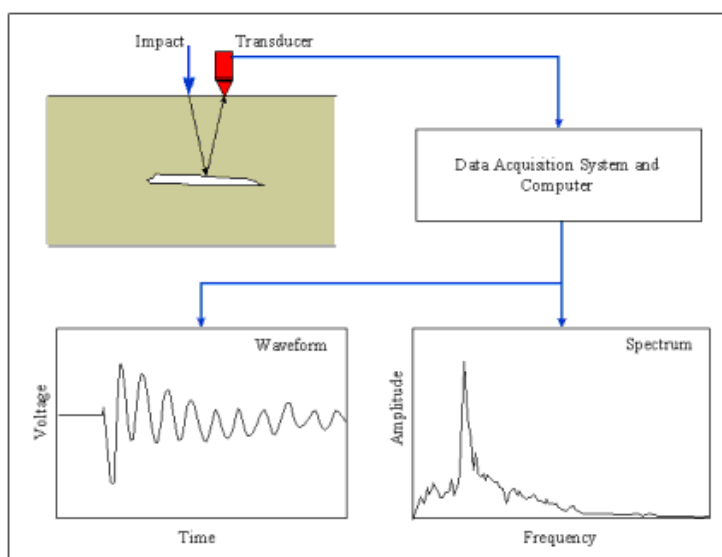


圖 3-3 零支距震測方式示意圖（ASTM C1383）

（資料來源：摘錄自 IEI 公司網站 <http://www.impact-echo.com>）

$$d = 0.96 \frac{V_p}{f_d} \dots\dots\dots (公式 3-6)$$

### 3、儀器設備

因多數傳統設備體積過大，單元較為複雜，現地應用時組裝且需多人協助試驗進行，不僅現地試驗需時較久，且檢測成本較高較不經濟。而中興工程顧問社 SINO-NDT-IE 檢測儀搭配可感測鋼珠敲擊器，可簡化儀器配置，現地試驗較為經濟省事，且資料精度甚至超越國外類似儀器設備，故採用作為本研究試驗設備。SINO-NDT-IE 檢測儀有以下特徵：

#### (1) 可感測鋼珠敲擊器

敲擊器內含感應裝置，可感測敲擊時間原點。鋼珠敲擊器尺寸分別為3、5、7及9mm。

#### (2) 訊號接收器

屬單一接收器，接收器接收混凝土表面位移之類比訊號。

#### (3) AD轉換器

將敲擊器與接收器接收之類比訊號轉換成數位訊號。

#### (4) 資料擷取系統

擷取數位訊號，並透過電腦主機及螢幕，直接顯示測試資料於電腦螢幕，供現場即時研判。

## 第二節 物理模型製作

本研究共計製作 3 個擋土牆物理模型，模型編號為 A 至 C，6 個土（岩）釘物理模型。表 3-1 為本研究採用作為試驗方法驗證的模型總表。3 個新製擋土牆物理模型外觀尺寸相同，惟內含不同鋼筋尺寸及排列方式，用以進行各檢測方法及應用目的之測試及驗證。為消除可能因混凝土性質差異所產生之影響，此三組試體均使用設計強度為  $210\text{kg/cm}^2$  之廠拌混凝土材料，澆置係採高壓幫浦車泵送混凝土漿液，並以振動機進行充分搗實，以提高混凝土品質，避免蜂窩及空洞之產生，模型製作過程照片參見附件三。上述模型係用以作為試驗驗證標的，應用檢測項目包含鋼筋間距、保護層厚度、鋼筋尺寸、鋼筋搭接位置等，採用檢測方法包含透地雷達及敲擊回音。

表 3-1 擋土牆物理模型總表

模型編號	尺寸 (長寬高) (cm)	混凝土 設計強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	鋼筋間距 (cm)	保護層 (cm)	鋼筋尺寸
既有擋土牆 1	200x35x35	210	15 雙層筋	9.2	D16
既有擋土牆 2	100x100x30	210	20*20 單層筋	10	D19
既有擋土牆 3	100x100x30	210	10*10 單層筋	10	D29
既有擋土牆 4	300x200x50	210	20*20 單層筋	10	D29
既有擋土牆 5	300x200x50	210	40*40 單層筋	10	D29
新製擋土牆 A	100x50x30	210	5/10	2.5/5	D16
新製擋土牆 B	100x50x30	210	雙層筋/	2.5/5	D19
新製擋土牆 C	100x50x30	210	三層筋	2.5/5	D29

(資料來源：本研究整理)

擋土牆模型 A 長寬高分別為 100cm、50cm 及 30cm。內部鋼筋號數均為 5 號 (D16) 尺寸，並採縱橫、兩層排列。鋼筋間距有兩種尺寸，分別為 5 及 10cm，保護層厚度亦分別為 2.5cm 及 5cm。其中模型左側部份為單層筋，模型中間部份為雙層筋，模型右側部份為三層筋，鋼筋縱向間距均為 5cm，模型示意圖參見圖 3-5。

擋土牆模型 B 與 C 擋土牆模型 A 尺寸完全一致，內部鋼筋排列亦相同，惟一不同者在於內部鋼筋號數，模型 B 為 6 號 (D19)，模型 C 為 9 號 (D29)，模型示意圖參見圖 3-4。

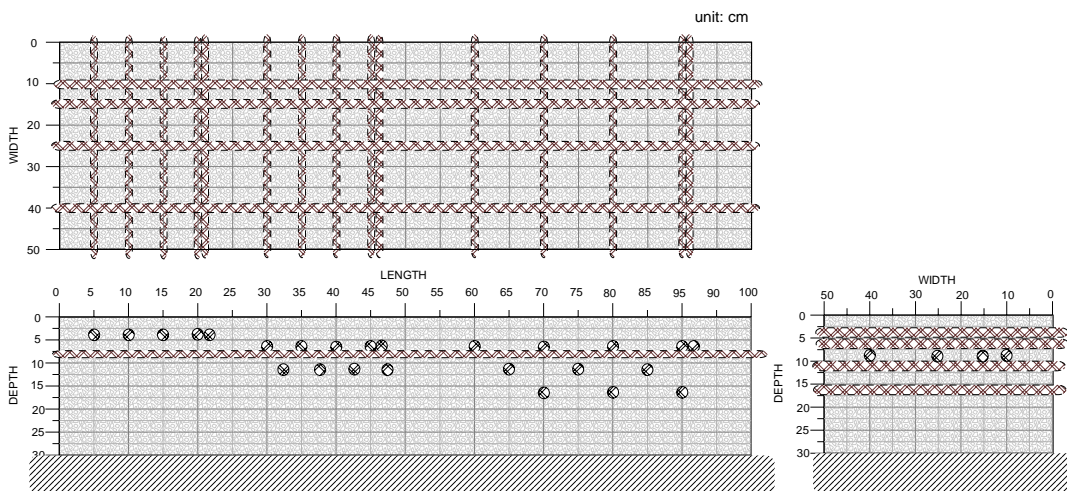


圖 3-4 擋土牆模型示意圖

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 鋼筋保護層厚度檢測試驗

本計劃前期研究在進行較小保護層檢測應用時，因採用既有儀器的資料解析度不足，無法獲得理想結果，故本期研究係採用新的檢測方法與檢測設備，以期改進及補充前期研究成果。

本節採目前國內較少見的高頻透地雷達系統作為檢測設備，並搭配數種資料處理方式，藉由物理模型驗證結果，以了解採用高頻透地雷達方法之可信度、資料準確性及解析度。以下試驗採用 1.5GHz 高頻天線，由此天線解析度較高，因此進行探查時，對於施測測線位置的座標準確率要求為嚴格，檢測前首先在模型表面縱橫方向每間距 5cm 進行標示，並在透地雷達施測中，天線中點經過標示時，輸入一個”標示”(Mark)，以供後續資料處理應用，模型試驗過程參見照片 3-3。



照片 3-3 透地雷達模型試驗過程

(資料來源：本研究整理)



### 一、既有擋土牆物理模型透地雷達試驗結果

既有一號模型係為雙層鋼筋混凝土模型，鋼筋保護層厚度為 9.2cm，鋼筋間距為 15cm，鋼筋尺寸為 9 號 (D29)，混凝土設計強度為  $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 。照片 3-4 為模型外觀，兩條測線測線間距 5cm。



照片 3-4 既有一號模型外觀

(資料來源：本研究整理)

圖 3-5 為透地雷達資料，共包含兩條測線剖面，剖面橫軸表示距離，單位為 cm，標示間距為 5cm；縱軸表示深度，右側單位為 ns ( $10^{-9}\text{sec}$ )，標示間距為 0.5ns，左側單位為 cm，標示間距為 1cm。施測天線為 1.5GHz，記錄時間為 5ns，採樣個數為 512，採樣間距為 0.0098ns。透地雷達剖面以灰階表示反射波強度，最大正向強度以白色表示，最大負向強度以黑色表示，兩極值間強度以灰階表示，並與灰度成正比。

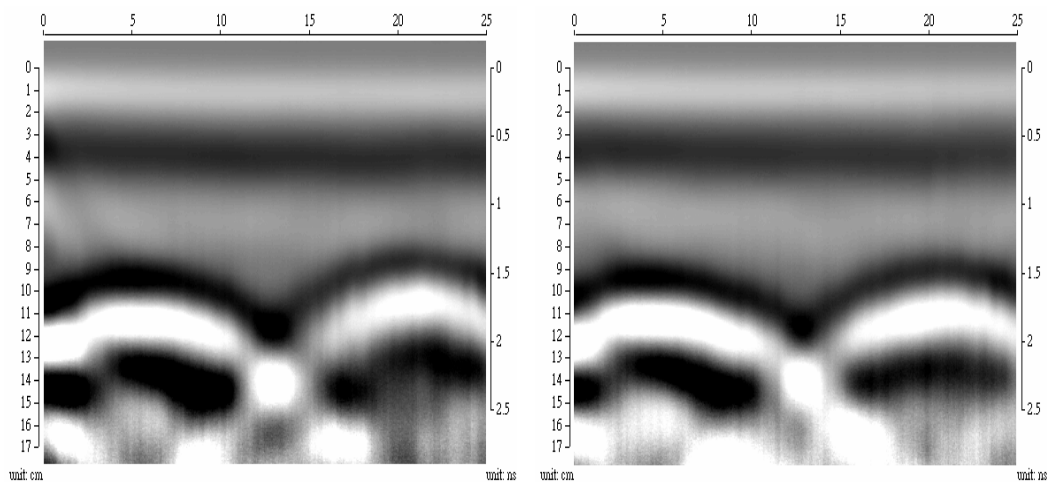


圖 3-5 既有一號模型透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

圖 3-5 中時間軸標示為 0ns 的位置出現正向訊號（淺色），在 0.4ns 左右出現反向訊號（深色），故波長約為 0.8ns，空間中長度約為 5cm。在 1.5ns 至 2ns 間出現的鋼筋繞射波相當明顯，雙曲線訊號的頂點約為 1.5ns，即為鋼筋保護層雙層走時，圖中共有四個完整的雙曲線，推估其鋼筋保護層約為 8.91cm 至 9.51cm 間，平均誤差為 0.2cm，約為 2%。

另位於相鄰的雙曲線訊號中間，時間軸約為 2.4ns 處，出現白色亮點訊號，其係相鄰鋼筋繞射訊號加強性干涉造成，此訊號由於反射強度頗高，易誤判為鋼筋位置。

混凝土介電常數約為 6 至 10，此常數係用以作為雷達波速進行鋼筋保護層厚度的估算，故應用時需慎選適當常數。一般而言，若混凝土含水量較高或潮濕時因水的介電常數為 81，故需選用較高常數作為混凝土介電常數。上述資料係採用介電常數 6 進行計算保

護層厚度。另外可利用鋼筋繞射波時間計算混凝土介電常數。圖 3-6 中圓點為上述案例資料的鋼筋繞射時間，展距 (Offset) 為 0cm 代表雙曲線頂點位置，其走時約為 1.51ns，展距 (Offset) 為 8cm 代表加強性干涉訊號位置，其走時約為 1.95ns。圖中五條曲線分別為介電常數約為 6 至 10 計算求得的理論走時，研判模型之介電常數為 6 應為合理。

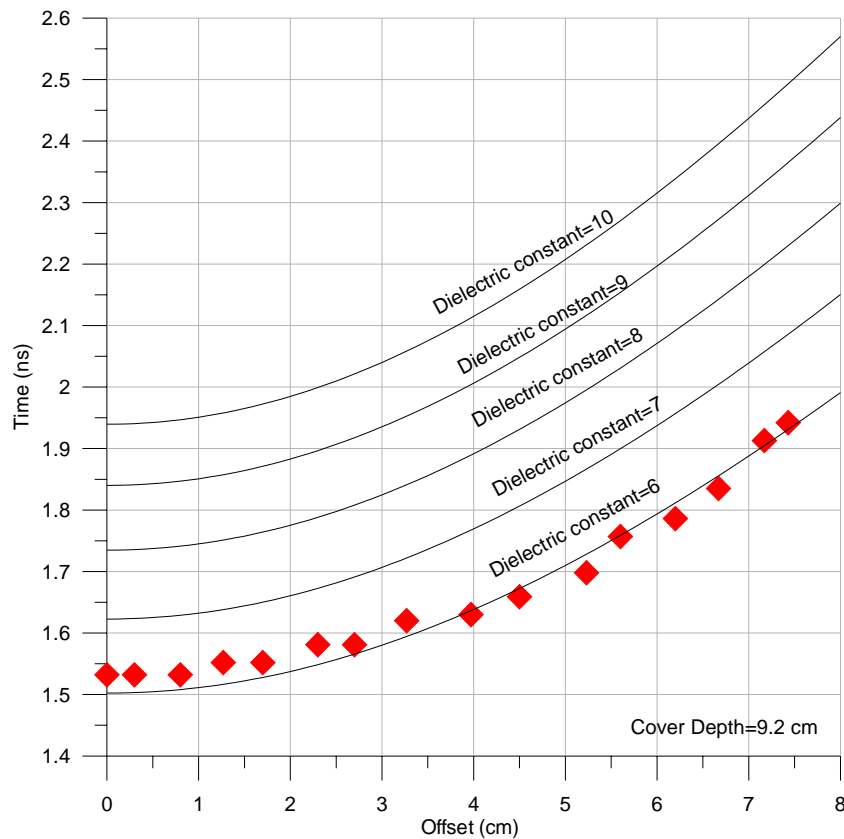


圖 3-6 既有模型透地雷達繞射時間資料

(資料來源：本研究整理)

既有二號模型鋼筋保護層厚度為 11.9cm，鋼筋間距為 20cm，鋼筋尺寸為 6 號 (D16)，混凝土設計強度為  $210\text{kg/cm}^2$ 。圖 3-7

為相鄰兩測線透地雷達剖面，圖中時間軸大於 2ns，繞射波相當明顯且一致，故應為鋼筋造成，雙曲線訊號的頂點即為鋼筋位置，推估其鋼筋保護層約為 10.62 至 11.74cm 間，平均誤差為 0.68cm，約為 6%。左圖中位於測線距離 20cm，深度約為 4cm 處有一個較明顯繞射訊號，而右圖中相對位置則無此訊號，表示造成此訊號之物體並無空間延續性，可能係混凝土內部局部空洞或材質較為特殊的粗骨材造成。

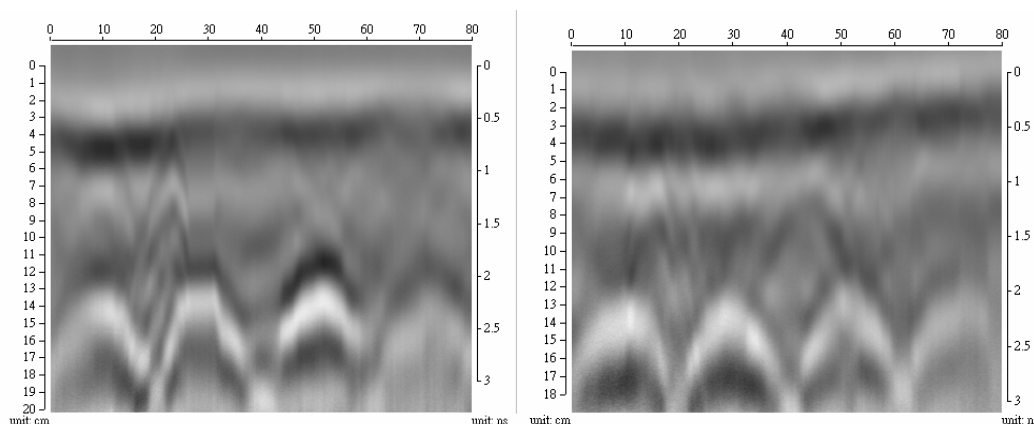


圖 3-7 既有二號模型透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

既有三號模型鋼筋保護層厚度為 7.2cm，鋼筋間距為 10cm，鋼筋尺寸為 6 號 (D16)，混凝土設計強度為  $210\text{kg/cm}^2$ 。圖 3-8 為透地雷達剖面，圖中鋼筋繞射波相當明顯，雙曲線訊號的頂點即為鋼筋位置，推估其鋼筋保護層約為 6.95cm 至 7.64cm 間，平均誤差為 0.19cm，約為 3%。本圖中第一次加強性干涉振幅相當明顯，其水平距離位置位於相鄰波波峰中間，時間軸約為 1.6ns，該訊號常

被誤判為鋼筋。第二次加強性干涉訊號亦相當明顯，位於 2.3ns 左右，其水平距離位置與波峰位置一致。

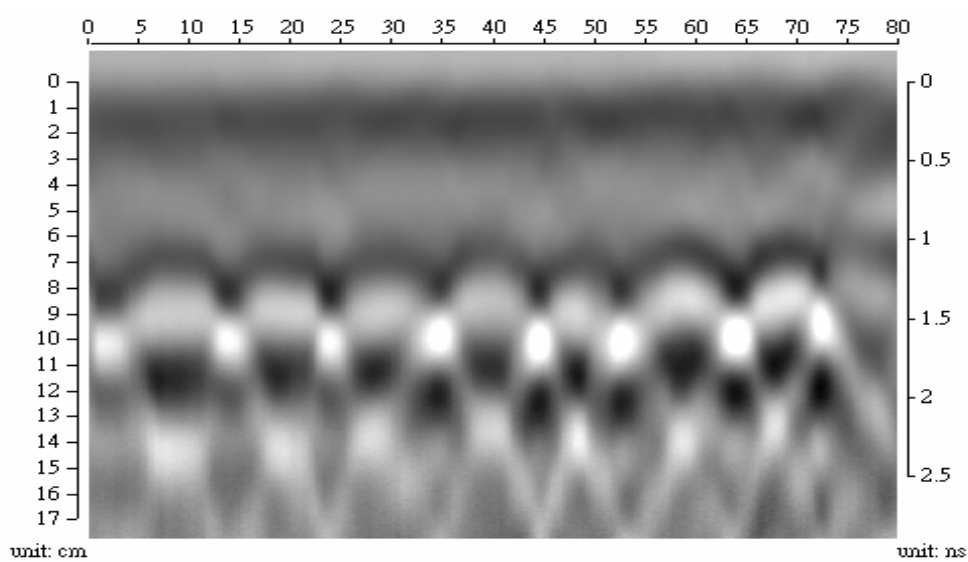


圖 3-8 既有三號模型透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

既有四號模型鋼筋保護層厚度為 13.2cm，鋼筋間距為 20cm，鋼筋尺寸為 6 號 (D16)，混凝土設計強度為  $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 。圖 3-9 為透地雷達剖面，圖中鋼筋繞射波相當明顯，雙曲線訊號的頂點即為鋼筋位置，推估其鋼筋保護層約為 12.53cm 至 14.21cm 間，平均誤差為 0.41cm，約為 3%。圖中位於深度 10cm 以內有許多不規則繞射訊號，可能係混凝土內部局部空洞或材質較為特殊的粗骨材造成。

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

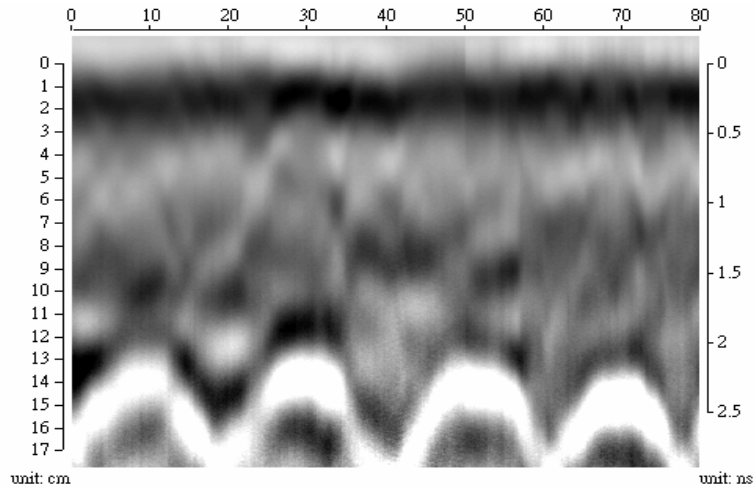


圖 3-9 既有四號模型透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

既有五號模型鋼筋保護層厚度為 13.2cm，鋼筋間距為 40cm，鋼筋尺寸為 6 號 (D16)，混凝土設計強度為  $210\text{kg/cm}^2$ 。圖 3-10 為透地雷達剖面，圖中鋼筋繞射波相當明顯，雙曲線訊號的頂點即為鋼筋位置，推估其鋼筋保護層約為 11.88cm 至 12.77cm 間，平均誤差為 0.81cm，約為 6%。

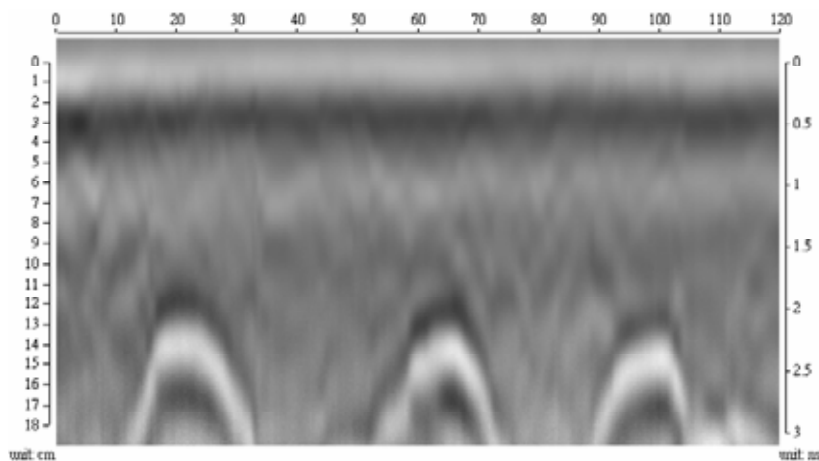


圖 3-10 既有五號模型透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

## 二、A 模型透地雷達試驗結果

A 模型長寬各為 100cm 及 50cm，透地雷達測線規劃為正交方向，其中平行模型長軸方向測線以英文字母代表，分別為 b 至 g，共 6 條測線，測線間距為 5cm，長度均為 85cm，測線起點位於左側，該處鋼筋保護層為 2.5cm，測線編號 b、c、e 與 g 沿位於橫向鋼筋上方。垂直模型長軸方向測線以數字代表，分別為 2 至 17，共 16 條測線，測線間距為 5cm，長度均為 40cm，測線起點位於下側，除測線編號 5、10、13、15 與 17 外，大部分測線均位於縱向鋼筋上方。測線分布參見圖 3-11。

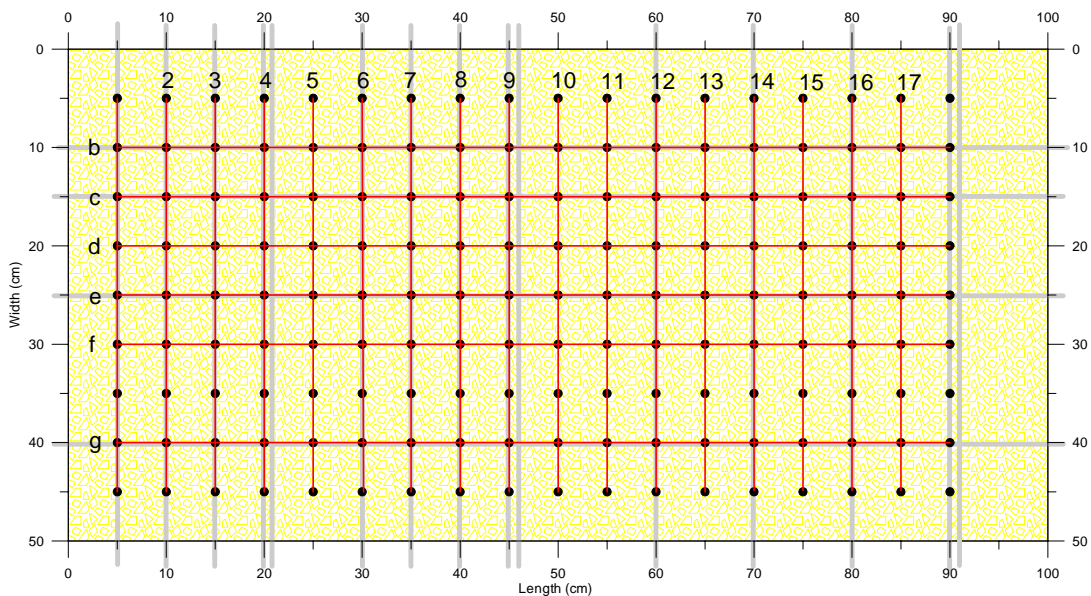


圖 3-11 A 模型透地雷達測線分布圖

（資料來源：本研究整理）

圖 3-12 為測線編號 b 至 g 透地雷達剖面，剖面橫軸表示距離，

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

單位為 cm，標示間距為 5cm；縱軸表示深度，右側單位為 ns ( $10^{-9}$ sec)，標示間距為 0.5ns，左側單位為 cm，標示間距為 1cm。施測天線為 1.5GHz，記錄時間為 6ns，採樣個數為 512，採樣間距為 0.0117ns。透地雷達剖面以灰階表示反射波強度，最大正向強度以白色表示，最大負向強度以黑色表示，兩極值間強度以灰階表示，並與灰度成正比。圖中黑色垂直線段為人為挑選的保護層厚度資料，無標示者表示該訊號型態較難辨識。

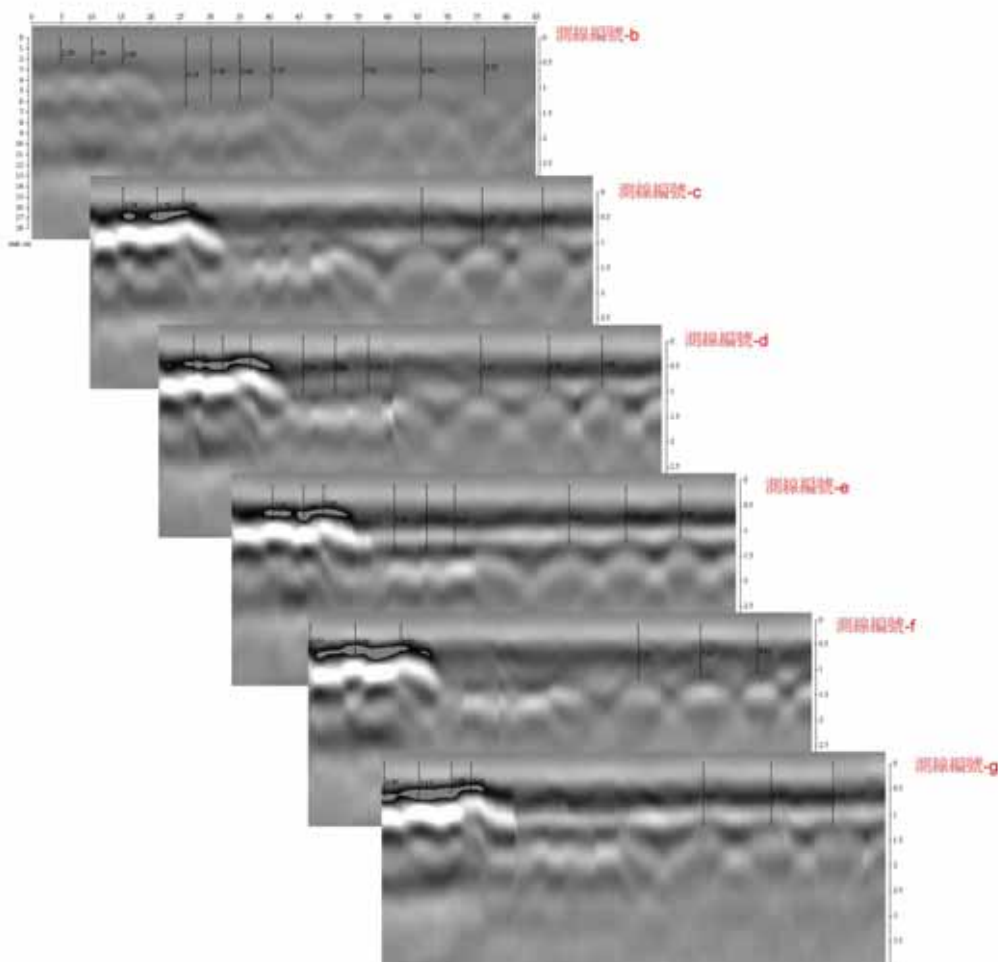


圖 3-12 A 模型橫向測線透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)



b 測線剖面圖係為採用透地雷達自動參數設定掃描結果，其反射能量雖較為微弱，但仍可發現數處較明顯繞射訊號。其中約位在水平距離 15cm 內之繞射訊號較早出現，雙曲線訊號出現時間約為 0.6ns，推估深度約為 2.8cm。此距離內模型鋼筋排列較為密集，故個別鋼筋繞射訊號緊密相鄰，較難以研判，惟因加強性干涉訊號相對明顯，故有利於協助研判鋼筋位置，此範圍內有三處雙曲線，其頂點深度分別為 2.29、2.29 與 2.46cm，且水平距離與內部鋼筋位置相近，故該訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.15cm，約為 6%。

b 測線中段資料（距離約 25cm 至 40cm）繞射訊號出現時間約為 1.1ns，推估深度約為 5.2cm。此距離內模型鋼筋排列亦較密集，故個別鋼筋繞射訊號緊密相鄰，且又因加強性干涉訊號不強，故難以研判鋼筋位置，僅能藉由微弱的訊號變化推估鋼筋位置，此範圍內有四處雙曲線，推估其頂點深度分別為 6.35、5.79、5.85 與 5.57cm，且水平距離與內部鋼筋位置相近，故該訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.89cm，約為 18%。測線後段資料（距離大於 50cm）繞射訊號出現時間約為 1.1ns，個別鋼筋繞射訊號相當明顯，推估其頂點深度分別為 5.63、5.74 與 5.07 cm，且水平距離與內部鋼筋位置相當，故該訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.48cm，約為 10%。

c 至 g 測線剖面圖係採人為方式設定加強參數（gain），故剖面資料與上述資料有明顯不同，反射強度明顯增強，尤其在測線前段資料繞射波訊號相當強，中後段的繞射波訊號亦較前述資料明顯許多。c 至 g 測線剖面圖特性相似，惟 e 與 g 測線剖面在時間軸約

0.9ns 附近出現明顯的水平一致性反射訊號，由於此兩側線洽位於橫向鋼筋上方，故此水平訊號應為橫向鋼筋造成。一般而言，測線前段訊號相當明顯，且加強性干涉訊號亦強，故大致上較易判定鋼筋位置；測線中段訊號加強性干涉訊號亦強，可用以研判鋼筋間距，但因繞射訊號相當微弱，難以研判雙曲線頂點位置；測線後段訊號加強性干涉訊號與繞射訊號均相當良好，故較易研判雙曲線頂點位置。上述各測線試驗資料依前、中、後三區段劃分，試驗資料誤差分別為 0.24~0.78cm (9%~30%)、0.33~1cm (7~20%) 與 0.12~0.56cm (2%~11%)。

圖 3-13 為測線編號 2 至 17 透地雷達剖面，透地雷達施測參數與圖形表示方法與上述相同。理論上在縱向測線雷達波剖面上應有四處鋼筋繞射訊號，惟測線 2 號至 5 號透地雷達剖面均僅出現 3 處雙曲線，此係測線平行淺層鋼筋，且位於其上方或鄰近位置，故水平一致性鋼筋反射訊號（時間軸約為 0.5ns）干擾兩個鄰近的繞射波波形，造成雙曲線訊號頂點局部破壞，故無法顯示兩個獨立且完整波形，另 6 號至 17 號測線，每個剖面均可獲得四處繞射訊號。

圖 3-14 為綜合上述各繞射波資料計算鋼筋各點的深度，並繪製四根鋼筋的深度分布圖。模型實際鋼筋深度自左至右由深變淺，深度約自 4.5cm 變化至 3.3cm。大致上探查結果亦由左至右由深變淺，深度約自 5.2cm 變化至 3.4cm，與實際狀況相當一致。左側因受淺層縱向鋼筋影響，故檢測誤差稍大，但均在 15% 以內。

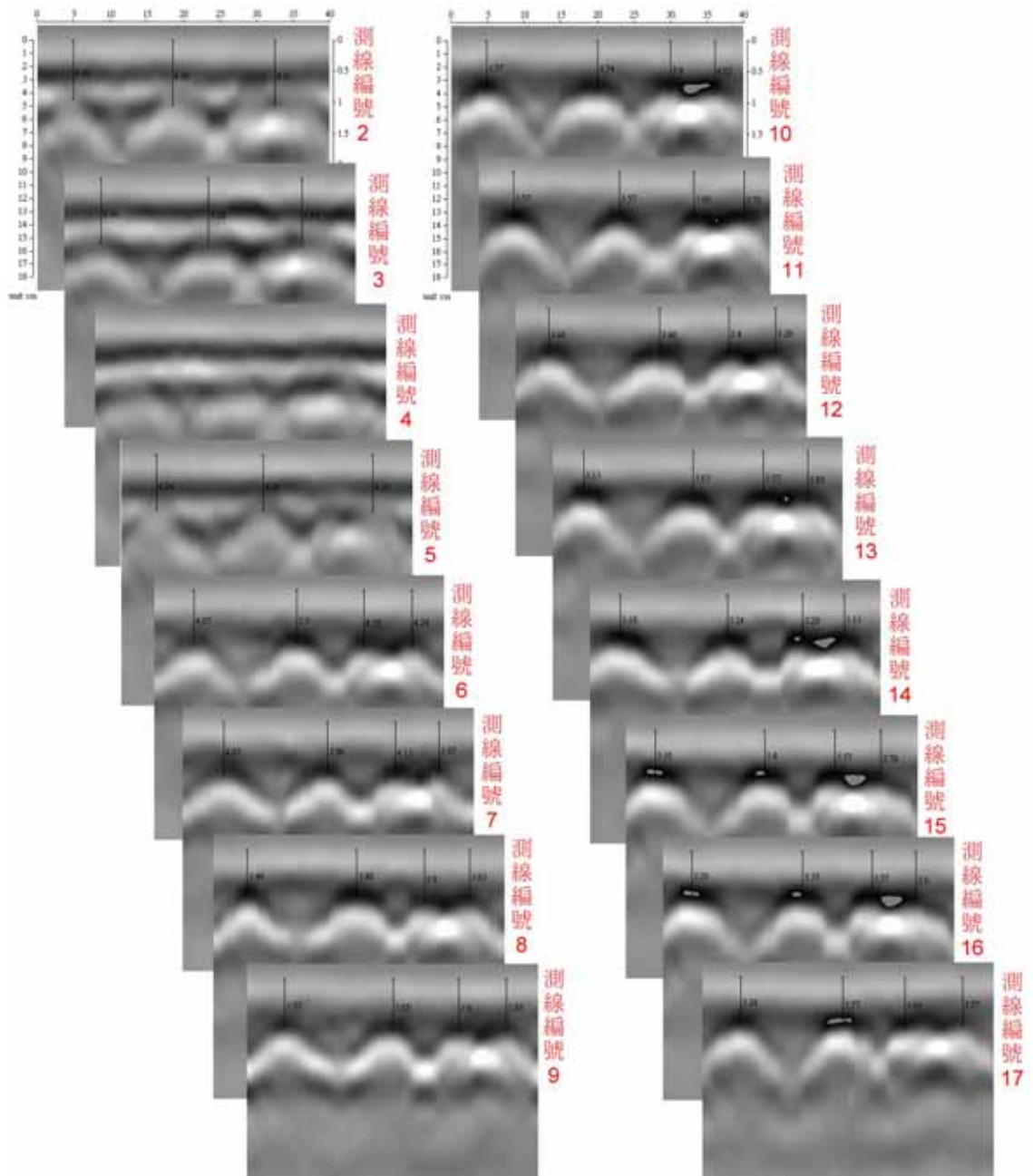


圖 3-13 A 模型縱向測線透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

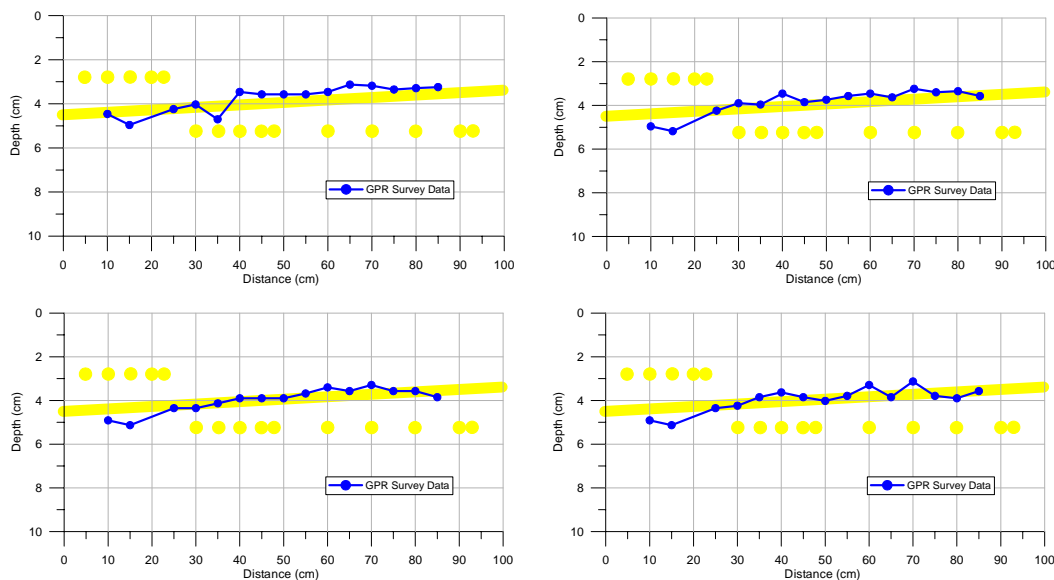


圖 3-14 A 模型縱向測線鋼筋保護層探查結果

(資料來源：本研究整理)

### 三、B 模型透地雷達試驗結果

B 模型長寬各為 100cm 及 50cm，透地雷達測線規劃為正交方向，其中平行模型長軸方向測線以英文字母代表，分別為 b 至 g，共 6 條測線，測線間距為 5cm，長度均為 85cm，測線起點位於左側，該處鋼筋保護層為 2.5cm，測線編號 b、c、e 與 g 沿位於橫向鋼筋上方。垂直模型長軸方向測線以數字代表，分別為 2 至 17，共 16 條測線，測線間距為 5cm，長度均為 40cm，測線起點位於下側，除測線編號 5、10、13、15 與 17 外，大部分測線均位於縱向鋼筋上方。測線分布參見圖 3-15。

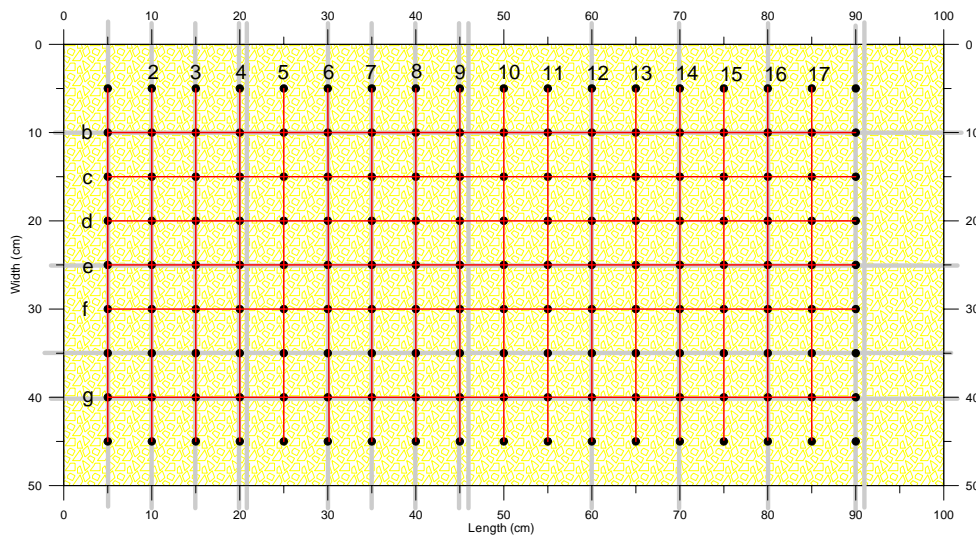


圖 3-15 B 模型透地雷達測線分布圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-16 為測線編號 b 至 g 透地雷達剖面，透地雷達施測參數與圖形表示方法與上述相同。b 測線剖面圖約位在水平距離 15cm 內之繞射訊號較早出現，雙曲線訊號出現時間約為 0.6ns，推估深度約為 2.8cm。此距離內模型鋼筋排列較為密集，故個別鋼筋繞射訊號緊密相鄰，較難以研判，惟因加強性干涉訊號相對明顯，故有利於協助研判鋼筋位置，此範圍內有四處雙曲線，其頂點深度分別為 2.13、2.69、3.13 與 2.8cm，且水平距離與內部鋼筋位置相近，故該訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.37cm，約為 15%。

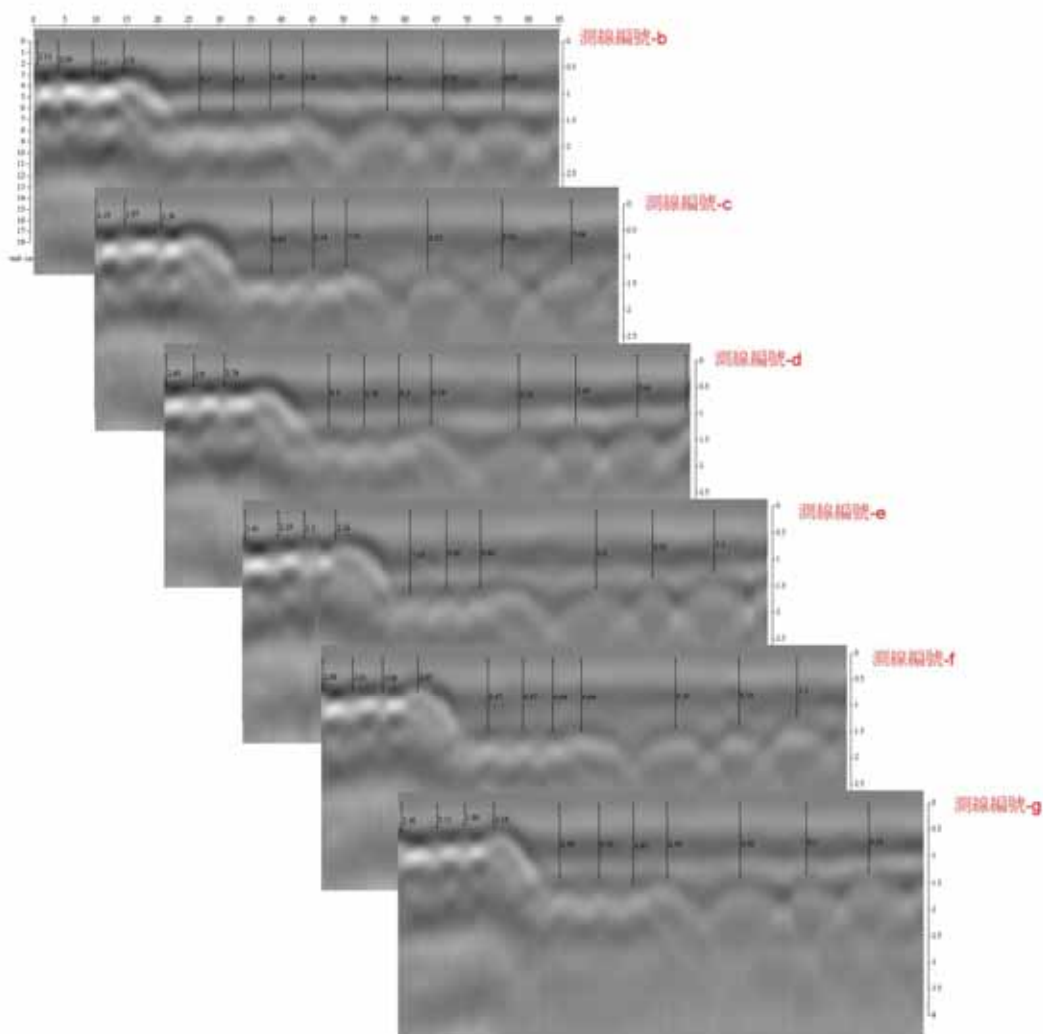


圖 3-16 B 模型橫向測線透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

b 測線中段資料繞射訊號出現時間約為 1.1ns，推估深度約為 5.2cm。此距離內模型鋼筋排列亦較密集，故個別鋼筋繞射訊號緊密相鄰，雖加強性干涉訊號不強，但仍可藉由微弱的訊號變化推估鋼筋位置，此範圍內有四處雙曲線，推估其頂點深度分別為 6.3、6.3、5.97 與 5.91cm，且水平距離與內部鋼筋位置相近，故該訊號

應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.62cm，約為 12%。

b 測線後段資料繞射訊號出現時間約為 1.1ns，個別鋼筋繞射訊號相當明顯，推估其頂點深度分別為 6.19、6.02 與 6.02cm，且水平距離與內部鋼筋位置相當，故該訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.58cm，約為 11%。

c 至 g 測線剖面圖特性相似，惟 e 與 g 測線剖面在時間軸約 1ns 附近出現明顯的水平一致性反射訊號，由於此兩側線恰位於橫向鋼筋上方，故此水平訊號應為橫向鋼筋造成。一般而言，測線前段訊號相當明顯，且加強性干涉訊號亦強，故大致上較易判定鋼筋位置；測線中段訊號加強性干涉訊號亦強，可用以研判鋼筋間距，但因繞射訊號較為微弱，較難以進行研判雙曲線頂點位置；測線後段訊號加強性干涉訊號與繞射訊號均相當良好，故較易研判雙曲線頂點位置。上述各測線試驗資料依前、中、後三區段劃分，試驗資料誤差分別為 0.21~0.41cm (9%~16%)、0.66~1.91cm (13~38%) 與 0.70~1.32cm (14%~26%)。

圖 3-17 為測線編號 2 至 17 透地雷達剖面，透地雷達施測參數與圖形表示方法與上述相同。理論上在縱向測線雷達波剖面上應有四處鋼筋繞射訊號，惟測線 2 號至 5 號透地雷達剖面均僅出現 3 處雙曲線，此係測線平行淺層鋼筋，且位於其上方或鄰近位置，故水平一致性鋼筋反射訊號（時間軸約為 0.5ns）干擾兩個鄰近的繞射波波形，造成雙曲線訊號頂點局部破壞，故無法顯示兩個獨立且完整波形，另 6 號至 17 號測線，每個剖面均可獲得四處繞射訊號。

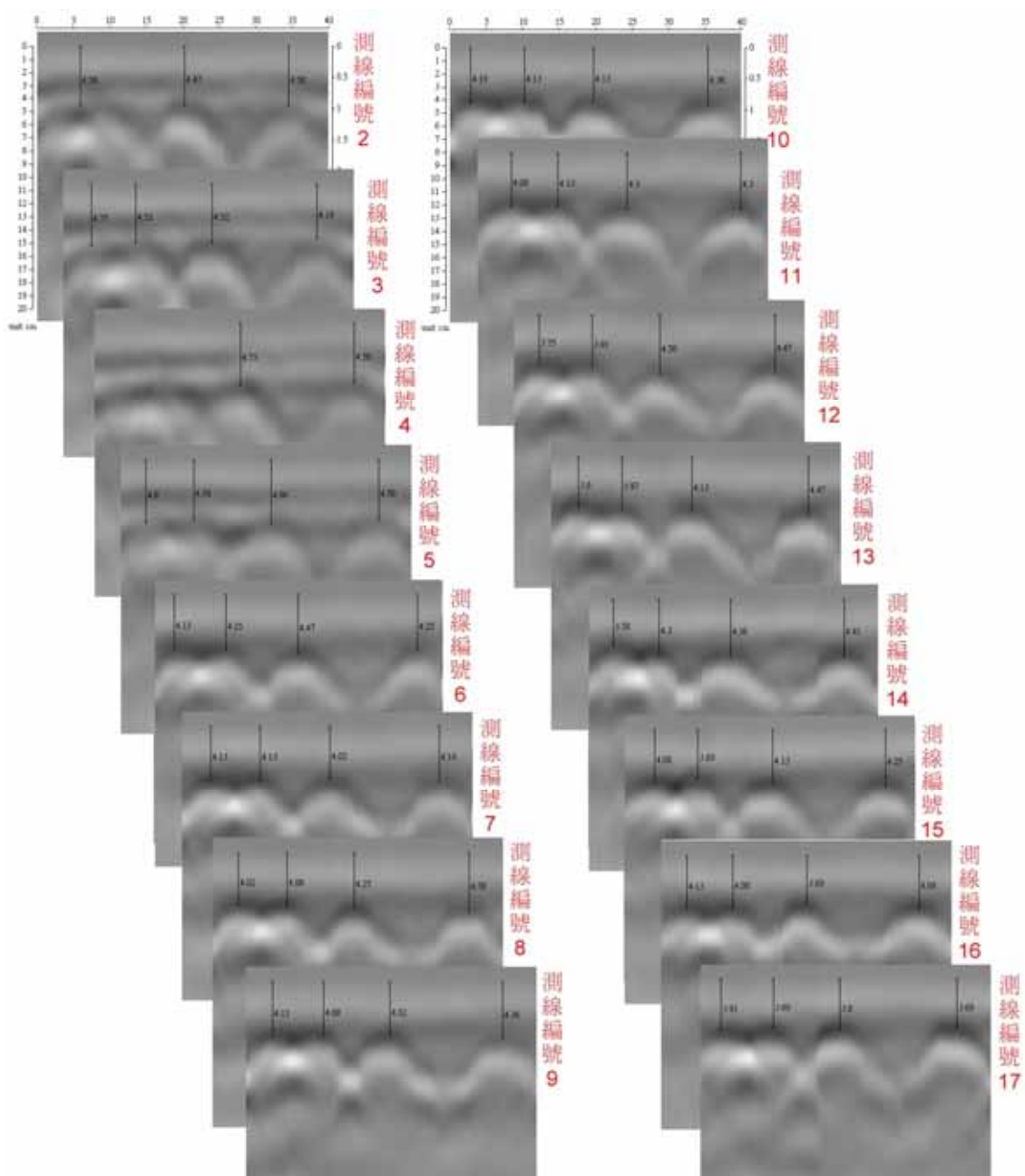


圖 3-17 B 模型縱向測線透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)



圖 3-18 為綜合上述各繞射波資料計算鋼筋各點的深度，並繪製四根鋼筋的深度分布圖。模型實際鋼筋深度自左至右由深變淺，深度約自 3.2cm 變化至 4.5cm。大致上探查結果亦由左至右由深變淺，深度約自 3.4cm 變化至 4.9cm，與實際狀況相當一致。左側因受淺層縱向鋼筋影響，故檢測測誤差稍大，但均在 10% 以內。

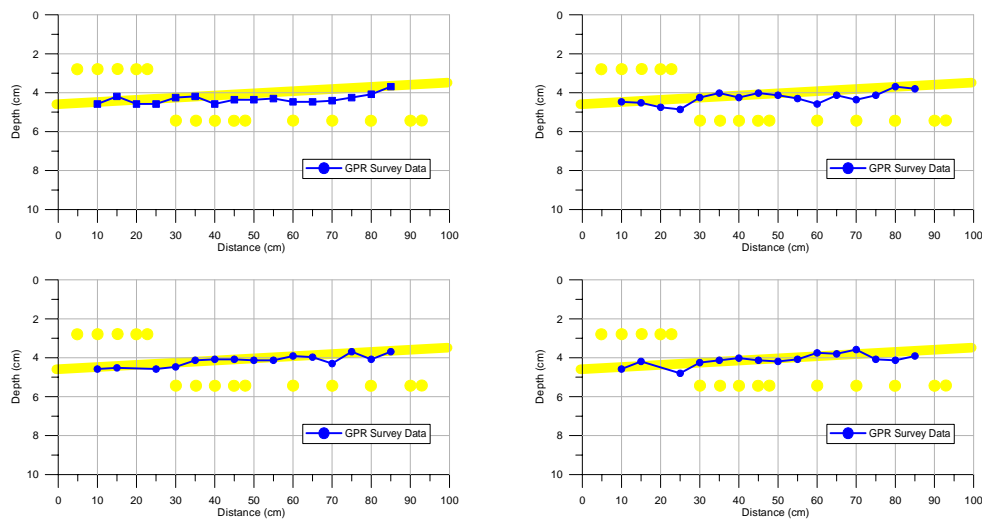


圖 3-18 B 模型縱向測線鋼筋保護層探查結果

(資料來源：本研究整理)

進行鋼筋探查時，對於待測目標需有概略的了解，例如鋼筋走向、設計鋼筋間距/保護層厚度/鋼筋尺寸、與第二、三層鋼筋等。以利測線規劃與透地雷達施測參數設定。但應用於未知鋼筋走向等狀況時，可採用縱橫測線方式進行施測，再採用先進三維資料處理程式進行資料分析，以了解鋼筋的走向與分布，再進行適當的詳細探查。圖 3-19 為 GSSI 公司的三維資料處理軟體程式視窗，對於待

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

測物先行規劃縱橫測線，如圖中顯示的格線，進行透地雷達掃描後，再將蒐集的資料檔案依序建立，程式最終將自動計算測線的空間分布與鋼筋繞射波的時間分布。

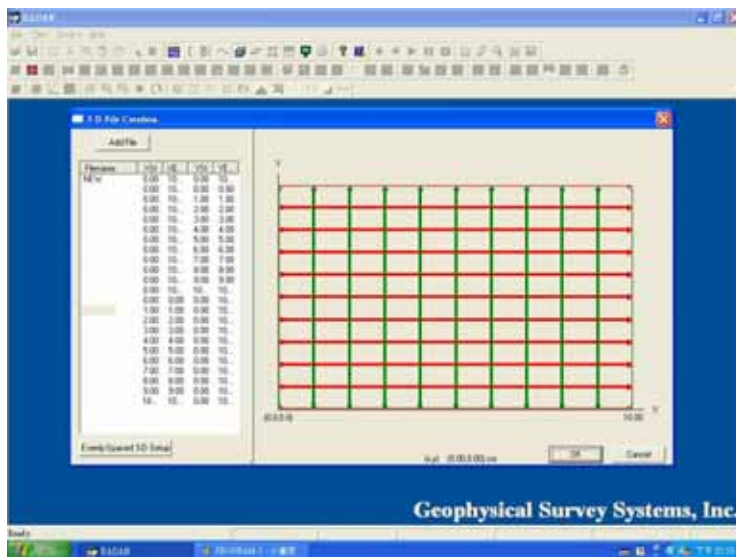
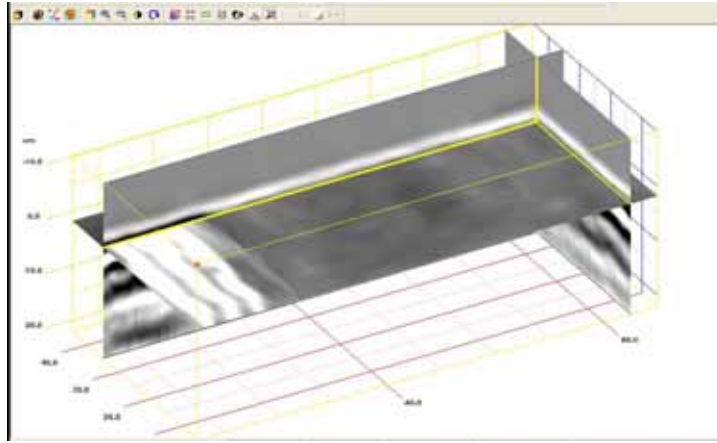


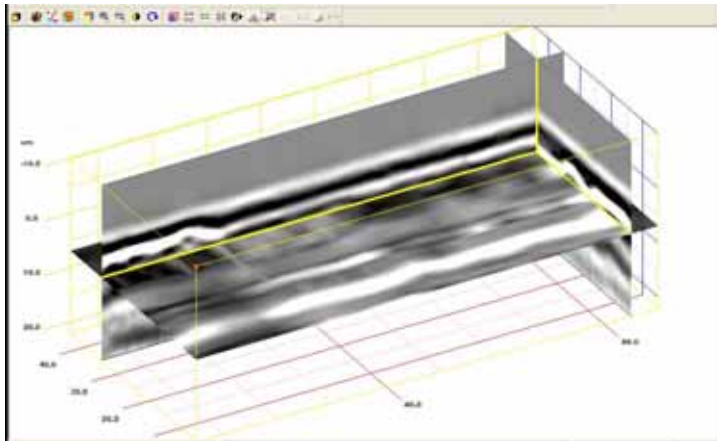
圖 3-19 透地雷達三維資料處理程式

(資料來源：本研究整理)

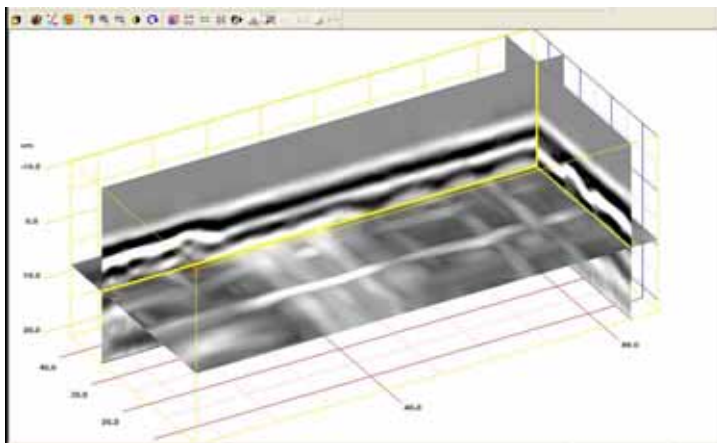
圖 3-20 為 B 模型縱橫測線透地雷達資料處理結果。圖中有三張影像，分別代表不同深度的水平切面。第一張切面深度小於 2.5cm，圖中最明顯的影像為左側三條平行短軸的直線，其相對位置為保護層厚度 2.5cm 的三根鋼筋。第二張切面深度位於 3.5cm，圖中最明顯的影像為兩條平行長軸的直線，其相對位置為保護層厚度 3.4cm 的橫向鋼筋。第三張切面深度位於 5cm，圖中最明顯的影像為數條平行短軸的直線，其相對位置為保護層厚度 5cm 的縱向鋼筋，上述三張影像呈現的鋼筋深度與位置模型鋼筋位相當一致。



深度=2.5cm



深度=3.5cm



深度=5cm

圖 3-20 透地雷達三維資料

(資料來源：本研究整理)

#### 四、C 模型透地雷達試驗結果

C 模型長寬各為 100cm 及 50cm，透地雷達測線僅規劃橫向測線，測線以英文字母代表，分別為 b 至 g，共 6 條測線，測線間距為 5cm，長度均為 90cm，測線起點位於左側，該處鋼筋保護層為 2.5cm。測線分布參見圖 3-21。

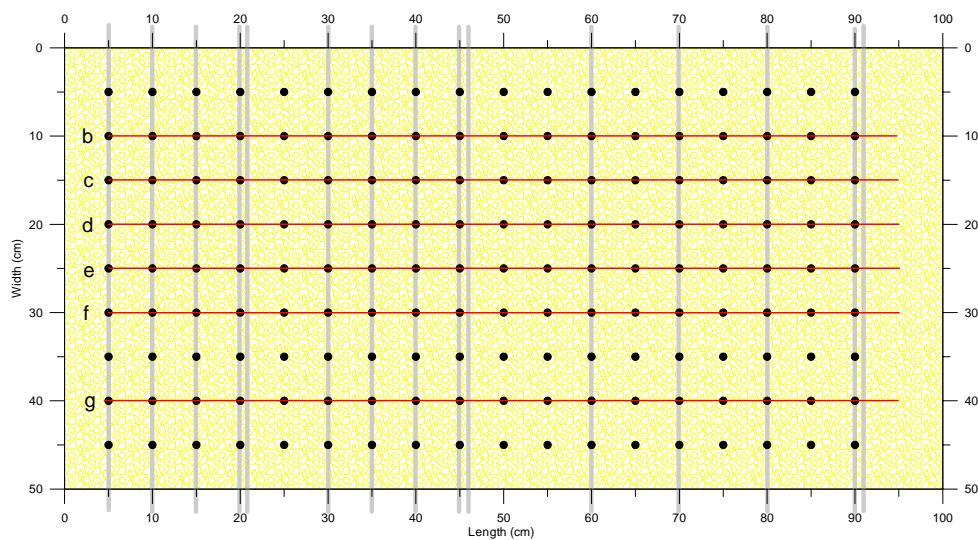


圖 3-21 C 模型透地雷達測線分布圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-22 為測線編號 b 至 g 透地雷達剖面，透地雷達施測參數與圖形表示方法與上述相同。b 測線剖面圖約位在水平距離 15cm 內之繞射訊號較早出現，雙曲線訊號出現時間約為 0.6ns，推估深度約為 2.8cm。此距離內模型鋼筋排列較為密集，故個別鋼筋繞射訊號緊密相鄰，較難以研判，惟因加強性干涉訊號相對明顯，故有利於協助研判鋼筋位置，此範圍內有三處雙曲線，其頂點深度分別為 2.88、3.21 與 3.04cm，且水平距離與內部鋼筋位置相近，故該

訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.53cm，約為 21%。

b 測線中段資料繞射訊號較為微弱，出現時間約為 1.2 至 1.5ns，推估深度約為 5.2cm。此距離內模型鋼筋排列亦較密集，故個別鋼筋繞射訊號緊密相鄰，雖加強性干涉訊號亦不明顯，難以研判鋼筋位置。b 測線後段資料繞射訊號出現時間約為 1.1ns，個別鋼筋繞射訊號相當明顯，推估其頂點深度分別為 5.38、5.44、4.82 與 4.77cm，且水平距離與內部鋼筋位置相當，故該訊號應為鋼筋造成。上述試驗資料平均誤差為 0.3cm，約為 6%。

c 至 g 測線剖面圖特性相似，惟 e 與 g 測線剖面在時間軸約 1ns 附近出現明顯的水平一致性反射訊號，由於此兩側線恰位於橫向鋼筋上方，故此水平訊號應為橫向鋼筋造成。一般而言，測線前段訊號相當明顯，且加強性干涉訊號亦強，故大致上較易判定鋼筋位置；測線中段訊號加強性干涉訊號與繞射訊號較為微弱，較難以進行研判雙曲線頂點位置；測線後段訊號加強性干涉訊號與繞射訊號均相當良好，故較易研判雙曲線頂點位置。本模型與前述兩模型差別除了埋設鋼筋的號數外，本模型並未埋設橫向鋼筋，故造成透地雷達剖面較無水平一致性的反射訊號，較易進行繞射訊號的判讀。上述各測線試驗資料依前、後兩區段劃分，試驗資料誤差分別為 0.15~0.75cm (6%~30%) 與 0.46~0.92cm (9%~18%)。

表 3-2 為檢測結果綜合整理表。一般而言，透地雷達檢測結果精度與鋼筋尺寸、保護層厚度並無太大關係，惟鋼筋間距與保護層厚度比約為 1 時，部分鋼筋繞射波並無法採人為區分，最終並不納入計算誤差範圍。

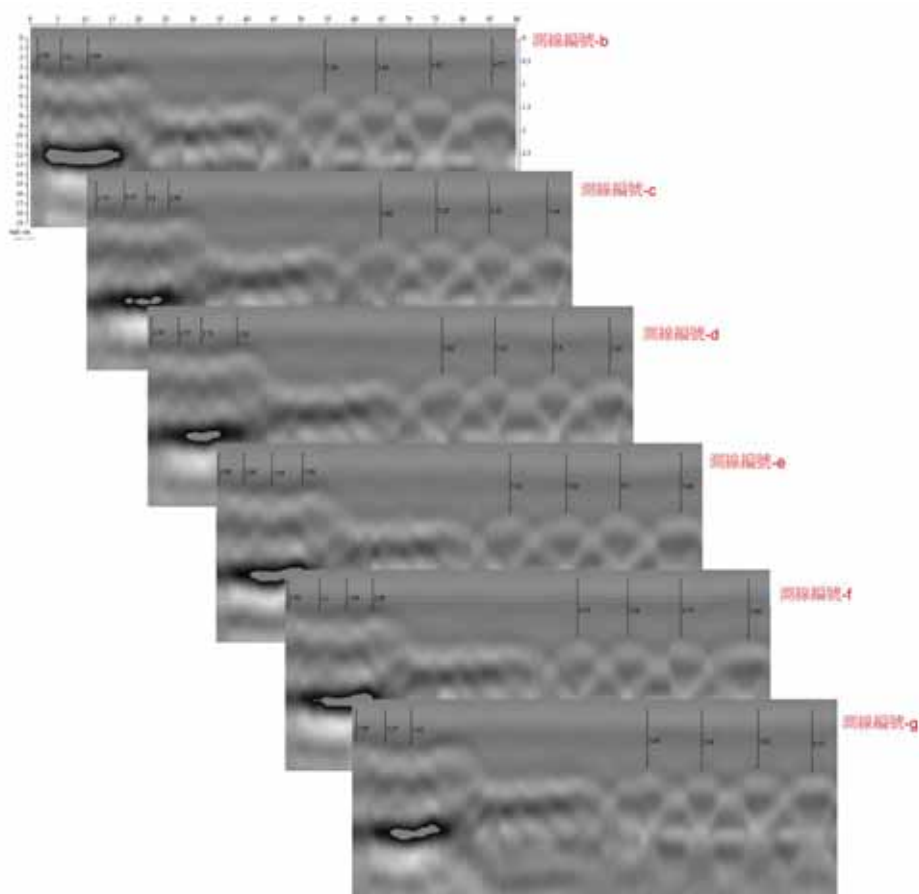


圖 3-22 C 模型橫向測線透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 鋼筋保護層厚度檢測結果(一)

鋼筋尺寸	D16	D16	D19	D19	D29	D29
模型保護層厚度	2.5	5	2.5	5	2.5	5
平均檢測結果	3.01	5.53	2.81	5.91	2.95	5.69
平均檢測誤差	0.51	0.53	0.31	0.91	0.45	0.69
誤差比	20%	11%	12%	18%	18%	14%

單位:cm

(資料來源：本研究整理)



#### 第四節 鋼筋搭接位置檢測試驗

理論上單一鋼筋產生一個完整的繞射波訊號，其型態類似雙曲線。但兩根鄰近的鋼筋，兩個繞射波訊號將發生干涉現象，雙曲線型態被破壞，形成雙山丘訊號型態，參見圖 3-23。若鋼筋間距仍足夠大，此兩雙曲線頂點仍可分開，故可藉以研判鄰近的鋼筋位置，但若間距不夠大時、波長過長或波形受干擾時，兩處頂點並不易分辨，則無從研判鋼筋位置，上述情景可參見圖 3-24 案例資料。圖 3-23 說明在雷達波剖面上某深度位置，單一鋼筋繞射波寬度為  $w_1$ ，搭接鋼筋繞射波寬度為  $w_2$ ，而  $w_2$  明顯大於  $w_1$ ，因此繞射波波包（Wave Envelope）的寬度似乎可作為研判鋼筋搭接位置的指標。

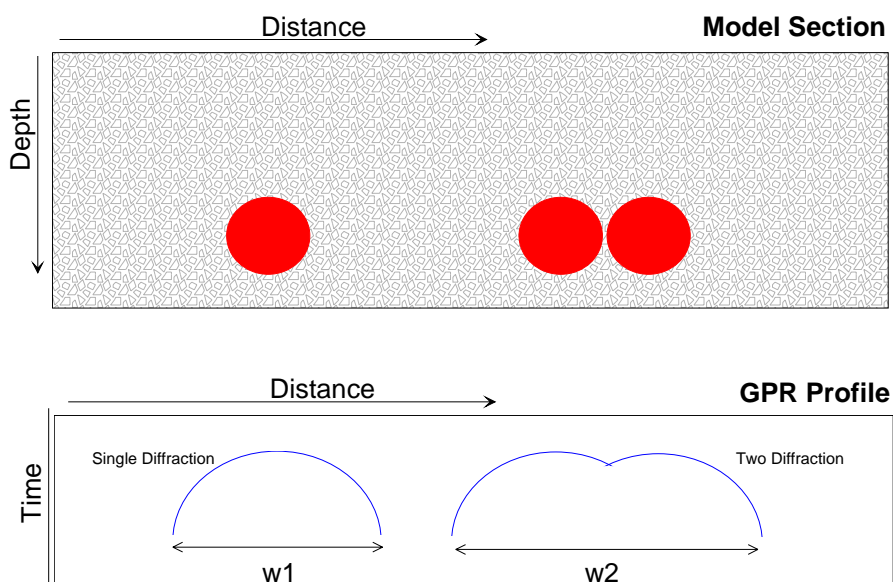


圖 3-23 搭接鋼筋理論繞射波

（資料來源：本研究整理）

圖 3-24 為 A 模型中段部分橫向透地雷達詳細探查剖面，測線位置約位於圖 3-11 的 b 測線位置的中段部分（20cm 至 50cm）。圖中在時間軸約 1.5ns 處出現四個比較強烈的訊號，根據前面試驗結果，其應為鋼筋繞射訊號的加強性干涉位置，並非鋼筋位置。

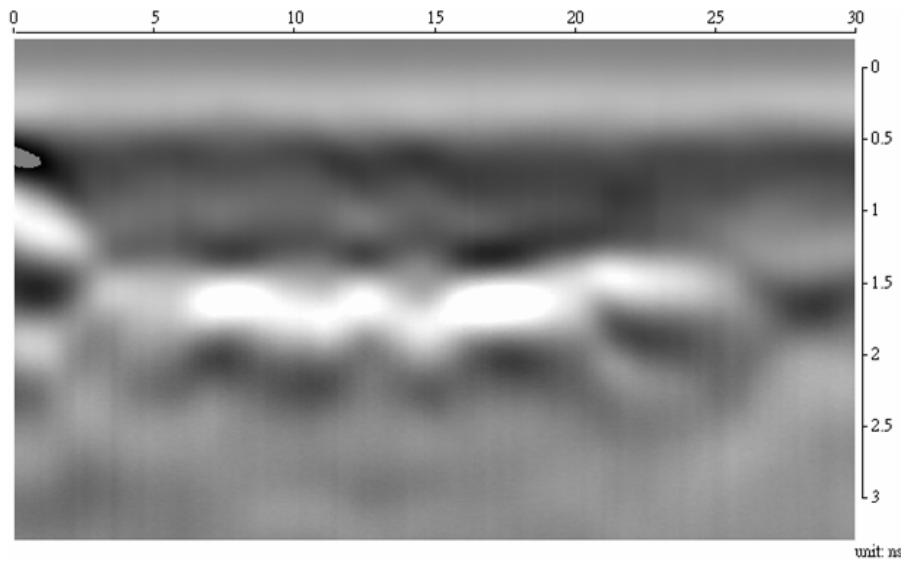


圖 3-24 A 模型搭接鋼筋透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

圖 3-25 為人為點選雙曲線資料，圖中由左至右共形成四個雙曲線圖形，第一至第三個圖形的寬度較小，第四個圖形寬度較大。就時間軸 1.25ns 而言，第一圖形的寬度 ( $w_1$ ) 約為 2.2cm，第二個圖形的寬度 ( $w_2$ ) 約為 2.4cm，第三個圖形的寬度 ( $w_3$ ) 約為 2cm，第四個圖形的寬度 ( $w_4$ ) 約為 3.9cm。模型中兩根鋼筋並排位置恰位於距離 20cm 處，也就是第四個雙曲線圖形位置。

但雙曲線頂點高度的不同，將影響雙曲線的寬度，也就是說，



較淺的鋼筋，其雙曲線位置較高，故其寬度要比較深的鋼筋來得大。為修正鋼筋深度不同造成的影響，上述雙曲線寬度量測方式將採變動深度量測方式，也就是將進行個別雙曲線的寬度量測，在單一雙曲線頂點以下 $\Delta t$ 處，量測該處的雙曲線寬度，作為進一步資料處理的依據。

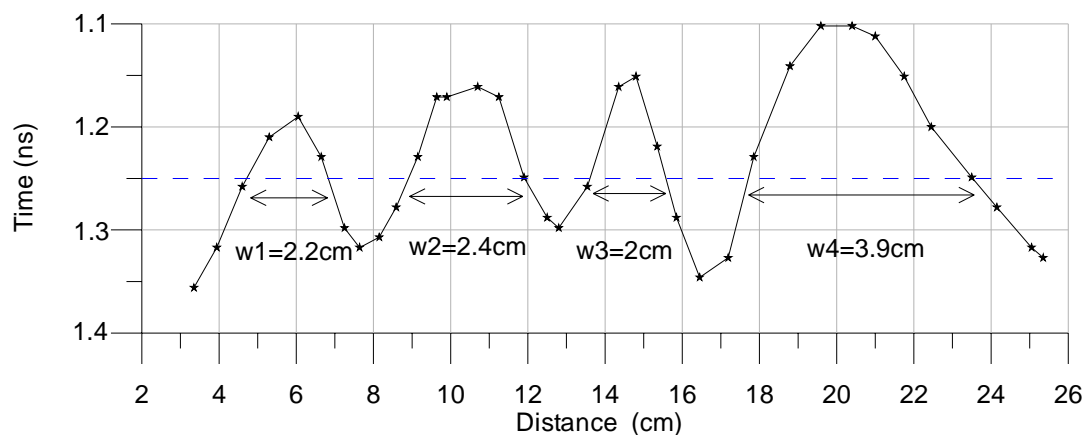


圖 3-25 A 模型鋼筋繞射時間寬度圖

(資料來源：本研究整理)

上述資料係為單一測線結果，該測線位於模型縱軸位置為 10cm 處，上述資料可整理成為三維資料  $(x,y,t)$ ，其中  $x$  為距離， $y$  為測線縱軸位置， $t$  為雙曲線走時。本節繼續在模型縱軸位置為 15cm、20cm、25cm、30cm、35cm 及 40cm 處分別佈置測線，進行透地雷達施測，每個透地雷達剖面再進行雙曲線走時挑選。綜合上述七條測線資料可綜合成三維分布資料，再採用專業三維處理軟體進行繪製繞射時間三維分布圖。圖 3-26 為繞射時間三維分布圖，其中顏色較淺部分表示較小的繞射時間，故白色部分可視為鋼筋位置。右側顯示白色的寬度較大，與鋼筋搭接位置相當一致。

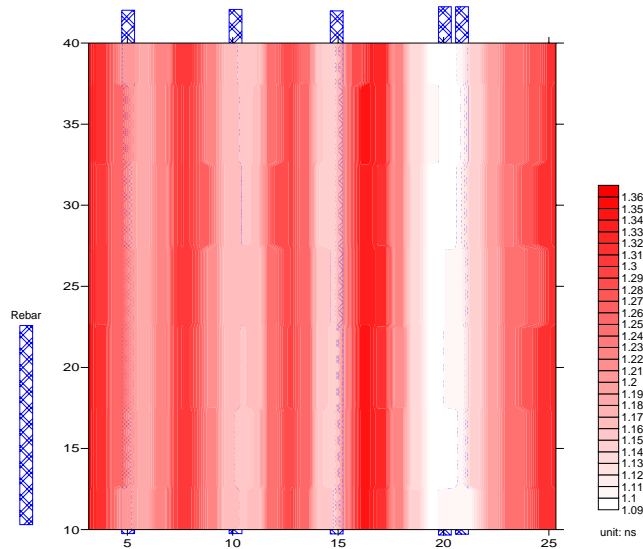


圖 3-26 D16 鋼筋繞射時間三維分布圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-27 為 B 模型後段部分橫向透地雷達詳細探查剖面，測線位置約位於圖 3-11 的 b 測線位置的後段部分 (50cm 以後)。圖中在時間軸約 1.5ns 處出現四個比較強烈的鋼筋繞射訊號。

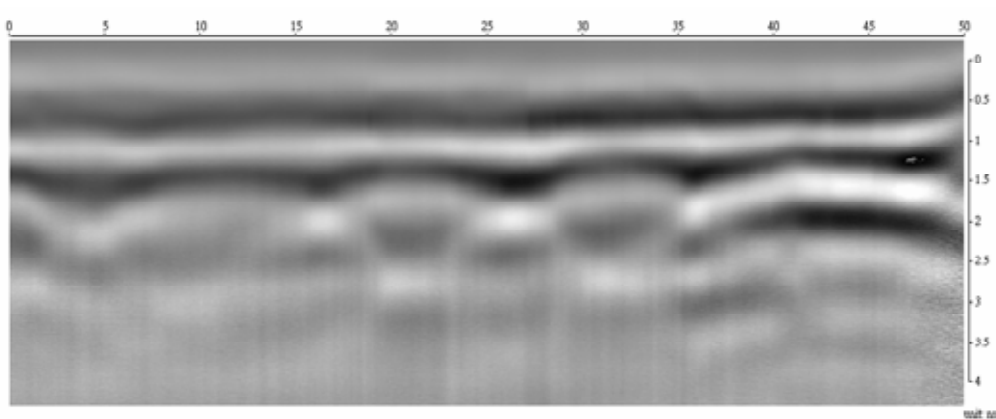


圖 3-27 B 模型搭接鋼筋透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

圖 3-28 為人為點選雙曲線資料，圖中由左至右共形成四個雙曲線圖形，第一至第三個圖形的寬度較小，第四個圖形寬度較大。第一圖形的寬度 ( $w_1$ ) 約為 7.9cm，第二個圖形的寬度 ( $w_2$ ) 約為 7.6cm，第三個圖形的寬度 ( $w_3$ ) 約為 7.7m，第四個圖形的寬度 ( $w_4$ ) 約為 11cm。模型中兩根鋼筋並排位置洽位於距離 45cm 處，也就是第四個雙曲線圖形位置。

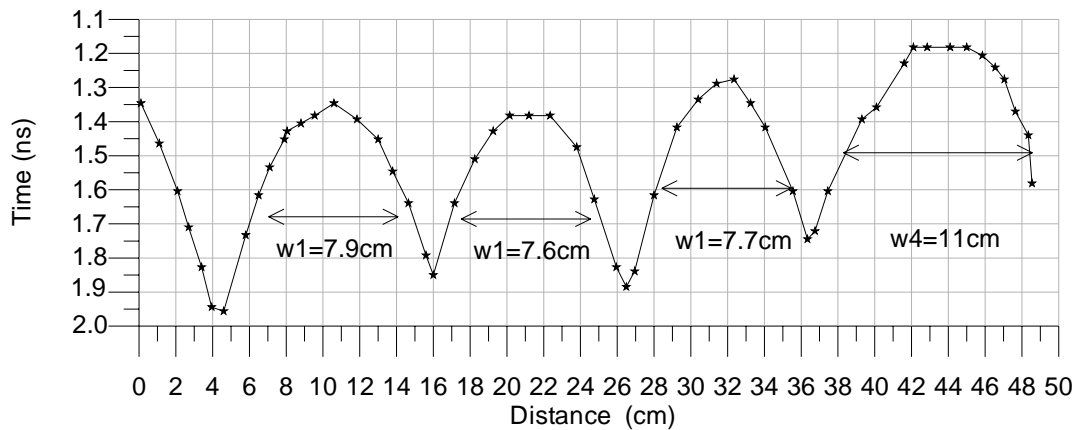


圖 3-28 B 模型鋼筋繞射時間寬度圖

(資料來源：本研究整理)

上述資料係為單一測線結果，該測線位於模型縱軸位置為 10cm 處，上述資料可整理成為三維資料 ( $x,y,t$ )，其中  $x$  為距離， $y$  為測線縱軸位置， $t$  為雙曲線走時。本節繼續在模型縱軸位置為 15cm、20cm、25cm、30cm、35cm 及 40cm 處分別佈置測線，進行透地雷達施測，每個透地雷達剖面再進行雙曲線走時挑選。綜合上述七條測線資料可綜合成三維分布資料，再採用專業三維處理軟體進行繪製繞射時間三維分布圖。圖 3-29 為繞射時間三維分布

圖，其中顏色較淺部分表示較小的繞射時間，故白色部分可視為鋼筋位置。右側顯示白色的寬度較大，與鋼筋搭接位置相當接近。

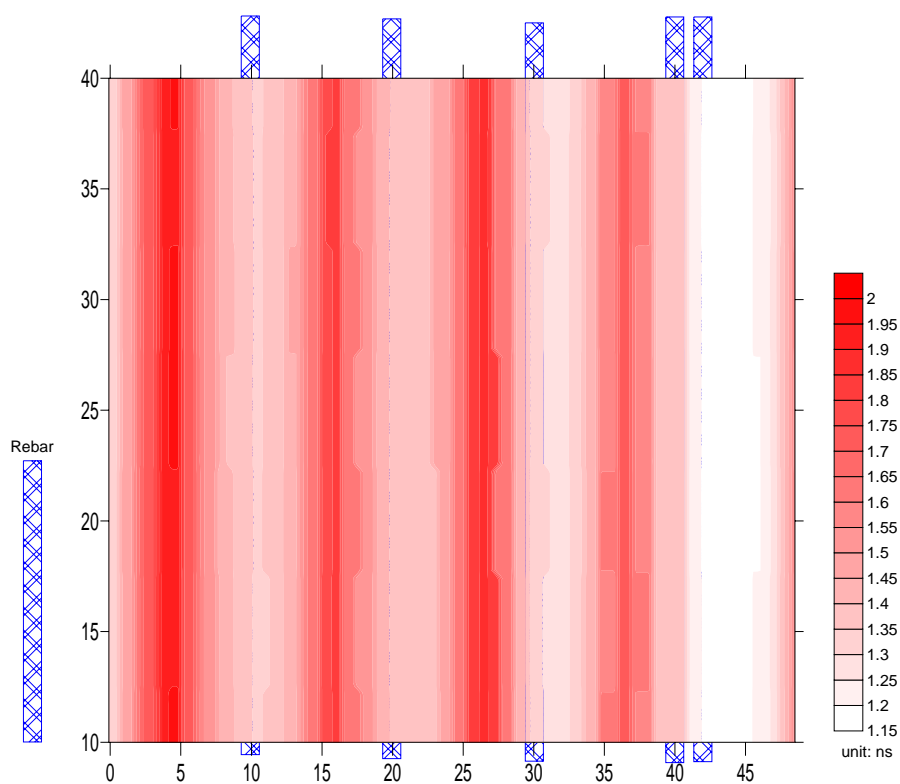


圖 3-29 D19 鋼筋繞射時間分布圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-30 為 C 模型後段部分橫向透地雷達詳細探查剖面，測線位置約位於圖 3-11 的 b 測線位置的后段部分（水平距離 50cm 以後）。圖中自左至右，在時間軸約 1.5ns 處出現四個比較強烈的鋼筋繞射訊號，其中第一至第三個繞射訊號雙曲線寬度較為相似，第四個雙曲線則明顯較寬，模型相對位置的鋼筋係為兩根緊鄰並排。

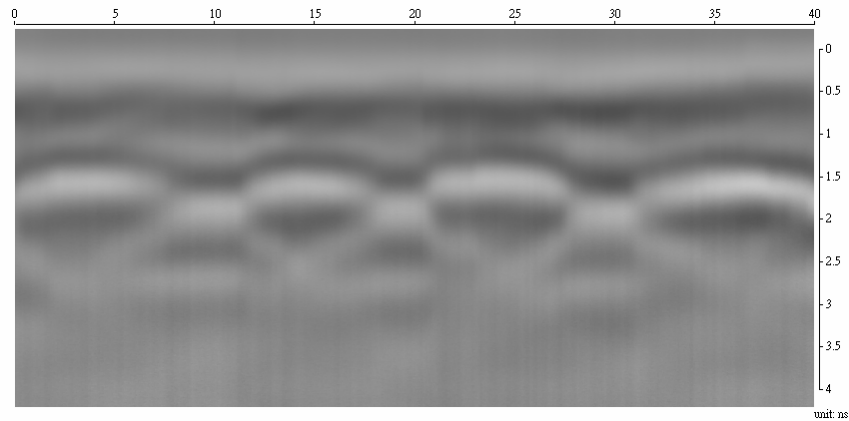


圖 3-30 C 模型搭接鋼筋透地雷達剖面

(資料來源：本研究整理)

圖 3-31 為以人為方式點選繞射波包絡線資料，圖中由左至右共形成四個雙曲線圖形，第一至第三個圖形的寬度較小，第四個圖形寬度較大。第一圖形的寬度 ( $w_1$ ) 約為 6.1cm，第二個圖形的寬度 ( $w_2$ ) 約為 5.6cm，第三個圖形的寬度 ( $w_3$ ) 約為 5.8m，第四個圖形的寬度 ( $w_4$ ) 約為 6.7cm。模型中兩根鋼筋並排位置洽位於距離 35cm 處，也就是第四個雙曲線圖形位置。

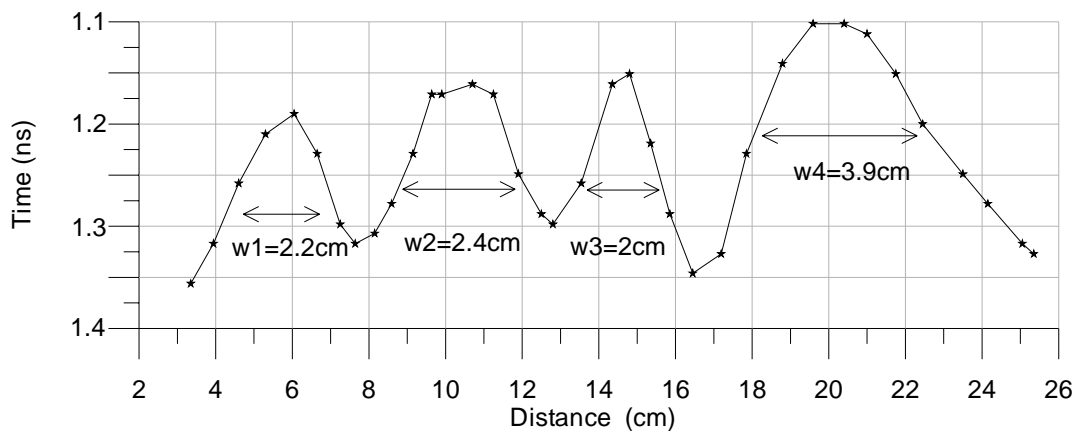


圖 3-31 C 模型鋼筋繞射時間寬度圖

(資料來源：本研究整理)

上述資料係為單一測線結果，該測線位於模型縱軸位置為10cm處，上述資料可整理成為三維資料(x,y,t)，其中x為距離，y為測線縱軸位置，t為雙曲線走時。本節繼續在模型縱軸位置為15cm、20cm、25cm、30cm、35cm及40cm處分別佈置測線，進行透地雷達施測，每個透地雷達剖面再進行雙曲線走時挑選。綜合上述七條測線資料可綜合成三維分布資料，再採用專業三維處理軟體進行繪製繞射時間三維分布圖。圖3-32為繞射時間三維分布圖，其中顏色較淺部分表示較小的繞射時間，故白色部分可視為鋼筋位置。右側顯示白色的寬度較大，與鋼筋搭接位置相當接近。

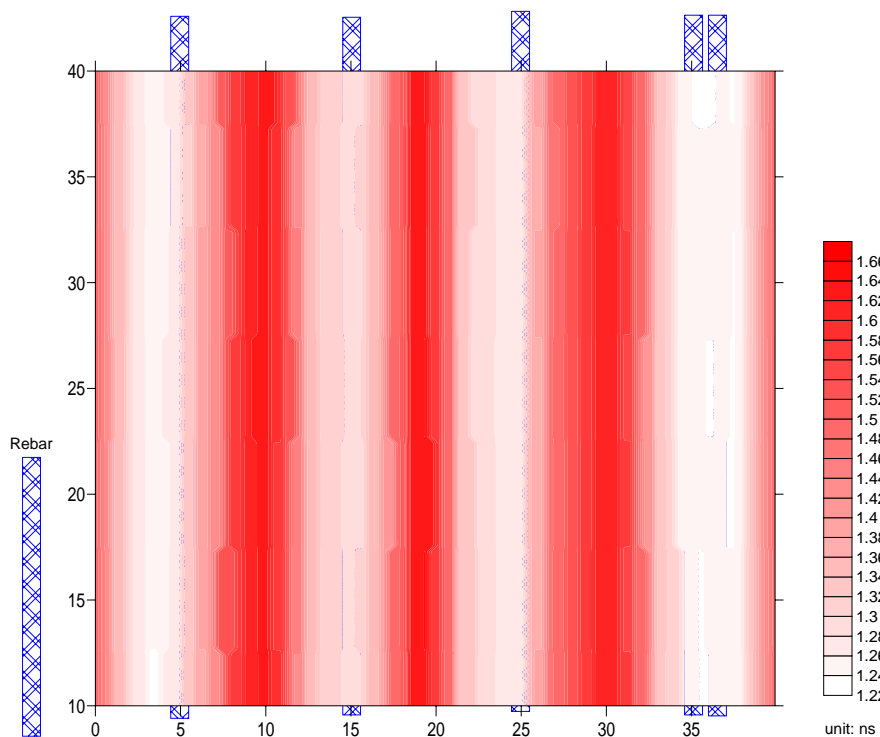


圖 3-32 D29 鋼筋繞射時間分布圖

(資料來源：本研究整理)

### 第五節 深層鋼筋位置檢測

圖 3-33 為 C 模型透地雷達原始資料剖面。圖中左側在距離 25cm 以內單層鋼筋位置，此處鋼筋保護層僅為 2.5cm 且鋼筋間距為 5cm，又因鋼筋直徑達 2.87cm，所以緊密的鋼筋幾乎形成一個金屬平面，對於雷達波而言，鋼筋繞射訊號大多互相干擾，且加強干涉效應明顯，所以在時間軸約為 2 至 2.5ns 處的訊號強度相當明顯（灰階的兩個極值）；圖中距離約為 30cm 至 50cm 處為兩層鋼筋位置，深度分別為 5cm 及 10cm，此處鋼筋排列與上述相同，故鋼筋繞射訊號互相干擾，加強性干涉訊號易相當明顯，遮蔽下方的鋼筋繞射訊號；圖中右側距離約為 55cm 至 90cm 處為模型內含三層鋼筋位置，深度分別為 5cm、10cm 及 15cm，此處鋼筋保護層為 5cm，鋼筋間距為 10cm，第一層鋼筋的繞射訊號相當明顯，且相當易於分辨個別雙曲線訊號頂點位置，進行鋼筋定位及保護層厚度估算。此處位於時間軸約為 2ns 處出現等間距明顯反射訊號，其位置相當於第二層鋼筋深度。

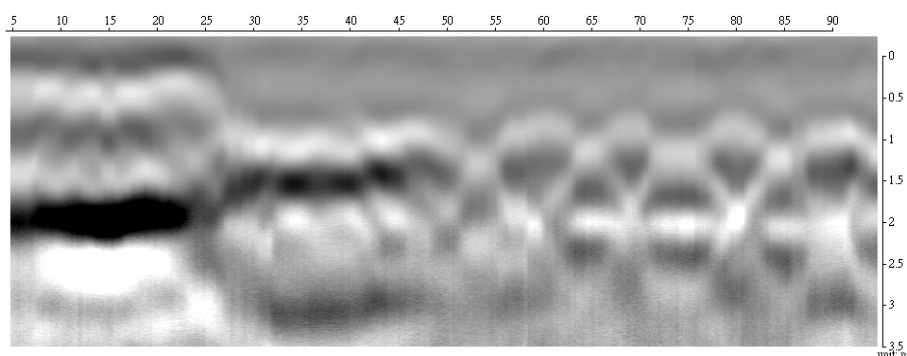


圖 3-33 模型 C 透地雷達剖面

（資料來源：本研究整理）

上述討論的局部透地雷達經專業軟體進行資料處理，處理程序包含濾波 (Filtering)、加強 (Gain) 及訊號移位 (Migration) 等，處理完成後再進行一次訊號加強，圖 3-34 為處理後結果。圖中以圓圈標示者為模型鋼筋位置，該位與透地雷達明顯訊號位置相當一致，標示"x"者為加強性干涉訊號位置，其洽位於第一層鋼筋繞射訊號的中間。另位於第一層雙曲線頂點正下方亦出現相當明顯的反射訊號，其應為第一層鋼筋與第二層鋼筋射訊號的疊加結果。惟第三層鋼筋在透地雷達剖面上仍無法獲得相對位置的繞射訊號。

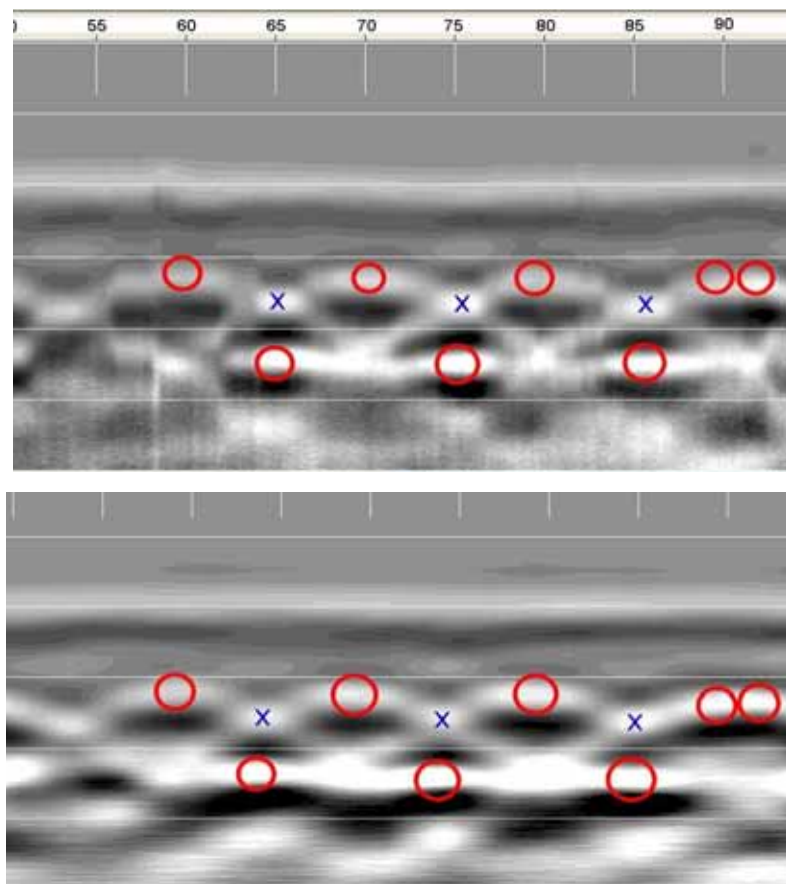


圖 3-34 C 模型資料處理後透地雷達剖面 (D29)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-35 為 B 模型透地雷達掃描資料處理後結果。圖中以圓圈標示者為模型鋼筋位置，該位與透地雷達明顯訊號位置相當一致，標示"x"者為加強性干涉訊號位置，其恰位於第一層鋼筋繞射訊號的中間。另位於第一層雙曲線頂點正下方亦出現相當明顯的反射訊號，其應為第一層鋼筋與第二層鋼筋射訊號的疊加結果。惟此處第二層鋼筋繞射訊號強度不及上述資料，可能因鋼筋尺寸較小造成的反射波能量較為微弱。另第三層鋼筋在透地雷達剖面上仍無法獲得相對位置的繞射訊號。

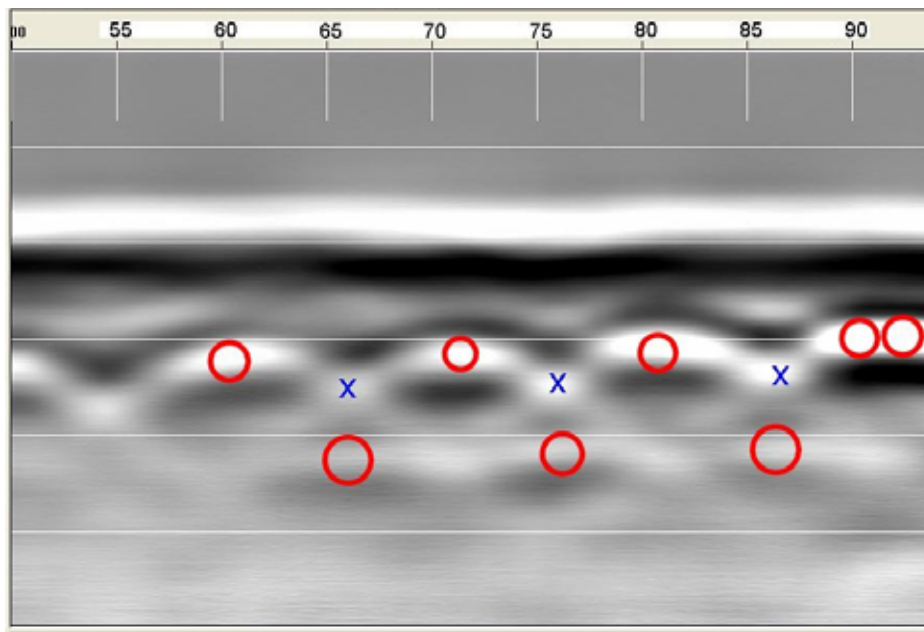


圖 3-35 B 模型資料處理後透地雷達剖面 (D19)

(資料來源：本研究整理)

圖 3-36 為 A 模型透地雷達掃描資料處理後結果。圖中以圓圈標示者為模型鋼筋位置，該位與透地雷達明顯訊號位置相當一致，標示"x"者為加強性干涉訊號位置，其洽位於第一層鋼筋繞射訊號的中間。另位於第一層雙曲線頂點正下方亦出現相當明顯的反射訊號，其應為第一層鋼筋與第二層鋼筋射訊號的疊加結果。惟此處第二層鋼筋繞射訊號強度不及前兩者資料，可能因鋼筋尺寸較小造成的反射波能量較為微弱。另第三層鋼筋在透地雷達剖面上仍無法獲得相對位置的繞射訊號。

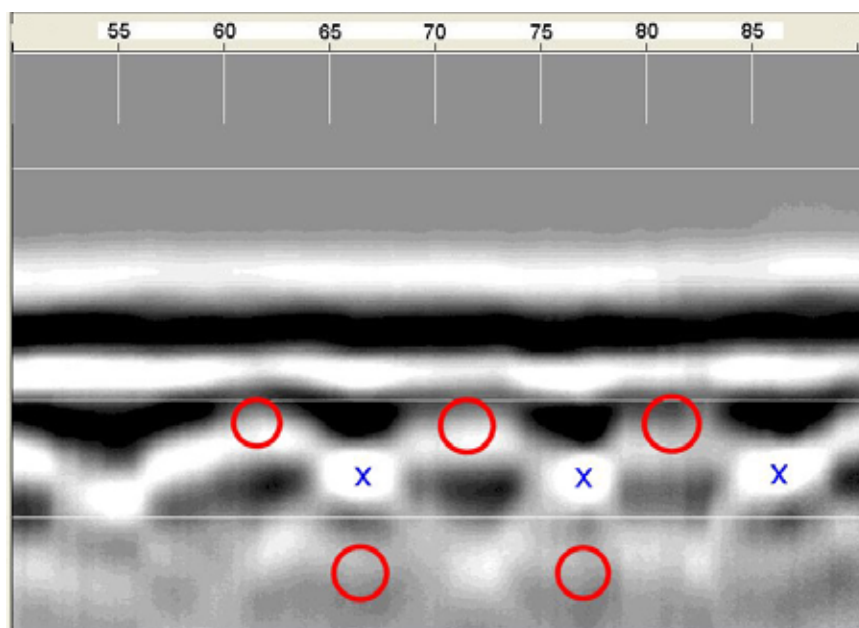


圖 3-36 A 模型資料處理後透地雷達剖面 (D16)

(資料來源：本研究整理)

### 第六節 鋼筋尺寸檢測試驗

理論上透地雷達剖面之鋼筋繞射時間與鋼筋尺寸有關。圖 3-37 為繞射距離說明圖，圖中  $d$  為鋼筋保護層厚度， $r$  為鋼筋半徑， $x$  為支距 (offset)，也就是與鋼筋中心點的水平距離。位於  $x$  位置的透地雷達天線，其與鋼筋中心點的距離為  $h$ ，但是雷達波最短距離應為  $h-r$ ，故可藉由下列公式 3-6 計算求得理論走時。

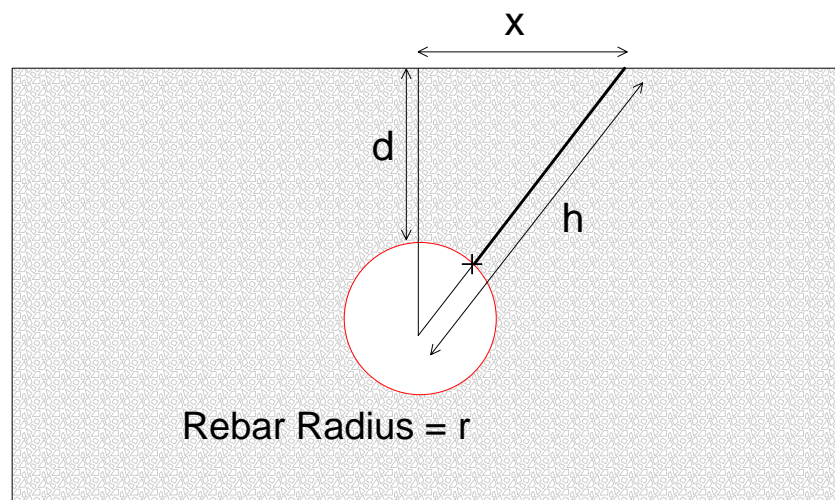


圖 3-37 鋼筋繞射距離說明圖

(資料來源：本研究整理)

$$t = 2 \left( \frac{\sqrt{x^2 + (d+r)^2} - r}{V_{\text{CONCRETE}}} \right) \dots\dots\dots \text{(公式 3-6)}$$

根據公式 3-6，在相同的鋼筋保護層厚度、混凝土介電常數等

條件下，對於不同的鋼筋半徑，在不同的支距位置應有不同的雷達波走時。圖 3-38 為保護層厚度為 5cm，混凝土介電常數為 10，鋼筋半徑自 0.5 至 2.5cm 的理論支距-走時圖。圖中顯示在支距為 5cm 處， $r=2.5\text{cm}$  的走時與  $r=0.5\text{cm}$  的走時約僅相差 0.08ns，支距超過 15cm 時，兩者時間差大致上為 0.2ns。本研究採用透地雷達系統資料解析度約可達 0.0098ns，故理論上應可分辨此極小時間差。

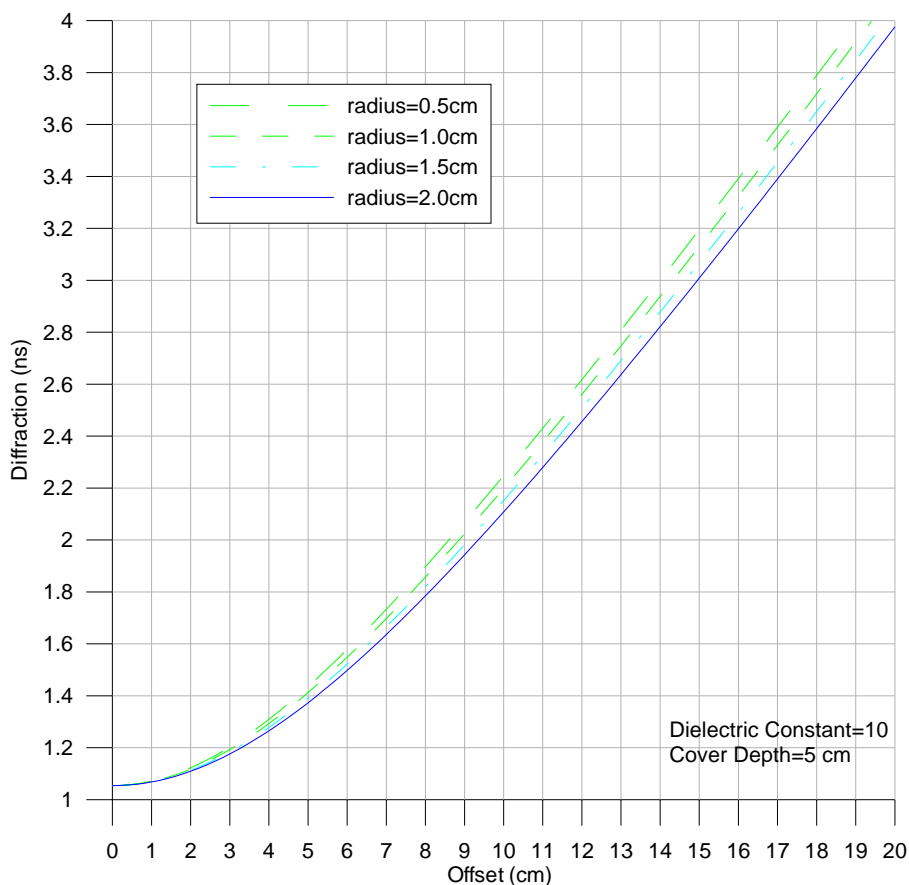


圖 3-38 鋼筋半徑與支距-走時比較圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-39 左側為既有一號模型透地雷達剖面，施測天線為

1.5GHz，記錄時間為 5ns，採樣個數為 512，採樣間距為 0.0098ns。右圖中圓點為鋼筋繞射波走時與支距資料，兩條曲線為資料擬合結果。一般應用時，鋼筋保護層厚度、混凝土介電常數與鋼筋半徑均為未知參數，故應採三變數進行資料擬合，圖中最佳擬合曲線（上方曲線）參數分別為：鋼筋保護層為 8.78cm、混凝土介電常數為 6.8，鋼筋半徑為 2.4cm，檢測誤差約為 67%。

惟因上述資料擬合過程為純數學計算，不含任何物理意義，而一般鋼筋保護層厚度資料較易獲得且可經由多種方法確認，不應為變數，故在固定鋼筋保護層為 9.2cm 的前提下，進行最小平方插法進行曲線擬合，此最佳擬合曲線（下方曲線）參數分別為：混凝土介電常數為 6.2，鋼筋半徑為 1.5cm，本模型鋼筋號數為 9 號(D29)，直徑為 28.7mm，故檢測誤差約僅為 5%。

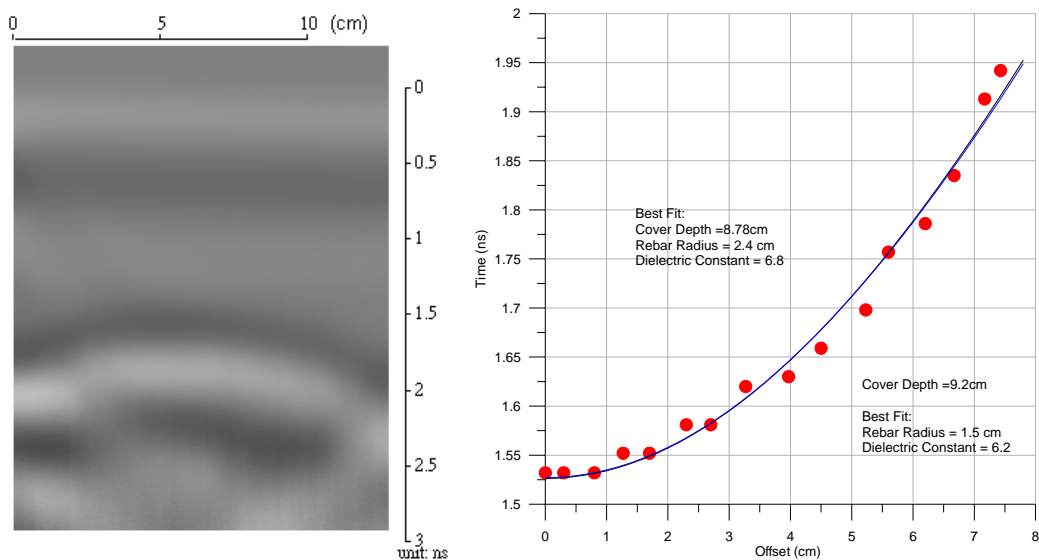


圖 3-39 既有一號模型鋼筋半徑與支距-走時比較圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-40 為針對不同鋼筋尺寸進行的透地雷達試驗，由左至右分別為 D16、D19 與 D29 等鋼筋尺寸的透地雷達剖面。施測天線為 1.5GHz，記錄時間為 5ns，採樣個數為 512，採樣間距為 0.0098ns。

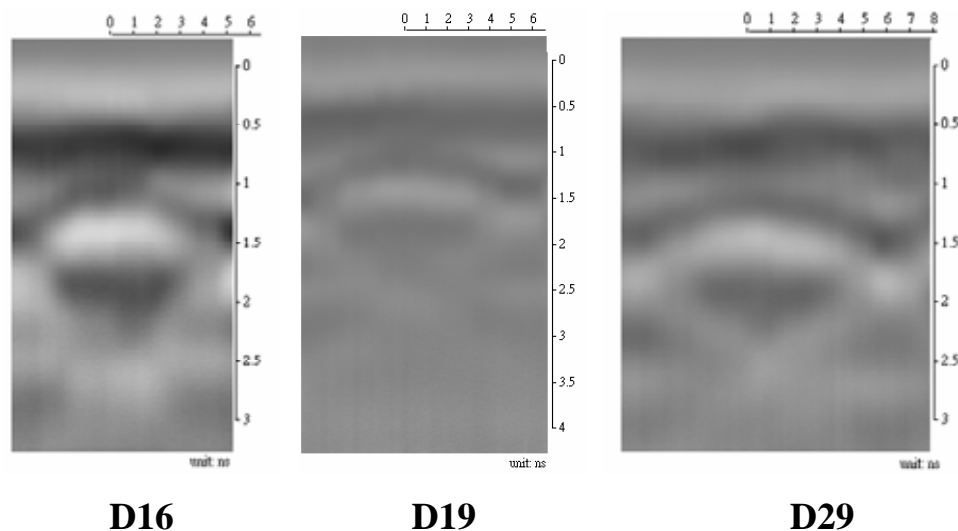


圖 3-40 鋼筋透地雷達剖面比較圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-41 為 D16、D19 與 D29 鋼筋繞射時間資料分布，圖中曲線係採保護層厚度 5cm，介電常數為 10 與不同鋼筋半徑的理論繞射時間。在支距 3cm 內，繞射時間資料與理論值相近，但較遠支距處則明顯大於理論值，此係因繞射波受到鄰近鋼筋或其他方向鋼筋的干擾，且波訊的起始點較不明確，皆影響人為挑波過程。

不同鋼筋半徑之理論值在短支距內支繞射時間差極為微小，相當難以人為方式分辨檢測資料所屬的鋼筋尺寸，若以數學方式處理 D16 與 D19 資料則顯得誤差過大。惟因 D29 試驗位置並無其他方向鋼筋干擾，故其繞射時間資料與曲線相當符合，檢測鋼筋半徑約為 2cm，檢測誤差約為 39%。

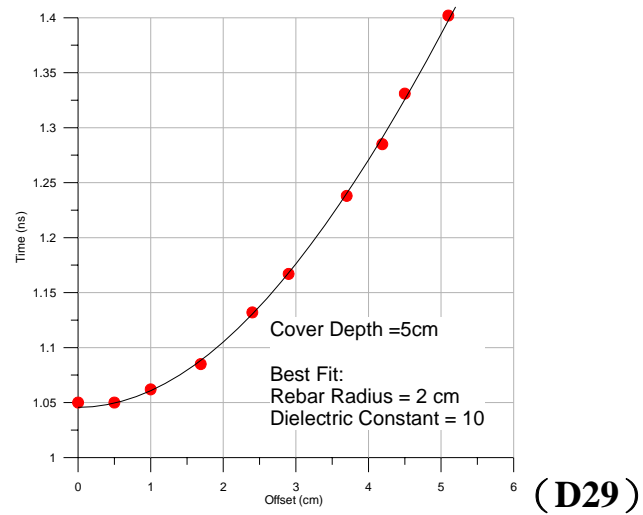
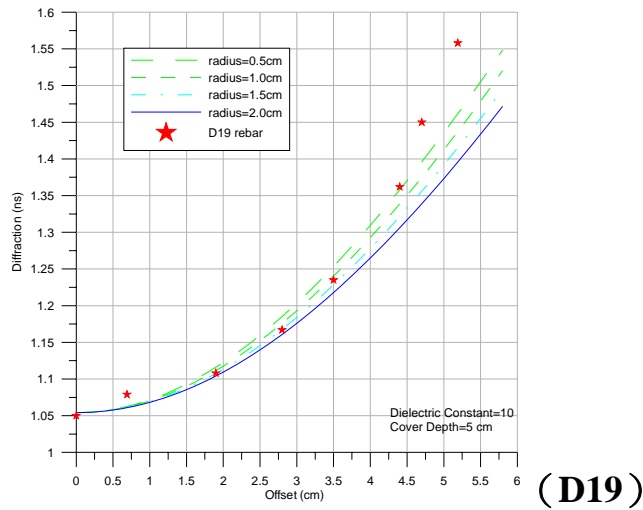
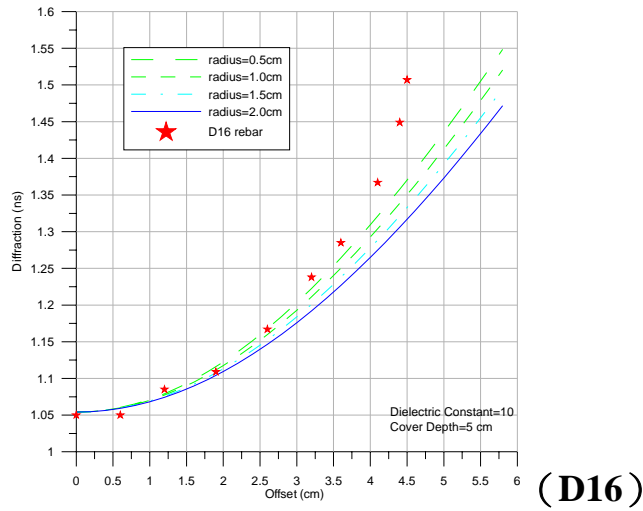


圖 3-41 鋼筋繞射波時間-展距擬合圖

(資料來源：本研究整理)



## 第七節 震波測勘試驗

### 一、既有一號模型試驗

#### 折射震波試驗

圖 3-42 為震測法試驗佈置示意圖，折射震測試驗共規劃四條折射測線，測線走向與埋設鋼筋走向一致，測線編號分別為 a1、a2、a3 與 a4，其中 a1 與 a4 恰位於埋設的鋼筋上方。測點間距為 2cm，近支距為 4cm，遠支距為 40cm。

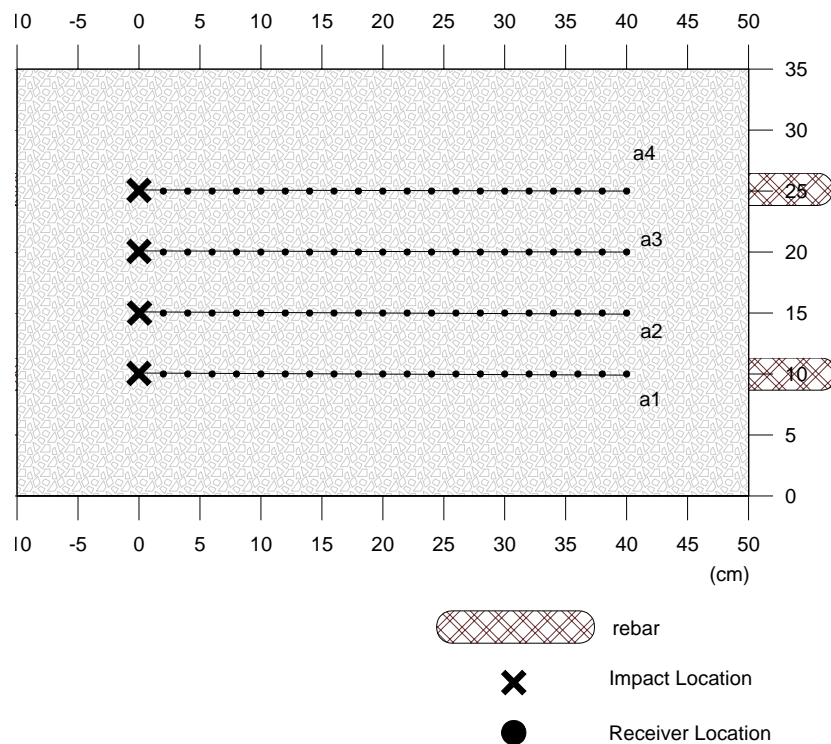


圖 3-42 折射震波試驗探勘佈置圖一

(資料來源：本研究整理)



試驗方式採單一頻道方式進行，使用機械裝置配合可感測時間原點敲擊器及訊號接收器，同時紀錄敲擊及接收訊號，在完成單一測點試驗後，敲擊位置固定不動，再將接收器移往下一測點繼續進行，照片 3-5 為試驗過程。



照片 3-5 折射震波試驗過程

(資料來源：本研究整理)

圖 3-43 為測線 a1 各測點原始波形資料，共有十九筆試驗結果，近支距為 4cm，遠支距為 40cm，其中除第一筆資料外，其餘資料首達波能量相當微弱，需進行放大 (Amplify) 以利挑選首達波走時。

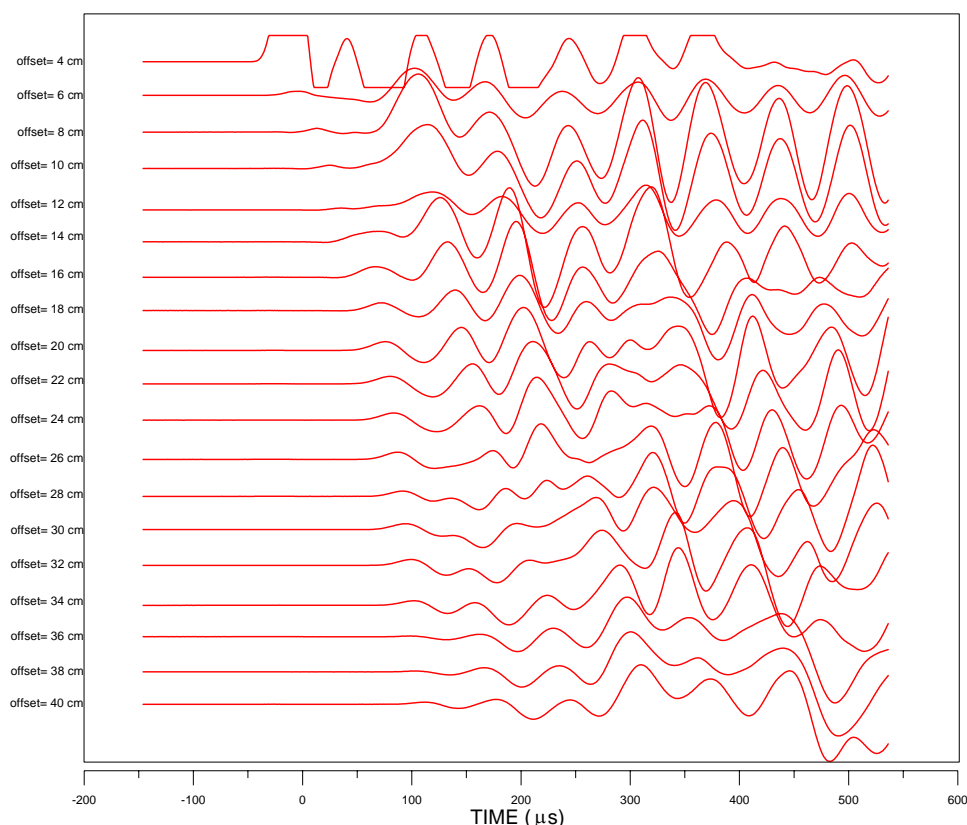


圖 3-43 折射震波試驗資料

(資料來源：本研究整理)

圖 3-44 為測線 a1 至 a4 各測點首達波與支距資料。圖中走時資料在短距離內，約支距 12cm 以內，走時與展距均顯示相當良好的線性關係，在支距 20cm 以後明顯分成兩個群組，其中 a1 與 a4 資料形成一群，a2 與 a3 資料形成另一群，且第二群走時似乎與第一群有明顯的時間落差。

對於 a1 測線而言，走時-支距資料的分布大致上形成兩段直線，圖中顯示的兩段直線係為線性回歸結果，斜率倒數分別為 1,570m/sec 與 5,013m/sec。斜率變化處約位於展距 12 至 14cm 區間，在震波傳遞上的意義為：在此距離以內，沿著表

面傳遞的震波首先到達測點，在此距離以上，經過鋼筋筋的折射波首先到達測點，此距離稱為折射波臨界距離。

兩段線性回歸斜率倒數為 1,570m/sec 與 5,013m/sec，分別代表混凝土表面波速與鋼筋縱波波速。另混凝土縱波波速量測結果約為 2,800m/sec。經分析結果，若以展距 14cm 作為臨界距離，採公式 3-4 與公式 3-5 進行計算，則檢測厚度約為 10.36cm。若以展距 12cm 作為臨界距離，則檢測厚度約為 8.85cm。

另圖中虛線係斜率倒數為 5,013m/sec 線段的延伸，與 Y 軸交點約為  $60 \mu s$ ，表示在支距(H)為 0 時的理論折射時間，根據公式 3-4 亦可計算求得檢測厚度為 10.11cm。表 3-3 為四條測線分析結果。

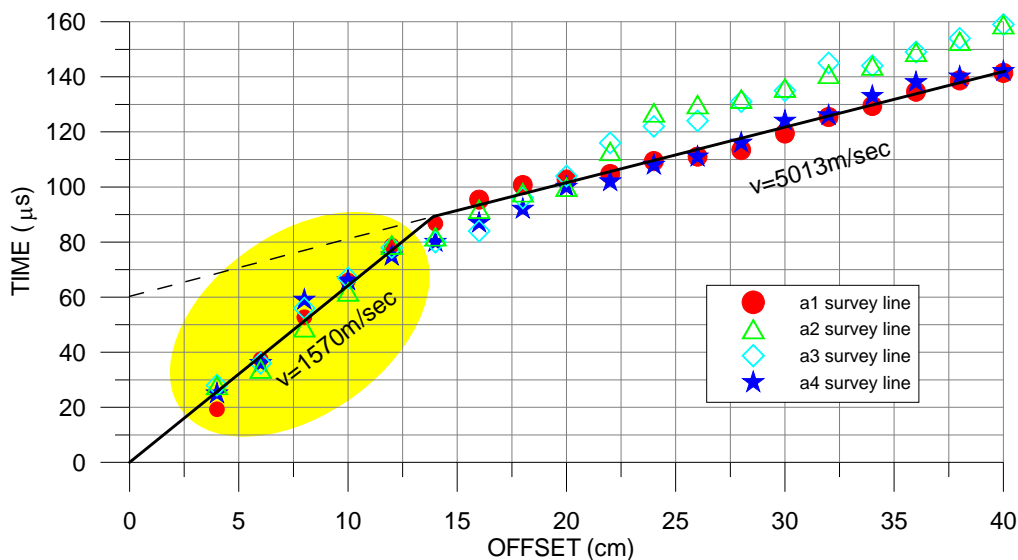


圖 3-44 折射震測試驗走時-支距資料一

(資料來源：本研究整理)

表 3-3 折射震測法檢測結果

測線	臨界距離 (cm)	混凝土表面波速 (m/sec)	鋼筋波速 (m/sec)	檢測結果 (鋼筋距離 cm)	保護層 厚度(cm)
a1	12-14	1,570	5,013	8.85- 10.36	9.2
a2	16-18	1,658	4,980	10.89-12.2 6	10.47 (斜邊距離)
a3	16-18	1,675	4,885	10.74-12.0 8	10.47 (斜邊距離)
a4	12-14	1,603	4,996	8.61- 10.14	9.2

(資料來源：本研究整理)

### 反射震測試驗

零支距反射震測法試驗共規劃八個測點，測點編號分別為 b1 至 b4、c1 至 c4，其中 b1、b4、c1 與 c4 洽位於埋設的鋼筋上方，參見圖 3-45。試驗方式依循 ASTM C1383 建議方法辦理，採單一頻道方式進行，使用機械裝置配合可感測時間原點敲擊器及訊號接收器，同時紀錄敲擊及接收訊號，兩者位置相距約為 2cm，期使達到零支距的效果。在完成單一測點試驗後，再將敲擊器與接收器移往下一測點繼續進行。

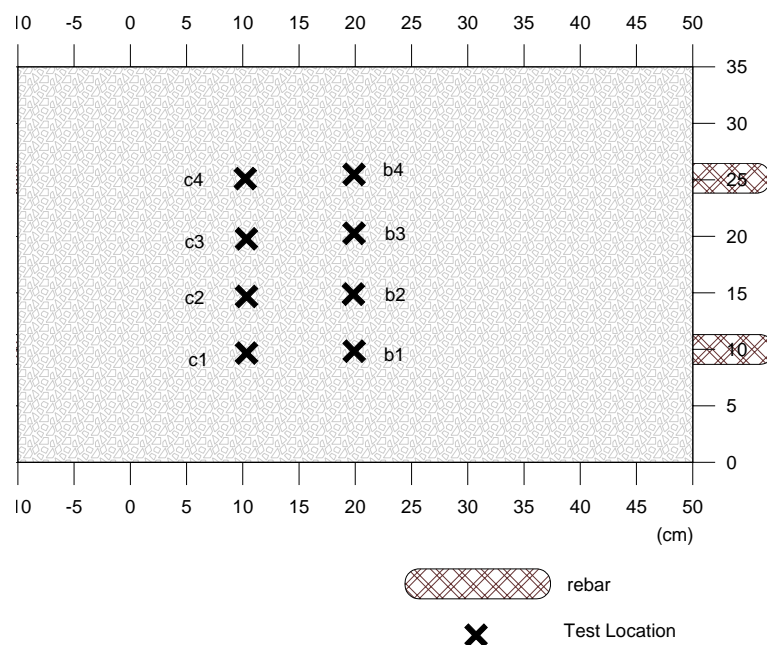


圖 3-45 反射震波試驗探勘佈置圖一

(資料來源：本研究整理)

圖 3-46 為全部測點的原始波形歷時紀錄與頻譜。圖中左上角為 b1 與 c1 的試驗資料，兩者檢測位置恰位於鋼筋上方，上圖為歷時紀錄，下圖為經 FFT 轉換後的頻率域振幅，圖中顯示兩者頻率約為 14.6kHz 與 15.3kHz 處有極大值，其應為鋼筋造成。根據公式 3-6 所得檢測厚度約為 9.21cm 與 8.78cm，該處鋼筋保護層厚度約為 9.2cm。圖中右上角為 b2 與 c2 的試驗資料，兩者檢測位置距離最近的鋼筋約為 10.47cm。頻譜圖中顯示兩者特徵頻率約為 11.7kHz 與 12.4kHz，所得檢測厚度約為 11.47cm 與 10.74cm。圖中左下角為 b3 與 c3 的試驗資料，兩者檢測位置距離最近的鋼筋約為 10.47cm。頻譜圖中顯示兩者特徵頻率約為 10.3kHz 與 8.8kHz，所得檢測厚度約為 13.11cm 與 15.29cm。圖中右下角

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

為 b4 與 c4 的試驗資料，兩者檢測位置均位於鋼筋上方，頻譜圖中顯示兩者頻率約為 13.9kHz，其應為鋼筋造成。根據公式 3-6 所得檢測厚度約為 9.66cm 與 8.78cm。

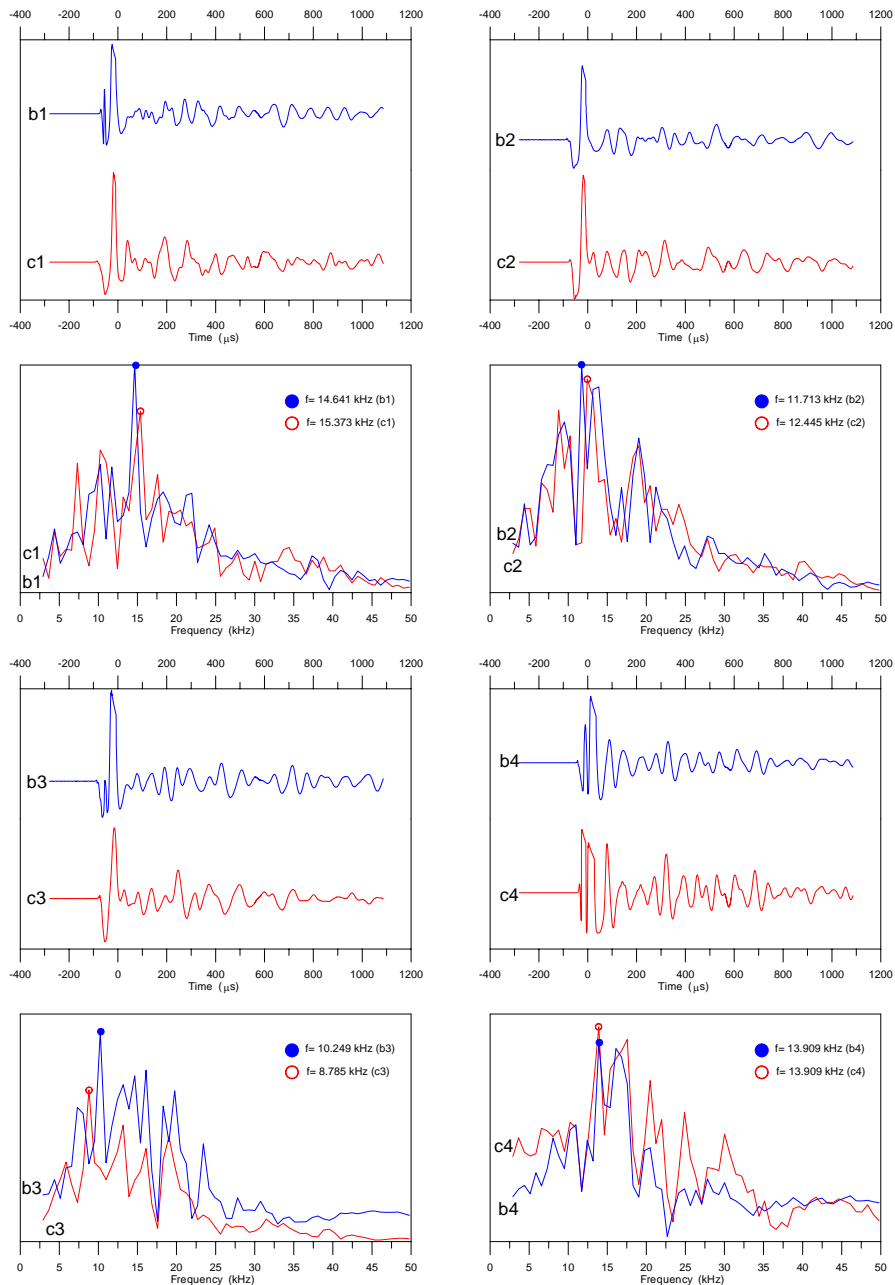


圖 3-46 反射震波試驗資料

(資料來源：本研究整理)

## 二、本期模型試驗

折射震測試驗

圖 3-47 為震測法試驗佈置示意圖，折射震測試驗共規劃七條折射測線，測線走向與埋設鋼筋走向一致，測線編號分別以數字表示，其中 2 號至 4 號測線沿位於埋設的鋼筋上方，此部份鋼筋保護層為 2.5cm，測點間距為 5cm，近支距為 5cm，遠支距為 40cm。6 號至 9 號測線亦位於埋設的鋼筋上方，此部份鋼筋保護層為 5cm，測點間距為 5cm，近支距為 5cm，遠支距為 40cm。試驗方式採單一頻道方式進行，使用機械裝置配合可感測時間原點敲擊器及訊號接收器，同時紀錄敲擊及接收訊號，在完成單一測點試驗後，敲擊位置固定不動，再將接收器移往下一測點繼續進行。本期新拌製的三個混凝土模型均採上述方式進行試驗工作。

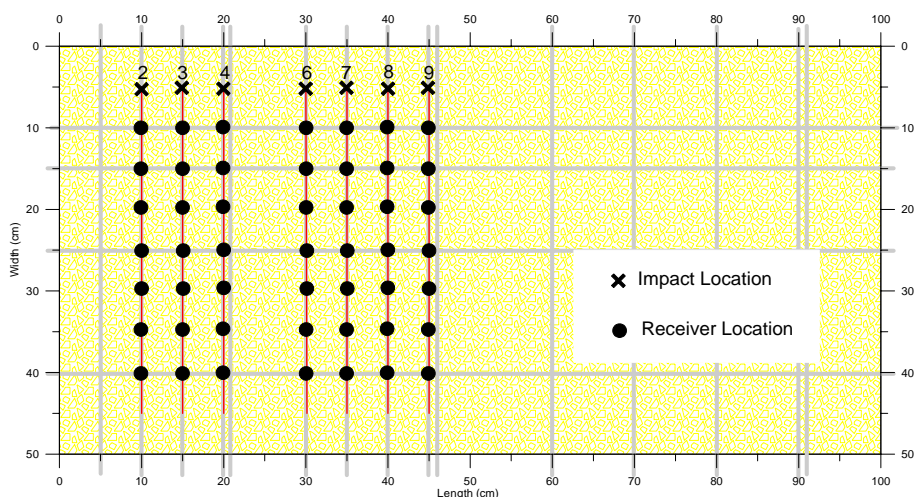


圖 3-47 折射震波試驗探勘佈置圖二

(資料來源：本研究整理)

圖 3-48 為第二個模型 (D19 號鋼筋) 2 號測線各測點原始波形資料，各筆資料的首達波訊最明顯位置連線斜率約略低於 2,000m/sec，表示該波訊應屬於沿著模型表面直接傳遞至測點位置的表面波。在近支距處，表面波似乎仍為首達波，但在支距大於 25cm 以上，明顯的表面波之前似乎出現另一個振幅較微弱的波訊。

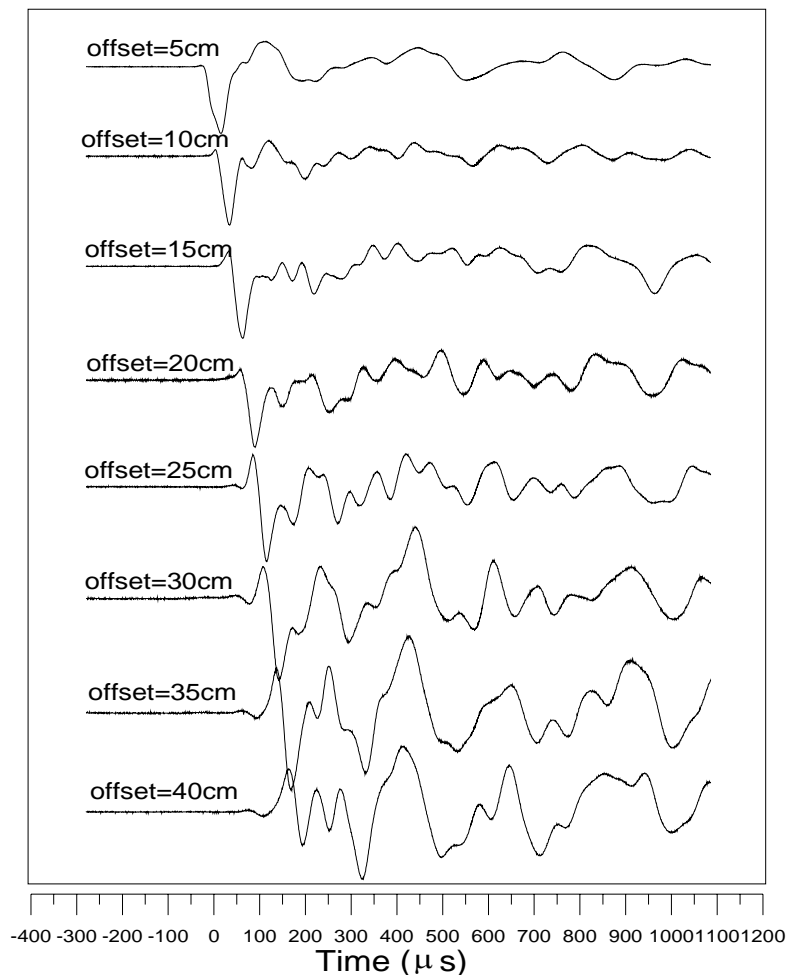


圖 3-48 折射震波試驗資料二

(資料來源：本研究整理)



圖 3-49 為局部頻道紀錄放大顯示，圖中下方歷時波形為近支距紀錄（offset=5cm），其首達波為振幅較大的表面波，圖中上方歷時波形為遠支距紀錄（offset=30cm），其首達波為振幅相當微弱的折射波，而表面波因波速較慢故延後出現。故進行首達波挑選時，需進行波訊放大，並需大致了解折射波出現的臨界距離，協助人為判定。折射波臨界距離可藉由公式 3-4 與公式 3-5 大致估算，大致上而言，如鋼筋保護層為 5cm 以內，則展距在 10cm 以上時，折射波走時應明顯小於表面波，故此處應注意微弱訊號的出現。

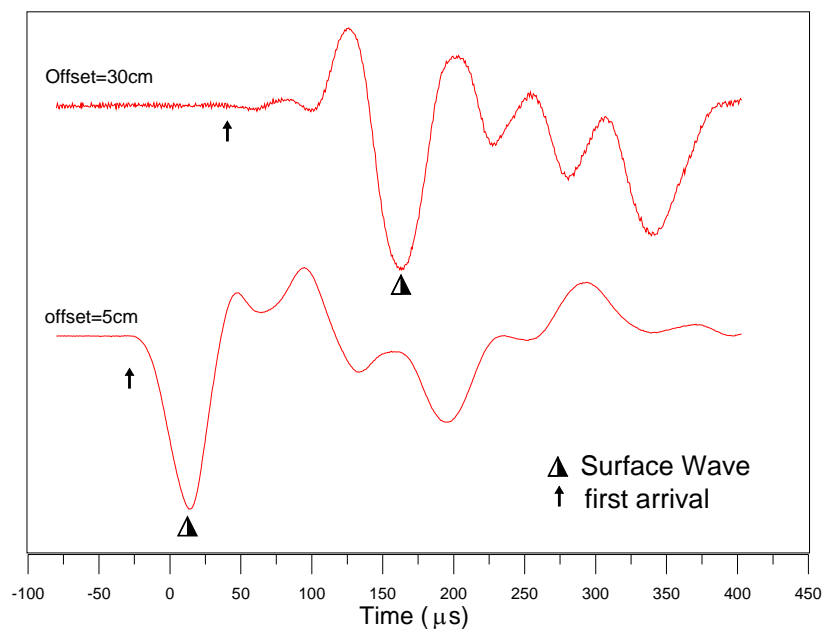


圖 3-49 波形紀錄放大比較圖

（資料來源：本研究整理）

圖 3-50 為 A 模型試驗人為挑波結果，因折射測線分別位在鋼筋保護層厚度分別為 2.5cm 與 5cm 的上方，故為了瞭解試驗資料與保護層厚度的關係，特將所有測線資料繪製在同一張圖上。

圖中點狀資料為所有測線各頻道首達波走時人為挑選結果，三角形表示者為近支距資料（offset 不大於 15cm），全部近支距資料應為 21 筆，但去除無法辨識的波形紀錄，圖中顯示 18 筆試驗值。十字形標示為測線 6 號至 9 號的遠支距資料（offset 大於 15cm），共有 19 筆試驗值。圓形標示為測線 2 號至 4 號的遠支距資料（offset 大於 15cm），共有 9 筆試驗值。圖中兩段直線分別表示兩部分遠支距資料的線性回歸結果，其斜率的倒數分別為 5,634 與 5,811m/sec，而其時間軸截距分別為 36.05  $\mu$ s 與 24.36  $\mu$ s，根據公式 3-5 計算求得的鋼筋保護層厚度約為 5.82cm 與 3.89cm。誤差分別為 16% 與 57%。

圖中另一較為特殊點在於：在某些較近支距處，其走時大於較遠支距位置的資料。以本案例而言，支距為 15cm 的走時（圖中以實心方框表示）均大於支距為 20 至 25cm 的走時資料。此係位於近支距處之波形紀錄最明顯的波訊為表面波，且因折射波的走時與其相差極小，故微弱的折射波容易被其干擾，在進行人為挑波時，易以表面波為首達波資料。而較遠支距時（圖中以橢圓形方框表示），折射波走時大幅小於表面波，波訊已明顯分離，故容易挑選正確的折射波作為首達波。

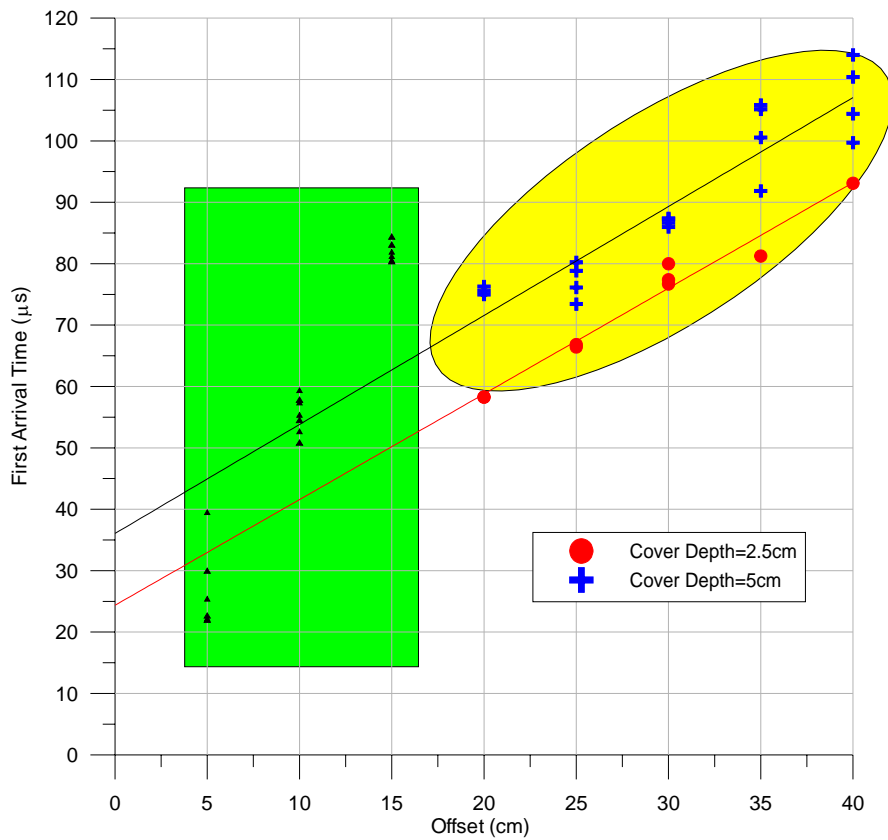


圖 3-50 A 模型折射震測試驗走時-支距資料

(資料來源：本研究整理)

圖 3-51 為 B 模型首達波走時人為挑選資料分布圖與分析結果。圖中資料以三角形表示者為近支距資料 (offset 不大於 15cm)，共有 17 筆試驗值，十字形標示為測線 6 號至 9 號的遠支距資料 (offset 大於 15cm)，共有 13 筆試驗值，圓形標示為測線 2 號至 4 號的遠支距資料 (offset 大於 15cm)，共有 9 筆試驗值。圖中兩段直線分別表示兩部分遠支距資料的線性回歸結果，其斜率的倒數均為 5,682m/sec，而其時間軸截距分別為 35.84  $\mu\text{s}$  與 20.12  $\mu\text{s}$ ，根據公式 3-5 計算求得

的鋼筋保護層厚度約為 5.77cm 與 3.24cm。誤差分別為 15% 與 30%。

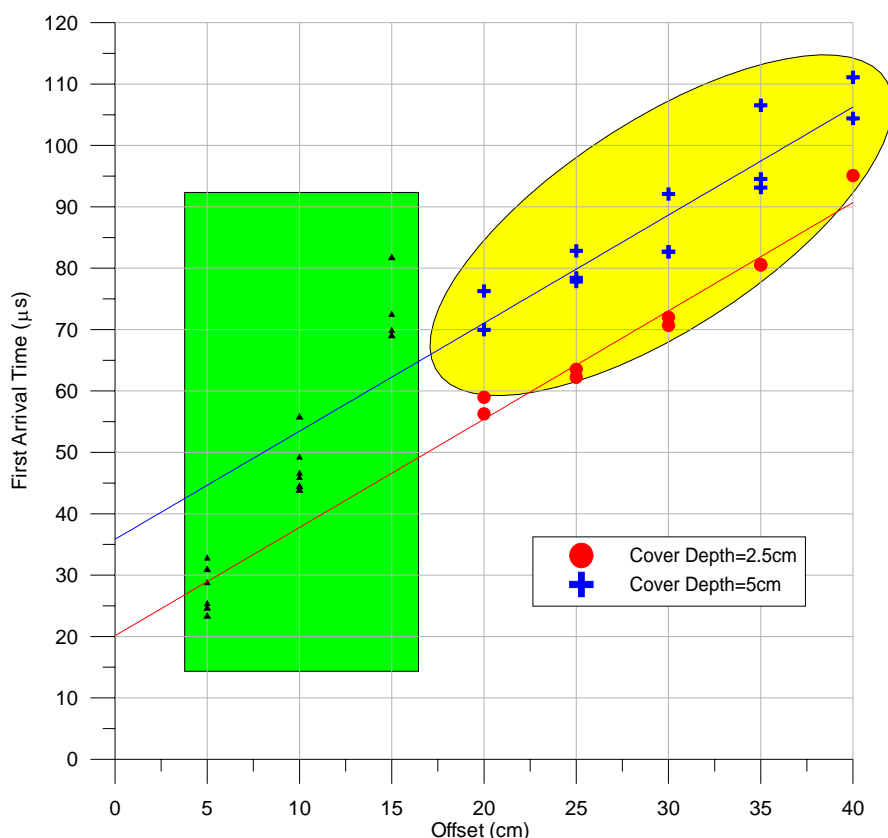


圖 3-51 B 模型折射震測試驗走時-支距資料

(資料來源：本研究整理)

圖 3-52 為 C 模型首達波走時人為挑選資料分布圖與分析結果。圖中資料以三角形表示者為近支距資料 (offset 不大於 15cm)，共有 23 筆試驗值，十字形標示為測線 6 號至 9 號的遠支距資料 (offset 大於 15cm)，共有 14 筆試驗值，圓形標示為測線 2 號至 4 號的遠支距資料 (offset 大於 15cm)，

共有 13 筆試驗值。圖中兩段直線分別表示兩部分遠支距資料的線性回歸結果，其斜率的倒數分別為 5,422 與 5,559m/sec，而其時間軸截距分別為 36.66  $\mu$ s 與 19.98  $\mu$ s，根據公式 3-5 計算求得的鋼筋保護層厚度約為 5.98cm 與 3.20cm。誤差分別為 20% 與 28%。

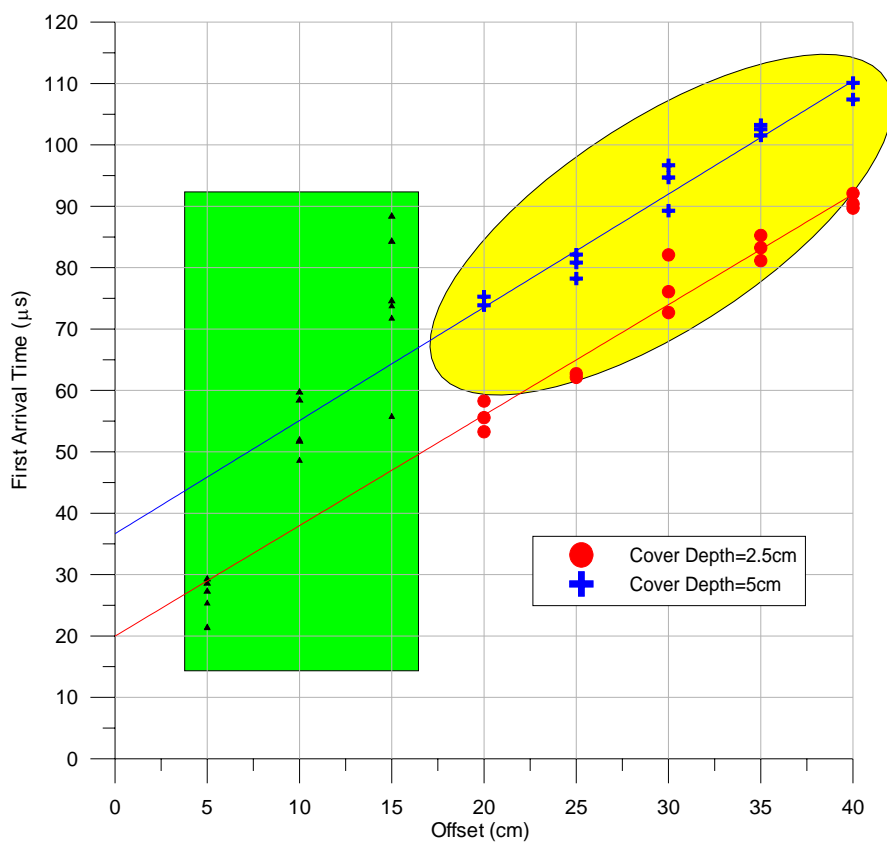


圖 3-52 C 模型折射震測試驗走時-支距資料

(資料來源：本研究整理)

### 反射震測試驗

零支距反射震測法試驗共規劃六個測點，測點編號分別為

c4 至 c9，其中除 c5 外，大部分測點均位於埋設的鋼筋上方，參見圖 3-53。試驗方式依循 ASTM C1383 建議方法辦理，採單一頻道方式進行，使用機械裝置配合可感測時間原點敲擊器及訊號接收器，同時紀錄敲擊及接收訊號，兩者位置相距約為 2cm，期使達到零支距的效果。在完成單一測點試驗後，再將敲擊器與接收器移往下一測點繼續進行。

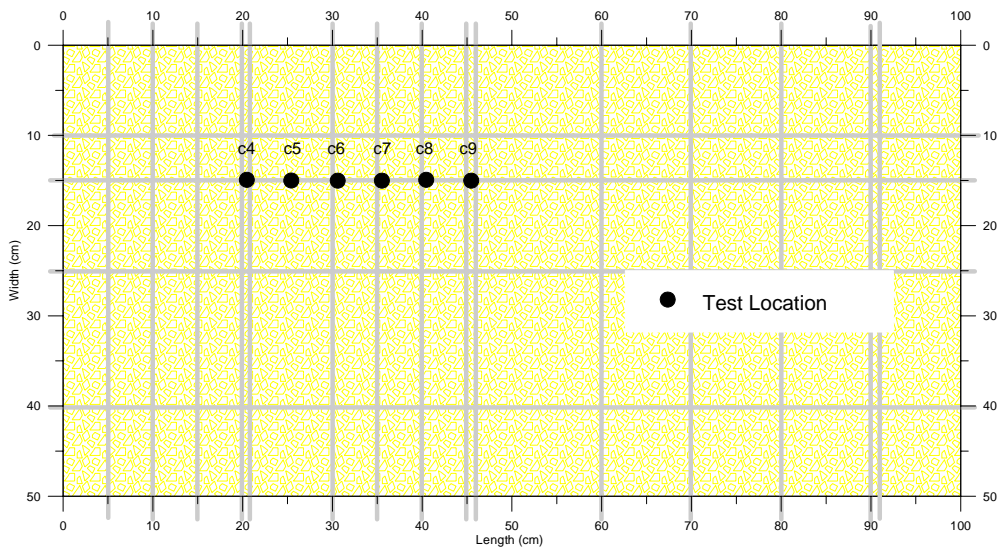


圖 3-53 反射震波試驗探勘佈置圖二

(資料來源：本研究整理)

圖 3-54 為 A 模型測點 c4 至 c9 反射震波試驗資料頻譜，各頻譜圖橫軸為頻率，單位為 kHz，縱軸為正規化振幅 (Normalized Amplitude)。全部六筆資料的最主要低頻大致上均位於 5kHz 附近，若採波速 2,800m/sec 進行計算，其相對的深度約為 26.9cm，相當接近模型厚度，所以該訊號應為模型厚度的重複反射頻率。

c4 測點頻譜的高頻部分約在 33.7 至 42.5kHz 間有局部較強振幅（圖中以實心方框表示），該訊號深度相當於 3.2 至 4.0cm 間，由於該測點下方為保護層厚度 2.5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c5 測點頻譜的高頻部分較弱，但相較於 c4 而言，約在 27.8kHz 處有局部較強振幅（圖中以實心方框表示），該訊號深度相當於 4.8cm。由於該測點恰位於相鄰兩鋼筋，其與最近的鋼筋距離約 3.6cm。

c6 測點頻譜的高頻部分相當明顯，約在 30.7kHz 處有局部較強振幅（圖中以實心方框表示），該訊號深度相當於 4.4cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c7 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 26.9kHz 處有局部較強振幅（圖中以實心方框表示），該訊號深度相當於 5.1cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c8 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 29.6kHz 處有局部較強振幅（圖中以實心方框表示），該訊號深度相當於 4.6cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c9 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 27.8kHz 處有局部較強振幅（圖中以實心方框表示），該訊號深度相當於 4.8cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

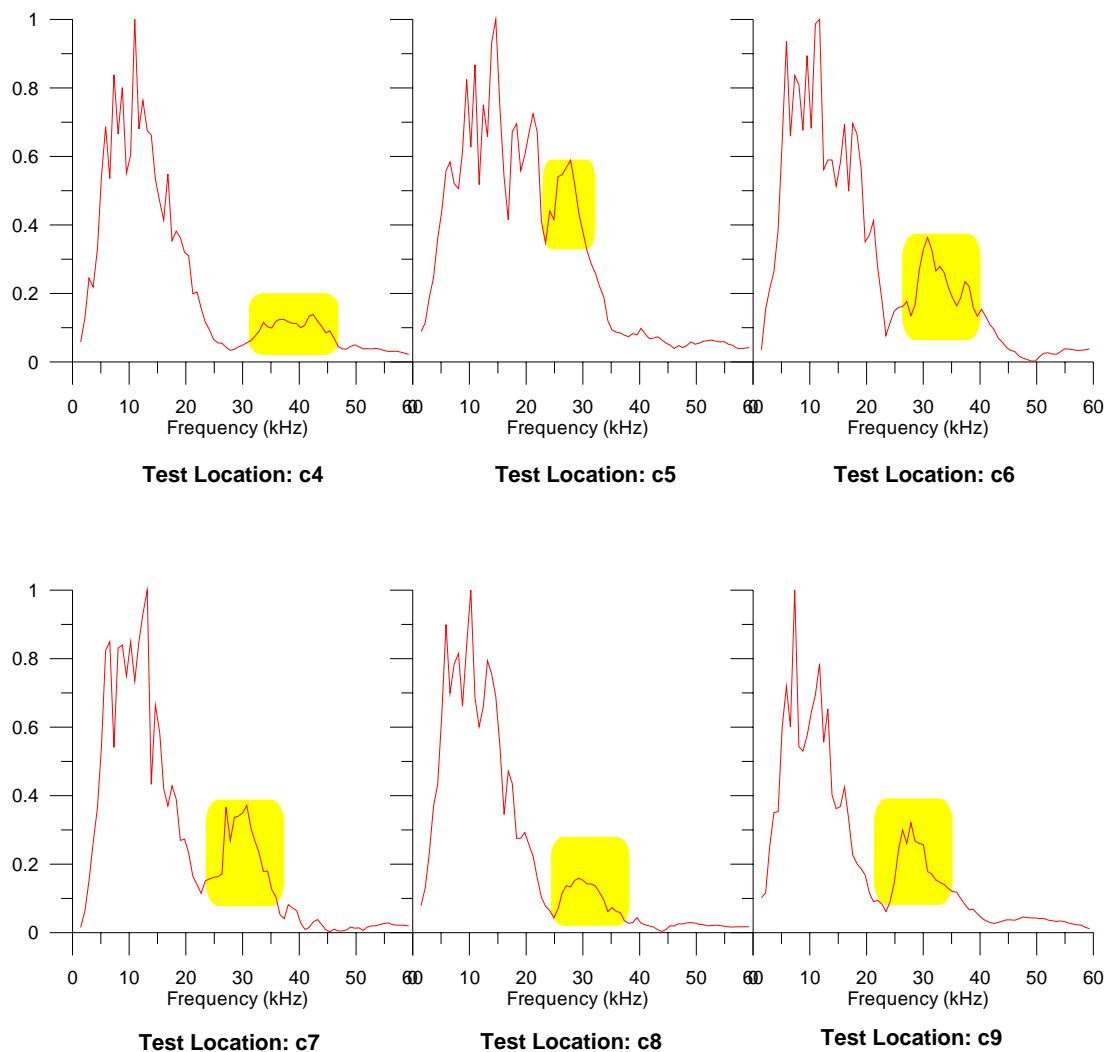


圖 3-54 A 模型反射震波試驗資料頻譜

(資料來源：本研究整理)

一般而言，上述試驗資料型態可分為三部分，參見圖 3-55。第一部份為低頻訊號，頻率大致上小於 15kHz，屬於深層反射，如混凝土底部、邊界及其他距離較遠的鋼筋造成。第二部份為中高頻訊號，頻率大致上位於 25 至 30kHz 間，屬於淺層反射，係來自保護層厚度為 5cm 的鋼筋。第三部份為高頻訊號，頻率大致上大於 30kHz，屬於極淺層反射，係來自保護層厚度為 2.5cm 的鋼筋。



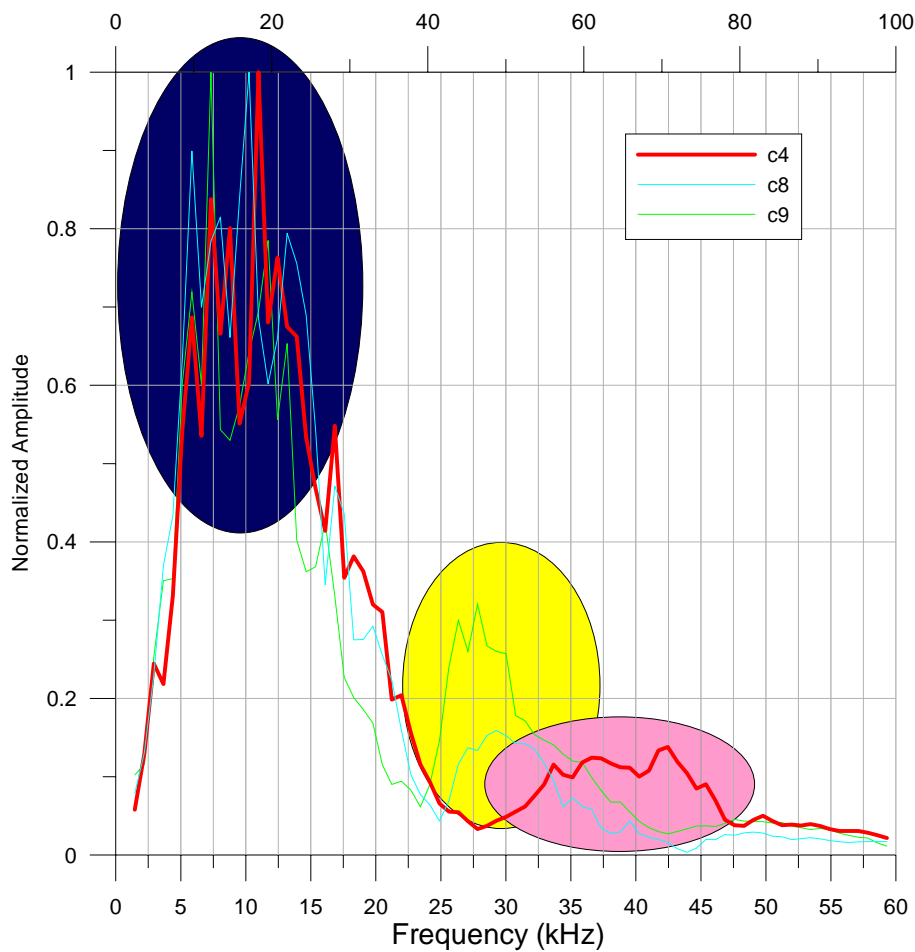


圖 3-55 反射震波試驗資料頻譜比較圖

(資料來源：本研究整理)

圖 3-56 為 B 模型測點 c4 至 c9 反射震波試驗資料頻譜，各頻譜圖橫軸為頻率，單位為 kHz，縱軸為正規化振幅 (Normalized Amplitude)。全部六筆資料的最主要低頻大致上均位於 5kHz 附近，若採波速 2,800m/sec 進行計算，其相對的深度約為 26.9cm，相當接近模型厚度，所以該訊號應為模型厚度的重複反射頻率。

c4 測點頻譜的高頻部分約在 40 至 49kHz 間有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 2.7 至 3.4cm 間，由於該測點下方為保護層厚度 2.5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c5 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 32.2kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 4.2cm。由於該測點恰位於相鄰兩鋼筋，其與最近的鋼筋距離約 3.6cm。

c6 測點頻譜的高頻部分相當明顯，約在 26.4kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 5.1cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c7 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 24.9kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 5.4cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c8 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 24.6kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 5.5cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c9 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 27.1kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 4.9cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

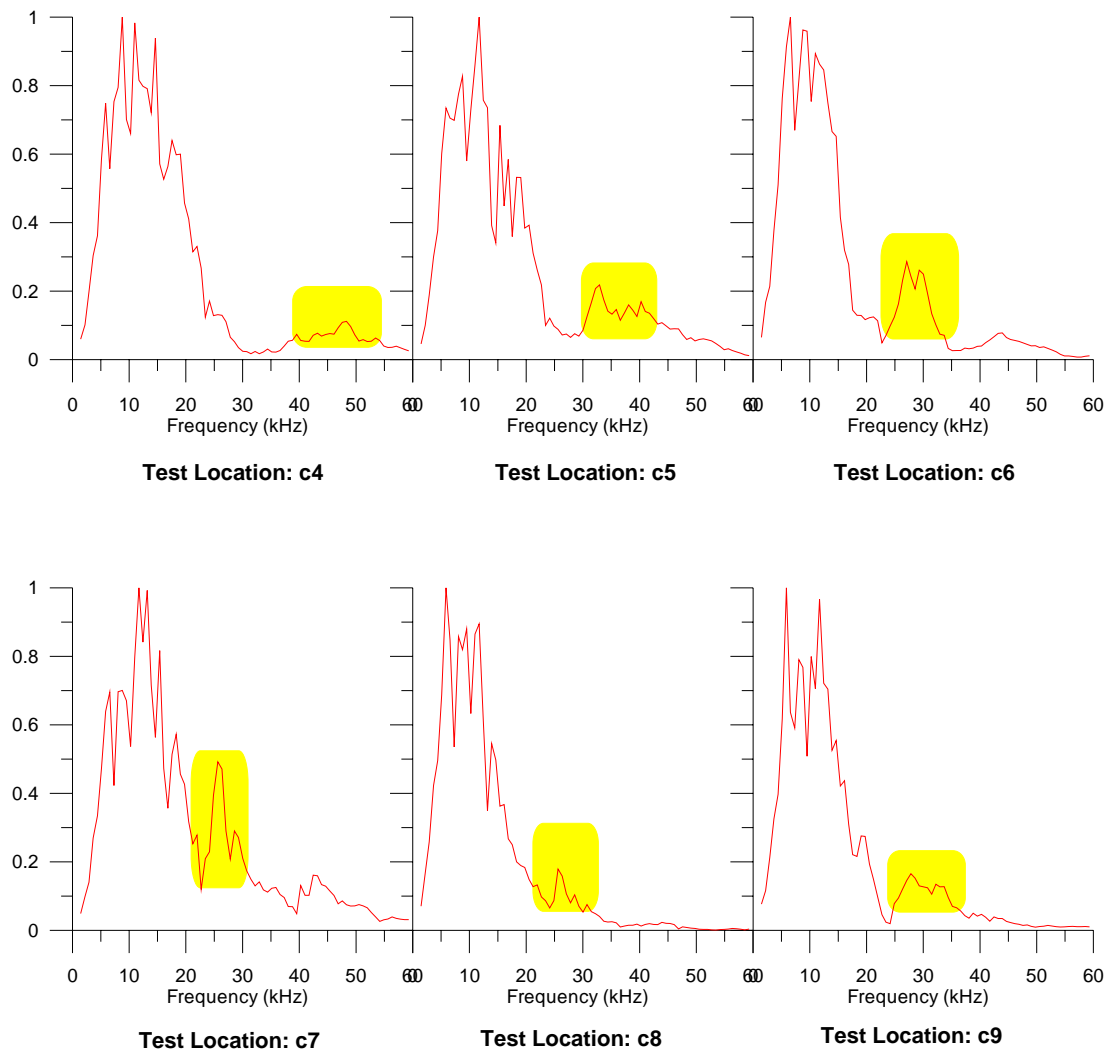


圖 3-56 B 模型反射震波試驗資料頻譜

(資料來源：本研究整理)

圖 3-57 為 C 模型測點 c4 至 c9 反射震波試驗資料頻譜，各頻譜圖橫軸為頻率，單位為 kHz，縱軸為正規化振幅 (Normalized Amplitude)。全部六筆資料的最主要低頻大致上均位於 5kHz 附近，若採波速 2,800m/sec 進行計算，其相對的深度約為 26.9cm，相當接近模型厚度，所以該訊號應為模型厚度的重複反射頻率。

c4 測點頻譜的高頻部分約在 33 至 39kHz 間有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 3.4 至 4.1cm 間，由於該測點下方為保護層厚度 2.5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c5 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 35.8kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 3.8cm。由於該測點恰位於相鄰兩鋼筋，其與最近的鋼筋距離約 3.6cm。

c6 測點頻譜的高頻部分相當明顯，約在 21.3kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 6.3cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c7 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 29.3kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 4.6cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c8 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 20.5kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 6.6cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

c9 測點頻譜的高頻部分亦相當明顯，約在 21.2kHz 處有局部較強振幅(圖中以實心方框表示)，該訊號深度相當於 6.3cm。該測點下方為保護層厚度 5cm 的鋼筋，故此微弱訊號應來自於該鋼筋的重複反射。

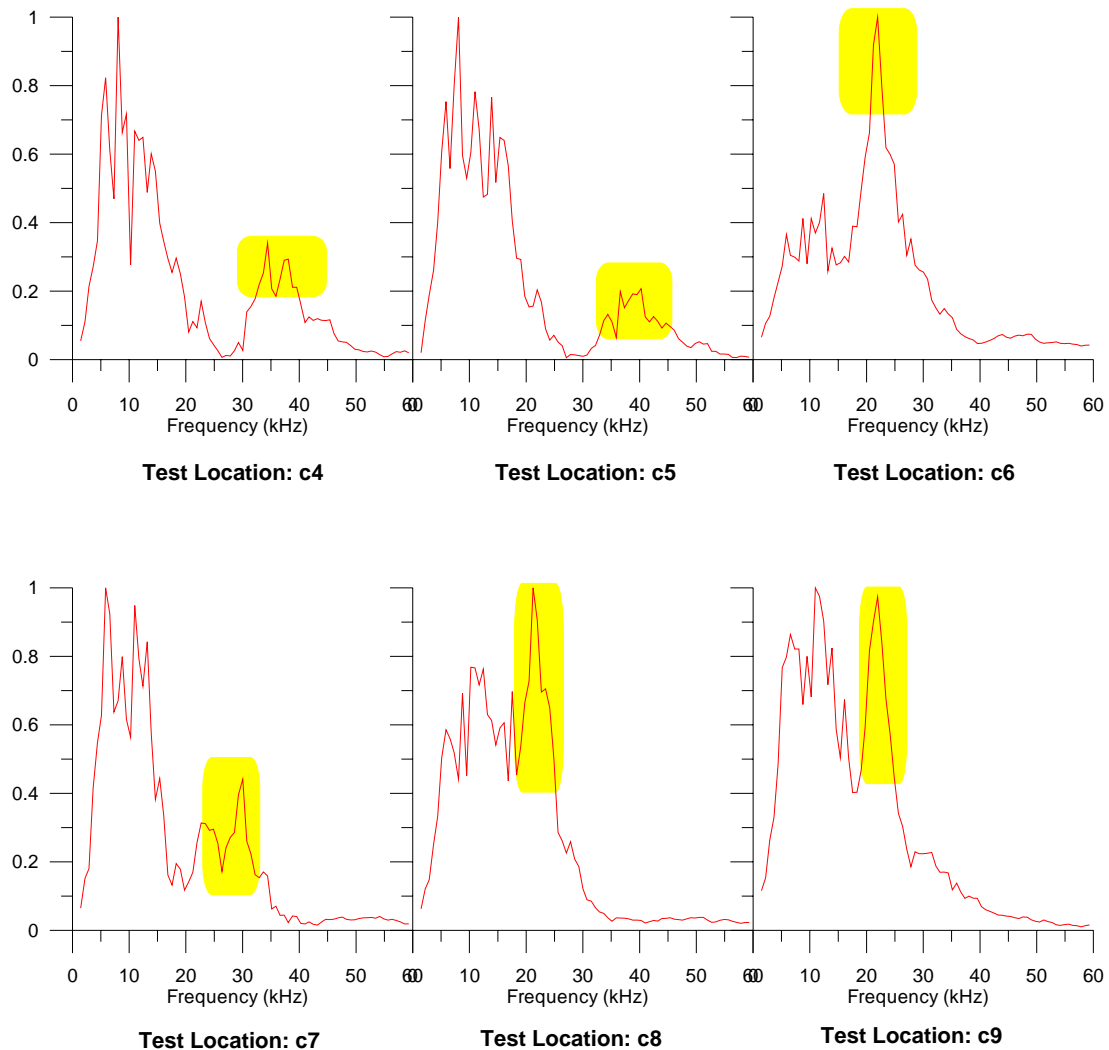


圖 3-57 C 模型反射震波試驗資料頻譜

(資料來源：本研究整理)

表 3-4 為鋼筋保護層厚度檢測結果。一般而言，檢測資料準確性與鋼筋尺寸並無明顯關聯，但與鋼筋保護層厚度有相當大關聯，對於模型保護層厚度為 2.5cm 時，檢測誤差約為 22% 至 50% 間，對於模型保護層厚度為 5cm 時，檢測誤差約小於 20%。

表 3-4 鋼筋保護層厚度檢測結果(二)

鋼筋尺寸	D16	D16	D19	D19	D29	D29
模型保護層厚度	2.5	5	2.5	5	2.5	5
折射法						
平均檢測結果	3.24	5.7	3.2	5.98	3.89	5.82
平均檢測誤差	0.74	0.7	0.7	0.98	1.49	0.82
誤差比	30%	15%	28%	20%	57%	16%
反射法						
平均檢測結果	3.6	4.73	3.05	5.23	3.75	5.95
平均檢測誤差	1.1	0.27	0.55	0.23	1.25	0.95
誤差比	44%	5%	22%	5%	50%	19%

單位:cm

(資料來源：本研究整理)

根據 ASTM c 1383 的建議公式(公式 3-6)，可根據量測資料的特徵頻率估算深度，其中的 0.96 為修正係數，此為國外部分地區及廠商採用的修正值，亦有其他應用者採用係數。上述零支距反射試驗資料係採 0.96 進行修正，在保護層厚度大於等於 5cm 時，所得的檢測結果與實際物理模型鋼筋保護層厚度較為相近。但在應用於保護層為 2.5cm 時，所得誤差較大。

圖 3-58 為使用不同修正係數的比較圖，圖中縱軸為模型鋼筋保護層實際厚度，縱軸為上述各資料特徵頻率，三條曲線分別採修正係數為 0.98、0.7 及 0.6 計算求得的理論值。當保護層厚度較大時，採 0.96 應可符合試驗資料，但對於較小的保護層厚度，其誤差較大。若採 0.6 作為修正係數，應可

符合較小的保護層厚度的試驗資料，但大致上採用 0.7 可較符合全部試驗資料。本研究建議在進行小尺度探查時，大致上可採用 0.7 作為修正係數。

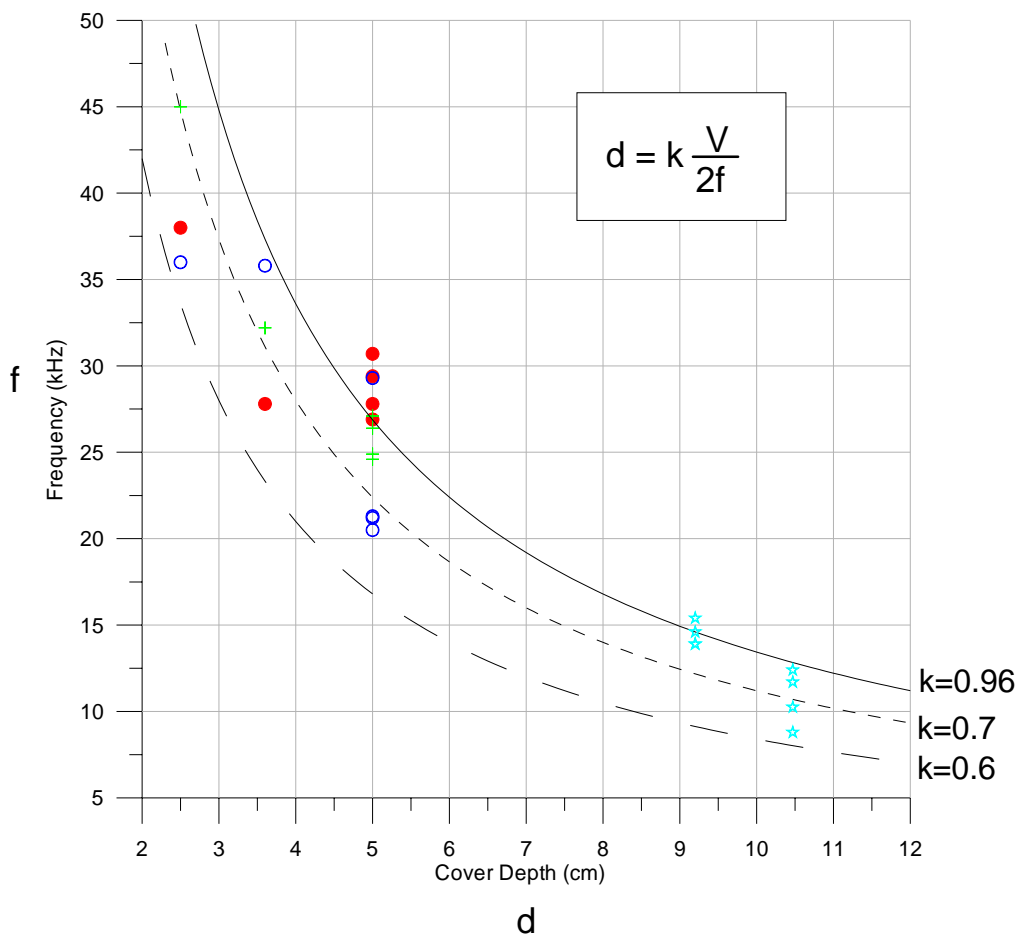


圖 3-58 頻譜資料修正係數

(資料來源：本研究整理)

## 第八節 鋼筋檢測儀試驗

鋼筋檢測儀操作方式相當簡易，只要連接適當探頭即可進行探查。進行鋼筋保護層厚度檢測時，需先於主機輸入待測鋼筋直徑，再將探頭放置待測位置，主機螢幕立即顯示深度資料。一般檢測方式係將待測面位置標示等間距格點，依序進行檢測工作，參見照片3-6。



照片 3-6 鋼筋檢測儀試驗過程(一)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-59 為 A 模型鋼筋等深度圖，係採三維資料處理程式處理結果。圖中橫軸長度為 90cm，縱軸長度為 40cm，此面積洽為模型中間部分，圖中顏色分布自淺置深分別表示鋼筋保護層厚度由 1cm 至 5cm。位於橫軸距離 20 至 25cm 處，大部分鋼筋深度約小於 2.5cm，此範圍內模型保護層厚度為 2.5cm。位於橫軸距離 30 至 90cm 處鋼筋深度約在 2.5cm 至 5cm 間，此範圍內模型保護層有兩種，橫向鋼筋保護層厚度約為 3.3cm 至 4.5cm，縱向鋼筋保護層厚度為 5cm。一般而言，檢測資料的準確度相當高，足以分辨不同鋼筋保護層厚度，惟因鋼筋排列密度較高，檢測資料無法顯示鋼筋位置。比較值得注意的是：在橫軸大於 30cm 的資料型態分布大致上為橫向等深區間，此範圍內雖有縱橫兩向鋼筋，但卻與鋼筋保護層厚度較小的鋼筋走向一致，顯示檢測資料應來自於較淺鋼筋。

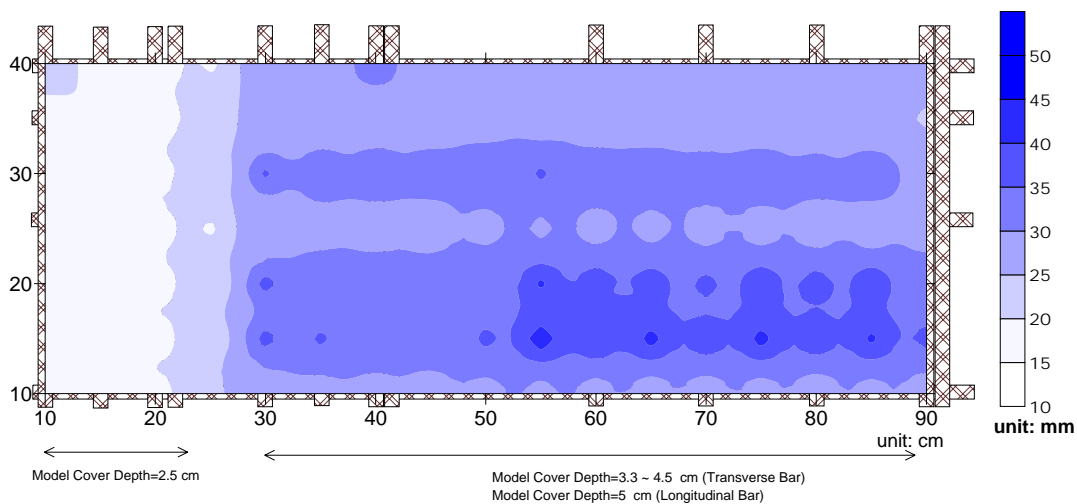


圖 3-59 A 模型鋼筋檢測儀檢測結果

(資料來源：本研究整理)

圖 3-60 為 B 模型鋼筋等深度圖。位於橫軸距離 20 至 25cm 處，大部分鋼筋深度約小於 2cm，此範圍內模型保護層厚度為 2.5cm。位於橫軸距離 30 至 90cm 處鋼筋深度約在 2.5cm 至 5cm 間，此範圍內模型保護層有兩種，橫向鋼筋保護層厚度約為 3.2cm 至 4.5cm，縱向鋼筋保護層厚度為 5cm。一般而言，檢測資料的準確度相當高，足以分辨不同鋼筋保護層厚度，惟較小保護層厚度的檢測誤差較大，且因鋼筋排列密度較高，檢測資料無法顯示鋼筋位置。橫軸小於 20cm 的資料型態分布大致上與鋼筋保護層厚度較小的縱向鋼筋走向一致，橫軸大於 30cm 的資料型態分布大致上亦與鋼筋保護層厚度較小的橫向鋼筋走向一致，顯示檢測資料應來自於較淺鋼筋。

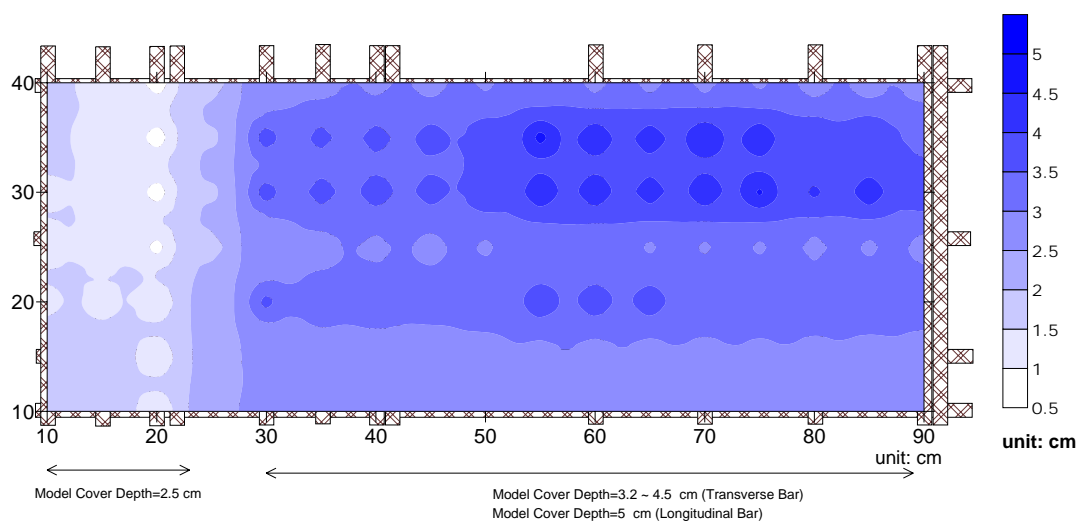


圖 3-60 B 模型鋼筋檢測儀檢測結果

(資料來源：本研究整理)

圖 3-61 為 C 模型鋼筋等深度圖。位於橫軸距離 20 至 25cm 處，大部分鋼筋深度約小於 3cm，此範圍內模型保護層厚度為 2.5cm。位於橫軸距離 30 至 90cm 處鋼筋深度約在 3.5cm 至 6cm 間，此範圍內鋼筋保護層厚度為 5cm。一般而言，檢測資料的準確度相當高，足以分辨不同鋼筋保護層厚度，惟較小保護層厚度的檢測誤差較大，且因鋼筋排列密度較高，檢測資料無法顯示鋼筋位置。模型 C 僅含單向鋼筋，故大部分資料型態分布係為橫向，與鋼筋走向一致。

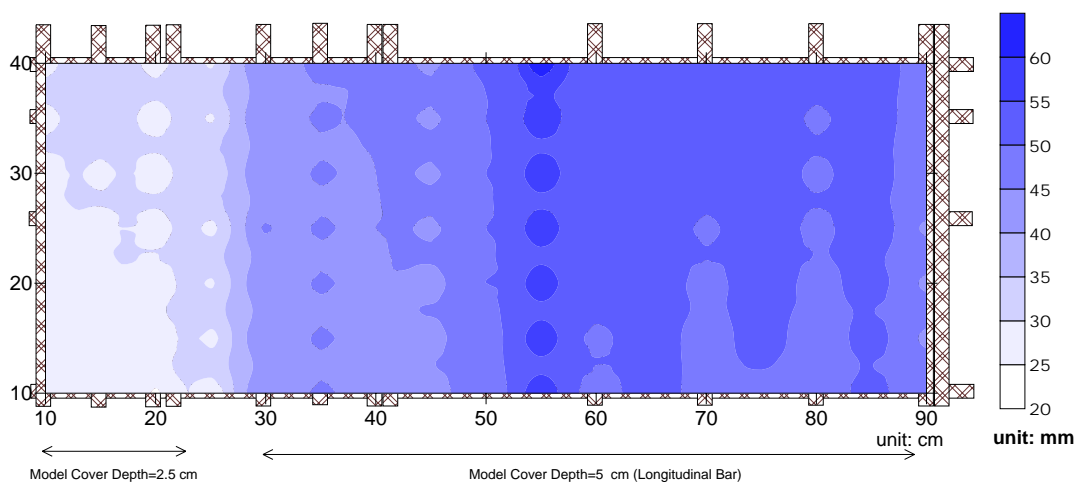


圖 3-61 C 模型鋼筋檢測儀檢測結果

(資料來源：本研究整理)

上述試驗結果顯示：鋼筋檢測儀試驗結果顯示應用於緊密排列的鋼筋保護層檢測時，資料分布的走向可用以研判距離表面最近鋼筋的走向，惟檢測資料仍不足以研判個別鋼筋實際位置。大致上而言，除保護層厚度 2.5cm 外，檢測精度仍相當高，參見表 3-5。

表 3-5 鋼筋保護層厚度檢測結果 (三)

鋼筋尺寸	D16	D16	D19	D19	D29	D29
模型保護層厚度	2.5	3.4	2.5	3.4	2.5	5
平均檢測結果	1.76	3.03	1.2	3.17	2.74	4.81cm
平均檢測誤差	0.74	0.56	1.29	0.63	0.25	0.39
誤差比	30%	16%	52%	19%	10%	8%

單位:cm

(資料來源：本研究整理)

渦電流形式的鋼筋檢測儀係量測鋼筋表面產生渦電流引發之次生磁場強度，此磁場強度與鋼筋尺寸、保護層厚度均有關，故在相同鋼筋尺寸條件下，不同的距離應測得不同磁場強度。鋼筋檢測儀內部以建立上述完整資料庫，具有多種尺寸鋼筋在不同距離下的試驗資料，故基本上，在檢測儀上輸入鋼筋尺寸，檢測儀即依量測所得資料比對既存資料庫，立即顯示出比對結果。因此若增加測點與混凝土表面的距離，亦即將探頭懸空放置於混凝土表面，則檢測儀顯示結果應大於鋼筋保護層厚度，此係因磁場強度將因傳遞距離增加而變小，而較大的鋼筋保護層應具較小的次生磁場強度。上述物理特性洽可用於進行鋼筋尺寸檢測應用。

本研究將依儀器原廠建議方式進行鋼筋尺寸探查。首先將檢測儀探頭放置於混凝土表面，並分別設定不同鋼筋尺寸進行探查，探查結果為  $X(i)$ ， $i$  為鋼筋尺寸設定號數進行。再將檢測儀探頭放置於離混凝土表面距離  $h$  的位置，參見照

片 3-7，並分別設定不同鋼筋尺寸進行探查，探查結果為  $Y(i)$ 。最後分別計算  $D(i) = Y(i) - X(i)$ ， $D(i)$  並分別與  $h$  進行比較，一但  $D(i)$  最接近  $h$ ，表示  $i$  即為鋼筋尺寸。



照片 3-7 鋼筋檢測儀試驗過程 (二)

(資料來源：本研究整理)

圖 3-62 為 A 模型試驗資料，自上至下分別為距離  $h=0.6\text{cm}$ 、 $1.2\text{cm}$  與  $1.5\text{cm}$  的資料分析結果。最上圖縱軸為檢測儀量測結果的相差值，亦就是位於  $h=0.6\text{cm}$  的量測值 ( $Y$ ) 與位於混凝土表面的量測值 ( $X$ )，兩者量測值之差 ( $D$ )。縱軸為鋼筋設定尺寸。故理論上，若選擇正確的鋼筋尺寸，量測結果應可接近  $0.6\text{cm}$ 。圖中三種符號分別表示不同檢測位置， $\triangle$  為位於鋼筋保護層厚度  $5\text{cm}$ /鋼筋間距  $5\text{cm}$  處； $\times$  為位於鋼筋保護層厚度  $5\text{cm}$ /鋼筋間距  $10\text{cm}$  處； $\square$  為位於鋼筋保護層厚度  $2.5\text{cm}$ /鋼筋間距  $5\text{cm}$  處；大致上而言，資料分布

顯示：量測值差值與鋼筋尺寸設定值有正相關，而在量測值相差約為 0.6cm 左右時，鋼筋尺寸之設定值相當於 1.6 至 2.0cm 間（圖中以方框表示），本模型鋼筋尺寸約為 1.6cm。中、下圖分別表示  $h=1.2\text{cm}$  與  $1.5\text{cm}$  的資料分析，兩者結果顯示鋼筋尺寸均約相當於 1.6 至 2.0cm 間（圖中以方框表示），即探查所得鋼筋可能為 5 號鋼筋或 6 號鋼筋。

圖 3-63 為 B 模型試驗資料，自上至下分別為距離  $h=0.6\text{cm}$ 、 $1.2\text{cm}$  與  $1.5\text{cm}$  的資料分析結果。圖中顯示鋼筋尺寸均約相當於 1.6 至 2.5cm 間（圖中以方框表示），即探查所得鋼筋可能為 5 號鋼筋至 8 號鋼筋。本模型鋼筋尺寸約為 1.9cm。

圖 3-64 為 C 模型試驗資料，自上至下分別為距離  $h=0.6\text{cm}$ 、 $1.2\text{cm}$  與  $1.7\text{cm}$  的資料分析結果。本模型鋼筋尺寸約為 2.9cm。上圖及中顯示鋼筋尺寸均約相當於 1.2 至 2.5cm 間（圖中以方框表示），與真實鋼筋尺寸相去較大，此明顯的誤差可能因鋼筋尺寸較大且排列較為緊密造成，而下圖顯示鋼筋尺寸均約相當於 2.5 至 3.2cm 間，較接近實際鋼筋尺寸，顯示較大的高程距離有利於此特殊檢測環境。

上述檢測結果顯示：應用鋼筋檢測儀於鋼筋尺寸的探查應為可行，惟探查方式應採合理的物理方式進行，若僅簡單的左右移動探頭方式進行尺寸的概估則可能造成較大偏差。另進行鋼筋尺寸探查時，對於尺寸較大且排列較為緊密的鋼筋，應採用較大的高程距離（ $h$ ）進行資料蒐集，方可獲得可信度較高的檢測結果。

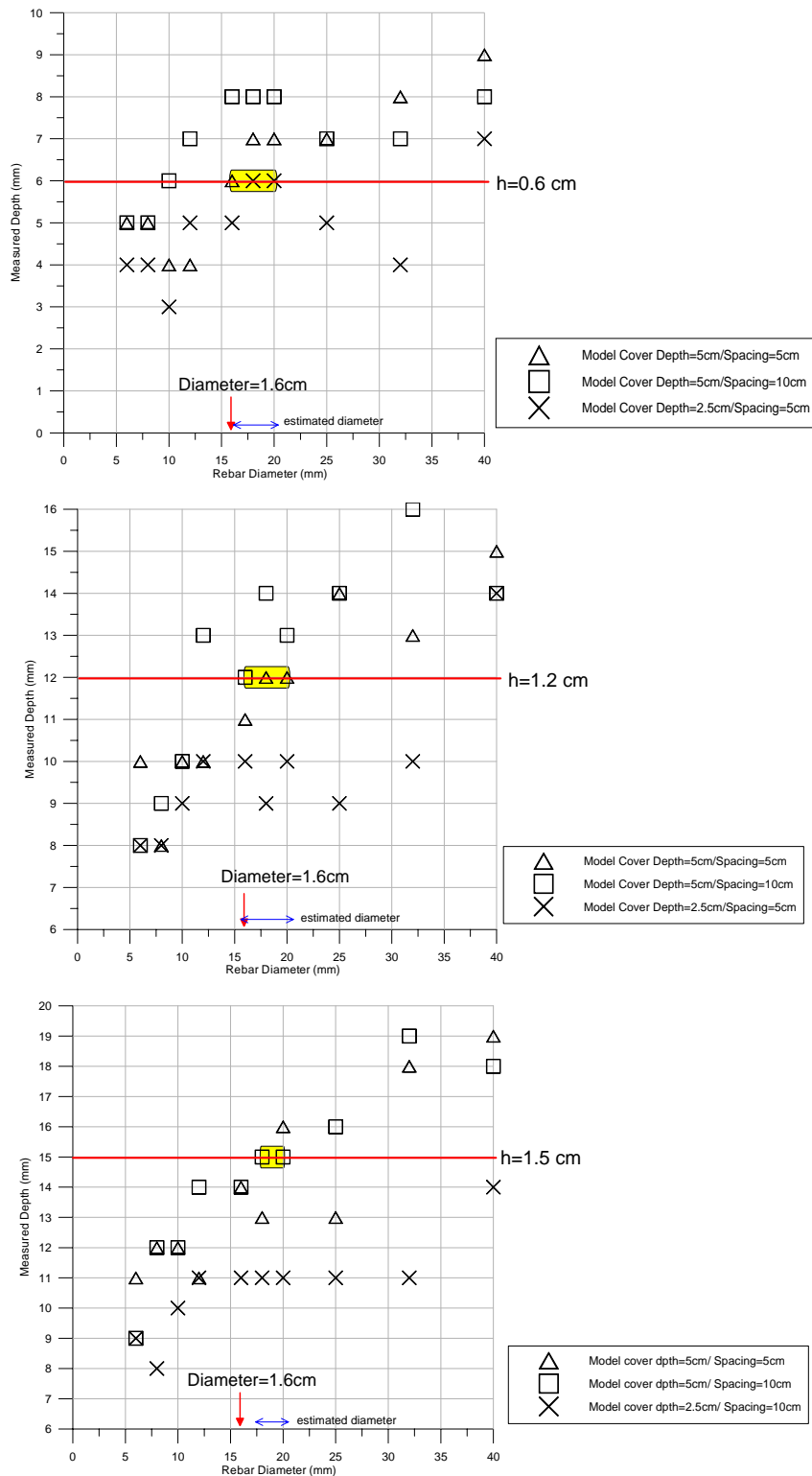


圖 3-62 A 模型鋼筋尺寸檢測結果

(資料來源：本研究整理)

非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

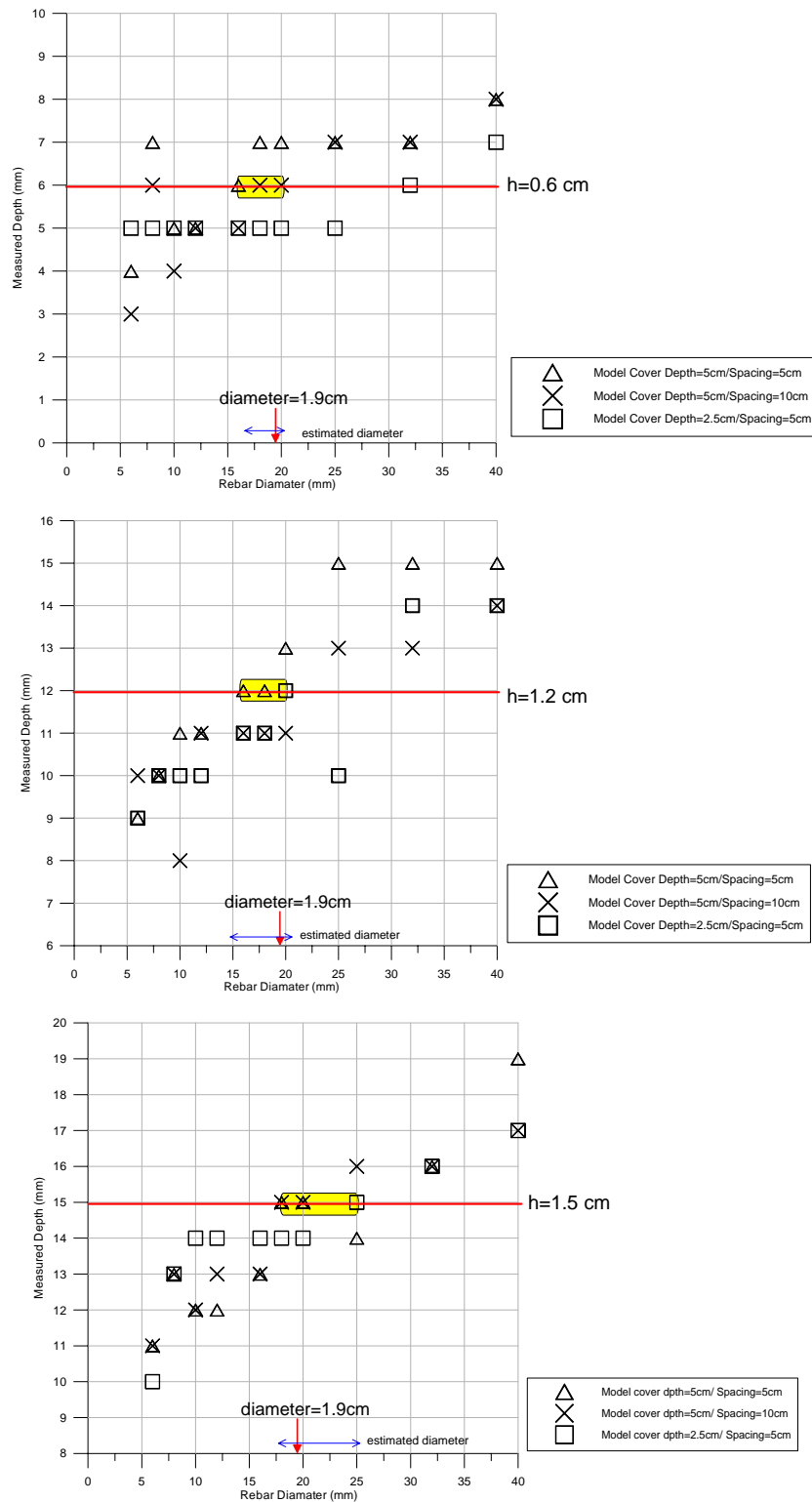


圖 3-63 B 模型鋼筋尺寸檢測結果

(資料來源：本研究整理)





### 第九節 鋼筋腐蝕檢測應用評估

前期擋土牆混凝土中曾參雜大量鹽，並於局部位置以醋酸造成鋼筋腐蝕。腐蝕電位大多位於-450 至-590mV 間，根據 ASTM C-876-91 評估標準，整體腐蝕機率係為「大於 90%」。圖 3-65 為 F 模型鋼筋腐蝕電位等值圖，圖中電位趨勢似有自左而右，由高至低的趨勢。其可能係模型右側雜草叢生且常積水，目視可得鋼筋出露位置已發生嚴重鏽蝕。

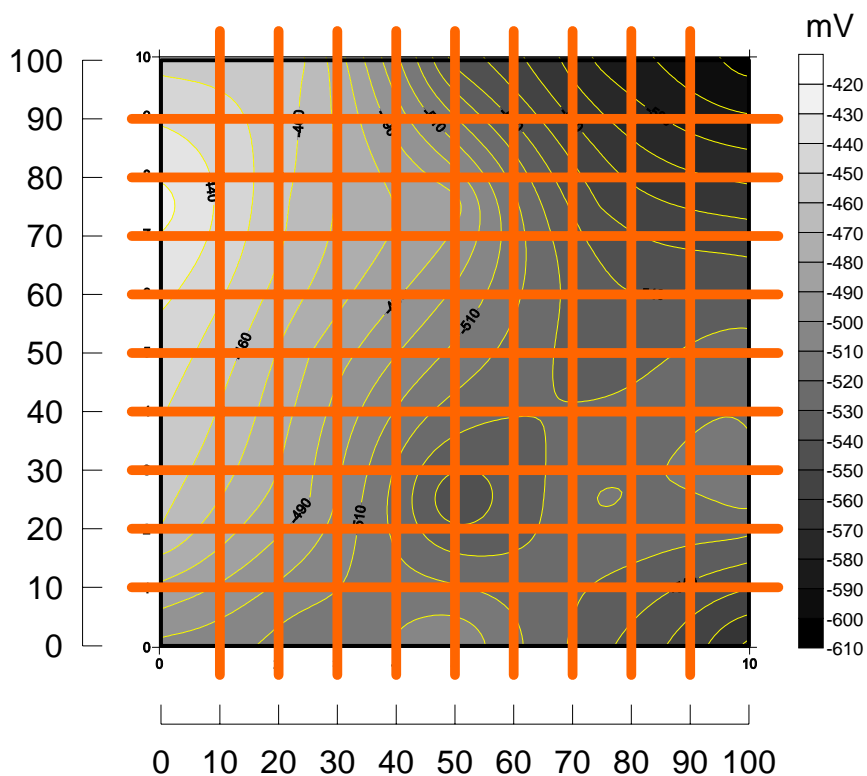


圖 3-65 前期 F 模型鋼筋腐蝕電位等值圖

(資料來源：本研究整理)

為了解透地雷達應用於鋼筋腐蝕檢測可行性，本研究採高頻天線，並以一般探查方式進行 F 模型檢測，並與完整鋼筋檢測資料進行比對。圖 3-66 為既有模型完整鋼筋透地雷達剖面與前期 F 模型透地雷達剖面比較圖。一般而言，兩者剖面除了在於鋼筋繞射波的強弱有差別及雙曲線的頂點位置不同外，並無任何實質上的差異。一般進行透地雷達探查時，均會進行各種參數的設定，以獲得最佳的探查結果，因此反射波強弱與設定參數有關係。以上兩筆資料係採相同設定進行資料蒐集及處理，也就是說在客觀一致的條件下，鋼筋腐蝕對雷達波並不會造成太大影響，或僅有些微的影響，惟無法採人為區分此差異，國內相關研究亦顯示類似狀況，透地雷達對於腐蝕鋼筋的反應並無太大變化。

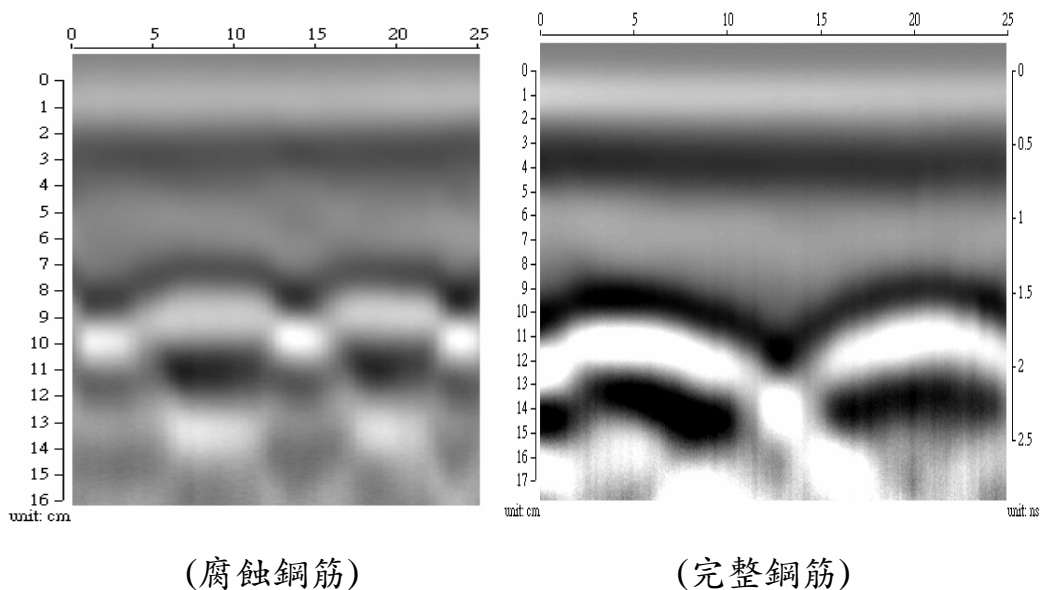


圖 3-66 透地雷達剖面比較圖

(資料來源：本研究整理)

透地雷達探查原理係利用待測物體與周圍材料電學特性的差異，進行幾何尺寸及相關位置的探查，並無法對於其物理過程或化學反應進行了解。因此就鋼筋混凝土擋土牆而言，僅能就擋土牆尺寸、背填含水與否及內部鋼筋分布等幾何特性進行探查，而無法直接了解擋土牆受力狀況、變形行為、破壞原因及內部鋼筋腐蝕過程等。惟鋼筋腐蝕係為連續的化學反應過程，一般鋼筋腐蝕作用初期係破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，生成外層環狀剝離的氧化鐵，而環狀氧化鐵之尺度並非透地雷達可辨認，但一但時間較為久遠，鐵銹分子間張應力大於混凝土的圍束力時，便會使鋼筋軸周圍產生裂縫，嚴重時此局部裂縫漿彼此穿透連接，形成內部局部裂縫發達範圍，或水平一致性裂隙。如鋼筋腐蝕達到此階段時，則應可採透地雷達進行局部破壞範圍或水平裂隙的探查。另敲擊回音法亦可應用於混凝土結構物內部裂隙及空洞檢測，本計劃前期研究成果已證實敲擊回音法應用於鋼筋混凝土擋土牆內部空洞檢測之可行性。

## 第十節 驗證資料結論

綜合上述模型試驗結果及檢討試驗過程中遭遇的問題，提出以下幾點結論：

1. 上述試驗方法共包含透地雷達、敲擊回音及渦電流鋼筋檢測儀，其檢測原理均藉由介質特性差異造成的物理現象，以了解鋼筋混凝土結構物內部鋼筋位置、深度及尺寸，及埋設土（岩）釘灌漿狀況等，表 3-6 簡要說明各檢測方法與適用範圍。

表 3-6 檢測方法一般說明表

	探查方式	應用範圍	資料處理 難易程度
透地雷達法	雷達波	混凝土、鋼筋相關檢測	適中
敲擊回音法	暫態應力波	混凝土、鋼筋、土（岩）釘相關檢測	較難
渦電流法	次生磁場	鋼筋相關檢測	簡易

（資料來源：本研究整理）

2. 以透地雷達進行擋土牆鋼筋保護層厚度、搭接位置、深層鋼筋等探查應用，可獲得相當準確的檢測資料，特別可適用於極小厚度檢測，且檢測方式不受混凝土表面不平整及粉塵的影響。惟因鋼筋間距與保護層厚度均影響檢測結果，一般而言，鋼筋間距大於鋼筋保護層厚度時，檢測資料中鋼筋繞射波較為完整且明顯，容易以人為方式進行辨認，所得檢測結果較為準確。
3. 透地雷達 1.5GHz 高頻天線探查結果顯示：對於保護層厚度在

2.5cm 至 5cm 間，檢測誤差約在於 20% 以內，已大幅改進前期研究結果（誤差為 118%）；對於保護層厚度大於 5cm 的檢測誤差亦明顯小於 6%，亦優於前期研究成果（誤差為 20%）。

4. 進行鋼筋尺寸檢測時，採用目前商用透地雷達設備仍不足以區分小尺寸鋼筋，對於 D29 鋼筋檢測結果則有較大誤差，此係因常用鋼筋尺寸的差異，仍無法造成明顯的繞射波時間差，理論繞射時間差最大僅約 0.2ns，對於雷達波而言仍屬相當細微的變化。且緊密排列的鋼筋造成的繞射波彼此干涉，易造成雙曲線訊號的破壞，造成人為挑波誤判。故本研究結果認為在緊密排列的鋼筋狀況下，目前仍無法採透地雷達進行鋼筋尺寸探查。
5. 採用震測探勘方法中的折射震測與零支距反射震測可有效檢測鋼筋混凝土結構物鋼筋保護層厚度，且較小的保護層厚度、緊密排列的鋼筋及較大的鋼筋尺寸等特殊狀況下，折射波及反射波較為顯著，有利人為研判並提高檢測準確度。
6. 由於採敲擊方式作為震源，因此導入混凝土結構物的能量及頻率可受人為控制，惟接收器與混凝土表面的接觸狀況實為影響試驗成敗的關鍵。故進行試驗前需對適體表面進行適當的清理工作，以去除劣質混凝土及表面起伏過大的影響。
7. 折射試驗中，近展距的波形紀錄首達波大多為振幅明顯的表面波，在臨界距離附近，折射波與表面波的時距相當小，亦難以發現微弱的折射波波訊，故難以察覺真實臨界距離。推估保護層厚度較好的方式仍是採用較長展距的走時資料，進行線性回歸後所得的直線，計算其與時間軸的截距，再採用公式 3-5 進行估算。

8. 採用零支距反射震測法進行保護層厚度探查，由於硬體設備尺寸的關係，震源位置與接收器位置仍有 2.5cm 左右的距離，對於檢測較小的厚度時，此距離應會造成較大的影響，無法達到零支距的效果，是否因此造成檢測結果均大於實際厚度（且誤差百分比較大），此點仍需更多資料佐證。
9. 採用公式 3-6 進行反射深度的計算，修正係數係採用 0.96，惟該公式大多應用於一般混凝土版厚檢測，也就是適用於較大深度的探查。圖十為本研究資料分布狀況，在較大的保護層厚度時，採用 0.96 作為修正係數應符合檢測結果，但應用於較小的保護層厚度時，似乎需採用較小的修正係數，惟此點仍需更多試驗資料佐證。
10. 採用渦電流形式鋼筋檢測儀（Covermeter）進行鋼筋保護層探查時，對於緊密排列鋼筋的狀況下，亦能進行極小保護層的探查，惟探查資料無法進行鋼筋定位。另本類儀器亦可應用於鋼筋尺寸探查，惟探查方式應採合理的物理方式進行，若僅簡單的左右移動探頭方式進行尺寸的概估則可能造成較大偏差。另進行鋼筋尺寸探查時，對於尺寸較大且排列較為緊密的鋼筋，應採用較大的高程距離（h）進行資料蒐集，方可獲得可信度較高的檢測結果。
11. 一般鋼筋腐蝕初期僅生成外層環狀剝離的氧化鐵，而此時環狀氧化鐵尺度並非透地雷達可辨認，但一但時間較為久遠，鋼筋軸周圍裂縫生成，嚴重時，局部裂縫將彼此穿透連接，形成局部內部裂縫發達區域或水平一致性裂隙，則應可採透地雷達或敲擊回音法進行內部局部破壞範圍或水平裂隙的探查。

12. 上述三種非破壞檢測方法，均可應用於鋼筋混凝土內部鋼筋的相關檢測，惟因各方法解析度及應用難易程度均不相同。透地雷達方法係採電磁波作為檢測方法，檢測資料可獲得鋼筋的三維空間位置，應用於保護層厚度、鋼筋間距及鋼筋搭接位置探查，均可獲得良好成果，惟仍無法進行鋼筋尺寸探查。敲擊回音法係以彈性波為檢測方法，檢測資料可獲得保護層厚度，並可依據保護層厚度的變化推估鋼筋間距。渦電流法則採次生磁場強度量測，主要用以檢測估鋼筋保護層厚度，並可藉由合理物理探查方式，進行鋼筋尺寸估算。表 3-7 簡要說明各檢測方法的適用性。

表 3-7 檢測方法適用範圍說明表

	透地雷達法	敲擊回音法	渦電流法
保護層厚度	優	優	優
鋼筋間距	優	可	可
鋼筋搭接位置	優	無法檢測	無法檢測
鋼筋尺寸	可	無法檢測	優
內部破壞範圍或水平裂隙	優	優	無法檢測

(資料來源：本研究整理)



## 第四章 土（岩）釘非破壞檢測方法應用驗證

### 第一節非破壞檢測方法原理與設備

敲擊回音法研究內容包含數值分析及物理模型驗證。數值分析係採用商用三維分析軟體 FLAC-3D 進行土（岩）釘波傳模擬，以瞭解應力波受漿液包覆長度及漿液強度等之影響。另物理模型則採全尺寸土（岩）釘，並變化漿液包覆長度及漿液強度，以實測資料瞭解應力波受周圍材質的影響，並驗證敲擊回音法的檢測能力。此外，在物理模型製作同時預埋同軸電纜，進行時域反射法量測以了解方法可行性。

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) 針對超音波法在混凝土材料應用上之限制（例如高頻波之散射衰減、激發能量不足及訊號辨識不易），加以改良，研究發展出一種利用較低頻率、暫態應力波傳原理之非破壞試驗法來偵測混凝土內部瑕疵之檢測方法。敲擊回音法乃利用機械性的敲擊方法將應力波引入測試的物體內，然後再利用位移訊號接收器（receiver），來接收因應力波被內部材質變化或瑕疵造成之反射波，此一位移波形可用來決定縱波來回敲擊表面與反射界面來回所需的時間，若波速已知，則可推求得到該界面的深度。

敲擊回音法發展初期（1983-1991），主要應用於偵測版狀物混凝土結構（例如樓版、橋面版、牆、地下連續壁等）內部各種瑕

疵，包含內部裂縫與孔隙；搗實不良之混凝土；預力套管內部因灌漿不良殘留之孔隙；瀝青混凝土內部之斷層及層狀版內含之裂縫與孔隙。在進入 1990 年代後，敲擊回音法之應用則趨向多元化，其中包含桿狀結構（例如梁、柱、混凝土樁）內部裂縫、孔隙與蜂窩之偵測、隧道混凝土襯砌內部瑕疵之偵測、混凝土結構粘結品質之檢測等。近年來儀器配置由單一接收器改為雙接收器，同時可在時域與頻率域進行訊號分析，對於混凝土表面裂縫開裂深度之測定，亦有重大發展。由於不斷累積研究成果，已使敲擊回音法成為全方位之混凝土結構品質檢測技術。其中有關鋼筋混凝土版之厚度量測已被納入 1998 年 ASTM 試驗標準（ASTM C-1383）。

本法優點在於：

- 1、訊號分析簡易。
- 2、檢測速度快，每一測點所需時間僅數秒鐘。
- 3、敲擊源可彈性調整，以因應不同現地狀況。
- 4、施測時，無須使用接合液或對物體表面特別磨平處理。

應用於土（岩）釘長度檢測時，需先將土（岩）釘頂部包覆之混凝土保護裝置鑿除，再切除局部彎曲段，切除時需注意截面平整並垂直裝設方向，且儘量減少出露長度。在確認敲擊回音檢測儀功能正常及預備電池電力充足後，即可進行試驗工作。試驗時先進行儀器組裝，再將接收器置於土（岩）釘頂部，使其垂直並貼緊表面（表面直徑約僅 1 吋），再以敲擊器敲擊頂部，以獲得檢測波形。

試驗資料分析處理極為簡易，一般僅挑選重複反射波波谷位置時間間距，作為應力波在土（岩）釘內雙程走時（ $\Delta T$ ），

再乘以土（岩）釘波速（V），其值二分之一即為土（岩）釘長度（L），參見下式。若試驗資料含過多雜訊，可以簡易濾波處理以增加反射波強度。

$$L = \frac{V \cdot \Delta T}{2} \dots\dots\dots(\text{公式 4-1})$$

因多數傳統設備體積過大，其訊號接收器尺寸較大，無法應用於土（岩）釘長度檢測，且多無應用實績，目前僅中興工程顧問社 SINO-NDT-IE 檢測儀（參見照片 2-10）有多次應用案例，故採用作為本研究試驗設備。

SINO-NDT-IE 檢測儀有以下特徵：

- 可感測鋼珠敲擊器：敲擊器內含感應裝置，可感測敲擊時間原點。鋼珠敲擊器尺寸分別為3、5、7及9mm。
- 電路盒：用以記錄激發應力波時間零點。需搭配手錘使用，提供較大暫探應力波激發能量，應用於巨積混凝土檢測。
- 訊號接收器：屬單一接收器，接收器接收混凝土表面位移之類比訊號。
- AD轉換器：將敲擊器與接收器接收之類比訊號轉換成數位訊號。
- 資料擷取系統：擷取數位訊號，並透過電腦主機及螢幕，直接顯示測試資料於電腦螢幕，供現場即時研判。

## 第二節 物理模型製作

土(岩)釘模型供六支，三支長度為2m，三支長度為3m，分別以英文字母編號，分別採不同灌漿包覆比例。即其中A與D模型僅底部灌漿、B與E模型為中後段灌漿、C與F模型為底部及頂部局部灌漿，內部鋼筋號數均為8號(D25)尺寸，漿液水灰比為0.5，模型示意圖參見圖4-1。

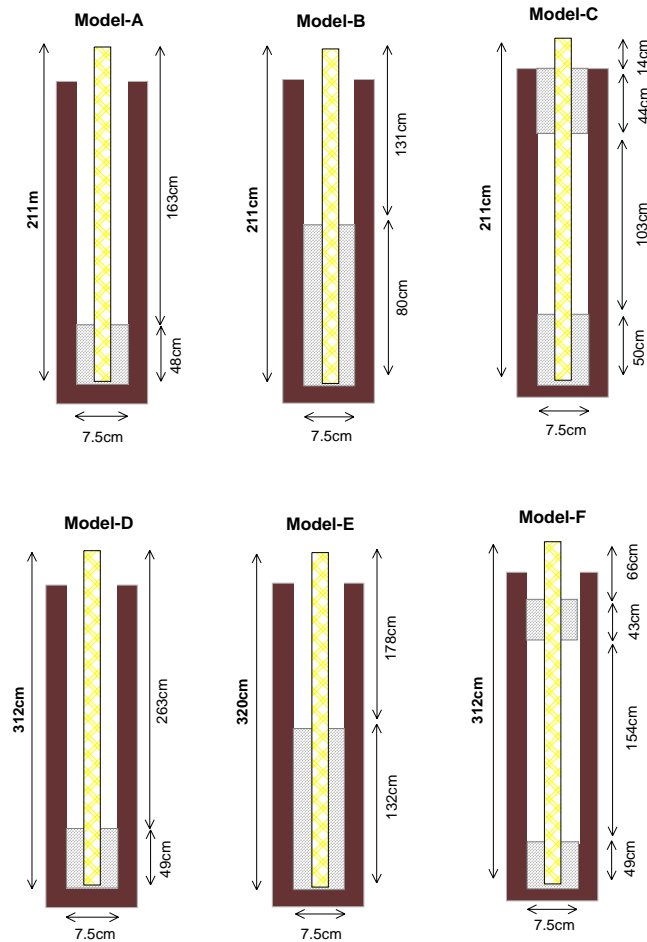


圖 4-1 土(岩)釘模型示意圖

(資料來源：本研究整理)

表 4-1 為土（岩）釘物理模型總表。因本期物理模型均為局部灌漿，故仍採用前期六支完整灌漿土釘模型作為對比，以了解灌漿造成檢測資料的差異。

表 4-1 土（岩）釘物理模型總表

模型編號	尺寸 (長寬高) (cm)	灌漿材料	鋼筋尺寸	灌漿完整性
既有土（岩）釘 2支	300	灌漿材料 水灰比 0.5	D29	全段灌漿
既有土（岩）釘 2支	400	灌漿材料 水灰比 0.5	D29	全段灌漿
既有土（岩）釘 2支	600	灌漿材料 水灰比 0.5	D29	全段灌漿
新製土（岩）釘 A	300	灌漿材料 水灰比 0.5	D25	局部灌漿(16%)
新製土（岩）釘 B	300	灌漿材料 水灰比 0.5	D25	局部灌漿(41%)
新製土（岩）釘 C	300	灌漿材料 水灰比 0.5	D25	局部灌漿(30%)
新製土（岩）釘 D	200	灌漿材料 水灰比 0.5	D25	局部灌漿(23%)
新製土（岩）釘 E	200	灌漿材料 水灰比 0.5	D25	局部灌漿(61%)
新製土（岩）釘 F	200	灌漿材料 水灰比 0.5	D25	局部灌漿(45%)

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 土(岩)釘灌漿品質檢測

本計劃前期研究成果係對於埋設土(岩)釘長度進行檢測方法的適用性研究，並確認敲擊回音法及時域反射法可有效進行埋設長度探查，惟兩方法均有其限制性。應用敲擊回音法時，需了解設計土(岩)釘長度、灌漿品質與圍岩狀況，一但灌漿強度較高且灌漿完全，則在於敲擊回音檢測資料上並無明顯暫態應力波的重複反射現象，需藉由頻譜資料大致估算特徵頻頻率出現位置，再推估埋設長度，惟此時回波速大幅降低至與灌漿材料一致的波速，若採裸露鋼筋波速進行長度估算，將造成嚴重偏差。另採用時域反射法進行埋設長度檢測，量測方法相當簡易，量測資料亦不需經過繁複的處理與解譯，可立即獲得高準確率的結果。惟此法需預埋同軸電纜，故不適用於老舊土(岩)釘。由於此法的原理簡易及資料判讀爭議性較少，故香港土木工程署已編列為檢測規範，各處工址需依照規範進行裝設及量測。本期研究亦採敲擊回音法進行灌漿品質檢測適用性研究，藉由數值分析與物理模型驗證結果，了解回波與灌漿完整性的關係。

目前土(岩)釘相關研究結果顯示：敲擊回音試驗回波之強弱與灌漿品質有關，當回波顯著時表示內部無灌漿，無回波則表示內部灌漿完全，若回波介於兩者間，則表示灌漿不完全。本研究前期結果顯示：時域資料回波明顯則表示土(岩)釘鍵體無任何漿體包覆，時域資料無回波則表示土(岩)釘鍵體受漿體包覆完全，惟頻率資料依然可獲得土(岩)釘長度。但對於部分灌漿結果，本研

究認為時域資料呈現結果似乎較為複雜，較難以回波強弱定義灌漿品質。本研究並將採用基樁完整性檢測概念，對時域資料進行完整了解，並期能了解灌漿完整性與回波的關係。

圖 4-2 為基樁完整性檢測結果的回波特性的圖。以下簡述幾項特點：

1. 理論上完整基樁之回波資料上僅有兩個明顯波訊，即表面直達波及樁底反射波。此狀況係因基樁周圍土壤物性一致，且與混凝土物性差距較大，故將形成圓柱型的波導（Wave Guide），敲擊波在樁體內有效地傳遞，並在樁底反射。應用於土（岩）釘時，類似完全無灌漿狀況，高頻暫態反射波明顯。
2. 一旦樁身有缺陷，則會在缺陷處造成阻抗的變化，並形成局部反射波，如果此缺陷過大，或形成斷樁，則無樁底回波。應用於土（岩）釘時，亦類似土（岩）釘周圍有局部漿體包覆，造成阻抗變化，於是形成介面造成局部反射波，此阻抗變化介面亦即為灌漿包覆介面。至於因混凝土材料引起的空洞、離析等現象，土（岩）釘則無
3. 基本上進行基樁檢測時，樁長與混凝土波速均為未知，其係為關係式的兩項參數（關係式同公式 4-1）。若已知埋設長度，則可藉由回波時間估算混凝土波速，推估混凝土品質及強度。若已知混凝土波速，則可藉由回波時間估算基樁埋設長度及缺陷深度，推估基樁完整性。應用於土（岩）釘檢測時，因鍵體波速較為一致，變化較小，故可採用合理的波速推估埋設長度及漿體包覆之深度。

桩身性状	标准曲线	$n = \frac{Z_1}{Z_2}$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} > 0$	说明
完整桩		$n = \frac{Z_1}{Z_2} > 1$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} > 0$	1. 反射波 $R'$ 与直达波初动相位相同。 2. 一次反射时间 $t$ , 波速 $C$ 和桩长 $L$ , 其关系为: $C = 2L/t$ 。
扩颈桩		$n = \frac{Z_1}{Z_2} < 1$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} < 0$	1. 扩颈反射波 $R'$ 初动相位与直达波 $D$ 相反。 2. 扩颈位置 $L' = \frac{1}{2} C t'$ 。
缩颈桩		$n = \frac{Z_1}{Z_2} > 1$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} > 0$	1. 缩颈反射波 $R'$ 初动相位与直达波 $D$ 相同。 2. 扩缩颈反射波 $R'$ 振幅大小与缩(扩)尺寸有关。
夹泥微裂空洞		$n = \frac{Z_1}{Z_2} > 1$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} > 0$	夹泥、微裂、空洞三者情况近似, 缺陷反射波 $R'$ 初动相位与直达波 $D$ 相同。
离析松散		$n = \frac{Z_1}{Z_2} > 1$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} > 0$	1. 离析松散二者情况近似, 缺陷反射波 $R'$ 初动相位与直达波 $D$ 相同。 2. 在频域分析中, 缺陷位置处频率明显降低。
局部断裂		$n = \frac{Z_1}{Z_2} > 1$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} > 0$	1. 局部断裂也会出现多次反射, 如 $R', R'', R''', \dots$ 。 2. 能看到桩底反射, 但振幅较小。
断桩		$n = \frac{Z_1}{Z_2} \rightarrow \infty$ $R_v' = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = 1$	1. 没有桩底反射。 2. 断桩处的反射波振幅 $R', R'', R''', \dots$ , 越来越小, 其位置几乎相等。

圖 4-2 基樁完整性檢測回波特性的

(資料來源：摘自吳文等，1998)

### 一、數值分析

本分析工作係用以了解敲擊回音回波與土(岩)釘漿體包覆狀況之關係。數值土(岩)釘模型共有 6 組，圖 4-3 為幾何示意圖。土(岩)釘模型編號 A 長度為 2m，僅包含底部局部灌漿，漿體包覆長度為 20cm。模型編號 B 長度為 2m，僅包含底部半段灌漿，漿體包覆長度為 100cm。模型編號 C 長度為 2m，包含底部及頂部局部灌漿，漿體包覆長度均為 20cm。模型編號 D、E 與 F 長度均為 3m，其漿體包覆狀況與上述編號 A、B 與 C 相同。



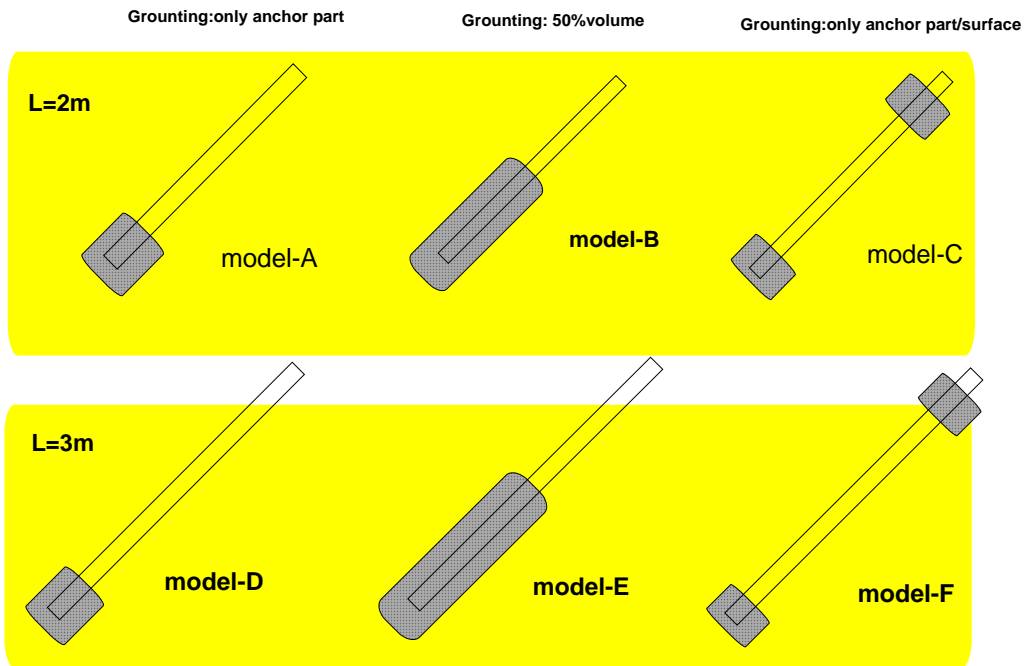


圖 4-3 土（岩）釘數值分析模型

（資料來源：本研究整理）

分析採用美國 ITASCA CONSULTING GROUP, INC. 所發展之三維分析程式 FLAC3D 辦理。土（岩）釘材料參數包含鋼筋、周圍漿液與土壤之壓縮波速及彈性模數等，其中鋼材波速為 5,800m/sec，鋼材彈性模數為 2.1E8KPa，詳細材料參數參見表 4-2。數值分析案例共有 6 組，分別為 A 至 F，主要係為模擬在假設條件下，鋼筋頂部輸入一暫態應力波後，經過內部傳遞後，其回波形式；同時改變土層參數，以了解介質不同力學性質造成波傳行為之差異。中其中入射波採半週期方塊波，時間延時為 50  $\mu$  s。

表 4-2 數值模擬材料參數

分析 案例	鋼筋 長度 (m)	鋼筋彈 性模數 ( $\times 10^8$ ) KPa	灌漿材料 彈性模數 ( $\times 10^5$ ) KPa	灌漿材 料波速 (m/sec)	土層材料 彈性模數 ( $\times 10^5$ ) KPa	土層材 料波速 (m/sec)	漿體包 覆 比例
A	2	2.10	7.45	600	0.665	200	10% (20cm)
B	2	2.10	7.45	600	0.665	200	50% (100cm)
C	2	2.10	7.45	600	0.665	200	20% (40cm)
D	3	2.10	7.45	600	0.665	200	6.7% (20cm)
E	3	2.10	7.45	600	0.665	200	50% (150cm)
F	3	2.10	7.45	600	0.665	200	13.4% (40cm)

\*鋼材材料波速為 5,800m/sec

(資料來源：本研究整理)

圖 4-4 為數值模型 A 與數值模型 D 的回波歷時曲線。左圖中在直達波後有三個明顯的反射波訊，其時距大致上相同，約為  $810 \mu s$ 。右圖有兩處反射波訊，其時距約為  $1,270 \mu s$ 。A、D 兩數值模型鍵體長度分別為 200cm 及 300cm，其比值約為 0.67，而上述時距比值約為 0.64，兩比值有明顯差異，顯見反射波應非來自於鍵體底端。由於兩模型漿底包覆長度均為 20cm，故其裸露段分別為 180cm 與 280cm，其比值約為 0.64，與反射波時距比值相同。故推論反射波係來自於漿體包覆界面。

另值得注意的是，A 模型資料反射波型中包含兩個同相位的波群，亦即顯示有兩個波谷，第一個波谷可能來自於漿體包覆界面，而第二個較晚到達的波谷可能為鍵體底部回波。

大致上而言，反射相位與直達波相位相差 180 度，而與第二次重複反射波（Second Multiple）同相。一般裸露鋼筋的回波試驗，其歷時紀錄亦顯示相當多高頻應力波重複反射訊號，惟各訊號相位均相同。此係因裸露鋼筋底部與空氣接觸，其介質阻抗（Impedence）特性係由強變弱，故反射係數為正值，對於反射波相位並無改變。而本案例顯示：灌漿材料的包覆使得介質阻抗（Impedence）特性係由弱變強，故反射波相位有 180 度的改變，而再次反射時，也就是第一次複反射（First Multiple），相位再進行 180 度的改變，相當於 360 度的相位差，等於無改變，故第一次複反射訊號與直達波相位相同。此波形特徵可用以了解灌漿情況及位置。

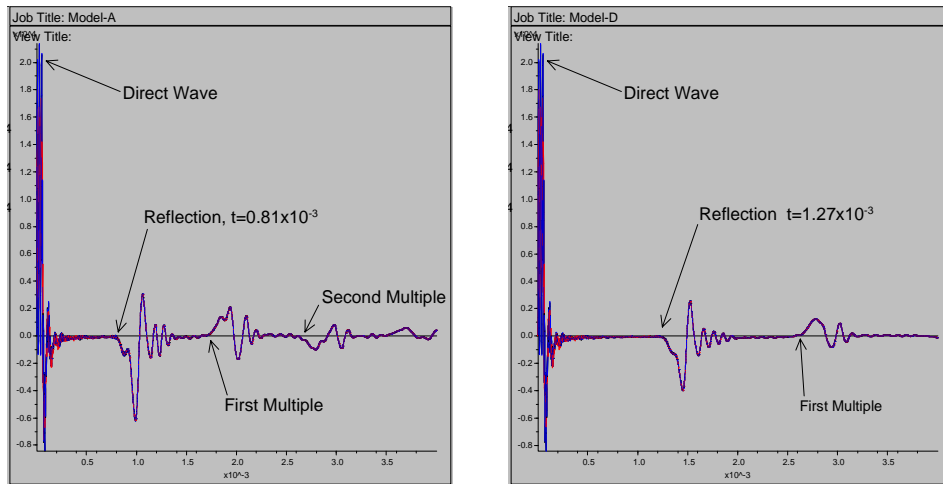


圖 4-4 土（岩）釘數值模型回波資料（一）

（資料來源：本研究整理）

圖 4-5 為數值模型 B 與 E 的回波歷時曲線。左右兩圖中在直達

波後有三個明顯的反射波訊，根據反射波相位與時距推論，三者應分別為漿體界面反射、鍵體底部反射及第一次重複反射。

B 模型的漿體界面反射時距與鍵體底部反射時距比約為 0.44，表示漿體界面反射波速度較大於鍵體底部反射波。漿體界面反射波速係為自由鋼筋波速，一般平均鋼筋波速可採 5,200m/sec，則鍵體底部反射波速度應為 4,576m/sec，亦可估算求得底部部分漿體包覆段之波速約為 3,952m/sec。E 模型資料分析結果與上述相似，表示部份漿體包覆下的傳波速度將低於裸露鋼筋波速。

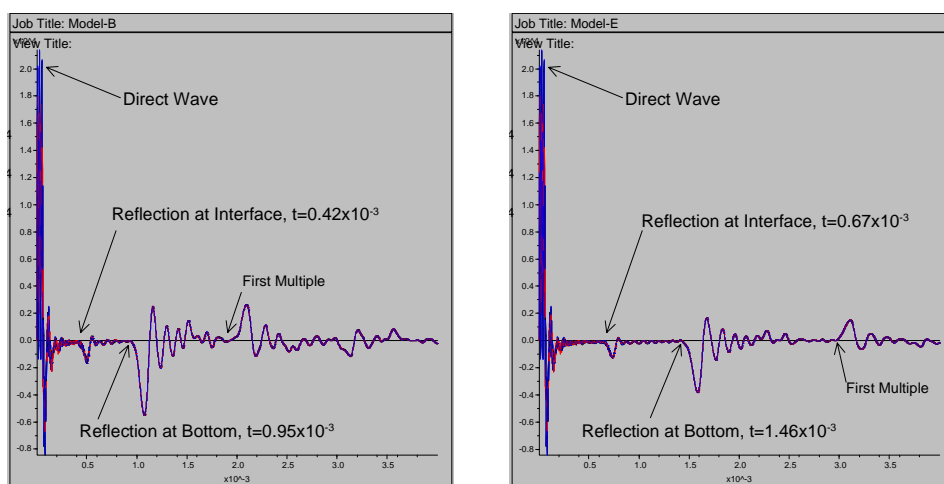


圖 4-5 土(岩)釘數值模型回波資料(二)

(資料來源：本研究整理)

圖 4-6 為數值模型 C 與數值模型 F 的回波歷時曲線。左右兩圖中在直達波後有三個明顯的反射波訊，根據反射波型態、相位與時距推論，三者應分別為表面自由段的共震、底部漿體界面反射及第一次重複反射。

C 模型資料中，反射波之前係為一連串的單頻訊號，係為表面

出露約 20cm 的鍵體震動造成。反射波出現在約  $880\mu\text{s}$  處，與模型 A 資料約有  $70\mu\text{s}$  的延遲，此應為表面局部灌漿段造成波傳速度降低，導致走時延長，經估算回波速度約為  $4,091\text{m/sec}$ 。F 模型資料顯示此時間延遲約為  $60\mu\text{s}$ ，回波速度約為  $4,211\text{m/sec}$ 。兩者解析結果一致，並與裸露鋼筋波速差異甚大。

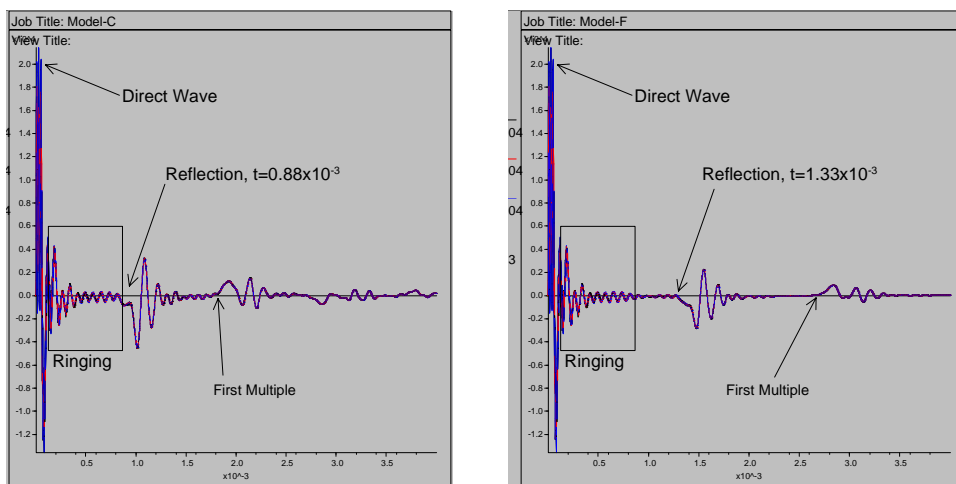


圖 4-6 土（岩）釘數值模型回波資料（三）

（資料來源：本研究整理）

上述數值分析結果顯示：漿體包覆介面將形成反射波，建體底部亦有反射波，惟未包覆漿體段回波速度係為自由鋼筋波速，包覆漿體段回波速度較低。另表面出露段將造成共振訊號，可能掩蓋或干擾時間較遲的反射波，造成資料誤判，未來在處理實測資料時應密切注意。

## 二、物理模型驗證

首先回顧前期 6 支完整灌漿的土（岩）釘物理模型回波狀況，

圖 4-7 為既有兩支 3m 長土釘模型檢測資料，左側為回波歷時紀錄，橫軸為時間，單位為毫秒 ( $\mu s$ )，縱軸為數位記數 (digital count)，無單位。右圖為經過 FFT 處理完成的頻譜資料，橫軸為頻率，單位為赫茲 (Hz)；縱軸為正規化振幅 (Normalized Amplitude)，採對數形式 (Log Scale)。大致上而言，歷時紀錄的回波衰減相當快，除部份接收器與土釘出露段的持續共震訊號外，並無任何明顯且等間距出現的高頻暫態應力波。右側頻譜圖顯示兩處峰值，其中位於 4,000Hz 左右的明顯波峰為接收器的共震頻率，另外低於 1,000Hz 的明顯波峰應為土釘出露段 (長度約 7cm) 造成的共震訊號。

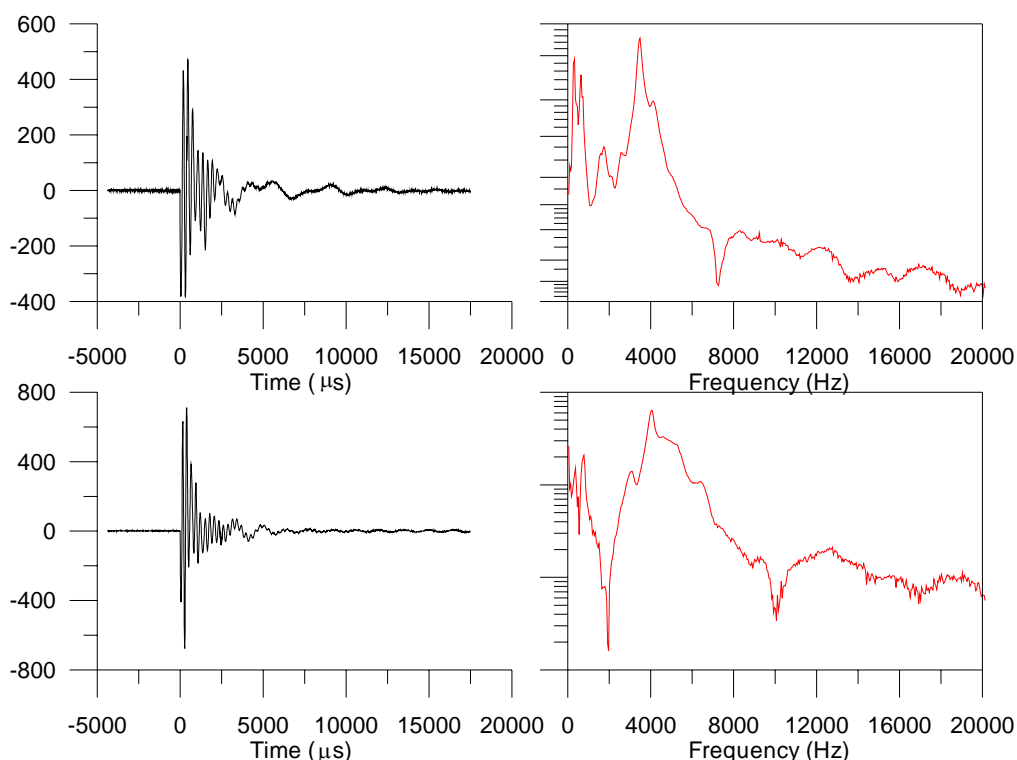


圖 4-7 既有土(岩)釘模型檢測結果(3m)

(資料來源：本研究整理)

圖 4-8 為既有兩支 4m 長土（岩）釘模型檢測資料，左側為回波歷時紀錄，右側為相對的頻譜。大致上而言，第一支土釘的歷時紀錄的回波衰減相當快，除部份接收器與土釘出露段的持續共震訊號外，並無任何明顯且等間距出現的高頻暫態應力波。右側頻譜圖顯示兩處峰值，其中位於 4,000Hz 左右的明顯波峰為接收器的共震頻率，另外低於 1,000Hz 的明顯波峰應為土釘出露段（長度約 10cm）造成的共震訊號。第二支土釘的歷時紀錄低頻共震訊號相當明顯，此係土釘出露段（長度約 15cm）的持續共震造成，故右側頻譜圖僅顯示一處峰值，位於 4,000Hz 左右的接收器共震頻率較不明顯。

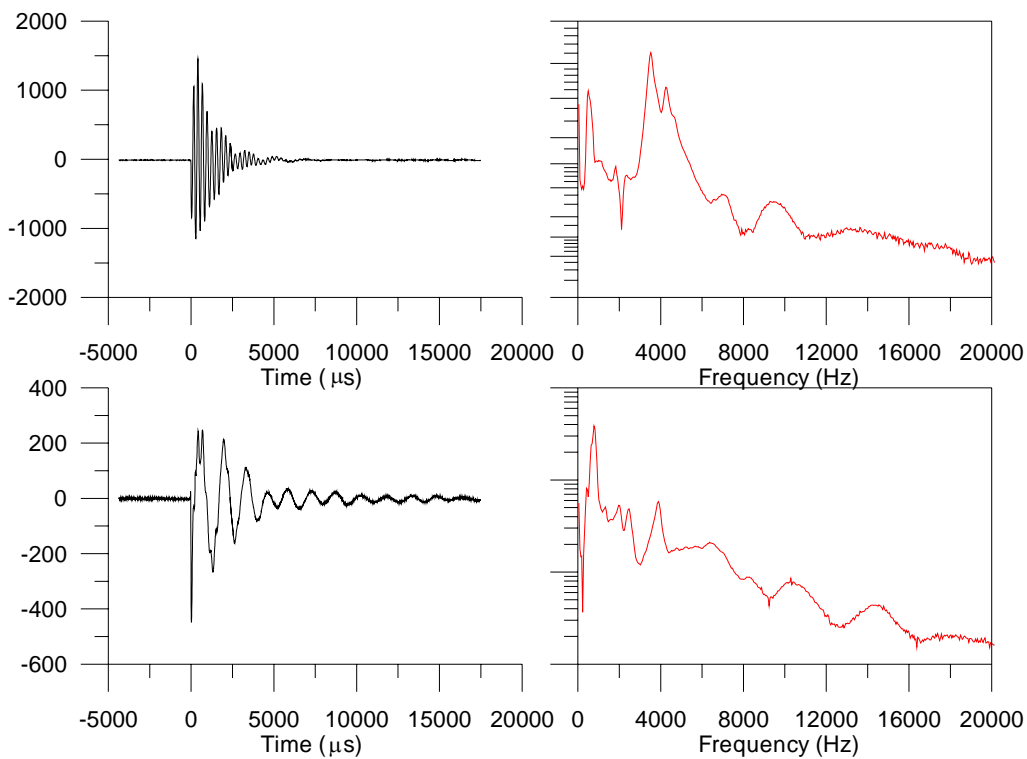


圖 4-8 既有土（岩）釘模型檢測結果(4m)

（資料來源：本研究整理）

圖 4-9 為既有兩支 6m 長土（岩）釘模型檢測資料，左側為回波歷時紀錄，右側為相對的頻譜。左側為回波歷時紀錄，右側為相對的頻譜。大致上而言，歷時紀錄的回波衰減相當快，除部份接收器與土釘出露段的持續共震訊號外，並無任何明顯且等間距出現的高頻暫態應力波。右側頻譜圖顯示兩處峰值，其中位於 4,000Hz 左右的明顯波峰為接收器的共震頻率，另外低於 1,000Hz 的明顯波峰應為土釘出露段（長度約 10cm）造成的共震訊號。

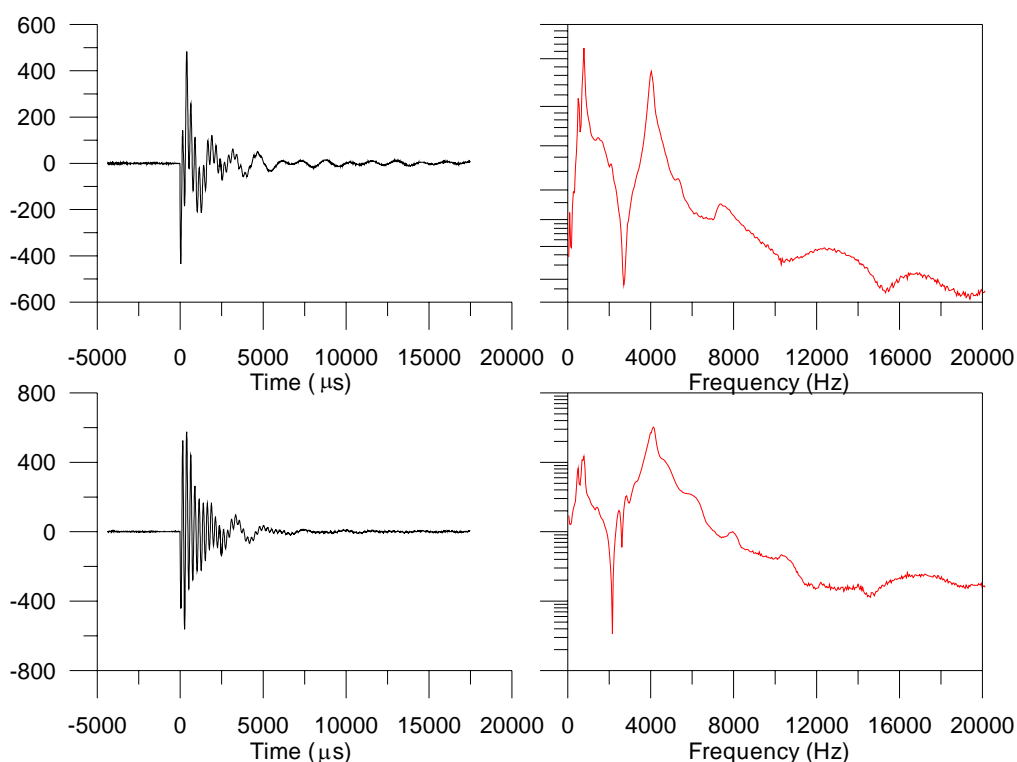


圖 4-9 既有土（岩）釘模型檢測結果(6m)

(資料來源：本研究整理)

根據前人研究：即使灌漿完全條件下，仍應有局部底部回波，



且位於 70kHz 左右的波群應較為明顯，本研究試驗資料於 70kHz 附近亦出現局部明顯波訊，參見圖 4-10，惟該頻率振幅相對較低，強度約小於接收器共振訊號約 100 倍，故歷時紀錄上並未出現此反射波訊。又可能係導入之暫態應力波能量大多集中於低頻部分，此較長的波長不容易因局部些微的介質差異而造成反射，反而很輕易地穿透鍵體與漿體介面，漏失至圍岩中。

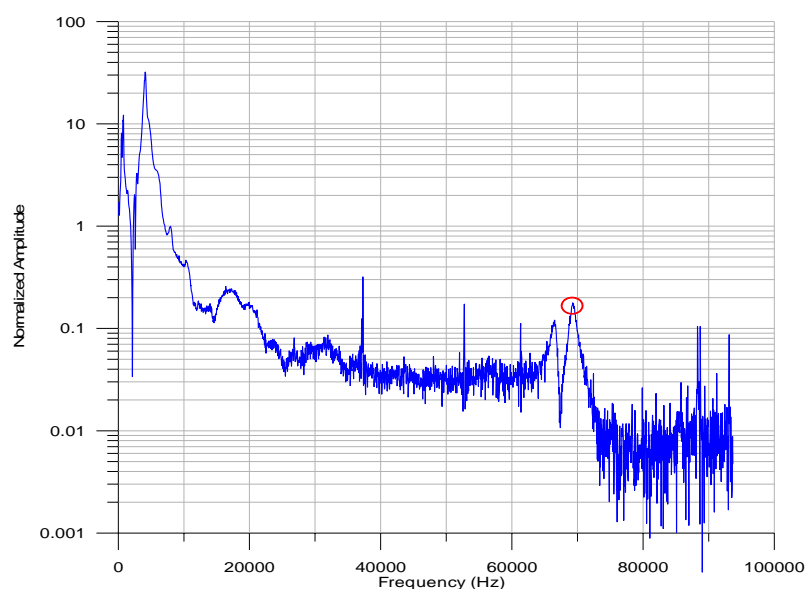


圖 4-10 既有土（岩）釘模型檢測頻譜(6m)

（資料來源：本研究整理）

圖 4-11 為本期新製 A 號土（岩）釘物理模型試驗回波資料，自上至下分別為原始紀錄與採用不同高通濾波的處理結果、模型幾何示意圖及回波資料頻譜。濾波頻率分別為 3.5kHz 與 6.5kHz，旨在濾除低頻共震訊號，濾波結果顯示：圖中標示實心三角形位置為暫態應力波直達波，係由敲擊點沿土釘鍵體截面直接傳遞至接收

器，其波訊相當完整明顯。圖中箭頭位置為高頻暫態應力波反射時間位置，分別為第一次與第二次的反射，其時間間距相當一致，約為 1,088 與 1,065  $\mu\text{s}$ ，採一般鋼筋波速 5,180m/sec 進行估算，該反射距離長度約為 2.82m 與 2.76m，其應為未灌漿段長度，也就是模型幾何示意圖中 ab 長度。

圖中直達波相位與第二次反射波相位一致，而與第一次反射波有 180 度的差別，也就是反向訊號出現在第一次反射。一般裸露鋼筋的回波試驗，其歷時紀錄亦顯示相當多高頻應力波重複反射訊號，惟各訊號相位均相同。此係因裸露鋼筋底部與空氣接觸，其介質阻抗 (Impedance) 特性係由強變弱，故反射係數為正值，對於反射波相位並無改變。而本案例顯示：灌漿材料的包覆使得介質阻抗特性係由弱變強，故第一次反射相位有 180 度的改變，而第二次相位相當於 360 度的相位差，等於無改變，故第二次反射訊號與直達波相位相同，故可利用相位改變狀態了解灌漿情況及位置。另於時間約為 2,550  $\mu\text{s}$  出現之較微弱波群，應為土釘鍵體底部之反射波，其與第一次暫態應力波反射時間相距約 365  $\mu\text{s}$ ，此時間應為灌漿段的雙程走時，也就是模型幾何示意圖中 bc 長度，並可反算求得波速約為 2,685m/sec，此波速與漿體波速相當。位於第二次高頻暫態應力波反射時間以後，亦即時間軸大於 3,500  $\mu\text{s}$  之歷時紀錄，因 ab 段與 bc 段重複反射波的疊加效應，波形相當複雜，故相當難以區分各反射波群。

頻譜圖最顯著的特徵應為頻率約自 4kHz 至 13kHz 間，頻率間距約為 9,735Hz 間出現 11 處波峰，其波峰頻率間距約為 974Hz，其相對長度約為 2.66m，此外頻率位置並無其他任何特徵出現。

#### 第四章 土(岩)釘非破壞檢測方法驗證

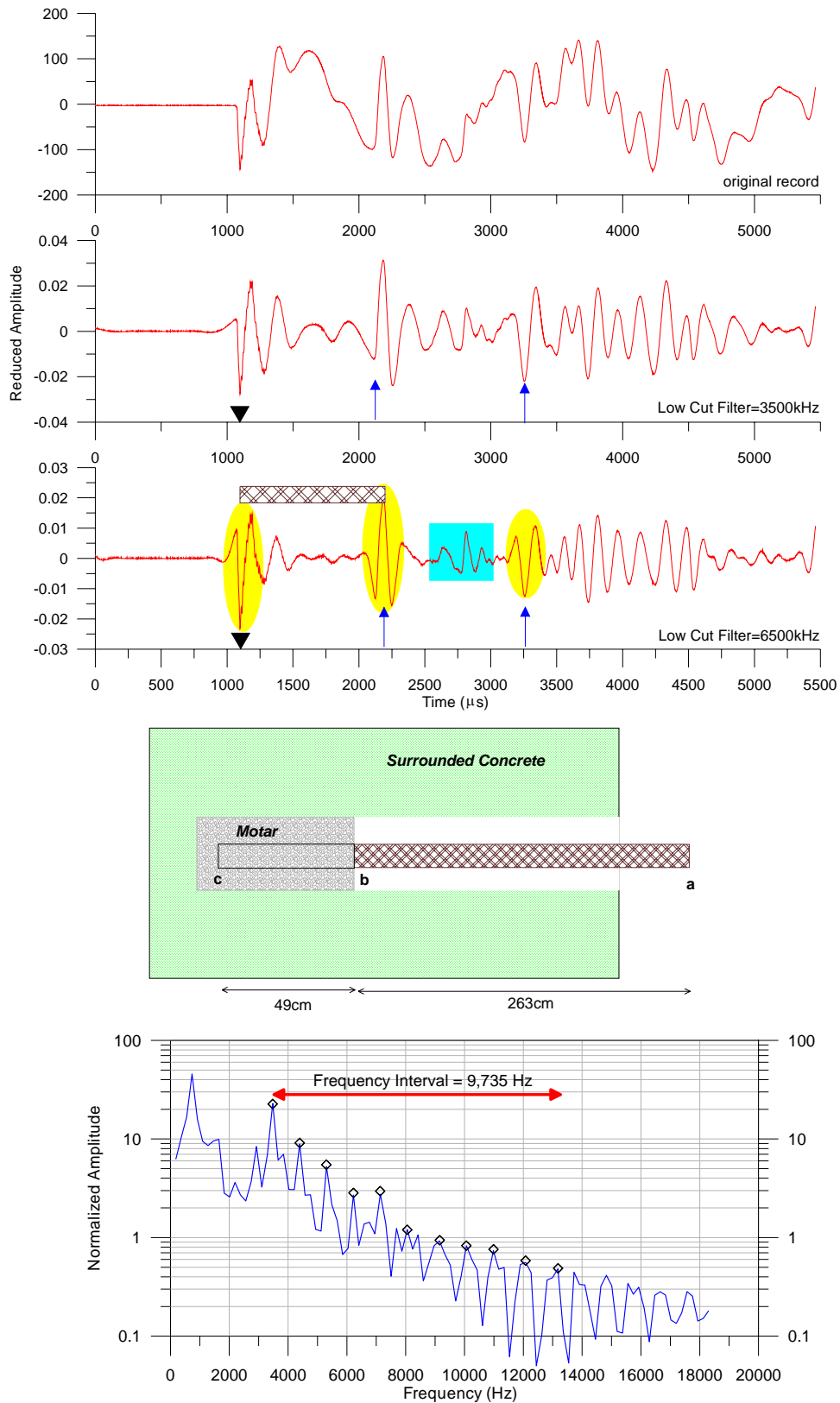


圖 4-11 A 號土(岩)釘物理模型檢測結果

(資料來源：本研究整理)

圖 4-12 為本期新製 B 號土（岩）釘物理模型試驗回波資料。高通濾波結果顯示：圖中標示實心三角形位置為暫態應力波直達波，係由敲擊點沿土釘鍵體截面直接傳遞至接收器，其波訊相當完整明顯。圖中箭頭位置為高頻暫態應力波反射時間位置，分別為第一次與第二次的反射，其時間間距相當一致，約為 751 與 755  $\mu\text{s}$ ，採一般鋼筋波速 5,180m/sec 進行估算，該反射距離長度約為 1.95m 與 1.96m，應為未灌漿段長度，也就是模型幾何示意圖中 ab 長度。

本模型試驗結果直達波的波訊相位與第二次反射波相位一致，而與第一次反射波有 180 度的差別，與上述資料相同，表示高頻反射波深度位置有完整的灌漿包覆情況。

另於第二次高頻暫態應力反射波時間位置後，約為 2,800  $\mu\text{s}$  出現之較微弱波群，應為土釘鍵體底部之反射波。其與直達波位置相距 1,695  $\mu\text{s}$ ，而第一次暫態應力波反射時間相距約 944  $\mu\text{s}$ ，此時距應為灌漿段的雙程走時，也就是模型幾何示意圖中 bc 長度，並可反算求得波速約為 2,797m/sec，此波速與水泥漿體波速相當。時間軸約為 4,550  $\mu\text{s}$  左右，濾波資料上出現一群較低頻的波群，其與直達波位置時距約為 3,445  $\mu\text{s}$ ，相當於上述時距 1,695  $\mu\text{s}$  的倍數，表示此波群為灌漿底部的重複反射波（代表 ac 長度）。

頻譜圖最顯著的特徵應為頻率約自 4,000Hz 至 13,000Hz 間，頻率間距約為 13,905Hz 間出現 11 處波峰，其波峰頻率間距約為 1,391Hz，其相對長度約為 1.86m，此外頻率位置並無其他任何特徵出現。

#### 第四章 土(岩)釘非破壞檢測方法驗證

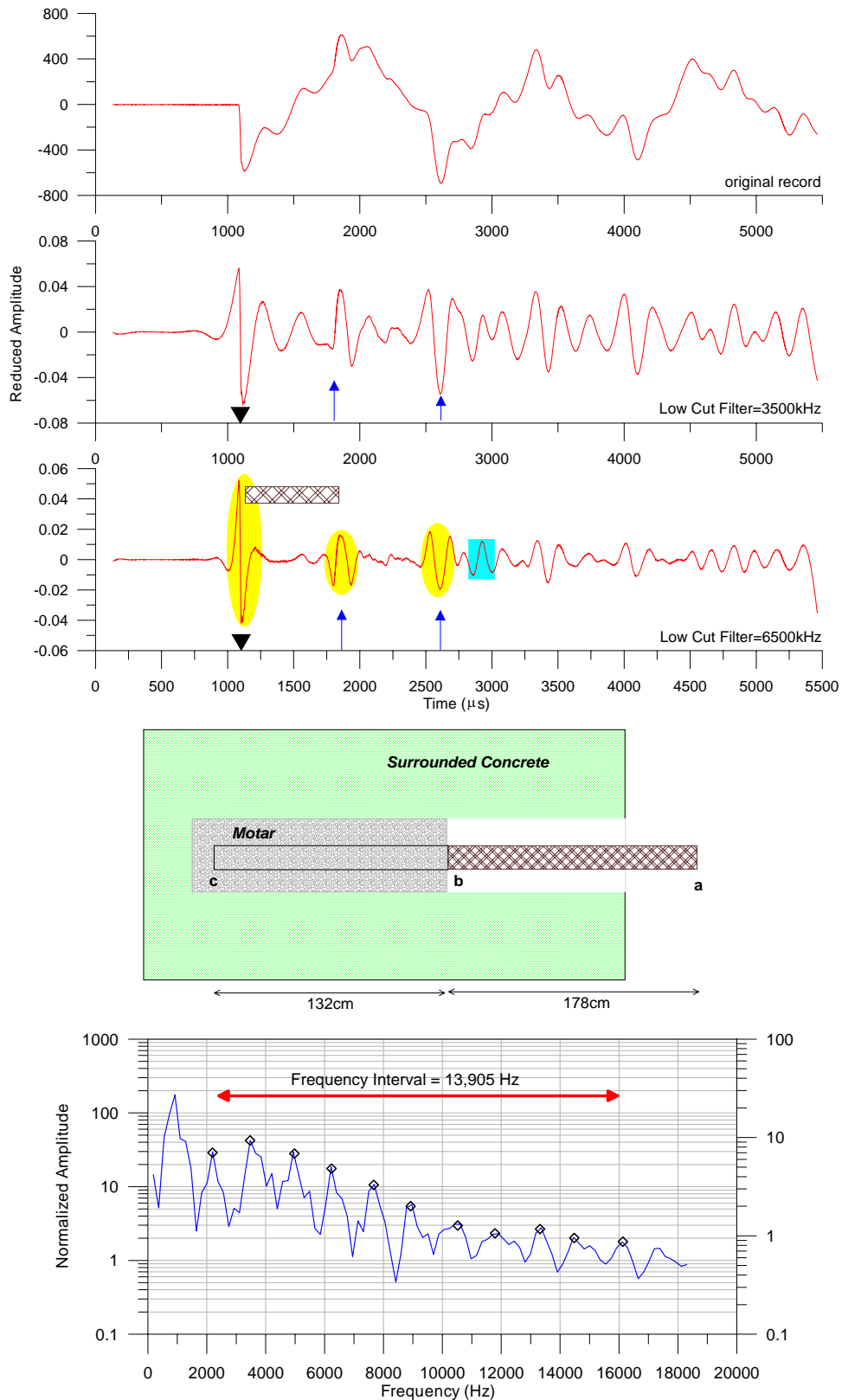


圖 4-12 B 號土(岩)釘物理模型檢測結果

(資料來源：本研究整理)

圖 4-13 為本期新製 C 號土(岩)釘物理模型試驗回波資料。高通濾波結果顯示：圖中標示實心三角形位置為暫態應力波直達波，係由敲擊點沿土釘鍵體截面直接傳遞至接收器，其波訊較不若上述資料完整明顯。圖中箭頭位置為高頻暫態應力波反射時間位置，其與直達波之時距約為  $260\mu s$ ，採一般鋼筋波速  $5,180\text{m/sec}$  進行估算，該反射距離長度約為  $0.67\text{m}$ ，相當於土釘頂端未灌漿段長度，也就是模型幾何示意圖中 ab 長度。

譜譜資料中最明顯的特徵為圖中以菱形標示之明顯波峰，其頻率間距約略相，其頻率間距約為  $3,400\text{Hz}$ ，以此估算長度約為  $0.76\text{m}$ ，與時域資料檢測結果相似，故應為土釘頂端未灌漿段長度。另外在頻率約  $15,000$  至  $25,000\text{Hz}$  間，有近似等間距出現之波峰，其頻率間距約為  $2,000\text{Hz}$ ，採波速  $5,180\text{m/sec}$  估算長度約為  $1.29\text{m}$ 。由於前述數值分析結果顯示：灌漿段回波速度小於自由鋼筋波速，若採數值分析結果之灌漿段平均回波波速  $4,200\text{m/sec}$  進行估算，則長度約為  $1.05\text{m}$ ，此長度與模型幾何示意圖中 ac 長度 ( $1.09\text{m}$ ) 相當。此外頻率大於  $30,000\text{Hz}$  之振幅趨於一致，無任何規律，且  $70\text{kHz}$  訊號並未出現，故研判均為雜訊。

上述分析結果顯示應用敲擊回音法於部分灌漿土(岩)釘時，因地表出露段共振過大，影響較深處反射訊號，故底端反射訊號較不明顯。淺部反射訊號大致顯示有兩段長度，分別為未灌漿/灌漿界面深度(即 b 點)與灌漿/未灌漿界面深度(即 c 點)，表示暫態應力波反射波均能反映出淺層介質特性變化位置。

#### 第四章 土(岩)釘非破壞檢測方法驗證

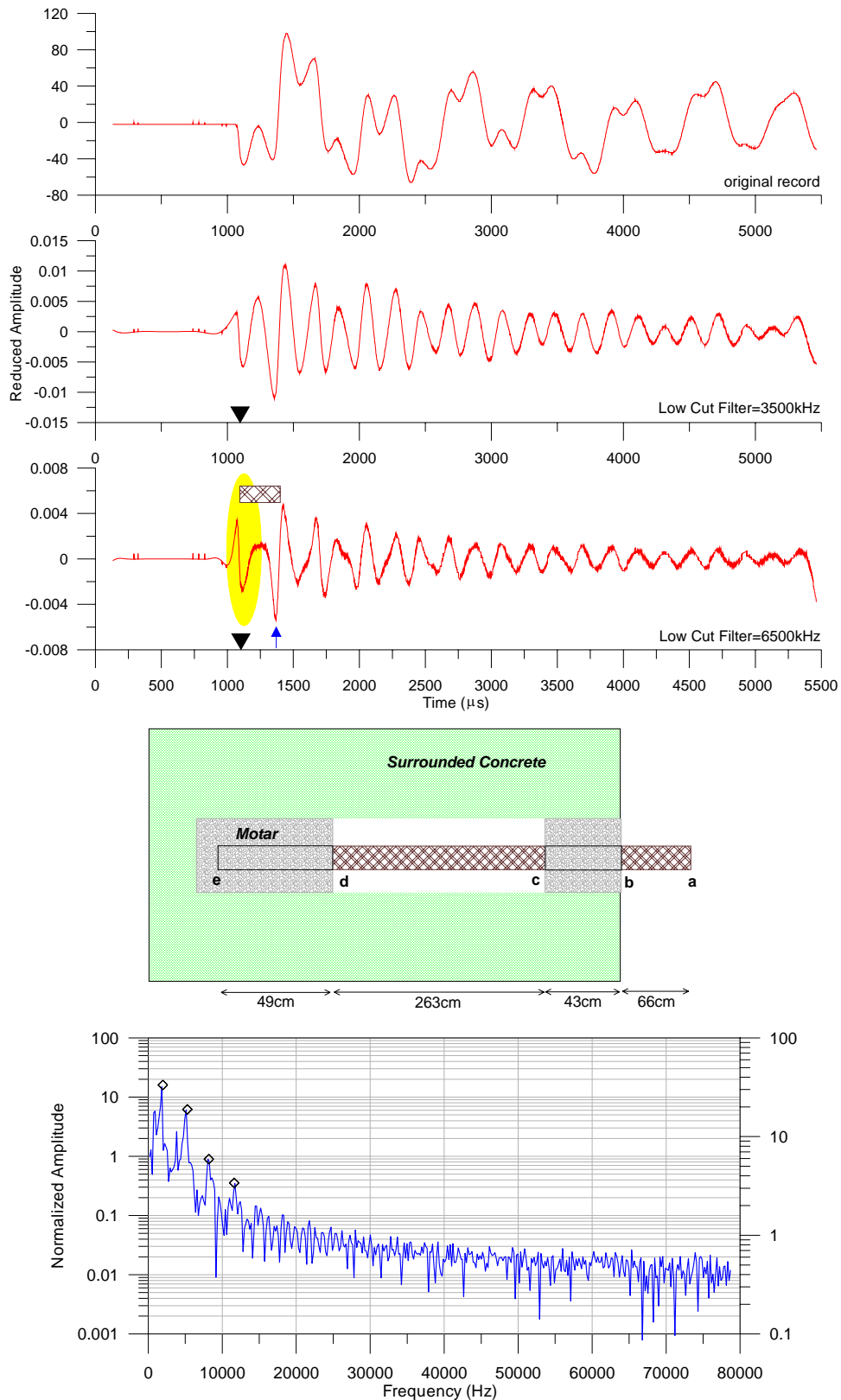


圖 4-13 C 號土(岩)釘物理模型檢測結果

(資料來源：本研究整理)

圖 4-14 為本期新製 D 號土(岩)釘物理模型試驗回波資料。高通濾波結果顯示：圖中標示實心三角形位置為暫態應力波直達波，係由敲擊點沿土釘鍵體截面直接傳遞至接收器，其波訊相當完整明顯。圖中箭頭位置為高頻暫態應力波反射時間位置，分別為第一次、第二次與第三次的反射，其時間間距相當一致，約為 616、734 與 710  $\mu s$ ，採一般鋼筋波速 5,180m/sec 進行估算，該反射距離長度約為 1.6m、1.9m 與 1.84m，應為未灌漿段長度，也就是模型幾何示意圖中 ab 長度。

本模型試驗結果直達波的波訊相位與第二次反射波相位一致，而與第一次與第三次反射波有 180 度的差別，與 A、B 模型試驗資料相同，表示高頻反射波深度位置有完整的灌漿包覆情況。

另於第二次高頻暫態應力反射波時間位置後，約為 2150  $\mu s$  出現之較微弱波群，應為土釘鍵體底部之反射波。其與直達波位置相距 1,045  $\mu s$ ，而第一次暫態應力波反射時間相距約 429  $\mu s$ ，此時距離應為灌漿段的雙程走時，也就是模型幾何示意圖中 bc 長度，並可反算求得波速約為 2,238m/sec，此波速略低於水泥漿體波速。

頻譜圖最顯著的特徵應為頻率約自 4,500Hz 至 10,000Hz 間，頻率間距約為 5,100Hz 間出現 4 處波峰，其波峰頻率間距約為 1,700Hz，其相對長度約為 1.52m，此外頻率位置並無其他任何特徵出現，此長度與未灌漿段長度相當，故頻譜圖上主要特徵頻率代表自由段的重覆反射波頻率。



#### 第四章 土(岩)釘非破壞檢測方法驗證

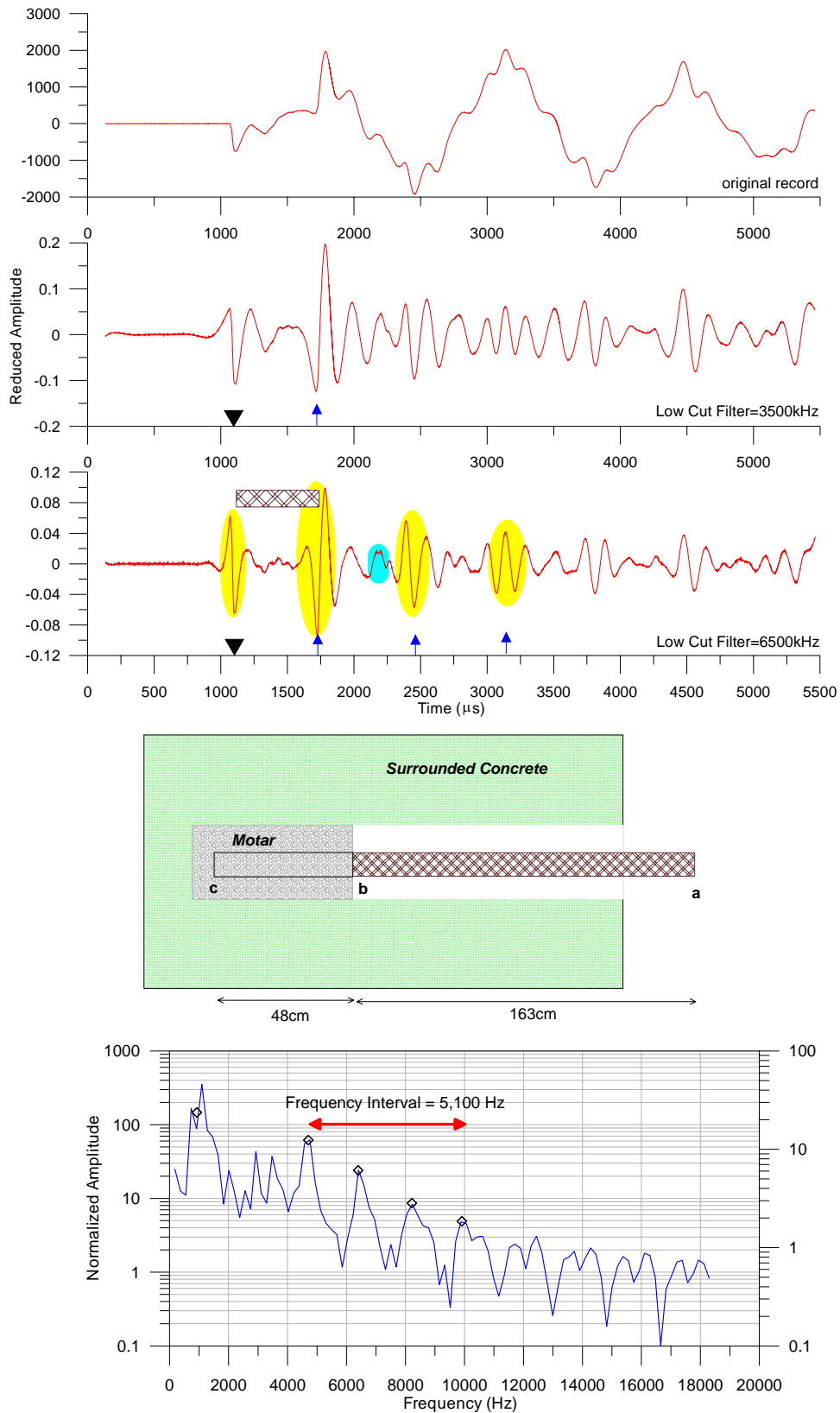


圖 4-14 D 號土(岩)釘物理模型檢測結果

(資料來源：本研究整理)

圖 4-15 為本期新製 E 號土(岩)釘物理模型試驗回波資料。高通濾波結果顯示：圖中標示實心三角形位置為暫態應力波直達波，係由敲擊點沿土釘鍵體截面直接傳遞至接收器，其波訊較不若上述資料完整明顯，且因模型頂部出露段長度僅 14cm，其反射波時距較短，無法與直達波完全分離，故影響人為研判，從時域資料並無法獲得任何有效資料。

譜譜資料中較明顯的特徵資料有兩群，第一群以菱形標示之明顯波峰，其頻率間距約略相，其頻率間距約為 2,400Hz。第二群以星形標示之明顯波峰，其頻率間距約略相，其頻率間距約為 3,600Hz。第一群波若以波速 5,180m/sec 估算長度約為 1.08m，若以波速 4,200m/sec 估算長度約為 0.88m，較符合模型幾何示意圖中 dc 長度。第二群波若以波速 5,180m/sec 估算長度約為 0.72m，若以波速 4,200m/sec 估算長度約為 0.58m，較符合模型幾何示意圖中 ac 長度。另外在頻率約 32,000 至 38,000Hz 間，有近似等間距出現之波峰，其頻率間距約為 875Hz，若以波速 5180m/sec 估算長度約為 2.96m，若以波速 4,200m/sec 估算長度約為 2.4m，較符合模型幾何示意圖中 ae 長度，故為埋設土(岩)釘長度。此外頻率大於 50,000Hz 之振幅趨於一致，無任何規律，且 70kHz 訊號並未出現，故研判均為雜訊。

本模型因出露段較短，造成之共振狀況較不嚴重，分析結果可顯示灌漿/未灌漿界面的深度(即 c 點)與灌漿/未灌漿界面深度(即 d 點)，同時亦可獲得埋設長度資料，表示暫態應力波反射波均能反映出淺層介質特性變化位置。

#### 第四章 土(岩)釘非破壞檢測方法驗證

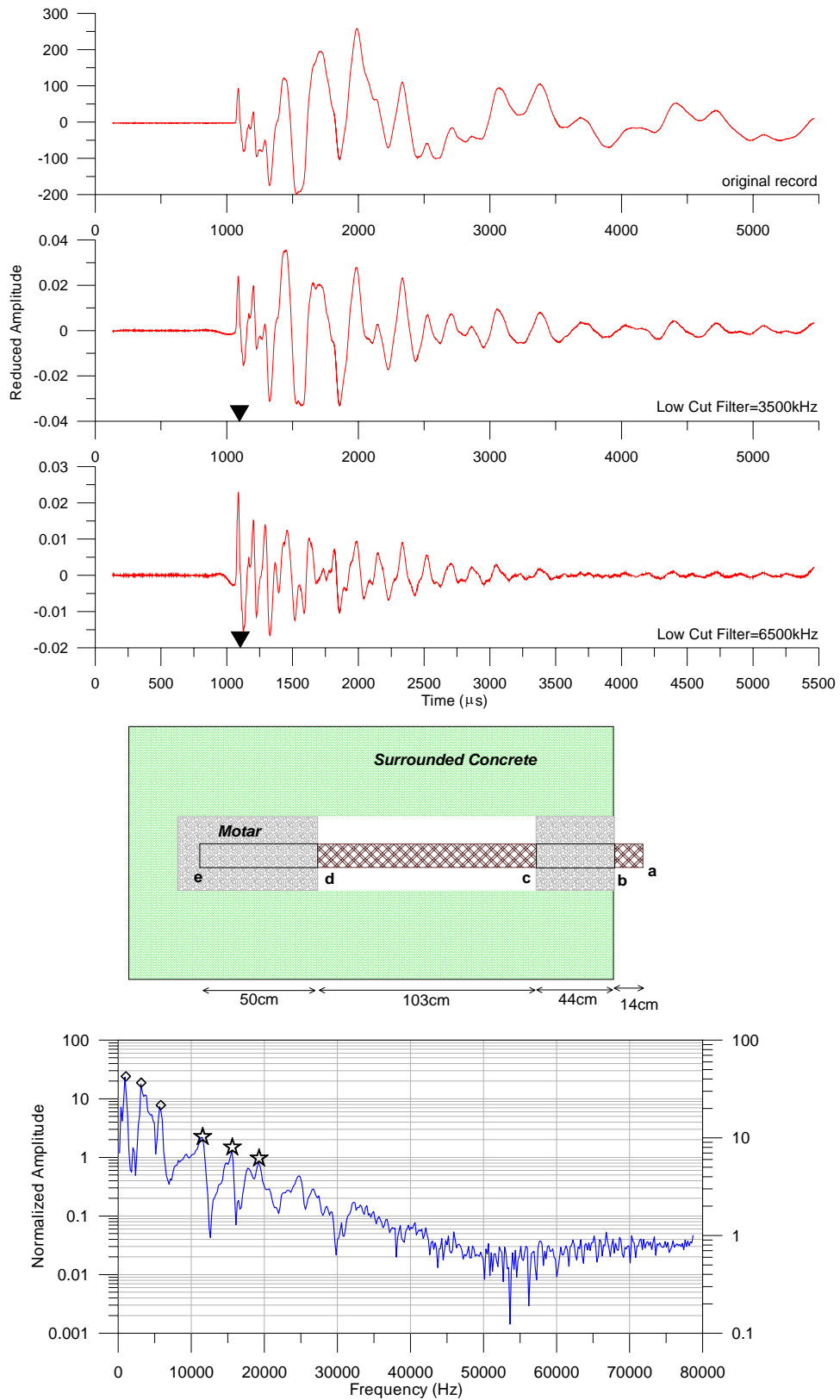


圖 4-15 E 號土(岩)釘物理模型檢測結果

(資料來源：本研究整理)

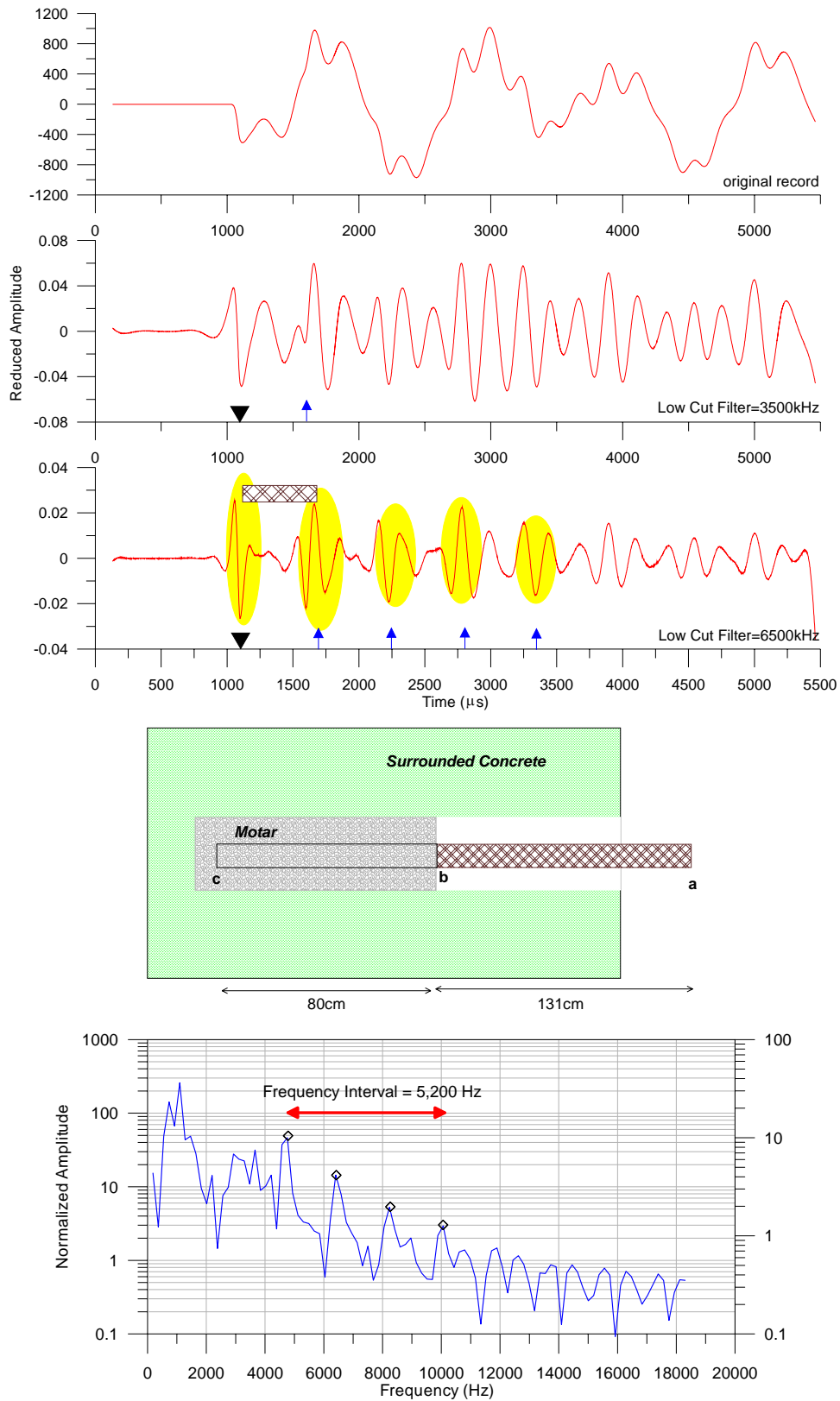
圖 4-16 為本期新製 F 號土(岩)釘物理模型試驗回波資料。高通濾波結果顯示：圖中標示實心三角形位置為暫態應力波直達波，係由敲擊點沿土釘鍵體截面直接傳遞至接收器，其波訊相當完整明顯。圖中箭頭位置為高頻暫態應力波反射時間位置，分別為第一次、第二次、第三次與第四次的反射，其時間間距相當一致，約為 574、583、545 與 554  $\mu\text{s}$ ，採一般鋼筋波速 5,180m/sec 進行估算，該反射距離長度約為 1.49m、1.51m、1.41m 與 1.43m。因本物理模型未灌漿段長度為 1.31m，故上述檢測結果應為未灌漿段長度，也就是圖 3-67 最下方模型幾何示意圖中 ab 長度。

濾波資料除上述高頻反射波外，並無其他較有意義的波訊。理論上 bc 長度的雙程走時約為 571  $\mu\text{s}$ ，應位於第一次反射後時距為 571  $\mu\text{s}$  位置，而該時間軸位置恰為第二次反射波時間，故與高頻暫態應力波疊加後形成單一波群，在歷時紀錄上無法分辨。

頻譜圖最顯著的特徵應為頻率約自 4,800Hz 至 10,000Hz 間，頻率間距約為 5,200Hz 間出現 4 處波峰，其波峰頻率間距約為 1,733Hz，其相對長度約為 1.49m，此外頻率位置並無其他任何特徵出現，此長度與未灌漿段長度相當，故頻譜圖上主要特徵頻率代表自由段的重覆反射波頻率。

上述分析結果顯示應用敲擊回音法於部分灌漿土(岩)釘時，頻率域資料之特徵振幅可用估算灌漿段與未灌漿段的長度，而試驗資料 A、B、D 與 F 均顯示出顯示應用敲擊回音法於部分灌漿土(岩)釘時，時間域反射訊號足以反映出灌漿段與未灌漿段長度。

## 第四章 土(岩)釘非破壞檢測方法驗證



**圖 4-16 F 號土(岩)釘模型檢測結果**

(資料來源：本研究整理)

#### 第四節 驗證資料結論

綜合上述物理模型試驗結果，大致可得初步結論如下：

1. 對於完全灌漿的土(岩)釘，檢測結果時域資料並無任何明顯且重複出現的暫態應力波，歷時紀錄上大多為接收器的共振訊號或是土(岩)釘鍵體地表出露段的重複反射訊號及共振訊號，並無法由歷時紀錄上獲得任何有用波訊。
2. 完全灌漿的土(岩)釘檢測結果頻率域資料亦顯示無任何特徵，前期研究結果證實局部低頻訊號可用以推估埋設長度，惟需採用較低波速方可獲得合理結果。大部分頻譜圖顯示的是兩處相當明顯的波峰，分別代表接收器共振頻率及出露段共振頻率。其他並無法由頻譜圖中獲得任何有用波訊。故一旦量測所得資料符合上述時域及頻率域兩項特徵，應可推估該土(岩)釘灌漿完全，土(岩)釘包覆狀況良好。
3. 對於局部灌漿的土(岩)釘，檢測資料可有效地反應漿體包覆情況，尤其可根據時域資料中反射波的時距，並選擇合理回波波速，估算未灌漿段長度及漿體包覆長度。一般而言，灌漿狀況較為簡易時，可獲得較準確的檢測結果，若漿體包覆狀況較為複雜時，則僅能獲得鄰近表面的包覆狀況。
4. 數值分析結果與試驗資料均顯示：暫探應力波在漿體包覆界面的反射波相位與鍵體底部的反射波相位相同，兩者與表面直達波相位有 180 度的差異。惟重覆反射之後，相位有兩次 180 度的轉換，結果與直達波相位一致。此點特性可用以輔助研判土

（岩）釘埋設長度，因未灌漿土（岩）之回波類似裸露鋼筋，其相位與直達波相位相同。故一旦在時域資料上出現重複之反射波，即可依其相位反轉推論該深度以下係觀漿包覆段。

5. 上述相位反轉現象應可採用基樁波阻沉方式說明：一般樁身波抗與材料特性（波速與密度）與截面積之乘積成正比，也就是在均勻材料下，一旦截面積增加，則波阻抗增加。反射係數係為上介質與下介質之波阻抗差，故下介質波阻抗增加表示反射係數小於零，代表的是相位的反轉。應用於土（岩）釘檢測時，圍束（漿體包圍）鍵體之波速應略為增加，在其他條件未改變下，波阻抗亦應些微增加，造成反射係數小於零，故相位亦為反轉。
6. 局部灌漿的土（岩）釘檢測結果頻率域資料大多僅顯示灌漿段介面，亦即代表自由鋼筋段長度之重複反射波訊，局部資料亦反應近地表段灌漿包覆長度，惟需採合理波速估算各段長度。惟地表出露段造成共振明顯，嚴重干擾深層反射訊號，試驗結果顯示較長的出露段影響較為顯著，故建議現地應用時應局部切除出露段，以減少共振效應。
7. 上述數值分析結果及試驗資料顯示：漿體包覆下的回波速度將明顯低於自由鋼筋波速，採漿體包覆段回波速度為4,200m/sec，可獲得較準確的檢測結果。

## 第五節 TDR 檢測方法評估

時域反射法 (TDR) 發展於 1950 年代，最初用於偵測傳輸纜線的斷裂或破損，其原理係應用纜線中電脈衝波的傳導，在介質物理性質不連續處發生反射返回原點，故計算其走時即可得知物性不連續位置。1970 年開始，大地工程界應用 TDR 作為土石坡面滑動量測方法，其裝設方法係在觀測位置鑽掘一裸孔或槽溝，置入同軸電纜 (Coaxial Cable) 後再灌漿。故可經由 TDR 量測得知同軸電纜因受外力擠壓造成變形的深度或位置，近年來亦被用為地下水位量測的方法。應用於土釘長度檢測時，需預埋一根與土釘設計長度相同的同軸電纜，再量測電脈衝在底部的回波，根據已知電脈衝速度即可求得土釘長度。

時域反射法 (TDR) 應用於土釘長度檢測時，需預埋一根與土釘設計長度相同的同軸電纜，再量測電脈衝在底部的回波，根據已知電脈衝速度即可求得土釘長度。圖 4-17 為前期土釘模型編號 I 預埋同軸電纜時域反射波形資料，土釘埋設長度為 4m，同軸電纜埋設長度為 4.38m。圖中在 0.5m 處，係為訊號線與示波器連接位置；第二處變化較為明顯位置位於 4m 處，其係訊號線與同軸電纜連接位置，其與第一處訊號間距恰為訊號線長度；第三處變化明顯位置約位於 8.59m 處，之後並無任何波形變化，代表該位置為同軸電纜斷路位置，其與第二處訊號間距應為同軸電纜長度，故本案例檢測長度約為 4.59m。



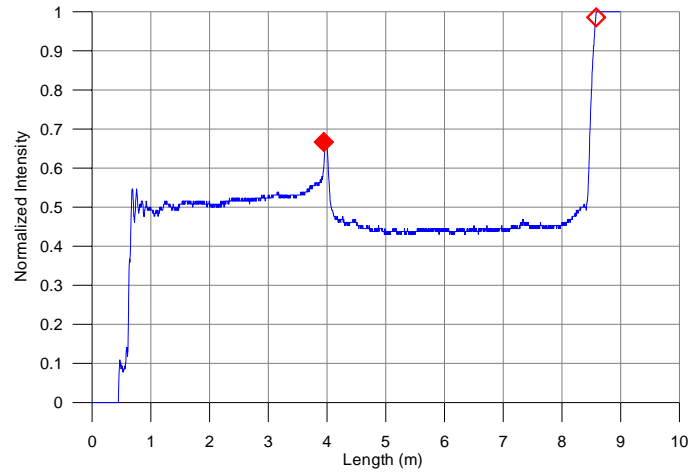


圖 4-17 前期土釘模型時域反射波形

（資料來源：本研究整理）

惟埋設同軸電纜進行檢測，此方法邏輯並不正確，惟因 TDR 法需於雙股線或同軸電纜上進行試驗，故應可模擬此情景進行試驗。香港最近的研究方法是在土（岩）釘附近埋設一條單股電線，並視土（岩）釘鍵體為另一股，將其組合視為雙股線進行 TDR 試驗，參見圖 4-18。

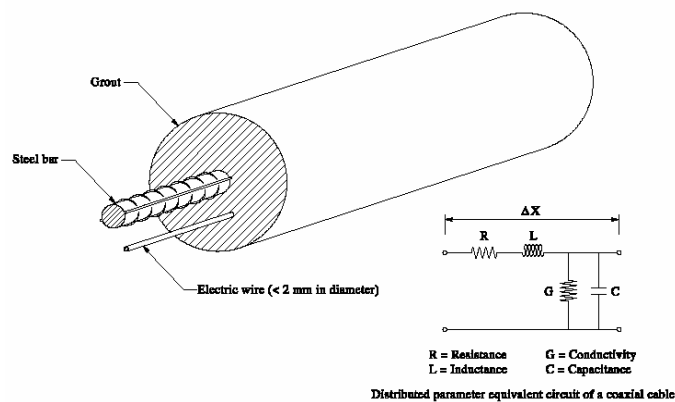


圖 4-18 TDR 現地佈置示意圖

（資料來源：摘錄自 W. M. Cheung, 2002）

本研究嘗試在鋼筋上直接進行 TDR 試驗，但將鋼筋以保鮮膜包覆作為絕緣層後，外面再包覆以一層銅箔紙，將其組合視為同軸線進行 TDR 試驗，參見照片 4-1。



照片 4-1 TDR 鋼筋試體

(資料來源：本研究整理)

圖 4-19 為香港 TDR 研究回波資料【Cheung, 2002】，該試驗埋設土釘長度與單股線長度均為 6m，試驗資料顯示：採用波長為 25ns、35ns、160ns 與 720ns 的回波均不相同，理論上短波長應具高解析度，但採 25ns 及 35ns 波長的試驗結果波形能量度較微弱，波形並無差異，反而採 160ns 波長的回波資料具有較明顯的回波，且其較明顯變化處恰為土釘長度。根據回波時間估算回波速度大約為  $7.7 \times 10^7 \text{m/sec}$ ，約為  $0.26c$  ( $c$  為光速)，前期研究資料顯示同軸電纜之波速約為  $0.82c$ 。

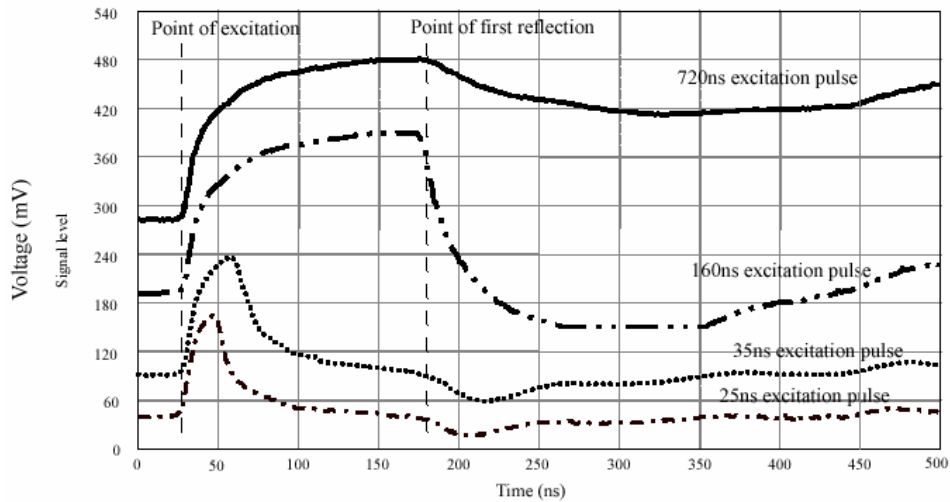


圖 4-19 TDR 試驗資料一

（資料來源：摘錄自 W. M. Cheung, 2002）

本研究 TDR 試驗係採國內自行研發之 TDR 檢測儀搭配示波器使用，參見照片 4-2。TDR 檢測儀內部係由電路發出一個方波，時間寬度約為 34ns，此方波經內部放大器增強電流，並由 BNC 送入待測物。回波由內部電路放大後，並與原始方波比對，以計算時間差，作為土釘檢測長度之估算。

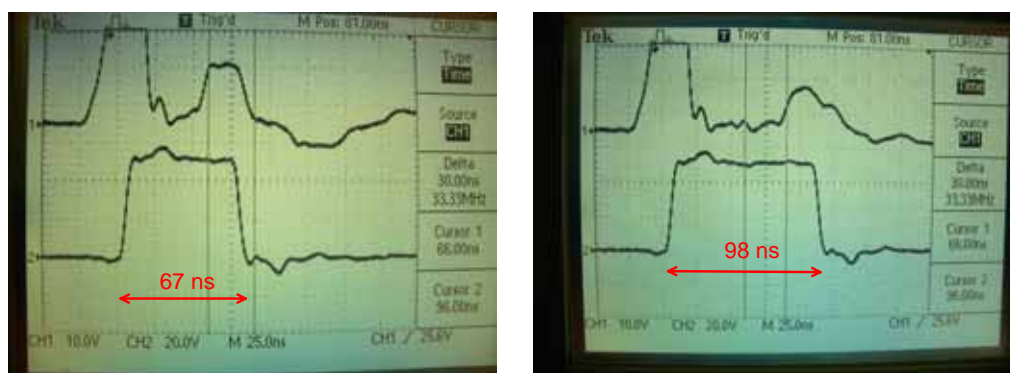
圖 4-20 為 TDR 驗證資料，左側為未接鋼筋試體的 TDR 回波資料，右側為 BNC 連接鋼筋試體的 TDR 回波資料。各圖中包含兩筆紀錄，上方為實際發射方波與回波紀錄，下方為內部電路時間差。未接鋼筋試體之電路時間差為 67ns，連接 BNC 與鋼筋試體之電路時間差為 98ns，顯見 1m 長的鋼筋試體雙程走時約為 31ns，反算其波速約為  $6.5 \times 10^7$  m/sec，約為 0.22c（c 為光速）。

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



照片 4-2 TDR 檢測設備

(資料來源：本研究整理)



(未接鋼筋試體)

(接 1m 鋼筋試體)

圖 4-20 TDR 試驗資料二

(資料來源：本研究整理)

以往 TDR 檢測方法需預埋一條與土釘等長度的同軸電纜，並進行同軸電纜長度量測。此方式僅了解電纜長度，無法得知真實土

釘埋設深度，一但施工人員埋設符合設計長度的電纜，而實際上偷工減料，原 TDR 檢測方式並無法發現此弊端。目前香港相關研究與本研究均沿用 TDR 電纜長度檢測方式，視土釘鍵體為電纜，故所得結果即為鍵體長度，此方式可完全杜絕既有方法的缺點，驗證結果顯示土釘底部的 TDR 回波明顯，回波走時用以估算土釘埋設長度之準確度極高。

上述新型試驗方法可直接量測土（岩）釘長度，而不是量測預埋同軸電纜長度，再間接推估埋設土（岩）釘長度，故可大幅改進既有檢測方式缺點。惟上述兩種方式仍需採埋設單股電線或預先將土（岩）釘鍵體加工處理，上述作業配合土（岩）釘施工進行，故可應用於新建工程，但對於老舊土（岩）釘檢測之實用性仍不高。因此本研究認為針對老舊土（岩）釘檢測，敲擊回音法之可行性較高。

## 第六節 微型樁檢測應用評估

微型樁 (Micropile 或 Minipile) 係為小口徑的鑽掘樁，主要用於老舊建物補強或托底工程使用，近年來被廣泛應用於土木工程，例如基礎開挖擋土設施、建物保護及邊坡穩定等。一般微型樁口徑約在 10~30 cm 左右，當鑽掘至預定深度時以壓力灌漿方式注入水泥(砂)漿，再將數支鋼筋置入穩固後將套管取出即可，故依其施工及構造而言，該工法類似一般混凝土基樁。

目前微型樁並無任何適用的非破壞檢測方法或商用檢測設備可供採用。但對於基樁而言，非破壞檢測方法相當多樣，且應用廣泛，故本節蒐集目前基樁常用非破壞檢測方法，並評估其應用在微型樁的適用性。

基樁檢測乃針對完工後的基樁進行品管及設計驗收的一種方法。基樁檢測分成兩類，即基樁質量檢測 (完整性檢測) 與基樁承载力檢測。基樁質量檢測目的在於檢驗完工之基樁是否達到設計要求，如長度之檢驗、外型之檢驗 (施工中造成縮頸或擴頸)、斷裂之檢驗 (施工中造成斷裂或材料弱面)、品質之檢驗 (混凝土之離析、空洞等)。基樁承载力檢測是在保證基樁質量完整的前提下，檢測實際承载力是否達到設計承载力要求。質量檢測的方式除了施工中加強監督及部分現地破壞試驗外，基樁完工後之非破壞性檢驗亦為重要手段。

目前國內較常採用之非破壞檢驗方法為埋管法與表面反射法。此法需事先在鋼筋籠內裝設數支 PVC 管，對於微型樁而言，

並不適合。表面反射法係樁頭以鐵鎚敲擊，在鄰近位置以探頭收錄反射資料，根據反射波形及發生時間位置，研判樁身之長度、斷裂、縮頸與擴頸等缺陷，參見圖 4-21。此方法無須任何前置作業，且施測快速，為其分析結果對於缺陷的嚴重程度無法提出定量資料，係以定性描述為主，且資料解讀需賴有經驗工程師。

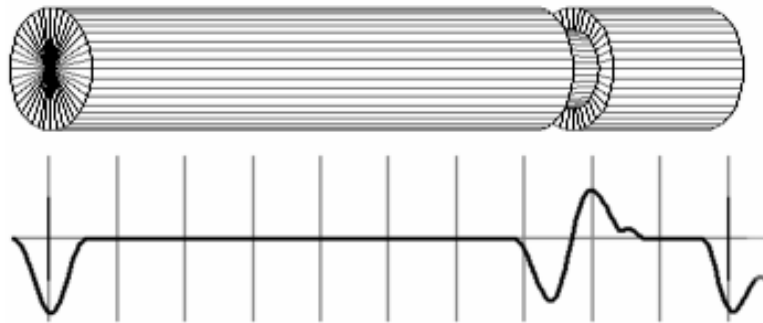


圖 4-21 表面反射法資料

（資料來源：摘錄自網站資料，<http://www.cse.polyu.edu.hk>）

根據現地檢測作業方式及儀器佈置方法，表面反射法又可細分為音波反射法（Sonic Echo；簡稱 SE）、脈波反應法（Impulse Reponse；簡稱 IR）、超震波法（Ultra-Seismic；簡稱 US）、阻抗縱剖分析法（Impedance Log；簡稱 IL）等。【財團法人中興工程顧問社研發報告，2001】

SE 法又稱應力波法（Stress Wave）或應力波回應法（Pulse Echo），該法原理及試驗方法與敲擊回音法（Impact Echo）相同，

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

因操作方式簡易，在樁頭敲擊後即可獲得檢測資料，故在中國大陸及歐美地區最常被應用，且儀器設備亦已發展成熟，近年來國內工程界多採此方式進行基樁檢測。此法操作簡易及儀器容易取得，故應適用於微型樁檢測，可應用於樁長及內部缺陷調查。惟一般基樁探查均針對單樁進行檢測，樁身周圍為土壤介質，其物理特性與樁身混凝土有明顯差異，樁身介面形成一良好阻絕層，應力波多集中於樁身內傳遞而能量穿透溢失較少，故回波狀況良好，而微型樁可能彼此緊密相連形成群樁，應用時需先行了解工址實際狀況。



照片 4-3 音波反射法試驗過程

(資料來源：摘錄自網站資料，<http://www.cse.polyu.edu.hk>)



IR 法係由法國國家營造工業研究中心（CEBTR）於 1960 年代末期發展完成。該法施作方式與敲擊回音法類似，惟資料處理過程係於頻率域內進行特徵頻率間距之挑選，進而估算埋設長度及內部缺陷深度，參見圖 4-22。此法發展歷史較久遠，目前發展已趨完備，因此被列入美國標準試驗規範 ASTM-D5882。本法最大的適用限制為基樁長度需為樁徑的二十至三十倍間，微型樁的幾何尺寸亦位於此範圍內，故此法亦適用於微型樁檢測。

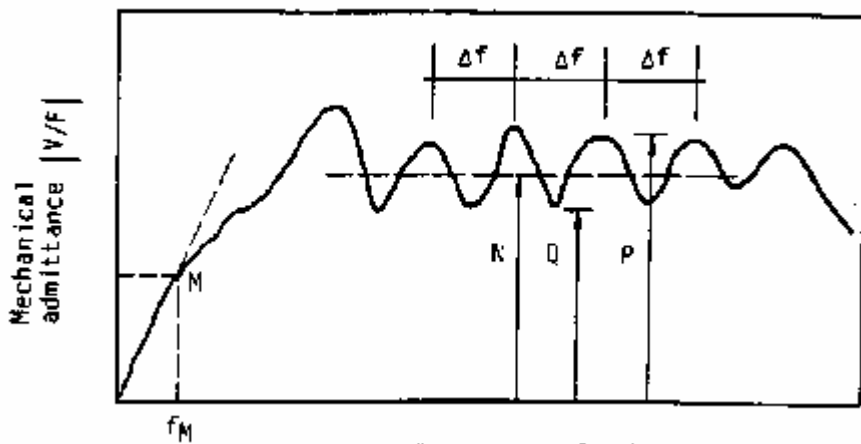


圖 4-22 脈波反應法資料

（資料來源：摘錄自網站資料，<http://www.cse.polyu.edu.hk>）

US 法及 IL 法均為近年來發展的檢測方法，係為解決傳統方法的缺點，惟因現地操作方式繁複，資料處理方式複雜，且目前實務應用案例較少，目前仍無法評估方法限制條件及適用範圍。

另直接傳輸法包含三種應用方法，分別為平行震測法（Parallel Seismic；簡稱 PS）、跨孔音波檢層法（Cross-Hole Seismic Logging；

簡稱 CSL) 與跨孔斷層掃描法 (Cross-Hole Tomography; 簡稱 CHT)。

平行震測法須於基樁鄰近位置鑽掘一裸孔，孔身需大於基樁長度，然後在孔內裝設一系列等間距排列的接收器，並在樁頭上進行敲擊，循序收錄各深度接收器訊號，根據各直達波走時推估樁長、混凝土品質與樁身完整性。由於本法檢測費用相當高，故一般檢測作業較少採用。

跨孔音波檢層法係國內最常使用的檢測方法，惟需預先在基樁鋼筋籠製作時預埋數支 PVC 管，並使 PVC 管保持中空。當基樁完工後，在其中一支 PVC 管中填滿水，再放置超音波發射源於孔底，在另一支 PVC 管中等深度位置放置超音波接收器，檢測時依序提高發射器與接收器深度並量測超音波資料，檢測資料可用以求得混凝土超音波波速，並用以研判混凝土品質。此法最大缺點在於僅能得到 PVC 管間的混凝土施工品質，無法了解基樁完整性及埋設樁長，且 PVC 管埋設容易因基樁施工造成管身破裂或連接處開裂，導致混凝土滲入，無法進行檢測。北部某快速道路橋樑基樁工程即發生數起此類型事件，導致檢測作業無法順利進行，最後折採表面法設法進行檢測。為改善此缺陷，國外目前多採用預埋金屬管方法，雖材料費用較高，但可大幅提昇檢測可靠度。

跨孔斷層掃描法與跨孔音波檢層法類似，差別在於具有多點接收的功能，故能進行斷層掃描分析。因微型樁尺寸較短且口徑較小，並不適合在樁身內裝設 PVC 管，且鑽孔檢測費用較高，故直接傳輸法較不適用於微型樁檢測。表 4-3 為檢測方法簡要說明表。

表 4-3 微型樁適用檢測方法說明表

方法名稱	檢測目的	方法簡述	特點	微型樁適用性
音波反射法 (SE)	1. 樁長 2. 樁身完整性	於樁頭產生應力波，並分析回波資料，研判反射波深度。	1. 不需前置作業 2. 方法簡便/檢測快速 3. 應用案例較多	較適用
脈波反應法 (IR)	1. 樁長 2. 樁身完整性	於樁頭產生應力波，並於頻率域分析回波資料，研判反射波深度。	1. 不需前置作業 2. 方法簡便/檢測快速 3. 應用案例較多	較適用
超震波法 (US)	1. 樁長 2. 樁身完整性	於樁頭產生應力波，並於樁身側面接收回波，分析直達與反射波時間。	1. 不需前置作業 2. 方法簡便/現地檢測時間較長 3. 應用案例較少	不適用
阻抗縱剖分析法 (IL)	1. 樁長 2. 樁身完整性	採 IR 法配合數值分析進行，可推估樁身截面積變化。	1. 不需前置作業 2. 檢測理論較繁複/現地檢測時間較長 3. 應用案例較少	不適用
平行震測法 (PS)	1. 樁長 2. 樁身混凝土品質 3. 樁身完整性	於樁頭產生應力波，並於裸孔內接收回波，分析直達與反射波時間。	1. 需鑽孔埋設接收器 2. 現地檢測時間較長 3. 應用案例較少/	不適用
跨孔音波檢層 (CSL) 法	1. 樁身混凝土品質	於於埋的兩裸孔內進行超音波試驗，分析直達波異常時間發生深度。	1. 需預埋多支 PVC 管 2. 應用案例較多 3. 無法得知完整性	不適用
跨孔斷層掃描法 (CHT)	2. 樁身混凝土品質	於於埋的兩裸孔內進行超音波試驗，藉由煩數的資料處理，了解內度波速異常分布。	1. 需預埋多支 PVC 管 2. 應用案例較少/準確度高 3. 無法得知完整性	不適用

(資料來源：本研究整理)

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

## 第五章 現地試驗工作

現地試驗工作係採透地雷達法及敲擊回音法應用於既有擋土牆檢測，用以了解方法適用性與限制條件。試驗工址共有三處，以下詳述各處工址試驗工作及結果。

### 第一節 擋土牆案例一試驗結果

本案例工址係位於北縣深坑某山坡地社區，該社區興建於 87 年間，目前住戶約五百戶，目前委由專責人員管理，惟管委會僅留存建築圖，並無保存任何大地工程相關圖說及資料。本社區擋土牆數量相當多，本案例蒐集工作僅對其中四處擋土牆進行了解及透地雷達檢測，擋土牆分別編號為 A 至 D，擋土牆外觀參見照片 5-1 至照片 5-7。



照片 5-1 現地應用案例一社區外觀

(資料來源：本研究整理)



照片 5-2 案例一 A 擋土牆外觀

(資料來源：本研究整理)



照片 5-3 案例一 A 擋土牆局部裂縫

(資料來源：本研究整理)



照片 5-4 案例一 B 擋土牆外觀

(資料來源：本研究整理)



照片 5-5 案例一 C 擋土牆外觀

(資料來源：本研究整理)





照片 5-6 案例一透地雷達探查

(資料來源：本研究整理)



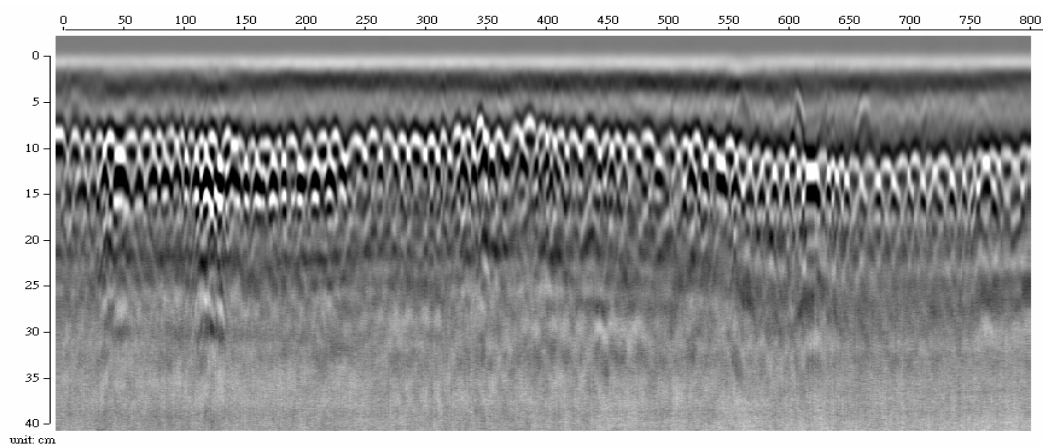
照片 5-7 案例一 D 擋土牆外觀

(資料來源：本研究整理)

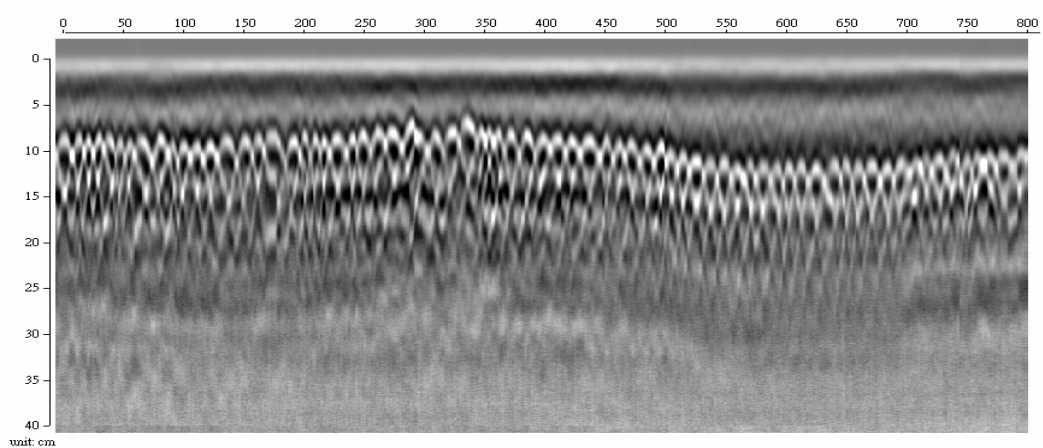


A 擋土牆高約 10m，牆厚約 50cm。此處透地雷達測線長度共三條，分別命名為測線-a、測線-b 與測線-c，每條測線長度約 8m，各測線平行地面而高程不同。圖 5-1 為透地雷達剖面，橫軸為距離，單位為 cm，縱軸為深度，單位為 cm。測線-a 鋼筋保護層厚度約自 5cm 至 10cm。測線長度內共有 72 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 11cm。測線-b 鋼筋保護層厚度約自 6cm 至 12cm，略深於上述測線資料。測線長度內共有 68 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 12cm。測線-c 鋼筋保護層厚度約自 7cm 至 13cm，又略深於上述測線資料。測線長度內共有 73 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 11cm。各測線鋼筋重複反射與干涉現象等一致性訊號相當明顯，其餘並無其他異常訊號。

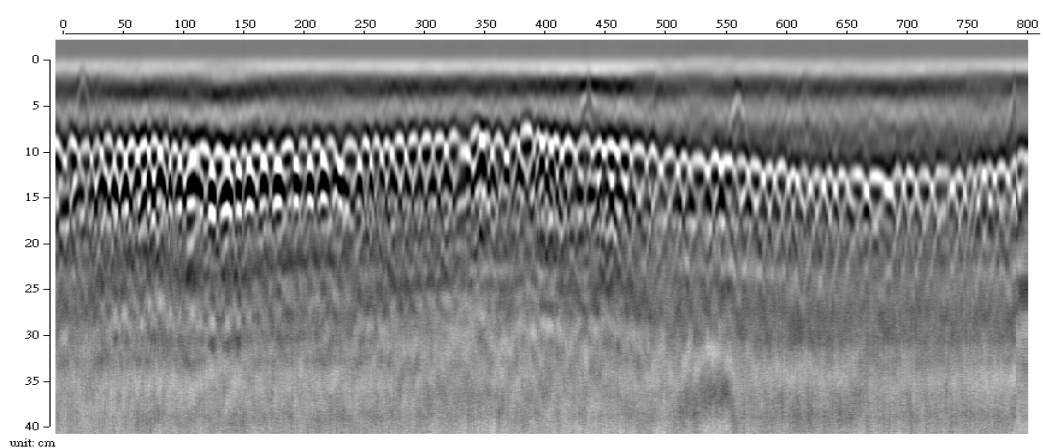
## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



測線-a



測線-b



測線-c

圖 5-1 案例一 A 擋土牆透地雷達試驗資料

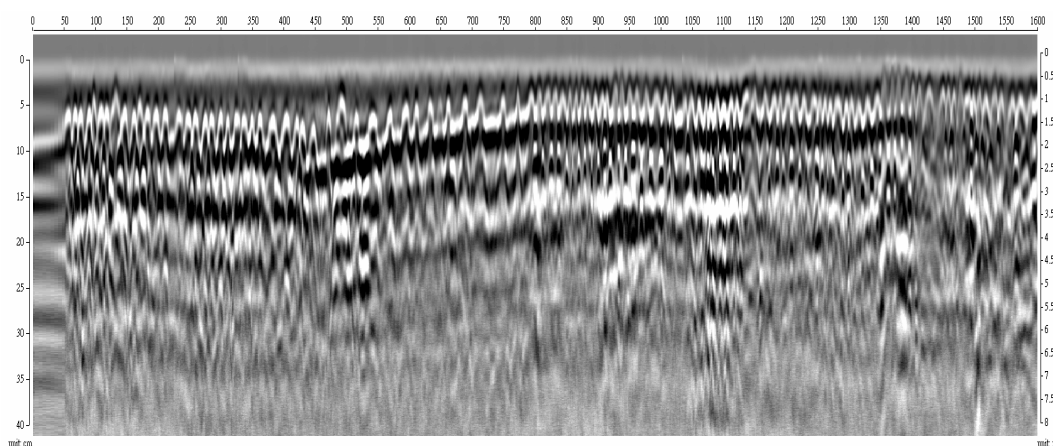
(資料來源：本研究整理)

B 擋土牆緊鄰社區住宅，牆高約 4m，牆厚約 50cm。此處透地雷達測線長度共三條，分別命名為測線-a、測線-b 與測線-c，每條測線長度約 16m，各測線平行地面而高程不同。圖 5-2 為透地雷達剖面，橫軸為距離，單位為 cm，縱軸為深度，單位為 cm。測線-a 鋼筋保護層厚度相當小，最大者亦不超過 2.5cm，且許多處鋼筋繞射訊號頂點與透地雷達零點訊號位置相當，尤其在測線距離 13.5m 至 14.5m 間，該處位置鋼筋保護層厚度接近 0。實際上目視檢測結果，該處確時有幾根鋼筋已經出露且有腐蝕現象。測線長度內共有 106 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 15cm。

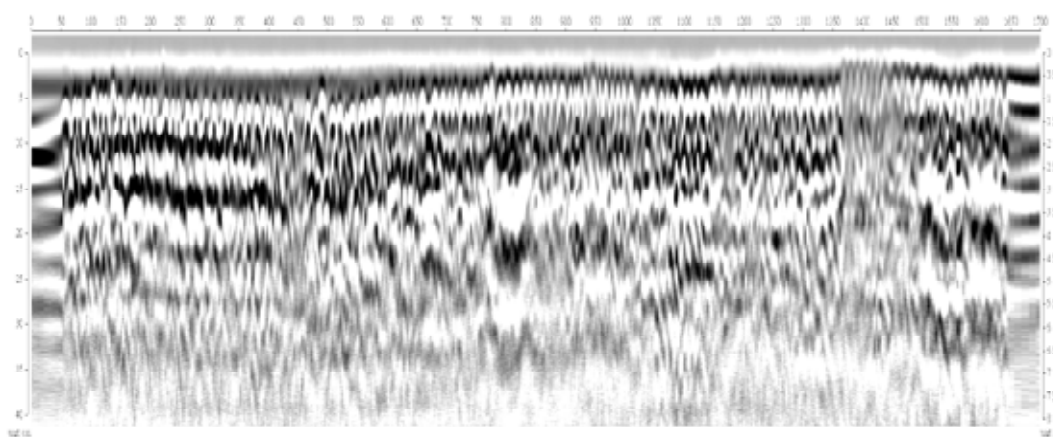
測線-b 的鋼筋保護層厚度狀況與上述結果相似，檢測厚度相當小，在測線距離 13.5m 至 14.5m 間，檢測厚度亦接近 0。測線長度內共有 124 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 13.3cm。測線-c 的檢測結果與測線-b 類似。

另測線-a 的鋼筋訊號重複反射與干涉現象十分明顯，在表層鋼筋繞射訊號之下，呈現出等深度間距且一致性的水平向訊號，此訊號大致上在深度 20cm 時仍相當清楚。測線-b 的重複反射與干涉現象等一致性訊號僅在測線距離 4.5m 內較為明顯，其餘位置則呈現雜亂繞射波，出現的深度並無規律，約為 6 至 13cm，惟水平間距似乎仍與第一層鋼筋間距相同，故推估應為內部第二層鋼筋造成。測線-c 幾乎均無重複反射與干涉現象等一致性訊號，雜亂繞射波出現深度約為 10 至 16cm，較大於測線-b 結果，惟水平間距似乎仍與第一層鋼筋間距相同，故推估應為內部第二層鋼筋造成。

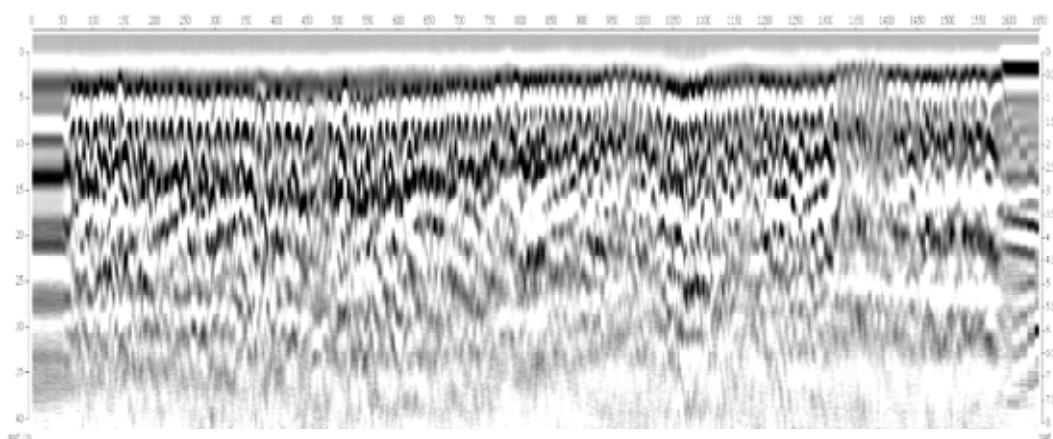
## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



測線-a



測線-b



測線-c

圖 5-2 案例一 B 擋土牆透地雷達試驗資料

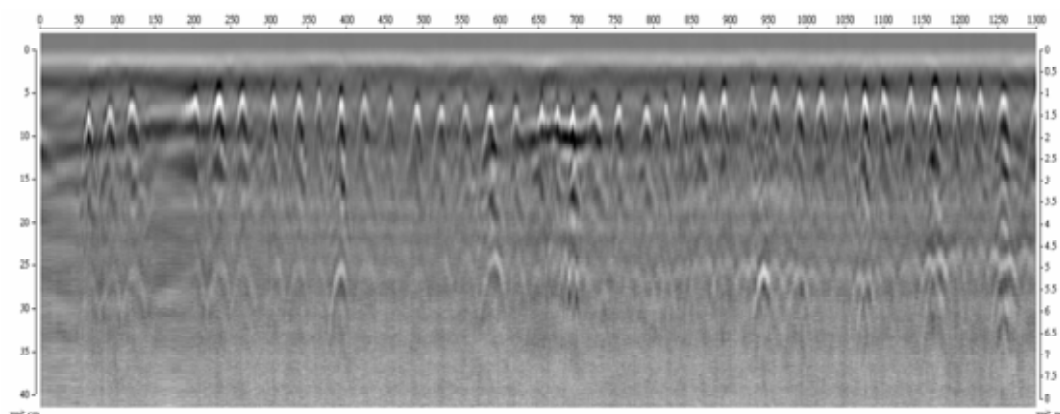
(資料來源：本研究整理)

C 擋土牆位於社區游泳池旁，牆高約 3m，牆厚約 30cm。此處透地雷達測線長度共三條，分別命名為測線-a、測線-b 與測線-c，每條測線長度約 13m，各測線平行地面而高程不同。圖 5-3 為透地雷達剖面。測線-a 圖中類似雙曲線之繞射訊號，係為擋土牆內垂直地表方向表層主筋造成，該保護層厚度約自 2.5cm 至 5cm，且多處鋼筋繞射訊號頂點與透地雷達零點訊號位置相當接近，尤其在測線距離 8.5m 至 13m 間，該處位置鋼筋保護層厚度均小於 2cm。惟目視檢測結果，該處混凝土表面仍相當完整，並無任何鋼筋出露現象。測線長度內共有 42 處鋼筋繞射訊號，推估鋼筋平均間距約為 31cm。至於在測線距離 650cm 處出現的水平反射訊號，其深度約為 9cm，洽位於表層垂直主筋下方，應為橫向箍筋造成。

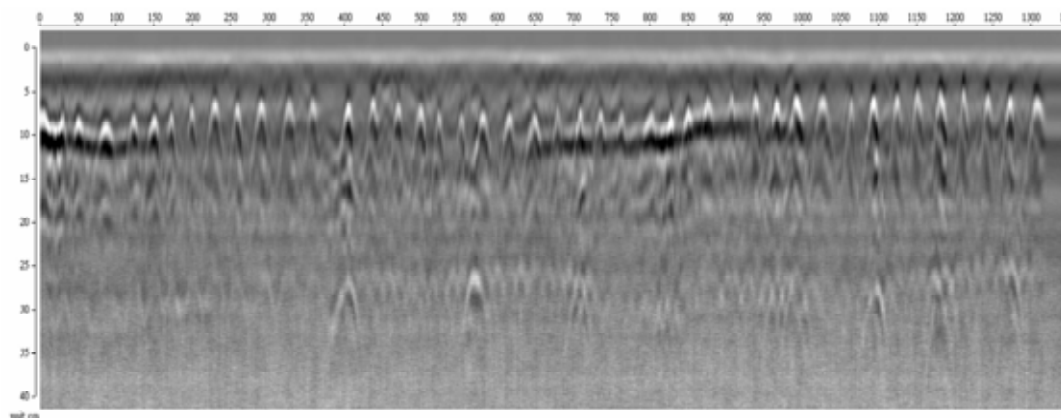
測線-b 的鋼筋保護層厚度狀況與上述結果相似，檢測厚度約自 2.5cm 至 7cm，局部鋼筋保護層厚度均小於 2cm。測線長度內共有 43 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 30cm。測線-c 的檢測結果與測線-b 類似。

另測線-a 的鋼筋訊號重複反訊號明顯，而干涉現象相當微弱，此係因鋼筋相隔較遠，鄰近鋼筋對於雷達波的干擾較小。另在表層鋼筋繞射訊號之下，約在深度 25cm 處出現局部明顯繞射訊號，應為內部第二層鋼筋造成，惟部分繞射訊號較弱，無法判定個別鋼筋位置及推估第二層鋼筋間距，至於擋土牆厚度的反射訊號（約在深度 30cm 處）並未出現，推估擋土牆背填完整且無積水現象。測線-c 資料與測線-b 結果大致相同。

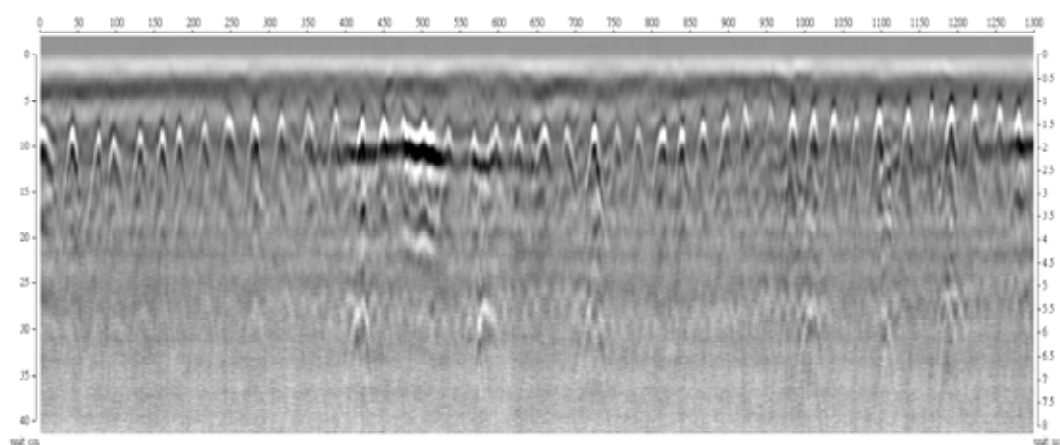
## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



測線-a



測線-b



測線-c

圖 5-3 案例一 C 擋土牆透地雷達試驗資料

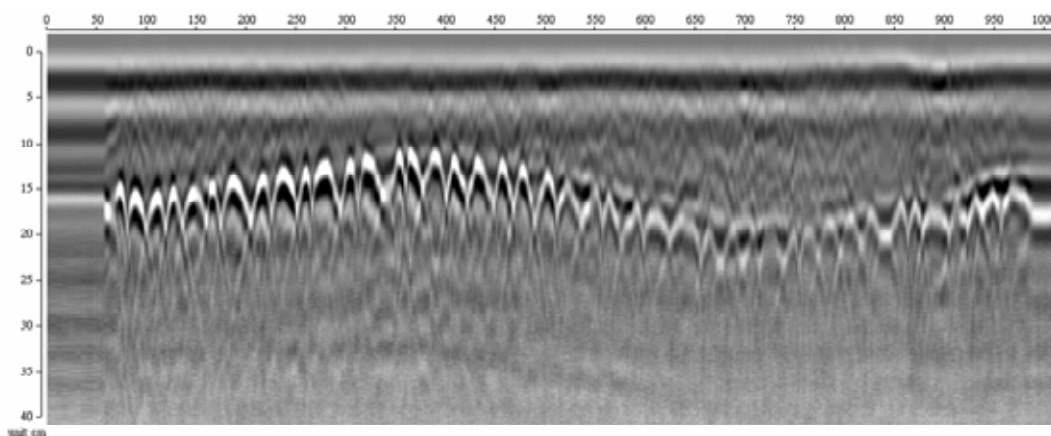
(資料來源：本研究整理)

D 處擋土牆位於社區下方，牆高約 3m，牆厚約 30cm。此處透地雷達測線長度共三條，分別命名為測線-a、測線-b 與測線-c，每條測線長度約 10m，各測線平行地面而高程不同。圖 5-4 為透地雷達剖面，橫軸為距離，單位為 cm，縱軸為深度，單位為 cm。測線-a 圖中類似雙曲線之繞射訊號，係為擋土牆內垂直方向第一層主筋造成，其雙曲線頂點與表面水平反射訊號之間距代表鋼筋保護層厚度，經人為挑選計算後，該厚度約自 10cm 至 18cm。測線長度內共有 43 處鋼筋繞射訊號，推估鋼筋平均間距約為 23cm。

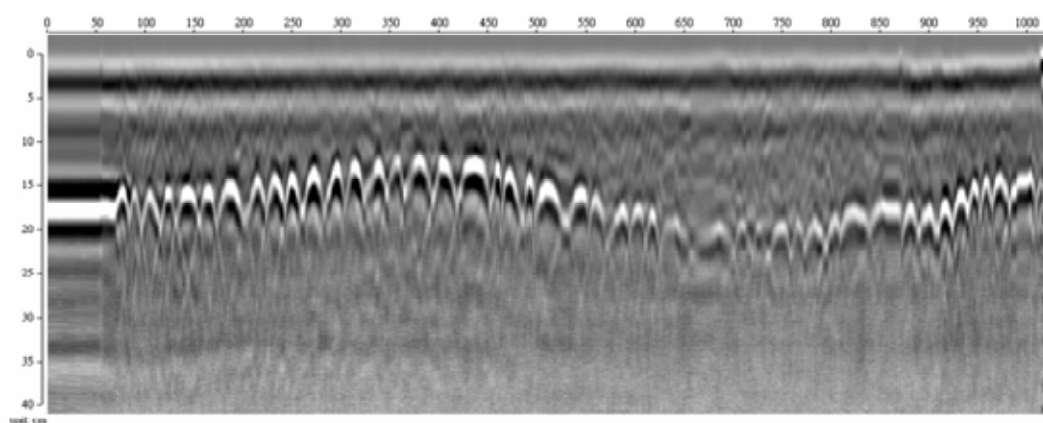
測線-b 的鋼筋保護層厚度狀況與上述結果相似，檢測厚度約自 11cm 至 20cm。測線長度內共有 45 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 22cm。測線-c 的檢測結果與測線-b 類似。

本擋土牆厚度為 30cm，檢測結果顯示鋼筋位於深度 15cm 附近，亦即位於擋土牆中央，其餘並無任何鋼筋射訊號，推估擋土牆內部僅含單層鋼筋。

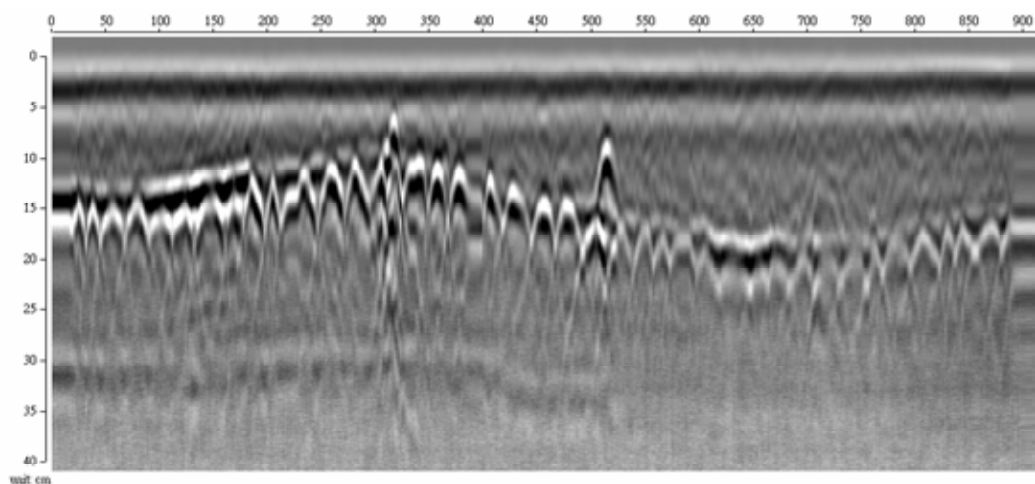
## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



測線-a



測線-b



測線-c

圖 5-4 案例一 D 處擋土牆透地雷達試驗資料

(資料來源：本研究整理)



## 第二節 案例二試驗結果

第二處試驗工址係位於北部某輸水隧道建造計畫邊坡工程，目前已完工。該邊坡擋土牆長約 100m，高約 4m，採懸臂式鋼筋混凝土牆設計形式，施工方法採分塊澆置，每塊混凝土牆寬度約 6m，分塊接縫位置以 PVC 止水帶及保力龍板等材料填塞，混凝土設計強度為  $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 。圖 5-5 為邊坡擋土牆標準斷面圖，牆高 (H) 為 4m，牆厚 (S) 約自 60cm (底端) 至 30cm (頂端)，該牆填方側設計 30cm 厚的礫石透水層，並裝設直徑 10cm 排水管穿透擋土牆，排水管縱橫間距為 150cm。斷面圖顯示擋土牆底部位置附近 (標示為 L3)，除正面表層鋼筋外，鄰近背面共有三層鋼筋，表層鋼筋保護層厚約 8cm，鋼筋間距為 30cm。

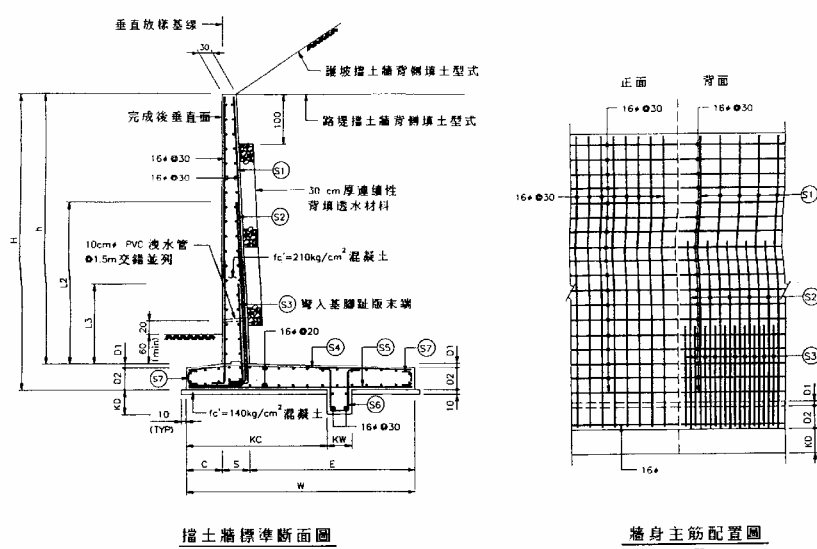


圖 5-5 案例二擋土牆標準設計圖

(資料來源：中興工程顧問公司提供)

本案例擋土牆表面有石灰質裝飾材料，外觀參見照片 5-8，表面具縱橫交錯溝槽且平坦度極差。透地雷達測線共三條，測線平行地面，相隔約 50cm，分別為測線-a、測線-b 與測線-c，每條測線長度為 20m，檢測位置擋土牆厚度經實際量測約為 30cm。



照片 5-8 案例二透地雷達試驗過程

(資料來源：本研究整理)

圖 5-6 為透地雷達剖面，橫軸為距離，單位為 cm，左側縱軸為深度，單位為 cm，右側縱軸為時間，單位為 ns。透地雷達時間參數僅設定為 6ns，預期探查深度小於 30cm。測線-a 圖中較上方的近似水平反射訊號係來自擋土牆表面，惟其中似乎包含許多不規則的繞射訊號，經局部放大後清楚地顯示：該繞射訊號頂點所在時間軸位置，均與擋土牆水平反射訊號時間軸位置一致，顯示應為擋土

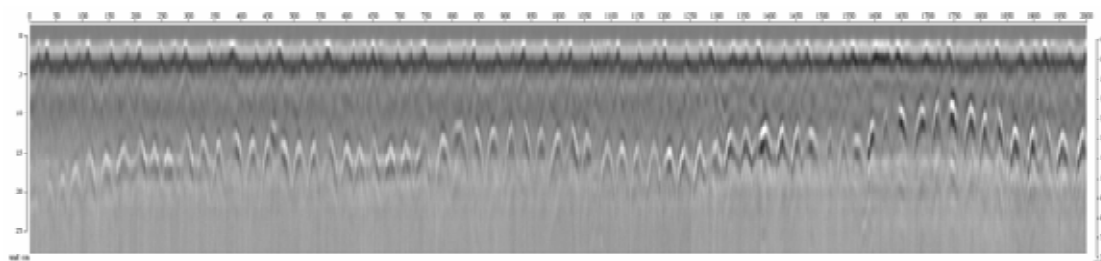
牆表面不規則裝飾面板造成，因面板表面空洞及凹陷處並無任何規律，故造成局部微弱繞射波。圖中在深度約 8 至 20cm 處出現近似等間距的鋼筋繞射波，平均間距約 29.8cm。檢測結果符合上述設計資料，惟鋼筋保護層分布較不平均且較大。

測線-b 的鋼筋保護層厚度狀況與上述結果相似，檢測厚度約自 8cm 至 20cm。測線長度內共有 65 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 30.8cm。測線-c 的檢測結果與測線-b 類似。

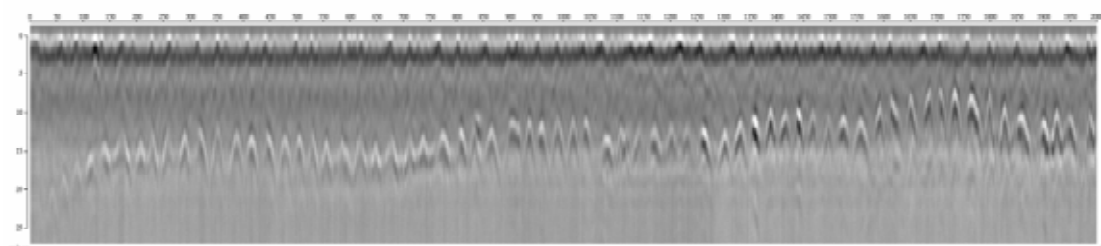
本檢測位置擋土牆厚度為 30cm，且牆身內應含雙層筋，惟上述檢測結果並未發現第二層鋼筋。

圖 5-7 為時間參數僅設定為 12ns 之透地雷達剖面，圖中僅顯示第一層鋼筋明顯繞射波，並無第二層鋼筋及擋土牆底部反射訊號，推估其原因可能為表面裝飾版的散射效應造成入射波能量減少，故深層訊號反射能量相當微弱，無法偵測有效的訊號。

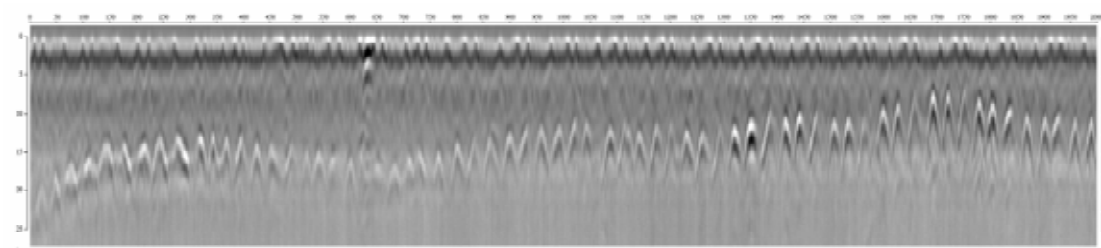
## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



測線-a



測線-b



測線-c

圖 5-6 案例二透地雷達試驗資料一

(資料來源：本研究整理)

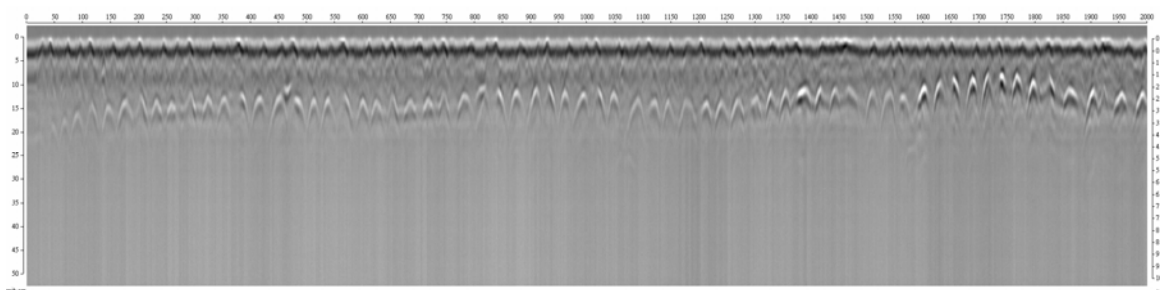


圖 5-7 案例二透地雷達試驗資料二

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 案例三試驗結果

第三處試驗工址係位於北部某快速道路建造計畫邊坡工程，目前仍處於施工階段，參見照片 5-9。該邊坡擋土牆長約 150m，高約 12m，採懸臂式鋼筋混凝土牆設計型式，施工方法採分塊澆置，每塊混凝土牆寬度約 9m，分塊接縫位置以 PVC 止水帶及保力龍板等材料填塞，混凝土設計強度為  $245\text{kg}/\text{cm}^2$ 。



照片 5-9 案例三擋土牆外觀

(資料來源：本研究整理)

圖 5-8 為邊坡擋土牆標準斷面圖，牆高 (H) 為 12m，牆厚 (S) 約自 140cm (底端) 至 30cm (頂端)，該牆填方側設計 30cm 厚

的礫石透水層，並裝設直徑 10cm 排水管穿透擋土牆，排水管縱橫間距為 150cm。斷面圖顯示擋土牆底部位置附近（標示為 L3），鄰近背面共有三層鋼筋。但現地檢視發現：擋土牆鄰近背面僅有一層鋼筋，係因施工單位將三層鋼筋排列至相同深度位置，其保護層厚約 8cm，鋼筋縱橫間距均為 30cm，背面鋼筋縱向間距分別為 10、20 及 40cm，橫向間距為 30cm。

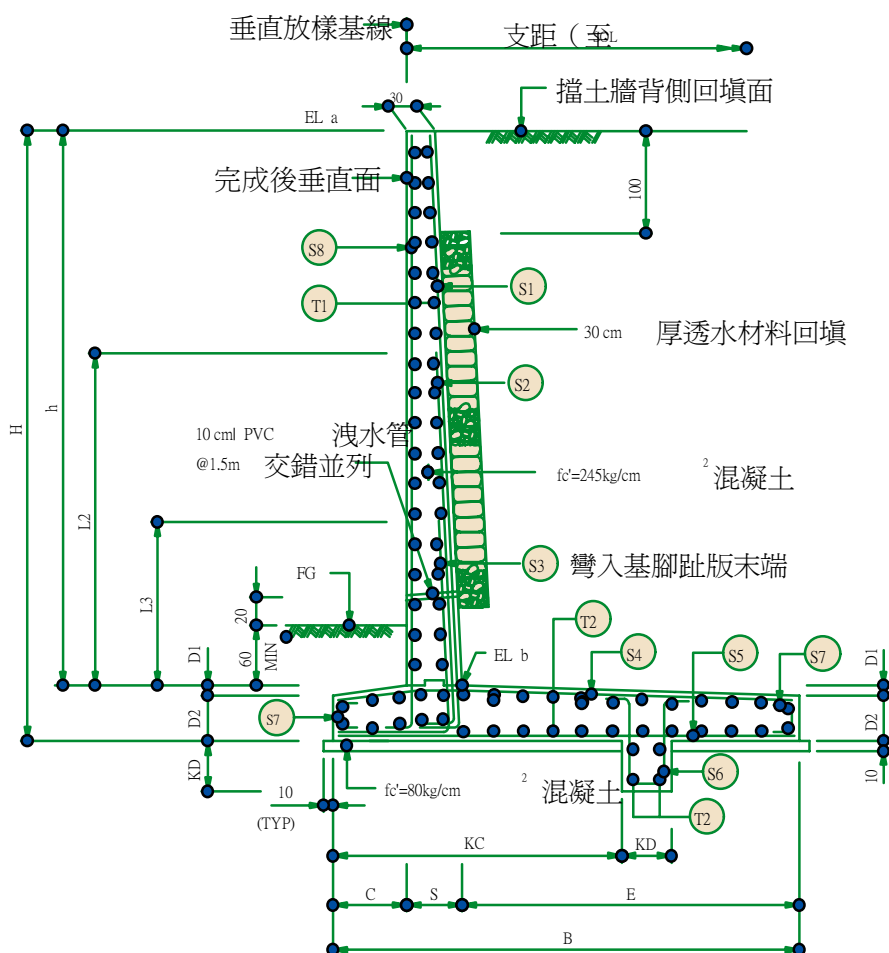


圖 5-8 案例三擋土牆標準設計圖

(資料來源：中興工程顧問公司提供)

本案例透地雷達測線共三條，測線平行地面，相隔約 50cm，分別為測線-a、測線-b 與測線-c，每條測線長度為 13m，照片 5-10 為透地雷達試驗過程。該位置擋土牆厚度經實際量測約為 60cm，而檢測位置鋼筋設計間距為 20cm，保護層厚度為 8cm。



照片 5-10 案例三透地雷達試驗過程

(資料來源：本研究整理)

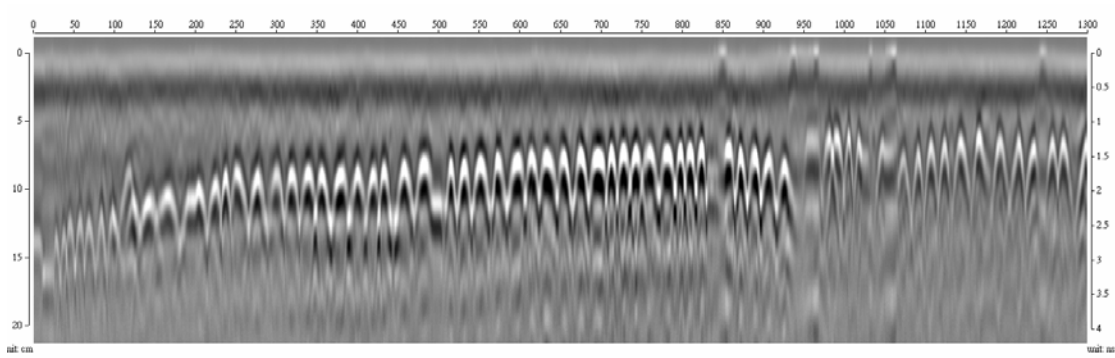
圖 5-9 為透地雷達剖面，橫軸為距離，單位為 cm，左側縱軸為深度，單位為 cm，右側縱軸為時間，單位為 ns。測線-a 與測線-b 透地雷達時間參數均設定為 6ns，預期探查深度小於 30cm。測線-a 圖中較上方的近似水平反射訊號係來自擋土牆表面，因牆面相當平緩，故無上述案例資料中不規則的繞射波訊號。圖中在深度約 6 至 11cm 處出現近似等間距的鋼筋繞射波，平均間距約 19.4cm。檢

測結果符合上述設計資料，惟鋼筋保護層分布較不平均且局部小於設計需求。

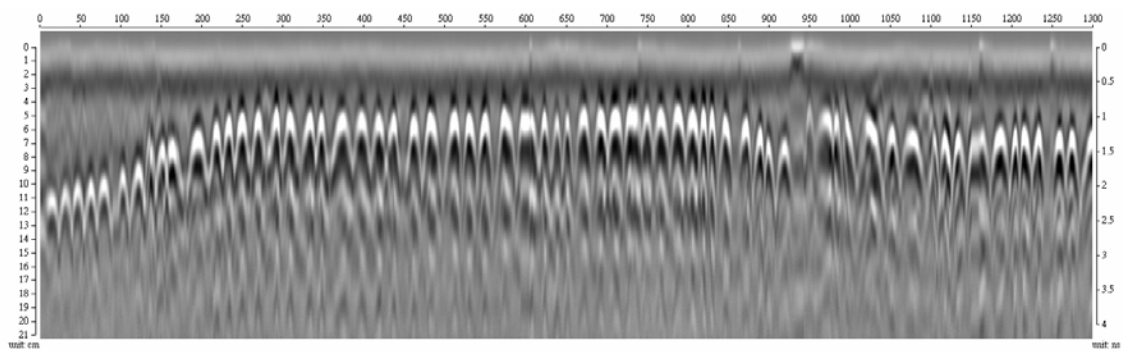
測線-b 的鋼筋保護層厚度狀況有較小的趨勢，檢測厚度約自 4cm 至 10cm。測線長度內共有 65 處鋼筋繞射訊號，推估平均鋼筋間距約為 20cm。

測線-c 為時間參數僅設定為 12ns 之透地雷達剖面，圖中僅顯示第一層鋼筋明顯繞射波，並無第二層鋼筋及擋土牆底部反射訊號，推估其原因可能為淺測鋼筋排列較為緊密，造成鋼筋反射波明顯而入射波能量減少，故深層訊號反射能量相當微弱，無法偵測有效的訊號。

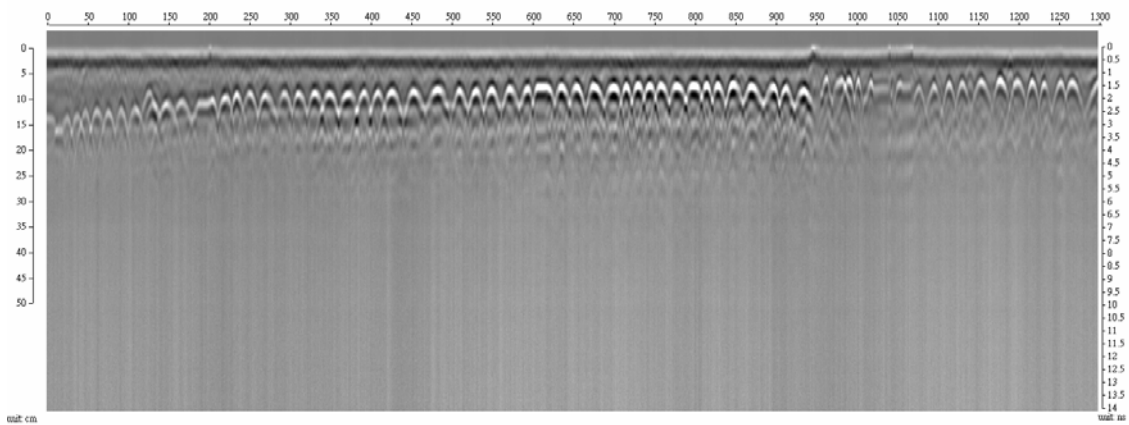




測線-a



測線-b



測線-c

圖 5-9 案例三透地雷達試驗資料

(資料來源：本研究整理)

#### 第四節 土(岩)釘案例試驗結果

本節係說明敲擊回音法應用於現地工址岩釘長度檢測應用結果。試驗工址共有兩處，均為水力發電工程道路邊坡，分別位於台灣中部及東部。現地試驗工作共完成 12 處岩釘長度檢測工作（編號為 A 至 L），其中岩釘設計長度為 3 至 6m。以下詳述各試驗資料及檢測結果。

案例 A 為設計長度 5m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 5.15m。圖 5-10 為回波檢測記錄，自上至下分別為原始紀錄、3,500Hz 低頻濾波及 6,500Hz 低頻濾波結果。原始資料圖中清楚顯示三處波谷位置，且其波相及時間間距均為一致，顯示岩釘內部均未灌漿，而兩種濾波結果更加強資料的可信度，亦使得反射波相未更為明確。

圖中第一個波谷為直達波，以實心三角形標示，時間位置為 963  $\mu\text{s}$ ，第二個波谷為底部反射波，以箭頭標示，時間位置為 2,938  $\mu\text{s}$ ，第三個波谷為底部第一次重複反射波，亦以箭頭標示，時間位置為 4,875  $\mu\text{s}$ 。波谷時間間距分別為 1,975 與 1,937  $\mu\text{s}$ ，因其反射波波形與入射的暫態應力波形相當類似，代表其傳遞路靜造成的衰與高頻波耗散較不顯著，波傳特性與裸露鋼筋相似，故採波速為 5,185m/sec 進行計算，檢測長度分別為 5.12 與 5.02m，與施工長度之平均檢測誤差約為 3%。

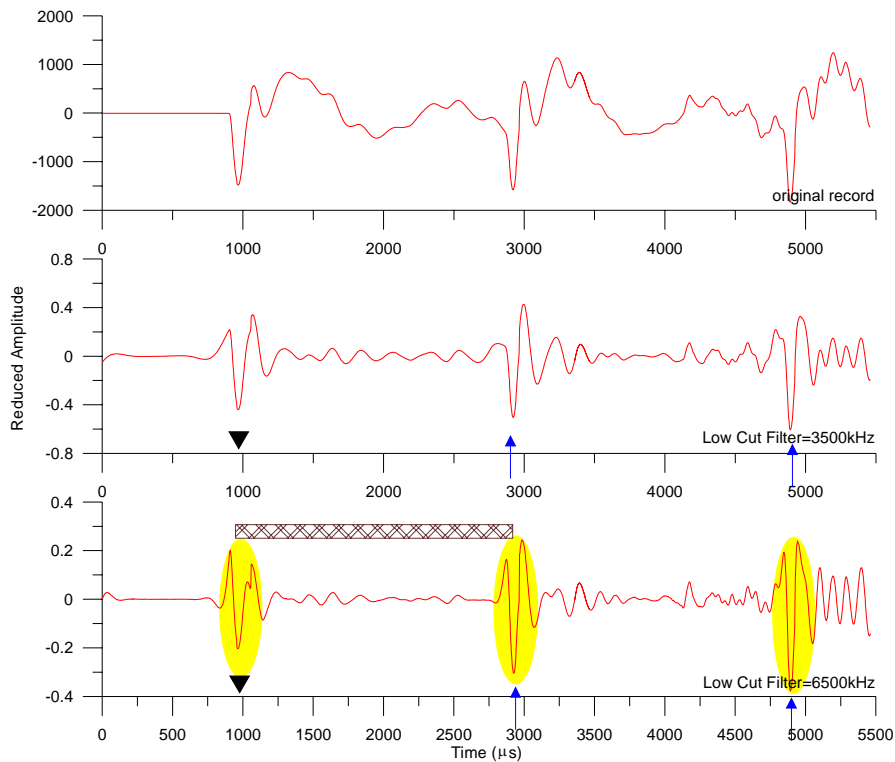


圖 5-10 岩釘案例 A 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 B 為設計長度 6m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 6.15m。圖 5-11 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號明顯，惟仍清楚顯示兩處高頻波波谷位置，且其波相一致顯示其底部並無漿體包覆。圖中第一個波谷為直達波，其時間位置為  $1,087 \mu s$ ，第二個波谷為底部反射波，時間位置為  $3,500 \mu s$ 。時間間距為  $2,413 \mu s$ ，採波速  $5,185 m/sec$  進行計算，檢測長度為  $6.26 m$ ，與施工長度之平均檢測誤差約為 2%。

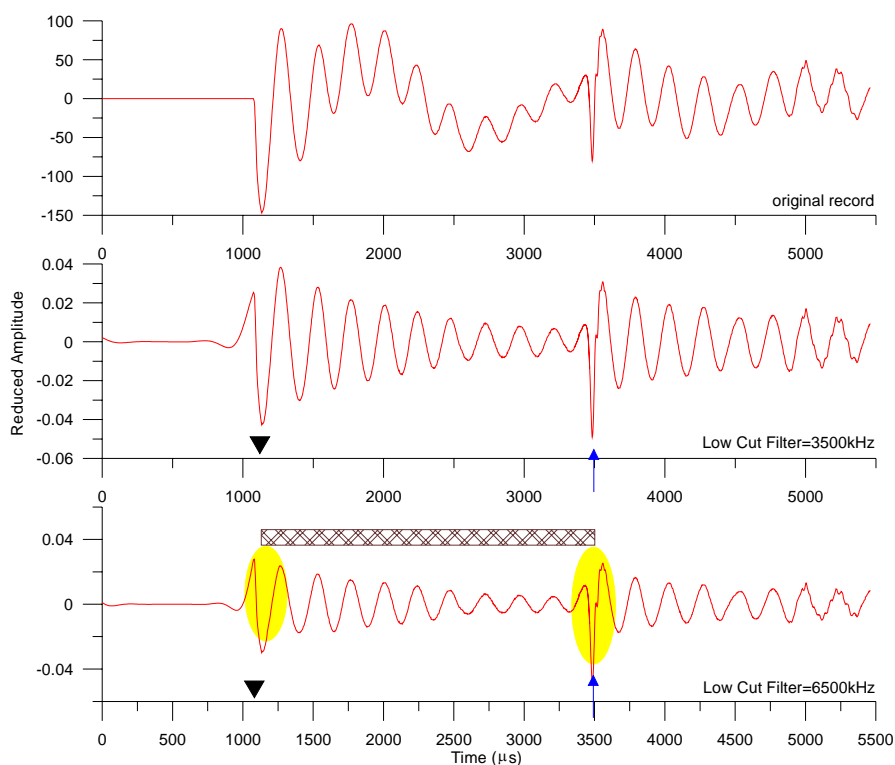


圖 5-11 岩釘案例 B 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 C 為設計長度 6m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 6.15m。圖 5-12 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號明顯，惟仍清楚顯示兩處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位，惟反射波相位與直達波相位相反，顯示底部應有漿體包覆。圖中第一個波谷為直達波，其時間位置為  $967 \mu s$ ，第二個波谷為底部反射波，時間位置為  $3,291 \mu s$ 。時間間距為  $2,324 \mu s$ ，採波速  $5,185 m/sec$  進行計算，檢測長度為 6.02m。惟底部漿體包覆長度較短（推估小於 10cm），造成包覆段之底部反射波雙程走時過小，兩深度之反射波串無法分離，故僅顯示單一反射波群。

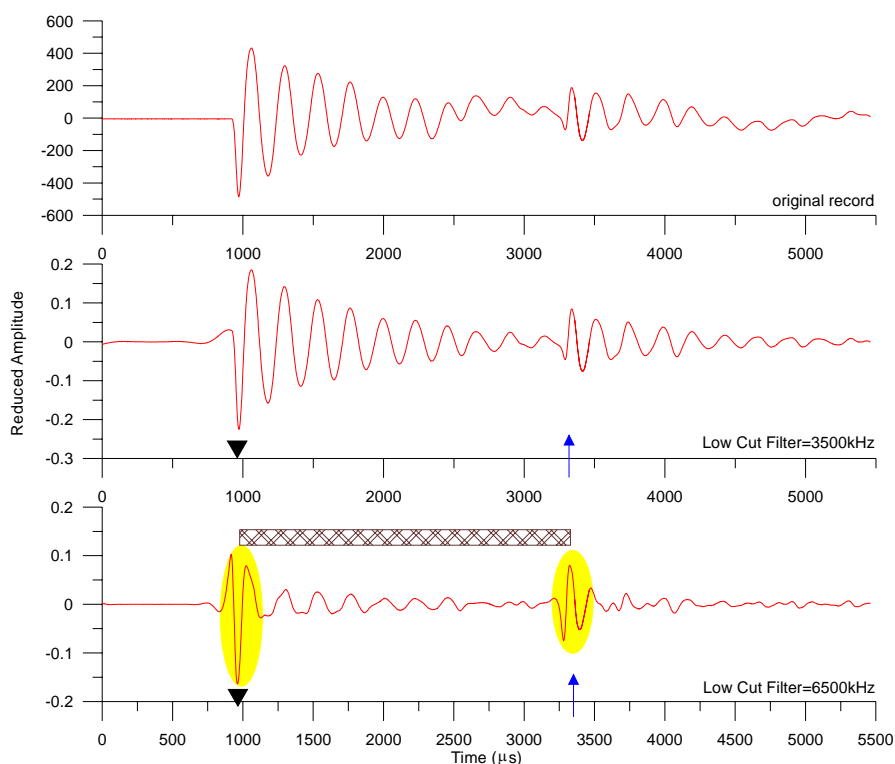


圖 5-12 岩釘案例 C 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 D 為設計長度 5m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 5.15m。圖 5-13 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號明顯，惟仍清楚顯示三處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位，惟反射波相位與直達波及第一次重複反射波相位相反，顯示底部應有漿體包覆。圖中反射波時間間距為 2,000 及 2,060  $\mu$ s，採波速 5,185m/sec 進行計算，檢測長度為 5.19 及 5.34m，與施工長度相近。惟本資料與上述結果相當，推估因底部漿體包覆長度較短，造成包覆段之底部反射波雙程走時過小，兩深度之反射波串無法分離，故僅顯示單一反射波群。

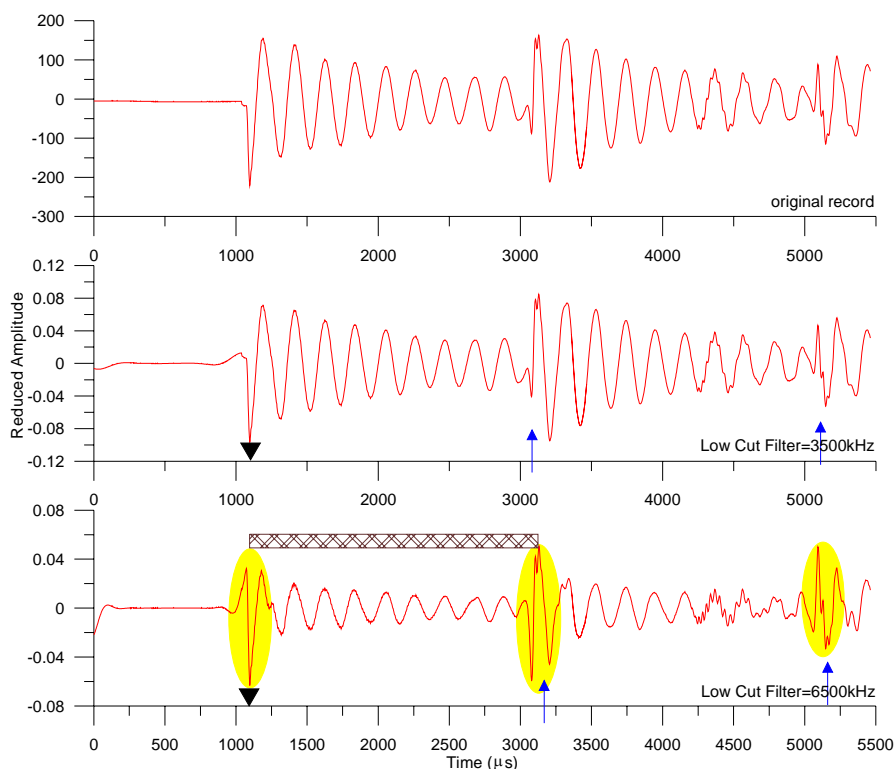


圖 5-13 岩釘案例 D 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 E 為設計長度 6m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 6.15m。圖 5-14 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號局部明顯，惟仍清楚顯示兩處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位，惟反射波相位與直達波相位相反，顯示底部應有漿體包覆。圖中反射波時間間距為  $2,338 \mu s$ ，採波速  $5,185m/sec$  進行計算，檢測長度為 6.06m，略短於施工長度。惟本資料與上述結果相當，推估因底部漿體包覆長度較短，造成包覆段之底部反射波雙程走時過小，兩深度之反射波串無法分離，故僅顯示單一反射波群。

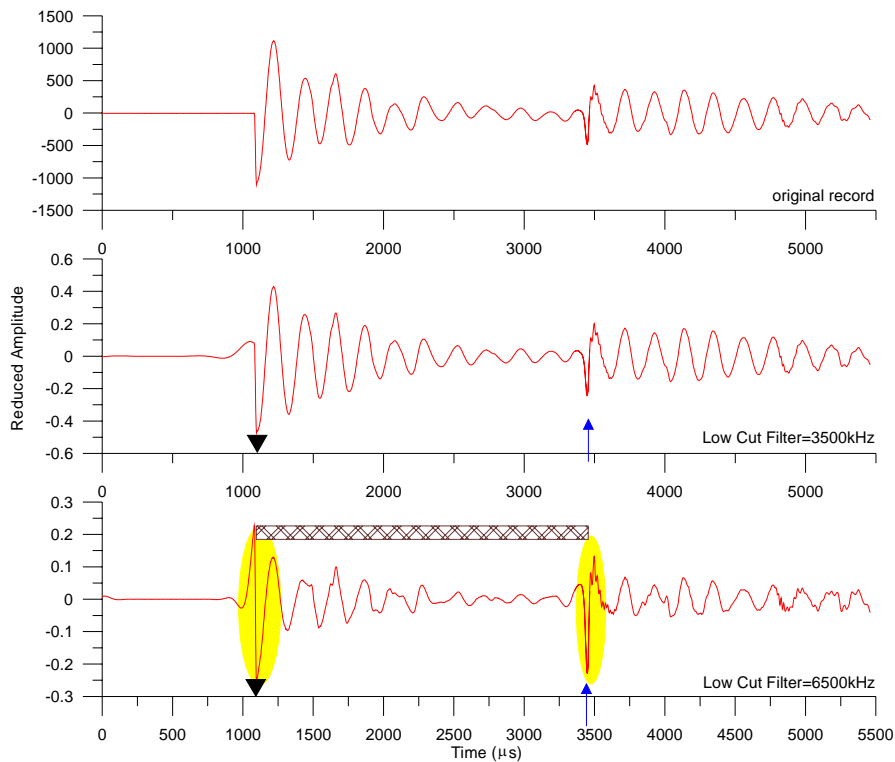


圖 5-14 岩釘案例 E 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 F 為設計長度 3m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 3.15m。圖 5-15 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號局部明顯，惟仍清楚顯示多處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位，惟局部反射波相位與直達波相位相反，顯示底部應有漿體包覆。圖中反射波時間間距為 1,013、1,085 與 1,060  $\mu\text{s}$ ，採波速 5,185m/sec 進行計算，檢測長度為 2.7m，略短於施工長度。惟推估因底部漿體包覆長度較短，造成包覆段之底部反射波雙程走時過小，兩深度之反射波串無法分離，故僅顯示單一反射波群。

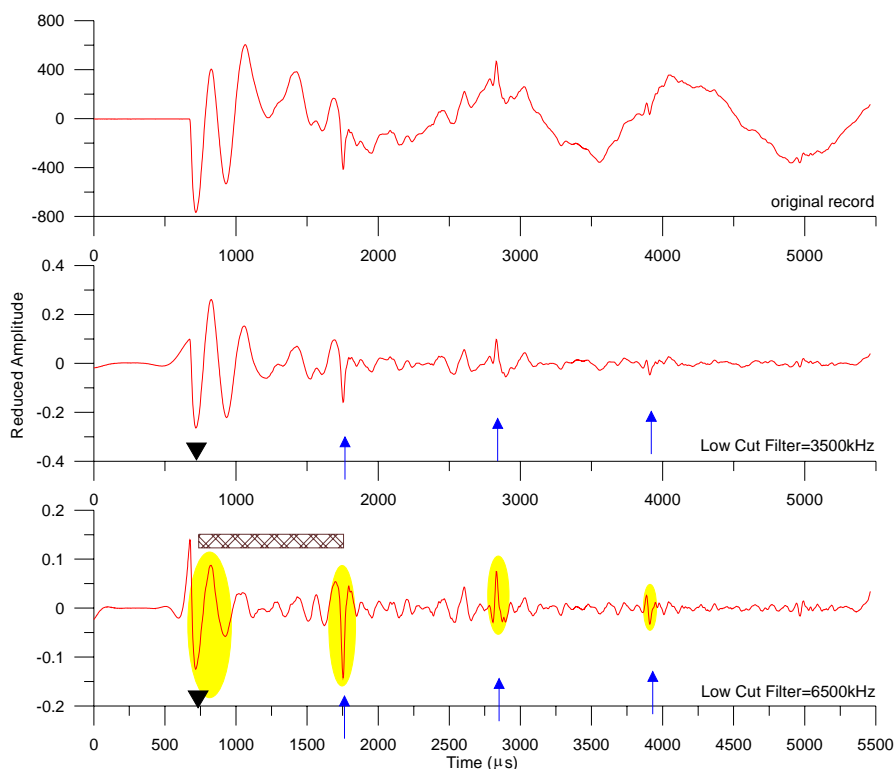


圖 5-15 岩釘案例 F 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 G 為設計長度 4m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 4.15m。圖 5-16 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號局部明顯，惟仍清楚顯示兩處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位與直達波相位一致，顯示底部應無漿體包覆。圖中反射波時間間距為  $1,580 \mu s$ ，採波速  $5,185 m/sec$  進行計算，檢測長度為 4.1m，與施工長度之平均檢測誤差約為 1%。



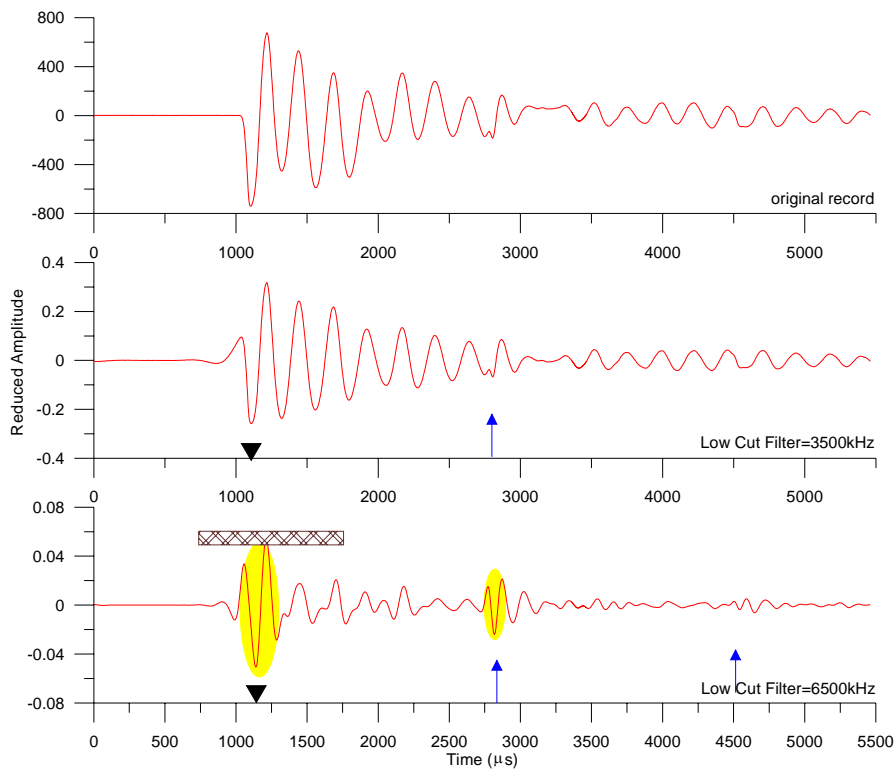


圖 5-16 岩釘案例 G 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

案例 H 為設計長度 4m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 4.15m。圖 5-17 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號較不明顯，濾波結果清楚顯示多處高頻波波谷位置，惟其時距相當小，且反射波相位與直達波相位相反，顯示其應為鄰近地表未灌漿段的反射訊號。圖中反射波時間間距為  $380 \mu\text{s}$ ，採波速  $5,185\text{m/sec}$  進行計算，檢測長度為 0.99m。

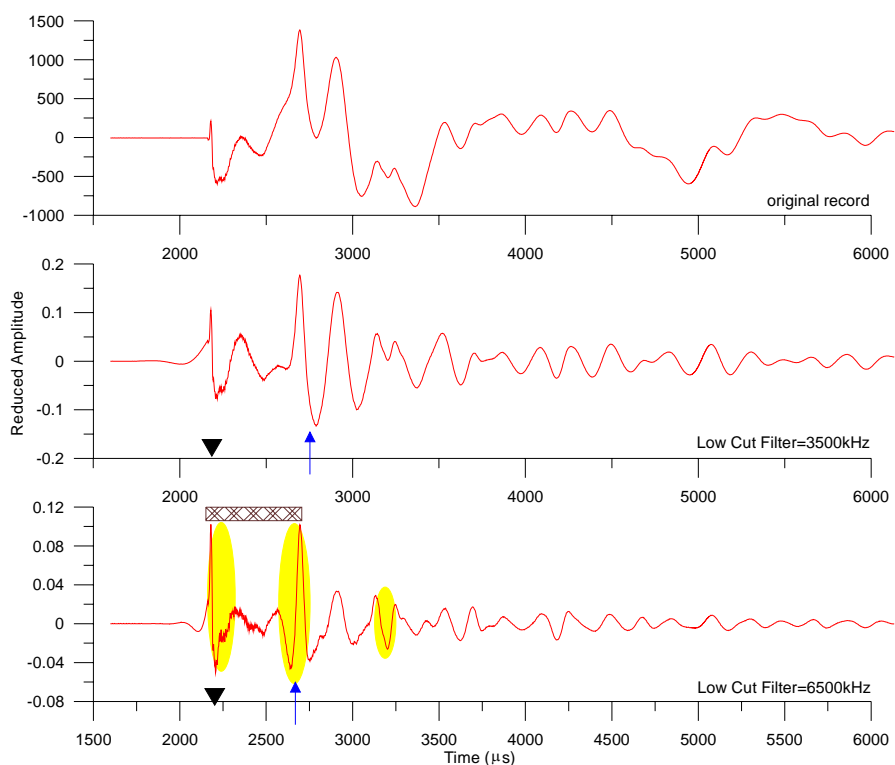


圖 5-17 岩釘案例 H 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

圖 5-18 為案例 H 回波檢測記錄頻譜。圖中在頻率約 20,000Hz 以內之特徵波峰以近似等頻率間距出現，平均頻率間距約為 2,222Hz，採波速 5,185m/sec 進行計算，該相對長度約為 1.17m，與時域資料檢測結果相當，故應為鄰近地表未灌漿段長度。另位於 7500Hz 附近，存在另一群等頻率間距之局部波峰訊號，該訊號頻率間距約為 515Hz，若以回波速度 4,200m/sec 估算，該相對長度約為 4.08m，應為埋設岩釘長度。故本案例岩釘檢測長度約為 4.08m，而鄰近地表段約有 1m 為無灌漿段，鄰近底端約 3m 為灌漿段。

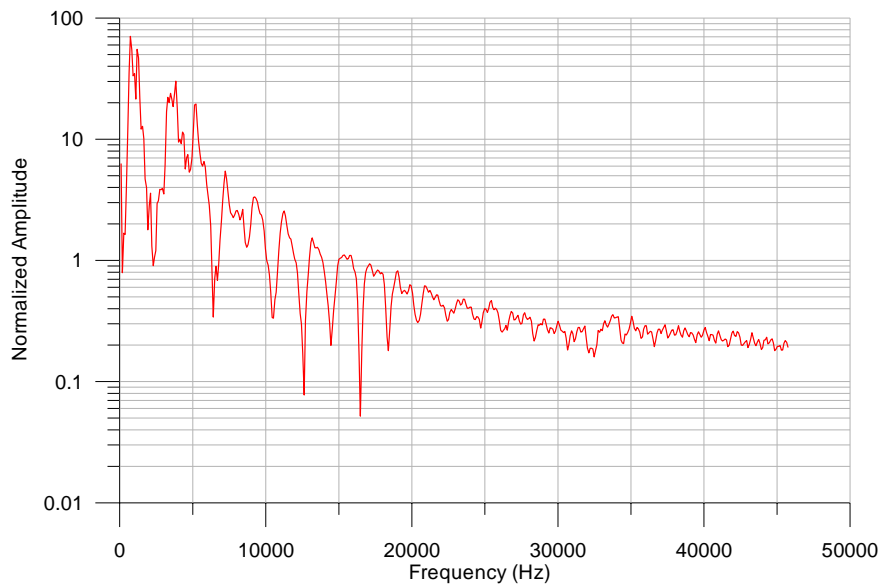


圖 5-18 岩釘案例 H 檢測資料頻譜

(資料來源：本研究整理)

案例 I 為設計長度 4m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 4.15m。圖 5-19 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號較不明顯，但低頻雜訊較顯著，濾波結果大致顯示反射波波谷位置，惟其時距相當小，且反射波相位與直達波相位相反，顯示其應為鄰近地表未灌漿段的反射訊號。圖中反射波時間間距為  $1,150 \mu s$ ，採波速  $5,185 m/sec$  進行計算，檢測長度為 2.99m。

圖 5-20 為案例 I 回波檢測記錄頻譜。圖中在頻率約 7,500Hz 以內之特徵波峰以近似等頻率間距出現，平均頻率間距約為 909Hz，採波速  $5,185 m/sec$  進行計算，該相對長度約為 2.85m，與時域資料檢測結果相當，故應為鄰近地表未灌漿段長度。另位於 1,500 至 2,000Hz 附近，存在另一群等

頻率間距之局部波峰訊號，該訊號頻率間距約為 565Hz，若以回波速度 4,200m/sec 估算，該相對長度約為 3.72m，應為埋設岩釘長度。故本案例岩釘檢測長度約為 3.72m，而鄰近地表段約有 2.9m 為無灌漿段，鄰近底端約 0.8m 為灌漿段。

本案例埋設岩釘採拔出試驗以了解實際灌漿狀況與埋設長度。照片 5-11 及照片 5-12 為岩釘案例 I 拔出驗證照片，照片中共有三支岩釘，位於中間者即為案例 I 岩釘，拔出之岩釘全部長度為 3.95m，岩釘表面附著水泥砂漿甚少，且上半部鋼筋表面仍保持鐵銹色，並無水泥砂漿漿體包覆，應為未灌漿段，該部分長度約為 2.5m。

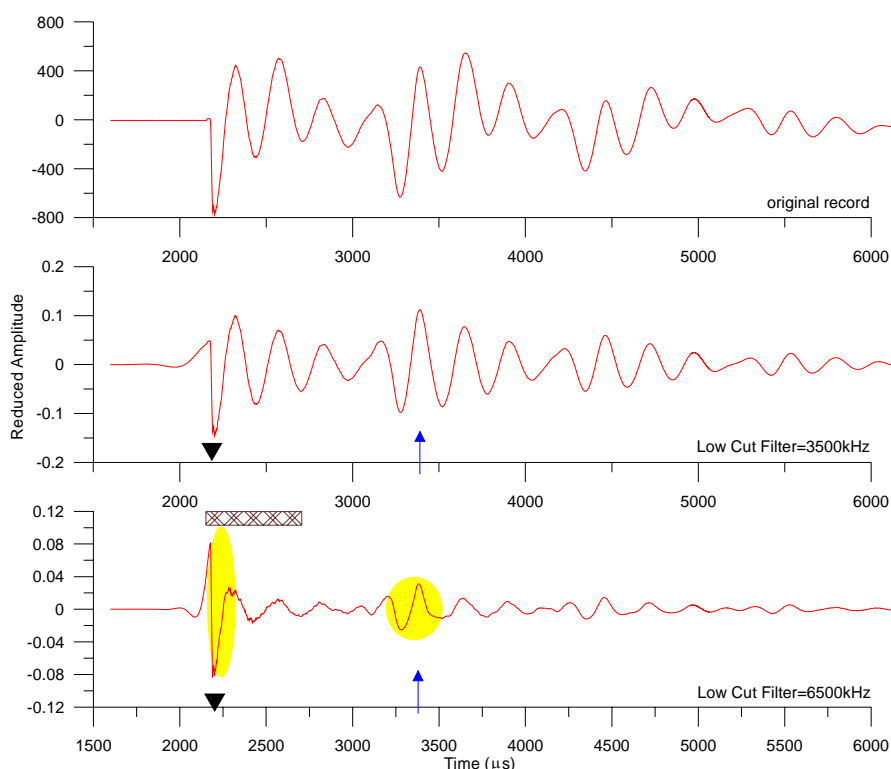


圖 5-19 岩釘案例 I 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

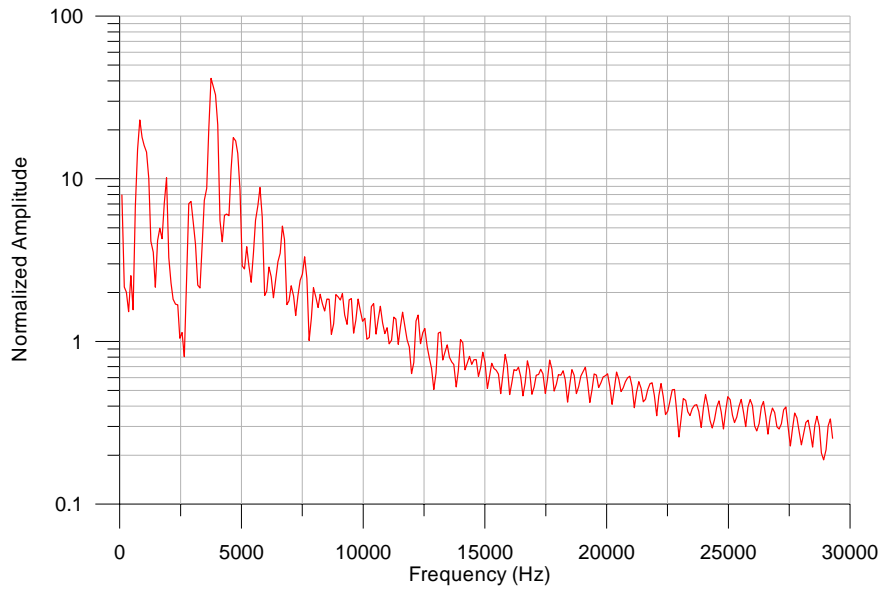


圖 5-20 岩釘案例 I 檢測資料頻譜

(資料來源：本研究整理)



照片 5-11 岩釘案例 I 拔出驗證照片一

(資料來源：本研究整理)



照片 5-12 岩釘案例 I 拔出驗證照片二

(資料來源：本研究整理)

案例 J 為設計長度 4m 邊坡 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 4.15m。圖 5-21 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號較不明顯，且反射能量相當微弱，並無明顯波谷出現。

圖 5-22 為案例 J 回波檢測記錄頻譜。圖中在頻率約 1,500Hz 及 5,000 之顯著波峰係低頻雜訊及接收器共振訊號，其餘並無任何明顯訊號出現，推估其內部灌漿完全，大部分暫態應力波能量經由完整的鍵體/漿體/岩盤等接觸面向外傳遞，原岩釘形成之波導「Wave Guide」狀況已不復存在，故回波相當微弱，無法進行辨識。

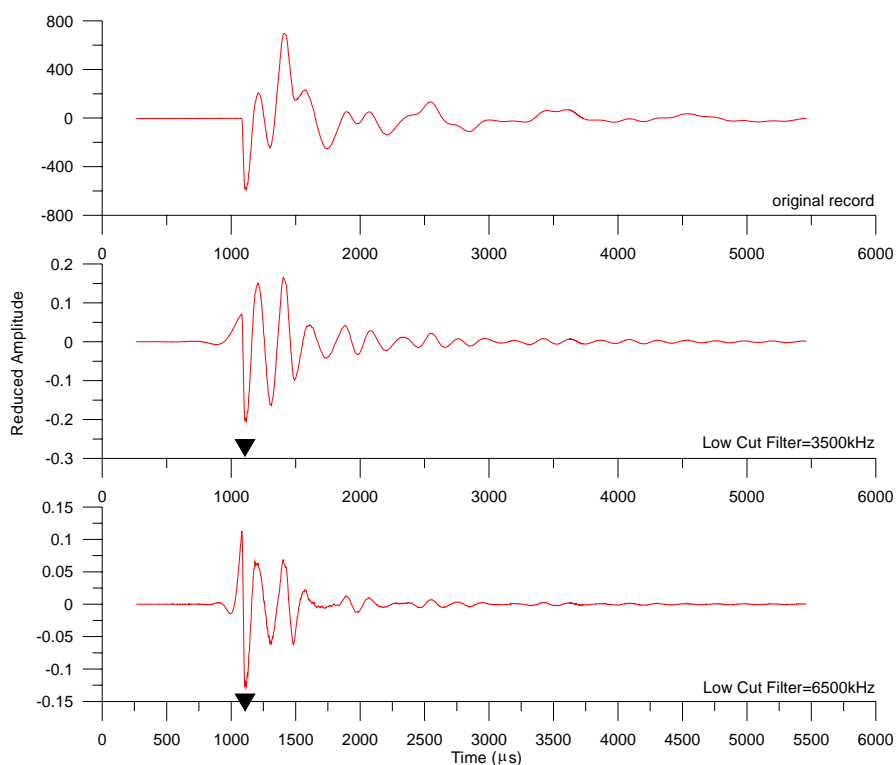


圖 5-21 岩釘案例 J 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

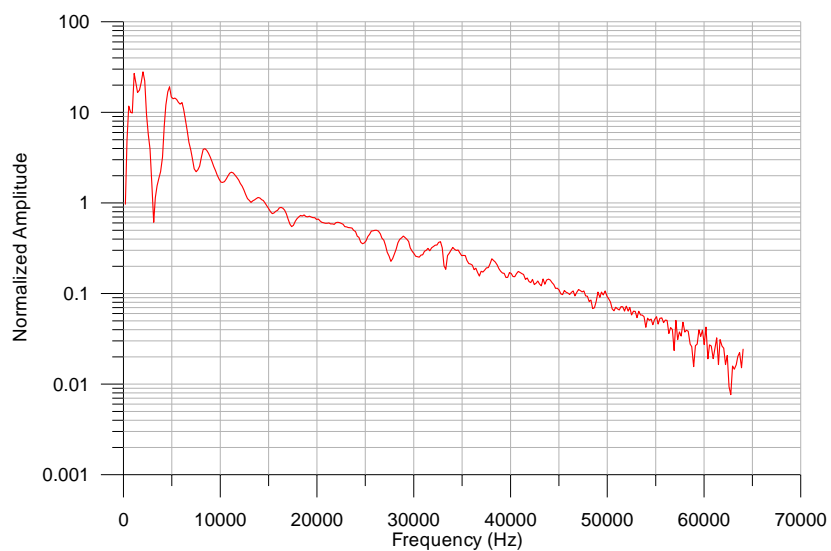


圖 5-22 岩釘案例 J 檢測資料頻譜

(資料來源：本研究整理)

案例 K 為設計長度 3m 隧道 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 3.15m。圖 5-23 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號及低頻雜訊明顯，惟仍清楚顯示多處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位與直達波相位一致，顯示底部應無漿體包覆。圖中反射波時間間距為 1,145  $\mu\text{s}$ ，採波速 5,185m/sec 進行計算，檢測長度為 2.97m，與施工長度之平均檢測誤差約為 6%。

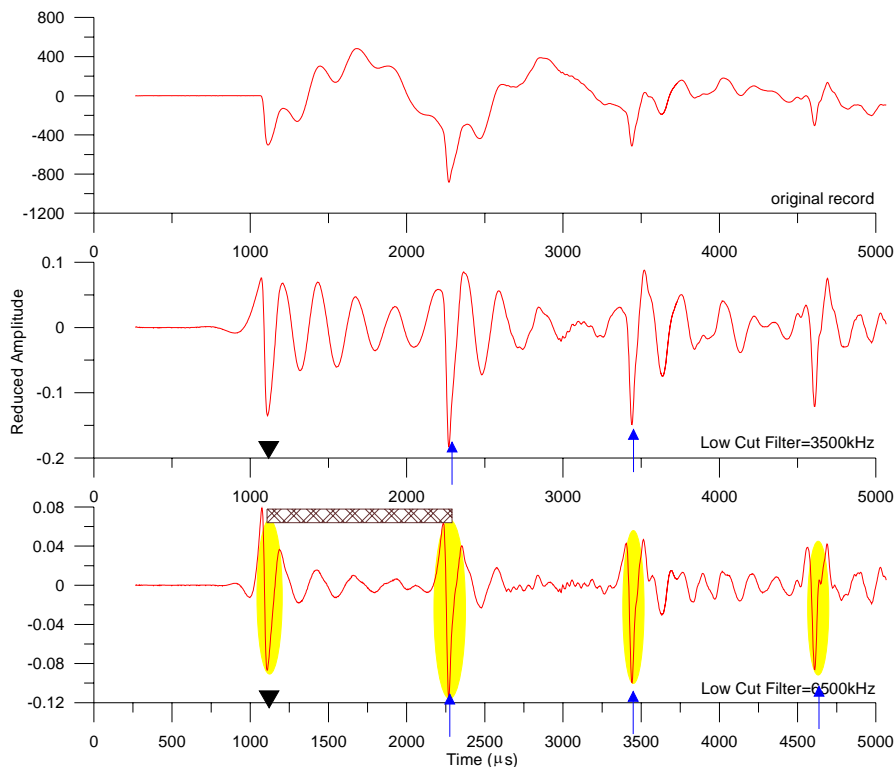


圖 5-23 岩釘案例 K 檢測資料

(資料來源：本研究整理)



案例 L 為設計長度 3m 隧道 SN 岩釘。岩釘實際施工長度為 3.15m。圖 5-24 為回波檢測記錄。圖中接收器共振訊號及低頻雜訊明顯，惟仍清楚顯示多處高頻波波谷位置，濾波結果大幅降低共振效應，且清楚顯示反射波相位與直達波相位一致，顯示底部應無漿體包覆。圖中反射波時間間距為 1,158  $\mu\text{s}$ ，採波速 5,185m/sec 進行計算，檢測長度為 3m，與施工長度之平均檢測誤差約為 5%。

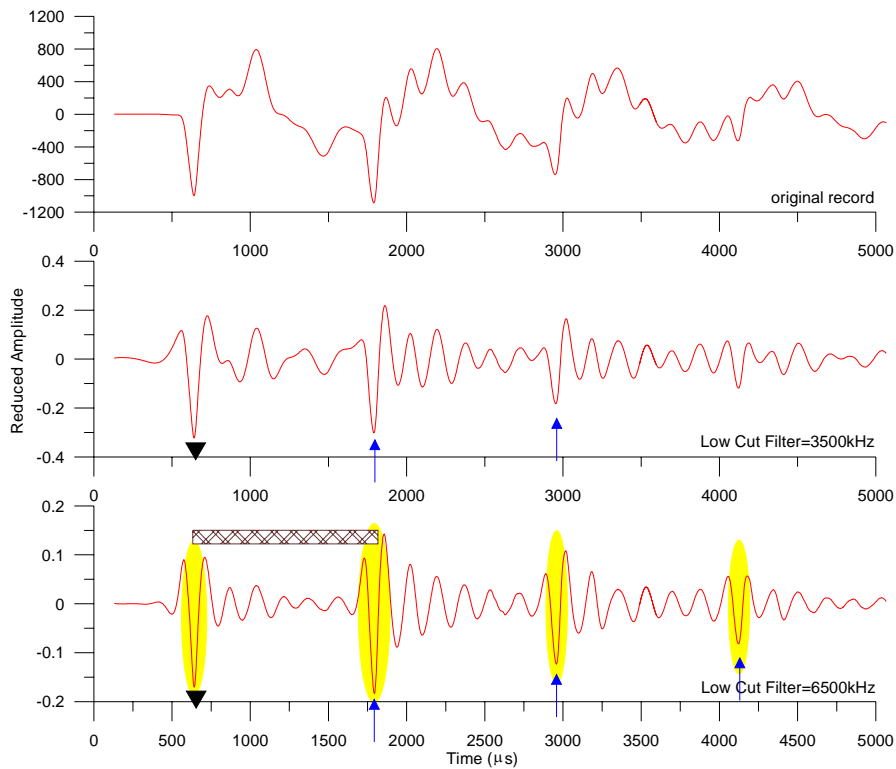


圖 5-24 岩釘案例 L 檢測資料

(資料來源：本研究整理)

## 第五節 現地試驗工作結論

綜合上述案例應用結果及檢討試驗過程中遭遇的問題，提出以下幾點結論：

1. 雷達波為非接觸波，故不受擋土牆混凝土表面狀況的影響，即使混凝土表面粗造或有裝飾材料，透地雷達方法依舊可進行現地作業，且高頻雷達波檢測資料亦不受影響，故適用性極高。
2. 現地應用檢測資料顯示：透地雷達剖面中，表層鋼筋繞射波相當明顯，相當容易進行鋼筋定位及保護層厚度的研判，甚至可應用於相當小的保護層探查；第二層鋼筋繞射波亦明顯，且可據以研判位置及深度。惟因鋼筋間距的大小影響深層鋼筋檢測結果，實測資料顯示：若第一層鋼筋間距大於等於 30cm 以上，即可應用於深層鋼筋探查。
3. 以敲擊回音法進行土（岩）釘灌漿品質檢測時，接收器與鍵體表面接觸好壞將嚴重影響檢測資料品質。一般工址土（岩）釘鍵體均經過燒焊或裁切，鍵體表面相當不平整，檢測前需以砂輪機進行修整。
4. 敲擊回音法現地應用檢測資料顯示：藉由回波資料進行灌漿段長度及未灌漿段長度檢測應為可行，且經由岩釘拔出試驗結果驗證檢測資料準確度極高，惟部分少數岩釘內部灌漿完全，回波微弱。前期研究與本期現地試驗結果顯示：一般工址土（岩）釘均呈現灌漿不完全狀況，僅少數試驗結果顯示內部灌漿完全，故本法應可適用於實際工程狀況。

## 第六章 標準作業模式

本章參考國內外相關文獻及本研究過程所得經驗，提出透地雷達及敲擊回音法標準作業模式，以供參考。

### 第一節 透地雷達應用於鋼筋探查

#### 1.0 範圍

- 1.1 本作業模式係說明透地雷達應用於鋼筋混凝土擋土牆厚度、內部瑕疵、鋼筋定位、保護層厚度、鋼筋搭接長度等試驗方法、步驟與儀器設備等。
- 1.2 本作業模式適用之擋土牆，包含邊坡或地下開挖所進行之鋼筋混凝土擋土牆，設計形式包含重力式、L 型、倒 L 型與懸臂式擋土牆等。
- 1.3 本作業模式透地雷達儀器係使用單一天線罩進行探查，天線罩內含發射天線與接收天線，並不適用於雙天線罩之透地雷達儀器設備。

#### 2.0 重要事項

- 2.1 本試驗方法係於擋土牆表面，以天線發射雷達波向下傳遞，在底部或空洞等位置形成反射波，返回頂端，由接收天線感應雷達波，並記錄成為波形資料。藉由波形研判及走時分析，進行擋土牆厚度及內部鋼筋、空洞等定位。
- 2.2 若有多筆試驗資料，可藉由波形相似性協助進行研判，以增加探查結果可信度。

2.3 探查資料得採適當雷達波速進行鋼筋保護層厚度之估算。

雷達波速可採混凝土平均雷達波速 ( $1.12 \times 10^8 \text{m/sec}$ )，或採用已知鋼筋深度或擋土牆厚度反算波速。

2.4 本檢測方法係於擋土牆表面進行試驗，故進行現地試驗前，應儘可能蒐集擋土牆設計圖說及近況外觀照片，以瞭解內部設計、表面現況及協助選用適當天線及檢測資料判讀。

### 3.0 試驗目的

3.1 本試驗基本上可作為擋土牆厚度、擋土牆混凝土內部缺陷、空洞位置、背填孔洞及含水範圍與鋼筋定位、間距、保護層厚度、搭接位置等檢測。

### 4.0 方法限制

4.1 擋土牆表面植生、大塊礫石或裝飾材料對現地探查工作影響不大，但若表面滲水過大將可能造成天線進水，又如鄰近高壓電塔或大量電纜，將嚴重影響檢測資料品質，均不適用於透地雷達探查。另擋土牆表面長寬尺寸需有足夠空間，供天線放置其上及以人為方式進行施測，若待測位置過高，則必須以工作梯或搭架方式協助現地工作進行。

4.2 測線須與擋土牆內部待測物走向垂直，若在未知條件下，可採縱橫格線方式進行施測。一般而言，擋土牆內部第一層鋼筋可以本法檢測，但第二層鋼筋及更深處鋼筋探查需視待測物鋼筋設計而有所不同。

4.3 對於背填大致良好之擋土牆，或背填僅存在局部空洞之擋土牆，因背填土層（劣質混凝土或岩層）電性與混凝土電

性相近，造成界面反射率較小，雷達波反應較不明顯，較難以研判擋土牆厚度。但若背填孔洞含水，則雷達反射波較為明顯，故可藉以研判背填孔洞含水範圍。

4.4 檢測方法內含較多的理論與技術，且須因應現地狀況採取不同的檢測方式、資料處理方法與判讀技巧，故建議仍由專業人員進行，以提高資料可信度及準確性。

## 5.0 儀器設備

5.1 透地雷達：透地雷達硬體主要包含主機及天線。主機主要作為資料操控中心，藉由參數的設定，將重複產生之電脈衝送至發射天線以產生雷達波，並同時接收由天線內感應之反射雷達波信號，此信號經內部晶片處理後，成為數位記錄顯示於監控螢幕上，供即時研判並儲存於內部硬碟中。透地雷達天線頻率大致在 10MHz 至 3,000MHz 間。天線設備分為兩種，一種是將接收天線與發射天線裝設於同一天線罩內，另一種則為分別獨立，使用方法並不相同。

5.2 捲尺：進行資料蒐集前，必須在預定測線里程上等距離進行標示，以作為座標控制使用。當天線沿測線前進，經過標示位置時，藉由主機或天線輸入一電子訊號，作為數位資料之參考座標。

5.3 噴漆或粉筆：作為標示用。

5.4 記錄紙：供作為現地記錄測線位置、地形地物描繪、變電站（箱）位置、滲水位置、天候狀況、土層條件等資料記錄。

5.5 手套、鐵鎚、及工具箱等

5.6 電瓶或發電機：提供透地雷達儀器電源，或現地照明等供應電源。

## 6.0 準備工作

6.1 設備檢查：檢查主機電源供應是否充足、訊號連接線是否破損、接頭位置是否鬆脫、資料蒐集軟體功能是否正常、硬碟空間是否足夠、天線功能是否正常等。

6.2 資料蒐集：蒐集擋土牆相關資料，包含地質調查資料、設計圖、竣工圖、歷年來災害及修復勘查及施工記錄、照片及相關檢監測資料。資料蒐集係提供作為現地檢測規劃之參考依據，用以設計測線長度、位置、分布間距及天線頻率之選擇。

6.3 現地勘查：根據上述資料蒐集結果，進行必要之現地勘查工作，以瞭解擋土牆現況及適合進行透地雷達探查之範圍。

## 7.0 檢測步驟

7.1 在預定測線位置，以捲尺及噴漆（或粉筆）進行測線距離標示。一般進行鋼筋定位檢測時，測線標示間距應不大於設計鋼筋間距。若進行擋土牆厚度及背填狀況檢測時，表面標示間距可依現地狀況調整。除測線標示方法外，亦可以測距輪以等間距雷達掃描方式，記錄各掃描資料之空間座標。

7.2 擋土牆雷達波速標定：藉由已知混凝土厚度或鋼筋深度之擋土牆進行波速量測，或由參考文獻提供合理波速，一般而言，可採用混凝土平均波速（約  $1.087 \times 10^8 \text{m/sec}$ ）進行

深度之初步估算。

7.3 儀器設備組裝及暖機：將主機及天線等單元連接，並打開電源進行測試。若背景雜訊過大，需調高放大倍率，提高訊號/雜訊比。

7.4 施測參數設定，包含數位資料個數（Sample No.）、記錄時間長度（Range）、資料位元（Data Byte）、發射頻率（Transmit Frequency）、掃描率（Scan Rate）等，須因應不同現地條件及檢測目的進行設定，惟一般透地雷達硬體設備均提供多組參數供選用。

7.5 將天線放置於擋土牆表面測線一端，再次調整放大倍率，使得波形強度一致。根據此設定，移動天線約 50cm 距離並進行資料蒐集，再次調整放大倍率，使得整體波形強度一致。

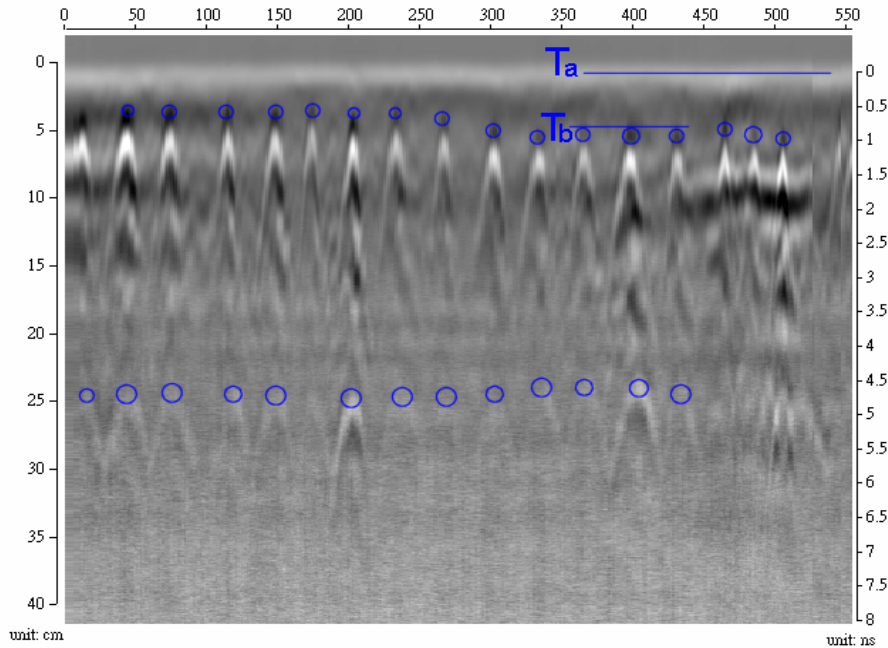
7.6 將天線以等速沿測線移動，經過噴漆標示位置上方時，以天線手把上之標示器（Marker）輸入電子訊號，作為空間定位使用。結束時並立即儲存波形資料。

7.7 在同一條測線上重複以上試驗步驟，一直到波形資料重複出現且內容一致，即完成該測線現地資料蒐集工作，可移動前往下一處檢測位置。

## 8.0 資料處理方法

8.1 圖一為鋼筋探查案例雷達波剖面，圖中橫軸為距離，縱軸為資料記錄時間。雷達波剖面是由許多筆測點反射資料所組成，每一筆反射資料皆反映該測點位置，擋土牆內部材料電性異常狀況，而以顏色或灰階表示反射波強弱程度。

本案例剖面係以灰階呈現反射波強度分布，白色代表最大正向強度，黑色代表最大負向強度。



圖一 透地雷達剖面說明

(資料來源：本研究整理)

8.2 圖中最明顯特徵為水平方向近似等距離出現之弧狀訊號，該訊號即為擋土牆內部等間距排列之鋼筋繞射訊號，該訊號頂點反射波強度最大，係為鋼筋位置（圖中以圓圈表示），故可藉由測線距離，進行鋼筋空間定位。

8.3 圖中標示第一條橫線位置，呈現水平一致性反射訊號，係為擋土牆表面反射波，時間約為  $T_a$ 。圖中標示第二條橫線位置為鋼筋繞射訊號頂點，時間約為  $T_b$ 。兩者時間差即為雷達波來回鋼筋保護層所需的雙程（two way）走時，將



單程走時乘以雷達波速即可得鋼筋保護層厚度(參見公式一)。

$$D = V_{\text{radar}} \cdot \frac{(T_b - T_a)}{2} \dots\dots\dots \text{(公式一)}$$

8.4 進行波形資料研判前，可進行疊加 (stacking)、濾波 (filtering) 及改變色階等資料處理方式，以增加真實訊號強度。

8.5 對於擋土牆厚度及內部缺陷的資料處理方式與前述流程一致，惟厚度及內部缺陷等形成之反射訊號型態與鋼筋繞射訊號並不相同。一般判釋方法大多憑藉雷達波剖面上出現 (1) 側向訊號不連續，或 (2) 反射波強度較明顯位置進行研判，由於反射訊號型態並無固定模式，故需具檢測經驗人員進行。

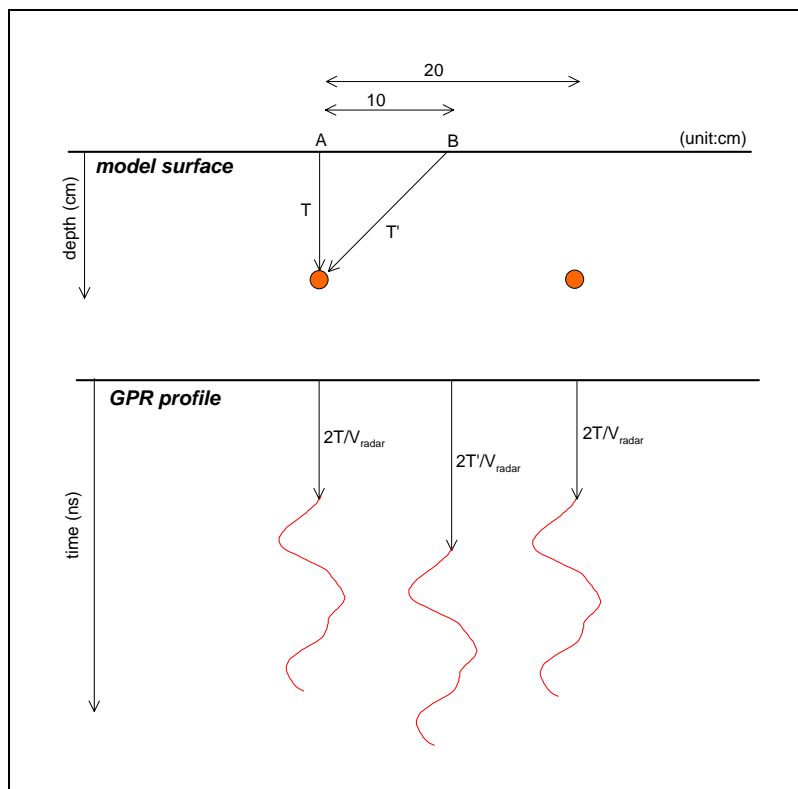
8.6 可採用繞射波時間差法估算保護層厚度，詳 9.0。

#### 9.0 繞射波時間差法

9.1 圖二為透地雷達繞射時間示意圖。圖上方為擋土牆模型剖面示意圖，其中鋼筋間距為 20cm，鋼筋保護層厚度為 T。A 點位於鋼筋上方，鋼筋深度為 T，B 點位於兩鄰近鋼筋中央，與鋼筋距離為 T'，T' 與 T 的關係如下：

$$T' = \sqrt{T^2 + D^2} \dots\dots\dots (公式二)$$

其中：D 為鋼筋間距之半



圖二 透地雷達繞射時間示意圖

(資料來源：本研究整理)

9.2 圖二下方為波到時間示意圖，相當於雷達波剖面。理論鋼筋反射波走時應為 2 倍的鋼筋距離除以雷達波速，故 A、B 兩點反射波走時應為  $2T/V_{RADAR}$  與  $2T'/V_{RADAR}$ ，兩者時間差 ( $\Delta t$ ) 為  $2T'/V_{RADAR} - 2T/V_{RADAR}$ ，故在已知鋼筋間距及波速等條件下，可根據  $\Delta t$  並藉由下式計算求得鋼筋保

護層厚度 (T)。

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{T^2 + D^2}}{V_{\text{RADAR}}} - \frac{2T}{V_{\text{RADAR}} \dots \dots \dots} \quad (\text{公式三})$$

## 10.0 試驗報告

報告內容應包含：

- 10.1 前言：說明計畫名稱、地理位置、委託單位、檢測目的、檢測單位及檢測時間等。
- 10.2 基地概況：包含擋土牆所在平面位置圖、蒐集到之相關地質調查資料、設計圖、竣工圖、歷年來災害及修復勘查及施工記錄、照片及相關檢監測資料等。
- 10.3 儀器設備。
- 10.4 檢測步驟。
- 10.5 現地試驗說明、試驗過程照片及資料處理。
- 10.6 檢測結果與判識
- 10.7 結論與建議或其他重要事項說明。

## 11.0 名詞解釋

- 11.1 天線罩：係作為雷達波發射與接收單元，一般為非金屬材質外殼，內含發射天線及接收天線。
- 11.2 測線：係標示於探測物體表面，並垂直於目的物走向的一條線，施測時近似等速移動天線罩沿著此線前進。

## 第二節 折射震測法應用於保護層厚度檢測

### 1.0 範圍

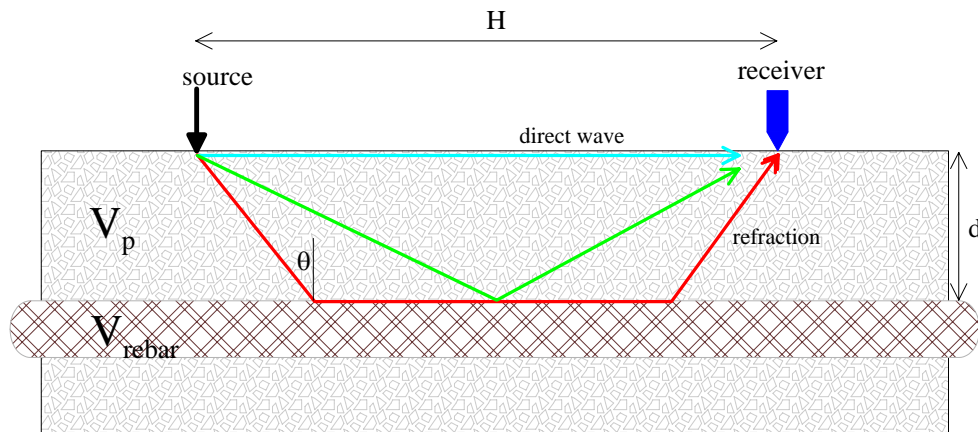
- 1.1 本作業模式係說明折射震測法應用於鋼筋混凝土擋土牆保護層厚度檢測之試驗方法、步驟與儀器設備等。
- 1.2 本作業模式適用之擋土牆，包含邊坡或地下開挖所進行之鋼筋混凝土擋土牆，設計形式包含重力式、L型、倒L型與懸臂式擋土牆等。

### 2.0 重要事項

- 2.1 儀器設備單元應包含敲擊源、接收器、數位類比轉換器、主機及分析軟體等。
- 2.2 本試驗方法如圖一所示，現地試驗設備係由一個敲擊源及一個訊號接收器組成。試驗時，在擋土牆表面錘擊造成擾動，形成之暫態應力波向下傳遞，在擋土牆表面傳遞或沿著內部鋼筋形成折射波，返回表面，由接收器感應混凝土表面振動，並記錄波形資料。

$$T_1 = \frac{H}{V_R} \dots\dots\dots (公式一)$$

$$T_2 = \frac{2d}{V_p \cos(\theta)} + \frac{H-2d \tan(\theta)}{V_{rebar}} \dots\dots (公式二)$$



圖一 折射震測法檢測示意圖

(資料來源：本研究整理)

2.3 上述公式係為直達波與折射波的走時-支距公式。公式一為直達波傳遞時間 ( $T_1$ )，公式二為折射波傳遞時間 ( $T_2$ )，當  $T_1 = T_2$  時，該支距為臨界距離，可據以計算鋼筋保護層厚度。 $V_R$  為混凝土表面波速， $H$  為支距， $V_p$  為混凝土表面波波速， $d$  為保護層厚度， $\theta$  為折射角， $V_{rebar}$  為鋼筋縱波波速。

2.4 現地施測佈置測線須與鋼筋走向平行，並沿著測線採等間距方式移動接收器，依序進行敲擊試驗，若未知鋼筋走向，則需藉其他探查方式解大致鋼筋走向，或採輻射狀測線方式進行施測。

2.5 相同試驗位置需採多次敲擊試驗，並藉由波形相似性及重複性確認收錄資料之真實性，提高資料可信度，降低因人為及環境等因素造成的雜訊。

2.6 一般試驗所得首達波可能為直達波或折射波，波的形式可能為表面波或縱波。在進行資料處理時必須非常明確地了解處理各紀錄的波形是否正確且一致。

### 3.0 試驗目的

3.1 本試驗主要作為擋土牆鋼筋保護層厚度檢測。

### 4.0 方法限制

4.1 擋土牆表面若有過於粗糙、植生、大塊礫石、裝飾材料、表面滲水過大等狀況，均不適用於敲擊回音法探查。

4.2 需採可感應時間原點的敲擊裝置，但需注意接收器自振頻率及瞭解擋土牆設計、混凝土性質及強度等資料，若混凝土強度太小或施工品質不佳，造成暫態應力波衰減嚴重，可能造成檢測失敗。

4.3 檢測方法內含較多的理論與技術，且須因應現地狀況採取不同的檢測方式、資料處理方法與判讀技巧，故建議應由專業人員進行，以提高資料可信度及準確性。

### 5.0 儀器設備

5.1 儀器設備單元應包含敲擊源、接收器、數位類比轉換器、主機及分析軟體等。

5.2 敲擊源：採用鋼珠敲擊器或其他體積小、重量輕之鋼珠敲擊器或小手錘，以期激發高頻暫態應力波。

5.3 接收器：應為寬頻且高感度位移計、速度計或加速度計，反映出的訊號電壓與垂直表面位移（速度或加速度）成正比，且不需使用接合液增加偶合，並須瞭解接收器自振頻率。

5.4 高速資料擷取卡：電源需可由電池或交流電供應。

5.5 主機：用於儲存資料擷取卡輸出之數位資料，並進行訊號處理與分析。一般可為筆記型電腦或工業用觸控面板電腦，電源需可由電池或交流電供應。

5.6 分析軟體：包含資料蒐集及處理等功能，可進行硬體設定、即時顯示波形記錄及資料處理、分析、列印等功能。

## 6.0 準備工作

6.1 設備檢查：檢查資料擷取卡電源供應是否充足、主機電源供應是否充足、訊號連接線是否破損、接頭位置是否鬆脫、軟體功能是否正常、硬碟空間是否足夠、接收器訊號是否正常等。

6.2 資料蒐集：蒐集擋土牆相關資料，包含地質調查資料、設計圖、竣工圖、歷年來災害及修復勘查、施工記錄、照片及相關檢監測資料。資料蒐集係作為現地檢測規劃之用，如設計測點位置、分布間距及選擇鋼珠敲擊器之參考。

6.3 現地勘查：根據上述資料蒐集結果，進行必要之現地勘查工作，以瞭解擋土牆現況及適合進行探查之範圍。

## 7.0 試驗步驟

7.1 儀器設備組裝及暖機：將敲擊器、接收器、主機等單元連接，並打開電源進行測試，並進行施測參數設定，主要數位資料個數（Sample No.）及採樣時間間距（Sample Interval）等，一般對於較小保護層厚度檢測時，需採較小的採樣時間間距，約自  $0.5 \mu s$  至  $4 \mu s$  應可符合一般檢測需求，而資料個數可採 1,024。

7.2 在預定測線上採等距離方式進行標示，一般可採 5cm 作為標示間距，測線長度與鋼筋保護層厚度與混凝土品質有關，一般測線長度離不得小於 30cm。

7.3 將鋼珠敲擊器放置於測線原點，再將接收器放置於測線第一處標示位置上，並輕壓接收器使其與擋土牆接觸，再以鋼珠敲擊器進行敲擊。

7.4 檢查波訊並儲存正常波形資料。若波形持續發生不正常現象或無法正常記錄，則可能為高速資料擷取卡電源供應不足，須進行電池更換。若回波資料微弱，則可採較大敲擊器重新進行試驗。如果擋土牆混凝土表面過於粗糙，無法使接收器與表面有良好接觸，則必須以砂輪進行磨平。

7.5 重複敲擊試驗，一直到三次波形資料內容一致，即可完成試驗並紀錄接收器與敲擊點距離（稱為支距）。接著移動接收器至第二處標示位置繼續上述步驟，一直到接收器位置達到測線的另一端即完成整個試驗。

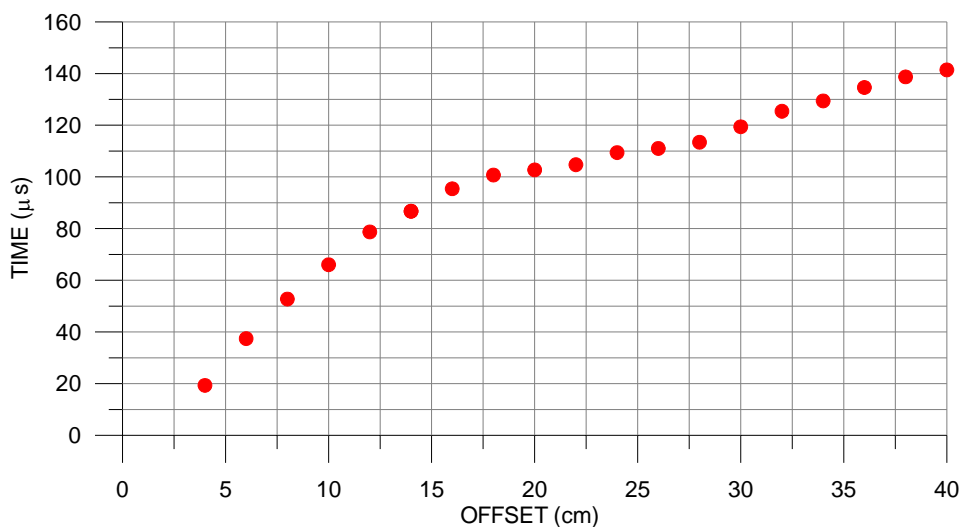
## 8.0 計算方法

8.1 繪製每一個支距位置的接收波形記錄，並以人為方式挑選首達波起始時間（Onset）。挑選過程需留意波形的頻率、振幅及視速度（Apparent Velocity），三者均代表合理且一致性的波訊。

8.2 再將各筆記錄的支距與起始時間繪製成支距-走時圖。圖二為檢測案例資料，近支距為 4cm，遠支距為 40cm，資料間距為 2cm，最小首達波走時約為  $20\mu s$ ，最小首達波走時約為  $140\mu s$ 。

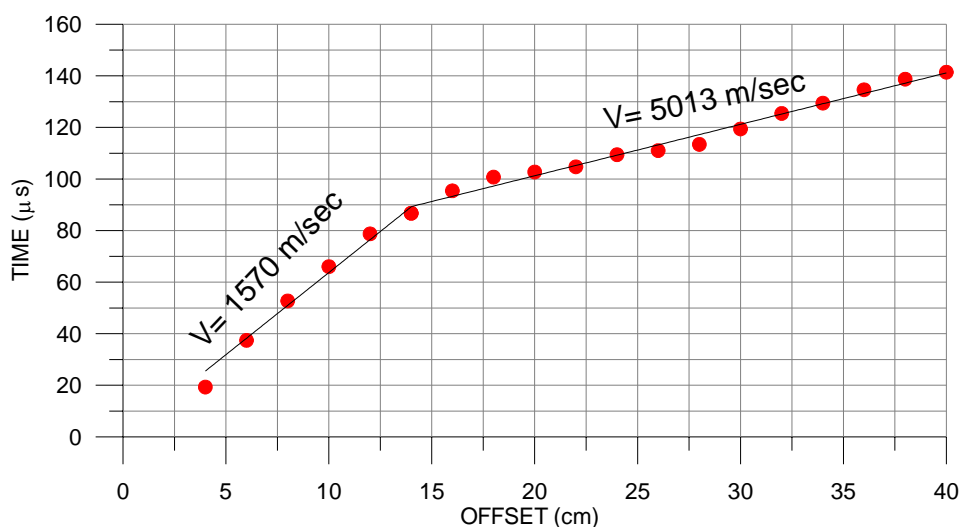


8.3 圖三為上述案例折射資料分析結果。圖中兩段直線係為較近支距與較遠支距兩群走時資料的回歸分析結果。其中較近支距走時資料斜率倒數約為 1,570m/sec，表示較近支距之首達波波速較低，應為沿混凝土表面傳遞的表面波。較遠支距走時資料斜率倒數約為 5,013m/sec，此波速與鋼筋波速一致，故較遠支距之首達波應為沿著鋼筋傳遞的折射波。斜率轉折點約位於支距 14cm 處，該處稱為臨界距離。鋼距上述分析結果即可公式一與公式二計算求得保護層厚度。



圖二 支距-走時圖

(資料來源：本研究整理)



圖三 折射資料分析結果

(資料來源：本研究整理)

## 9.0 試驗報告

報告內容應包含：

- 9.1 前言：說明計畫名稱、地理位置、委託單位、檢測目的、檢測單位及檢測時間等。
- 9.2 基地概況：包含擋土牆所在平面位置圖、蒐集到之相關地質調查資料、設計圖、竣工圖、歷年來災害及修復勘查及施工記錄、照片及相關檢監測資料等。
- 9.3 儀器設備。
- 9.4 檢測步驟。
- 9.5 現地試驗說明、試驗過程照片及資料處理。
- 9.6 檢測結果與判識
- 9.7 結論與建議或其他重要事項說明。

## 10.0 名詞解釋

10.1 測線：係標示於探測物體表面，並垂直於目的物走向的一條線，在此線上以等間距方式標示測點位置。試驗時將敲擊器及接收分別放置於適當測點。

10.2 採樣時間間距：此數值為硬體設定參數，與波形記錄的解析度有關，數值愈小解析度愈高。

### 第三節 敲擊回音法應用於土(岩)釘 灌漿完整性檢測

#### 1.0 範圍

- 1.1 本作業模式係說明敲擊回音法應用於埋設土(岩)釘灌漿完整性檢測的試驗方法、步驟與儀器設備等。
- 1.2 本作業模式適用之土(岩)釘，包含邊坡、地下開挖或隧道開挖時進行支撐工之土(岩)釘，但不包含接桿式岩釘。

#### 2.0 重要事項

- 2.1 儀器設備單元應包含敲擊源、接收器、數位類比轉換器、主機及分析軟體等。
- 2.2 本試驗方法係於土釘鍵體頂端表面錘擊造成擾動，形成之暫態應力波向下傳遞，在底部或斷裂位置形成反射波，返回頂端，由接收器感應表面振動，並記錄成為波形資料。反射波走時為 $\Delta T$ ，土釘縱波波速為 $V$ ，故可計算求得反射波發生的深度位置( $L$ )，參見下式。值得注意的是，反射波深度位置可能為多處。

$$L = \frac{V \cdot \Delta T}{2} \dots\dots\dots (公式一)$$

- 2.3 上述計算結果係用於推估土釘埋設長度或材料物性改變的深度，若檢測結果與設計資料長度不符，則反射波發生因

素可能來自於內部灌漿不確實、長度短少或鋼筋截面積變化等。若有多筆試驗資料，可藉由波形相似性協助進行研判。

2.5 本檢測方法係於土（岩）釘鍵體出露節面位置進行試驗，故進行現地試驗前，應儘可能蒐集土（岩）釘設計圖說，以協助選用設備及資料判讀。對於試驗結果有疑慮時，得採局部破壞試驗，如拔出試驗，進行驗證。

2.6 一般鋼材波速約為 5,800 至 5,950 m/sec，但鋼筋為細長體材鋼材化合物，具頻散效應，一般試驗資料顯示波速可能自 4,800m/sec 至 5,400m/sec，含碳元素鋼筋波速可能稍低。

2.7 受漿液及土層包覆影響，土（岩）釘波速將低於裸露鋼筋波速。案例研究結果顯示，在漿液水灰比約為 0.4 至 0.6 間，土（岩）釘回波速度約 3,480m/sec，可作為工址應用波速參考值。

### 3.0 試驗目的

3.1 本試驗基本上可作為土（岩）釘灌漿完整性檢測，並可應用作為土（岩）釘斷裂位置、斷面積變化位置等檢測。

### 4.0 方法限制

4.1 現地試驗須於土（岩）釘鍵體截面積進行，故進行檢測前，需先敲除表面表面保護措施或包覆之噴凝土，使岩釘出露，並切除局部連接之鋼絲網，再將鋼筋出露截面積以砂輪機進行修整，以利接收器裝設。

4.2 若有承壓版及螺帽，則須將承壓版及螺帽取下，在拆卸過

程進行之錘擊，不可碰及土（岩）釘。

4.3 鍵體需為鋼棒形式，不可為鋼索（strand）形式，鍵體直徑必須不小於 2.5cm，需有足夠空間，供裝設訊號接收器及進行敲擊。鍵體應為一體成形，不可以鋼筋續接器或焊接方式接桿，鍵體不可彎曲。

4.4 一般最大檢測深度可達約 10m，但在無漿液包覆狀態下，可達 20m 以上。

4.5 檢測方法內含較多的理論與技術，且須因應現地狀況採取不同的檢測方式、資料處理方法與判讀技巧，故建議仍由專業人員進行，以提高資料可信度及準確性。

## 5.0 儀器設備

5.1 儀器設備單元應包含敲擊源、接收器、數位類比轉換器、主機及分析軟體等。

5.2 敲擊源：採用可感測鋼珠敲擊器或其他體積小、重量輕之鋼珠敲擊器或小手錘，以期激發高頻暫態應力波。但須注意敲擊器面積不可過大，應小於土釘截面尺寸。

5.3 接收器：應為寬頻且高感度位移計、速度計或加速度計。與土釘表面的接觸面積需足夠小，反映出的訊號電壓與垂直表面位移（速度或加速度）成正比，且不需使用接合液增加耦合，並須瞭解接收器自振頻率。

5.4 高速資料擷取卡：電源需可由電池或交流電供應。

5.5 主機：用於儲存資料擷取卡輸出之數位資料，並進行訊號處理與分析。一般可為筆記型電腦或工業用觸控面板電腦，電源需可由電池或交流電供應。

5.6 分析軟體：包含資料蒐集及處理等功能，可進行硬體設定、即時顯示波形記錄及資料處理、分析、列印等功能。

## 6.0 準備工作

6.1 設備檢查：檢查資料擷取卡電源供應是否充足、主機電源供應是否充足、訊號連接線是否破損、接頭位置是否鬆脫、軟體功能是否正常、硬碟空間是否足夠、接收器訊號是否正常等。

6.2 資料蒐集：蒐集土（岩）釘相關資料，包含地質調查資料、設計圖、竣工圖、施工記錄、照片及相關資料等。

6.3 現地勘查：根據上述資料蒐集結果，進行必要之現地勘查工作，以瞭解土（岩）釘現況及適合進行探查之範圍。

## 7.0 試驗步驟

7.1 儀器設備組裝及暖機：將敲擊器、接收器、主機等單元連接，打開電源進行測試，並進行施測參數設定，包含數位資料個數及採樣時間間距。

7.2 採樣時間間距與數位資料個數並無限制，惟採樣時間間距與資料解析度有關，一般採  $10\ \mu\text{s}$  即可達到 5cm 的資料精度。惟兩者乘積表示紀錄時間長度，必須大於埋設土（岩）釘底部反射波雙程走時的兩倍以上，方能記錄較兩次以上的重覆反射波，利於資料處理及研判。另資料個數較多造成資料處理速度較慢，亦較耗費記憶體。

7.3 若資料處理需於頻率域內進行，則採樣時間間距與最大頻率解析度有關，故採較小設定可得高頻寬資料，數位資料個數並無限制，惟兩者乘積表示紀錄時間長度，必須大於

埋設土(岩)釘底部反射波雙程走時的兩倍以上。

- 7.4 將接收器放置於土釘表面，並輕壓接收器使其與土釘接觸，再以銅珠敲擊器進行敲擊。敲擊時必須注意接觸點必須位於土釘表面，且不可碰及接收器，參見照片一。



照片一 敲擊回音法試驗過程

(資料來源：本研究整理)

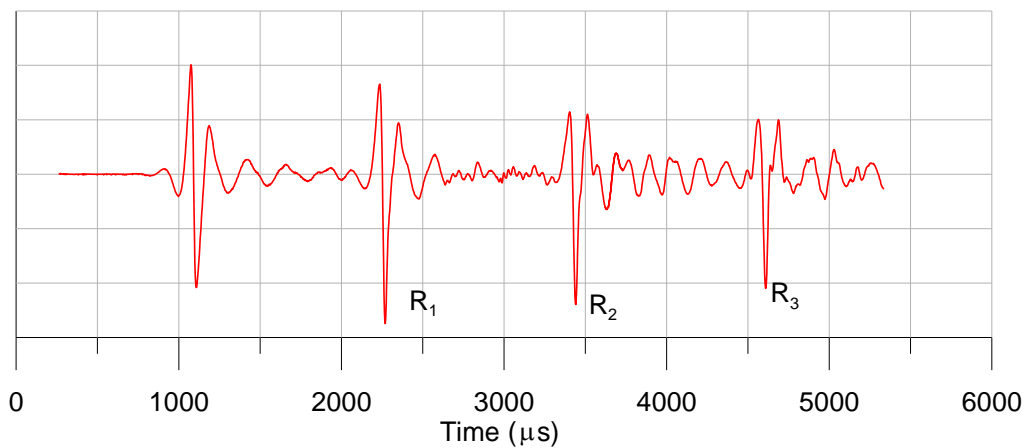
- 7.5 檢查波訊並儲存正常波形資料。若波形持續發生不正常現象或無法正常記錄，則可能為高速資料擷取卡電源供應不足，須進行電池更換。若接收波形資料強度微弱，可採較大敲擊器進行試驗或於資料處理時進行資料疊加。

- 7.5 重複以上試驗步驟，一直到三次波形資料內容一致，即完成試驗。

## 8.0 計算方法



- 8.1 繪製敲擊波形與接收波形記錄。
- 8.2 檢視波形正確性及完整性，必要時可進行疊加 (stacking) 及濾波 (filtering) 以增加真實訊號強度。
- 8.3 挑選接收波形記錄中重複出現反射波，如圖一中標示  $R_1$ 、 $R_2$  與  $R_3$  之尖端位置，並計算各位置之時間間距，再求取平均值 ( $\Delta T$ )，依公式一計算土 (岩) 釘長度。

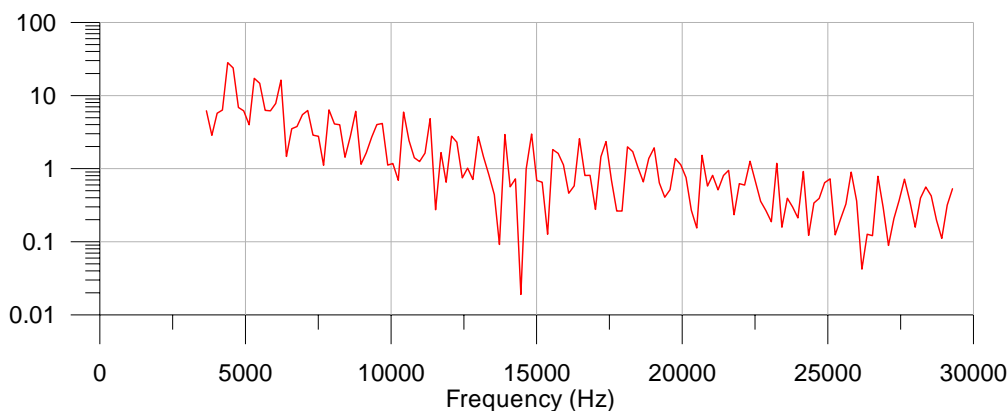


圖一 時間域回波資料

(資料來源：本研究整理)

## 9.0 力學導納方法

- 9.1 將回波記錄經快速傅利葉轉換至頻率域，挑選特徵振幅出現之頻率位置，圖二為頻率域資料，其中各波峰位置為特徵振幅，以人為挑選其頻率並計算各頻率間距。



圖二 頻率域回波資料

(資料來源：本研究整理)

9.3 求取各頻率間距之平均值 (F)，並採合理波速 (V)，以公式二計算土 (岩) 釘長度。

$$L = \frac{V}{2F} \dots\dots\dots (公式二)$$

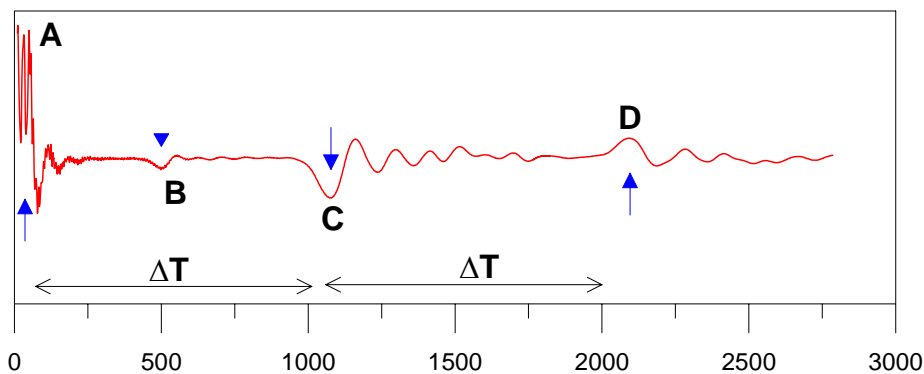
### 10.0 灌漿完整性分析

10.1 圖三為部分灌漿回波歷時曲線示意圖。圖中標示 A、B、C、D 分別為直達波、灌漿面反射波、土 (岩) 釘底部反射波及底部重複反射波。其中 B 與 C 波形相位相同，而 A 與 D 波形相位相同。

10.2 上述反射相位與直達波相位相差 180 度。一般裸露鋼筋的回波試驗，其歷時紀錄亦顯示相當多高頻應力波重複反射

訊號，惟各訊號相位均相同。此係因裸露鋼筋底部與空氣接觸，其介質阻抗（Impedence）特性係由強變弱，故反射係數為正值，對於反射波相位並無改變。而灌漿材料的包覆使得介質阻抗（Impedence）特性係由弱變強，故反射波相位有 180 度的改變，而再次反射時，也就是第一次複反射（First Multiple），相位再進行 180 度的改變，相當於 360 度的相位差，等於無改變，故第一次複反射訊號與直達波相位相同。此波形特徵可用以了解灌漿情況及位置。

10.3 故 AC 段與 CD 段時間間距可用以估算埋設土（岩）釘長度，而 AB 段時間間距可用以估算未灌漿段長度。



圖三 部分灌漿回波

（資料來源：本研究整理）

## 11.0 試驗報告

報告內容應包含：

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

11.1 前言：說明計畫名稱、地理位置、委託單位、檢測目的、檢測單位及檢測時間等。

11.2 基地概況：包含土(岩)釘所在平面位置圖、蒐集到之相關地質調查資料、設計圖、竣工圖、施工記錄、照片及相關資料等。

11.3 儀器設備。

11.4 檢測步驟。

11.5 現地試驗說明、試驗過程照片及資料處理。

11.6 檢測結果與判識

11.7 結論與建議或其他重要事項說明。

## 12.0 名詞解釋

12.1 介質阻抗：一般定義為材料的密度與波速的乘積。

## 第七章 結論與建議

本研究共完成透地雷達、敲擊回音法、鋼筋腐蝕電位法等檢測方法試驗工作，研究內容包含物理模型驗證及工址實測應用，其中鋼筋混凝土擋土牆物理模型共有三組，土釘模型共有六組，實際工址應用包含六處鋼筋混凝土擋土牆及十二處岩釘案例，透地雷達試驗總長度為 201m，符合合約規範工作內容及數量。

### 第一節 結論

- 一、採高頻透地雷達天線進行擋土牆鋼筋保護層厚度、搭接位置、深層鋼筋等探查應用，可獲得相當準確的檢測資料，特別可適用於極小厚度檢測，且檢測方式不受混凝土表面不平整、粉塵及裝飾材料阻絕等影響。惟鋼筋間距之疏密將影響檢測結果，一般而言，鋼筋間距大於鋼筋保護層厚度時，所得檢測結果較為準確。而緊密的表層鋼筋排列將使干擾雷達入射波，使得深層反射波微弱，影響第二層及第三層鋼筋探查結果。
- 二、進行鋼筋尺寸檢測時，採用目前商用透地雷達設備仍不足以區分小尺寸鋼筋。而採用渦電流形式鋼筋檢測儀（Covermeter）進行鋼筋保護層探查時，對於緊密排列鋼筋的狀況下，除可應用於鋼筋尺寸檢測外，亦能進行極小保護層的探查，惟探查資料仍無法進行鋼筋定位。惟探查方式應採合理方式進行，對於尺寸較大且排列較

為緊密的鋼筋，應採用較大的高程距離（h）進行資料蒐集，方可獲得可信度較高的檢測結果。

三、對於擋土牆鋼筋間距低於 10cm 之探查，本研究認為採高頻透地雷達方法與震波探勘發法均可獲得令人買一的探查結果。其中地球物法探勘方法中的折射震測與零支距反射震測，兩者均可有效地應用於保護層厚度檢測，且較小的保護層厚度、緊密排列的鋼筋及較大的鋼筋尺寸等特殊狀況下，折射波及反射波較為顯著，檢測結果準確度較高。由於採敲擊方式作為震源，因此導入混凝土結構物的能量及頻率可受人為控制，惟接收器與混凝土表面的接觸狀況實為影響試驗成敗的關鍵。故進行試驗前需對適體表面進行適當的清理工作，以去除劣質混凝土及表面起伏過大的影響。

四、對於第二、三層鋼筋的定位而言，採用透地雷達方法可獲得第二層鋼筋訊號，而較難進行第三層鋼筋定位；惟表層鋼筋排列將影響探查結果，一般而言排列間距小於 10cm 的表層鋼筋將嚴重干擾雷達入射波，使得深層反射波微弱，影響第二層及第三層鋼筋探查結果。

五、透地雷達方法仍無法進行鋼筋腐蝕初期現象檢測，推估因鋼筋腐蝕初期僅生成外層環狀剝離的氧化鐵，而此時環狀氧化鐵尺度相當微小，並非雷達波可辨認，但一但時間較為久遠，鋼筋軸周圍裂縫生成，嚴重時，局部裂縫將彼此穿透連接，形成局部內部裂縫發達區域或水平一致性裂隙，則應可採透地雷達或敲擊回音法進行內部

局部破壞範圍或水平裂隙的探查。

- 六、敲擊回音法應可有效地檢測土（岩）釘灌漿完整性，尤其對於局部灌漿的土（岩）釘，檢測資料可有效地反應漿體包覆情況，可根據時域資料中反射波的時距，並選擇合理回波波速，估算未灌漿段長度及漿體包覆長度。一般而言，灌漿狀況較為簡易時，可獲得較準確的檢測結果，若漿體包覆狀況較為複雜時，則僅能獲得鄰近表面的包覆狀況。
- 七、既有 TDR 檢測方法需預埋一條與土釘等長度的同軸電纜，並進行同軸電纜長度量測。此方式僅了解電纜長度，無法得知真實土釘埋設深度。香港近期相關研究與本研究均直接檢測土釘本體，此方式可完全杜絕既有方法的缺點，且驗證結果顯示土釘底部的 TDR 回波明顯，回波走時可用以估算土釘埋設長度。惟檢測方式仍需採預埋單股線或對鍵體進行處理，仍不適用於既有土（岩）釘檢測。
- 八、微型樁結構與基樁類似，故可應用基樁檢測方式進行施工品質了解，目前國內較常採用之基樁非破壞檢驗方法為埋管法與表面反射法。惟埋管法需事先在鋼筋籠內裝設數支 PVC 管，對於微型樁而言，並不適合。表面反射法係樁頭以鐵錘敲擊，在鄰近位置以探頭收錄反射資料，根據反射波形及發生時間位置，研判樁身之長度、斷裂、縮頸與擴頸等缺陷。此方法無須任何前置作業，且施測快速，較適用於微型樁檢測。

## 第二節 建議

### 建議一

建立透地雷達應用於 RC 擋土牆檢測技術標準：立即可行建議

主辦機關：公共工程委員會

協辦機關：經濟部、交通部、內政部、水保局。

建立透地雷達應用於鋼筋混凝土擋土牆檢測技術及標準作業模式，供工程檢測人員有所依循。

### 建議二

建立折射震波探勘方法應用於 RC 擋土牆檢測技術標準：立即可行建議

主辦機關：公共工程委員會

協辦機關：經濟部、交通部、內政部、水保局

建立折射震波探勘方法應用於鋼筋混凝土擋土牆保護層厚度檢測技術及標準作業模式，供工程檢測人員有所依循。

### 建議三

建立敲擊回音法應用於土(岩)釘檢測技術標準：立即可行建議

主辦機關：公共工程委員會

協辦機關：經濟部、交通部、內政部、水保局

建立敲擊回音法應用於土(岩)釘檢測技術及標準作業模式，供工程檢測人員有所依循。

### 建議四

發展檢測 RC 擋土牆底板部分之方法：中長期建議

主辦機關：公共工程委員會

協辦機關：經濟部、交通部、內政部、水保局



本計劃所採用非破壞檢測方法，僅能針對可觸及擋土牆的部分進行探查。對於被表土覆蓋的擋土牆底板部分，仍無法進行探查，惟此部份對於結構安全檢查亦相當重要，建議未來可蒐集相關探查方法並進行適用性研究。

#### 建議五

發展檢測各類型擋土牆之方法：中長期建議

主辦機關：公共工程委員會

協辦機關：經濟部、交通部、內政部、水保局

本計畫係應用非破壞檢測方法於鋼筋混凝土擋土牆檢測的可行性研究，目前已證實為透地雷達與敲擊回音法等方法適用性應無疑問，且資料準確度亦相當高。惟擋土牆形式相當多樣，且目前國家重大工程中，許多工址擋土設施均採生態工法，建議宜針對各形式擋土構造進行資料蒐集，並了解非破壞檢測技術應用之可行性。

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

## 附錄一

### 物理模型製作過程照片

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



擋土牆物理模型

(資料來源：本研究整理)



擋土牆物理模型

(資料來源：本研究整理)



擋土牆物理模型

(資料來源：本研究整理)



土(岩)釘物理模型

(資料來源：本研究整理)

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



混凝土澆置

(資料來源：本研究整理)



擋土牆混凝土模型

(資料來源：本研究整理)

## 附錄二

### 第一次專家座談會專家意見



## 第一次專家座談會專家意見

一、主題；『非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)』

專案計畫第一次專家座談會議。

二、時間：95年6月14日(星期三)上午11時正

三、地點：本社大地工程研究中心會議室

(台北市逸仙路26巷7號B1)

四、主持人：冀樹勇經理

五、記錄：葛文忠

六、出席學者專家：

內政部建築研究所陳建忠組長

內政部建築研究所李怡先博士

營建研究院李維峰博士

台灣大學土木系林銘郎教授

蔡道賜博士

中興社：高憲彰副理

中興社：李國榮研究員

七、主辦單位：財團法人中興工程顧問社

八、研究團隊：冀樹勇經理、高憲彰副理、葛文忠研究員、

李國榮研究員、林金成研究員、蔡政憲工程

師



## 九、專家意見與答覆

專家學者意見	答覆
<p>1. 林銘郎教授</p> <p>2. 建研所委辦案與國科會委辦案性質不同，就本案而言，委辦案的精神應遵循既有模式及技術，並依現地個別案例的特殊考量，進行方法修正與改進，故最重要的應為方法可行性研究。為落實方法實用性，建議找一些老舊社區擋土牆進行實測，以了解方法再實際應用時的限制條件。</p> <p>3. 土（岩）釘灌漿完整性研究目前看來似乎已有初步成果，惟地錨握裹力的檢測相當重要，建議是否可朝此方向嘗試應用。</p> <p>4. 實測案例建議幾處地點，如萬芳國宅、公教人員訓練中心、九份地區及台北藝術大學等曾發生問題的邊坡擋土牆，上述部分工址曾進行持續監測工作，故可配合監測位置與資料進行檢測應用與資料解釋。</p>	<p>1. 本案規劃下階段工作包含現地應用，將尋求適合工址進行方法測試。</p> <p>2. 因地錨鍵體部分為多束纏絞在一起的鋼索，較土岩釘複雜許多，且鋼索截面積相當小，目前尚無適用檢測設備。</p> <p>3. 遵照辦理，將選擇適合工址進行方法測試。</p>
<p>李維峰副所長</p> <p>1. 檢測方法的實用性相當重要，對於擋土設施而言，進行安全檢查最重要的目的是了解整體安全並進行評估。但是一般非破壞技術的檢測結果，例如內部缺陷、不完整或破壞程度等資料，要如何應用於評估作業，此部份應如何進行。</p> <p>2. 建議本研究應明確定義檢測技術之應用並非用於爭議之處理即責任之釐清等，應為提供一項方法技術供參考應用。</p> <p>3. 目視檢測應為非破壞技術之一種，且最重要的一項。破壞試驗結雖然明確，但其僅為”點的資料”，非破壞檢測結果可形成”面”的資料，兩者相輔相成。目前非破壞檢測技術檢測結果多為定性描述，需藉局部破壞試驗與定量描述建立關係，以確認非破壞檢測結果。且非破壞檢測的方法與數量的經濟性、</p>	<p>1. 本案主要工作係為檢測技術的適用型研究，目前此階段尚未包含評估作業的研究工作，需由業主考量是否需要另案研究。</p> <p>2. 遵照辦理，將於報告前言及結論部分加強說明。</p> <p>3. 遵照辦理，將於技術說明及結論部分加強說明。</p>

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

<p>可行性及成效亦需在規劃階段納入通盤考慮。</p>	
<p>蔡道賜博士</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 非破壞檢測所得的物理參數需對應成為檢測目的可使用的資料，之間需依賴相當多試驗結果建立關係，並作為技術改良的依據。</li> <li>2. 土(岩)釘結構顯示應有明顯頻散行為，試驗結果亦顯示回波速度即頻率含量有明顯不同，可由此處著手進行灌漿完整性與回波的敏感度分析。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本案將依研究需要，進行足夠的物理模型試驗，建立檢測目的與物理參數間的基本關係。</li> <li>2. 本案將藉由數值分析與模型試驗了解應力波頻散特性。</li> </ol>
<p>李怡先博士</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 期中報告內容主要為工作進度報告，不需態偏重技術說明與探討，重要的是說明與原研究規劃目的相關性。</li> <li>2. 以往期末報告內容多為許多圖表及數據，令許多第一次閱讀者需要花較多時間了解，希望考慮在正式完整報告前增加厚度僅十數頁的綱要或使用說明，可供使用者即時了解及應用報告內容。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 遵照辦理。</li> <li>2. 此部份將與業主進一步溝通，再期末報告前做出決定</li> </ol>

## 附錄三

### 第二次專家座談會專家意見

## 第二次專家座談會專家意見

一、主題；『非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)』

專案計畫第二次專家座談會議。

二、時間：95年10月14日(星期六)上午10時至12時

三、地點：本社大地工程研究中心會議室

(台北市逸仙路26巷7號B1)

四、主持人：高憲彰副理

五、記錄：葛文忠

六、出席學者專家：

內政部建築研究所陳建忠組長

內政部建築研究所李怡先博士

華梵大學環境設計學系陳修副教授

蔡道賜博士

王文禮顧問

七、主辦單位：財團法人中興工程顧問社

八、研究團隊：冀樹勇經理、高憲彰副理、葛文忠研究員、  
李國榮研究員、林金成研究員、蔡政憲工程  
師

## 九、專家意見與答覆

專家學者意見	回覆
<p><b>蔡道賜博士</b></p> <p>(1) 鋼筋繞射訊號與雷達波波速、鋼筋號數、測線方向與鋼筋走向夾角均有關，應用於鋼筋號數探查時，建議宜先建立各類鋼筋號數的繞射波形。</p> <p>(2) 採鋼筋檢測儀進行鋼筋尺檢測時，將探頭墊高以進行二次探查。惟此時探頭與混凝土間存在空氣介質，是否影響檢測結果？</p> <p>(3) 土(岩)釘數值分析結果建議進行小波解迴旋處理(Wavelet Deconvolution)，以增進資料解析度。</p> <p>(4) 採透地雷達進行第二層鋼筋定位時，採移位資料處理方式應有助於資料解釋。</p>	<p>(1) 專家的建議相當值得本研究參考，惟因雷達波繞射波形的影響因素眾多，例如施測掃描速率及施測參數等，均對掃描結果有重大影響。而鋼筋檢測儀(Covermeter)因無上述參數設定與施測問題，故可建立大量資料庫工作檢測結果之比對。</p> <p>(2) 因探頭墊高之高度僅為1.5cm，空氣介質造成雷達波干擾較小，故應不影響解測結果。</p> <p>(3) 謝謝指教。本研究將採納建議，應用適當處理方法進行資料處理。本研究將採納建議，應用適當處理方法進行資料處理。</p> <p>(4) 謝謝指教。</p>
<p><b>陳修教授</b></p> <p>(1) 透地雷達應用於擋土牆探查，是否僅用以了解擋土牆受力變形。</p>	<p>(1) 透地雷達方法適用於擋土牆內部現況檢測，無法用於擋土牆力學行為調查。至於擋土變形調查宜採用一般光學量測方法。</p>
<p><b>王文禮顧問</b></p> <p>(1) 根據研究單位之簡報，本研究案針對”鋼筋混凝土擋牆”及’土(岩)釘’之非破壞性檢測技術等二大主題已有許多具體成果，顯見研究單位非常盡心盡力辦理本研究案。</p> <p>(2) 簡報曾述及透地雷達可應用於量測搭接鋼筋位置及鋼筋尺寸，惟於現地工址實際量測A、B、C、D鋼筋混凝土擋牆之說明，並未提及上述兩項，</p>	<p>(1) 感謝專家肯定。</p> <p>(2) 因現地工址試驗過程時間較短，故僅能進行局部方法應用及測試，無法完成所有方法現地試驗。惟本研究仍嘗試進一步尋找適當試驗工址，以驗證檢測方法。</p> <p>(3) 謝謝指教。</p> <p>(4) 謝謝指教。</p>

<p>請補充說明。</p> <p>(3) 簡報資料中前期研究之審查意見中曾提及”土(岩)釘長度檢驗重要性不及握裹力檢驗”，握裹力檢驗需配合完整性檢測、拉拔試驗及地質等方有結果，可於結論與建議章節中建議列為爾後之研究。</p> <p>(4) 簡報資料中已提出數項土(岩)釘完整性檢測之研究成果，實務上土(岩)釘灌漿體中，及其與土(岩)釘常有空隙存在，影響握裹力，可於結論與建議章節中建議建議為爾後之研究。</p>	
<p><b>李怡先博士</b></p> <p>(1) 微型樁之檢測應用是否可採土(岩)釘檢測方法？</p> <p>(2) 建議期末報告結論撰寫方式與合約條款一致？</p>	<p>(1) 因微型樁結構與基樁類似，檢測重點應著重於混凝土施工品質，而土(岩)釘係於鍵體進行試驗，兩者之資料解釋方法不同，惟試驗方式均為表面敲擊與接收方法。</p> <p>(2) 遵照辦理。</p>

附錄四  
期中審查專家意見

## 期中審查專家意見

一、主題：『非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)』

專案計畫期中審查專家會議。

二、時間：95年7月4日(星期二)上午9時30分

三、地點：內政部建築研究所會議室

四、主持人：陳建忠組長

五、記錄：李怡先

六、出席學者專家：

陳宏宇教授、陳建謀教授、黃健政組長、邱昌平顧問、  
內政部營建署戴昌毅先生、台北市政府工務局李衍清先生、  
台北縣政府蔡政勳先生、洪志忠先生、國家災害防  
救科技中心張志新先生、台灣省土木技師工會高文宗先  
生、台北市大地技師工會傅文鵬先生、台灣省土木技師  
工會拱祥生先生、內政部建築研究所陳建忠組長、內政  
部建築研究所李怡先博士、林建宏研究員、蕭嘉俊先生、  
陳宏亮博士

七、主辦單位：內政部建築研究所

八、研究團隊：冀樹勇經理、高憲彰副理、葛文忠研究員



## 九、專家意見與答覆

專家學者意見	回覆
<p>陳宏宇教授：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可補充不同的灌漿強度是否有不同的回波反應。</li> <li>2. 局部性的破壞性檢測工作應可補充說明。</li> <li>3. 引用文獻應更嚴謹。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將於期末報告中詳述。</li> <li>2. 將於期末報告中補充說明。</li> <li>3. 謝謝指教。</li> </ol>
<p>陳建謀教授：</p> <p>建議表列比較各種檢測方法之優缺點，如準確性、便利性及經濟性等方面進行考量。</p>	<p>將於期末報告中補充說明。</p>
<p>丘昌平顧問：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計劃為第二期，研究報告宜先介紹第一期之成果、問題點等。</li> <li>2. 研究案名稱針對山坡地安全，面向較廣，建議主標題之後加註-RC 擋土牆結構安全與土（岩）釘護坡安全之檢測。</li> <li>3. 任何結構安全之 NDT，大多需佐以原設計圖或竣工圖等圖說資料的研判。現場除了非破壞檢測外，必要時可採微破壞或可回復原強度之小局部破壞作檢測。</li> <li>4. 章節圖之表達宜有資深工程師再檢核修正。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將於期末報告中補充說明。</li> <li>2. 將與主辦單位討論是否可變更名稱。</li> <li>3. 謝謝指教。</li> <li>4. 謝謝建議</li> </ol>
<p>黃健政組長</p> <p>蒐集之文獻很多，應列表分析其在</p>	<p>將於期末報告中補充說明。</p>

非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

<p>國內適用不足，不適合的地方，並說明本研究可以增加改進的地方及未來的貢獻。</p>	
<p>國家災害防救科技中心張志新</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫收集詳細之文獻，可供未來國內建立非破壞檢測技術規範之參考。</li> <li>2. 本計畫利用模型試驗實際進行非破壞檢測，可為下一階段現地試驗之基本資料。</li> <li>3. 題目範圍”山坡地安全檢查”太大了，應根據計畫內容縮小題目範圍。</li> <li>4. 期中報告第三章中應提供模型試驗基本資料，例如混凝土配比、製作方法、鋼筋型號與尺寸等。</li> <li>5. 期中報告第四章中應提供透地雷達試驗示意圖。</li> <li>6. 圖 3.2 中若 cover depth=7.58cm，其不同的 slope 應為多少。</li> <li>7. 土（岩）釘檢測技術研究中，數值分析的條件應與敲擊回音法相近（數值分析土層材料波速為 200m/sec，敲擊回音法為何？）詳述各項檢測方法與步驟。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝指教。</li> <li>2. 謝謝指教。</li> <li>3. 將與主辦單位討論是否可變更名稱。</li> <li>4. 將於期末報告中補充說明。</li> <li>5. 將於期末報告中補充說明。</li> <li>6. 將於期末報告中補充說明。</li> <li>7. 將於期末報告中補充說明。</li> </ol>
<p>省土木技師公會高文宗</p> <p>擋土牆主筋一般位於填土側，實務</p>	<p>謝謝指教，目前研究案內容包含第二、</p>

<p>上非破壞性檢測無法判讀深層鋼筋，一般僅檢測第一層鋼筋，失去檢測目的。</p>	<p>三層鋼筋的檢測研究工作。</p>
<p>省大地技師公會傅文鵬</p> <p>1. 非破壞檢測各項解析結果（如鋼筋號數、排列間距、混凝土品質等）是否可明確應用相關結構體或構件之應力檢核？</p> <p>2. 在坡地社區中常見之破壞尚有地錨錨頭處鋼鍵及夾片鏽蝕導致斷裂及預力損失所致之災害，是否可對此兩項目研究非破壞檢測之應用。</p>	<p>1. 目前僅能針對幾何尺寸的檢測，尚無法了解結構體應力狀況。</p> <p>2. 地錨的形式與土（岩）釘差別很大，目前尚無任何可行的 NDT 方法可進行相關檢測。</p>
<p>北市土木技師公會</p> <p>1. 本研究非破壞檢測技術是否適用於其他鋼筋混凝土相關結構，如集水池等</p> <p>2. 應明確界定非破壞檢測技術之適用範圍。</p> <p>3. 是否可應用於地錨檢測。</p> <p>4. 專家學者的建議相當好，局部的破壞試驗是必須的。</p>	<p>1. 應可應用於一般鋼筋混凝土結構物。</p> <p>2. 將於期末報告中補充說明。</p> <p>3. 地錨的形式與土（岩）釘差別很大，目前尚無任何可行的 NDT 方法可進行相關檢測。</p> <p>4. 謝謝指教。</p>
<p>建研所李怡先博士</p> <p>1. 請承辦單位確實掌控研究案進度與時程。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>建研所陳建忠組長</p> <p>1. 有關預期完成之工作項目，其具體成果如何達成？請於文內充</p>	<p>1. 將於期末報告中補充說明。</p>

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

<p>分表達。</p> <p>2.有關推廣計畫部分，請詳細研擬操作。</p>	<p>2.將配合中華建築中心辦理山坡地社區推廣活動。</p>
--	--------------------------------

附錄五  
期末審查專家意見

## 期末審查專家意見

一、主題：『非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)』

專案計畫期末審查專家會議。

二、時間：95年11月14日(星期二)上午9時30分

三、地點：內政部建築研究所簡報室

四、主持人：陳建忠組長

五、記錄：李怡先

六、出席學者專家：

陳建謀教授、邱昌平顧問、陳宗禮總經理、內政部營建署戴昌毅先生、國家災害防救科技中心鄧敏政先生、陳聯光先生、台北市政府工務局胡鴻盛先生、台灣省土木技師工會施國欽先生、台北市大地技師公會林衍行先生、台北市土木技師公會拱祥生先生、中華民國建築師工會全聯會、台灣區綜合營造工程工業同業工會吳憲彰、建築研究所林建宏研究員、王暉堯研究員、蕭嘉俊研究員

七、主辦單位：內政部建築研究所

八、研究團隊：冀樹勇經理、高憲彰副理、葛文忠研究員

專家學者意見	回覆
<p>陳建謀教授</p> <p>1. 非破壞檢測技術未來應用範圍非常廣泛，將不僅限於山坡地安全檢查，尤其是應用透地雷達以及地球物理法檢測鋼筋尺寸以及保護層厚度等資料，將可廣泛應用於一般建築物安全檢測，對於未來一般老舊建築物定期安全檢測以及地震發生後之安全檢測，將可發揮廣大效益，目前本研究已完成SOP，對於未來推廣助益甚大，建議表列各種檢測方法之經費需求以及檢測時間以便業者推廣應用。</p> <p>2. 參考文獻部分建議加入：蔡昌明，「結合非破壞性檢測技術與破裂強度理論於損傷鋼筋混凝土結構安全評估之研究」（2003 中華大學土木工程研究所碩士論文），並參考其研究內容。</p>	<p>1. 因各種檢測方法之經費與時間變異相當大，與檢測目的、位置與數量等因素接有關聯，且不同檢測單位有不同人力配置，故相當難以表列各項經費需求，建議未來有需求時，就特定檢測目的進行多家檢測單位訪價及估算檢測所需時間。</p> <p>2. 遵照辦理。</p>
<p>丘昌平顧問</p> <p>1. 本研究主要在以透地雷達、敲擊回音法、渦電流法（所需之儀器及標準作業程序或方法）應用於物理模型及現地試驗探</p>	<p>1. 感謝評審委員意見。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> <p>3. 遵照辦理。</p>

非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

<p>求 RC 擋土牆鋼筋尺寸、間距、保護層厚度、內部破壞範圍或劣化狀況等以及土釘長度及灌漿品質等特性。內容嚴謹，成果良好。</p> <p>2. 專家座談與專家意見若可採用者請在本文中提出之，如本文中所言之擋土牆前皆加入 RC 二字、目視檢測、局部微傷鑽敲檢驗-無礙原結構性能之方法。</p> <p>3. 參考文獻中英文共 34 篇，宜於文中提及之。</p>	
<p>陳宗禮</p> <p>1. 本研究對於非破壞檢測技術介紹極為深入值得肯定研究之用心。</p> <p>2. 對於所列之檢測技術實際應用於山坡地安全維護時，對於新施工完成或既存老舊坡面穩定設施之安全性評估，究竟適用在工程驗收或殘存耐力診斷評估較為有效，宜更深入探討其差異。</p> <p>3. 山坡地安全維護措施常因設計錯誤或天災或歷時變化而有不同危險因子存在，關於本研究內容在應用時應有不同的檢測</p>	<p>1. 感謝評審委員意見。</p> <p>2. 本研究目的係應用於坡地社區擋土設施安全檢查，故原先規劃為應用於既有設施安全評估工作。惟研究過程發現，採用相同的非破壞檢測方法亦適用於新建工程驗收，這是因為非破壞檢測方法係用於了解擋土設施的物理現象，而不論新建或老舊的擋土設施，其物理參數可能有些微變化，但物理現象仍為相同，故可採用適當物理參數解釋不同階段的物理現象。</p> <p>3. 進行個別案例的既有設施安全評估工作時，的確需要針對工程設</p>



<p>方法，若能併入闡述則更完整可行。</p>	<p>計、施工、天災及維護等各階段問題進行了解，再選用適當手段進行現況調查。惟本研究所列非破壞檢測方法僅適用於破壞現況或工程品質調查，無法用於了解破壞成因。</p>
<p>施國欽</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 既有的擋土牆基礎埋入深度、基礎厚度及長度、基底剪力樺尺寸及位置，有無更好的檢測方法。</li> <li>2. 擋土牆基礎若為樁基礎，可否檢測其長度及樁徑。</li> <li>3. 土（岩）釘若間距較小時，是否可利用相鄰兩支土（岩）釘導電來檢視土（岩）釘長度。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 因擋土牆基礎上方常有相當厚度的表土覆蓋，非破壞檢測技術無法進行基礎探查，較可行的方式需局部開挖表土，使基礎外露，此時非破壞檢測始能派上用場。</li> <li>2. 與上述相似，一但有表土覆蓋或上部結構完成，則無法以非破壞檢測方法進行探查。</li> <li>3. 一般土（岩）釘間距均在數公尺以上，且目前並無任何資料或研究結果顯示可利用兩支相鄰鋼筋進行時域反射試驗。惟此課題值得進一步研究。</li> </ol>
<p>北市土木技師工會</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 報告中所列標準作業模式建議加入名詞解釋與流程圖。</li> <li>2. 請詳述微型樁檢測方法。</li> <li>3. 請詳述 P.237 高頻天線為何？</li> <li>4. 請於結論中詳述不同檢測儀器及方法。</li> <li>5. 結論中所述主辦及協辦機關建</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將於期末報告標準作業模式增加名詞解釋，惟各非破壞試驗方法較難以流程圖表示，仍採文字詳細說明。</li> <li>2. 遵照辦理。</li> <li>3. 本研究所指高頻天線為 1.5GHz 天線。</li> <li>4. 已於表 3-7 中說明。</li> </ol>

非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

<p>議改為事業主管機關，並加入水保局。</p>	<p>5. 遵照辦理。</p>
<p>省大地技師工會</p> <p>1. 土(岩)釘灌漿握裹體斷面之完整性為影響土(岩)釘強度是否發揮之主要因素，請說明本研究技術能否進行握裹體斷面之完整性。</p> <p>2. 本案為研究案，建議將本案所採用檢測技術之限制條件詳列，以為日後機關、相關業者考慮選用之參考。</p>	<p>1. 土(岩)釘灌漿握裹體斷面完整性包含漿體與鍵體的接觸完整性、漿體本身完整性及漿體與土體(岩盤)接觸完整性。就數值分析與物理模型試驗結果而言，若三者完整性均相當佳時，表示材料間接觸狀況良好，暫態應力波將會大量溢失至土體中，導致反射波微弱。若漿體與鍵體接觸不完整或漿體與土體(岩盤)接觸不完整，均會導致明顯反射波，故由反射波的能量大小及頻率內涵，可推估斷面完整性。</p> <p>2. 遵照辦理，將於期末報告結論增加說明檢測技術之限制條件。</p>
<p>陳組長</p> <p>1. 請補充說明國內坡地社區應用土(岩)釘工法案例。</p>	<p>遵照辦理，將於期末報告文獻回顧增加說明國內坡地社區應用案例。</p>

## 附錄六

### 坡地社區防災教育宣導活動

## 坡地防災教育宣導行程表

時間：95年9月9日(星期六)上午9點20分  
 地點：名人藝術山莊社區(中和市中興街180巷)  
 計畫名稱：山坡地社區安全防治輔導與諮詢計畫(三)  
 主辦單位：內政部建築研究所  
 執行單位：財團法人中華建築中心

時間	課程名稱	課程內容	主講人
9:20~9:50 (30分鐘)	報到		
9:50~10:00 (10分鐘)	開幕致詞		林杰宏 副執行長
10:00~10:40 (40分鐘)	坡地防災教育訓練	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 社區防災之重要性</li> <li>✓ 坡地災害</li> <li>✓ 安全監測</li> </ul>	莊睦雄 博士
10:40~10:45 (5分鐘)	休息時間		
10:45~11:05 (20分鐘)	社區檢視	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 社區環境現況解說</li> </ul>	莊睦雄 博士
11:05~11:10 (5分鐘)	休息時間		
11:10~12:00 (50分鐘)	坡地監測設施介紹 與操作示範	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 簡易監測設施之安置</li> </ul>	張志彰 技師 陳顥銘 研究員



財團法人中華建築中心  
 電話：02-8667-6398  
 網址：www.cabc.org.tw

# 坡地防災教育宣導行程表

時間：95年9月9日(星期六)下午14點20分

地點：花園新城社區(台北縣新店市金興路40之1號)

計畫名稱：山坡地社區安全防治輔導與諮詢計畫(三)

主辦單位：內政部建築研究所

執行單位：財團法人中華建築中心

時間	課程名稱	課程內容	主講人
14:20~14:50 (30分鐘)	報到		
14:50~15:00 (10分鐘)	開幕致詞		林杰宏 副執行長
15:00~15:40 (40分鐘)	坡地防災教育訓練	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 社區防災之重要性</li> <li>✓ 坡地災害</li> <li>✓ 安全監測</li> </ul>	莊睦雄 博士
15:40~15:45 (5分鐘)	休息時間		
15:45~16:05 (20分鐘)	社區檢視	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 社區環境現況解說</li> </ul>	莊睦雄 博士
16:05~16:10 (5分鐘)	休息時間		
16:10~17:00 (50分鐘)	坡地監測設施介紹 與操作示範	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 簡易監測設施之安置</li> </ul>	張志彰 技師 陳顯銘 研究員



財團法人中華建築中心

電話：02-8667-6398 敬邀

網址：www.cabc.org.tw

## 坡地防災教育宣導行程表

時間：95年9月10日(星期日)上午9點20分  
 地點：馥記山莊社區(台北縣汐止市秀山里秀山路2號)  
 計畫名稱：山坡地社區安全防治輔導與諮詢計畫(三)  
 主辦單位：內政部建築研究所  
 執行單位：財團法人中華建築中心

時間	課程名稱	課程內容	主講人
9:20~9:50 (30分鐘)	報到		
9:50~10:00 (10分鐘)	開幕致詞		林杰宏 副執行長
10:00~10:40 (40分鐘)	坡地防災教育訓練	✓ 社區防災之重要性 ✓ 坡地災害 ✓ 安全監測	莊睦雄 博士
10:40~10:45 (5分鐘)	休息時間		
10:45~11:05 (20分鐘)	社區檢視	✓ 社區環境現況解說	莊睦雄 博士
11:05~11:10 (5分鐘)	休息時間		
11:10~12:00 (50分鐘)	坡地監測設施介紹 與操作示範	✓ 簡易監測設施之安置	張志彰 技師 陳顯銘 研究員



財團法人中華建築中心  
 電話：02-8667-6398 敬邀  
 網址：www.cabc.org.tw

附錄六 坡地社區防災教育宣導活動



(資料來源：本研究整理)



## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)



(資料來源：本研究整理)



## 參考書目

### 中文部分

1. ”非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用（一）”，2005，內政部建築研究所研究報告。
2. 彭朋畿、陳明正、黃進國、王仲宇、翁德富，2006，”鋼筋混凝土結構物內鋼筋尺寸檢測法”，第十三屆非破壞檢測技術研討會論文集。
3. 張益瑄，2001，”三維線性走時內差法於土木構件斷層掃描之應用”，中央大學土木工程研究所碩士論文。
4. 王仲宇、陳志賢，，2006，”RC 構件之三維斷層掃描理論與數值驗證”，第十三屆非破壞檢測技術研討會論文集。
5. 劉宗豪，2002，”混凝土內部鋼筋定位之新檢測法”，中興大學土木工程研究所博士論文。
6. 劉宗豪、林宜清、蕭家孟，2004，”混凝土內部鋼筋定位之新方法-應力波法”，第十二屆非破壞檢測技術研討會論文集。
7. 王文禮、黃文，1988，”岩栓非破性檢驗”，地工技術雜誌第 22 期，pp.80-89。
8. 朱國維、彭蘇萍、王懷秀，2002，”高頻應力波檢測錨固密實狀況的實驗研究”，岩土力學第 23 卷第 6 期，pp. 787-791。
9. 李義、劉海峰、王富春，2004，”錨桿錨固狀態參數無損檢測及其應用”，岩土力學與工程學報第 23 卷第 10 期

pp.1741-1744。

10. 葛文忠、陳建忠、高憲彰、李怡先、林金成，2006，”岩釘非破壞檢測技術研究”，2006 岩盤工程研討會。
11. 葛文忠、陳建忠、高憲彰、李怡先、林金成，2006，”敲擊回音法應用於土（岩）釘長度檢測”，中興工程期刊。
12. 敲擊回音法在土木工程非破壞檢測之應用及案例介紹研習會講義，2006，財團法人中興工程顧問社教育訓練教材。
13. 林喻峰、林宜清、葉至璋，2006，”應用敲擊回音法於檢測錨筋長度之研究”，第十三屆非破壞檢測技術研討會論文集。
14. 財團法人中興工程顧問社研發報告，2001，”基樁完整性檢測技術發展與應用”。
15. 台灣營建研究院叢書，2001，”非破壞性檢測技術之新技術與應用”
16. 劉衍宏，2001，”地電法應用於混凝土中鋼筋鏽蝕研究”，中央大學地球物理研究所碩士論文。
17. 施建志、詹麒璋，”鋼筋腐蝕之非破壞性檢測”，非破壞性檢測之新技術及應用論文集研習會資料，2001，台灣營建研究院，pp.45-68。
18. 倪勝火，1991，”影響鑽掘樁超音波完整性檢測相關因素之探討”，檢測科技第 9 卷第 3 期，pp.65-72。
19. 曾先明、陳肇元、王靖濤、杜云鶴，2004，”錨固類結構安全性與耐久性問題探討”，岩土力學與工程學報第 23 卷第 13 期，pp. 2235-2242。

20. 「M-10A 型錨桿測試儀」廣告資料。
21. 崔志龍，2004，”TDR 與 OTDR”錯動變形監測之研究，交通大學土木工程研究所碩士論文。
22. 楊弘倫，2004，”時域反射儀應用於土壤含水量及地下水監測技術”，交通大學土木工程研究所碩士論文。
23. 陳錦清、高憲彰、葛文忠、李國榮、林金成，2006，”非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(一)子計畫二：土(岩)釘非破壞檢測技術研究”，九十四年度防救災專案計畫成果研討會。
24. 陳錦清、高憲彰、葛文忠、李國榮、蔡政憲，2006，”非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(一)子計畫一：擋土牆非破壞檢測技術研究”，九十四年度防救災專案計畫成果研討會。
25. 葛文忠、李國榮、高憲彰、陳建忠、李怡先，2006，”震波探勘方法應用於鋼筋保護層厚度檢測”，九十五年度地球物理學術研討會。
26. 吳文、吳玉山，1998，”基樁低應變檢測的一些實用技術”，岩土力學第 19 卷第一期，pp.81-87。
27. 蔡昌明，2003，”結合非破壞性檢測技術與破裂強度理論於損傷鋼筋混凝土結構安全評估之研究”，中華大學土木工程研究所碩士論文。

## 外文部分

1. ”Recommended Practice for Evaluation of Metal-Tensioned Systems in Geotechnical Application”, 2002, NCHRP report 477.
2. M. D. Beard, M. J. S. Lowe, 2003, ”Non-Destructive testing of

- rock bolts using guided ultrasonic waves”, *International Journal of Rock Mechanics & Sciences* 40, pp.527-536.
3. M. D. Beard, 2002, “Guided Wave Inspection of Embedded Cylindrical Structures”, Ph. D. Thesis, Imperial College.
  4. W. M. Cheung, 2002, ”Non-Destructive Tests for Determining The Lengths of Installed Steel Soil Nails”, 香港土木工程署大地工程處。
  5. P. C. Chang, S. Chi Liu, 2003, ”Recent Research in Nondestructive Evaluation of Civil Infrastructures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*.
  6. J. Song, D. E. Chimenti, 2005, ”Design, Fabrication and Characterization of a Spherically Focused Capacity Air-Coupled Ultrasonic Transducer”, 先進非破壞檢測科技與應用國際研討會論文集。
  7. Carino, N. J., 2001, ”The Impact-Echo Method: an Overview”, The proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition.
  8. Pawal, S. 2000, ”Finite Element Modeling of Ultrasonic Wave Propagation in Heterogeneous Concrete Composites”, M. S. Thesis, Colorado University.
  9. ”Geomeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes”, 2000 , CRC.

非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02)89127890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://abri.gov.tw>

出版年月：95 年 12 月

版（刷）次：

工本費：270 元

GPN：

ISBN：

## 非破壞性檢測技術於山坡地安全檢查之應用(二)

GPN :

ISBN :