

部 編 號：  
本公司編號：TPC-(546)-(03)-(0012101)

台灣電力股份有限公司一〇三年度  
研究專題  
研究計畫

# 整合煤灰去化和控制性低強度材料 應用於填地工程之可行性評估

## 期末報告書

台灣電力股份有限公司

中華民國一〇五年六月

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※  
※ 本報告書僅供  
※  
※ 政府機關參考  
※  
※  
※ 請勿轉載  
※  
※  
※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

## 中文摘要

台電公司燃煤火力發電廠運作過程中，每年煤灰產量高達 200 餘萬噸。其中，飛灰佔總量之 80%，底灰佔 20%。目前在世界各國的研究與資源利用中，飛灰之利用已相當廣泛，且整體利用率相當高。然而，底灰的部分則因其利用價值性低，僅能用以作路基回填，使用率相當低。因此，如何提高底灰的去化程度，仍是目前世界各國專家學者致力研究的課題之一。目前臺電公司飛灰之處置，大多以標售方式提供業界作為摻合物，加至水泥及預拌混凝土，而剩餘部分，則是與底灰一同用作填地材料，以水力排放方式填置於濱海築堤內。然而，利用煤灰填海造地而成之灰塘地屬於台灣港務公司，於歸還時需將灰塘地盤改良至規定之強度後方能交還台灣港務公司。因此，在煤灰回填地層歸還之前，還需再另行支付一筆鉅額的地改費用。有鑑於此，本研究研擬於煤灰排放過程中，即將水泥固化材與煤灰混合，形成低強度回填材料直接填入灰塘地。本計畫預計透過三個階段來達到本案之研究目標，包括前期煤灰低強度回填材料室內配比試驗，用以作為後續現地試作攪拌時之參考依據；中期現地小規模填地試作；後期則待填地完成後，透過地球物理檢測方法進行煤灰低強度回填材料排放填地之成效檢驗，並再藉由一定數量之現地鑽心試體，進行力學性質試驗等，以求取回填試驗區域之強度。最後，比較本研究之一次到位煤灰填地改良和其他地盤改良工程技術之工程和經濟效益差異。期望可以藉由此一方法達至提高煤灰去化和資源再利用之效率，以節省台電公司用於改良煤灰塘之工程成本。

## **Abstract**

Totally, the five operating coal burning power plants in Taiwan produce  $2 \times 10^6$  tons of coal ash each year. Among the coal ash, about 80% is fly ash and 20% is bottom ash. The recycling ratio of fly ash is high due to wide application of fly ash in the industry. In comparison, the recycling ratio of bottom ash is low due to its limited application apart from being used as the backfill material. Even worse, the land backfilled by coal ash is loose and it requires further ground improvement to prevent it from liquefaction induced damage. Currently, the disposal system of coal ash from the Taiwan power company's (TPC) coal burning power plants is done by hydraulically pumping the coal ash (with various ratios of fly ash and bottom ash) to a pond near the plant. But the land of ash pond belongs to Taiwan International Ports Corporation (TIPC). TPC is asked to improve the engineering properties of ash pond before handing it back to TIPC. Tremendous extra cost had been spent. This research is to work out a better approach to economically and effectively improve the engineering properties of coal ash backfilled land. To do so, this study will integrate the coal ash disposal with the CLSM concept by adding cement slurry to the discharging pipeline of coal ash disposal. It will be carried out in three phases. The first phase is to determine the proper mixing proportions of coal ash and cement for the hydraulically filled coal ash; the second phase is the full scale test of injecting cement grout to the coal ash pipeline on site. A mixing process will be developed and modified in this phase. After the completion of coal ash backfilling, the properties of the reclaimed land by coal ash will be investigated by geophysical method and drilling and coring method. The mechanical properties test will be run on the specimens taken from the ash pond. Finally, the benefit of using CLSM backfilling method and the traditional backfill method will be compared in terms of cost and performance. It is hoped that the cost of treating coal ash pond for the requirements of future land use can be significantly reduced through the method proposed in this study.

## 關鍵字

關鍵字	Keywords
煤灰	Coal Ash
煤灰塘	Coal Ash Pond
地層改良	Ground Improvement
控制性低強度材料	Controlled Low Strength Material

# 目錄

中文摘要 .....	I
ABSTRACT .....	II
關鍵字 .....	III
目錄 .....	IV
表目錄 .....	VIII
圖目錄 .....	X
第一章 前言 .....	1
1-1 計畫背景與目的 .....	1
1-2 工作項目與執行規劃 .....	2
第二章 煤灰塘應用相關法規與文獻分析 .....	6
2-1 煤灰材料性質 .....	6
2-2 國內外煤灰相關應用 .....	10
2-2-1 煤灰相關利用 .....	10
2-2-2 煤灰處置相關法規 <sup>[6~13]</sup> .....	13
2-2-3 煤灰塘相關處置方式 .....	20
2-3 煤灰塘改良工法 .....	23
2-3-1 淺層攪拌工法 .....	23
2-3-2 CLSM 工法 .....	24
2-3-3 排水預壓工法 .....	25
2-3-4 動力夯實工法 .....	25
2-3-5 振動擠壓工法 .....	26
2-3-6 WILL 工法 .....	27

2-4	土壤固化/穩定化(SOLIDIFICATION/STABILIZATION, S/S)整治工法 .....	28
<b>第三章 煤灰低強度回填材料之研發 .....</b>		<b>33</b>
3-1	煤灰低強度回填材試驗材料與步驟 .....	33
3-1-1	煤灰低強度回填材試驗材料性質與來源 .....	34
3-1-2	室內煤灰低強度回填材試體製作步驟 .....	35
3-2	水泥加底灰低強度回填材試驗 .....	38
3-2-1	試驗配比設計 .....	38
3-2-2	試體抗壓強度試驗結果 .....	43
3-3	不同固化材與添加劑之配比試驗 .....	46
3-3-1	特殊固化材試驗 .....	46
3-3-2	添加劑試驗 .....	49
3-4	特固力 C 添加劑量試驗 .....	55
3-4-1	特固力 C 添加劑量設計 .....	55
3-4-2	特固力 C 劑量試驗結果 .....	56
3-5	粒料沉降試驗 .....	59
3-6	不同固化材灌注試驗 .....	61
3-6-1	不同固化材配比設計 .....	61
3-6-2	不同固化材試驗結果 .....	62
3-7	不同養護齡期抗壓強度試驗 .....	63
3-7-1	不同養護齡期之配比設計 .....	63
3-7-2	不同養護齡期試驗結果 .....	64
3-8	小結 .....	65

第四章	小型水工煤灰低強度材料回填試驗.....	67
4-1	水工模型灌注設備.....	67
4-2	水工模型試驗灌注流程.....	71
4-2-1	混合管攪拌灌注.....	71
4-3	水工模型試驗結果.....	75
4-3-1	有無添加劑試驗結果比較.....	77
4-3-2	直接攪拌灌注.....	80
4-3-3	不同灌注型式試驗結果比較.....	81
4-3-4	水工試驗單軸抗壓試驗.....	83
第五章	現地小型水力回填試驗.....	86
5-1	現地小型回填試驗規劃與執行.....	86
5-1-1	試驗場址開挖規劃.....	86
5-1-2	低強度材料水力回填灌注.....	89
5-2	煤灰低強度材料回填品質非破壞性檢測.....	96
5-2-1	表面波(MASW)測勘.....	96
5-2-2	電阻率影像剖面探測.....	114
5-3	現地鑽心取樣回填品質檢測.....	131
5-3-1	鑽心取樣.....	131
5-3-2	現地標準貫入試驗.....	134
5-3-3	鑽探及標準貫入試驗結果.....	135
5-3-4	鑽心樣體材料參數研究.....	141
5-4	數值模型分析探討.....	158

5-5	工法比較與評估.....	162
<b>第六章 結論 .....</b>		<b>165</b>
6-1	室內煤灰低強度回填材料配比設計.....	165
6-2	小型水工模型試驗.....	166
6-3	現地小規模回填試驗.....	167
6-4	綜合結論 .....	169
<b>參考文獻 .....</b>		<b>170</b>
<b>附錄 A 鑽探日報表 .....</b>		<b>172</b>
<b>附錄 B 煤灰推廣手冊 .....</b>		<b>187</b>
<b>附錄 C 期中審查意見暨回覆 .....</b>		<b>189</b>
<b>附錄 D 期末審查意見暨回覆 .....</b>		<b>192</b>

## 表目錄

表 2-1-1 煤灰之室內力學性質試驗結果(剪力強度試驗和壓密試驗)和沉泥 質土壤之參數比較.....	9
表 2-2-1 煤灰之一般用途 (摘自陳泰元, 1993) <sup>[1]</sup> .....	11
表 2-2-2 煤灰處置場要求規範.....	20
表 2-3-1 WILL 處理機規格和適用土壤.....	28
表 3-1-1 水泥之化學成分及物理性質.....	34
表 3-2-1 底灰回填材料配比設計一覽表.....	39
表 3-2-2 養護齡期 7 天之單壓強度.....	45
表 3-2-3 養護齡期 14 天之單壓強度.....	45
表 3-2-4 養護齡期 28 天之單壓強度.....	45
表 3-3-1 超細水泥配比設計一覽表.....	47
表 3-3-2 高鋁水泥配比設計一覽表.....	48
表 3-3-3 海菜粉配比設計一覽表.....	50
表 3-3-4 保水劑配比設計一覽表.....	51
表 3-3-5 減水劑配比設計一覽表.....	53
表 3-3-6 好泥友配比設計一覽表.....	54
表 3-3-7 特固力 C 配比設計一覽表.....	55
表 3-4-1 特固力 C 添加劑量設計一覽表.....	56
表 3-6-1 不同固化材配比設計一覽表.....	62
表 3-7-1 不同養護齡期配比設計一覽表.....	63
表 3-8-1 不同固化材以及添加劑試驗結果.....	66
表 4-3-1 水工模型試驗配比設計一覽表.....	76
表 5-1-1 現地小型回填試驗配比設計一覽表.....	90
表 5-1-2 不同配比試驗坑材料用量一覽表.....	90
表 5-2-1 S 波波速對應岩盤分類表(TI 809-04, SEISMIC DESIGN FOR	

BUILDINGS) .....	104
表 5-2-2 NEHRP (NATIONAL EARTHQUAKE HAZARDS REDUCTION PROGRAM)	
Vs-30 波速等級表 .....	104
表 5-3-1 三處試驗坑不同孔位及深度之 SPT-N 值 .....	136
表 5-3-2 回填材料力學性質試驗項目、依據規範與產出參數一覽表 .....	142
表 5-3-3 土壤試驗參數結果一覽表 .....	150
表 5-3-4 水力回填鑽心取樣試體無圍壓縮強度一覽表 .....	155
表 5-3-5 三軸壓密不排水試驗獲取參數一覽表 .....	157
表 5-4-1 各土層物性參數 .....	159
表 5-5-1 煤灰地層改良工法之成效評估表 .....	163
表 5-5-2 煤灰地層改良工法之適用性比較 .....	164
表 6-2-1 SPT-N 與單軸抗壓強度之關係 .....	167

## 圖目錄

圖 1-1-1 現地灰塘水力排放設備.....	2
圖 1-2-1 本研究之工作流程和執行構想.....	5
圖 2-1-1 電子顯微鏡下(A)飛灰和(B)底灰之顆粒結構.....	6
圖 2-1-2 台中一期灰塘之煤灰粒徑分佈曲線.....	8
圖 2-1-3 台中一期灰塘煤灰之物理性質和各項指標參數.....	8
圖 2-1-4 地質調查 SPT-N 值及土壤分類結果.....	9
圖 2-1-5 地質分層結果.....	10
圖 2-2-1 民國 74 年~民國 104 年煤灰再利用情形 (台電綜合研究所提供)	12
圖 2-2-2 污染種類及途徑.....	22
圖 2-3-1 淺層攪拌工法之應用例 (重繪自 廖洪鈞和陳福勝, 2006).....	24
圖 2-3-2 CLSM 材料於橋台回填應用示意圖.....	25
圖 2-3-3 WILL 工法施工情形和主要工作處理機.....	27
圖 2-3-4 WILL 工法攪拌翼型式.....	28
圖 2-4-1 現地固化整治案例 1 <sup>[18]</sup> .....	30
圖 2-4-2 現地固化整治案例 2 <sup>[18]</sup> .....	31
圖 3-1-1 透明塑膠膜.....	36
圖 3-1-2 塑膠膜直徑測量.....	36
圖 3-1-3 封膜機.....	36
圖 3-1-4 底部封膜加水測試.....	37
圖 3-2-1 不同水泥比例水中養護照片.....	39
圖 3-2-2 不同水泥比例養護 7 天拆模照片.....	40
圖 3-2-3 不同水泥比例養護 14 天拆模照片.....	41
圖 3-2-4 不同水泥比例養護 28 天拆模照片.....	42
圖 3-2-5 土壤 C.B.R 試驗機.....	44
圖 3-3-1 超細水泥照片.....	47

圖 3-3-2 超細水泥養護 28 天照片 .....	47
圖 3-3-3 高鋁水泥照片 .....	48
圖 3-3-4 高鋁水泥養護 14 天照片 .....	48
圖 3-3-5 海菜粉照片 .....	50
圖 3-3-6 海菜粉添加劑養護 7 天照片 .....	50
圖 3-3-7 保水劑照片 .....	51
圖 3-3-8 保水劑養護 7 天照片 .....	51
圖 3-3-9 減水劑照片 .....	52
圖 3-3-10 減水劑養護 28 天照片 .....	52
圖 3-3-11 好泥友照片 .....	54
圖 3-3-12 好泥友養護 14 天照片 .....	54
圖 3-3-13 特固力 C 照片 .....	55
圖 3-3-14 特固力 C 拆模照片 .....	55
圖 3-4-1 不同特固力 C 添加劑量拆模照片 .....	57
圖 3-4-2 小型土壤灌入儀照片(POCKET PENETROMETER) .....	57
圖 3-4-3 小型土壤灌入儀檢測試體強度照片 .....	58
圖 3-4-4 不同添加劑劑量圓柱試體抗壓強度曲線 .....	58
圖 3-5-1 水泥與底灰之粒徑分布及沉降速度圖 .....	60
圖 3-5-2 添加特固力 C 之粒徑分布及沉降速度圖 .....	61
圖 3-6-1 不同固化材圓柱試體抗壓強度曲線 .....	63
圖 3-7-1 不同養護齡期試體拆模照片 .....	64
圖 3-7-2 不同固化材圓柱試體抗壓強度曲線 .....	65
圖 4-1-1 交通錐上安裝球閥開關 .....	68
圖 4-1-2 電動攪拌棒 .....	68
圖 4-1-3 水泥灌注槍與 PVC 三通管 .....	69
圖 4-1-4 混合管線 .....	69
圖 4-1-5 灌注設備組合圖 .....	70

圖 4-1-6 透明壓克力水槽 .....	70
圖 4-2-1 水泥攪拌機 .....	71
圖 4-2-2 水泥灌注槍抽取水泥漿 .....	72
圖 4-2-3 水泥灌注槍裝上 PVC 三通管及混合管 .....	72
圖 4-2-4 交通錐裝上水泥灌注槍及混合管 .....	73
圖 4-2-5 交通錐加入 1 等份底灰的拌合水 .....	73
圖 4-2-6 電動攪拌棒攪拌過程照片 .....	74
圖 4-2-7 打開球閥開關注入水泥漿 .....	74
圖 4-2-8 混合管灌注示意圖 .....	75
圖 4-2-9 混合管灌注設備照片 .....	75
圖 4-3-1 灌注完成粒料沉降情形 .....	76
圖 4-3-2 灌注完成後 1 分鐘粒料沉降情形 .....	76
圖 4-3-3 灌注完成後 2 分鐘粒料沉降情形 .....	76
圖 4-3-4 灌注完成後 3 分鐘粒料沉降情形 .....	76
圖 4-3-5 水工試驗試體養護狀況(A)無添加劑；(B)添加特固力 C .....	78
圖 4-3-6 無添加劑水工試驗試體養護 7 天拆模(A)前視圖；(B)左視圖 .....	78
圖 4-3-7 添加特固力 C 水工試驗試體養護 7 天拆模(A)前視圖；(B) 左視圖 .....	79
圖 4-3-8 無添加劑之水工模型試體剖面圖 .....	79
圖 4-3-9 添加特固力 C 之水工模型試體剖面圖 .....	79
圖 4-3-10 水泥漿直接注入交通錐進行攪拌 .....	80
圖 4-3-11 直接灌注示意圖 .....	81
圖 4-3-12 直接灌注設備照片 .....	81
圖 4-3-13 直接灌注之水工試驗試體養護狀況 .....	82
圖 4-3-14 直接灌注之水工試驗試體養護 7 天拆模(A)前視圖；(B) 左視圖 .....	82
圖 4-3-15 直接灌注之水工試驗試體剖面圖 .....	83
圖 4-3-16 混合管灌注之水工試驗鑽心試體 .....	84

圖 4-3-17 直接灌注之水工試驗鑽心試體.....	84
圖 4-3-18 單軸抗壓試驗強度.....	85
圖 5-1-1 台中小型水力回填試驗廠址空照圖.....	86
圖 5-1-2 試驗場址周邊及試驗配置示意圖.....	87
圖 5-1-3 回填試驗坑開挖順序示意圖.....	87
圖 5-1-4 集水坑開挖幾何示意圖.....	88
圖 5-1-5 試驗坑開挖幾何示意圖.....	88
圖 5-1-6 試驗坑開挖完成現地照片.....	89
圖 5-1-7 試驗坑水力回填灌注流程示意圖.....	91
圖 5-1-8 底灰漿注入泵浦車.....	92
圖 5-1-9 水泥漿注入低速攪拌桶.....	92
圖 5-1-10 三通管連接水泥漿及底灰管線照片.....	93
圖 5-1-11 底灰漿混合水泥漿水力排放至試驗坑.....	93
圖 5-1-12 水力回填灌注試驗現地實作照片.....	94
圖 5-1-13 水力回填灌注完成後 28 天狀況(試驗坑 I).....	95
圖 5-1-14 水力回填灌注完成後 28 天狀況(試驗坑 II).....	95
圖 5-1-15 水力回填灌注完成後 28 天狀況(試驗坑 III).....	96
圖 5-2-1 表面波傳播示意圖(摘自 K. HAYASHI, 2003. SAGEEP SHORT COURSE) .....	97
圖 5-2-2 表面波測勘資料逆推處理流程.....	100
圖 5-2-3 二維剪力(S 波)波速度剖面處理流程.....	101
圖 5-2-4 表面波頻散法測線配置圖(以 SITE 1 為例).....	102
圖 5-2-5 SITE1 剪力波速度剖面成果圖.....	105
圖 5-2-6 SITE1 剪力波速度對應參考 N 值剖面圖.....	106
圖 5-2-7 SITE1 各測線剪力波速度剖面柵狀立屏圖.....	107
圖 5-2-8 SITE2 剪力波速度剖面成果圖.....	108
圖 5-2-9 SITE2 剪力波速度對應參考 N 值剖面圖.....	109

圖 5-2-10 SITE2 各測線剪力波速度剖面柵狀立屏圖.....	110
圖 5-2-11 SITE3 剪力波速度剖面成果圖 .....	111
圖 5-2-12 SITE3 剪力波速度對應參考 N 值剖面圖.....	112
圖 5-2-13 SITE3 各測線剪力波速度剖面柵狀立屏圖.....	113
圖 5-2-14 電阻率與對應岩性關係圖 .....	114
圖 5-2-15 直流電阻法使用四極排列施測示意圖 .....	115
圖 5-2-16 電阻率影像剖面極-偶極陣列施測示意圖.....	118
圖 5-2-17 SYSCAL PRO. 地電阻探測系統.....	118
圖 5-2-18 地電阻影像剖面探查現地施工示意圖 .....	119
圖 5-2-19 SITE1 測線 V1 及 V2 地電阻影像剖面成果圖 .....	121
圖 5-2-20 SITE2 測線 V3 及 V4 地電阻影像剖面成果圖 .....	122
圖 5-2-21 SITE3 測線 V5 及 V6 地電阻影像剖面成果圖 .....	123
圖 5-2-22 測線 H1 地電阻影像剖面成果圖 .....	124
圖 5-2-23 測線 H2 地電阻影像剖面成果圖 .....	125
圖 5-2-24 測線 H3 地電阻影像剖面成果圖 .....	126
圖 5-2-25 測線 H4 地電阻影像剖面成果圖 .....	127
圖 5-2-26 SITE1 各測線電性地層剖面柵狀立屏圖.....	128
圖 5-2-27 SITE2 各測線電性地層剖面柵狀立屏圖.....	129
圖 5-2-28 SITE3 各測線電性地層剖面柵狀立屏圖.....	130
圖 5-3-1 鑽心取樣孔位示意圖 .....	131
圖 5-3-2 現地鑽心取樣及 SPT 試驗機具照片 .....	132
圖 5-3-3 鑽機及鑽孔定位 .....	133
圖 5-3-4 增加取樣土樣穩定性之超泥漿及皂土混合液.....	133
圖 5-3-5 試體及岩心箱照片 .....	134
圖 5-3-6 SPT-N 劈管試驗取得之銅圈 .....	135
圖 5-3-7 SITE1 不同孔位鑽心樣體及其 SPT-N 值.....	137
圖 5-3-8 SITE2 不同孔位鑽心樣體及其 SPT-N 值.....	138

圖 5-3-9 SITE3 不同孔位鑽心樣體及其 SPT-N 值.....	139
圖 5-3-10 SITE1 開挖剖面.....	140
圖 5-3-11 SITE2 開挖剖面.....	140
圖 5-3-12 SITE3 開挖剖面.....	141
圖 5-3-13 篩網組照片.....	143
圖 5-3-14 搖篩機照片.....	143
圖 5-3-15 SITE1~SITE3 銅圈土樣照片.....	145
圖 5-3-16 SITE1 烘乾後土樣照片.....	146
圖 5-3-17 SITE2 烘乾後土樣照片.....	146
圖 5-3-18 SITE3 烘乾後土樣照片.....	147
圖 5-3-19 SITE1 粒徑分佈曲線.....	149
圖 5-3-20 SITE2 粒徑分佈曲線.....	149
圖 5-3-21 SITE3 粒徑分佈曲線.....	150
圖 5-3-22 無圍壓縮試驗儀.....	152
圖 5-3-23 SITE1~3 單壓試體照片(左至右分別為上中下).....	152
圖 5-3-24 SITE1 單壓試體破壞照片.....	153
圖 5-3-25 SITE2 單壓試體破壞照片.....	153
圖 5-3-26 SITE3 單壓試體破壞照片.....	153
圖 5-3-27 三軸室及壓力控制系統照片.....	156
圖 5-3-28 SITE1~3 三軸試體照片(左至右分別為上中下).....	156
圖 5-4-1 自由場網格模型圖.....	160
圖 5-4-2 自由場液化分析結果.....	160
圖 5-4-3 層狀結構網格模型圖.....	161
圖 5-4-4 層狀結構液化分析結果.....	161

# 第一章 前言

## 1-1 計畫背景與目的

台電公司燃煤火力發電廠運作過程中，每年煤灰產量高達 200 餘萬噸。目前煤灰之處置方式大多係以標售方式提供外界作為摻合物加入至水泥及預拌混凝土，而剩餘煤灰則是用作填地材料，以水力排放方式填置於濱海築堤內。然而，該利用煤灰填海造地而成之灰塘地有部分屬於台灣港務公司，於歸還時需將該地盤改良至相關規定之強度( $N=13.7$ )後方能交還。而目前台電公司的舊有還地模式乃是先將煤灰以水力排放模式排放置灰塘，其中在台中灰塘地之排放煤灰流程為電廠燃燒後所產生之煤灰藉由輸送管線直接進入灰倉後並藉由現地排放管線直接排放入灰塘之中。而另一線西灰塘煤灰之運送方式則是飛灰由車載運送至料倉漏斗後於現地抽取海水進行混合攪拌以水力排放置指定回填地，相關設備如圖 1-1-1。而底灰則是直接由車載運送至指定回填地後倒入。在填地完成後，再進行擠壓砂樁亦或是礫石樁改良以達至地盤改良之需求。不論台中灰塘亦或是線西灰塘，此一流程均需分為兩階段進行，除了煤灰填地需支出一筆費用之外，日後又需再另行支付一筆鉅額的改良費用，來改良煤灰填地之工程性質。就施工及經濟效益層面上來看，均不理想。有鑑於此，台電公司乃研擬於煤灰排放期間即利用類似於可控制性低強度回填材料(Controlled Low Strength Material, CLSM)，直接將具備強度性質之煤灰用於填海造地。由於回填材料本身即具有相當程度之強度與膠結性，灰塘在完成填海造地後，即可直接進行回填地再利用，就改良成本及改良時程上而言，均有極大之效益。因此，若能在煤灰排入灰塘階段，在不影響既有煤灰排放作業流程下，透過水力攪拌和添加適量之水泥，使水力煤灰排放作業，轉換為煤灰低強度回填材灰塘澆置作業，可以一次到位的方式，完成電廠煤灰排放和灰塘地質改良作業，以節省改良工程費用支出，並減少環境生態衝擊和環保團體之質疑。故此，整體煤灰水力排放

行程之規劃、水泥固化材料之加入流程、以及低強度回填材之配比設計，便是此改良工法成功與否之重要課題。本研究將針對本工法相關之各項課題進行探討、試驗及現地施作驗證。



圖 1-1-1 現地灰塘水力排放設備

## 1-2 工作項目與執行規劃

本計畫將針對煤灰低強度回填材應用於填地工程之可行性進行研討，期能在排放煤灰階段即能以最經濟和最環保考量，提供可行之填地配比以利台電公司灰塘管理單位參酌。用以減少填地成本、灰塘改良成本及促進回填時之環境保護，達至煤灰去化最佳應用。茲將預計完成之工作項目，說明如下：

1. **國內外煤灰塘應用案例探討與相關法規蒐集：**針對國內外煤灰資源之分類及分級、使用範圍、資源回收利用比例等進行收集，並收集煤灰材料處理之相關法令規定以作為施工材料之參考標準，以利本計畫後續之執行。此外，針對煤灰塘填地方式、煤灰塘之利用進行探討與比較。同時，為再加強宣導國人對煤灰材料的認知，本研究過程中亦將協助台電公司完成煤灰材料使用(宣傳)手冊之製訂。
2. **煤灰低強度回填材作業設備設計與研發：**先行瞭解台電公司既有煤灰排放系統之流程與機具管線分佈，並在不影響電廠原有的排放煤灰作業情況下，進行煤灰低強度回填材之作業設備的設計與研發。在研究中煤灰低強度回填材之作業設備將以中繼站之角色與電廠既有煤灰排放系統

進行聯結。而在中繼站的研發上將帶入傳統地盤改良之灌漿工法概念進行設計。在研發階段時將特別考慮兩系統之相容性且新系統之組成構件將包含機械攪拌、加壓、排放管線等項目，並進行各構件之整合。

3. **煤灰低強度回填材配比試驗：**本研究內容中所採用之煤灰低強度回填材與一般規範中之低強度回填材並不完全相同，本次填地材料僅只添加一般波特蘭水泥，並於填地試作前先行於實驗室內進行煤灰低強度回填材之配比設計。試驗過程中，煤灰材料之流動性與排放之強度均是試驗內容之主要關注重點，強度追蹤齡期分別為 7、28、56 及 90 天共四種。該配比設計將以灰塘地質改良需求、流動性和工作性為主要考量。
4. **煤灰去化和低強度回填材材料填地之操作程序建議和小規模填地試作：**由於低強度回填材排放澆置之施工方式和操作順序，將影響填地改良之品質差異。本研究於填地試作前將進行施工方法、施工範圍和施工步驟等操作細節的檢討，以建議合乎使用需求之標準化作業程序。並由台電公司協助配合提供適當場地進行小規模填地試作進行驗證。但為探討建議配比於現地施工的適用性，填地試做除採用建議配比外，將再擇二組對照配比共分三區執行，各區之填地面積應不小於 5 x 10 m，改良深度則以現地灰塘實測深度為改良深度。並於填地完成後採用下列試驗方法進行成效驗證。
  - (1) 各區填地完成 28 天後，應以適當之地球物理探測方法進行大範圍之填地成效檢驗(含改良均勻性和改良品質的初步判斷)。
  - (2) 以地球物理探測結果做為鑽心取樣選點之參考依據，鑽心應以全深度取樣為原則，且各區面積(共三區)內之取樣孔數不得少於 5 孔。
  - (3) 利用各區面積(共三區)取得之鑽心，分上層、中層及下層各取 3 組樣本，進行無圍壓試驗和三軸壓密不排水試驗，以瞭解其強度和滲透性。

5. **整合煤灰去化和低強度回填材料填地之工程可行性與效益評估：**由小規模填地試作之成果，並依據煤灰低強度回填材排放之流動性、工作性以及填地改良之地層之強度、均勻性和施工難易度等各方面進行評估，探討該本研究之成果應用於實際工程之可行性。而在經濟層面上，則以施工期間之機具動員和材料使用之直接工事費用作為主要考量進行評估。進而比較一次到位煤灰低強度回填材填地改良和傳統水力排灰造地之經濟效益差別，期能提供台電公司參酌。
6. **傳統水力排灰填地灰塘之重金屬滲漏潛勢評估：**依據台電公司提供傳統水力排灰填地灰塘之重金屬滲漏調查數據進行分析，了解重金屬滲漏對灰塘土壤、地下水及海水的影響程度。評估完成後，對未來可能發生重金屬滲漏污染之高潛勢地層，提出相對應之整治工法與所需之整治材料提供給予台電公司進行參酌。
7. **教育訓練：**受委託廠商應於計畫執行完成前與委託廠商共同舉辦一場教育訓練，期能建立台灣電力公司相關從事人員之地盤改良灌漿知識和掌握一次性地改最佳配比與排放流程。

為期能有效達成本研究目標，以助益於整合煤灰去化應用於填地工程之分析工作，研究團隊針對計畫之執行內容與步驟深入思考，期能以整體與通盤性的規劃考量完成相關工作，如圖 1-2-1 所示為本研究針對工作項目所規劃之研究作業流程。

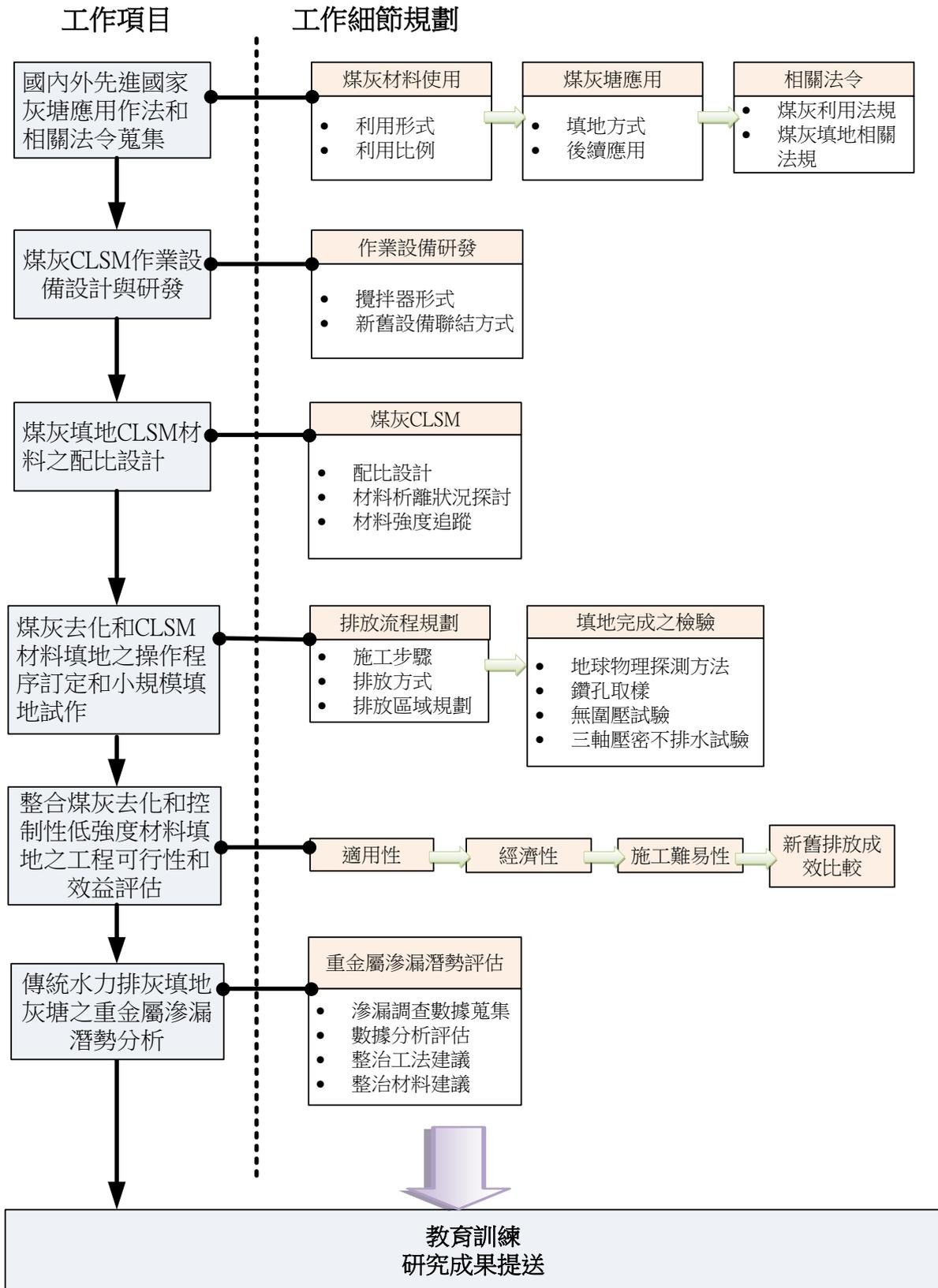


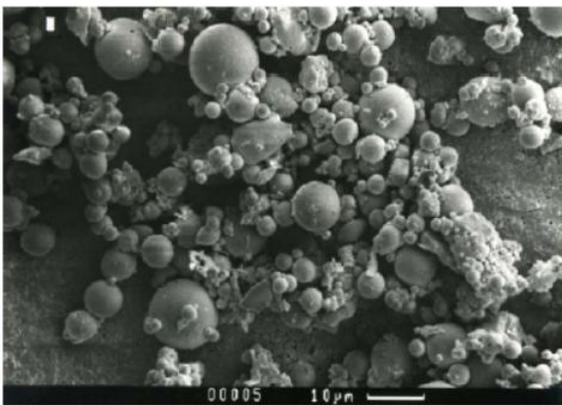
圖 1-2-1 本研究之工作流程和執行構想

## 第二章 煤灰塘應用相關法規與文獻分析

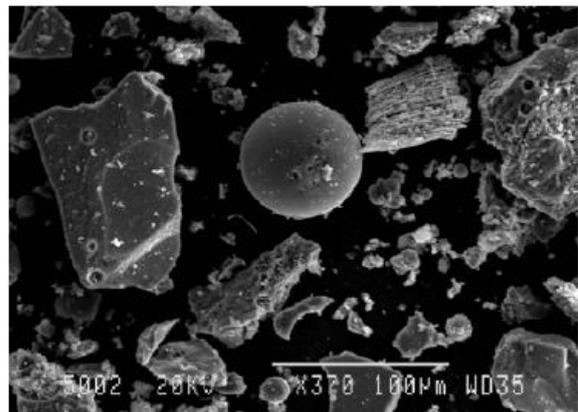
綜觀國內外煤灰運用，通常均分為底灰以及飛灰兩類進行討論。截至目前，世界各國之飛灰絕大部分均都可以百分之百去化完成，並實際將飛灰以資源再利用方式應用於土木工程、混凝土材料等方面。而底灰由於其本身特性關係，應用層面仍是目前個專家學者致力研究的議題之一。本研究即針對煤灰本身性質、國內外煤灰相關應用以及煤灰相關法規等進行回顧，以提供台電相關單位參考。

### 2-1 煤灰材料性質

一般而言，煤灰為高溫燃燒後產物，主要由飛灰和底灰(組成比例約為80%：20%)組合而成，且大都為球狀結晶之多孔性結構(圖 2-1-1)，具有高孔隙和易碎性。至於，其材料特性則依煤礦產源、燃煤情形和處理方式的不同而有所差異，以台中一期灰塘煤灰為例，分別就其表層煤灰和沿灰塘深度進行取樣，並進行室內試驗，可得煤灰之各項指標參數和材料性質如下<sup>[1]</sup>：



(a) 飛灰



(b) 底灰

圖 2-1-1 電子顯微鏡下(a)飛灰和(b)底灰之顆粒結構

- 1. 物理性質：**由於水力排放沉積距離和不同時期排放煤灰之材料組成比例不同，灰塘表層大都為性質鬆散和部分夾雜黏灰之塊狀堆疊煤灰，而且沿灰塘深度，煤灰顆粒尺寸和細粒料含量變化不均勻。如圖 2-1-2，由篩分析和比重計分析試驗結果可知，灰塘煤灰在不同深度情況下，其顆粒尺寸大多分佈在#20~#200 號篩，且細粒料含量多(高達 15~30%)，依統一土壤分類標準可分類為低塑性粉土質砂(ML-SM)。此外，由前期煤灰材料參數相關試驗，如：煤灰含水量( $\omega\%$ )、比重( $G_s$ )、單位重( $\gamma$ )和孔隙比( $e$ )等指標參數試驗結果(如圖 2-1-3(a)~圖 4(d))可知，煤灰具有重量輕、孔隙大和高含水量等特性<sup>[2~5]</sup>。
- 2. 力學性質：**由前期煤灰相關試驗結果可知(表 2-1-1)，灰塘煤灰之剪力強度、滲透性和壓縮性質皆和沉泥質土壤非常類似。透過地質調查和鑽探取樣結果整理發現如圖 2-1-4 及圖 2-1-5 所示，灰塘之常時地下水位約位於地下 4m，灰塘全深度除上層和下層之外，細粒含量非常高，約達 70% 以上。依統一土壤分類標準(AASHTO Soil Classification)可分類整體地層主要由粉土質砂土(ML-SM)組成，其中，深度在 0~4m 內為表土和砂土(SPT-N 值約 4~20)；深度在 4~11m 內為灰色煤灰及細砂(SPT-N 值約 2~4)；深度在 11 公尺以下則灰褐色細砂夾雜粉土或黏土(SPT-N 值約 12~20)<sup>[2~5]</sup>。

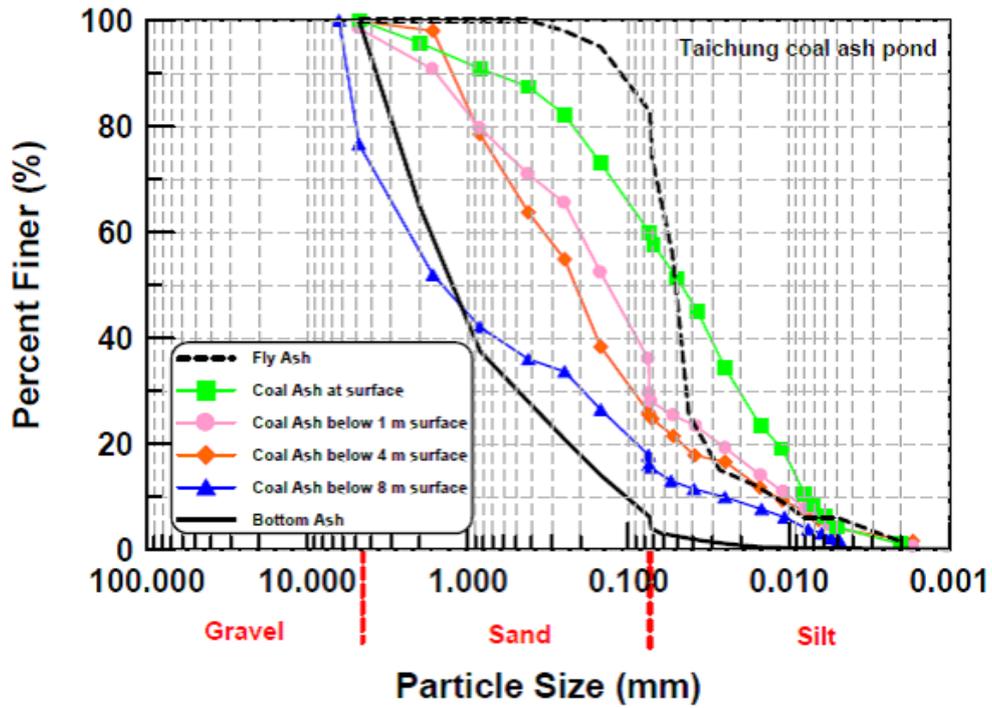


圖 2-1-2 台中一期灰塘之煤灰粒徑分佈曲線

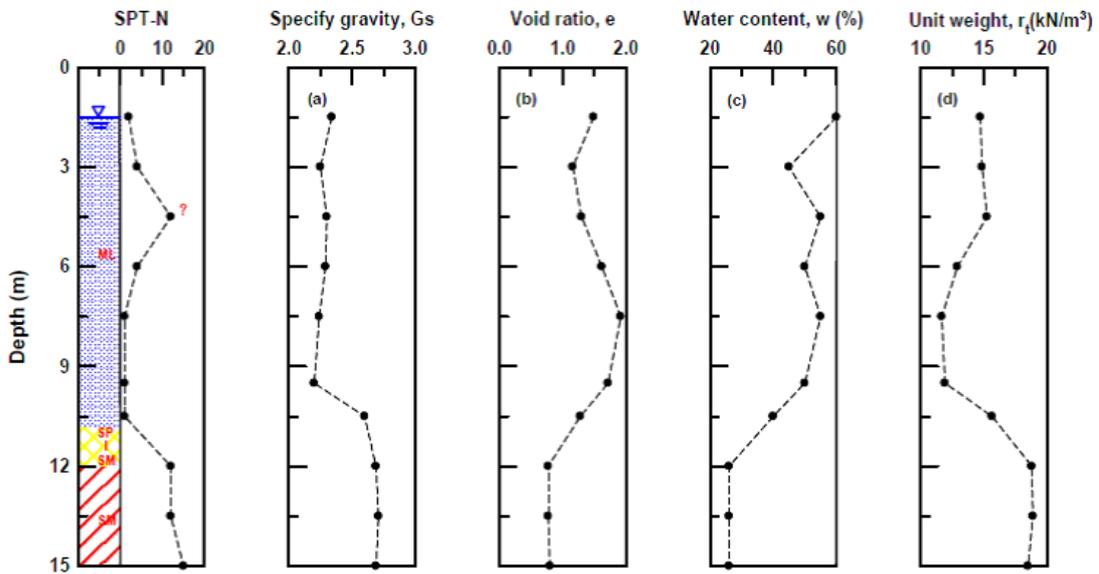


圖 2-1-3 台中一期灰塘煤灰之物理性質和各項指標參數

表 2-1-1 煤灰之室內力學性質試驗結果(剪力強度試驗和壓密試驗)和沉泥質土壤之參數比較

參數值	灰塘煤灰	上層煤灰	中層煤灰	下層煤灰	沉泥質土壤
有效凝聚力, $c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	≈ 0.0	≈ 0.0	≈ 0.0	≈ 0.0	-
有效摩擦角, $\phi'$ (degree)	29.61	32.40	34.90	34.90	26° ~ 35°
滲透係數, $k$ (cm/sec)	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.67 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$
壓縮係數, $C_c$	0.1000	0.1940	0.2730	0.2730	0.16 ~ 0.34
回脹係數, $C_s$	0.0041	0.0010	0.0010	0.0010	-
壓密係數, $C_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	0.0288	0.0343	0.0200	0.0200	$2.0 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$

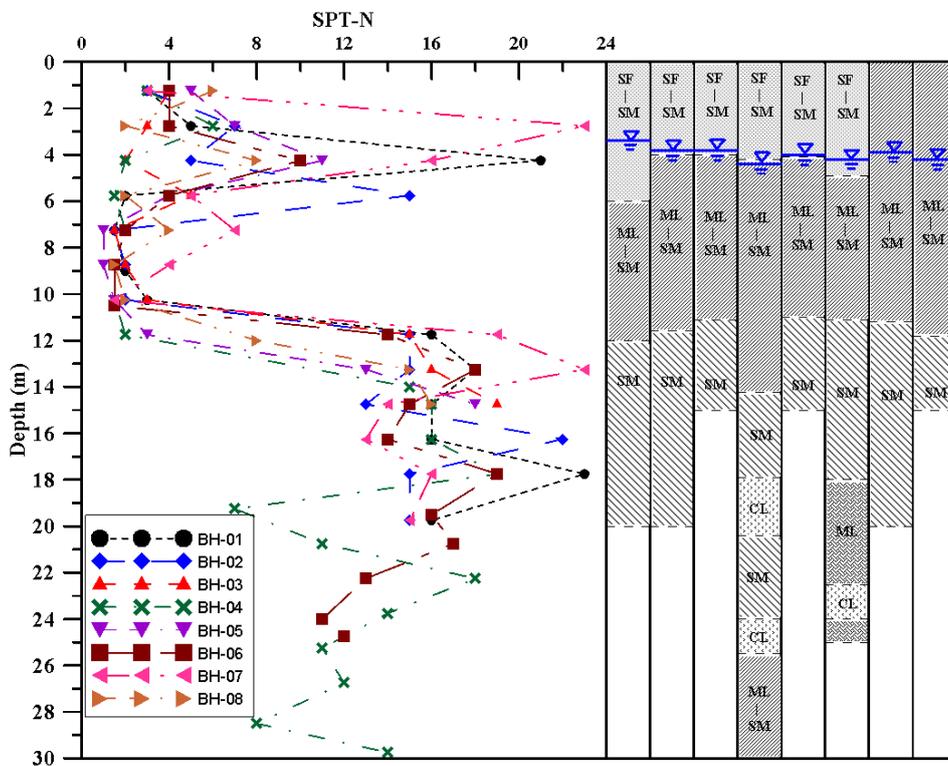


圖 2-1-4 地質調查 SPT-N 值及土壤分類結果

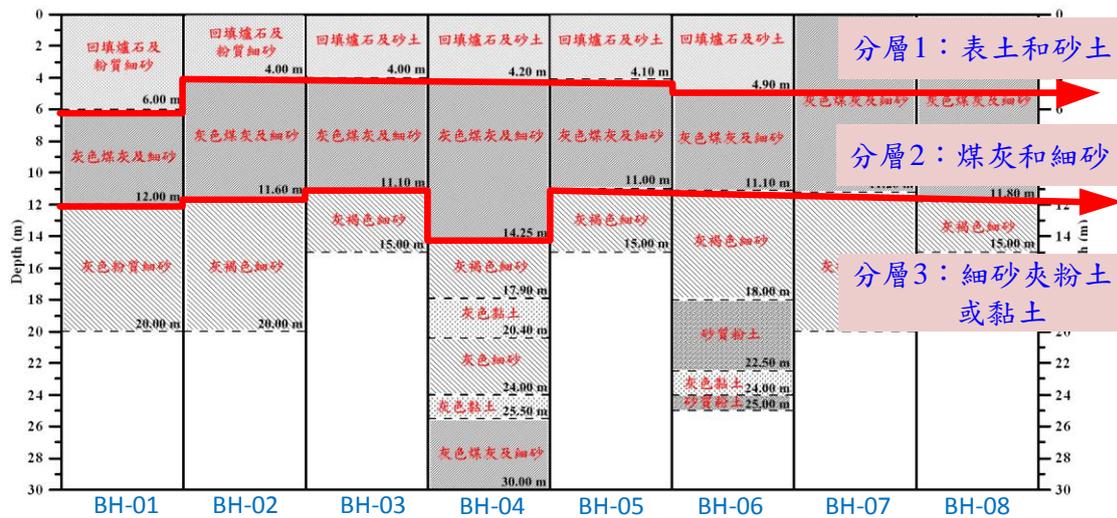


圖 2-1-5 地質分層結果

## 2-2 國內外煤灰相關應用

### 2-2-1 煤灰相關利用

台灣現有燃煤火力發電廠，大都分佈於北海岸和西部沿海，而其發電後產出之副產品煤灰的處理，大都以標售方式提供有關機構使用，林口電廠、台中電廠和興達電廠等較具規模之發電廠，採用水力排放方式將未利用之煤灰輸送至灰塘，以築堤方式填造新生地。如圖 2-2-1 為民國 74 年~民國 104 年間，台灣煤灰產量和飛灰、底灰之再利用情形，由圖可知近年在台電相關單位和國家政策推動下，飛灰使用率已提升至 100%，而底灰使用率則年年均有所提升。回顧過去 20 年來，台灣本地之應用大致可分為三個方面說明如下，詳細應用則如表 2-2-1 所示<sup>[1]</sup>：

1. 水泥類：在考量經濟性及改善混凝土性質的原則下，飛灰最常應用為水泥和混凝土的添加物。
2. 土木類：土木工程應用之回填材料通常具可流動性且水泥量含量非常低。因此，飛灰之第二大應用即作為可流動性回填和一般性回填土，同時，此材料因不需符合任何特別要求，故從任一電廠產出之飛灰皆可茲

應用。

3. 其他應用類：煤灰應用於建築材料之研究乃利用煤灰之質量輕、強度高及耐火性好等特性替代粘土以製作人工輕質骨材、磁磚、地磚、隔熱磚等建築材料，具有良好成效。

表 2-2-1 煤灰之一般用途 (摘自陳泰元，1993)<sup>[1]</sup>

類別	說明
混凝土工程利用	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 作為水泥原料或混合料</li><li>2. 製造混凝土或混凝土塊</li><li>3. 作為輕質骨材</li></ol>
土木工程利用	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 作為墾殖計劃中之填土材料</li><li>2. 作為水壩、土堤、公路及橋梁引道路基、儲煤場、堆灰場、社區建設用地、懸臂牆等構造之填充材料</li></ol>
其他應用	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 直接用於農地，作為土壤改良劑或控制劑</li><li>2. 燒結飛灰作緩效性肥料</li><li>3. 造磚</li><li>4. 瀝青混凝土之填縫料</li><li>5. 作為基礎或地面穩定之改良劑</li><li>6. 提煉金屬</li><li>7. 污水處理</li><li>8. 垃圾處理</li><li>9. 作為油漆、樹脂、塑膠之填充劑</li></ol>

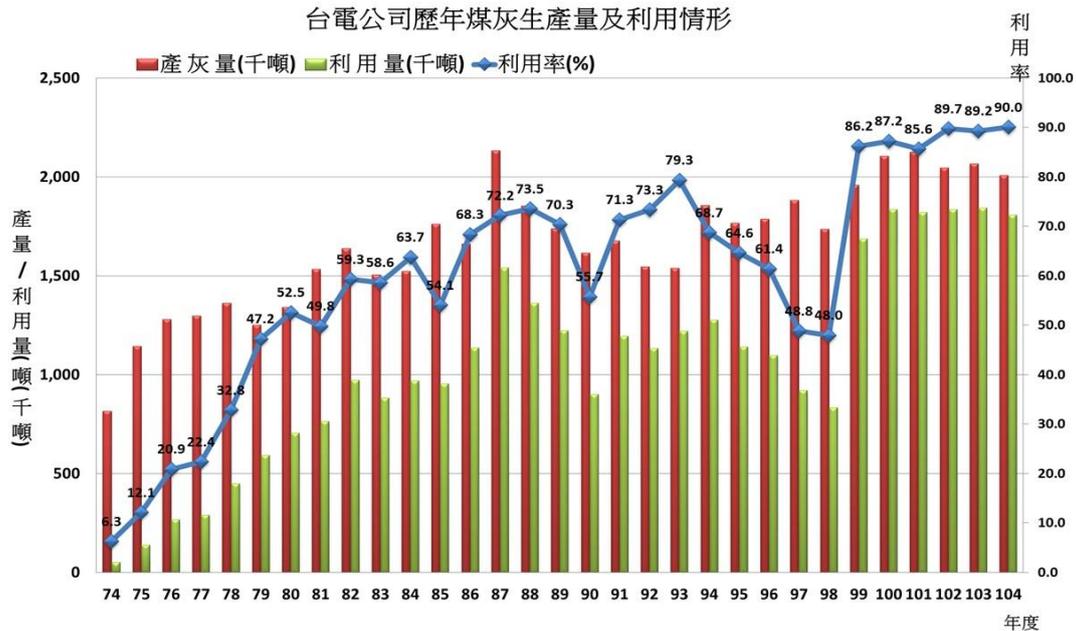


圖 2-2-1 民國 74 年~民國 104 年煤灰再利用情形 (台電綜合研究所提供)

其他國家的煤灰資源利用與我國略有差異，例如美國境內之煤灰總產量居世界第二，而飛灰之主要利用則是做為混凝土攪料來替代水泥；英國則是將飛灰運用於建材工業上；法國針對煤灰之行銷與資源化利用，由其國內運輸部統一管轄，並制訂有相關的規範，為全世界目前最有效率的煤灰產業；丹麥為資源化煤灰最有效率的國家之一，將煤灰廣泛運用至水泥、混凝土、填地鋪路及農業改良等，資源利用率高達 84.6%；荷蘭則因國內缺少水泥原料之天然資源，於 1980 年起始便開始進行煤灰資源化利用，除了自身國內之煤灰外，亦從鄰國進口運用於工程建設上，其煤灰資源利用率甚至超過 100%；日本自 1970 年代起始便相當重視煤灰資源化之研究，並根據煤源與燃燒條件的不同所產出的煤灰依照不同的使用途徑進行規範，未符合 JIS 標準者做為水泥工業之生料，符合 JIS 標準者可作為混合型水泥之混凝土攪料；澳洲則因地廣人稀，對於煤灰之資源化利用較不重視，其資源利用率僅只 11.7%；南非礦藏富饒是世界重要之煤產輸出國，煤灰之產量高居世界第四位，其煤灰之利用包括混合型水泥、混凝土及灌漿，另有部份外銷他國；中國大陸之產煤量及煤灰用量高居世界第一位，早期之煤灰都排入江河湖海，直到 50 年代才將煤灰利用於水力發電之水壩工程，其煤灰利用之途

徑包括建材利用、土木工程、築路、回填及農業用等。

底灰由於其性質與飛灰有所不同，因此，其資源化利用亦有所差異。美國在底灰的利用上與飛灰大致相仿，而底灰之主要用途乃是作為結構回填、道路路基及冰雪控制為主。相較於飛灰之利用，底灰不需經過複雜的處理可以直接使用，在程序上擁有較大之優勢。而目前底灰新的利用方式則朝向作為砂濾器之建材，可處理污水淨化槽之放流水。而日本除了上數的利用方式外，更將煤灰進一步製作成合成肥料及化學肥料，其主要作法為將氮肥及鉀肥加入磷酸液後，再與煤灰進行化學反應。除此之外，以煤灰合成之人造沸石其陽離子置換量(CEC)極大，用於土壤改良、農藥吸著劑與畜產廢棄物處理頗有開發空間。

而由前述之資料可知，在臺灣雖然飛灰之再生使用率已獲不錯的成效，但底灰的應用，近 40 年來則未見明顯增長，幾乎均用以回填掩埋，故現如今堆填之灰塘面積亦不斷地增加，甚至將達飽和(例如：台中灰塘、林口灰塘等)或面臨租界逾期須移轉歸還相關單位。因此，在相關轄管單位要求或灰塘回填陸地再利用考量下，如何迅速透過有效工法進行灰塘地盤改良以增加回填灰塘之強度和可用性，乃是現階段迫切並值得探討之議題。

## 2-2-2 煤灰處置相關法規<sup>[6~13]</sup>

### 一、 臺灣

臺灣目前煤灰再利用之主要規範來自於民國 100 年 2 月 9 日公告之「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」，煤灰則屬於廢棄物再利用種類中之第三類。該管理方式針對煤灰有以下相關規定：

#### 1. 再利用用途：

- (1) 飛灰：高爐爐石粉原料、水泥原料、水泥製品（限混凝土（地）磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋、紐澤西

護欄)原料、混凝土攪和物、陶瓷磚瓦原料、顆粒保溫材原料、鋪面工程之基層或底層級配粒料原料、混凝土粒料原料、瀝青混凝土粒料原料或非農業用地之工程填地材料。

(2) 底灰：水泥原料、混凝土粒料、混凝土粒料原料、陶瓷磚瓦原料、顆粒保溫材原料、鋪面工程之基層或底層級配粒料原料、瀝青混凝土粒料原料、級配配料或非農業用地之工程填地材料。

(3) 底灰含飛灰適用底灰之再利用用途。

## 2. 再利用機構應具備下列資格：

(1) 飛灰：

A. 工廠：依法辦理工廠登記或符合免辦理登記規定之工廠，其產品至少為下列之一項：高爐爐石粉、水泥、水泥製品（限混凝土（地）磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋、紐澤西護欄）、預拌混凝土、陶瓷磚瓦製品、顆粒保溫材料、鋪面工程之基層或底層級配粒料、混凝土粒料或瀝青混凝土粒料。但直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者，不受本文資格及產品之限制。

B. 商業：依法辦理營業登記之批發零售業，其營業項目為回收物料批發業或其他批發零售業（登載本編號之再利用種類）。

(2) 底灰：：依法辦理工廠登記或符合免辦理登記規定之工廠，其產品至少為下列之一項：水泥、預拌混凝土、混凝土粒料、陶瓷磚瓦製品、顆粒保溫材料、鋪面工程之基層或底層級配粒料、瀝青混凝土粒料或級配。但直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者，不受本文資格及產品之限制。

(3) 底灰含飛灰：同底灰再利用機構應具備之資格。

- (4) 直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者需符合下列資格：
- A. 公共工程：由該工程之設計單位在該工程圖樣及說明書中載明使用再生材料之種類及數量，向工程招標單位申請工程核准使用煤灰文件，始得向煤灰產生者取用。
  - B. 非公共工程：由該工程之設計單位在該工程圖樣及說明書中載明使用再生材料之種類及數量，並依建築法規定取得建造或雜項執照後，始得向煤灰產生者取用。

### 3. 運作管理：

- (1) 再利用機構之資格為工廠者，其收受煤灰再利用作為水泥原料用途者，應具備水泥旋窯。
- (2) 再利用於級配配料用途者，應依道路工程施工規範之相關規定辦理。
- (3) 底灰得採用露天貯存方式，但貯存場所應設有排水收集設施及有效抑制粒狀污染物逸散設施。
- (4) 再利用後之剩餘廢棄物應依廢棄物清理法相關規定辦理。
- (5) 再利用用途產品為混凝土（地）磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔或溝蓋等水泥製品者，其品質應符合國家標準。
- (6) 前款規定以外之再利用用途產品，其品質應符合國家標準、國際標準或該產品之相關使用規定。

然而，不論是飛灰亦或是底灰最常見之利用方式便是用以製作水泥及混凝土等材料。所以在國內亦有由行政院公共工程委員會所頒佈的「公共工程飛灰混凝土使用手冊」以及 1985 年初頒布 CNS11271，卜特蘭飛灰水泥用飛灰和 1996 年頒佈 CNS11270，卜特蘭飛灰水泥等規範，提供給予工程人員作為參照。

## 二、 大陸

在中國大陸方面，在 2013 年時重新修訂了「粉煤灰綜合利用管理辦法」。其在總則的第一條提及該管理辦法乃是依據「中華人民共和國循環經濟促進法」、「中華人民共和國清潔生產促進法」、「中華人民共和國固體廢棄物污染環境防治法」等相關法律所制訂。而在綜合管理中的第十一條則明確規定了新建電廠應綜合考慮周邊粉煤灰利用能力，以及節約土地、防止環境污染，避免建設永久性粉煤灰堆場(灰塘)，若需建設者，原則上占地不得超過 3 年儲灰量設計，且粉煤灰堆場(灰塘)選址、設計、建設及運行管理應當符合「一般工業固體廢物儲存、處置場污染控制標準」(GB18599-2001)等相關要求。而第十二條則規定了煤灰相關排放方式，產灰單位灰渣處理工藝系統應按照乾濕分排、粗細分排、灰渣分排的原則進行分類收集，並配備相應儲灰設施。已投運的電廠要改造、完善粉煤灰儲、裝、運系統，包括加工分選、磨細和灰場綜合治理等設施。產灰單位既有灰塘，應制訂粉煤灰綜合利用專項方案和污染防治專項方案，並報所在地市級資源綜合利用主管部門和環境保護部門備案。新建電廠應以便於利用為原則，不得濕排粉煤灰。灰塘中的粉煤灰應按環境保護部門有關規定嚴格管理。

## 三、 日本

日本政府在 1968 年頒發《大氣污染防止法》第 2 條中，把燃煤廢渣規定為飛灰和塊狀煤渣。1991 年 4 月開始實施的《再生利用法》以及在其基礎上修改擴充並於 2001 年頒布的《資源有效利用促進法》中，把燃炭廢渣規定為特定副產物，規定業主有義務進行技術開發、設備改良，以便進一步提高指定副產物作為資源的循環利用率，加強提高燃煤廢渣利用率的法律約束。1993 年出版的《環境基本法》，對燃煤廢渣中的水銀、有機磷化合物、鉛、氟、硼酸等可能對土地、水源、空氣形成污染的物質含量規定了嚴格的檢測基準。2000 年 6 月開始實施的《循環型社會形成推進基本法》和 2005 年 4 月 1 日《廢棄物處理法》中規定，不法投棄燃煤廢渣的企業，應依法受

到處罰和有清洗被污染現場使其恢復原狀的義務。

#### 四、 歐洲

煤炭燃燒後之產物(Coal Combustion Products, CCPs)利用在歐洲是受到制定之標準及國家法令所規範，其相關規範及法令主要乃是由 CEN(European Committee for Standardization)歐洲標準化委員會或是各國國家當局所制定。其中，與煤灰相關之規範為 EN 450，該規範最早於 1994 年制定，該規範內容又分為兩大部分，分別為 EN 450-1 及 EN 450-2，並逐年進行些許修正。其內容除了規範煤灰之合格標準之外，更詳細制定有關煤灰之分類、篩選、乾燥、混合、減炭等細部規定。而若將 CCPs 運用於道路材料工程上時，則可參照 prEN 13282，而規範 EN14227 系列中之第 3 及第 4 部分則說明飛灰混合物之主要相關規定，在此系列中之第 14 部分則闡述利用飛灰進行土壤淨化的相關規定。其他如使用於混凝土骨材之規範為 EN 12620，瀝青鋪面材料為 EN 13043 及 EN 13055 則為輕骨材相關規範。

#### 五、 美國

在美國的煤灰處置管理上，主要是依據美國環保局(United States Environmental Protection Agency, EPA)所頒佈之國家法規「資源保護與恢復法案 (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)」。該法案為主要是修改 1965 年所頒佈之固體廢棄物處置法而來。該法規屬於聯邦法規第 40 條 part 239~282，其內容細分為 A~J 共 10 個部分。其中，有關煤灰處置之規定分列於 C (Cradle to Grave requirements)與 D (Non-hazardous Solid Wastes)兩部分，目前煤灰主要是歸納為 D 類，煤灰相關處置方式也大部分均規定在此。此外，EPA 於 2011 年所頒佈之「非危險廢棄物規定 (Non-hazardous Waste Regulations)」和「危險廢棄物規定 (Hazardous Waste Regulations)」亦有相關規定。2015 年 4 月，EPA 發布了電力公司燃煤產物的最終處置規範(Hazardous and Solid Waste Management System; Disposal of Coal Combustion Residuals From Electric Utilities; Final Rule)，但在規範中，

仍未明定燃煤產物是否屬於有害物質，因此燃煤產物是否屬於有害物質仍待商榷。除了聯邦規定之法規外，美國各州亦有自訂法規，唯需經由 EPA 認可方可執行。其中，在 RCRA 的 6903(27)條款中，明確說明了固體廢棄物的定義。其他有關於煤灰材料之相關應用規定，則於其他有關組織均另有各自相關規範，如：美國材料與試驗協會(ASTM)、美國混凝土協會(ACI)、美國混凝土鋪面協會(ACPA)及美國聯邦公路協會(FHWA)…等。

而在煤灰塘的部分，EPA 對於煤灰塘同樣給出了明確的規範，為了確保煤灰掩埋場所不會對於人體健康及環境造成嚴重影響，在最終規範中建立了有關煤灰回填區的最低限制，其中包含了地點的限制、阻水層設計標準、結構完整性要求、經營準則、地下水監測...等要求。詳細說明如下：

1. 地點的限制：在最終規範中，規定了 5 個針對場地的限制，不可位於以下地點最上層含水層、濕地、地震影響區、不穩定區域以及斷層帶。煤灰掩埋場所的所有者及經營者均需出具相關證明，證明該場所符合以上條件，此限制乃針對新的煤灰掩埋場址。而在規範中亦有說明已營運之場址僅需符合不穩定場址此條件即可，且若該場址本身已存在於不穩定區域上則可進行適當的地盤改良或是工程手段來滿足此條件。規範中同時說明若已營運場址所有者及營運者未能滿足條件則需立即關閉該場址，而新場址若未能滿足條件，則不能進行回填處置。
2. 阻水層設計標準：在最終規範中，詳細說明了阻水層的設計標準，阻水層的存在主要是為了防止煤灰污染物滲入土層下方造成地下水污染。所有新的掩埋場址均需採用複合襯墊，襯墊需由一土工膜以及一 2 英尺厚之壓實土層直接安裝其上共兩部分組成。然而規範中同時說明可用其他複合襯板進行取代，但其功能必須與規範要求之襯板具有同樣的效果。然而，在此規範生效後，已使用之場址不需遵守此一規定，仍可繼續使用。但該場址需符合地下水監控及改善標準，及時解決地下水污染問題。
3. 結構完整性要求：在規範中要求場址所有者及營運者需定期針對結構完

整性進行評估，該評估項目包括：(1)定期進行潛在危險性評估；(2)由專業之工程師進行定期記錄評估設計、施工、營運和維護是否符合標準；(3)進行定期的安全性評估，評估是否達至最低標準的穩定性，若經過評估未能達至安全係數則需立即關閉該場址停止使用。

4. 運行準則：運行準則包括空氣標準、煤灰回填控制、水力排放要求以及定期檢驗等。這些標準被建立於防止來自於煤灰對人體健康及環境的衝擊。空氣標準主要是為了防止來自煤灰的經由風所造成之粉塵污染，規範中規定所有者及營運者需將來自場域所造成之粉塵污染最小化。
5. 地下水監測及改善措施：地下水監測要求所有者或是經營者需安裝監控井及取樣井，除了分析收集到的地下水數據，並檢測有無有害成分存在(如：有毒金屬)及其他參數(如：pH 值，總溶解固體)。一但監測值超出地下水標準規定值則必須立刻進行改善。
6. 場址關閉及關閉後要求：規範要求在场址關閉以及關閉後需依據特定標準監控和維護場址一段時間，監控項目包括地下水質監測和修復計畫。這些標準用來確保場址關閉後的長期的安全性，因此需保證確實執行。煤灰處理場的關閉是必要完成的，處理方法除了移除了現有煤灰外亦可安裝覆蓋系統來達成。所有者及營運者需準備關閉及關閉後的計畫。
7. 持續記錄、通知及網路發佈：最終規範中要求煤灰處理單位需做營運記錄。此外，需通報美國管理部門，並將資訊公佈在網路上使其透明化。
8. 可分離性：EPA 將本條規範視為可分離，表 2-2-2 提供了各項規定的具體要求。

綜合以上世界各國對於煤灰之相關規定可了解，燃煤產物(飛灰及底灰)大都均視為可再利用之資源亦或是特定的副產物。甚至在法規中提及相關業主需進行燃煤產物資源再利用的技術開發。然而，在將燃煤產物視為再利用資源的同時，各國亦規定了對於煤灰利用的管理辦法，以避免業者胡亂使

用造成嚴重的環境污染(如大陸)。且對於無法再利用之燃煤產物，若採用堆置處理方式，除了須遵規定中所規範之排放方式之外(各國規定排放方式有所不同)，目前綜合各國規範，回填堆置場最低要求均須有排水收集設施，避免造成周邊河川、海洋以及地下水之污染。

表 2-2-2 煤灰處置場要求規範

CCR Landfill Requirements				
Requirement	Existing CCR Landfills		New CCR Landfills and Lateral Expansions	
	Required? <sup>1</sup>	Rule Section	Required? <sup>1</sup>	Rule Section
Location Restrictions:	√	§257.64	√	§257.60 - §257.64
Placement Above the Uppermost Aquifer			√	§257.60
Wetlands			√	§257.61
Fault Areas			√	§257.62
Seismic Impact Zones			√	§257.63
Unstable Areas	√	§257.64	√	§257.64
Floodplains <sup>2</sup>	√	§257.3-1	√	§257.3-1
Endangered Species <sup>2</sup>	√	§257.3-2	√	§257.3-2
Design Requirements:			√	§257.70
Composite Liner			√	§257.70 (b & c)
Leachate Collection and Removal System			√	§257.70 (d)
Groundwater Monitoring and Corrective Action	√	§257.90 - §257.98	√	§257.90 - §257.98
Weekly Inspections	√	§257.84 (a)	√	§257.84 (a)
Annual Inspections	√	§257.84 (b)	√	§257.84 (b)
Fugitive Dust Controls	√	§257.80	√	§257.80
Run-on, Run-off Controls	√	§257.81	√	§257.81
Surface Water Protection <sup>2</sup>	√	§257.3-3	√	§257.3-3
Closure Requirements	√	§257.100 - §257.103	√	§257.100 - §257.103
Post-Closure Care	√	§257.104	√	§257.104
Recordkeeping Requirements	√	§257.105	√	§257.105
Notification Requirements	√	§257.106	√	§257.106
Publicly Accessible Internet Site Requirements	√	§257.107	√	§257.107

<sup>1</sup> √ = required,  = not required.  
<sup>2</sup> In existing regulations at 40 CFR part 257, subpart A.

### 2-2-3 煤灰塘相關處置方式

煤灰塘的應用往往取決於該國的土地資源，以澳洲為例，由於其國內地廣人稀，且多沙漠地區，因此該國煤灰塘回填完畢後，並未有任何後續應用。而在日本，由於日本國內很早便針對煤灰後續處置方式有所研擬，對於煤灰塘之後續應用多半採取植被覆蓋，並重新建造為休憩公園，提供給予人民使用。而在歐洲，則採取多年生牧草及植木造林方式重新整治回填完畢煤灰塘，此舉可為當地居民和生態系統帶來長期的效益，如：重新造林可帶來額外的利益(木材的生產)，景觀上的完全改變。並重新建造一個引人注目且健

康的土地。在臺灣方面，由於臺灣地狹人稠，土地資源稀缺的情況下，煤灰塘回填完畢後之利用顯得格外重要。目前臺灣煤灰塘土地之利用主要是經過地盤改良後，再於灰塘上方興建煤倉或是其他構造物進行使用，此舉不但可以對於回填完之灰塘重新進行整理，且對於土地資源的利用亦可發揮最大效益。

目前臺灣國內僅對於垃圾燃燒後之灰渣處置場有相關之規定，對於燃煤發電後之煤灰處置場無明確規定。然而，針對煤灰塘處置辦法，在國外已有詳細報告可以作為參考<sup>[14]</sup>。一般而言，煤灰塘對於周遭環境的污染問題有土壤污染、水及地下水污染、粉塵飛散以及毒素進入食物鏈等，如圖 2-2-2 所示。在整治煤灰塘前應先針對煤灰塘附近之環境進行評估與研究，首先須先針對周圍環境進行歷史性的研究，研究內容應包含以下項目：

1. 可能受影響之土地及水(例如:農業土地、森林、居住地、遊憩用地、垃圾處理場)。
2. 電廠使用之煤與灰性質長期研究，須針對原料煤與燃煤後之灰燼定期進行基礎物理與化學性質試驗。
3. 周圍動植物觀察及調查，針對煤灰塘周圍植物、作物、養植動物、養植漁業觀察植物生長、可見的中毒症狀等，可訪問當地居民以獲得更多資訊。
4. 了解當地的關注重點與需求，了解煤灰塘當地的社會背景尤為重要，以確定整治計畫的長期持續性。基本上優先處理可能污染的議題。
5. 針對土壤與水的長期污染觀察，應有適當的參考標準與依據，以臺灣而言可參照行政院環保署所公告之土壤與地下水污染管制標準為參考依據。

此外，在對煤灰塘周遭環境情況瞭解完成後，針對整治方法的進行可以概略為 4 個以下步驟進行：

1. 問題定義：定義目標和整治策略的動機。此目的可以解決當地問題並納入具體需求。總體來說，定義問題需滿足立法、社會和環境的要求。
2. 整治選項篩選：整治策略方法的運用需要說明一個項目於減少污染的有效性以及相對的安全性，使整治項目不會再增加煤灰處置所帶來不必要的風險。
3. 整治策略：制定整體整治策略以設定多個整治項目的組合解決多重面污染問題。替代策略可看作一個全體，考量不同解決方式間的交互作用。
4. 監測與評估計畫：制定監測措施以評估及確保策略的長期可持續性。尤其是定期策略的檢討為必要的，用以檢查對原始整治目標以及任何新出現的地方關注和環境條件改變後，策略的成效。

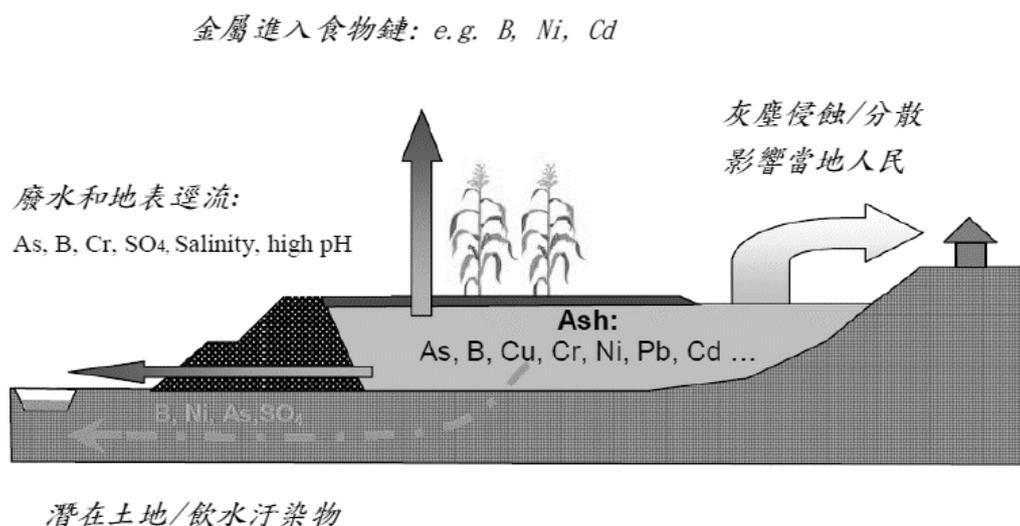


圖 2-2-2 污染種類及途徑

由於採用回填堆置煤灰進行煤灰的去化，往往需要消耗掉大量的土地資源，因此在煤灰去化上，可以加以考量的是擴展舊有或現存的煤灰場地亦或是找到其他替代的煤灰去化方案。最後，煤灰塘回填完成後，後續利用的考量也甚為重要，早期在歐洲地區會將煤灰塘利用土壤覆蓋之後作為農業用地，但在長期的觀察之下，發現土壤污染可能會進入食物鏈，反而引起當

地居民的抗爭，而造成不良觀感。經由調查煤灰塘附近居民意願後，可知建立一個綠色空間是較讓居民可接受的的選項。綠色空間的建立，可以帶來兩個優點，其一是綠色空間有助於保護當地環境免於工業污染(以臺中灰塘為例附近多工業區)，其二有一個引人注目且多樣化的綠色空間可改變居民對於煤灰塘污染的壞印象。因此根據調查在國外，煤灰塘後續利用作為開放的森林地可能是當地居民最為歡迎也最為可行的選項。

## 2-3 煤灰塘改良工法

台灣國內目前煤灰塘填地完成後，大都需要經由地盤改良技術進行相關整治後，再選擇後續利用方式，如還地、建造上部構造物等。而國內外大面積應用於地盤改良之工法，包括有淺層攪拌工法、(中)深層攪拌工法、排水預壓工法、動力夯實工法、振動擠壓工法…等。相關工法種類眾多、施工程序各異且應用性均大不相同，以下便針對可資應用於煤灰地層改良之工法進行說明如下：

### 2-3-1 淺層攪拌工法

淺層攪拌工法係以地表面下 1~3 公尺內之軟弱地層為主要處理對象，可透過排水、被覆、置換和攪拌等方式，利用特殊機械，將固化材就地與軟弱地層材料攪拌後，經夯實形成堅實之地層，以增加基礎承載力，依材料種類可區分為水泥和水泥系硬化材穩定法、瀝青穩定法、石灰穩定法及工業副產品穩定法等。同時，近年因各種新式土壤改良劑之研製成功，該工法已不受限於僅以土壤水泥、土壤石灰和土壤瀝青應用於改善道路、機場跑道、淤泥和廢棄雜物等軟弱地盤改良。現今該技術對於高含水量黏土、有機質污泥亦可獲得良好應用成效，相關應用案例如圖 2-3-1 所示。

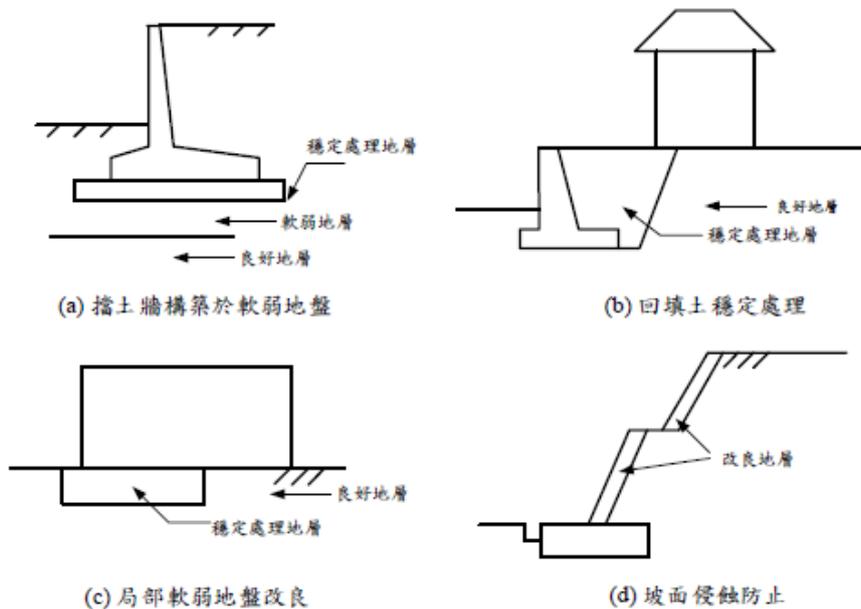


圖 2-3-1 淺層攪拌工法之應用例 (重繪自 廖洪鈞和陳福勝，2006)

### 2-3-2 CLSM 工法

CLSM 為 Controlled Low-Strength Material 之縮寫，國內公共工程施工綱要規範翻譯為「控制性低強度回填材料」。依美國混凝土協會(ACI)定義，CLSM 為一種具備可自行充填(self-compacting)，用以替代級配材料的新興回填用材料，其定義相當廣泛，舉凡可流動性的回填料、低收縮性的可控制式低密度回填料、可流動性漿體、可塑性之水泥質材料等，皆可為廣義之 CLSM。關於 CLSM 使用的粒料，包括一般天然砂石粒料、再生粒料、回收玻璃及現場剩餘土石方等，均可用以拌製 CLSM，在國內外已有不少實例(例如：歐美國家常利用 CLSM 材料，進行橋台背填土的回填，圖 2-3-2)，皆獲得成功的結果，兼具減少廢棄物與資源再利用功效。

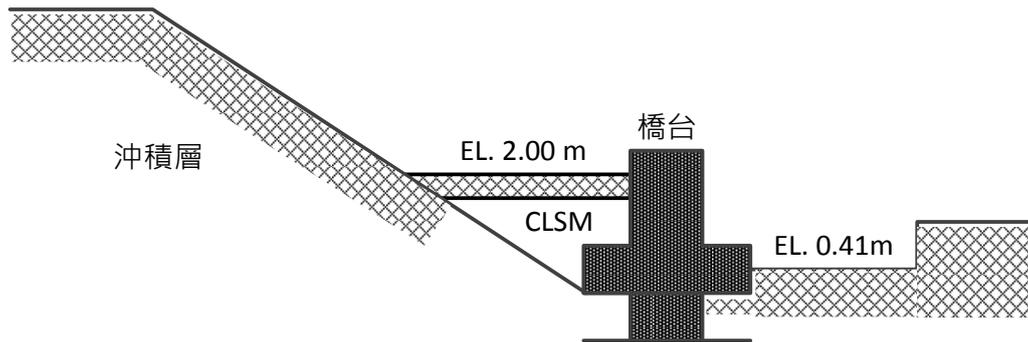


圖 2-3-2 CLSM 材料於橋台回填應用示意圖

### 2-3-3 排水預壓工法

係利用額外載重使土壤產生超額孔隙水壓，或利用透水性良好之砂礫、砂帶、紙帶、預製排水帶等材料以縮短排水路徑，達到地層排水與事先壓密之效果。此外，本工法主要由排水系統與加壓系統兩部分組合而成，其中排水系統包含砂(袋)樁及預製排水材，加壓系統包含堆載法、真空法、降低地下水位法及電滲法，並隨使用排水材料或預載方法之不同可分為預載排水工法、砂樁排水工法、預製排水工法及預載配合砂樁排水工法等四類，施工過程可以減少土壤之孔隙比、含水量、透水性及增大土壤密度以達到降低日後沉陷量及增加土壤剪力強度為目的。因此於構造物施築前，可先於基地打設排水材及施加預壓力，藉由水分排出土層而達到預先壓密之效果。

### 2-3-4 動力夯實工法

係利用吊車或特製之起重設備將鋼製或混凝土製之重錘吊起相當高度，再讓重錘自由落下，藉重錘落下時所產生之巨大衝擊能量改變現地土壤組構，使疏鬆地層壓縮趨於密實。為了能夠有效改良深層地盤，一般將夯擊點規劃為棋盤式配置，各夯擊點間保持相當距離，並依改良需求及地層特性、超額孔隙水壓激發情形等分一至數個階段夯擊，每一夯擊點以重錘多次反覆夯擊，此階段夯擊改良為主錘擊或稱主搗實。主錘擊完成後，由於夯錘衝擊地表形成陷坑，經整平後再以較低夯擊能量之夯錘，進行密接式整平錘擊以改良表層鬆散之地層。動力夯實工法早期僅用於滲透性高之砂性土層

改良，但經過數年的應用與發展，施工方法與排水條件在不斷的改進下，本法也適用於低透性飽合黏土之改良。

### 2-3-5 振動擠壓工法

台灣地區常用之振動擠壓工法主要包括振動擠壓砂樁工法與礫石樁樁工法等二種，因成樁方式之不同，對周圍地層產生三種作用，一為擠壓密實作用(砂質地層)或置換作用(粘質地層)，一為加勁補強作用，一加速排水作用。茲將此二種工法之施工方式和適用範圍說明如下：

1. 振動擠壓砂樁工法：振動擠壓砂樁工法之施工係利用振動機及高壓空氣的輔助，將中空鋼套管貫入擬改良地層中，於達預定改良深度後，再將回填砂料由施工機械上部之填料斗投入，經由鋼管及管底的自動靴將砂料投送至管底，然後藉由鋼管的上下反覆拉拔及貫入，將回填砂料擠壓並夯實成一直徑約 0.60m~0.70 m 的堅實柱體，使砂樁周圍土壤受到擠壓及振動趨於緊密，達到增加地層密度和剪力強度之目的。同時，振動擠壓砂樁工法最適用於細料粒含量低於 30% 之砂質土層，且其改良成效隨細料粒含量增加而遞減。
2. 礫石樁工法：礫石樁工法之施工可分為傳統之濕式頂部投料與改良之乾式底料供料二種施工方式。採用乾式高壓空氣輔助施工相較於濕式使用噴射水流施工方式，可保持乾淨之施工環境，同時採用底部供料方式較頂部投料方式，可確保礫石料投卸至施工深度而不致半途阻塞於樁孔內，對於施工品質較易掌握。此外，改良乾式底部供料之施工機械，具有良好之品質監控記錄器，可以隨時掌握每一深度之投料量和夯實壓力，較濕式施工更能確保施工品質及改良成效之均勻性。由過去施工經驗顯示，若擬改良地層細料粒含量低於 10%，則藉由乾振(不需填充材料)可得顯著之擠壓夯實效果，但細料粒大於 30% 時，則擠密夯實效果明顯降低，須填充礫石料以增加改良效果。

### 2-3-6 WILL 工法

WILL 工法(Windmill method)為中層攪拌地盤改良工法，其係使用配載鋼體螺旋狀攪拌翼之處理機，於地層中進行三向度搖動攪拌時注入固化材，使其與灰塘煤灰相互攪拌、充分混合後而產生強度較高的改良體(如圖 2-3-3)。依島野嵐等人 (2009)說明，隨攪拌翼型式(T 型和箱型，圖 2-3-4)和處理機型號的不同，WILL 工法可適用於黏土層及砂土層，而可達改良深度和改良土壤強度要求如表 2-3-1 所示。

WILL 工法採用搖動式攪拌翼均勻混合固化材與軟弱地層，具有攪拌效率高和較佳之改良品質。此外，附屬的鑽掘輔助裝置，鑽掘能力佳，可使用於 N 值大於 30 的混合砂質地層。並可使用高性能之資訊管理系統監控改良施工深度、瞬時流量、累積流量、回轉數以及傾斜角度等數據變化，相當適用於狹長和施工條件較為不佳之施工場址。



圖 2-3-3 WILL 工法施工情形和主要工作處理機



(a) T 型攪拌翼

(b) 箱型攪拌翼

圖 2-3-4 WILL 工法攪拌翼型式

表 2-3-1 WILL 處理機規格和適用土壤

機具類型	最大改良深度	適用土壤(N 值)	
		黏性土	砂質土、砂礫
0.8 m <sup>3</sup>	5.0 m	N<10	N<30
1.0 m <sup>3</sup>	6.0 m	N<10	N<30
1.4 m <sup>3</sup>	8.0 m	N<15	N<30

## 2-4 土壤固化/穩定化(Solidification/Stabilization, S/S)整治工法

由於重金屬污染具有範圍廣泛、持續時間長、污染隱蔽性高、無法被生物所分解，並可能通過食物鏈不斷地在生物體內積聚，最終進入人體內累積進而影響身體健康等特點。因此，土壤重金屬污染日益引起人們的關注。而修復重金屬污染土壤的技術發展一直是國際上的熱門研究課題。目前常用的污染場址修復技術主要包括開挖法、固化/穩定化法(solidification/stabilization, S/S)、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法、現地土壤沖洗法…等<sup>[19]</sup>。依據美國 EPA 土地修復技術年度報告(ASR)第 12

版<sup>[20]</sup>，1982~2005 年期間，共對 977 個場地進行整治，其中，有 217 個場地整治工法採用 S/S 整治技術。由於 S/S 整治技術具有快速、有效及經濟等特點，目前被廣泛的應用於各類危險物的處理。

S/S 整治工法的起源可以追溯到 20 世紀中期世界各國對於放射性物質處置。例如，美國在處理具有放射性之液體時，先用礦物進行吸附或是利用水泥將其固化然後再將其進行填埋處置。而在歐洲則是利用水泥進行固化再用惰性材料包封，進行海洋處置。而在大地工程領域中，水泥拌合土壤固化則是常利用來做為地盤改良。水泥是 S/S 整治技術中最常被使用來處理重金屬污染的材料，在過去的 50 年裡水泥固化技術最廣泛的應用於重金屬污染的整治過程。之所以採用水泥做為固化材，主要是因水泥的加入可以為重金屬提供一個鹼性環境，此環境可抑制重金屬的滲漏<sup>[15-17]</sup>。

S/S 處理程序可採現地(in-situ)或離地(ex-situ)處理，一般來說大多採離地處理，現地處理較少，但隨著技術逐漸發展成熟，近年來現地處理案例也逐漸增加。S/S 整治技術主要是為了達到以下目的：

1. 減少污染物移動或溶解性或達到法規之可接受風險要求。
2. 減少場址之滲透性(通常低於  $10^{-6}$  cm/sec)，減少污染物與地下水接觸之機會。
3. 增加抗壓強度。

以紐澤西因處理木材防腐而導致土壤污染之土地修復為例(圖 2-4-1)<sup>[18]</sup>，該場地約 320 公頃，該土壤受到砷、鉻和多環芳香烴的污染。在整個整治計畫裡面總共包含了以下 3 個部分：

1. 污染土壤的預先開挖
2. 整治材料以及重機具的放置位置規畫
3. 現地整治所需攪拌機頭選定

整治過程為將水泥混入污染土壤中，並利用攪拌機將其混合均勻後並確實的進行壓密及壓實，該硬層厚度約為 2 ft 形成於土層頂部。在規定上對於土壤污染處理的標準為無圍壓縮強度應至少達 25 psi (1.75 kg/cm<sup>2</sup>)，在經過水泥固化後，現地土壤無圍壓縮強度均大於此值。這樣的混合水泥土層強度提供了路面承載上方結構及荷載絕佳的效果。在整個整治過程中，採用 8% 的水泥量進行固化，該場址後續利用乃是做為貨櫃進出碼頭。



(a)木材處理場現地攪拌



(b)現地攪拌機機頭形式



(c)現地攪拌機混合土壤與水泥



(d)紐澤西典型貨櫃場

圖 2-4-1 現地固化整治案例 1<sup>[18]</sup>

第二個案例為美國法規限制了紐約和紐澤西州的港口疏浚沉積物進行海洋棄置，當時紐約港務局面臨尋找地方處理數千萬立方米沉積物的困境，因此採用水泥當作固化材料之 S/S 整治技術被應用處理這些廢棄沉積物。在這些沉積物中主要污染物為重金屬、多氯聯苯以及其他有機污染物等。利

用 S/S 整治技術進行處置後，成功的將原先的環境責任及危害轉變成為具有價值的結構性回填。其中疏浚泥是由船運送置碼頭後加入水泥固化材，再利用挖掘式機具進行混合攪拌(圖 2-4-2(a)、(b))。

在混合完成後，這些經過 S/S 整治技術處理之材料乃是作為紐澤西一個老舊的市政垃圾掩埋場回填材料使用(圖 2-4-2(c))，這些回填材料共回填覆蓋了 8 公頃的面積，且該回填地後續也被允許做為商場(圖 2-4-2(d))。同樣地，在此案例中，水泥比例依然是採用 8% 進行固化處理。在此案例中，成功的將原先具有嚴重環保議題之疏浚泥沉積物經由 S/S 技術處理後轉換成具極高價值之工程回填材料。



(a)紐約港疏浚底泥 S/S 處理照片



(b)機具攪拌混和水泥及土壤



(c)土層壓密照片



(d)土壤整治完成後土層上方所興建之購物中心內部照片

圖 2-4-2 現地固化整治案例 2<sup>[18]</sup>

上述案例均是針對已受污染的土壤進行固化整治處理，但明顯可見固化整治處理在現今的土壤整治技術中確實越來越普及，除了其具有不錯的整治效果外，也因在當地進行處理，在整治費用上也較為經濟。然而，本案所提出之一次性地改理念，除了有固化整治之概念外，因在回填排放時變已注入水泥固化材利用水利排放過程進行混合，因此後續回填完成後並不需如前述案例再利用攪拌機具進行攪拌混合，又再次將費用做進一步精省。雖然台灣電力公司目前所產之煤灰經由 TCLP 檢驗後均無重金屬污染之疑慮，但若在回填煤灰塘時可同步進行固化，則亦等同於進行整治，相信可再降低環保人士對於煤灰重金屬污染之疑慮。此外，更可如前述沉積泥之利用一般，將煤灰變為極具價值之工程回填材料。

## 第三章 煤灰低強度回填材料之研發

本研究之主要目的為探討一次性地改後煤灰塘之地層強度可達改良需求。因此，對於煤灰低強度回填材之配比便需進行一系列研究，以求取最佳配比。研究中配比試驗之材料共包含煤灰、水泥、水及添加劑(視試驗情況考慮添加)等 3~4 種不等。在計畫中，煤灰低強度回填材配比設計之重點有三：

1. 需有足夠之「流動性」以利後續排放至灰塘之中。
2. 回填材料需有足夠之「強度」以達至填地完成後之需求，而在強度足夠的情況下水泥的使用量需盡量達至最少亦即煤灰用量最大化。
3. 除上述兩個主要條件外，若加入添加劑，尚需考量環境保護，以無毒添加劑為主。

以上述三個條件為標的，藉由一系列的配比試驗設計，找出符合需求之配比及添加劑，作為後續現地小規模試驗之參考。本試驗將就以下數個部分進行試驗與探討：1.水泥加底灰低強度回填材；2.不同添加劑之性能與配比；3.不同添加劑劑量；4.不同固材化加煤灰之低強度回填材；5.不同養護齡期以下便就上述各項試驗逐一進行說明。

### 3-1 煤灰低強度回填材試驗材料與步驟

在進行室內煤灰低強度回填材配比試驗前，需先了解製作煤灰低強度回填材所需之各項材料物理特性與化學性質，且嚴格控管各項材料之來源品質均需相同，避免因材料來源不同而導致試驗有所誤差。此外，煤灰低強度回填材之製作流程亦至關重要，本研究在製作煤灰低強度回填材之試體時，亦設計了一固定施作步驟，使每個低強度回填材之試體之製作變因降至最低。以下就試驗材料及步驟進行說明：

### 3-1-1 煤灰低強度回填材試驗材料性質與來源

本配比試驗所採用之材料項目如下：

1. 水泥：本研究所採用之水泥為台灣水泥公司生產的普通卜特蘭 I 型水泥，性質符合 ASTM C150 或 CNS 61 之水泥規格，其化學成份與物理性質如表 3-1-1 所示。

表 3-1-1 水泥之化學成分及物理性質

試驗項目		水泥(第一型)	
		CNS61	台灣水泥 I 型
化 學 成 分 (%)	SiO <sub>2</sub> (S)	—	22.01
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	5.57
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (F)	—	3.44
	S+A+F	—	31.02
	CaO	—	62.8
	MgO	CNS61(Max:6.0)	2.59
	SO <sub>3</sub>	CNS61(Max:3.0)	2.08
	F-CaO	—	1.05
	TiO <sub>2</sub>	—	0.52
	Na <sub>2</sub> O	—	0.4
	K <sub>2</sub> O	—	0.78
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	0.05
	燒失量	CNS61(Max:3.0)	0.51
	不熔殘渣	CNS61(Max:0.75)	0.08
	C <sub>3</sub> S	—	40.1
	C <sub>2</sub> S	—	32.8
C <sub>3</sub> A	—	8.9	
C <sub>4</sub> AF	—	10.5	
物 理 性 質	細度(cm <sup>2</sup> /g)	Min:2800	2970
	比重	—	3.15
	(Vicat)初凝	>45min ; <375min	277min (W/C=0.47)
	(Vicat)終凝	<600min	502min

2. 拌合水：本研究拌合水取自台北市自來水廠提供之一般可飲用水，符合 CNS13961 之自來水品質要求。
3. 飛灰：本研究採用飛灰為細微粉末狀，顆粒主要呈中空球形狀，其比重較一般土壤為低，且液限、塑限都較一般土壤高，塑性指數較低，並具有一定活性。因此，飛灰具有輕質性、流動性、並且無塑性，以及毛細

管作用力強等特性。其主要化學成分包含有氧化矽( $\text{SiO}_2$ )、氧化鐵( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )及氧化鋁( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )，次要成分包含氧化鈣( $\text{CaO}$ )、氧化硫( $\text{SO}_3$ )、氧化鉀( $\text{K}_2\text{O}$ )、氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )、氧化鎂( $\text{MgO}$ )、氧化鈉( $\text{Na}_2\text{O}$ )以及燃燒未完全的碳。由於不同電廠燃燒後之煤灰性質皆有所差異，本次試驗乃以台中電廠所產煤灰為主。因此，飛灰來源為台中電廠之燃煤產物。

4. 底灰：本研究採用之底灰顆粒較粗糙，其化學成分大致上和飛灰一樣是以矽、鋁、鐵、鈣、鎂之氧化物為主，但是底灰之鐵含量較飛灰為多，表面粗糙為不規則結構，微粒也較粗。而乾底灰是綠到黑、相當圓、有多孔隙表面。底灰主要只跟燃燒爐之型式有關。來源與飛灰相同，均來自於台中電廠燃煤產物。

### 3-1-2 室內煤灰低強度回填材試體製作步驟

為了能夠清楚觀察煤灰低強度回填材回填材料拌合後之沉澱狀況，本研究室內試體均採塑膠膜製作，如圖 3-1-1 所示。圖 3-1-2 為利用游標尺量測塑膠膜照片，由照片中可知直徑塑膠模直徑為 5 cm，而模型高度則視試驗需求可自行進行調整。然而因本研究配比設計依據台電長期水力排灰之經驗，水與底灰之比例為 2.3:1，可知在試體製作過程中，水量相當多，因此塑膠套之高度均有足夠高度以避免水量過多時溢出。而塑膠膜之底則以封膜機(圖 3-1-3)進行封口，並用水先行測試是否密封完全，避免水由底部滲出，如圖 3-1-4 所示。

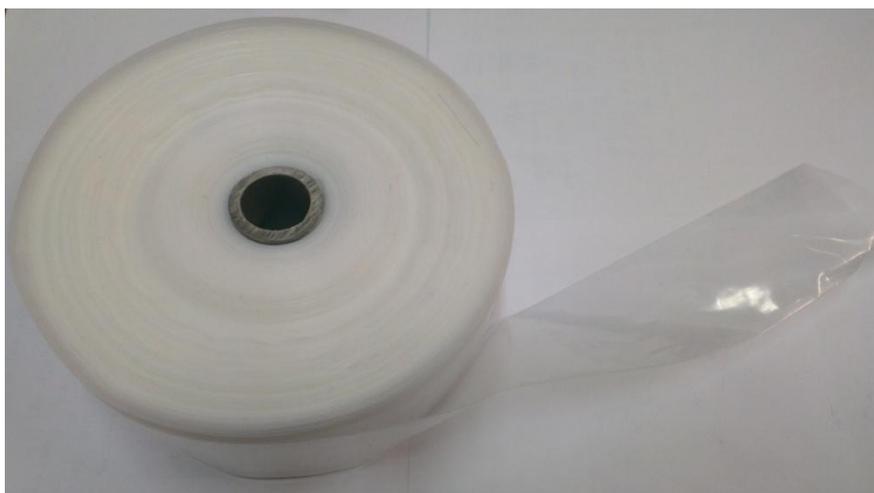


圖 3-1-1 透明塑膠膜

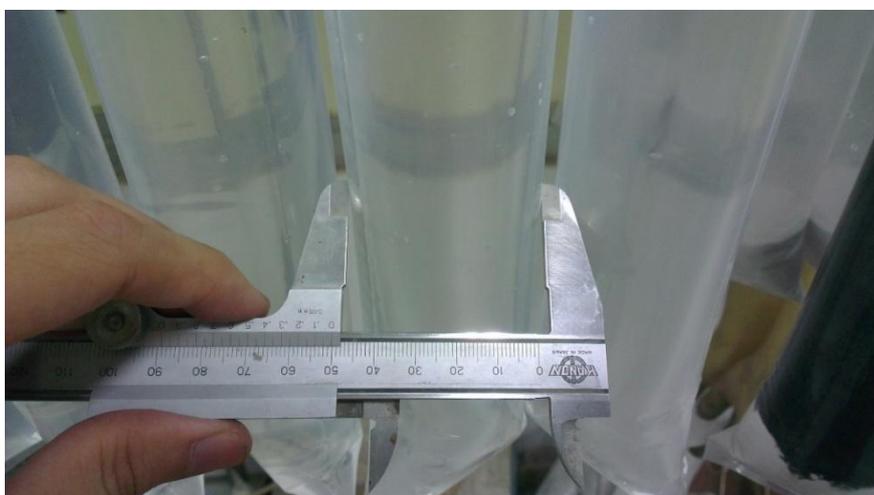


圖 3-1-2 塑膠膜直徑測量



圖 3-1-3 封膜機

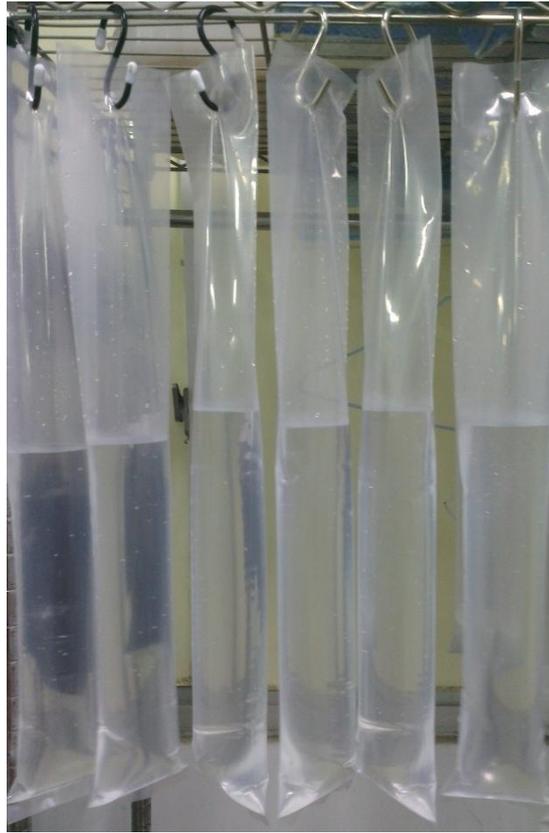


圖 3-1-4 底部封膜加水測試

完成塑膠膜後，即可進行煤灰低強度回填材試體製作，相關煤灰低強度回填材製作以及取樣流程步驟如下：

1. 預設底灰單位重，秤取適量之底灰，控制回填後之煤灰低強度回填材回填材料高度約為 15 公分（大於取樣高度）。
2. 為探討煤灰低強度回填材回填材料在不同配比情況下之力學行為，採用不同水泥配比  $a_w$  用以控制水泥添加量。

其中，水泥配比  $a_w(\%)$  之定義如公式(1)：

$$a_w (\%) = \frac{W_c}{W_s} \quad (1)$$

式中， $W_c$ :水泥質量(g)； $W_s$ :底灰質量(g)

3. 先秤取所需之底灰及拌和水，並置於攪拌器中均勻攪拌。

4. 秤取所需要的水泥及拌合水，並置於攪拌器中均勻攪拌。
5. 將步驟 4 和步驟 5 拌合完畢的材料注入塑膠膜中，搖晃一分鐘後，使其在塑膠膜中自然沉降。
6. 將煤灰低強度回填材回填材料靜置於塑膠膜中進行試體養治，養治時間為 7 天、14 天及 28 天。
7. 以刀片切開塑膠膜，取出養治完成之煤灰低強度回填材回填材料。

## 3-2 水泥加底灰低強度回填材試驗

### 3-2-1 試驗配比設計

依據 3.1 節所述步驟，首先就水泥與底灰兩種材料進行拌合製作試體，在本試驗中同步試驗水泥量多寡對於煤灰低強度回填材回填材料的影響性。本次試驗之水泥與底灰配比如表所示。其中水與底灰之重量比為 2.3:1，水灰比設定為 1，水泥與底灰比例由 20%、40% 逐步提升至 100%，養護齡期則分別養護 7 天、14 天以及 28 天。

由於本試驗流程為將水、底灰及水泥混合後倒入塑膠膜中，讓底灰加水泥回填材料在水中進行自由沉降。如圖 3-2-1 為不同水泥比例水中養護照片，由圖中可以明顯看出，單純水泥加底灰之回填材料，受到底灰與水泥粒徑大小差異較大影響，於水中自由沉降時，沉降速度不同而導致水泥與底灰產生明顯材料析離現象，析離現象越明顯同時說明底灰回填材料本身的膠結能力越差。此外，在圖 3-2-1 中，拌合水在底灰回填材料倒入後，明顯變得相當混濁，顯示水中充滿細顆粒底灰的懸浮粒子。

圖 3-2-2~圖 3-2-4 分別為養護 7 天、14 天以及 28 天之拆模照片。由圖中，可發現受到粒徑大小不同沉降速度亦隨之不同的情況下，試體明顯可區分為兩個部分，上半部為水泥，下半部為底灰。且隨著水泥量的不斷增加，對於材料析離的改善仍然不甚明顯且即便水泥與底灰之比例達至 1:1，材料

析離仍是相當明顯。而在水泥比例的部分，水泥比例 20%及 40%時，試體受到除受到材料析離以及水泥量較低而導致至膠結能力不足，拆模後試體開裂成上下兩部分。而比例 60%~100%，雖然材料析離仍在但膠結能力因水泥量增加而提升，試體拆模後並未開裂。而隨著養護時間越久，試體本身強度也逐步增加。

表 3-2-1 底灰回填材料配比設計一覽表

水和底灰 重量比	水泥+水 水灰比	水泥/底灰 百分比	養護齡期		
2.3:1	1:1	20%	7天	14天	28天
		40%			
		60%			
		80%			
		100%			



圖 3-2-1 不同水泥比例水中養護照片



圖 3-2-2 不同水泥比例養護 7 天拆模照片



圖 3-2-3 不同水泥比例養護 14 天拆模照片



圖 3-2-4 不同水泥比例養護 28 天拆模照片

### 3-2-2 試體抗壓強度試驗結果

抗壓強度通常被認為是品質特徵中最重要之工程性質之一，也是一般品質控制的重要參考指標。前述水泥加底灰之回填材料，希冀透過不同水泥量，並利用大量實驗數據分析驗證其對抗壓強度品質之影響。水泥加底灰回填材料分別於齡期 7 天、14 天、和 28 天進行抗壓試驗，依據相關研究經驗養護 14 天後，試體強度成長趨勢會逐漸趨緩，因此本試驗選擇實驗試體抗壓強度量測至 28 天。本試驗所設計之回填材料，其用途是為了符合台電灰塘回填用地歸還標準，故抗壓強度滿足地盤改良之需求即可，其最終強度並不可列為評估回填材料品質的主要標準，僅作為品質控制之參考標的。抗壓強度量測流程如下：

1. 依據 ASTM C31、C192、C617 及 CNS 1230、1232 之規定，製作直徑 5 cm、高 10 cm 之圓柱試體，拆模後個別養護不同配比之實驗試體。
2. 將不同養護齡期之圓柱試體於抗壓前 24 小時取出陰乾。
3. 把乾燥之試體置於蓋平台之平整面上，並以石膏於圓柱試體頂部加以蓋平，使得試體能與抗壓機之抗壓面完全接觸，減少誤差。
4. 蓋平後的試體需置於抗壓機上，本研究採用土壤 C.B.R 抗壓試驗機，設備如圖 3-2-5，進行抗壓試驗，試驗所得之量測值即為試驗試體的抗壓強度。

表 3-2-2~表 3-2-4 為水泥加底灰回填材料試體抗壓強度初步試驗結果。由量測所得之抗壓強度結果可知，試體強度並不因水泥添加量與養護齡期的增加，而有規律性的增加。由前述試體拆模照片可以得知，以水中沉降的方式來施作，都會有明顯析離的問題存在。產生析離的因素，主要是因為底灰粒徑大小不一致，粗顆粒的底灰沉澱速度較快，細顆粒的底灰與水泥沉澱速度較慢，因此造成水泥無法均勻分布在試體當中，底部水泥含量較少的部分，便是單壓試驗主要破壞的部分。受到析離影響，底部的水泥量並不會

因水泥比例提高而隨之增加。此也是造成單壓強度不因水泥添加量與養護齡期，而有規律性的變化的首要因素。

由水泥加底灰的試驗結果可知，若僅單純使用水泥加底灰，材料析離的現象相當嚴重，對於現地填地標準而言，相當不佳。受到析離分層的影響，底層材料強度明顯不足，亦可能產生液化現象。雖然在提升水泥百分比後，可以增強回填材料強度，但由於現地灰塘空間有限，水泥量的增加勢必會壓縮灰塘空間，對於煤灰去化效益而言相當不佳。因此，如何降低水泥使用量、改善材料析離現象、增加回填材料之強度以及兼顧環保議題為本研究之主要課題。



圖 3-2-5 土壤 C.B.R 試驗機

表 3-2-2 養護齡期 7 天之單壓強度

水泥/底灰 百分比	養護齡期	單壓強度 kg/cm <sup>2</sup>		
		20%	-	-
40%	7天	-	-	-
60%		3.82	-	-
80%		3.11	3.11	1.83
100%		2.75	4.07	8.71

表 3-2-3 養護齡期 14 天之單壓強度

水泥/底灰 百分比	養護齡期	單壓強度 kg/cm <sup>2</sup>		
		20%	-	-
40%	14天	-	-	-
60%		1.27	1.17	0
80%		1.68	1.88	1.27
100%		2.24	1.94	2.19

表 3-2-4 養護齡期 28 天之單壓強度

水泥/底灰 百分比	養護齡期	單壓強度 kg/cm <sup>2</sup>		
		20%	-	-
40%	28天	-	-	-
60%		1.12	-	-
80%		2.70	-	-
100%		9.37	-	-

註: ” - “表示試體拆模後斷裂，無法進行抗壓試驗

### 3-3 不同固化材與添加劑之配比試驗

由 3.1 章節水泥加底灰回填材料試驗之結果，可知底灰粒徑分布較廣，以水中自然沉降的方式，會產生嚴重的析離問題，導致底部因水泥含量較低，在抗壓強度試驗中，因底部性質較脆，會由底部產生破壞，量測所得強度並無法代表整個實驗試體的強度。為了解決嚴重析離的問題，本研究嘗試以加入無毒添加劑亦或加入部分特殊固化材的方式，用以製作試體，期能降低材料析離的問題。

#### 3-3-1 特殊固化材試驗

##### 一、 超(微)細水泥

超細水泥為一無機超細微粒組成的高性能灌漿材料，具有良好的滲透性及可灌性，比有機化學灌漿液更高的強度及耐久性，不存在老化現象。因而可適用於各種土質環境的地基加固處理、砂土層的固化處理……等等。材料本身由無毒無害的無機材料組成，其對水、土壤、空氣等周圍環境無污染，相對於其它灌漿材料而言，具有更高的安全性，屬於綠色環保型建材產品。

本試驗採用替換固化材方式，採用超細水泥替代原本一般水泥，考慮以超細水泥滲透性高之特性解決粒料析離問題，設計配比如表 3-3-1 所示。超細水泥分別替代 50% 水泥以及 100% 完全取代，水泥與底灰的比例依序由 10%、20% 提升至 30%，本試驗將養護齡期拉長為 28 天進行觀察。

圖 3-3-2 為超細水泥取代一般水泥，養護 28 天後之拆模照片。由圖中可以明顯看出加入超細水泥，由於超細水泥本身填補空隙的特性，析離現象明顯改善。然而，由於超細水泥本身粒徑較小，雖可填補空隙，但因計畫中之注入水泥量並不高，使得材料本身膠結性不足，而使試體下方產生碎裂而不符計畫使用。



圖 3-3-1 超細水泥照片



圖 3-3-2 超細水泥養護 28 天照片

表 3-3-1 超細水泥配比設計一覽表

超細水泥替代水泥	水泥/底灰 百分比	養護齡期
100%	10%	28天
	20%	
	30%	

## 二、 高鋁水泥

高鋁水泥（圖 3-3-3）是以鋁礬土和石灰為原料，按一定比例配製，經煅燒、磨細所製得的一種以鋁酸鹽為主要礦物成分的水硬性膠凝材料，又稱鋁酸鹽水泥。高鋁水泥早期強度增長很快，一天強度值可達到其標稱強度值的 80% 左右。

與超細水泥製作流程相同，將高鋁水泥替代部分水泥與底灰進行拌合後，注入塑膠膜養護 14 天後拆模。本次試驗之目的為利用高鋁水泥早強的特性，使灌注試體能在早期便具有一定的強度，觀察是否仍然碎裂。本試驗之配比設計如表 3-3-2 所示，高鋁水泥替代 10% 一般水泥，水泥與底灰之

比例同樣為 10%、20% 以及 30%，由於高鋁水泥具有早強特性，將養護時間縮短為 14 天。

圖 3-3-4 為高鋁水泥養護 14 天後拆模照片，由圖中可以看出雖然試體本身強度提高，但高鋁水泥本身並無法改善析離現象，導致試體底部下方因粒料析離而產生碎裂。雖然在水泥量達至 30% 試體底部未有碎裂產生，亦有較高之強度，然而 30% 之水泥量於本計畫中所佔據之體積明顯過高，並不符合本計畫之需求。



圖 3-3-3 高鋁水泥照片



圖 3-3-4 高鋁水泥養護 14 天照片

表 3-3-2 高鋁水泥配比設計一覽表

高鋁水泥替代水泥	水泥/底灰百分比	養護齡期
10%	10%	14天
	20%	
	30%	

### 3-3-2 添加劑試驗

#### 一、 海菜粉

海菜粉是一種非離子高分子聚合物，其主要成份為甲基纖維素(Methyl Cellulose)再加入特殊添加劑調配而成，運用于建造材料中作為緩凝劑，保水劑，增稠劑和黏結劑，在水泥配比中起緩凝和保水作用；在砂漿中，能改善黏度和收縮率，增強黏結力，控制結構水泥的凝結時間，提高初始強度。并可改善黏附性和施工性能。尤其是在施工中，可以延長和調節凝結時間，提高施工效率並有利于建築表面防止水溶性潛在的風化。

在添加劑試驗過程中，首先選用最為常見之海菜粉進行試驗。試驗流程與 3.1.1 雷同，唯一不同之處為在拌合水與水泥進行攪拌前需先拌合水與海菜粉後，在混合液體(水+海菜粉)與水泥進行攪拌，讓試體在水中自由沉降後並養護 7 天後，以刀片割開塑膠膜，取出養護完成之試體。本次試驗之相關配比如表 3-3-3 所示，水膠比分別配置為 30:1、40:1 以及 50:1，而混合液體(水+海菜粉)與水泥之配比一律固定為 5:2，最後固定水泥與底灰為 20% 進行試驗。

養護七天拆模後之試體照片如圖 3-3-6 所示。在原有的底灰加水泥回填材料加入海菜粉後，受到海菜粉特性的影響，其粒料之間的膠結性明顯增強，使其下半部之顆粒狀試體強度提高，但由圖片中之結果亦仍可發現材料析離的現象未改善，因此，雖然強度有所提升，但在水泥與底灰的介面處，試體依然產生斷裂。試體因析離產生分層的結果仍舊未獲得改善。

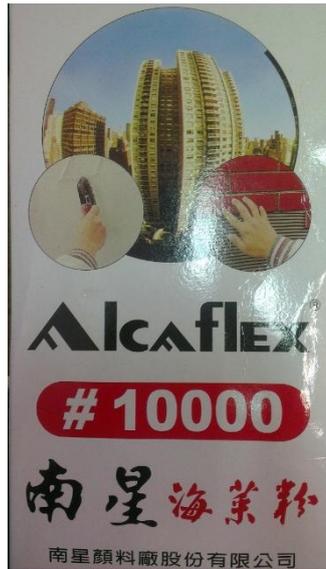


圖 3-3-5 海菜粉照片



圖 3-3-6 海菜粉添加劑養護 7 天照片

表 3-3-3 海菜粉配比設計一覽表

海菜粉+水 水膠比	水泥:海菜粉液	水泥/底灰 百分比	養護齡期
30:1	5:2	20%	7天
40:1			
50:1			

## 二、 保水劑

保水劑(圖 3-3-7)係一種混凝土的改質劑，如添加入混凝土中，其改變混凝土塑性與團聚性，降低粒料分離，減少泌水與失漿，使水泥漿體與水份保留於混凝土中，有助於混凝土施工品質的提升。保水劑增加混凝土的潤滑性，提高混凝土的泵送距離，尤其長距離或高揚程的泵送；同時可作為壓送車的潤管劑，使混凝土的水份不易在輸送管內流失造成卡管。

保水劑配比試驗流程與海菜粉流程相同，在與水泥拌合前，先將拌合水與保水劑進行混合，在與水泥拌合，最後再加入底灰混合注入塑膠套中。待養護七天後以刀片割開塑膠套取出養護完成之試體。保水劑配比設計如表 3-3-4 所示，水膠比為 100:1，而混合液體(保水劑+水)與水泥比例則採用

100:50 與 100:60 兩種比例，因本試驗主要目的為探討保水劑是否可改善材料析離狀況，因此在水泥與底灰比例上僅採用 30% 之水泥量進行試驗。圖 3-3-8 為底灰回填材料添加保水劑養護七天後拆模照片，由圖中可見加入保水劑後，材料析離狀況明顯獲得改善。然而，加入保水劑後保水劑因保水劑本身材料特性影響了水泥之水化反應，使得試體本身強度明顯不足而使得試體拆模後產生開裂，並無法符合現地回填強度需求。



圖 3-3-7 保水劑照片



圖 3-3-8 保水劑養護 7 天照片

表 3-3-4 保水劑配比設計一覽表

保水劑+水 水膠比	保水劑液:水泥		水泥/底灰 百分比	養護齡期
	100:50	100:60		
100:1	100:50	100:60	30%	14天

### 三、 減水劑特性

減水劑(圖 3-3-9)是指在混凝土和易性及水泥用量不變條件下，能減少拌合用水量、提高混凝土強度；或在和易性及強度不變條件下，節約水泥用量的外加劑。外觀形態分為水劑和粉劑。水劑含固量一般有 20%，40%（又稱母液），60%，粉劑含固量一般為 98%。根據減水劑減水及增強能力，分為普通減水劑（又稱塑化劑，減水率不小於 8%）、高效減水劑（又稱超塑化劑，減水率不小於 14%）和高性能減水劑（減水率不小於 25%），並又分別分為早強型、標準型和緩凝型。普通減水劑宜用於日最低氣溫 5°C 以上施工的混凝土。高效減水劑宜用於日最低氣溫 0°C 以上施工的混凝土，並適用於制備大流動性混凝土、高強混凝土以及蒸養混凝土。

減水劑屬於一種添加劑，因此其回填材料製作過程與海菜粉配比試驗流程相同。本次試驗所採用之減水劑為粉狀，試驗配比設計如表 3-3-5 所示，減水劑之添加量為 1%，水泥與底灰之比例同樣由 10%、20% 增加至 30%，養護齡期為 28 天。圖 3-3-10 為加入減水劑之回填材料試體養護 28 天後拆模照片，本試驗希冀藉由減水劑可縮減水泥用量並維持相同強度之特性，改善回填材料水泥量受限之狀況。然而，由圖中試體之拆模結果發現，試體本身析離狀況一就相當嚴重，不僅水泥量 10% 案例碎裂，甚至連水泥量 30% 案例試體底部亦同樣碎裂，顯示減水劑同樣不符合應用於本計畫。



圖 3-3-9 減水劑照片



圖 3-3-10 減水劑養護 28 天照片

表 3-3-5 減水劑配比設計一覽表

減水劑添加量	水泥/底灰 百分比	養護齡期
1%	10%	28天
	20%	
	30%	

#### 四、 好泥友特性

好泥友(圖 3-3-11)主要特性為在水中施工時，可減少或直接節省排水成本，並有降低析離現象，有效增加抗壓及膠結強度。並在施工時，可提高混凝土流動性，方便施工。同時在保持混凝土坍度活性時，不會延長凝結時間。且由於該添加劑可將水泥對環境的污染降到最低程度，對於環境保護有所助益。

好泥友同樣屬於一種粉狀添加劑，其回填材料製作過程與前述添加劑均相同。本試驗之配比設計如表 3-3-6 所示，其中好泥友共分為 MARINE-CON 以及 L-CON 兩種添加劑，MARINE-CON 與水比例為 1.1%，L-CON 與水比例為 2.2%，水泥與底灰之比例同樣為 10%、20%以及 30%，養護齡期為 14 天。圖 3-3-12 為加入好泥友添加劑製作出來之回填材料試體拆模後之照片，由圖中可看出析離狀況明顯獲得改善，此現象說明水泥與底灰在加入此添加劑後在水中自由沉降時，獲得均勻的混合。且照片中亦顯示出試體本身不論水泥量比例多寡均無開裂情形，表示試體之膠結性足夠，且具有一定強度存在。然而，雖然此好泥友符合計畫所需，但經訪價後，其價格相當高昂，對於現地大量回填時並不敷成本。



圖 3-3-11 好泥友照片



圖 3-3-12 好泥友養護 14 天照片

表 3-3-6 好泥友配比設計一覽表

MARINE-CON 添加量(對水)	L-CON 添加量 (對水泥)	水泥/底灰 百分比	養護齡期
1.1%	2.2%	10%	14 天
		20%	
		30%	

## 五、 特固力 C 之特性

特固力 C(圖 3-3-13)之特性具有在水中施工時，可減少或直接節省排水成本，並有降低析離現象，有效增加抗壓及膠結強度。並在施工時，可提高混凝土流動性，方便施工。同時在保持混凝土坍度活性時，不會延長凝結時間。其成本相較於好泥友低廉許多。

特固力 C 整體配比設計，水泥與底灰之比例僅採 10%進行製作，養護齡期同樣為 14 天，相關配比設計如表 3-3-7 所示。圖 3-3-14 為添加特固力

C 製作之回填材料試體養護及拆模後之試體照片。由圖中可見拆模後之試體析離狀況同樣獲得極大之改善，整體材料分佈也相當均勻，試體本身亦沒有開裂現象(開裂試體為拆模時不小心撞裂)，顯示試體本身具有足夠之膠結性以及強度。



圖 3-3-13 特固力 C 照片



圖 3-3-14 特固力 C 拆模照片

表 3-3-7 特固力 C 配比設計一覽表

特固力C與水比例	水泥/底灰 百分比	養護齡期
0.8%	10%	14天

### 3-4 特固力 C 添加劑量試驗

#### 3-4-1 特固力 C 添加劑量設計

由 3-3 不同添加劑試驗結果可以得知加入特固力 C 可使煤灰低強度回填材回填材料試體達到計畫需求中水泥用量低、改善材料析離狀況以及兼顧環境保護之目的。然而，在添加劑的使用劑量上，仍需經由試驗獲知與水

的最佳配比，方能在達到回填材料效果最佳的情況下，同時節省材料成本。前述 3-3-8 節所採用之特固力 C 配比為 0.8%，本試驗除配比 0.8% 外，新增 0.35% 以及 1.5% 兩種配比進行比較，相關配比設計如表 3-4-1 所示。

表 3-4-1 特固力 C 添加劑量設計一覽表

特固力C添加量			水泥/底灰 百分比	養護齡期
0.35%	0.8%	1.5%	10%	14天
			15%	
			20%	

### 3-4-2 特固力 C 劑量試驗結果

圖 3-4-1 為加入不同劑量之特固力 C 添加劑後，養護 14 天拆模照片。由圖中試體照片可以看出在加入特固力 C 之後，不論何種劑量試體均勻性均相當不錯，析離狀況也獲得極大幅度的改善。此時，僅從肉眼並無法分辨添加劑多寡對於試體的影響程度。為了獲知最佳劑量配比，本研究利用試體強度分佈來進一步觀察添加劑劑量與試體強度之相互關係。

圖 3-4-2 為小型土壤灌入儀，該儀器主要是用以檢測土壤之抗壓強度，由於土壤強度一般較低，因此該儀器最大量測抗壓強度僅為  $4.5 \text{ kg/cm}^2$ 。且貫入儀本身所測得之抗壓強度並不能用以作為實際抗壓強度，仍需經由實驗室其他相關試驗交互驗證。本試驗後續採用此儀器所測得之抗壓強度亦僅作為參考，並非試體本身之實際強度。採用此儀器量測之主要目的，僅是藉由測得之強度分佈，了解試體材料混合之均勻性，用以判別添加劑劑量對於試體之影響，進而選取最佳添加劑劑量。

圖 3-4-3 為利用小型土壤貫入儀檢測試體強度照片，檢測時，將試體等分為上、中、下 3 等份分別進行量測，每等份檢測 3 次強度值後進行平均，將量測所得之結果繪製成圖後可得圖 3-4-4 之抗壓強度曲線圖。由曲線圖中可以明顯看出，由於底灰粒徑較大，水泥粒徑較小，在自由沉降後，水泥

大部分均累積在試體上面，因此試體上方之抗壓強度明顯最高，而試體下方則是水泥量較低的部分，期強度也明顯最低。在此圖中，可以明顯看出添加劑量 0.8% 時，試體上中下之強度最為接近，顯示水泥分佈較為均勻，添加劑所發揮之功效最為明顯。

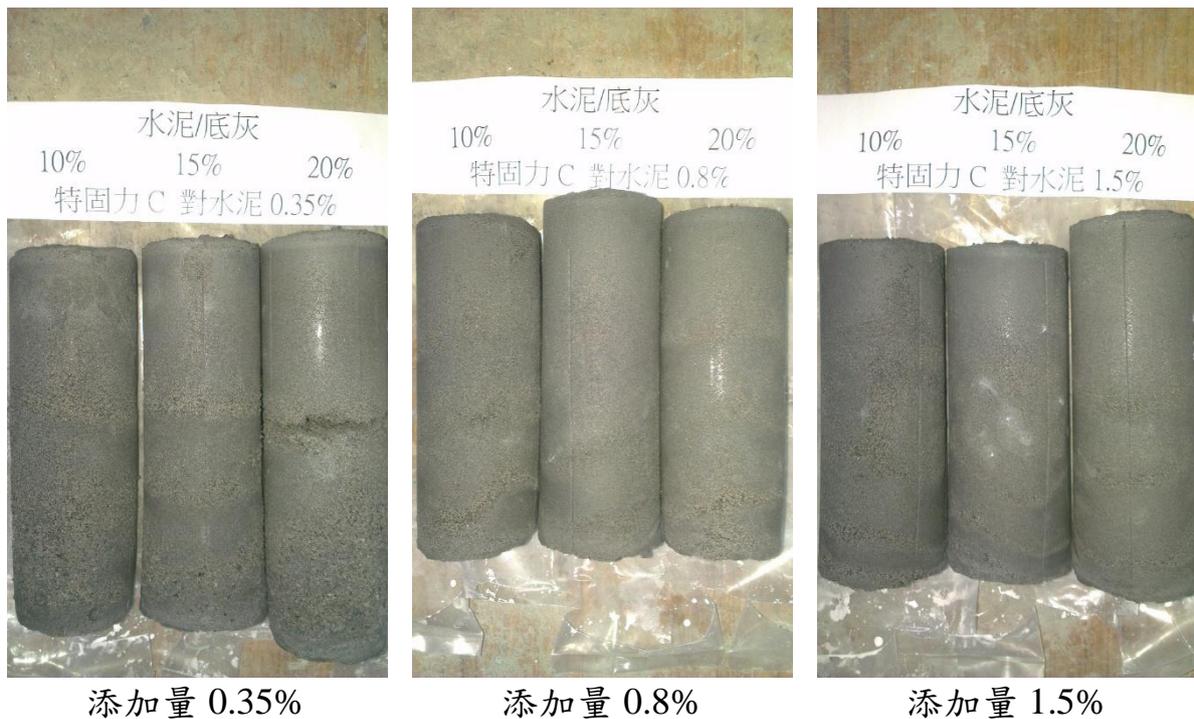


圖 3-4-1 不同特固力 C 添加劑量拆模照片



圖 3-4-2 小型土壤灌入儀照片 (Pocket Penetrometer)

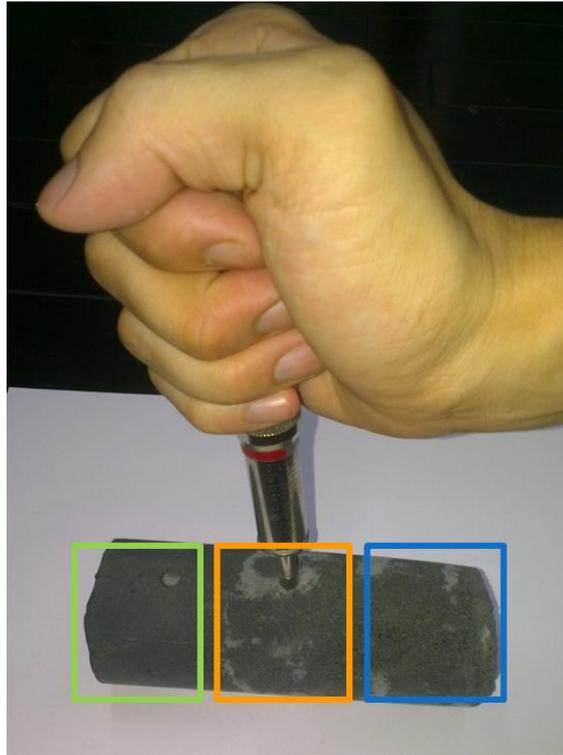


圖 3-4-3 小型土壤灌入儀檢測試體強度照片

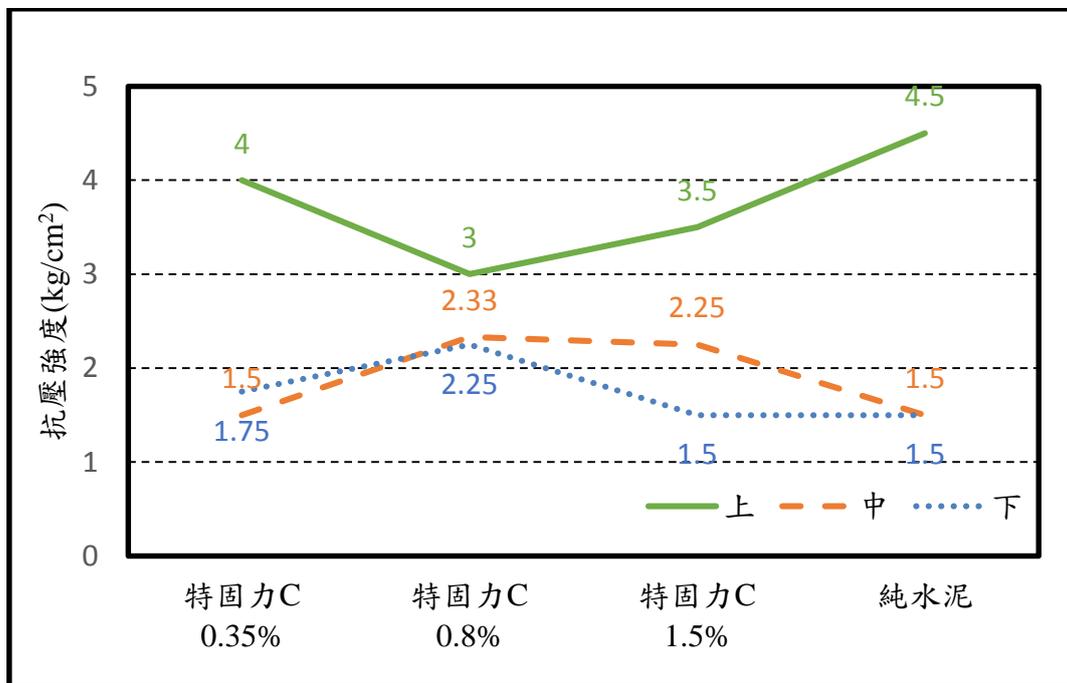


圖 3-4-4 不同添加劑劑量圓柱試體抗壓強度曲線

### 3-5 粒料沉降試驗

由 3-2 節之試驗結果可以得知，粗顆粒的底灰沉澱速度較快，細顆粒的底灰與水泥沉澱速度較慢，因此造成水泥無法均勻分布在試體當中，為水泥與底灰析離之最大因素，沉降速度不一所導致。本研究為探討有無添加劑之底灰與水泥沉降速度差異性，乃進行比重計試驗(或稱沉降試驗)

由於 200 號篩以下的土壤，顆粒細小，無法以篩分析區分顆粒大小，而改採攪拌沉澱方式分離，試驗主要根據流體力學中之斯托克定律(Stoke' s Law)分析，由土壤在水中的沉澱速度與粒徑之關係推求粒徑大小。其中，斯托克定律(Stoke' s Law)之定義如公式(1)：

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (1)$$

式中， $v$  = 沉降速度， $\rho_s$  = 顆粒之單位重， $\rho_w$  = 水單位重， $\eta$  = 水之黏滯性， $D$  = 顆粒之直徑。

圖 3-5-1 為底灰、水泥以及水泥漿之沉降試驗結果。由圖中可以看出，水泥在加水後，因團簇效應，使的水泥漿之粒徑較大於水泥，再由水泥漿之粒徑對應到沉澱速度，大概介於 0.0007~0.005 cm/s，底灰所對應之沉澱速度大概介於 0.002~20 cm/s，由圖中速度重疊區域(黃色區塊)可以看出沉澱速度之重疊範圍非常小，導致底灰和水泥無法均勻分布在試體當中，而造成強度分布不均。

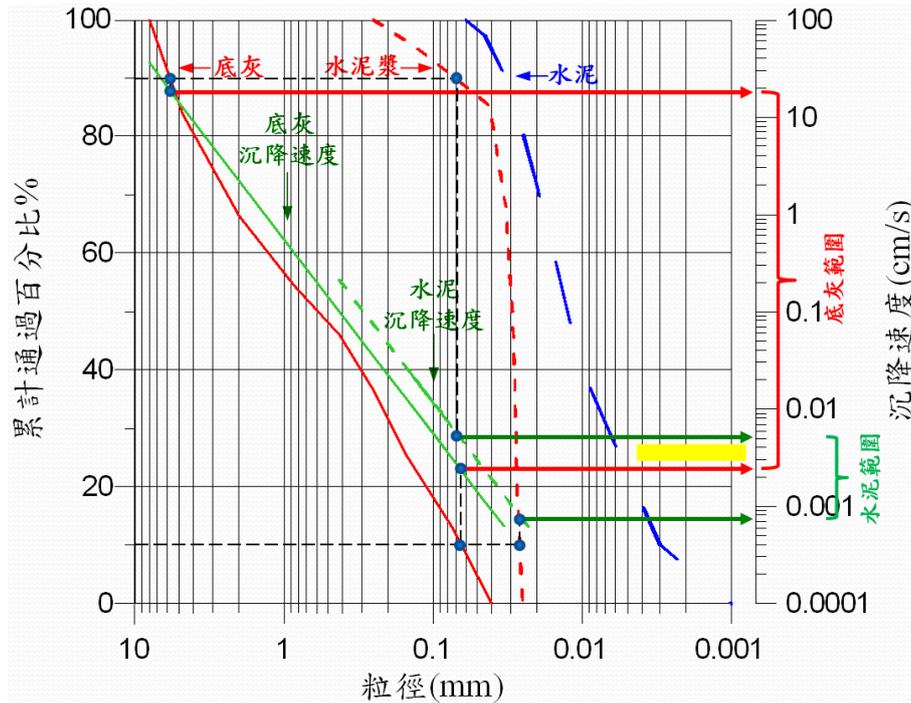


圖 3-5-1 水泥與底灰之粒徑分布及沉降速度圖

接續，加入添加劑特固力 C 之後再重新進行沉降試驗，可得圖 3-5-2。由圖中可以看出，水泥漿在添加特固力 C 後，因添加劑之效果，使得水泥漿之粒徑變大，由水泥漿之粒徑對應到沉澱速度，大概介於 0.001~0.03 cm/s，底灰所對應之沉澱速度大概介於 0.002~5 cm/s，由圖中速度重疊範圍(黃色區塊)部分可以發現較之未加入添加劑之前，其速度重疊範圍明顯多出數倍。但因其非完全重疊，所以析離現象仍少部分存在，考量到底灰之排放過程，並非是一次性完全排放完成，而是多次排放後回填於灰塘地，因此室內試驗亦採連續性方式澆置，可以減低底灰與水泥粒料析離的情形，後續之室內試驗皆以分 4 次澆置方式灌注。

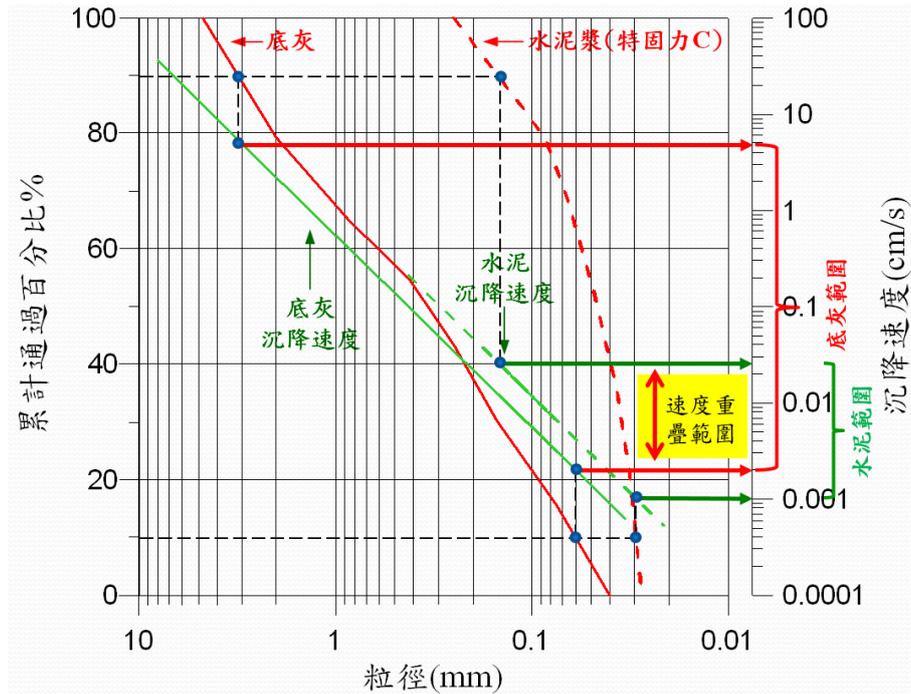


圖 3-5-2 添加特固力 C 之粒徑分布及沉降速度圖

### 3-6 不同固化材灌注試驗

#### 3-6-1 不同固化材配比設計

前述所作之試驗，所採用之固化材均為一般波特蘭水泥，本研究嘗試以不同固化材與底灰進行拌合後再與一般波特蘭水泥進行比較。本試驗中替代一般水泥之固化材有價格較一般水泥低廉的爐石水泥以及同樣為台電燃煤發電產物的飛灰，前者是可以大幅降低回填材料製作成本，後者除了降低成本之外，由於同樣均為燃煤產物，於環保議題上也較不會有所爭議。本次試驗配比如表 3-6-1 所示，第一個配比為採用爐石水泥完全替代一般水泥，第二個配比为一般水泥，第三個配比为採用飛灰替代 50% 一般水泥。

表 3-6-1 不同固化材配比設計一覽表

特固力C添加量	水泥/底灰百分比	固化材	養護齡期
0.8%	10%	爐石水泥	14天
		水泥	
		水泥+飛灰(1:1)	

### 3-6-2 不同固化材試驗結果

圖 3-6-1 為不同固化材養護 14 天後拆模後之照片，由圖中可以發現，即便在更換固化材後，由於灌注試體時加入添加劑，不同固化材試體皆無嚴重析離狀況出現。此結果說明特固力 C 對於均勻不同粒料沉降速度與降低粒料析離確實有相當顯著之成效。本試驗同樣利用小型土壤貫入儀進行試體強度檢測，不同固化材試體均灌注 3 顆，同樣將每一顆試體分成 3 等份進行量測，每等份分別量測 3 次後進行平均，將結果繪製成圖後如圖 3-6-1 所示。由圖中之強度分佈可知爐石水泥效果與一般水泥差異不大，而採用飛灰替代一半水泥後，強度則明顯下降，此結果說明以飛灰取代部分水泥之方案較不可行。

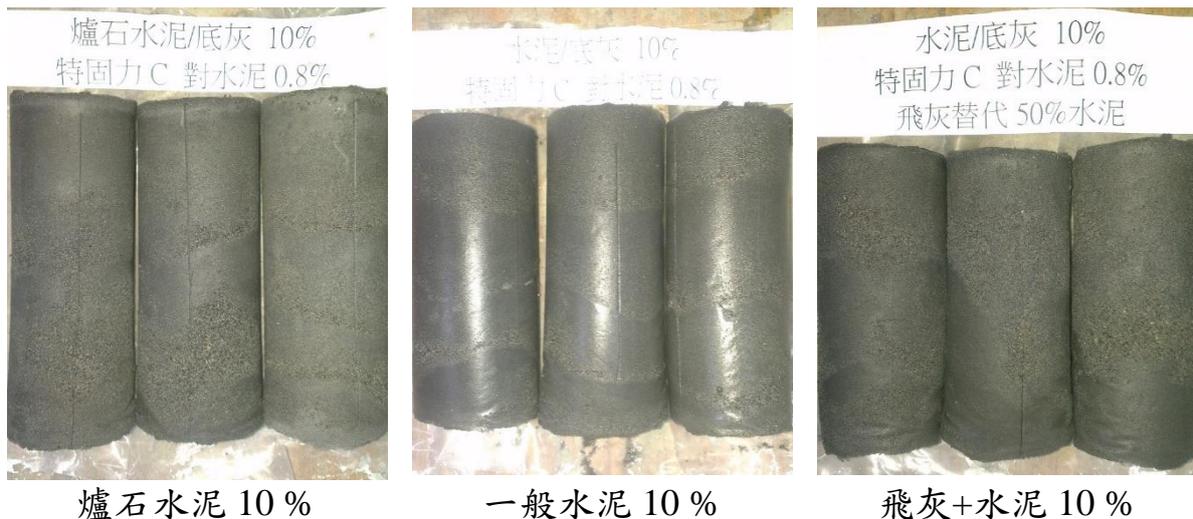


圖 3-3 8 不同固化材養護 14 天之試體拆模照片

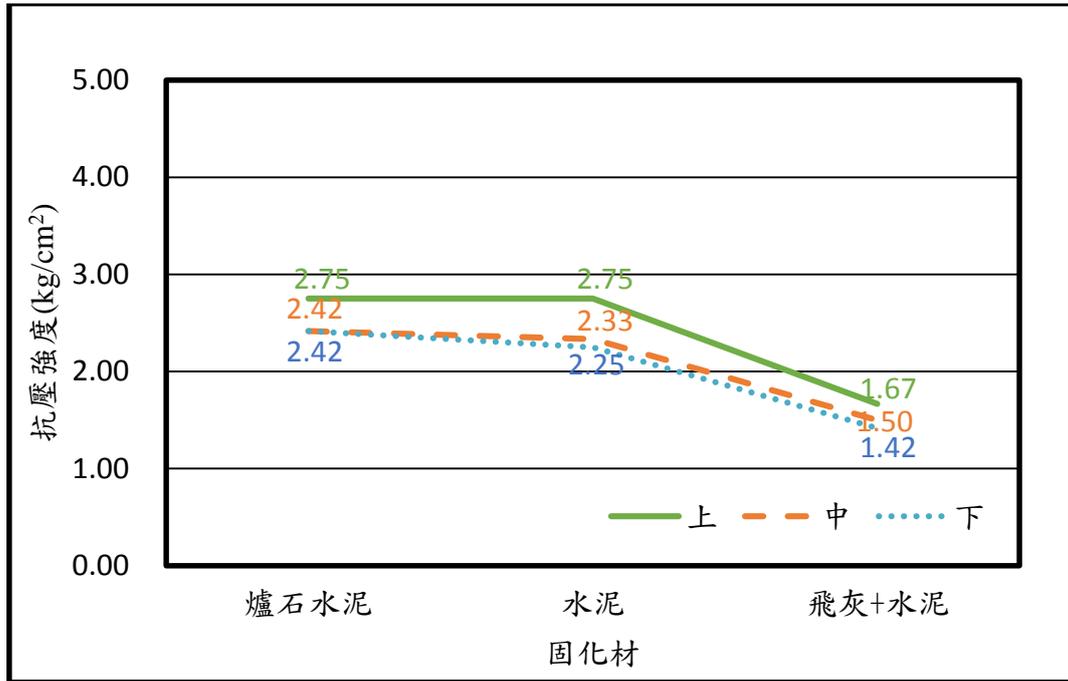


圖 3-6-1 不同固化材圓柱試體抗壓強度曲線

### 3-7 不同養護齡期抗壓強度試驗

#### 3-7-1 不同養護齡期之配比設計

由前述 3-3 節~3-5 節一系列實驗之結果已獲知煤灰低強度回填材之最佳配比。然而，養護齡期的長短也與試體的強度有密不可分的關係。本研究已前述所得之最佳配比進行齡期的試驗，相關試驗配比與齡期如表 3-7-1 所示。其中特固力 C 之添加量為 0.8 %，水泥百分比為 10 %，添加固化材為一般水泥，試驗齡期分別為 7 天、28 天、56 天以及 90 天。

表 3-7-1 不同養護齡期配比設計一覽表

特固力 C 添加量	水泥/底灰百分比	固化材	養護齡期
0.8%	10%	水泥	7 天
			28 天
			56 天
			90 天

### 3-7-2 不同養護齡期試驗結果

圖 3-7-1 為不同養護齡期試體拆模後之照片，由圖中可以發現採用表 3-7-1 之配比進行灌注後，不論齡期長短，試體粒料分佈均相當均勻，沒有嚴重析離狀況產生。然而，由試體外觀而言，養護齡期對於試體本身並無太大影響，因此同樣採取與 3-4 節以及 3-5 節相同方式，以小型土壤貫入儀進行抗壓強度試驗。檢測流程均與 3-4 節以及 3-5 節相同，將其結果繪製成圖後可得圖 3-7-2。由圖中之結果可以發現，不論齡期長短，試體上中下 3 個部分之強度均相當接近，顯示加入添加劑後確實有效改善不同粒料水中沉降速度不一的情況，同時大幅度降低粒料析離的狀況。而隨著養護齡期增加，試體強度確實也隨之逐漸增加。



圖 3-7-1 不同養護齡期試體拆模照片

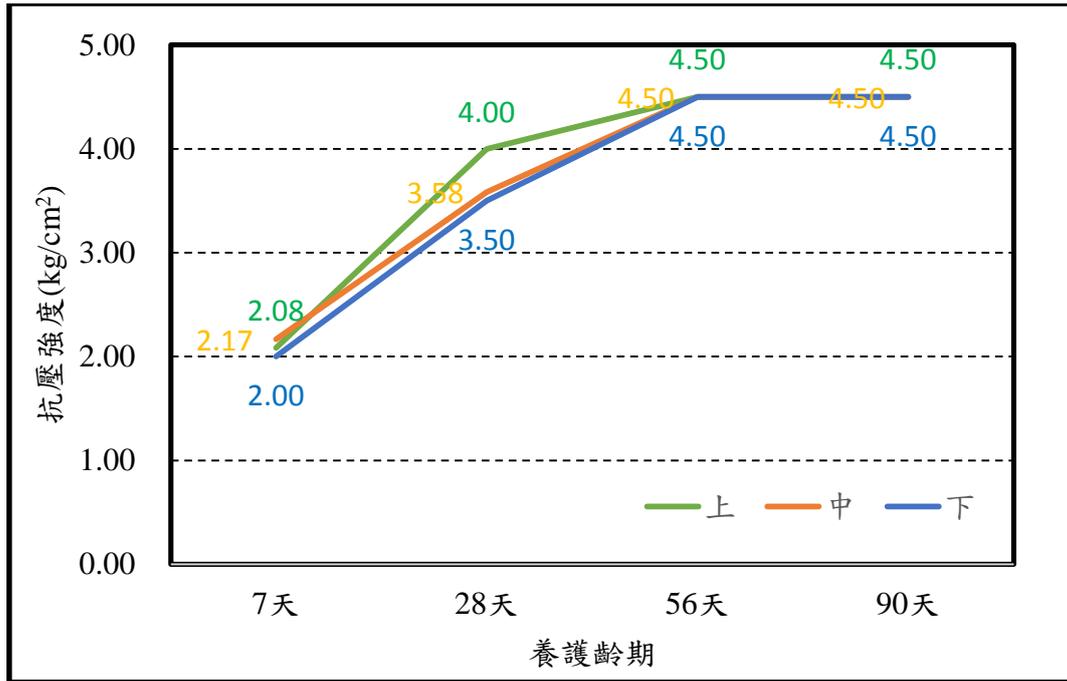


圖 3-7-2 不同固化材圓柱試體抗壓強度曲線

### 3-8 小結

本章藉由嘗試加入不同添加劑種類來解決回填材料析離問題，添加劑之選用均是針對無添加劑情況下，圓柱試體本身粒料分離及析離狀況之現象解決方式進行選用，各固化材及添加劑之特性以及試驗結果整理如表 3-8-1 所示。由各項試驗結果評比可知添加特固力 C 並採用一般水泥作為固化材試體成效最符合本次計畫所需。此外，本研究亦藉由沉降試驗說明本試驗中未加入添加劑，為何產生析離現象以及加入添加劑後析離現象降低之原因，同時藉由不同添加劑量測試方面也獲知最佳添加劑劑量為 0.8 %。

研究中亦嘗試以飛灰替代部份水泥，然而其結果顯示強度不佳，主要是因飛灰並無法完全取代水泥凝固強度所致。而在養護齡期試驗中，亦可發現本研究之回填材料亦具有齡期越久強度越高之特性，由於現地回填並不要求早期強度，因此對於回填之強度可藉由較長之養護齡期來獲得。

表 3-8-1 不同固化材以及添加劑試驗結果

添加劑	固化材	特性	析離現象	水質狀況	添加劑+固化材成本 (元/m <sup>3</sup> )
無	超細水泥	對砂土具有良好的滲透性及可灌性	有	混濁	978
無	高鋁水泥	早期強度增長快、快速硬化	有	混濁	377
海菜粉	水泥	改善黏度和收縮率，增強黏結力	有	混濁（試體表層有白色膠狀物體）	437
保水劑	水泥	改變混凝土塑性與團聚性，降低粒料分離，減少泌水與失漿	有	混濁	317
減水劑	水泥	和易性及強度不變條件下，節約水泥用量的外加劑	有	混濁	205
好泥友	水泥	水中施工，可減少或直接節省排水成本，並有降低析離現象，有效增加抗壓及膠結強度	無	清澈（試體表層有白色膠狀物體）	874
特固力 C	水泥	水中施工，可減少或直接節省排水成本，並有降低析離現象，有效增加抗壓及膠結強度	無	清澈	280

\*成本計算為每 m<sup>3</sup> 之水泥+添加劑或特殊固化材費用

## 第四章 小型水工煤灰低強度材料回填試驗

由第三章煤灰低強度回填材回填材料研發結果已獲知回填材料之最佳配比以及適合之添加劑。然而，前述之試驗均是灌注小型圓柱試體，與現地實際大範圍回填相較，在操作上仍有些許不同。因此本研究於實驗室內實際製作一小型水工模型，模擬現地水力回填，並採用多次灌注方式，模擬現地灰塘之多次回填。本節水工模型試驗共製作為 3 個試體，第一試體為無添加劑，亦即單純僅有水泥與底灰進行拌合回填，第二個試體為加入特固力 C 添加劑後進行拌合回填，第三個試體則是將原先構想之混管線拌合回填方式改為一次性攪拌回填，比較兩種回填方式的異同，以下便就三個試體試驗成果逐一進行說明。

### 4-1 水工模型灌注設備

由於現地灰塘是以水力回填之方式進行填灰，本試驗欲模擬現地排灰系統，並在管末處增加混合管線，在水力排灰管線最末端注入水泥，並經由混合管線進行混合後排放。本試驗之灌注設備共有底灰水力排放設備、電動攪拌棒、水泥灌注槍、混合管線以及壓克力水槽等，各項設備茲說明如下：

1. 底灰水力排放設備：如圖 4-1-1 所示，在交通錐在尖端處插入 PVC 管，並裝上球閥開關，將設計配比之底灰與水倒入後以電動攪拌棒(圖 4-1-2)進行攪拌使底灰與水均勻混合，用以模擬現地水力排放管線排放過程中底灰與水之拌合。



圖 4-1-1 交通錐上安裝球閥開關



圖 4-1-2 電動攪拌棒

2. 水泥灌注設備：以水泥灌注槍灌注水泥，前端加裝 PVC 三通管以利連接其他設備，相關設備如圖 4-1-3。



圖 4-1-3 水泥灌注槍與 PVC 三通管

3. 混合管線：在 PVC 管上插入數支螺絲如圖 4-1-4，當底灰、水泥和水流入時，遇到螺絲的阻礙，會在管內產生紊流，進而達到攪拌之功效。



圖 4-1-4 混合管線

4. 水力排放灌注設備：如圖 4-1-5 為整體灌注設備組合圖照片，將底灰與水倒入安全錐中，以電動攪拌棒進行攪拌，確保底灰與水完全混合，再打開球狀閥門讓底灰與水排放至混合管線中。此時，利用水泥灌注槍將水泥注入混合管線中，讓水泥與底灰合水在混合管線中進行混合，最後經由 PCV 管尾端注入水槽中。



圖 4-1-5 灌注設備組合圖

5. 透明壓克力水槽：將煤灰低強度回填材回填材料灌入透明壓克力槽體中，使其以水中自然沉降之方式回填，置於透明壓克力槽體中進行養護。面板以透明壓克力製作如圖 4-1-6，便於觀察煤灰低強度回填材回填材料之沉降速度，以及回填情況。槽體尺寸為長 50 cm、寬 20 cm、高 80 cm。



圖 4-1-6 透明壓克力水槽

## 4-2 水工模型試驗灌注流程

在水工灌注試驗中，以兩種不同灌注型式分別灌注試體進行比較。灌注型式分為混合管灌注以及直接灌注。實際操作流程說明如下：

### 4-2-1 混合管攪拌灌注

1. 先秤取所需之底灰、水泥、拌合水及添加劑，將底灰及底灰的拌合水分成 10 等份，以利執行多次灌注。
2. 添加劑與水泥的拌合用水攪拌均勻，再倒入底灰整體重量 10 % 之水泥量，以水泥攪拌機持續攪拌，相關設備如圖 4-2-1。



圖 4-2-1 水泥攪拌機

3. 水泥灌注槍抽取定量水泥漿，裝上 PVC 三通管及混合管，如圖 4-2-2 及圖 4-2-3。



圖 4-2-2 水泥灌注槍抽取水泥漿



圖 4-2-3 水泥灌注槍裝上 PVC 三通管及混合管

4. 將交通錐接上水泥灌注槍及混合管，完成整體灌注設備，如圖 4.16。



圖 4-2-4 交通錐裝上水泥灌注槍及混合管

5. 如圖 4-2-5 所示，倒入 1 等份拌合水，以電動攪拌棒攪拌交通錐中的拌合水，在攪拌中同時倒入 1 等份的底灰，持續攪拌，以避免底灰與水同時倒入後造成塞管，如圖 4-2-6。



圖 4-2-5 交通錐加入 1 等份底灰的拌合水



圖 4-2-6 電動攪拌棒攪拌過程照片

6. 打開球閥開關，並將水泥灌注槍中的水泥漿，以等速的方式注入混合管中，使底灰、水泥漿和拌合水在混合管中混合後，灌入透明壓克力槽體，如圖 4-2-7。



圖 4-2-7 打開球閥開關注入水泥漿

7. 重複步驟 3、4、5 和 6，將欲滿出之拌合水，以連通管原理引流至旁邊的大水桶，完成水工試驗灌注，如圖 4-2-8 及圖 4-2-9 所示。

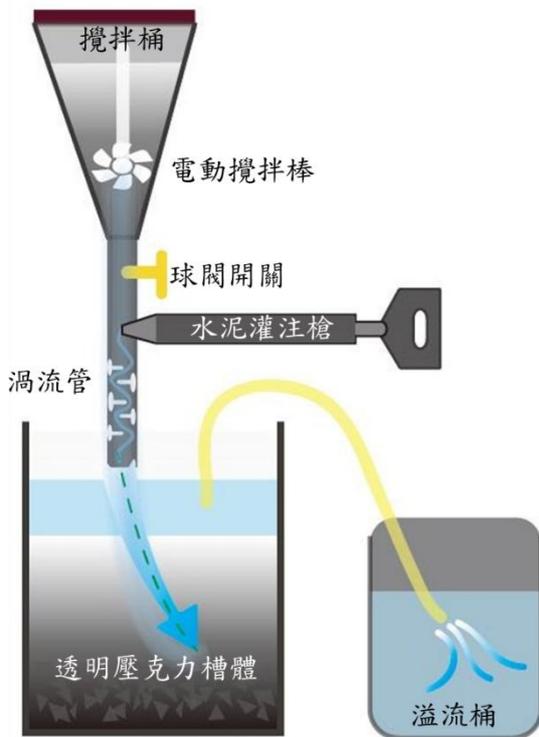


圖 4-2-8 混合管灌注示意圖



圖 4-2-9 混合管灌注設備照片

8. 在 24 小時後，插入薄管，以利取樣。
9. 養護 7 天後拆模。

### 4-3 水工模型試驗結果

本水工模型之試驗結果共分為兩部份進行探討與比較，第一部份為有無添加劑之討論；第二部份為灌注型式之討論。模型試驗之配比設計如表 4-3-1 所示，第一部份分為兩個配比，分別為添加特固力 C 0.8% 與沒有添加特固力。第二部份則統一均添加特固力 C 0.8%。在灌注過程中，由透明水槽外測可以清楚觀察到粒料沉降之情況如圖 4-3-1~圖 4-3-4 所示。

表 4-3-1 水工模型試驗配比設計一覽表

水泥/底灰 百分比	特固力添加量 (對水泥)	固化材
有無添加劑配比設計		
10%	無	水泥
	0.8%	
灌注型式配比設計		
10%	0.8%	水泥



圖 4-3-1 灌注完成粒料沉降情形



圖 4-3-2 灌注完成後 1 分鐘粒料沉降情形



圖 4-3-3 灌注完成後 2 分鐘粒料沉降情形



圖 4-3-4 灌注完成後 3 分鐘粒料沉降情形

#### 4-3-1 有無添加劑試驗結果比較

本次試驗灌注流程均採用混合管灌注(如 4-2-1 節)方式施作，試體灌注完成後，在養護期間先行比較有無加入添加劑，試體上層水質之透度與混濁度，如圖 4-3-5(a)為無添加劑之試體養護狀況，圖中明顯看出是體上層水質混濁程度相當高，透度相當低，就環保觀感而言，較為不佳。而圖 4-3-5(b)為加入特固力 C 之試體養護狀況，上層水質明顯混濁度低，且透度相當高，可清楚看出水中紙張所標示之文字，環保觀感較佳。

圖 4-3-6 為無添加劑試體養護 7 天後拆模之試體前視圖以及左側視圖，由兩圖中可以發現試體表面有非常明顯之分層狀況。而圖 4-3-7 為添加特固力 C 試體養護 7 天後拆模之前視圖及左視圖，前視圖中試體左下角的崩壞主要是由於拆模時不小心碰撞所導致，而崩落的部分也都呈現出塊狀結構。而圖中左邊有兩條明顯的析離現象，是由於在養護期間，將橫向擺放之角鐵取下後，壓克力面板受到內部壓力擠壓而向外膨脹產生縫隙，導致試體內部粒料流動所產生。

將兩個試體由中間進行剖面後，可得圖 4-3-8 以及圖 4-3-9 之剖面圖。由圖 4-3-8 無添加劑之試體剖面可以發現試體內部粒料分佈明顯可看出粒料呈現層狀結構，由一層水泥含量較高及一層水泥含量較少交雜混合而成。而試體破壞情況也可由圖中看出屬於層狀破壞，與斷面顯示情況相仿。圖 4-3-9 為添加特固力 C 試體剖面圖，由圖中可以發現加入特固力 C 後，不同粒徑粒料沉降速度較為一致的影響下，試體幾乎無分層現象，也無材料析離狀況。與前述圓柱試體模型結果一致。顯示加入添加劑確實有效改善材料析離狀況。

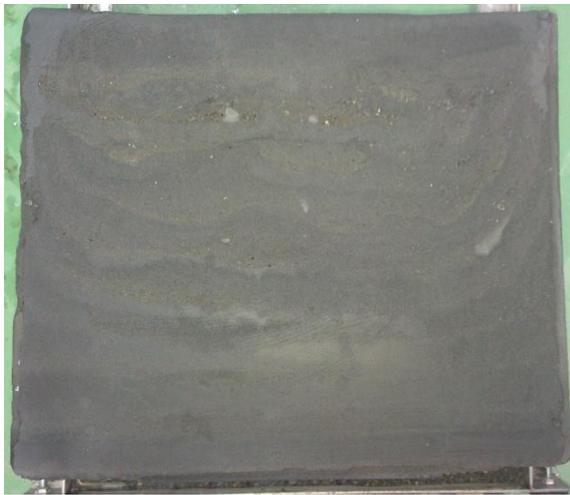


(a) 無添加劑



(b) 添加特固力 C

圖 4-3-5 水工試驗試體養護狀況(a)無添加劑；(b)添加特固力 C



(a) 前視圖



(b) 左視圖

圖 4-3-6 無添加劑水工試驗試體養護 7 天拆模(a)前視圖；(b)左視圖



(a) 前視圖



(b) 左視圖

圖 4-3-7 添加特固力 C 水工試驗試體養護 7 天拆模(a)前視圖；(b) 左視圖



圖 4-3-8 無添加劑之水工模型試體  
剖面圖



圖 4-3-9 添加特固力 C 之水工模型  
試體剖面圖

### 4-3-2 直接攪拌灌注

直接攪拌灌注步驟與混合管攪拌灌注前 3 項步驟相同，步驟更改如下：

4. 以電動攪拌棒攪拌交通錐中底灰的拌合水，在攪拌中倒入步驟一中 1 等份的底灰，以避免塞管，再將水泥灌注槍中之水泥漿，注入交通錐中，使其與底灰和拌合水均勻混合，如圖 4-3-10。



圖 4-3-10 水泥漿直接注入交通錐進行攪拌

5. 打開球閥開關，將攪拌均勻後之底灰、水泥漿和拌合水，灌入透明壓克力水槽。
6. 重複步驟 3、4 和 5，將欲滿出之拌合水，以連通管原理引流至旁邊的大水桶，完成水工試驗灌注，如圖 4-3-11 及圖 4-3-12 所示。

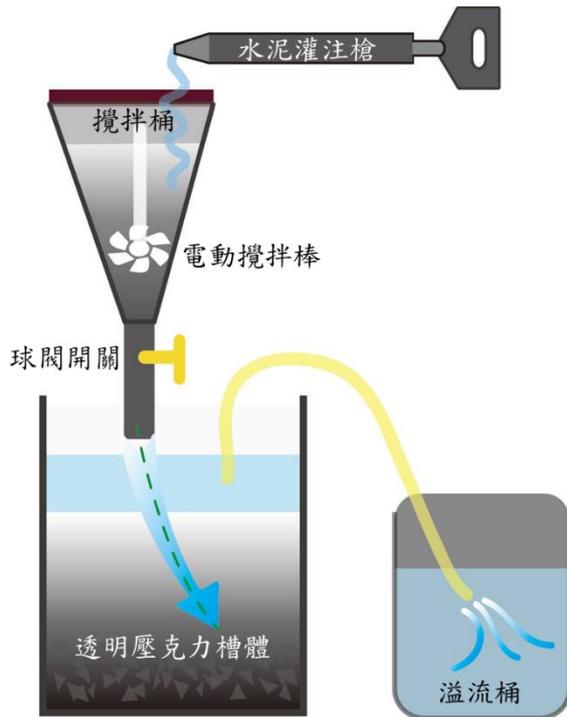


圖 4-3-11 直接灌注示意圖



圖 4-3-12 直接灌注設備照片

8. 在 24 小時後，插入薄管，以利取樣。
9. 養護 7 天後拆模。

### 4-3-3 不同灌注型式試驗結果比較

接續，將比較不同灌注型式之試體差異。4-3-1 節已探討混合管灌注(如 4-2-1 節)之成效，本節試體將以直接攪拌灌注(如 4-2-2 節)方式施作，並同樣添加添加劑特固力 C。圖 4-3-13 為直接灌注試體養護狀況，與混合管灌注相仿，上層水質混濁度低，透度相當高，置放於水中之文字同樣清晰可見。圖 4-3-14 為試體養護 7 天後拆模後之前視圖與左視圖，值得注意的是，與混合管灌注試體相同，在前視圖中都可發現試體表面有兩條明顯析離痕跡，此現象再次驗證前述所提之壓克力面板受到內部壓力擠壓導致面板向外膨脹，內部存在縫隙而使內部粒料流動之說法。而除了這兩條明顯的析離痕跡外，試體其他部份均相當均勻。將試體從中剖開後，可得圖 4-3-15 之剖面圖。由此圖與圖 4-3-9 之剖面圖相較後可以發現並無太大區別，試體內部同

樣無分層現象，也無析離狀況。由此比較結果可推論出灌注型式不同對於最後試體之成型並無太大影響。



圖 4-3-13 直接灌注之水工試驗試體養護狀況



(a) 前視圖



(b) 左視圖

圖 4-3-14 直接灌注之水工試驗試體養護 7 天拆模(a)前視圖；(b) 左視圖



圖 4-3-15 直接灌注之水工試驗試體剖面圖

#### 4-3-4 水工試驗單軸抗壓試驗

前述以外觀及剖面進行觀察僅能以目測的方式了解水泥分布，為了更加了解水泥之分布狀況將水工試驗試體養護 14 天拆模後，進行鑽心取樣。取樣方式為於試體縱剖面由上至下進行取樣，共取 8 個試樣進行抗壓試驗。其中，混合管灌注取樣試體如圖 4-3-16，從 1~8 分別是由上層到下層，試體 1 和 2 最上層的兩顆試體最為完整，表面也較光滑，較少粗顆粒之底灰，試體 3~8 都可以看到底灰顆粒，也斷裂的較為嚴重，代表上部水泥分布較多。直接灌注取樣試體如圖 4-3-17 所示，從 1~8 分別是由上層到下層，試體 1、2、6 和 8 之完整性較佳，以直接攪拌方式灌注，鑽心試體的均勻性較佳，水泥漿分布較均勻。為實際了解水泥分佈及灌注試體強度狀況，本試驗採取以無圍壓縮試驗進行抗壓強度測試，均取鑽心試體 1、4 和 8 號，分別代表上、中、下之抗壓強度，測試結果繪製成圖後可得圖 4-3-18。由抗壓強度曲線圖可以看出，混合管灌注試體與目視結果相仿，上層水泥量及強度較高，而以直接攪拌灌注之試體，上中下抗壓強度均較接近，此結果顯示水泥與底灰混合較均勻。

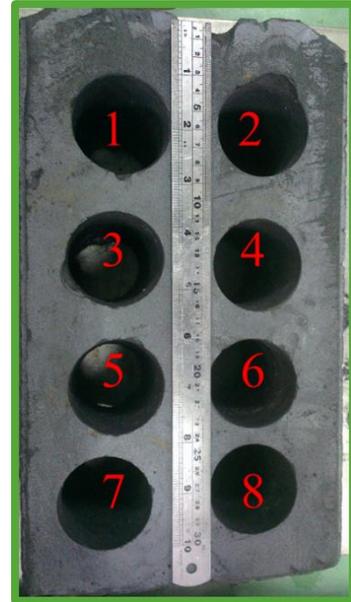


圖 4-3-16 混合管灌注之水工試驗鑽心試體

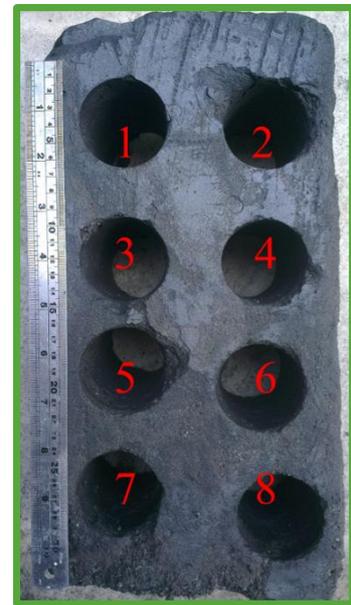


圖 4-3-17 直接灌注之水工試驗鑽心試體

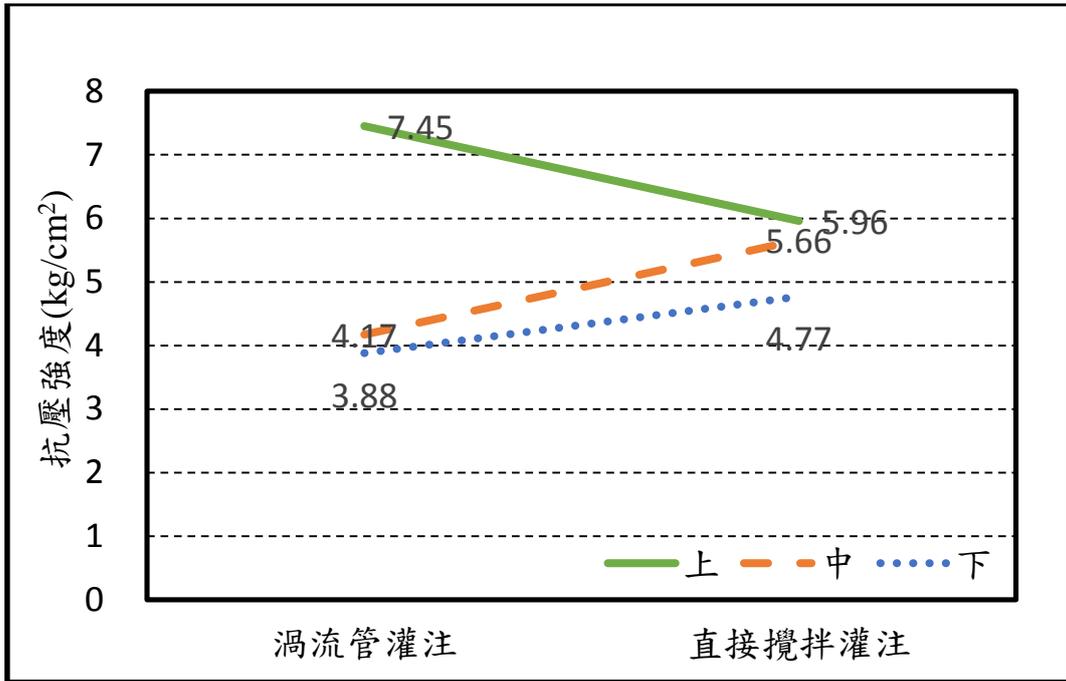


圖 4-3-18 單軸抗壓試驗強度

## 第五章 現地小型水力回填試驗

本試驗旨在模擬台電水力排放煤灰時同步加入水泥固化材之情境，試驗規畫中於台中試驗場址開挖小型試驗坑，並模擬水力排放底灰時加入少許固化材進行回填，藉由此一小型模擬試驗，驗證一次性水力排放地改之可行性。試驗詳細規劃及其成果說明如下：

### 5-1 現地小型回填試驗規劃與執行

#### 5-1-1 試驗場址開挖規劃

現地試驗場址共規劃為 3 個區塊，試驗位置空照圖如圖 5-1-1 所示。詳細規劃示意圖如圖 5-1-2 所示。於試驗場址進行開挖 3 個區塊，每個區塊長、寬分別為 10 m、5 m，深度則視現地場址狀況加以考慮，開挖深度為 1.5 m。為避免影響到場址邊界堤防基礎，開挖位置均距場址邊界一定距離。開挖順序如圖 5-1-3 所示，先將集水坑開挖完畢後，再逐一開挖試驗坑。集水坑之開挖尺寸為 10×10×1.5 m，試驗坑則一律皆為 10×5×1.5 m，相關幾何示意圖如圖 5-1-4 及圖 5-1-5 所示。其中，開挖時坑洞呈梯形，主要是因本次開挖並未設置任何鋼板樁以及太空包進行圍堰，因此將開挖坑預留斜坡，可避免開挖坑崩塌情況發生，圖 5-1-6 為現地試驗坑開挖完成照片。



圖 5-1-1 台中小型水力回填試驗廠址空照圖

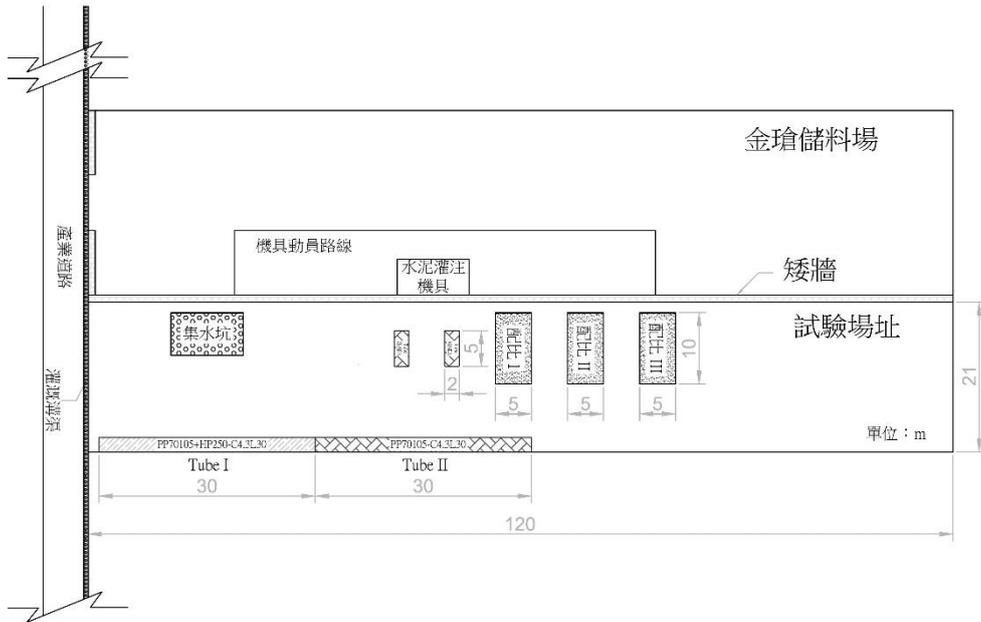


圖 5-1-2 試驗場址周邊及試驗配置示意圖

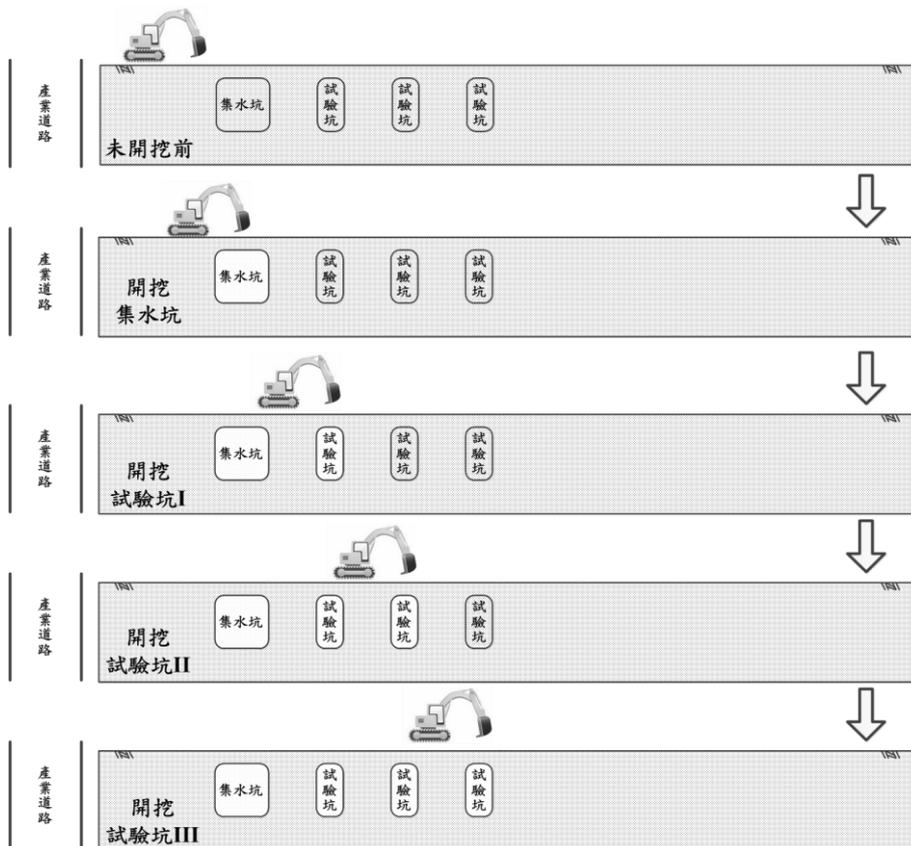
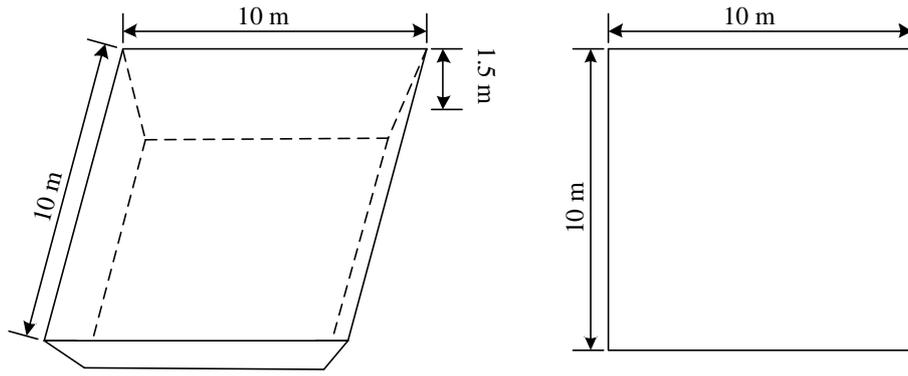
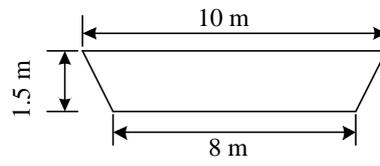


圖 5-1-3 回填試驗坑開挖順序示意圖



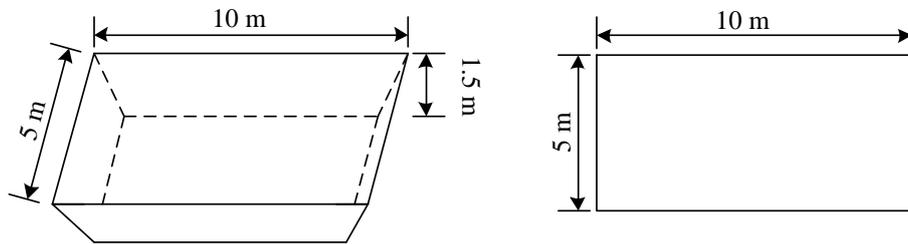
立體圖

上視圖



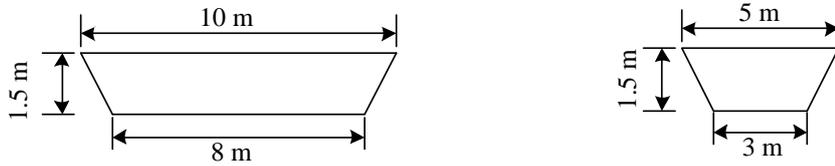
前視圖與側視圖

圖 5-1-4 集水坑開挖幾何示意圖



立體圖

上視圖



前視圖

側視圖

圖 5-1-5 試驗坑開挖幾何示意圖



圖 5-1-6 試驗坑開挖完成現地照片

### 5-1-2 低強度材料水力回填灌注

本試驗主體工作流程如圖 5-1-7，而每一試驗坑之配比設計則如表 5-1-1 所示，茲將此試驗之步驟說明如下：

#### 1. 灌注材料填入泵浦車

- (1) 在預拌場中先將底灰與水攪拌混合。
- (2) 利用混凝土預拌車將底灰漿載運至試驗場址。
- (3) 將底灰漿灌注至泵浦車中(圖 5-1-8)。

#### 2. 水泥拌合

- (1) 秤取表 5-1-2 中配比 1 所列重量之水泥，拌合水泥漿。
- (2) 利用預拌混凝土場之機具，依據水灰比為 1 之比例將水泥與水拌合為水泥漿。
- (3) 將拌合完成之水泥漿液利用水泥預拌車輸送至低速拌漿桶中(圖 5-1-9)。

#### 3. 低強度材料回填

- (1) 利用水泥灌注泵浦機將水泥漿輸送至水力排放管線中，利用 3 通管與底灰漿混合(圖 5-1-10)。

- (2) 利用泵浦車將底灰漿混合水泥漿輸送至試驗坑中(圖 5-1-11)。
- (3) 將試驗坑填至 9 分滿。
4. 依照配比 2 及 3，並重複步驟(1)~(3)陸續完成試驗坑 II 及試驗坑 III。
5. 其中配比 3 更改為水泥先與飛灰進行混合再進行水泥漿拌合。
6. 現地試驗實際操作流程狀況如圖 5-1-12 所示。
7. 待養護 28 天後，視狀況進行鑽心取樣，進行後續相關試驗，試驗坑養護情況如圖 5-1-13~圖 5-1-15。

表 5-1-1 現地小型回填試驗配比設計一覽表

水泥/底灰 百分比	特固力添加量 (對水泥)	固化材
<b>配比設計 I</b>		
10 %	0.8 %	水泥
<b>配比設計 II</b>		
15 %	0.8 %	水泥
<b>配比設計 III</b>		
水泥：11.25 % 飛灰：3.75 %	0.8 %	水泥、飛灰

表 5-1-2 不同配比試驗坑材料用量一覽表

配比	底灰(Kg)	水泥(Kg)	飛灰(Kg)
1	60,000	6,000	--
2	57,100	8,600	--
3	57,100	6,500	2,100
<b>總重</b>	<b>174,200</b>	<b>21,100</b>	<b>2,100</b>

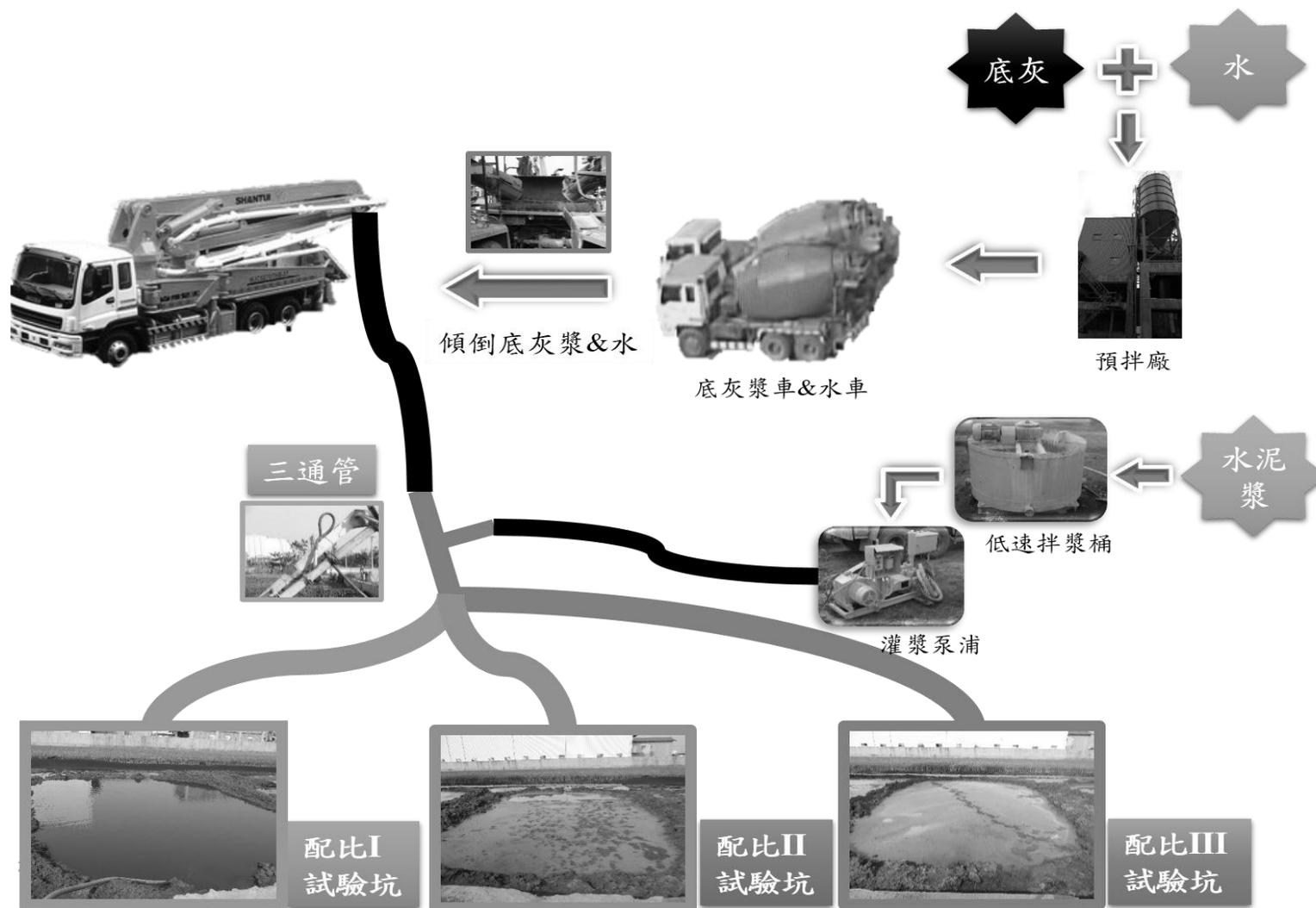


圖 5-1-7 試驗坑水力回填灌注流程示意圖



圖 5-1-8 底灰漿注入泵浦車



圖 5-1-9 水泥漿注入低速攪拌桶



圖 5-1-10 三通管連接水泥漿及底灰管線照片



圖 5-1-11 底灰漿混合水泥漿水力排放至試驗坑

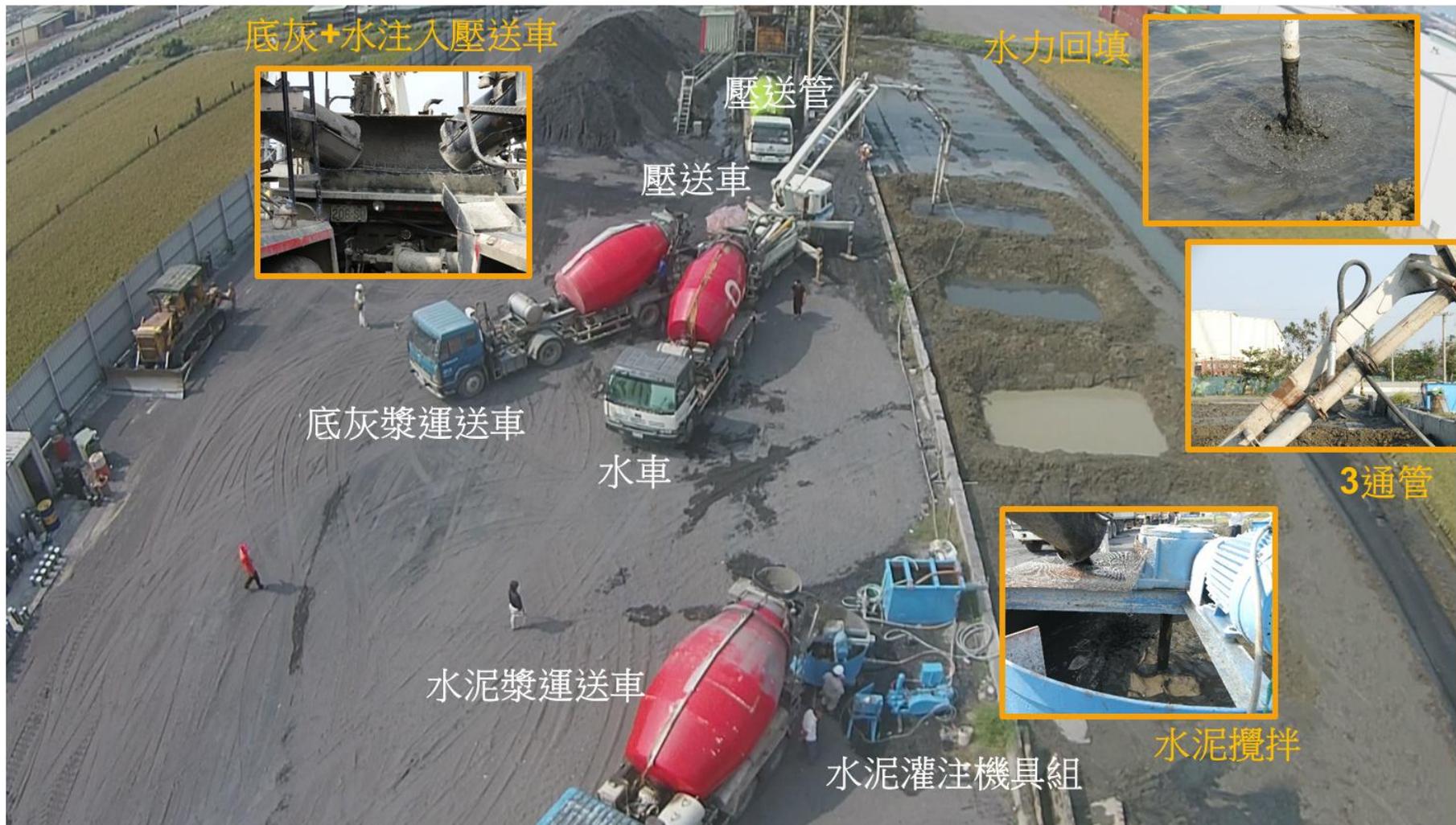


圖 5-1-12 水力回填灌注試驗現地實作照片



圖 5-1-13 水力回填灌注完成後 28 天狀況(試驗坑 I)



圖 5-1-14 水力回填灌注完成後 28 天狀況(試驗坑 II)



圖 5-1-15 水力回填灌注完成後 28 天狀況(試驗坑 III)

## 5-2 煤灰低強度材料回填品質非破壞性檢測

本研究在煤灰水力排放完成後，在試驗坑狀態仍完好的情況下，亦即尚未鑽心取樣前進行煤灰回填品質之非破壞性檢驗，用以驗證是否符合改良品質需求。在非破壞性的檢測中，分為兩個性質進行評估，首先採用表面波譜法進行回填試驗坑之強度檢測，後續再利用地電阻法檢測回填試驗坑回填材料之分布狀況，以下便就兩階段之檢測原理、流程及其結果進行說明：

### 5-2-1 表面波(MASW)測勘

#### 一、 原理簡介

震波測勘的領域裡，通常表面波(surface wave)及背景雜訊(background noise)皆被認為是影響資料品質的主要因素。但過去仍有不少研究嘗試從表面波之頻散特性中擷取有限的地層地質資訊。自 1980 年代逐漸演進而形成所熟知之表面波頻譜分析法(SASW, Spectral Analysis of Surface Waves)。

震波測勘所記錄之表面波多以雷利波(Rayleigh wave)為主，而表面波其

所內含之各種不同頻率(或波長)，具有不同波傳相速度(phase velocity)，其所反應的為不同地層厚度(深度)之地層訊息，即愈短波長之表面波反應的為近地表淺層特性；而愈長波長反應的為地表至較深層地層之綜合效應(如圖 5-2-1)；而地層之剪力(S)波波速多與表面波相速成正相關，通常表面波波速約為剪力波之 0.9 至 0.95 倍。是以，藉由多頻道之表面波記錄，分析表面波各頻率所對應之相速度變化可獲得表面波之頻散曲線(dispersion curve)，進而反演將可獲得地層之剪力波速度剖面。

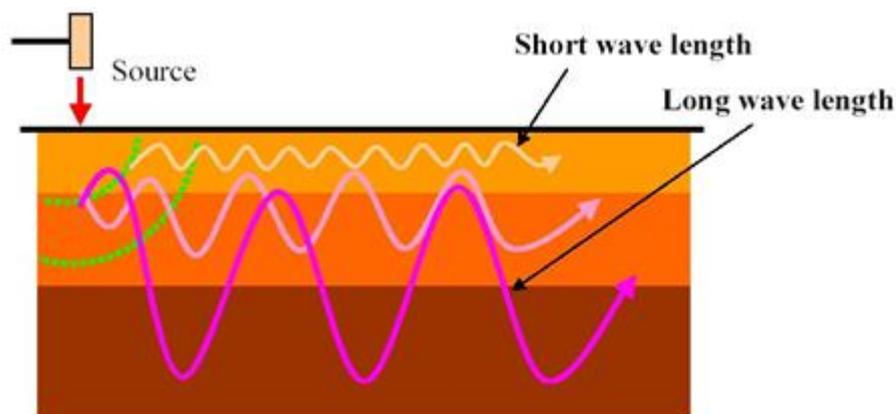


圖 5-2-1 表面波傳播示意圖(摘自 K. Hayashi, 2003. SAGEEP short course)

近年來在表面波頻譜分析(SASW)的基礎下演進，利用較多數量的接收器形成之陣列，藉由記錄中表面波相位與空間之關係來獲得地層波速資訊，此方法稱為 MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves)，其施測方式與儀器設備與傳統之折射震測法相近，但其記錄之震波資料著眼於不同频段之表面波或背景雜訊，依有無震源可區分成主動(Active)與被動式(Passive)兩種。被動式表面波法其又因記錄資料為測區環境背景之人文或天然震動，是故亦稱為折射微震法(Refraction Microtremor)(Louie, 2001)；主動式(Active)表面波法則施測方式與傳統折射法相同，但其主要收集分析的是人工敲擊震源產生之表面波頻散現象(Park, Miller, Xia etc, 1999, 2001, 2006；Hayashi, 2003, 2004)。鑑於表面波之特性，頻率較低(波長較長)之表面波傳

播深度越深，其深部地層資訊越多，但解析度越低；而主動式表面波法則獲得較高頻率(波長較短)資料，反應的是極淺層效應。

通常為符合工程尺度的需求(多於地層淺部 30 m 以內)，故常選擇主動式表面波法施測，以提高解析度並獲得淺部地層側向變化；然倘測區受限於腹地大小，為彌補測線太短可能測深不足，易造成深部資料離散時，則常酌量記錄被動式表面波法資料(即背景振動雜訊)，作為控制點以輔助資料處理，增加運算收斂度。

## 二、 施測儀器

使用之震測系統，主要包括受波器、電纜、觸發器、震波放大器、信號加強器、震波資料處理器、震波記錄儀等，茲分別說明如次：

1. 受波器；高感度電磁式速度型受波器，自然頻率 4.5Hz。
2. 震測電纜；美國 Mark 公司出品，為多波道精製震測專用電纜。
3. 震波放大器；美國 Geometrics 公司之 Strata View 全功能震測儀，其放大倍率達 138dB，輸入阻抗 10k 歐姆，頻率響應 2Hz-20,000Hz。濾波器分為低通四段；40，250，500 及 1000Hz。高通 11 段；10，15，25，35，50，70，100，140，200，280 及 400Hz。鎖定濾波器有 50，60 及 150Hz 三種。電源使用 12DC 伏特電瓶。
4. 信號加強器；24 波道，每波道之記憶容量為 24,000 單元，取樣速度 31.25 至 2000  $\mu$  sec。使用 3.5 吋之 1.44MB 磁片及 120MB 硬碟。信號可重複疊加於 32 位元之定點記憶體或 20 位元之浮點記憶體。
5. 震波記錄儀；採用高解析度，寬度 11cm，640 點熱感應式震波繪圖機。顯示器則為 15×12 cm，640×480 點之液晶板，可與 VGA 連通，顯示模式含搖擺、面積變化、截止組合等。

### 三、 施測方法

主動式表面波法使用一般的折射震測記錄系統，施測時測線與受波器配置也幾乎與 P 波折射工作相同，只是施測記錄係以敲擊震源產生之表面波(以 Rayleigh wave)為主；被動式表面波則利用上述測線配置(即線形測線)或另行配置陣列(如三角形、圓形或 L 型)，記錄多筆背景震動雜訊資料，如人文雜訊、風、波浪等。

本次施測以線形方式等間隔佈置接收器(與折射震測方式相同)，根據現場環境、已知地層材料等條件及施測目標深度設計接收器間隔與測線展距(本次規劃施測接收器間隔為 0.5 m)；主動式之震源位置在記錄長展距資料時於測線端點接收器外處，短展距震源則以等間距介於各個接收器之間。

### 四、 資料處理

資料處理時，先將震波記錄依施測之震源、接收器位置作整理排序(sorting)。獲得每一個資料點位置(CMP)及該處之不同展距表面波記錄。爾後每一處 CMP 點之記錄透過計算表面波相位隨距離(即記錄之展距)之改變(phase difference)並作交叉比對，透過時間、頻率域之空間與速度轉換，疊加獲得頻散曲線圖譜。透過此相速(c)-頻率(f)統計圖，可將各頻率之集中穩定相速度揀選出來，即可獲得該筆資料之表面波頻散曲線(dispersion curve)。再據此進行地層波速模型之反演運算，以獲致最佳 S 波的波速與深度關係，主要反演流程如圖 5-2-2 所示，爾後重複上述步驟將各相鄰測站(CMP 點位置)所得之速度與深度關係成果整合繪製形成完整二維速度剖面。資料處理及速度剖面製作之主要步驟如下：(如圖 5-2-3 所示)

1. 讀取表面波記錄，並輸入施測幾何參數。(流程 A)
2. 將所有記錄作排序(sorting)，獲得各個資料位置(CMP 點)及其不同展距表面波記錄(CMP gather)。
3. 主動法：對單一測站(CMP)記錄作相位交叉比對及相位偏移(phase shift)

轉換運算，繪製成相速-頻率(c-f)統計圖。(流程 B)

4. 依照相速-頻率(c-f)統計圖揀選各頻率對應之波速形成頻散曲線(dispersion curve)。(流程 B)
5. 逆推速表面波頻散曲線，獲得該 CMP 位置處之 S 波速度隨深度變化。(流程 C)
6. 整合各測站繪製測線二維成果剖面。(流程 D)

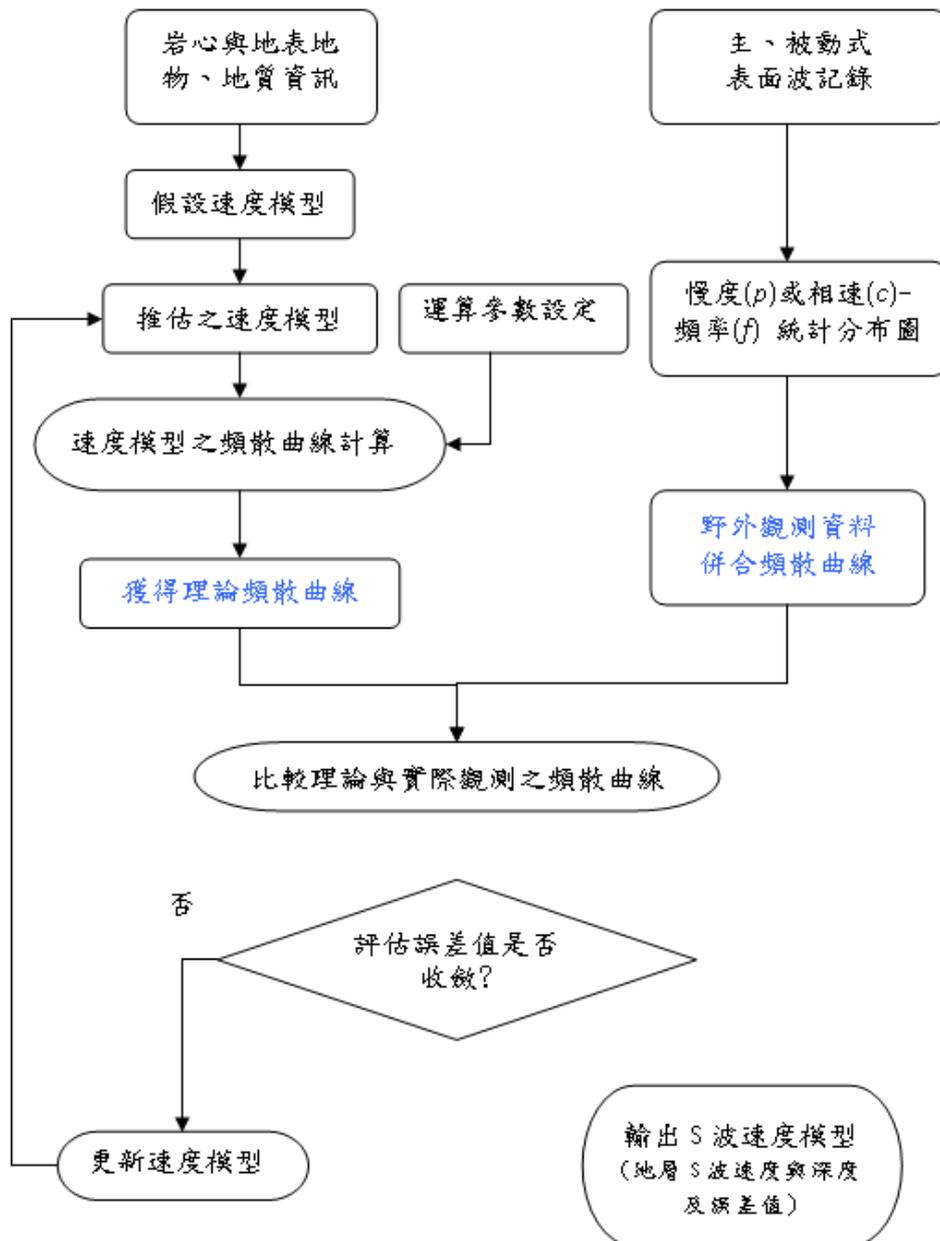


圖 5-2-2 表面波測勘資料逆推處理流程

### Procedure for 2-D Vs Profiling

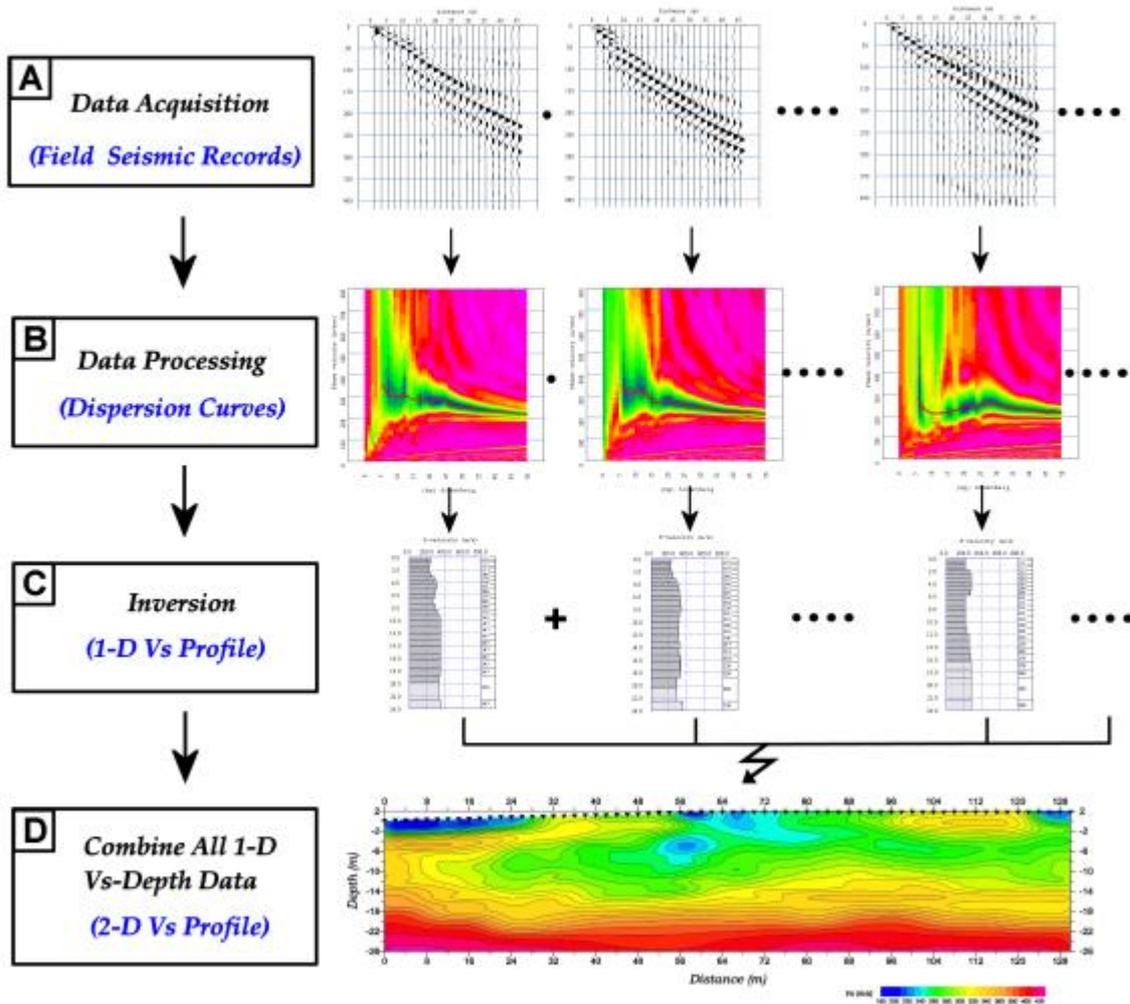


圖 5-2-3 二維剪力(S 波)波速度剖面處理流程

### 五、 施測成果

本次施測試驗場址周邊及試驗範圍規劃示意如圖 5-1-2。檢測場址分別以 Site1(配比 I)，Site2(配比 II)，Site3(配比 III)標示。而表面波測勘(MASW)場址施測位置如圖 5-2-4，其他兩個場址配置均相同。

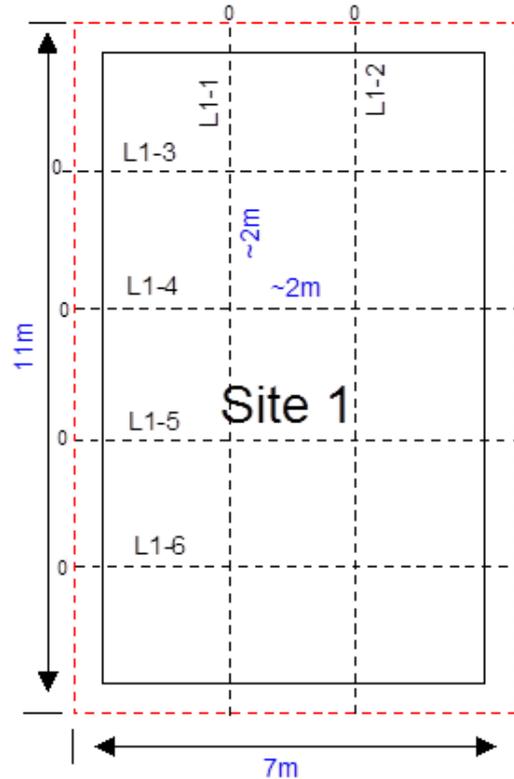


圖 5-2-4 表面波頻散法測線配置圖(以 Site 1 為例)

一般對於剪力波速( $V_s$ -30)之分級，在工程上常以等級 A~F 來加以區分(見表 5-2-1)，未固結之沈積物或極鬆軟空洞等材料波速多屬 D~F 等級。近年來針對速度等級 C 與 D，又細分成三個次級(即 C1~C3 與 D1~D3)。表 5-2-2 即為細分修訂地層波速分類等級之級距表。

另參考剪力波速與 SPT-N 值經驗公式( $V_s=97 \times N^{0.314}$ )，(Imai., and Tonouchi., 1982)，推估當  $N=13.7$  時，對應剪力波速經驗值約 220~221m/sec，以此評估試驗材料成效範圍。茲將速度成果剖面依速度分布特性及與範圍分層如下：

1. 速度層 A—波速高於 360m/s，改良成效最佳範圍。
2. 速度層 B—波速介於 220m/s~360m/s 之間，改良成效次佳範圍。
3. 速度層 C—波速介於 180m/s~220m/s 之間，原生土壤、煤灰與水泥混合範圍。

4. 速度層 D—波速小於 180 m/s，原地層或部分漿料滲流地層。

以下就三個試驗坑之檢測結果進行說明：

1. Site1：場址測線 L1-1~L1-6 試驗成果剪力波速度剖面及對應各速度分層如圖 5-2-5，參考的 N 值剖面如圖 5-2-6。較顯著改良成效深度範圍約 1.0~1.4 m，波速約 220~500 m/sec，以測線 L1-1、L1-2 與 L1-5 交會區附近最佳，如圖中標示 S1H 及 S1K 區，測線 L1-6 附近較差，如圖中標示 S1M、S1N 及 S1O 區。本場址測線柵狀立屏成果如圖 5-2-7。
2. Site2：場址測線 L2-1~L2-6 試驗成果剪力波速度剖面及對應各速度分層如圖 5-2-8，參考的 N 值剖面如圖 5-2-9。較顯著改良成效深度範圍約 1.0~1.6 m，波速約 220~560 m/sec，以測線 L2-2 與 L2-5 交會區附近最佳，如圖中標示 S2H、S2I、S2K 及 S2L 區。本場址波速分佈較均值，在開挖試驗區內改良成效較一致。本場址測線柵狀立屏成果如圖 5-2-10。
3. Site3：場址測線 L3-1~L3-6 試驗成果剪力波速度剖面及對應各速度分層如圖 5-2-11，參考的 N 值剖面如圖 5-2-12。較顯著改良成效深度範圍約 1.0~1.6 m，波速約 220~540 m/sec，以測線 L3-1、L3-2 與 L3-5 交會區附近最佳，如圖中標示 S3H、S3I、S3K 及 S3L 區，測線 L3-3 及 L3-6 附近較差，如圖中標示 S3A、S3B、S3C、S3M、S3N 及 S3O 區。本場址測線柵狀立屏成果如圖 5-2-13。

表 5-2-1 S 波波速對應岩盤分類表(TI 809-04, Seismic Design for Buildings)

<b>Class A</b>	Hard rock with measured shear wave velocity, $\bar{v}_s > 5,000$ ft/sec (1,500 m/s)
<b>Class B</b>	Rock with $2,500$ ft/sec $< \bar{v}_s \leq 5,000$ ft/sec (760 m/s $< \bar{v}_s \leq 1,500$ m/s)
<b>Class C</b>	Very dense soil and soft rock with $1,200$ ft/sec $< \bar{v}_s \leq 2,500$ ft/sec (360 m/s $< \bar{v}_s \leq 760$ m/s) or with either $\bar{N} > 50$ or $\bar{s}_u > 2,000$ psf (100 kPa)
<b>Class D</b>	Stiff soil with $600$ ft/sec $\leq \bar{v}_s \leq 1,200$ ft/sec (180 m/s $\leq \bar{v}_s \leq 360$ m/s) or with either $15 \leq \bar{N} \leq 50$ or $1,000$ psf $\leq \bar{s}_u \leq 2,000$ psf (50 kPa $\leq \bar{s}_u \leq 100$ kPa)
<b>Class E</b>	A soil profile with $\bar{v}_s < 600$ ft/sec (180m/s) or with either $\bar{N} < 15$ or $\bar{s}_u < 1,000$ psf or any profile with more than 10 ft (3 m) of soft clay defined as soil with PI $> 20$ , $w \geq 40$ percent, and $s_u < 500$ psf (25 kPa)
<b>Class F</b>	Soils requiring site-specific evaluations: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading such as liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, and collapsible weakly cemented soils.</li> <li>2. Peats and/or highly organic clays (H <math>&gt; 10</math> ft [3 m] of peat and/or highly organic clay where H = thickness of soil).</li> <li>3. Very high plasticity clays (H <math>&gt; 25</math> ft [8 m] with PI <math>&gt; 75</math>).</li> <li>4. Very thick soft/medium stiff clays (H <math>&gt; 120</math> ft [36 m]).</li> </ol>

表 5-2-2 NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Vs-30 波速等級表

<b>NEHRP Modified Site Classification criteria based on shear wave velocity (Wills et al., 2000; FEMA, 1994; IBC, 2009).</b>		
<b>NEHRP Class</b>		<b>Vs30 Range (m/sec)</b>
E		< 180
D	D1	180 - 240
	D2	240 - 300
	D3	300 - 360
C	C1	360 - 490
	C2	490 - 620
	C3	620 - 760
B		> 760

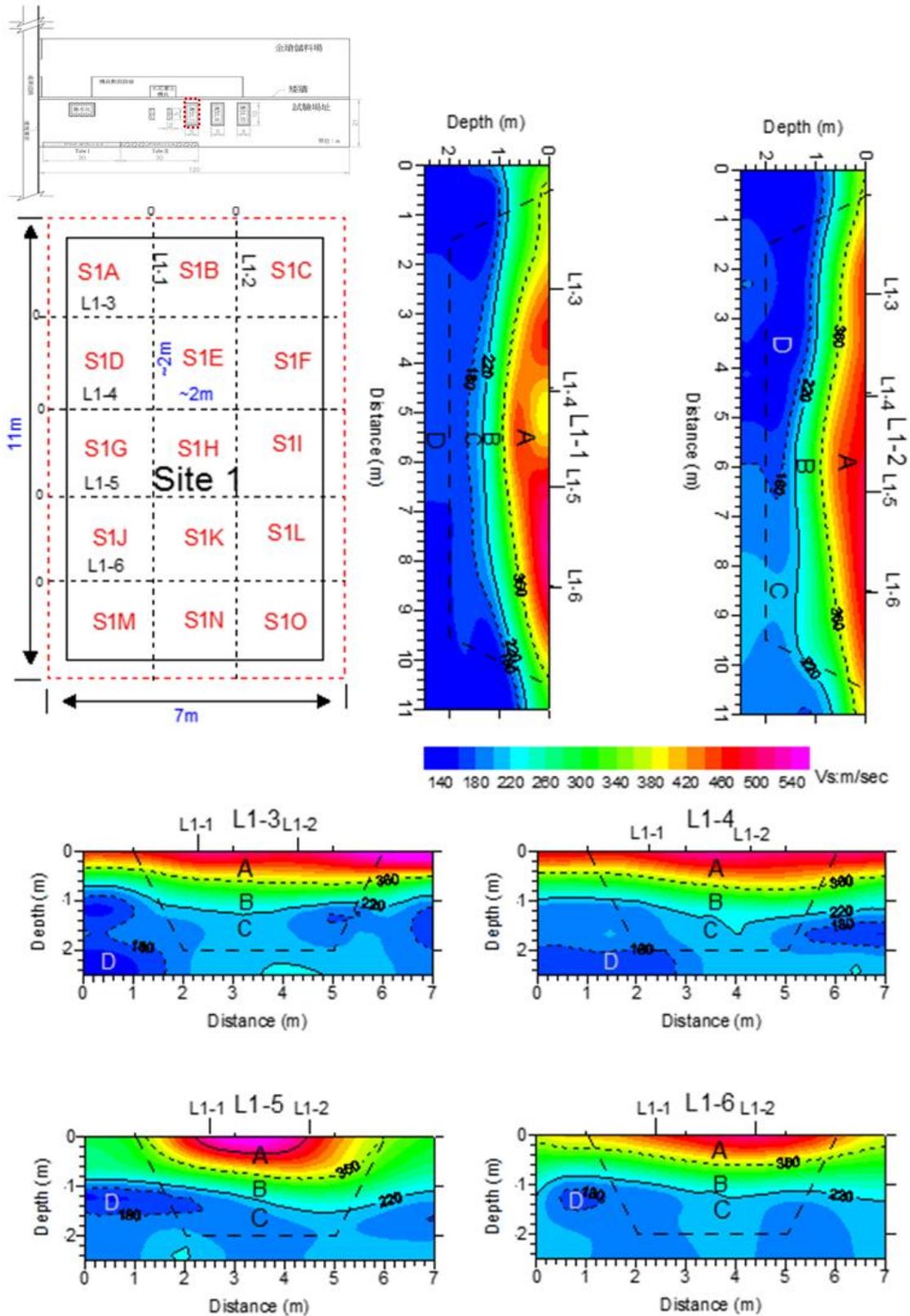


圖 5-2-5 Site1 剪力波速度剖面成果圖

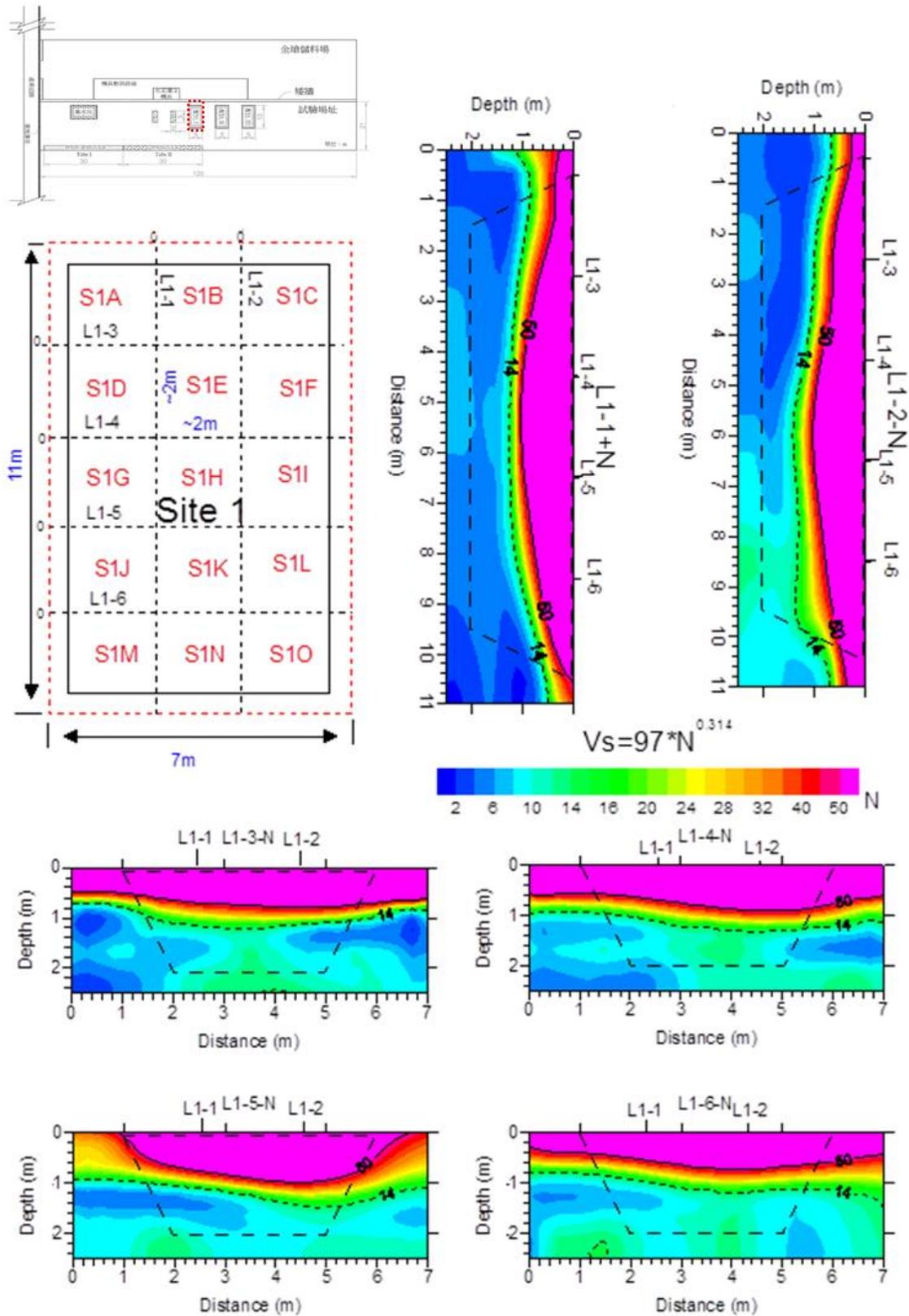


圖 5-2-6 Site1 剪力波速度對應參考 N 值剖面圖

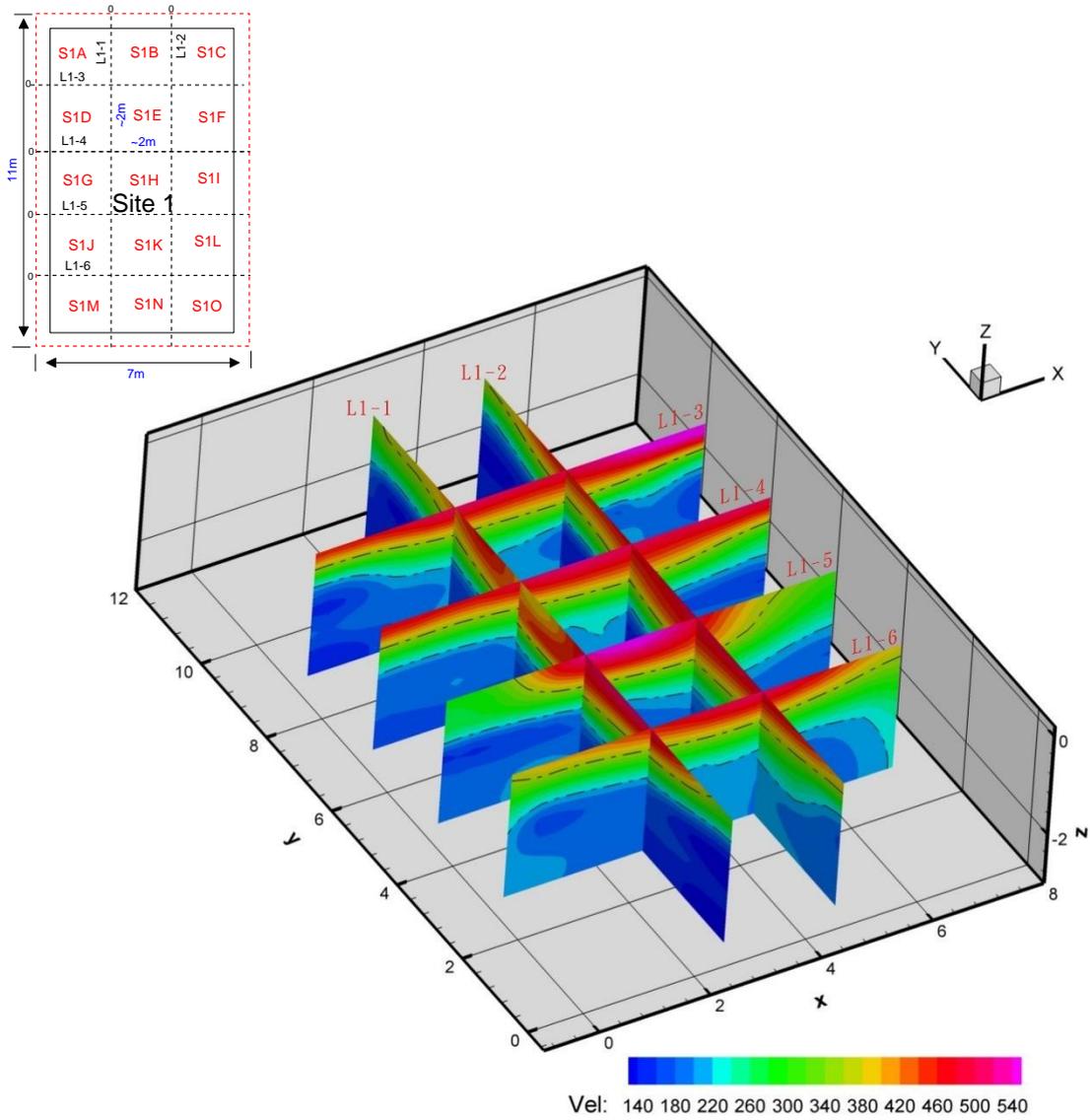


圖 5-2-7 Site1 各測線剪力波速度剖面柵狀立屏圖

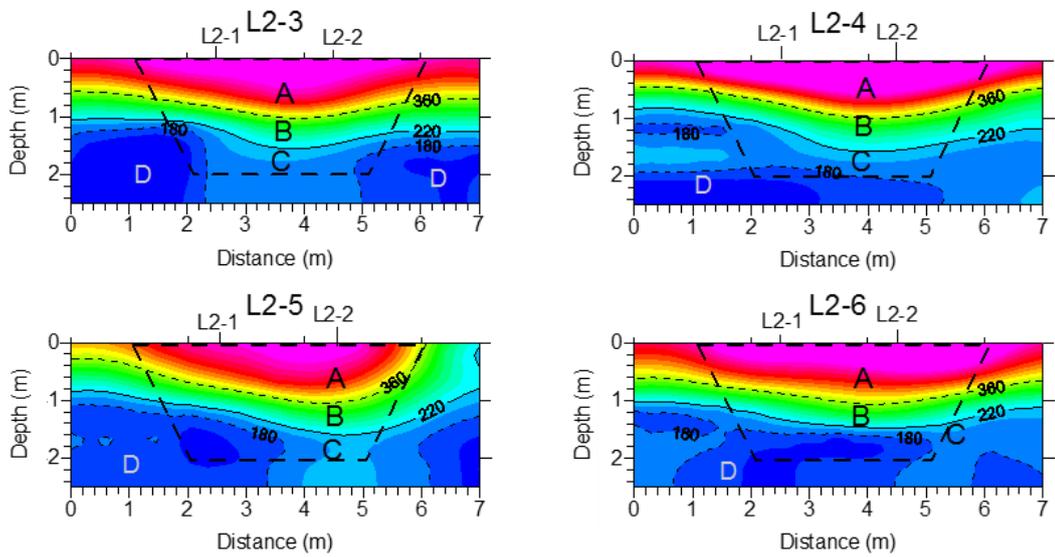
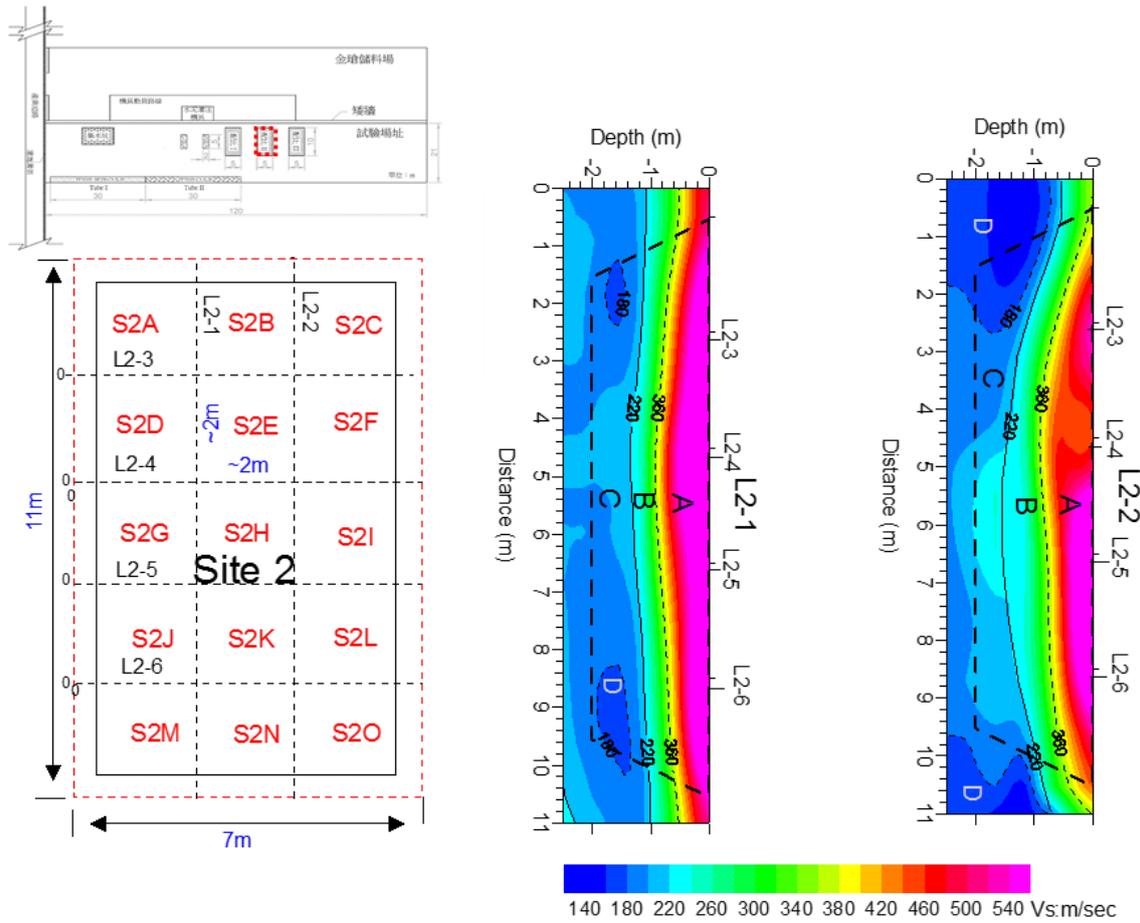


圖 5-2-8 Site2 剪力波速度剖面成果圖

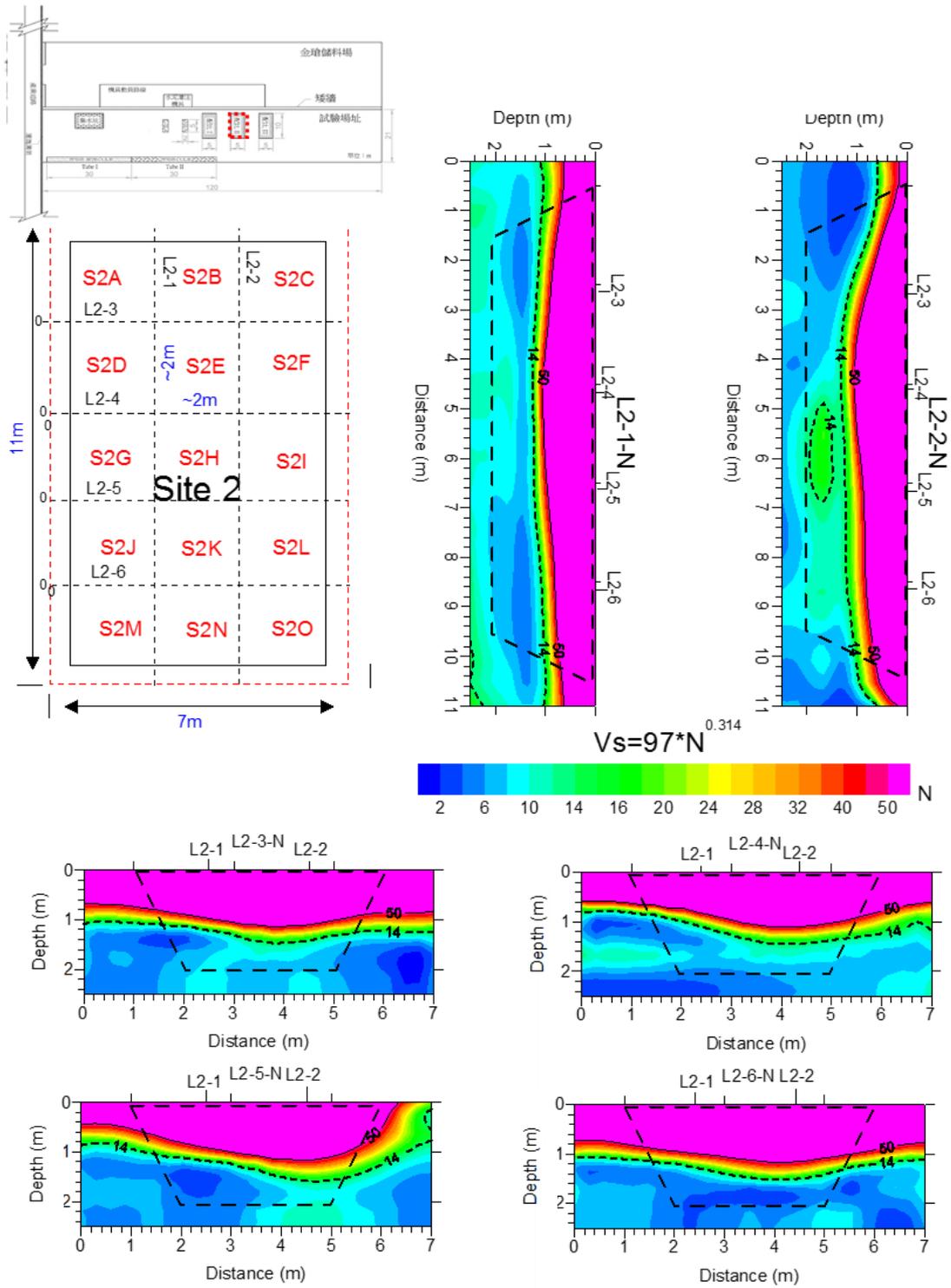


圖 5-2-9 Site2 剪力波速度對應參考 N 值剖面圖

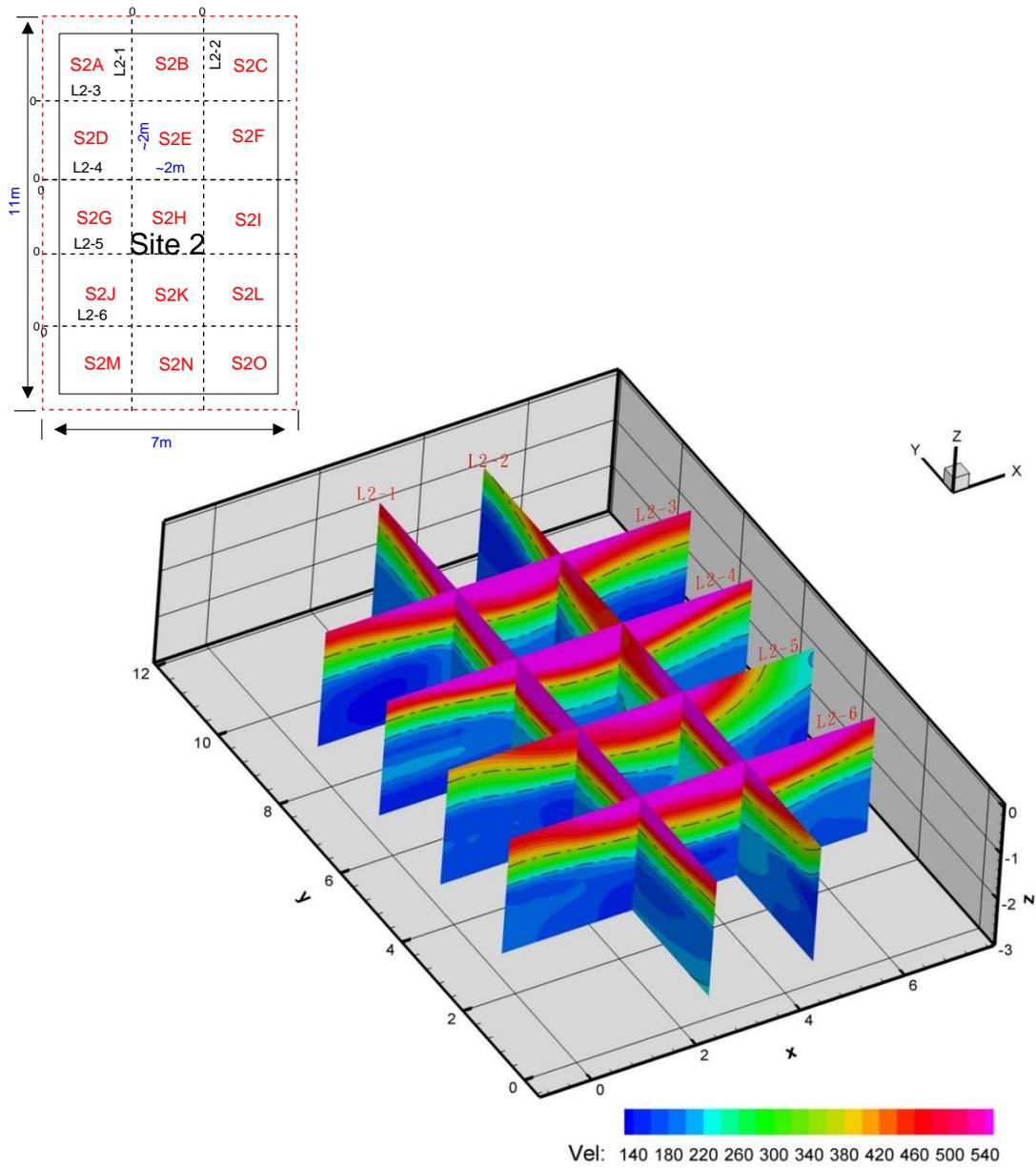


圖 5-2-10 Site2 各測線剪力波速度剖面柵狀立屏圖

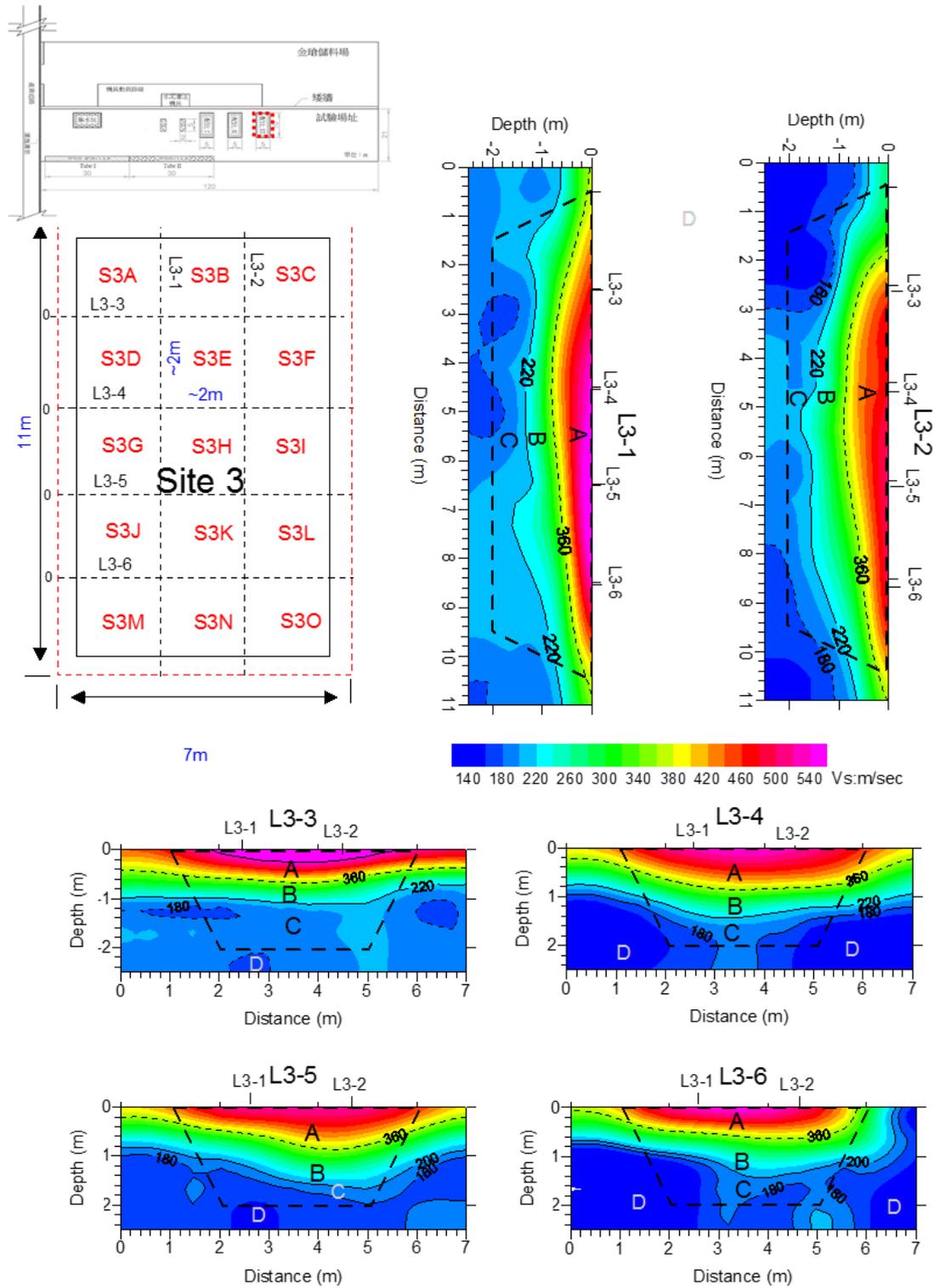


圖 5-2-11 Site3 剪力波速度剖面成果圖

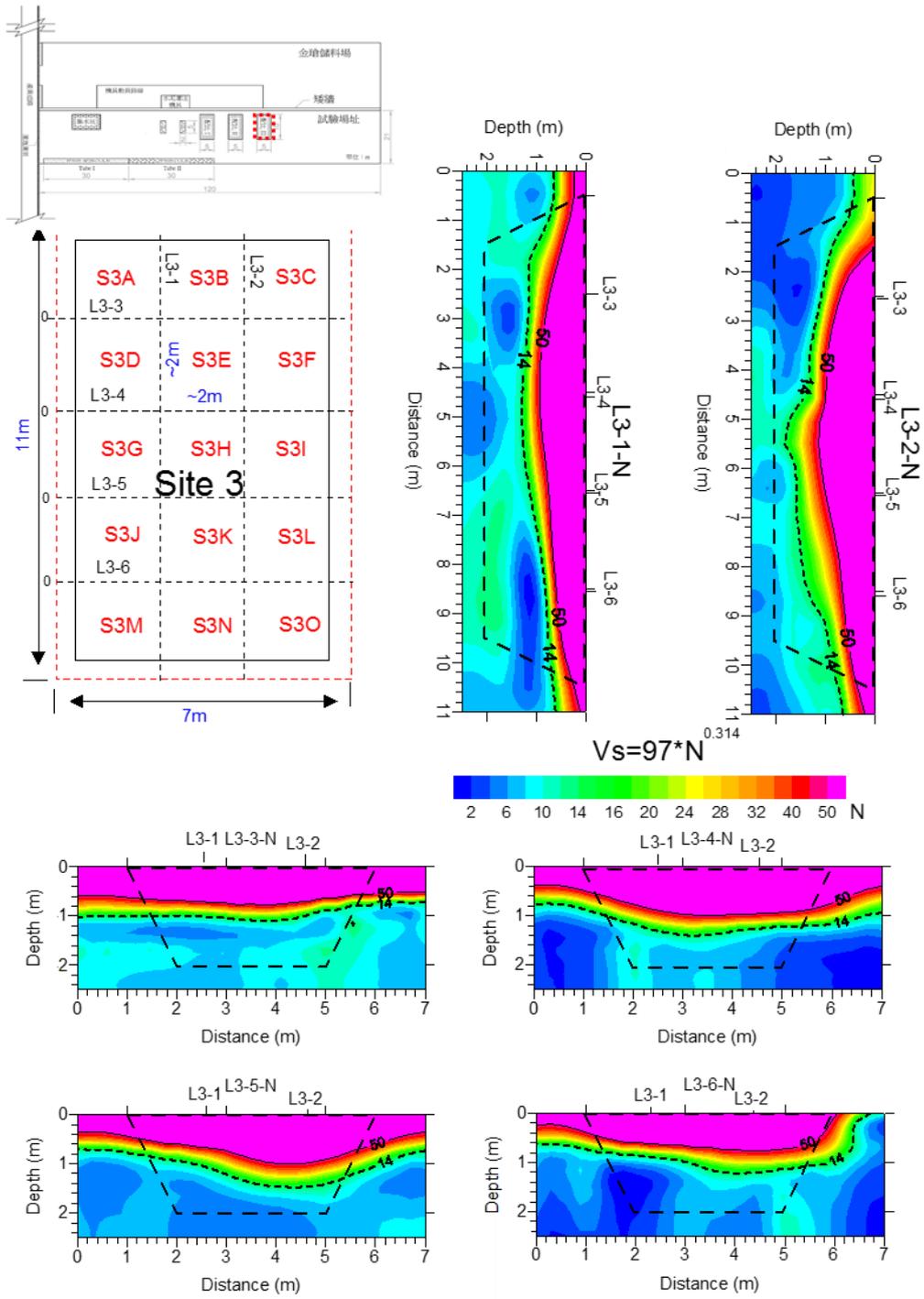


圖 5-2-12 Site3 剪力波速度對應參考 N 值剖面圖

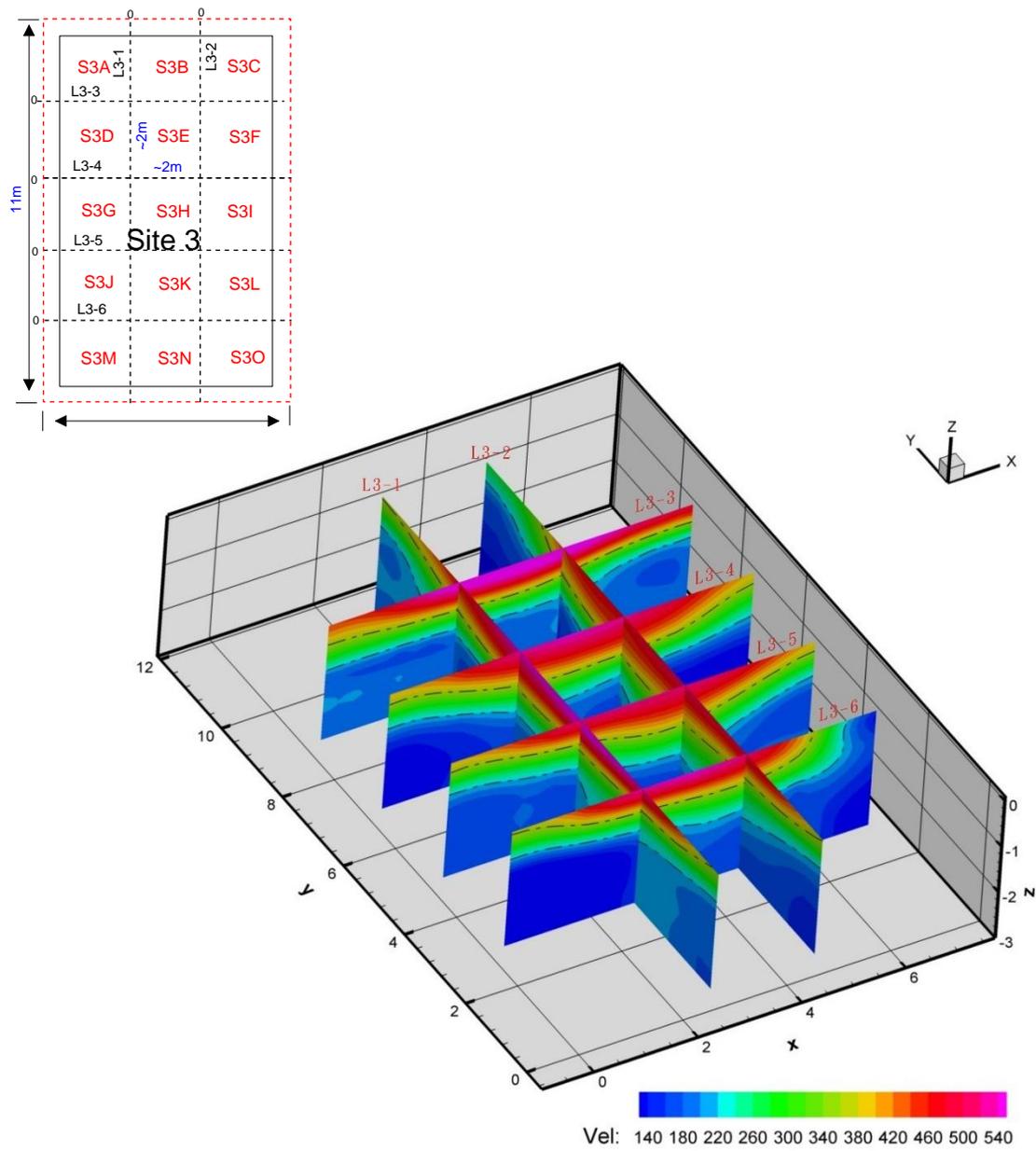


圖 5-2-13 Site3 各測線剪力波速度剖面柵狀立屏圖

## 5-2-2 電阻率影像剖面探測

### 一、 探測原理

地層的電阻率與地層組成礦物、顆粒度大小、組織以及地層之含水量與鹽度有關。其中與地層的顆粒度大小、含水量及水的鹽度關係較重要。因此可用地層的電阻率來研判地層的岩性、含水量及含鹽度，或探測地層內的異常構造。圖 3.1 為一般電阻率與不同地層材料間的對應關係。

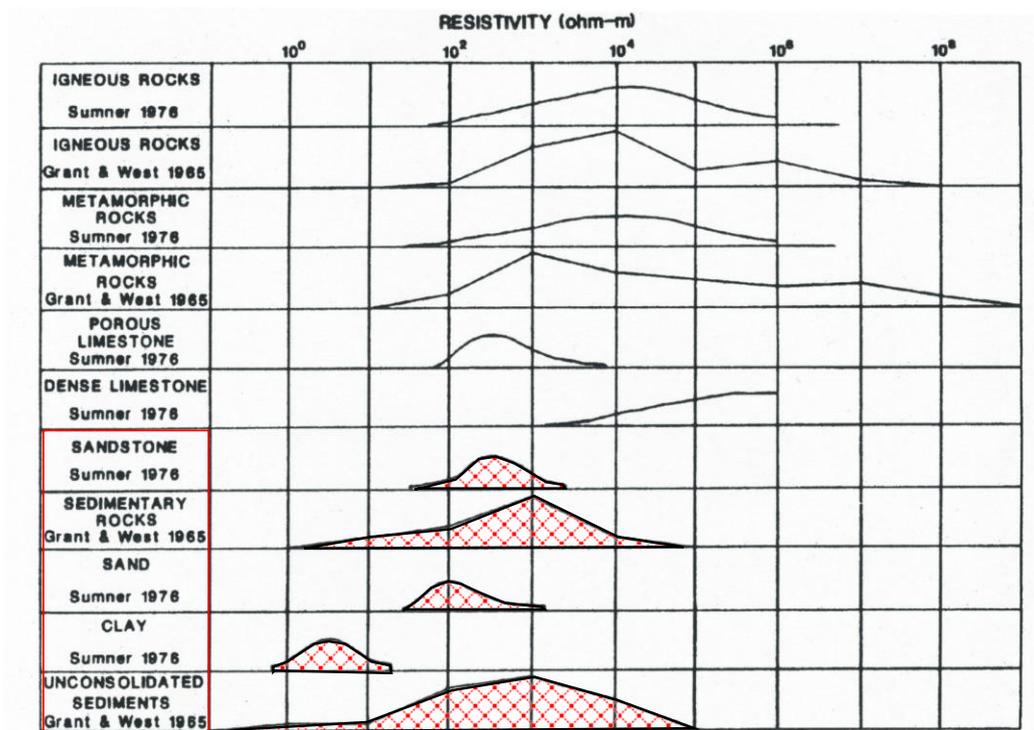


圖 5-2-14 電阻率與對應岩性關係圖

二維電阻率法探測，依電流極與電位極幾何位置不同而有不同的排列方式，常見的排列方式有” 偶極-偶極陣列(Dipole-Dipole array)、溫奈陣列(Wenner array)、溫奈-施蘭柏吉陣列(Wenner-Schlumberger array)、極-偶極陣列(Pole-Dipole array)及二極陣列(Pole-Pole array)等。本次調查為掌控地層橫向電阻率變化靈敏度及探測資料可信度，除使用偶極-偶極陣列，並以極-偶極陣列輔助探測結果。電阻率探測施測示意如圖 2.2，是以直流或低頻交

替直流電，流經一對電極稱為電流極（圖中的A與B）通入地下，電流流經地層建立電場，在地表上用另一對電極稱為電位極（圖中的M與N）測得其間的電位差。此電位差與通入地下的電流強度、電極間的相對位置及各地層的導電性有關。

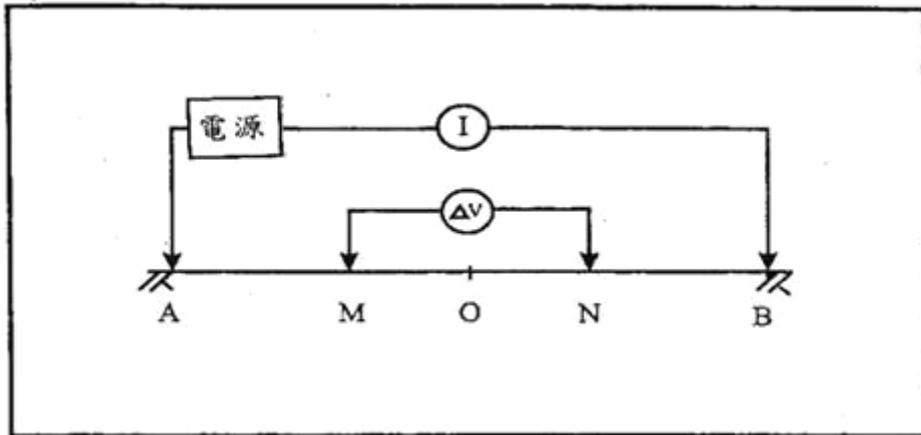


圖 5-2-15 直流電阻法使用四極排列施測示意圖

在一電性均質厚度無限大的地層，各物理量間之關係如下式：

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}$$

式中

$\Delta V$ ：為電位極間的電位差

$\rho$ ：為地層的電阻率

$I$ ：為通入地下的電流強度

$\overline{AM}, \overline{BM}, \overline{AN}$  及  $\overline{BN}$  為電流極至電位極的距離

上式可改寫成：

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

$$K = 2\pi \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}^{-1}$$

因此若測得  $\Delta V, I$  及電流極與電位極的距離即可算出此均質厚度無限大的地層的電阻率。但地層實際上並非均質且厚度為無限大，因此依上式算得的電阻率稱為「視電阻率」(apparent resistivity)，寫成下式：

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

視電阻率通常不代表地下各地層之實際電阻率，而是代表在此種電極排列情形下所有地層導電性之綜合效應。電流極展距愈大，電流穿入愈深，其效應愈接近下部地層的性质，因此在探測中將電流極展距逐次加大，可逐次測獲由淺至深的地層反應訊號，探測之資料經分析與解釋可求得地下由淺至深各地層之電阻率分布。

## 二、 探勘方法

電阻率影像剖面探測是將測點以等間距排列在一直線上，測點間距小，有高密度的探測資料以分析地層的電阻率分布。本研究以 pd array 為例，施測示意如圖 3-3，其中  $a$  為電極間距， $Z_e$  為探測深度， $C1$  與  $C2$  為電流極，其中  $C2$  為遠電流極， $P1$  與  $P2$  為電位極， $n$  為  $P1-P2$  距離與  $C1$  距離的比。探測步驟如下：

1. 電位極間距為  $a$ ， $n=1$  施測時由測站 1( $C1$ ), 2( $P1$ ), 3( $P2$ ), 測站 2,3,4,..... 依次分別量測至最後測站。
2. 電位極間距為  $a$ ， $n=2$  施測時由測站 1( $C1$ ), 3( $P1$ ), 4( $P2$ ), 測站 2,4,5,..... 依次分別量測至最後測站。
3. 電位極間距為  $a$ ， $n=3$  施測時由測站 1( $C1$ ), 4( $P1$ ), 5( $P2$ ), 測站 2,5,6,..... 依次分別量測至最後測站。
4. 依次增加  $n$  值施測至  $n=6$ 。改變電極間距，如上述步驟依序繼續施測。
5. 電位極間距為  $3*a$ ， $n=1$  施測時由測站 1( $C1$ ), 4( $P1$ ), 7( $P2$ ), 測站 2,5,8,..... 依次分別量測至最後測站。

6. 電位極間距為  $3*a$ ， $n=2$  施測時由測站 1(C1), 7(P1), 10(P2), 測站 2,8,11,.....依次分別量測至最後測站。
7. 電位極間距為  $3*a$ ， $n=3$  施測時由測站 1(C1), 10(P1), 13(P2), 測站 2,11,14,.....依次分別量測至最後測站。
8. 依次增加  $n$  值施測至  $n=6$ 。改變電極間距，如上述步驟依序繼續施測。
9. 當電位極間距為  $5a$  時，如上述步驟依序由  $n=1$ ,  $n=2$ ,  $n=3$ ... 繼續施測直至最後測站。

### 三、 資料處理

探測資料須經品質檢查，去除離奇資料點後再做資料解釋。離奇資料點大多由電磁干擾所致。在背景雜訊高的地方偶爾出現較大的雜訊，造成離奇資料。有些離奇資料是由地質因素或地下的異常物造成，須經適當修正或去除不用。探測資料通常計算成視電阻率， $\rho_a = 2\pi rV/I$ ； $r$  為  $C_1$  至  $P_1$  的距離， $V$  為訊號電壓， $I$  為通入地層之電流強度。探測結果通常以視電阻率擬似剖面(Apparent resistivity pseudosection)展示。它是以二測量電極之中點為橫軸，測量電極之間距為縱軸位置標示視電阻率的剖面。

電阻率影像剖面探測之資料解釋使用二維逆推法。逆推解釋程式之順演使用有限元素法(Finite-element method)做數值計算。逆演使用平滑限制最小平方法(Smoothness-constrained least-squares method)(Loke and Barker, 1996)。資料解釋程式將地形一併納入元素區塊，消除地形效應修正的困擾。順演與逆演作多次疊代運算達到結果收斂至穩定。

### 四、 探勘儀器

本次探勘使用法國 IRIS 公司製造的 SYSCAL Pro 地電阻探測儀，包括 SYSCAL Pro、Switch Pro. 72 及 Termination Strip 等(如圖 3.4)。該儀器輸出最大電壓為 1000 V 交替式直流電，最大電流 2.5 A(安培)，最大功率 250W，訊號靈敏度達  $1\mu V$ ，並具訊號疊加功能，可將不良資料去除。本儀器有電

腦功能，可做程式化控制施測，資料不良會重複施測，斷訊會發出警示，並在面板上出現錯訊顯示。圖 3.5 為地電阻影像剖面探測施工示意圖。

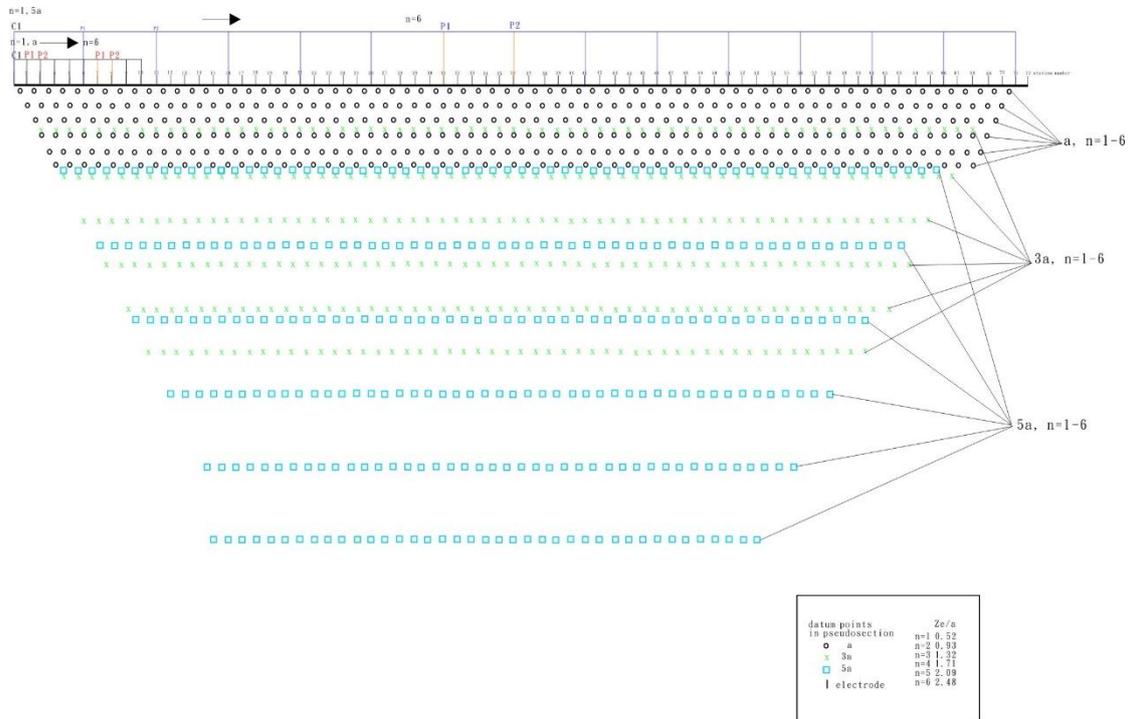


圖 5-2-16 電阻率影像剖面極-偶極陣列施測示意圖

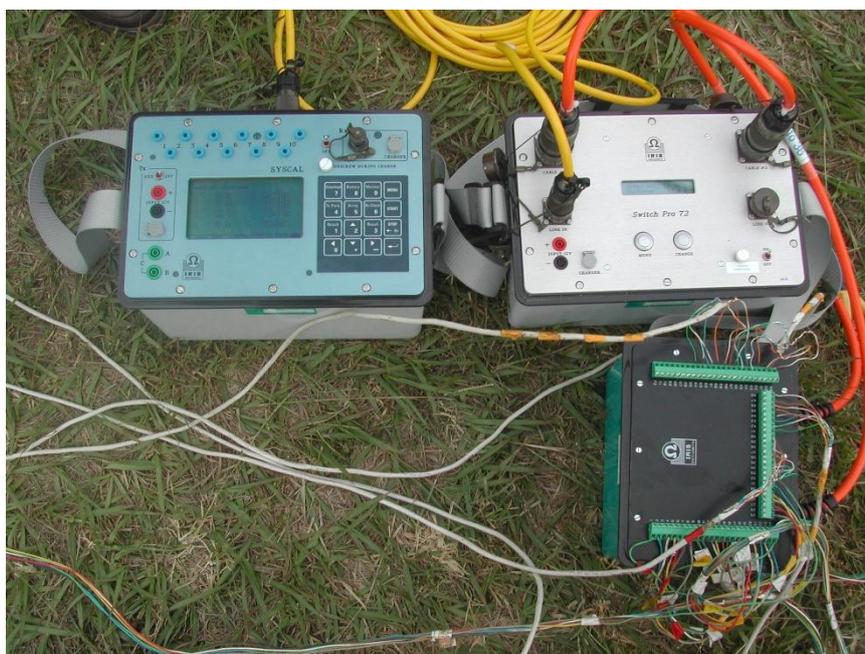


圖 5-2-17 SYSCAL Pro. 地電阻探測系統

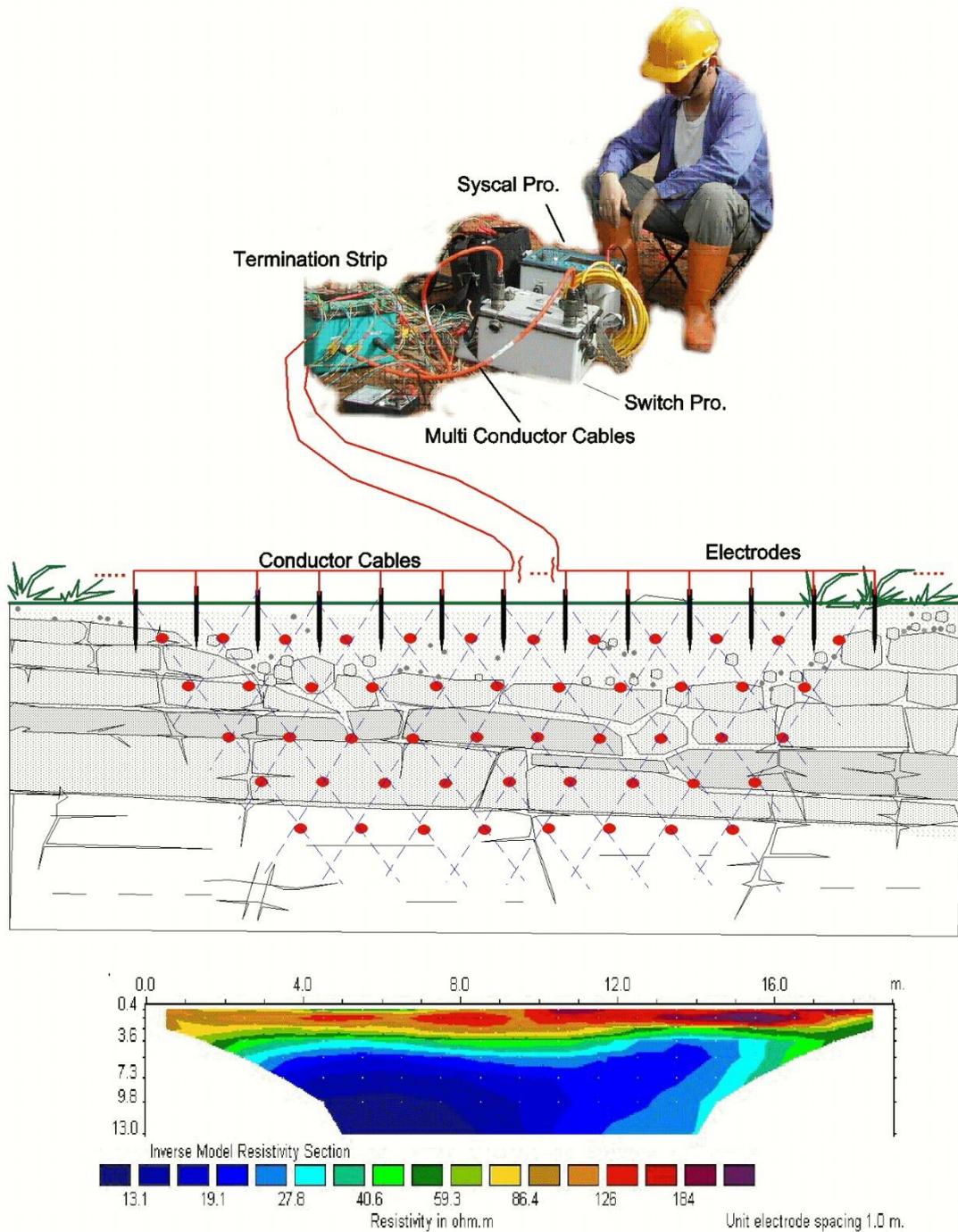


圖 5-2-18 地電阻影像剖面探查現地施工示意圖

## 五、 施測成果

本次施測試驗場址周邊及試驗範圍規劃示意如圖 5-1-2。檢測場址分別以 Site1(配比 I)，Site2(配比 II)，Site3(配比 III)標示。施測結果係依據電阻

率分布特性及與範圍分層如下：

1. RA 層－電阻率 $>30$  ohm-m，水泥含量高比例範圍。
2. RB 層－ $20$  ohm-m $<$ 電阻率 $<30$  ohm-m，水泥含量中比例範圍。
3. RC 層－ $15$ ohm-m $<$ 電阻率 $<20$  ohm-m，水泥含量低比例範圍。
4. RD 層－電阻率 $<15$  ohm-m，原地層或部分漿料滲流地層。

以下就三個試驗坑之檢測結果進行說明：

1. Site1 場址測線：測線 V1、V2 及測線 H1(0~10 m)~H4(0~10 m)，地電阻影像剖面及對應各電性分層如圖 5-2-19 及圖 5-2-22~圖 5-2-25。本場址試驗材料與原地層電阻率差異較小，改良成效深度範圍約從地表往下 1.0~1.4 m。較顯著電阻率變化區約在測線 H1、H2 與 V1、V2 所夾區域，如標示 S1D、S1E、S1F 區。測線 H3 與 V1、V2 交會附近顯示試驗材料與原地層差異最小。本場址測線柵狀立屏成果如圖 5-2-26。
2. Site2 場址測線：測線 V3、V4 及測線 H1(10~20 m)~H4(10~20 m)，地電阻影像剖面及對應各電性分層如圖 5-2-20 及圖 5-2-22~圖 5-2-25。本場址試驗材料與原地層電阻率差異較顯著，改良成效深度範圍約從地表往下 1.0~1.6m。較顯著電阻率變化區約在測線 H1~H3 與 V3、V4 所夾區域，如標示 S2B、S2E、S2H 及 S2K 區。測線 H4 與 V3、V4 交會附近顯示試驗材料相較其他區不顯著。本場址測線柵狀立屏成果如圖 5-2-27。
3. Site3 場址測線：測線 V5、V6 及測線 H1(20~28.4 m)~H4(20~28.4 m)，地電阻影像剖面及對應各電性分層如圖 5-2-21 及圖 5-2-22~圖 5-2-25。本場址試驗材料與原地層電阻率差異介於 Site1 與 Site2，改良成效深度範圍約從地表往下 1.0~1.6 m。全區改良成效顯著，其中以測線 V5、V6 與測線 H3、H4 所夾區域最深，如標示 S3K、S3L、S3N 及 S3O 區。本場址測線柵狀立屏成果如圖 5-2-28。

### 金瓊儲料場

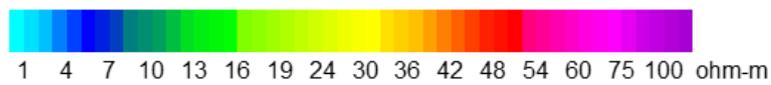
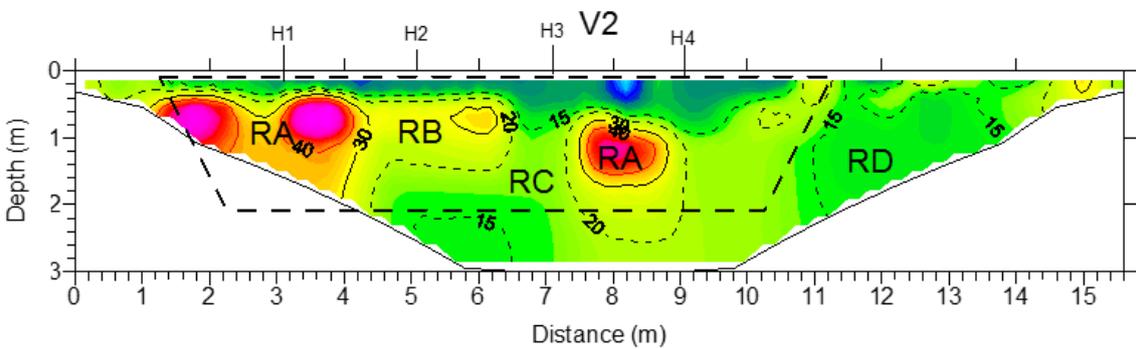
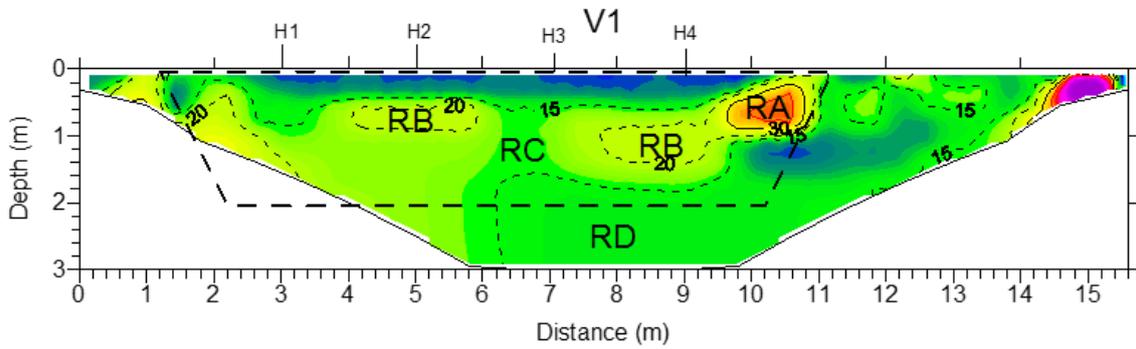
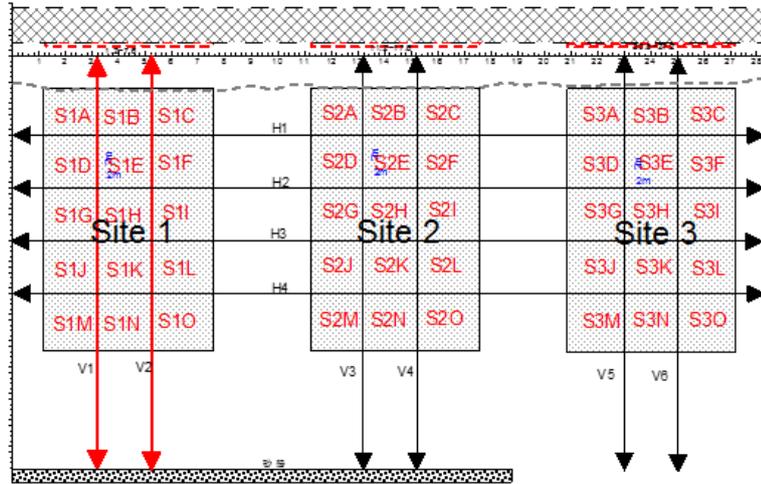


圖 5-2-19 Site1 測線 V1 及 V2 地電阻影像剖面成果圖

### 金瓊儲料場

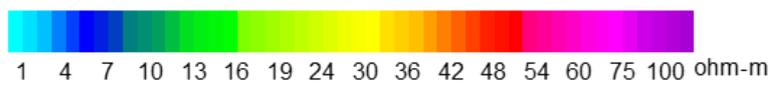
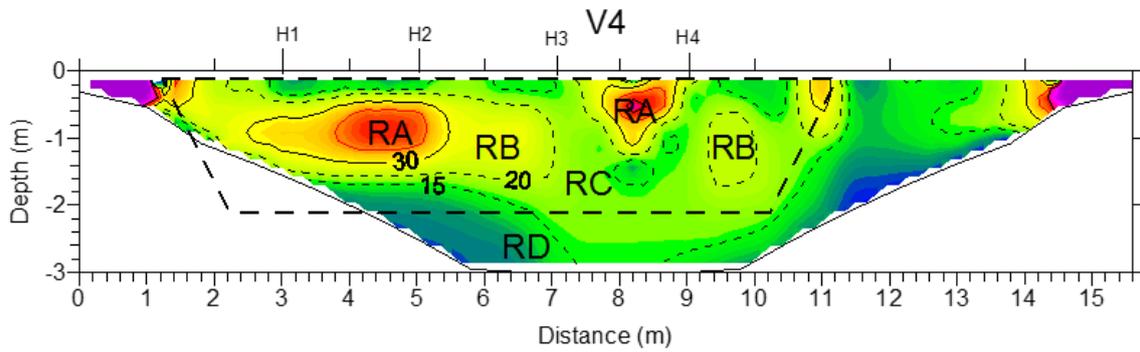
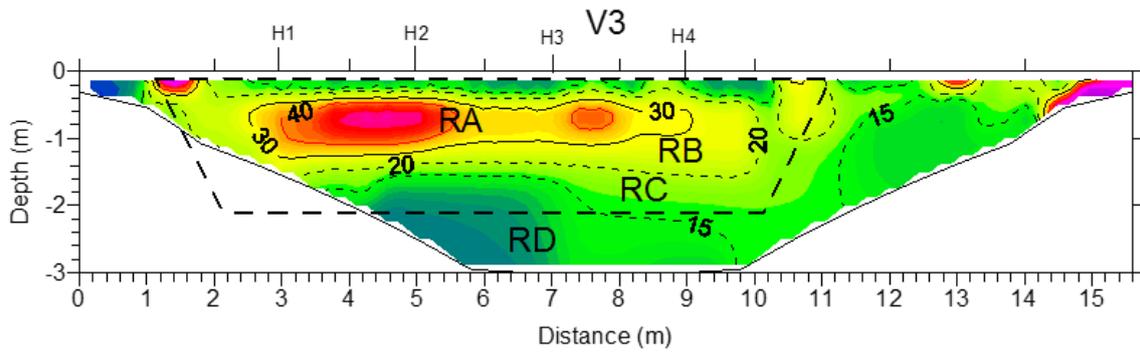
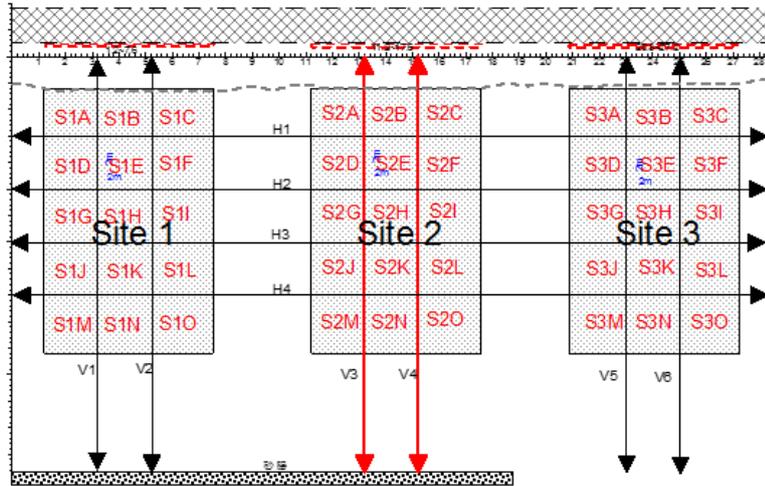


圖 5-2-20 Site2 測線 V3 及 V4 地電阻影像剖面成果圖

金瓊儲料場

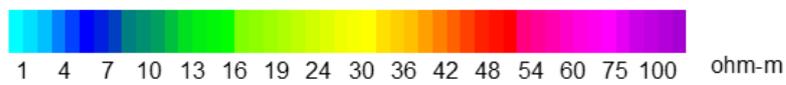
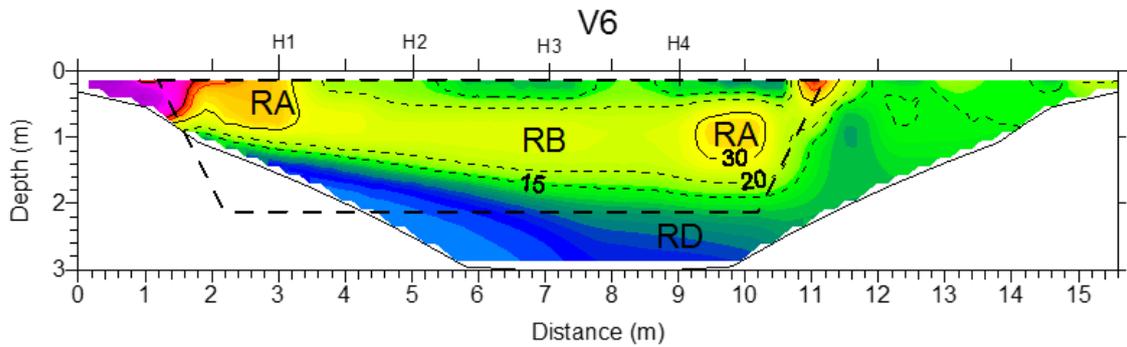
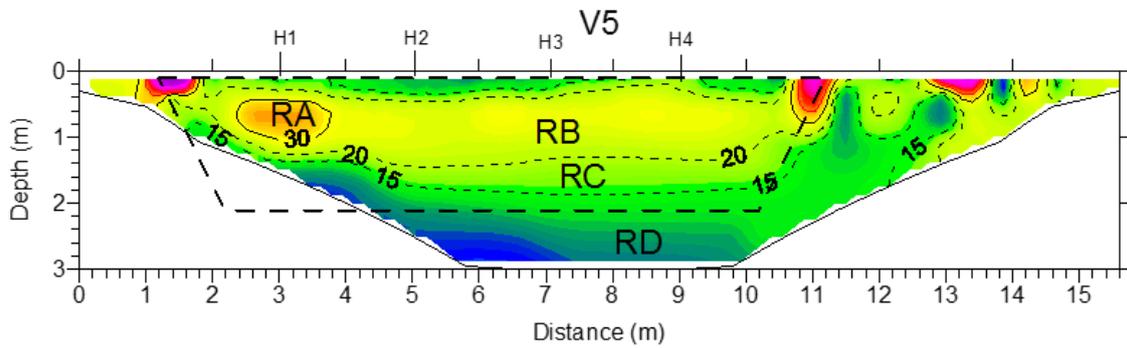
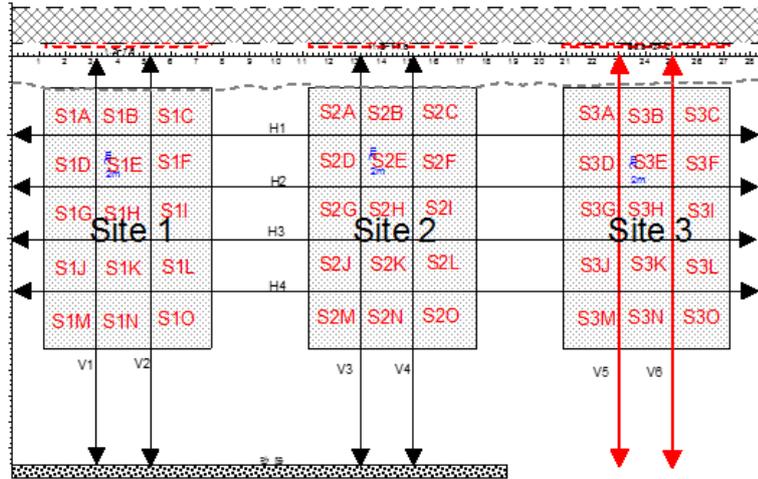
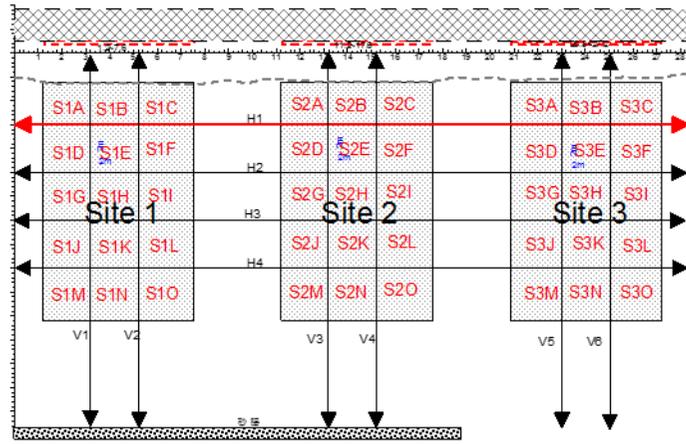
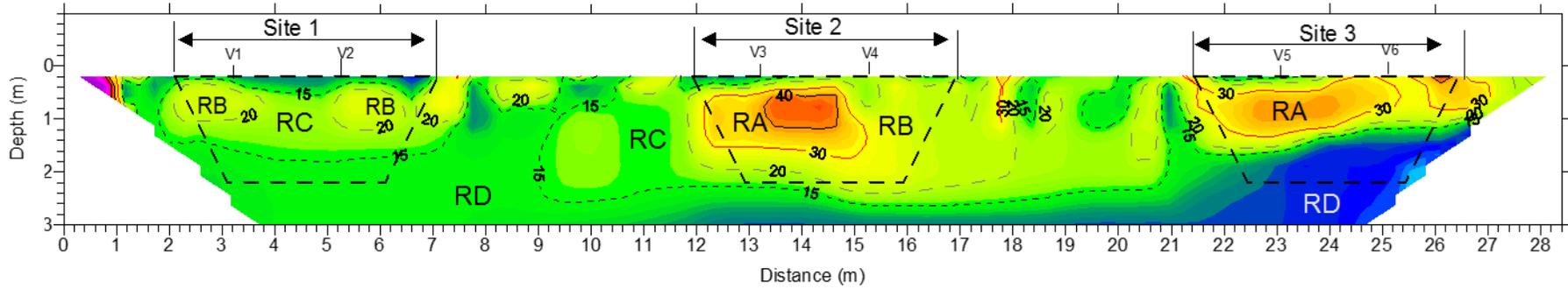


圖 5-2-21 Site3 測線 V5 及 V6 地電阻影像剖面成果圖

金瓊儲料場



H1



1 4 7 10 13 16 19 24 30 36 42 48 54 60 75 100 ohm-m

圖 5-2-22 測線 H1 地電阻影像剖面成果圖

金瑯儲料場

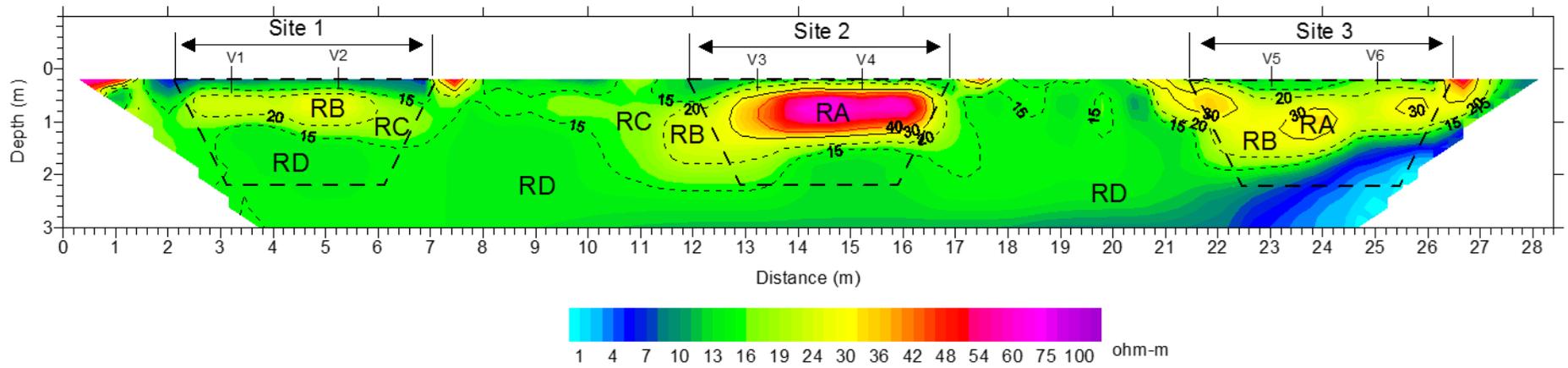
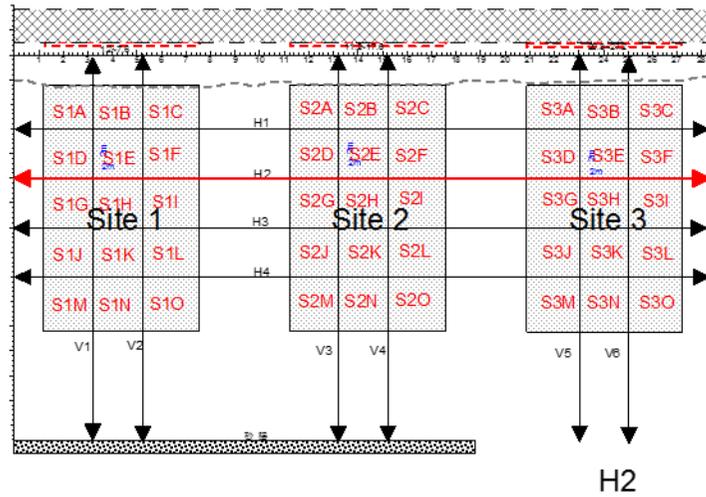
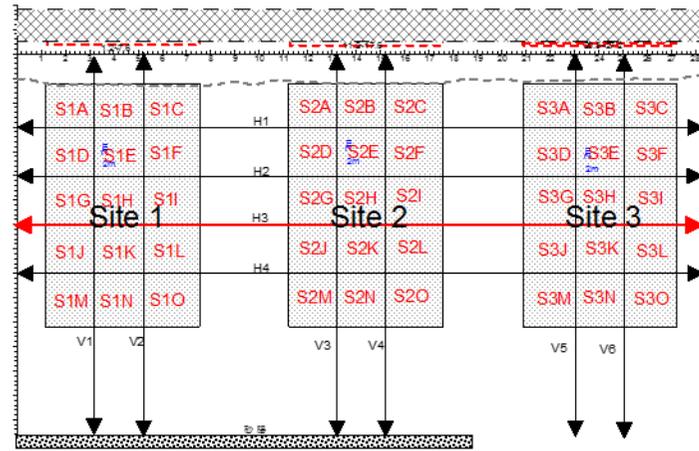


圖 5-2-23 測線 H2 地電阻影像剖面成果圖

金瓊儲料場



H3

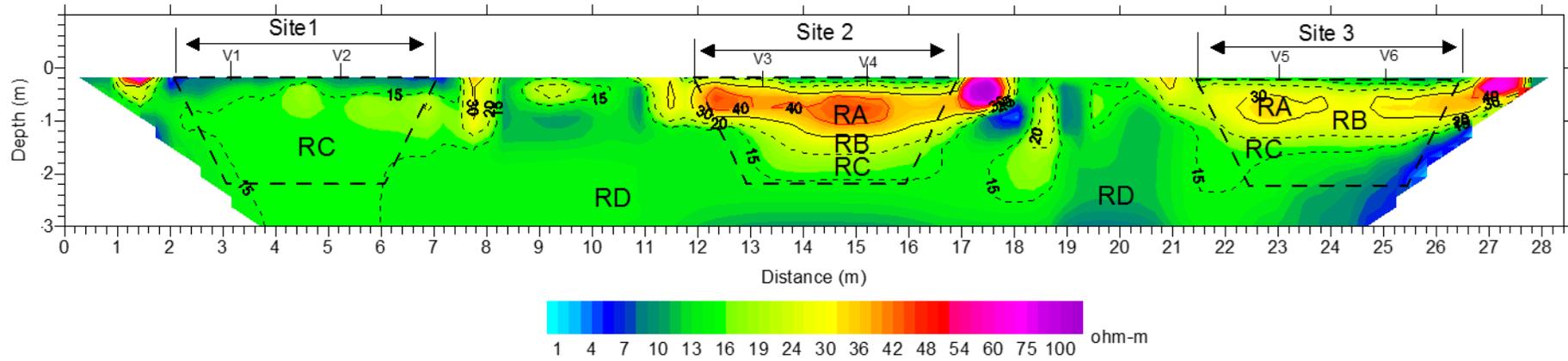
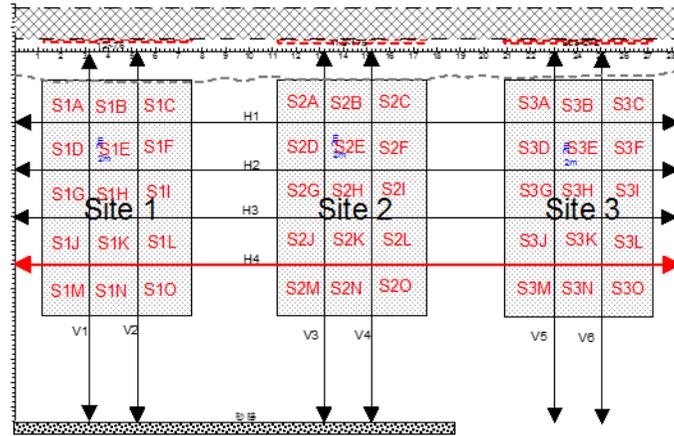


圖 5-2-24 測線 H3 地電阻影像剖面成果圖

金瑋儲料場



H4

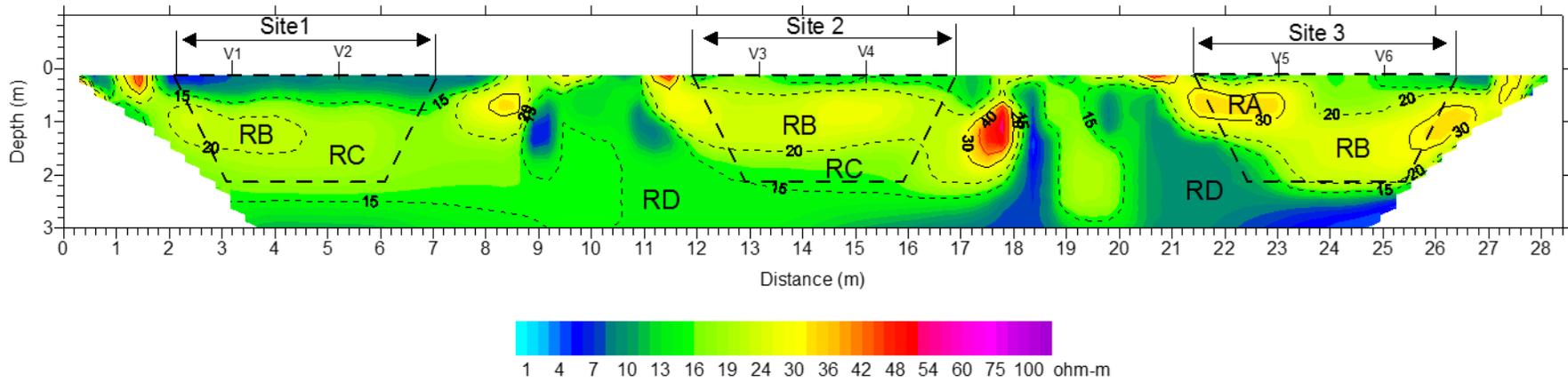


圖 5-2-25 測線 H4 地電阻影像剖面成果圖

金 瓊 儲 料 場

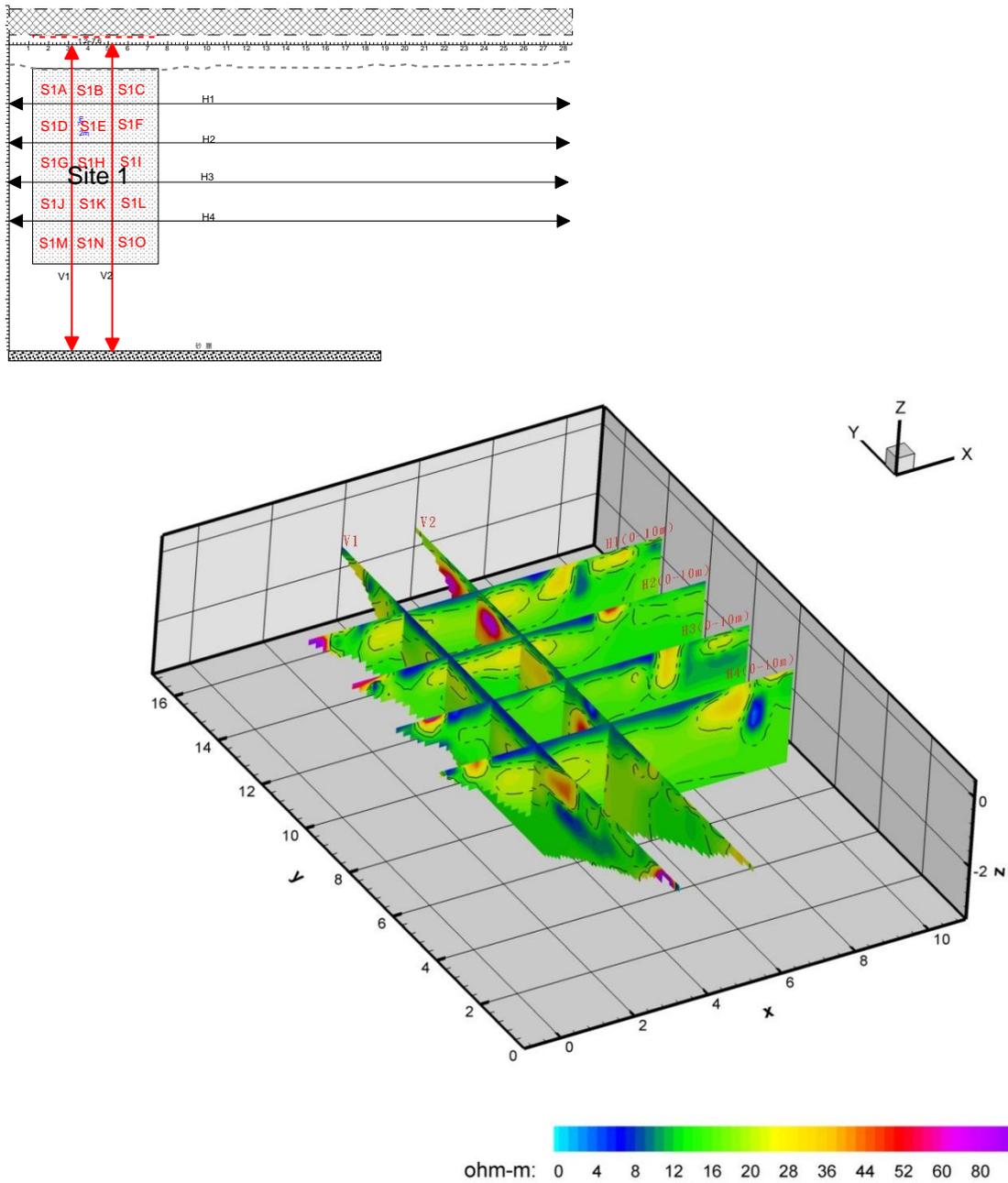


圖 5-2-26 Site1 各測線電性地層剖面柵狀立屏圖

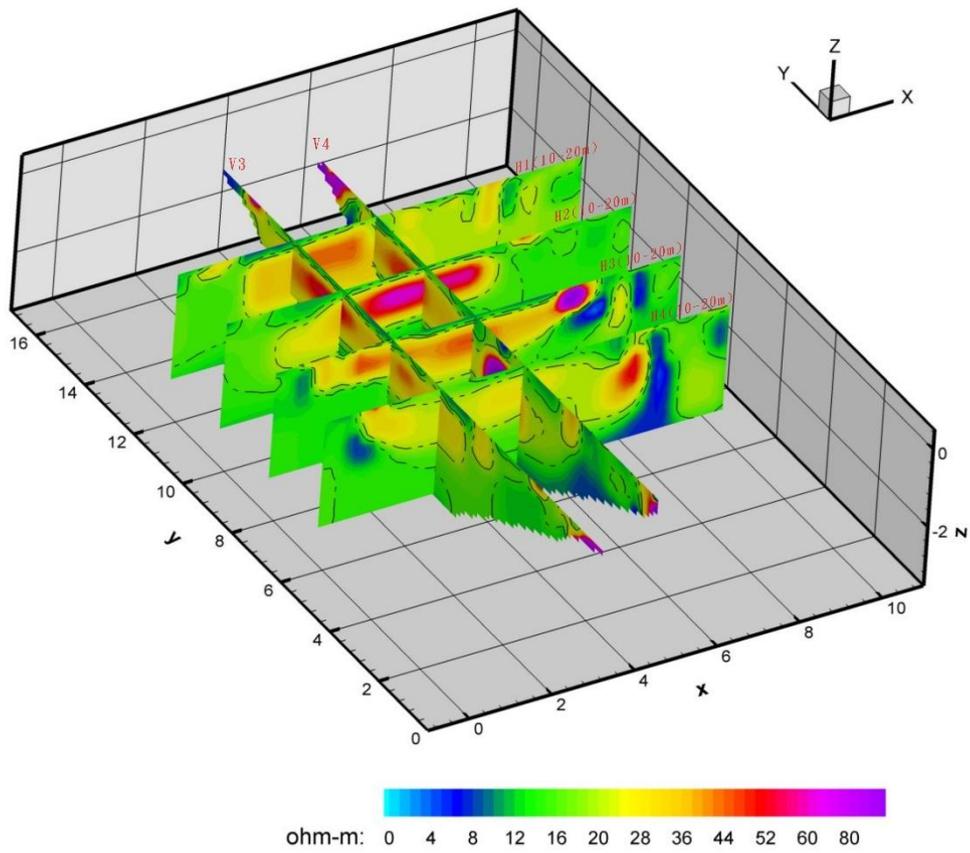
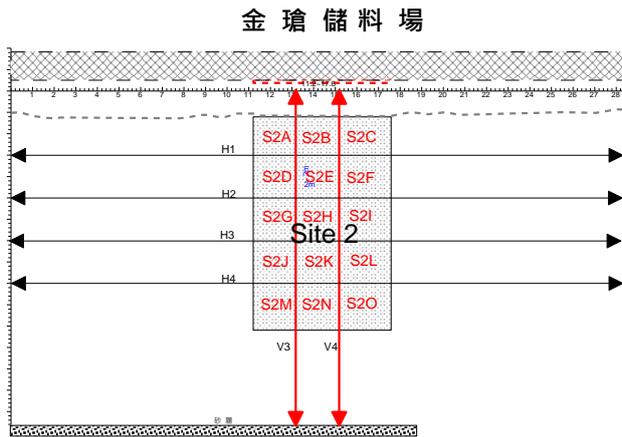


圖 5-2-27 Site2 各測線電性地層剖面柵狀立屏圖

金 瓊 儲 料 場

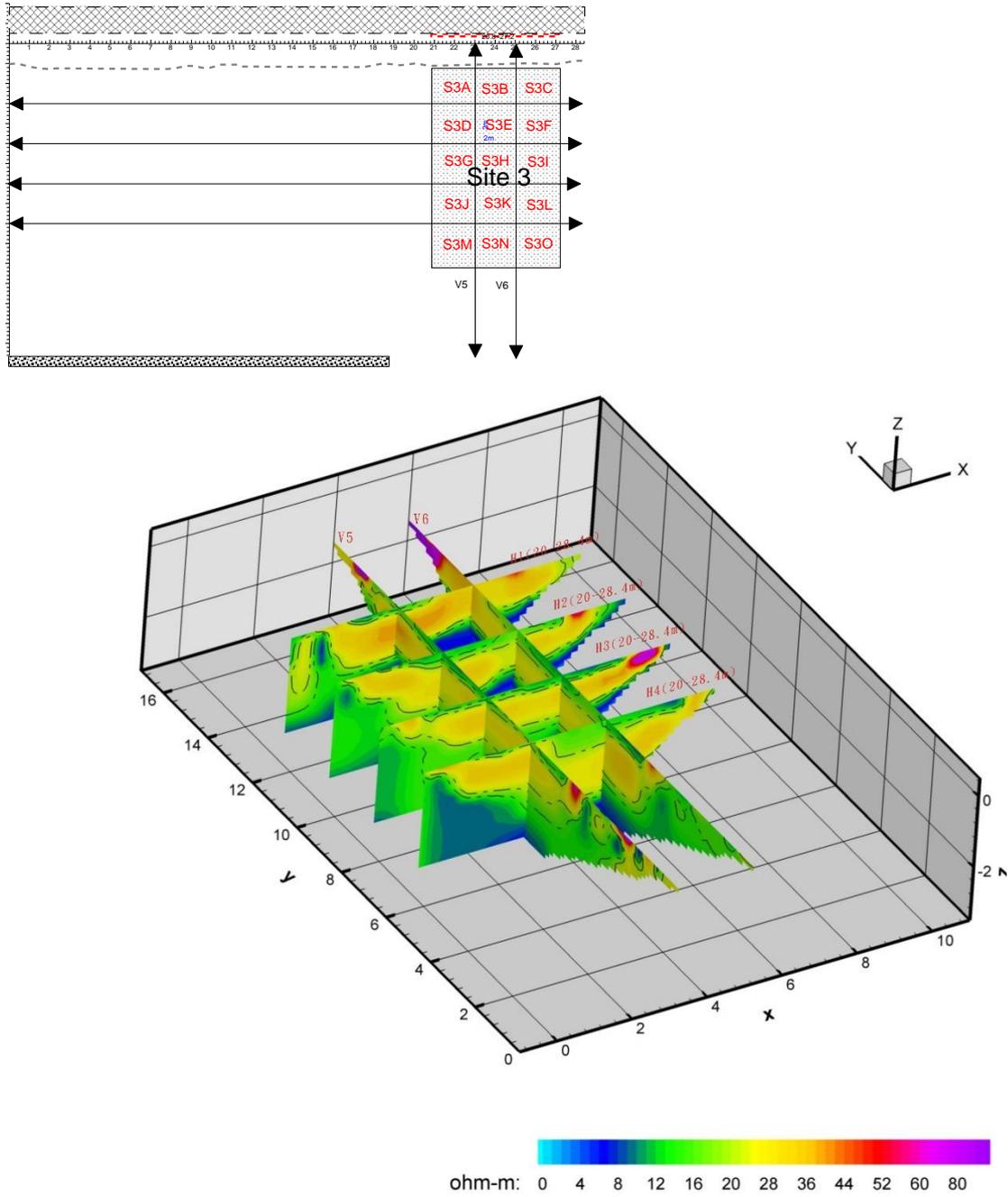


圖 5-2-28 Site3 各測線電性地層剖面柵狀立屏圖

### 5-3 現地鑽心取樣回填品質檢測

依據前述地球物理探測結果進行鑽心取樣，進一步確定現地排放灰塘之相關地層參數。由於煤灰塘經由水力排放回填後，其土層強度分佈經由前述地球物理探測方法檢測後，可大致了解其強度分佈情形。由檢測結果來看土層強度分佈呈現弧形分佈，本研究依據等分概念進行鑽心取樣。茲將取樣流程及其後續參數試驗說明如下：

#### 5-3-1 鑽心取樣

一般土層鑽探操作原則，係以地下水位面作為方法選擇之分際，地下水位面以上採用乾鑽法、地下水位面以下則採用水鑽法。但對於質地輕、透水性大且無凝聚性之煤灰，以及強度不一之回填材料(不同水泥含量)，上述操作原則仍應適度修正始能順利完成取樣工作，茲說明如下：

##### 一、 鑽探孔位放樣

由於本次試驗之配比共有 3 組，為避免鑽探孔位混淆，進行鑽探施工前應按圖 5-3-1 說明，進行放樣。同時，鑽心取樣深度以回填煤灰塘區之地表面向下 2 m，亦即樣體全長為 2 m。

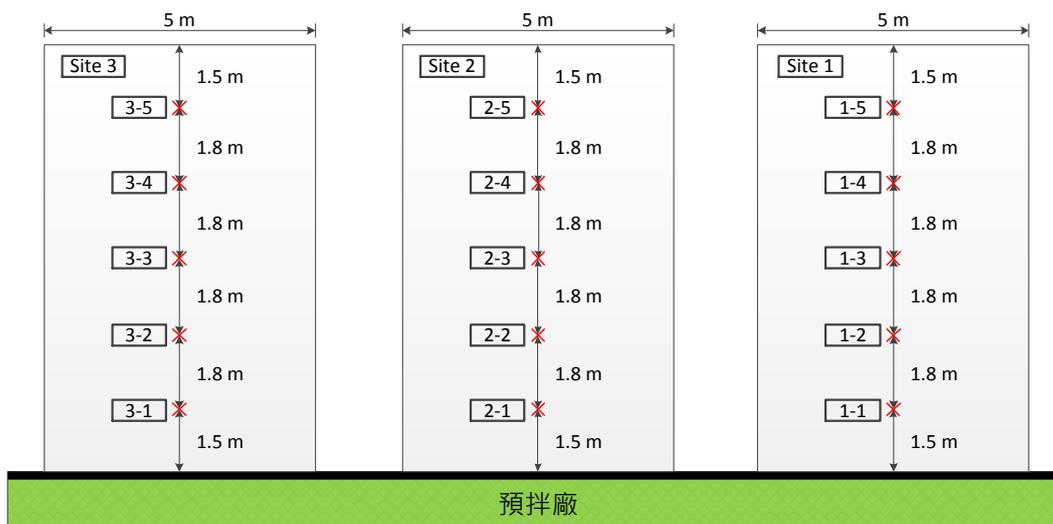


圖 5-3-1 鑽心取樣孔位示意圖

## 二、 取樣機器組件

本鑽探取樣工程之主要使用儀器包含有：(1) 鑽機(型號：KH-120)；(2) 水源設備(型號：WL-60)；(3) 鑽桿；(4) 取樣套管。圖 5-3-2 為鑽心取樣所使用之機具照片。



(a) 鑽心取樣鑽機



(b) 取水馬達



(c) 鑽桿



(d) 取樣套管

圖 5-3-2 現地鑽心取樣及 SPT 試驗機具照片

## 三、 施工步驟

1. 鑽機及鑽孔定位：可利用簡易水平儀進行鑽機及鑽桿之定位，以確保取樣套管能垂直貫入被取樣體內(圖 5-3-3)。



圖 5-3-3 鑽機及鑽孔定位

2. 岩心套管向下鑽掘取樣，鑽掘中注意水量之控制，尤以水泥含量低之改良體，容易受水沖洗而分離，值得注意。
3. 為增加原置煤灰和較低強度改良體之取樣工作性，可於取樣時注入超泥漿(用於不均勻改良體)或超泥漿及皂土混合液(用於煤灰地層)，以增加取出改良體之完整性(圖 3-6)。



圖 5-3-4 增加取樣土樣穩定性之超泥漿及皂土混合液

4. 鑽至固定深度取出岩心試體置於岩心箱中。



圖 5-3-5 試體及岩心箱照片

5. 重複步驟(2)~(4)，直至預定取樣深度。
6. 取樣完成後，取樣孔以固化材回填，移機至下一孔。

### 5-3-2 現地標準貫入試驗

標準貫入試驗之打擊數(SPT-N Value)除為地盤改良工程常用之驗收標準外，更可藉以得知回填試驗坑之貫入阻抗，判斷回填試驗坑之堅實程度，茲將其操作說明如下：

#### 一、 取樣器

取樣器尺度規格須符合 ASTM D1586(土壤貫入試驗和劈管取樣法)之規定。

#### 二、 試驗操作

本試驗係依 ASTM D1586(土壤貫入試驗和劈管取樣法)之規定辦理，應備有 65.3 kg (140 lb) 重錘，與打樁頭各一個及允許自由落下長 760 mm (30 in)之導引裝置一套，落錘時能量不可因導引裝置及錘間之摩擦而損失。貫入所用連接鑽桿，外徑為 41.2 mm，內徑為 28.5 mm 之鋼製鑽桿(A Rod)。以規定重錘用自由落高 760 mm 將取樣器貫入土層，紀錄每貫入 15 cm 之打擊次數，以第二及第三個貫入 15 cm 之打擊次數和作為貫入阻抗 N 值，若

打擊超過 100 下而貫入深度未達 45 cm 時，可停止試驗，此時應紀錄總打擊次數和總貫入深度，或以最後 30 cm 之相對打擊次數作為 N 值。試驗中，編號 1 之孔位 SPT 試驗深度為 0.50~0.95 m；編號 2 之孔位試驗深度為 1.10~1.55 m；編號 3 之孔位試驗深度為 1.55~2.00 m；編號 4 之孔位試驗深度為 0.65~1.10 m；編號 5 之孔位則進行全取樣。標準貫入試驗過程中取得之銅圈土樣(圖 5-3-6)將取回實驗室進行土壤試驗。



圖 5-3-6 SPT-N 劈管試驗取得之銅圈

### 5-3-3 鑽探及標準貫入試驗結果

本研究規劃在三處試驗坑分別進行深度 2 m 之鑽心取樣，每區 5 孔，共 15 個孔位和標準貫入試驗(SPT-N：12 孔)。三處試驗坑之鑽心樣體照片如圖 5-3-7~圖 5-3-9 所示，而圖 5-3-10~圖 5-3-12 則為三個試驗坑之開挖剖面照片，各孔位所得之 N 值如表 5-3-1 所示。茲將鑽心取樣、現地開挖及標準貫入試驗結果說明如下：

1. 經由試驗及現地開挖剖面觀察可將 3 處試驗坑之地層分層如下：

- (1) 地層 0.0 m~0.5 m：以底灰為主，水泥含量較高，敲擊時聲音回饋屬於敲中密實物體之音質，且回填材料不易掉落，顯示土層性質緊密且具有較佳之凝聚性。

(2) 地層 0.5 m~1.1 m(SPT-N 值介於 7~38 之間)：以底灰為主，水泥含量較之上層略低，敲擊時聲音回饋仍屬於敲中密實物體之音質，但會有局部回填材料掉落，顯示土層性質較鬆散且緊密度略差。

(3) 地層 1.1 m~2.0 m(SPT-N 值介於 2~8 之間)：以原始地層黏土為主夾雜少許粗顆粒底灰及水泥，黏性較高，但強度不佳。

2. 就三處試驗坑之 SPT-N 之結果可知，隨著配比中水泥量的增加(Site2> Site3> Site1)，試驗坑之 N 值也均隨之提升。
3. 就現地剖面觀察，Site1 明顯混合較不均勻，最上層屬於水泥堆積層，中間部分的水泥與底灰混合層效果也不佳。而在 Site2 及 Site3 中，明顯混合較為均勻，水泥堆積層僅只薄薄一層，中間水泥及底灰混合層也混合的較為均勻。其中，0.0 m~0.5 m 範圍內，因些微粒料析離狀況水泥含量略高外，底灰細顆粒大部分也凝聚於此一層面，但在 0.5 m~1.1 m 處，雖然可見回填層略為鬆散但由 SPT-N 值及現地敲擊後粒料不剝落情況可知應仍具有相當高之強度，說明粒料析離狀況在加入添加劑後有進一步改善。

表 5-3-1 三處試驗坑不同孔位及深度之 SPT-N 值

編號 孔號	Site 1 水泥 10%	Site 2 水泥 15%	Site 3 水泥 11.25%；飛灰 3.75%
1 (0.50~0.95 m)	7	28	18
2 (1.10~1.55 m)	3	6	5
3 (1.55~2.00 m)	2	8	4
4 (0.65~1.10 m)	14	38	27



孔位編號：1-5



孔位編號：1-4



孔位編號：1-3



孔位編號：1-2



孔位編號：1-1

圖 5-3-7 Site1 不同孔位鑽心樣體及其 SPT-N 值



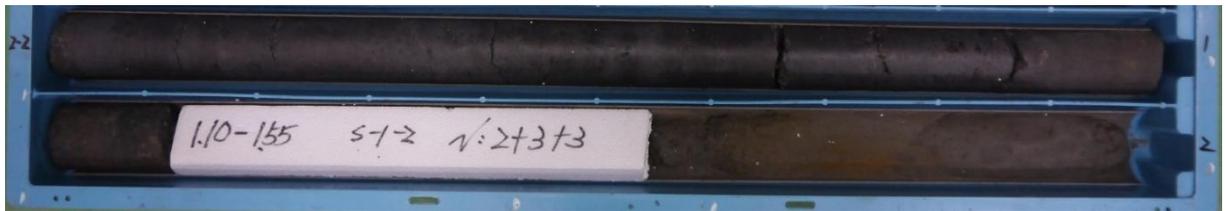
孔位編號：2-5



孔位編號：2-4



孔位編號：2-3



孔位編號：2-2



孔位編號：2-1

圖 5-3-8 Site2 不同孔位鑽心樣體及其 SPT-N 值



孔位編號：3-5



孔位編號：3-4



孔位編號：3-3



孔位編號：3-2



孔位編號：3-1

圖 5-3-9 Site3 不同孔位鑽心樣體及其 SPT-N 值

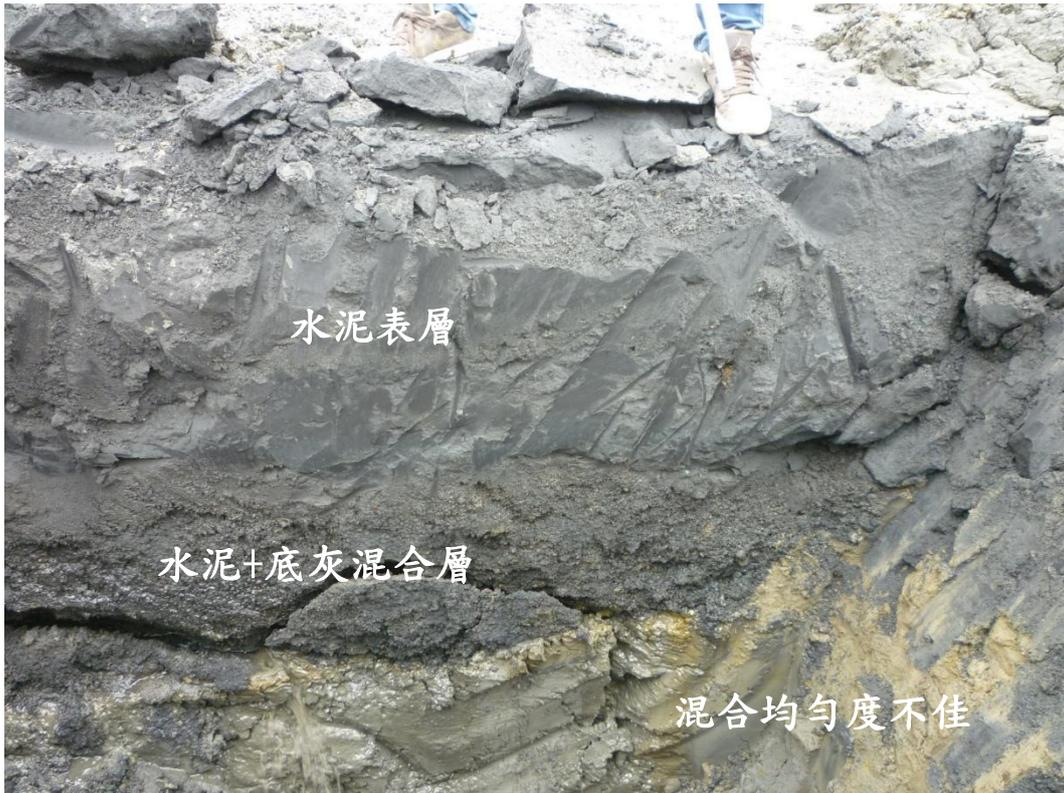


圖 5-3-10 Site1 開挖剖面

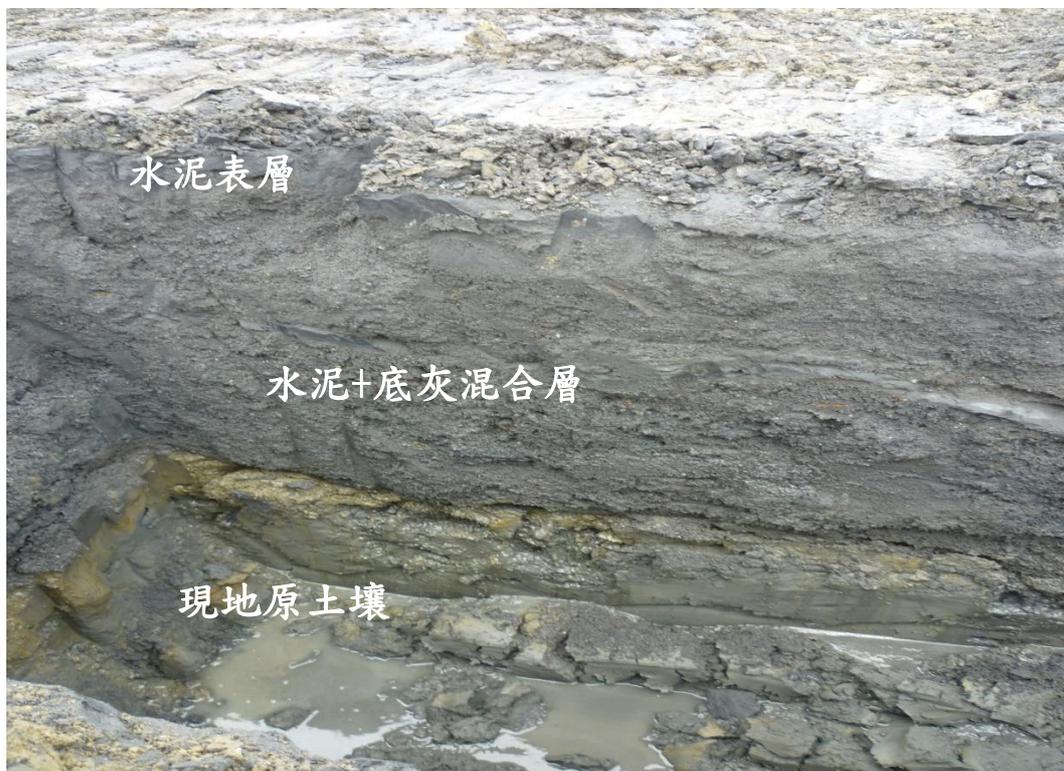


圖 5-3-11 Site2 開挖剖面

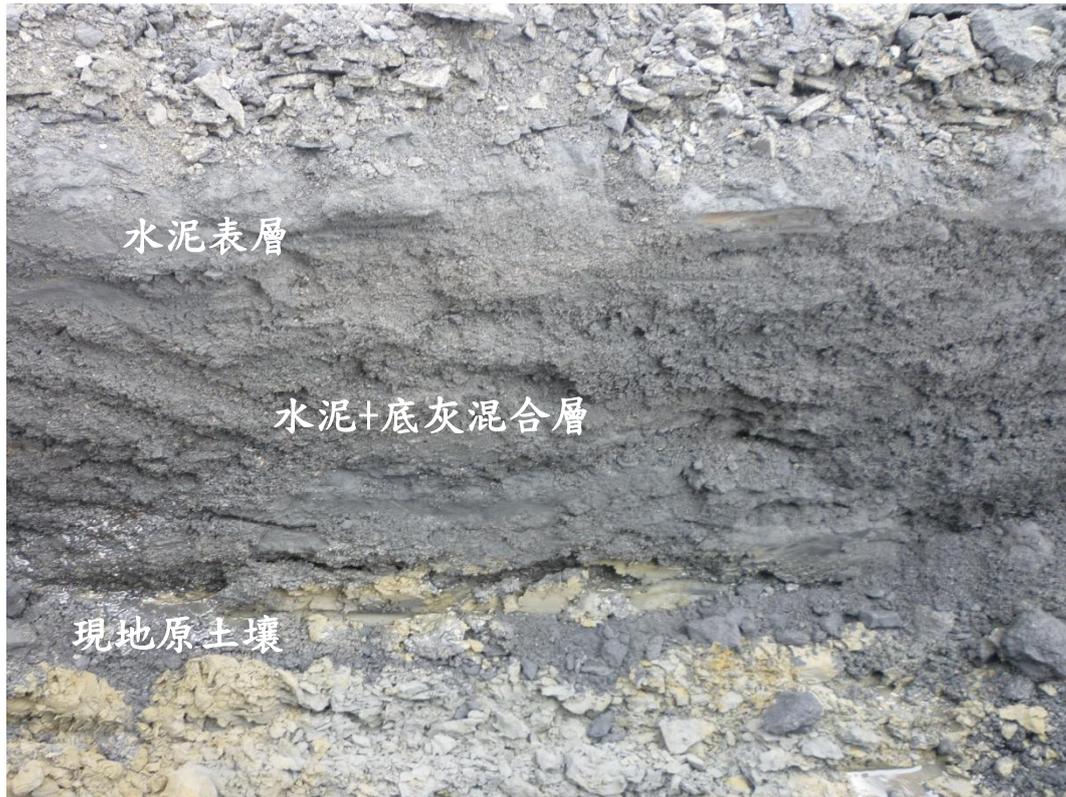


圖 5-3-12 Site3 開挖剖面

#### 5-3-4 鑽心樣體材料參數研究

在完成三大區域之鑽心試體取樣後，同一鑽心試體將分為上層、中層、下層共 3 組樣本，並將此 3 組樣本分別進行無圍壓縮及三軸壓密不排水試驗，相關規範及產出參數如表 5-3-2 所示。

表 5-3-2 回填材料力學性質試驗項目、依據規範與產出參數一覽表

試驗項目	規範依據	產出參數
土壤分類試驗	ASTM D2216-92 ASTM D2478-92 ASTM D854-92 ASTM D421-85 ; D422-63 ASTM D4318-84	含水比( $\omega$ )、比重( $G_s$ )、粒徑分佈
無圍壓縮試驗	ASTM D2166-91	單壓強度( $q_u$ )
三軸試驗(壓密不排水)	ASTM D4767-04	凝聚力( $c$ )、摩擦角( $\phi$ )、有效凝聚力( $c'$ )、有效摩擦角( $\phi'$ )

### 一、 土壤分類試驗

為瞭解土壤的物理指數性質(Index Properties)，土壤試體可經由下列各項試驗，以瞭解土壤之各種物理性質。相關試驗儀器、步驟及結果說明如下：

#### 1. 試驗儀器：

天秤、蒸發皿、電烘箱、比重瓶、標準篩一組(圖 5-3-13)、搖篩機(圖 5-3-14)、平光玻璃板、含水比試驗儀器、酒精燈、三腳鐵架、石棉板、燒杯。



圖 5-3-13 篩網組照片



圖 5-3-14 搖篩機照片

## 2. 試驗步驟：

- (1) 含水量(Moisture Content)：濕土樣放於已知重量之皿中(圖 5-3-15)，經稱重後置於 105°C 烘箱中烘烤二十四小時，再取出稱乾土樣及皿重，經計算得含水量。



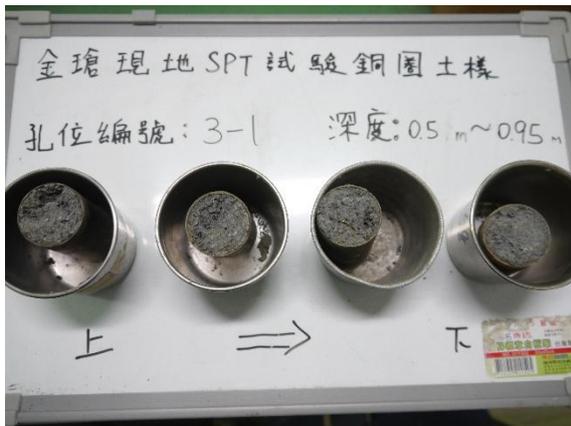


圖 5-3-15 Site1~Site3 銅圈土樣照片

- (2) 比重(Specific Gravity)：取完全烘乾土樣，磨碎後裝入二個 50cc 之比重瓶內( 每個瓶內的土樣重量約 15gm )稱其總重，並於加水後以煮沸方式趕出土體孔隙內之空氣。將比重瓶置於恆溫水槽中 4 小時以上，稱(瓶+土+水) 重，再配合(瓶+水)重量經計算求得土壤比重。

(3) 顆粒分析(Grain Size Analysis)：顆粒大小分佈曲線是由比重計分析與篩分析試驗而得。倒入 200 號篩網內洗去小於 200 號篩之土壤顆粒，經烘乾後進行篩分析試驗，並以其試驗結果繪製粒徑分佈曲線圖，烘乾土樣如圖 5-3-16~圖 5-3-18。



圖 5-3-16 Site1 烘乾後土樣照片



圖 5-3-17 Site2 烘乾後土樣照片



圖 5-3-18 Site3 烘乾後土樣照片

- (4) 阿太堡限度( Atterberg Limits )：測定阿太保限之土樣採用未經烘烤之土樣。液限試驗採用單點法，取打擊數  $N=23\sim 28$  間之含水量，經修正為  $N=25$  之含水量，即為此土壤之液性限度。塑限試驗為利用手將土樣於毛玻璃板上搓揉，當其直徑約為  $1/8$ " 左右恰好斷裂成數段，此時土壤之含水量即為其塑性限度。塑性指數(PI)=液性限度(LL)-塑性限度(PL)。
- (5) 孔隙比( Void Ratio )及當地密度( Bulk Density )：當地密度是由量測試樣之體積及重量求得，孔隙比則由當地密度、含水量及比重數據計算而得。
- (6) 土壤分類( Soil Classification )：土壤分類係依美國材料試驗學會標準之統一分類法辦理。

### 3. 試驗結果：

- (1) 含水量試驗結果如表 5-3-3 所示，由表中可以看出不論哪一處試驗坑，沿深度的含水量都相當平均，其中 Site1 含水量平均值為 39.92%、Site2 含水量平均值為 38.47%、Site3 含水量平均值為 48.52%。

- (2) 單位重試驗結果如表 5-3-3 所示，其中 Site1 之平均單位重為  $1.67 \text{ g/cm}^3$ ，Site2 平均 20 單位重為  $1.75 \text{ g/cm}^3$ ，Site3 平均單位重為  $1.65 \text{ g/cm}^3$ ，由於 Site1 以及 Site3 水泥含量差異不大，固其單位重比較相近。
- (3) 比重試驗結果如表 5-3-3 所示，表中結果顯示不論哪一處試驗坑，土層比重均約在 2.1~2.7 之間，其中 Site1 之平均比重為 2.4，Site2 平均比重為 2.48，Site3 平均比重為 2.31。三者比重差異不大，主要原因是配比中之水泥用量差異甚小。
- (4) 粒徑分析結果如圖 5-3-19~圖 5-3-21 所示，由粒徑分佈曲線可知 Site1~Site3 之粒徑分佈很相近，屬於優良級配範圍，顯示底灰粒徑分佈範圍較廣，若要進一步做為除了回填外之工程材料使用，則需進一步進行級配分類。
- (5) 藉由土壤分類及阿太堡限度試驗可以將 3 區試驗坑之土質分類如下：
- (a) Site 1：通過#200 號篩 $<50\%$ ，粗骨材部分通過#4 號篩 $>50\%$ ，砂通過#200 號篩 $>12\%$ ，再藉由阿太堡限度試驗可得  $LL=23$ ， $PL=0$ ，依據統一土壤分類法可將試體分類為 SM。
  - (b) Site 2：通過#200 號篩 $<50\%$ ，粗骨材部分通過#4 號篩 $>50\%$ ，砂通過#200 號篩 $>12\%$ ，再藉由阿太堡限度試驗可得  $LL=23$ ， $PL=0$ ，依據統一土壤分類法可將試體分類為 SM。
  - (c) Site 3：通過#200 號篩 $<50\%$ ，粗骨材部分通過#4 號篩 $>50\%$ ，砂通過#200 號篩 $>12\%$ ，再藉由阿太堡限度試驗可得  $LL=23$ ， $PL=0$ ，依據統一土壤分類法可將試體分類為 SM。

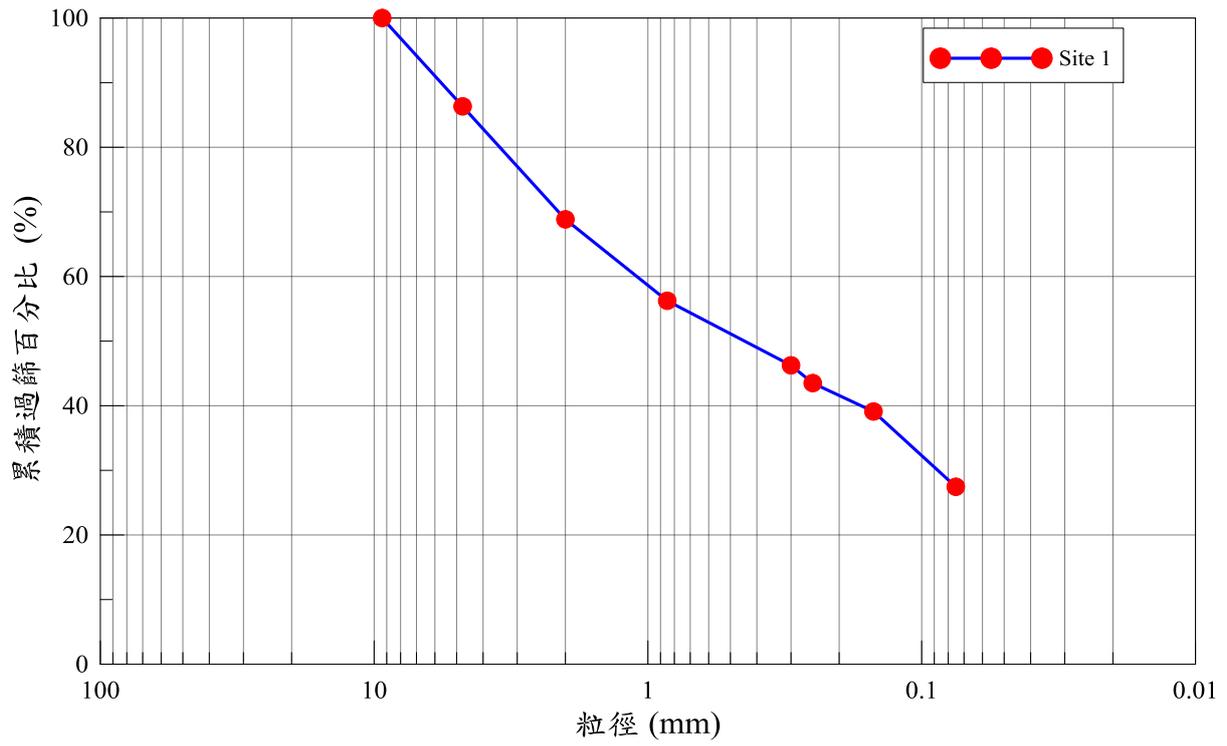


圖 5-3-19 Site1 粒徑分佈曲線

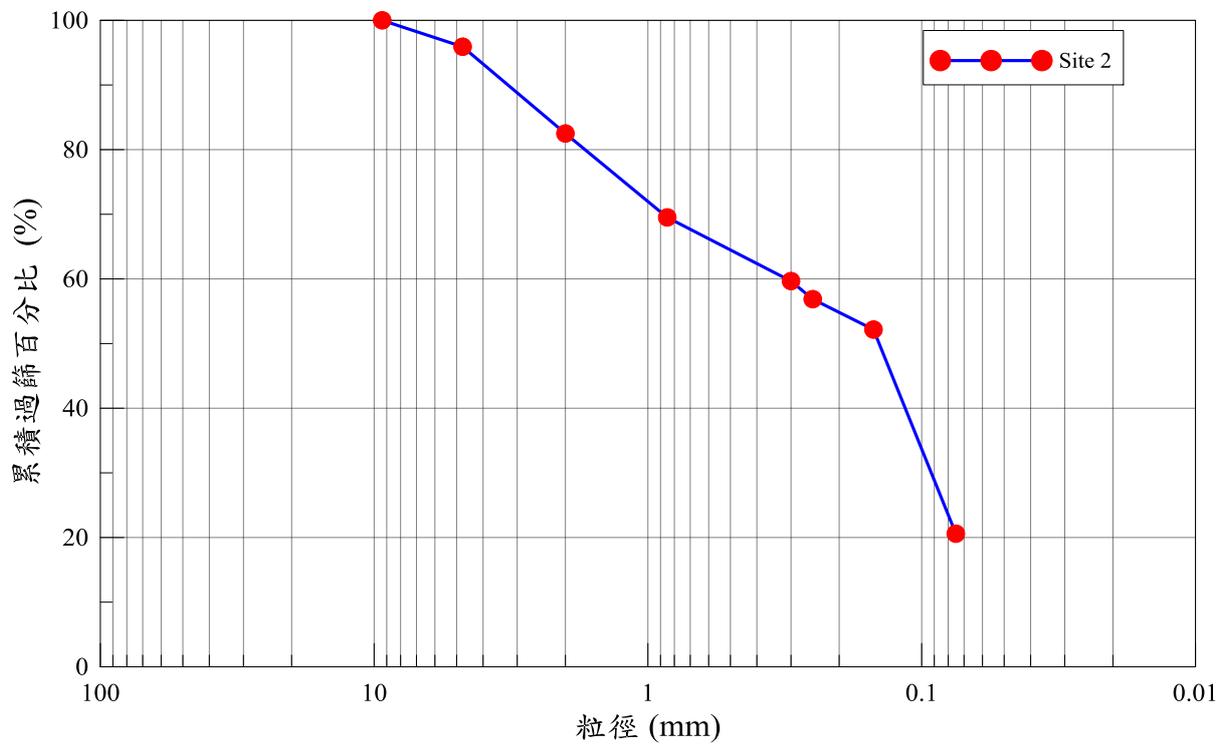


圖 5-3-20 Site2 粒徑分佈曲線

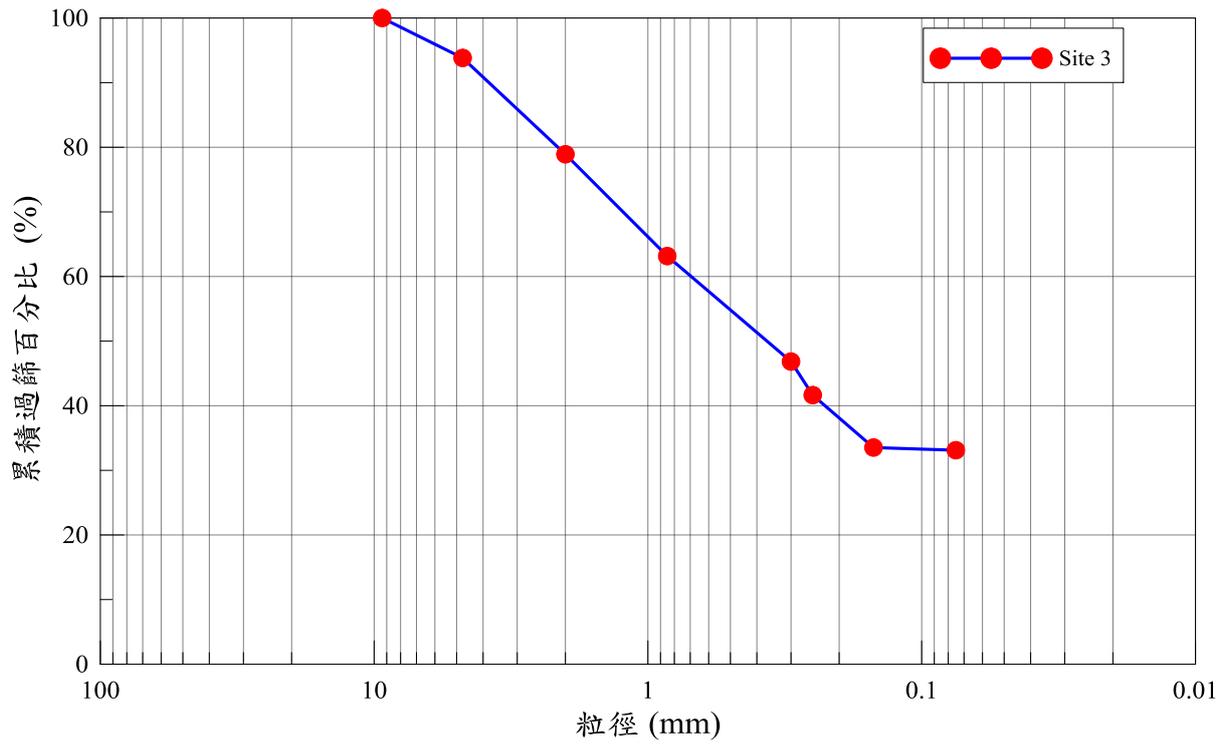


圖 5-3-21 Site3 粒徑分佈曲線

表 5-3-3 土壤試驗參數結果一覽表

	孔號 N 值 深度	號碼	代號	含水量(%)	濕單位重(g/cm <sup>3</sup> )	比重
第一區	1-1 2-4-3 0.5m~0.95m	S-1-1-1	a	26.98	1.57	2.211
		S-1-1-2	b	33.54	1.57	2.317
		S-1-1-3	c	48.61	1.54	2.346
	1-2 2-2-1 1.1m~1.55m	S-1-2-1	d	42.98	1.24	2.270
		S-1-2-2	e	29.67	1.94	2.546
	1-3 2-4-3 1.55m~2.0m	S-1-3-1	f	28.11	1.99	2.683
		S-1-3-2	g	29.56	1.89	2.671
		S-1-3-3	h	32.34	1.91	2.683
	1-4 11+12+2 0.65m~1.1	S-1-4-1	i	63.78	1.49	2.213
		S-1-4-2	j	57.86	1.59	2.176
		S-1-4-3	k	45.75	1.60	2.273

	孔號 N 值 深度	號碼	代號	含水量(%)	濕單位重(g/cm <sup>3</sup> )	比重	
第二區	2-1 8-12-16 0.5m~0.95m	S-2-2-1	l	36.00	1.71	2.367	
		S-2-2-2	m	35.84	1.69	2.369	
	2-2 2-3-3 1.1m~1.55m	S-2-2-1	n	32.09	1.77	2.717	
		S-2-2-2	o	77.12	1.50	2.436	
	2-3 2-3-5 1.55m~2.0m	S-2-3-1	p	28.44	1.94	2.747	
		S-2-3-2	q	29.67	1.94	2.752	
		S-2-3-3	r	29.81	1.94	2.673	
	2-4 18-19-19 0.65m~1.1m	S-2-4-1	s	39.53	1.72	2.287	
		S-2-4-2	t	36.69	1.66	2.273	
		S-2-4-3	u	39.51	1.62	2.224	
	第三區	3-1 10-9-9 0.5m~0.95m	S-3-1-1	v	45.70	1.58	2.182
			S-3-1-2	w	46.48	1.49	2.219
S-3-1-3			x	42.13	1.63	2.248	
S-3-1-4			y	55.54	1.63	2.160	
3-2 2-2-3 1.1m~1.55m		S-3-2-1	z	30.14	1.82	2.555	
		S-3-2-2	aa	28.18	1.89	2.692	
3-3 3-2-2 1.55m~2.0m		S-3-3-1	ab	28.94	1.98	2.683	
		S-3-3-2	ac	28.71	1.90	2.688	
		S-3-3-3	ad	29.83	1.86	2.688	
3-4 8-12-15 0.65m~1.1m		S-3-4-1	ae	57.74	1.51	2.181	
		S-3-4-2	af	61.55	1.47	2.187	
		S-3-4-3	ag	78.34	1.32	2.110	
		S-3-4-4	ah	68.62	1.49	2.174	
		S-3-4-5	ai	77.37	1.47	1.582	

## 二、 無圍壓縮試驗

利用無圍壓縮試驗儀量測具凝聚力之細粒土壤於無旁束圍壓作用下之極限抗壓強度值( $q_u$ )。相關試驗儀器、步驟及結果說明如下：

### 1. 試驗儀器：

無圍壓縮試驗儀(圖 5-3-22)、刮刀、鐵錘、木樁、鏟子、蓋平石膏、游標尺、計時器、測微錶等。



圖 5-3-22 無圍壓縮試驗儀

2. 試驗步驟：

- (1) 將各鑽探孔取樣體取出，按每孔之上層、中層和下層選取良好改良體，並以切割機進行抗壓試體切割，試體照片如圖 5-3-23。



Site1 單壓試體



Site2 單壓試體



Site3 單壓試體

圖 5-3-23 Site1~3 單壓試體照片(左至右分別為上中下)

- (2) 將切割所得試體放置於保鮮袋或養護池內養護，待試驗時將試體表



### 3. 試驗結果：

- (1) 由表 5-3-4 可知，水力回填三處試驗坑之上、中、下層鑽心樣體之抗壓強度，由列表可知試驗坑在經過 125 天的齡期之後，強度均在  $7 \text{ kg/cm}^2$  以上，符合本次試驗需求。
- (2) 因室內無圍壓縮試驗之抗壓試體的選擇，皆以良好改良體為優先考量，故所得結果應較現場實際情況保守。
- (3) Site 1 之下層強度較高的原因可能是因採取樣體時，該樣體水泥含量較高所致。
- (4) 由 3 處試驗坑之上層強度來看，隨著配比中水泥量增加，強度確實也隨之提高。
- (5) 就本次試驗結果來看，Site 2 之強度過高，對於後續若有需要進行基礎打設，反而會造成施工上的困難。顯示配比中之水泥量不需到達 15%。
- (6) 由試驗坑之單壓強度及現地 SPT 試驗結果可知，試驗坑強度分佈規則為上>中>下，主要還是因為粒料析離所導致。雖然在試驗過程中已嘗試加入添加劑用以降低粒料析離發生的情形，但藥劑本身僅能大幅度改善析離狀況，並無法完全使析離不會發生。因此，上層之水泥含量依然是最高，隨著深度加深逐步遞減，相對地強度也就較中層及下層大。

表 5-3-4 水力回填鑽心取樣試體無圍壓縮強度一覽表

試驗坑	深度	無圍壓縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	齡期 (天)
Site 1	上層 (0.0~0.4 m)	17.78	125
	中層 (0.4~0.8 m)	14.44	125
	下層 (0.8~1.2 m)	13.72	125
Site 2	上層 (0.0~0.4 m)	35.65	125
	中層 (0.4~0.8 m)	14.80	125
	下層 (0.8~1.2 m)	8.39	125
Site 3	上層 (0.0~0.4 m)	24.37	125
	中層 (0.4~0.8 m)	7.58	125
	下層 (0.8~1.2 m)	8.12	125

### 三、 三軸試驗(壓密不排水)

利用三軸試驗設備，求得土壤於飽和壓密不排水狀態下，承受不同圍壓時反映出之最大應力及對應超額孔隙水壓。利用此最大應力配合超額孔隙水壓及相對應圍壓大小繪出各階段總應力莫爾圓、有效應力莫爾圓及其破壞包絡線，並藉以求得其強度參數  $C$ 、 $\phi$  及  $C'$ 、 $\phi'$  值。

#### 1. 試驗儀器：

無圍壓縮試驗儀(圖 5-3-22)、三軸室及其壓力控制系統(圖 5-3-27)、資料量測系統 1 組、土樣修整設備等。



圖 5-3-27 三軸室及壓力控制系統照片

2. 試驗步驟：

- (1) 將各鑽探孔取樣體取出，按每孔之上層、中層和下層選取良好改良體，並以切割機進行抗壓試體切割，試體照片如圖 5-3 22。



Site1 三軸試體



Site2 三軸試體



Site3 三軸試體

圖 5-3-28 Site1~3 三軸試體照片(左至右分別為上中下)

- (2) 將試體加裝上、下濾紙及透水石，並於外部套以不透水橡皮膜後，裝設於三軸室中央底座上，並使用 O 形橡膠環將橡皮膜與上下封閉於上下承座。
- (3) 將清水由室壓閥門注入三軸室中，同時將空氣由上方排氣閥排出至清水完全充滿三軸室止。
- (4) 將準備好之三軸室裝設於三軸抗壓主機上，並把上下排水閥及室壓

閘門聯接至三軸壓力系統上。

- (5) 將圍壓及反水壓分上、中、下三階段分別加至 3、4、5 kg/cm<sup>2</sup> 以及 2.95、3.95、4.95 kg/cm<sup>2</sup> 令試體進行飽和，飽和時間至少 12 小時以上或進行 B-Check 飽和度達 95% 以上為止。
- (6) 關閉上下排水閘後，啟動三軸抗壓機，採用約 1 mm/min 之加壓速率使試體承受軸向應力。
- (7) 利用訊號量測系統自動擷取並記錄試體軸向變形量及軸向荷重值，至軸向應力下降或軸向應變達 15% 為止。

### 3. 試驗結果：

- (1) 由三軸壓密不排水試驗後可得 3 處試驗坑之總摩擦角( $\phi$ )、有效摩擦角( $\phi'$ )、總凝聚力( $c$ )、有效凝聚力( $c'$ )，如表 5-3-5 所示。
- (2) 由表中之結果可以看出 3 處試驗坑之摩擦角、有效摩擦角均相差不大，而在凝聚力部分則以第二試驗坑明顯較大，此乃是因為試驗坑 2 之水量含量較高所致。

表 5-3-5 三軸壓密不排水試驗獲取參數一覽表

Site \ 參數	總摩擦角 (度)	總凝聚力 (kg/cm <sup>2</sup> )	有效摩擦角 (度)	有效凝聚力 (kg/cm <sup>2</sup> )
1	72	1.07	66	0.77
2	55	2.64	54	2.6
3	50	0.78	50	0.54

## 5-4 數值模型分析探討

前述非破壞性檢測、鑽心取樣以及現地開挖檢視都可以發現現地回填結果呈層狀構造，而未來煤灰塘之回填也並非持續排灰至灰塘填滿，而是採用階段性回填，因此未來灰塘回填後層狀結構會更加明顯。基於此一現況，本研究採用 FLAC 3D 有限差分數值分析軟體進行層狀結構之分析，以確認層狀結構是否可以抵抗液化之發生。本次數值模擬探討乃依據台電公司前期報告「煤灰塘格狀改良地層之抗液化能力分析」成果進行後續分析。本次分析之數值模型設定為  $30 \times 30 \times 20$  m，網格尺寸大小為  $3 \times 3 \times 1$  m。本次分析主要分為兩個部分：

1. 自由場分析：設定台中灰塘之土層參數，模擬未進行改良前之土層液化分析。
2. 層狀結構分析：將液化層設定為層狀結構(硬層、軟層、硬層)，模擬進行改良後之土層液化分析。

首先進行非層狀結構之自由場分析，將土層依據台電前期研究報告依據現地 SPT 試驗將土層分為 3 層，分別為水位上回填煤灰(0~4m)、水位下回填煤灰(-4~-11m)及灰色粉質細砂(-11~-20m)，各土層物性參數列表如表 5-4-1 所示。圖 5-4-1 為自由場網格分割圖，圖 5-4-2 為土層液化分析剖面，由剖面圖中可以看出在水位下之煤灰層深度約為-4.5~-6 m 左右，其超額孔隙水壓比均大於 0.9，說明該深度之土層已發生液化，液化層厚度約為 1.5m。接著，將水位下回填煤灰(厚度 7m)設定為層狀結構如圖 5-4-3 所示，將水位下之煤灰層分為 7 層，每層厚度為 1 m，由上而下依序為硬層、軟層、硬層、軟層、硬層、軟層、硬層。其中硬層設定為將楊氏模數提高為 6000 kPa 進行分析，而軟層則同樣設定為 3000 kPa。圖 5-4-4 為層狀結構液化分析結果，由圖中結果可以看出，在層狀結構型式下，超額孔隙水壓比均在 0.9 已下，表示液化情況並未發生。由此分析結果比較可知，回填時若形成層狀結構，對於抗液化實有正面效益。

表 5-4-1 各土層物性參數

分層 物性	水位上回 填煤灰 (0~4 m)	水位下回 填煤灰 (4~11 m)	灰色粉質 細砂 (11~20 m)	資料來源
單位重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	14	15	19	台中發電廠一期灰塘第二階段地質改良(改良前)鑽探報告書
孔隙率 n	0.55	0.60	0.45	台中發電廠一期灰塘第二階段地質改良(改良前)鑽探報告書
滲透係數 k (m/sec)	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-6}$	煤灰現地攪拌改良後之材料大地工程性質探討研究論文
楊氏模數 E (kPa)	3600	3000	6300	台中發電廠一期灰塘第二階段地質改良(改良前)鑽探報告書
柏松比 v	0.3	0.3	0.3	粉土質砂土之柏松比
凝聚力 c (kN/m <sup>2</sup> )	0	0	0	煤灰現地攪拌改良後之材料大地工程性質探討研究論文
內摩擦角 $\phi$ (°)	30	32	35	煤灰現地攪拌改良後之材料大地工程性質探討研究論文
Finn 係數 C <sub>1</sub>	0.92	1.53	0.29	Finn 動孔壓模型
Finn 係數 C <sub>2</sub>	0.43	0.26	1.38	Finn 動孔壓模型

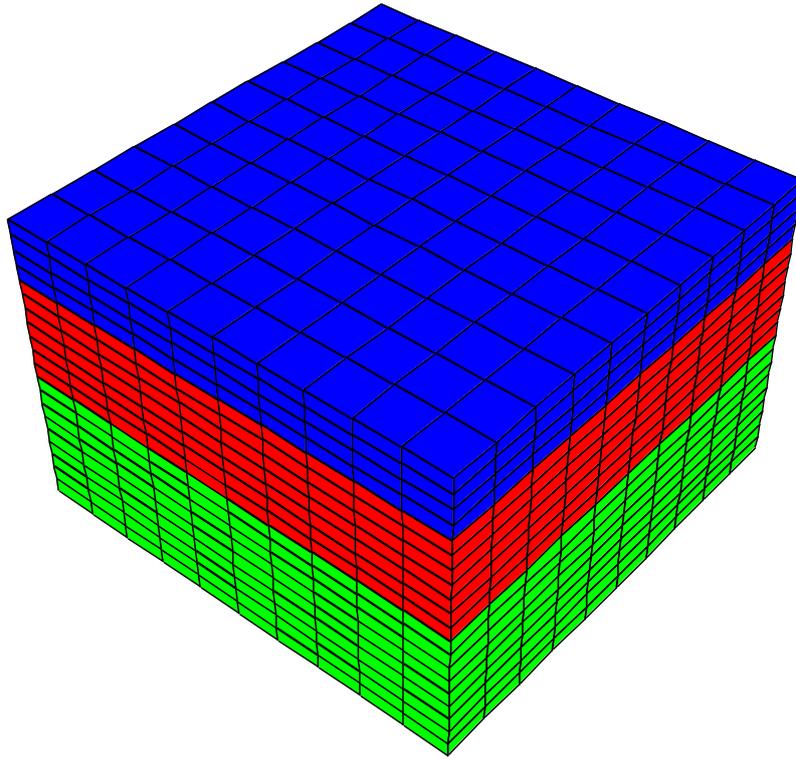


圖 5-4-1 自由場網格模型圖

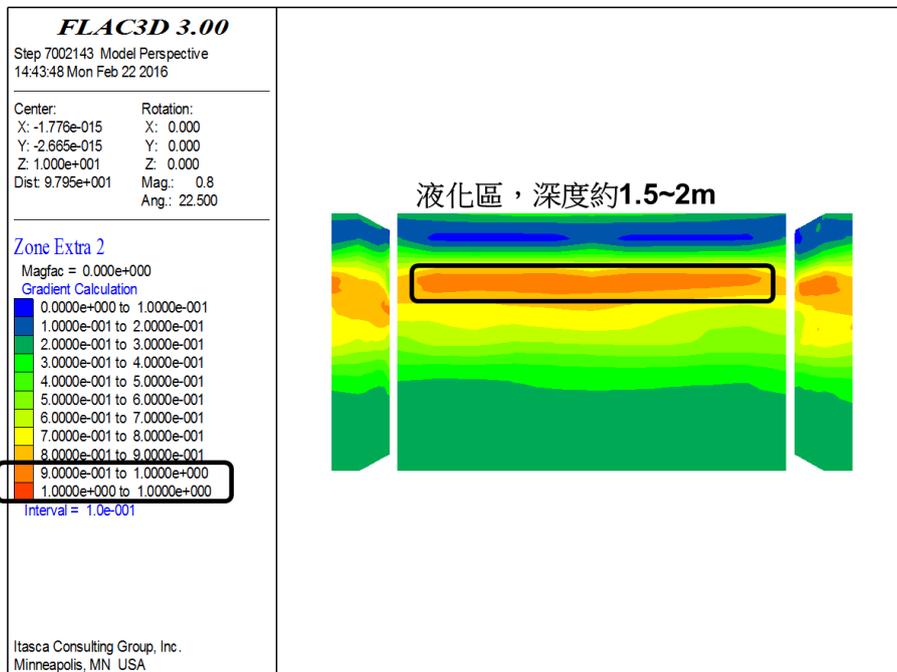


圖 5-4-2 自由場液化分析結果

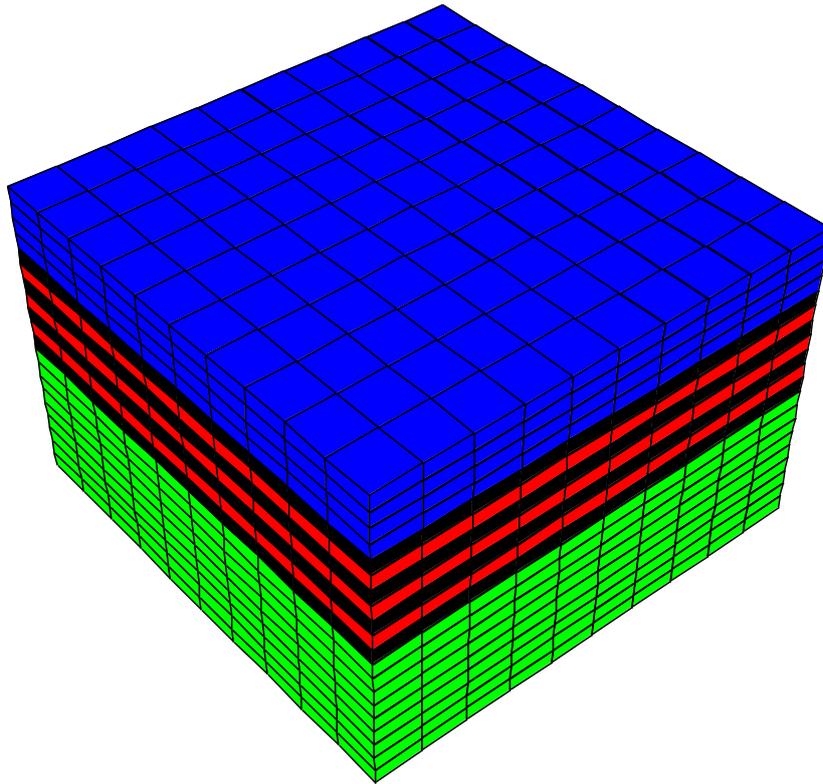


圖 5-4-3 層狀結構網格模型圖

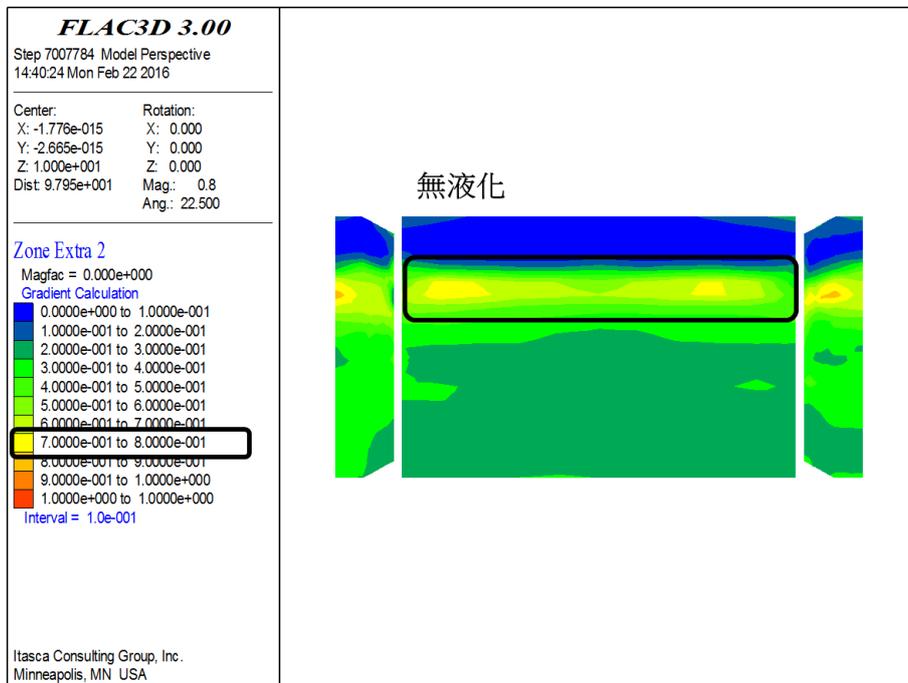


圖 5-4-4 層狀結構液化分析結果

## 5-5 工法比較與評估

最後，本研究以曾經使用過之煤灰塘改良工法進行成效與適用性比較如表 5-5-1 及表 5-5-2 所示。由表 5-5-1 中之比較可以得知，目前較為常使用之擠壓砂樁若採用間距 1.2m，其費用約為 430 元/m<sup>3</sup>，但此費用會隨著砂料價格波動有所改變。而 WILL 工法若採用改良率 50% 進行改良，則其費用約為 750 元/m<sup>3</sup>。同樣改良率 50%，SMW 則略貴約為 1000 元/m<sup>3</sup>。而一次性地改，其施作工序為利用現有排放管線加入水泥固化材及添加劑進行水力排放，屬於全面性改良，單純就材料費而言，則為 280 元/m<sup>3</sup>。以目前台中一期灰塘約 78 公頃，深度 6~14m 為例(以 10m 計算)，若採用目前價格最低之改良工法擠壓砂樁施作，每公頃價格約 6 千萬元，78 公頃共約 46 億 8 千萬元。而若改採一次性地改其費用僅約 21 億 8 千萬元，加上末端排放管線設計配置及每年維修費用，將上述費用乘上 1.2 作為最後整體工程費用約 26 億 2 千萬元，整體工程費用可節省約 20 億元左右。此評估結果顯示工程費用確實獲得大幅度地降低，且當灰塘回填完畢後，亦代表地層同時完成改良，亦省去後續改良工程的所需花費之時程。

由於現有地盤改良工法均有改良深度之限制，未來若灰塘縱深超過現有地改技術限制，則縱深較大處的地質改良將是一大難題，且目前灰塘地均是整建在靠海處，大半灰塘空間均處在水位面之下，大深度加上高水位之回填灰塘地質條件，需要花更多的工程費用才可完成改良。本研究所開發之一次性地改工法除了提高灰塘承載能力之外，由於在水力排放過程中便已同步進行改良，除了節省灰塘構築完成後續的鉅額改良費用外，此法在改良深度上便不受限制。未來若能詳細設計規劃排灰機制，可使整體排灰工程品質更上一層樓。本研究研發之一次性地改工法主要是應用於水中回填，對於水位面下之回填區域實具有其實用性。除可應用於水面下排放之外，由於電廠回填時並非一直排放，而是採用階段性排放，此舉造成灰塘形成層層結構，依據前述數值模擬之分析結果，可知其對於抵抗土層液化具有正面的助益。

表 5-5-1 煤灰地層改良工法之成效評估表

工法 評估項目	擠壓砂樁	WILL 工法	SMW 工法	一次性地改
工法原理	砂料填充與振動擠壓	搖動攪拌	搖動攪拌	水力攪拌
使用材料	砂、煤灰	煤灰、固化材	煤灰、固化材	煤灰、固化材
改良深度	20~35 公尺	10 公尺	3~30 公尺	任意
施工功率	215 m <sup>3</sup> /日 (單機)	250 m <sup>3</sup> /日 (單機)	220 m <sup>3</sup> /日 (單機)	600 m <sup>3</sup> /日 (單管，管徑 12.5 cm)
施工費用	430 元/m <sup>3</sup> (樁距 1.2m)	750 元/m <sup>3</sup> (改良率 50%)	1000 元/m <sup>3</sup> (改良率 50%)	280 元/m <sup>3</sup> (水泥+添加劑)
施工功效	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增加煤灰承載力</li> <li>2. 減少煤灰孔隙比</li> <li>3. 提供地震時超孔隙水壓消漲路徑</li> <li>4. 具加勁減震功能</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增加煤灰承載力</li> <li>2. 提升地層強度和降低地下水之滲透性</li> <li>3. 減少強地動下改良體變形量</li> <li>4. 提供側向力並防止地震液化之發生</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增加煤灰承載力</li> <li>2. 提升地層強度和降低地下水之滲透性</li> <li>3. 減少強地動下改良體變形量</li> <li>4. 提供側向力並防止地震液化之發生</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增加煤灰承載力</li> <li>2. 提升地層強度和降低地下水之滲透性</li> <li>3. 提供側向力並防止地震液化之發生</li> <li>4. 層層回填，層狀結構不易液化</li> </ol>
成本效益	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 表層煤灰似無改良，中、下層則受砂料高度置換影響，工程性質有相當程度之改善</li> <li>2. 對環境有一定影響，如噪音、落塵等</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改良成效較為良好</li> <li>2. 改良深度範圍較窄</li> <li>3. 儀控系統為自動系統，改良品質較能完整掌控</li> <li>4. 機具需自國外引進，若改良面積大，需考量其拖運時間</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 機具為國內較常使用，若改良面積大，規劃較方便</li> <li>2. 改良深度範圍較廣</li> <li>3. 改良之均勻性不佳</li> <li>4. 儀控系統為半自動系統，其改良品質掌控不易控制</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改良成效佳</li> <li>2. 回填煤灰時同步進行改良，省下後續改良費用</li> <li>3. 改良深度沒有限制</li> <li>4. 排放系統需詳細規劃</li> </ol>

表 5-5-2 煤灰地層改良工法之適用性比較

工法 評估項目	擠壓砂樁	WILL 工法	SMW 工法	一次性地改
工法原理	○	○	○	○
使用材料	×	○	○	○
改良深度	○	△	○	○
施工機具	×	○	○	○
施工管理	△	○	△	△
施工成效	△	○	△	○
環境影響	×	○	○	○
灰塘體積變化	×	○	○	△
改良品質	△	○	△	○
備註： ○：理想    △：尚可    ×：不理想				

## 第六章 結論

本研究旨在針對煤灰低強度材料運用於填地工程之可行性進行探討。在過往台電公司針對煤灰塘的處理方針，皆是先回填後，再進行地盤改良，以使地層達到可使用強度或是還地標準，此一工序除需進行兩個步驟外，後續改良費用也相當可觀。因此，本研究探討在水力回填期間同步進行改良之可行性。在研究過程中，可將研究分為 3 大階段：1.室內煤灰低強度回填材料配比設計；2.小型水工模型試驗；3.現地小規模回填試驗。試驗及研究成果詳細說明如下：

### 6-1 室內煤灰低強度回填材料配比設計

在第一階段中，初步藉由灌注小型圓柱試體來檢驗純水泥加底灰、各種類添加劑、不同固化材以及養護齡期之灌注試體特性以及適用性。經由一系列試驗找出最佳之添加劑以及配比。綜合第一階段試驗之成果可整理如下：

1. 單純水泥加底灰低強度回填材料，經過試驗後，可知其在水中沉降會因粒料本身粒徑大小不同而產生粒料分離以及析離狀況，依據拆模後之試體可明顯得知水泥由於粒徑較小沉降速度較慢，因此累積在試體上層；而底灰因粒徑較大，沉降速度較快，會累積在下層，使得試體強度分佈不均。
2. 在添加劑試驗結果中，大部分的添加劑均都無法改善析離狀況而不敷使用。而其中好泥友以及特固力 A 均可以改善析離狀況，但是前者單價過高，若使用在大範圍回填，其工程成本將大幅提高；後者則是因為試體表層會有一層膠狀白色物體殘留，於環保議題較有疑慮而不採用。特固力 C 經試驗後除可改善析離狀況，且亦無白色膠狀物體殘留，為目前研究結果中最佳之添加劑。
3. 在添加劑劑量的探討中，劑量過少，對於試體的粒料分佈均勻性並無太

大助益，而過多則會導致粒料沉降速度過快，上層強度過低而下層強度過高之奇特現象。因此，經由劑量試驗結果可知最佳劑量為添加劑與水百分比 0.8 %。

4. 本研究嘗試以飛灰取代部份水泥作為固化材，降低水泥使用量，且由於飛灰本身亦屬於燃煤產物一部份，對於灰塘回填上較無疑慮。然而就試驗結果而言，隨著水泥量降低，試體強度也隨之下降，顯示飛灰並無法取代水泥增強材料強度之特性，而爐石水泥之試驗結果則與一般水泥差異不大。
5. 由於本研究煤灰低強度材料需於水中進行自由沉降，因此算是一新嘗試的回填材料，其齡期對於強度的影響，亦須重新試驗。而試驗結果顯示，隨著齡期的增加，試體強度確實隨著逐漸增長。

## 6-2 小型水工模型試驗

第二階段則是依據第一階段之試驗結果，將原先的小型圓柱試體更換成較為大型的水工模型進行試驗。試驗中，回填水槽設計採用透明壓克力組成，可使灌注時，清楚觀察到粒料之沉降。而就水工試驗之結果可總結幾個成果如下：

1. 無添加劑之水工試體就外觀目視即有明顯分層狀況，在擷取剖面後由斷面情況確實發現試體呈現層狀結構。形成層狀結構的主要原因是由於粒料沉降速度不均且灌注時採取多次灌注所造成。此外，試體養護時，上層水質明顯可見相當混濁。
2. 加入添加劑後，試體外觀顯示材料均勻性與無添加試體相仿，均相當勻稱。但與無添加劑試體不同處在於，加入添加劑之水工試體養護完成後將試體斷面觀視可發現內部結構與外觀相同，並無粒料分離以及析離狀況存在。顯示添加劑的存在有其必要性。且灌注完成後之上層水質相當清澈透明，於現地回填時，將可降低因環保議題引發之爭議。

3. 混合管灌注與直接灌注試驗結果相較，並無太大區別，顯示在大量回填材料灌注時，對於試體的成型，灌注型式影響不甚明顯。
4. 依據水工試驗鑽心取樣後進行單軸抗壓試驗之結果可以得知，回填完後之試體強度約為  $5 \text{ kg/cm}^2$  上下，依據 SPT-N 與黏土性質之關係(表 6-2-1)，可知在強度為  $5 \text{ kg/cm}^2$  時，SPT-N 值已大於 32，遠遠超出台電公司還地於港務公司之規定標準 13.7。

表 6-2-1 SPT-N 與單軸抗壓強度之關係

標準貫入試驗 SPT-N 值	分類	現地簡易判別法	無圍壓縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )
< 2	非常軟弱	極易以拳頭貫入土中達數公分	< 0.24
2 ~ 4	軟弱	極易以拇指貫入土中達數公分	0.24 ~ 0.48
4 ~ 8	中等堅硬	以拇指貫入土中數公分需出力	0.48 ~ 0.96
8 ~ 16	堅硬	以拇指壓入土中易產生凹陷	0.96 ~ 1.92
16 ~ 32	非常堅硬	以拇指指甲壓劃土壤易產生凹陷	1.92 ~ 3.83
> 32	硬實	甚難以拇指指甲壓劃土壤產生凹陷	> 3.83

### 6-3 現地小規模回填試驗

第三階段為綜合第一階段圓柱試體配比試驗及第二階段水工模型試驗之結果應用於現地小規模試驗，藉由現地小規模試驗之經驗推廣至往後運用於實際灰塘回填工作。試驗完成後除破壞性的鑽心取樣及現地 SPT 試驗外，本次研究更利用了非破壞性地物探測技術進行大範圍的檢測，以探討未來利用非破壞性檢測方法評估灰塘改良成效之可行性。試驗結果整理如下：

1. 由表面波(MASW)檢測結果可知，回填試驗坑共可分成 3 個範圍，分別為 0~0.5 處波速大於  $360 \text{ m/s}$  ( $N > 50$ )；0.5~1.1 處波速介於  $220 \sim 360 \text{ m/s}$

( $14 < N < 50$ )之間；1.1 m 以下波速小於 220 m/s ( $N < 14$ )。由其檢測結果可以了解回填區大範圍的強度分佈。

2. 而由電阻率檢測結果分佈圖可以了解回填均勻性，可以發現分佈圖中，有某些區塊之電阻率較高，乃是由於其水泥量較高所致。由電阻率的結果可知除 Site1 水泥集中現象較明顯外，Site2 及 3 均勻性甚佳。
3. 依據鑽心樣體照片以及開挖後之驗證，發現本次回填改良深度均在地表面下 1.1~1.5 m 左右，就其剖面可分為三層進行討論。第一層約在 0~0.5 m 範圍，最為緊密，敲擊時聲音回饋屬敲中密實物體之音質，且回填材料不易掉落；第二層約在 0.5~1.1 m 範圍，與第一層相比較為鬆散，敲擊時聲音回饋仍屬敲中密實物體之音質，但會有局部回填材料掉落；第三層為 1.1 m 以下，大部分均屬於原生土層與底灰和水泥的混合物。
4. 現地 SPT 結果顯示，地層強度隨著水泥含量增加，依序由  $N=14$  提升至  $N=38$ ，均大於還地標準。
5. 比較非破壞性檢測與鑽心取樣、開挖剖面以及 SPT 試驗之結果後可以得知，兩者分析後之分層結果相近。顯示非破壞檢測技術應用於大範圍煤灰改良成效上具有相當高之可行性。
6. 無圍抗壓試驗結果顯示，水泥含量較高之回填坑試體其抗壓強度確實較高(最大強度  $35.65 \text{ kg/cm}^2$ )，隨著水泥量降低，強度也隨之下降(最低強度為  $7.58 \text{ kg/cm}^2$ )。而在深度部分，則是隨著深度越深強度越低。其中，中下層位置有部分試體強度較高是因分割鑽心樣體時，取得之樣體屬於水泥集中區塊，導致強度提升。
7. 由數值分析結果可以得知，層狀結構的存在對於煤灰塘抵抗液化實具有正面之助益。
8. 由工法比較與評估的結果顯示一次性地改具有高成效、低成本、不受深度限制且可於水中灌注之優勢，對於未來電廠之排灰及地改工作而言相

信是可獲得極佳之經濟效益。

## 6-4 綜合結論

本研究藉由初期的室內配比試驗，探討煤灰加入固化材於水中回填之可行性，並藉由多次的添加劑試驗尋找出最佳的煤灰、固化劑以及添加劑配比，將水中沉降所產生的離析問題降至最低。接續再製作小型水工模型試體進行水工試驗，驗證了研發之回填材料強度有達至預期目標，且在降低粒料析離問題之外，同步解決了水質混濁容易造成的環保觀感不佳疑慮。最後於現地進行小規模回填試驗，回填完畢後，水質確實清澈無混濁現象。此外，藉由非破壞性檢測、鑽心取樣及開挖剖面分別評估回填改良成效，3者結果亦相當接近，顯示未來若欲大範圍評估煤灰塘改良成效，非破壞檢測技術確實具有其可行性。而由現地無圍單壓強度均在  $7 \text{ kg/cm}^2$  以上之結果，說明現地小型水力回填試驗坑強度確實已達原先設定目標。

由上述成果可知，在水力排放過程中加入固化材及添加劑順帶進行地盤改良確實具有高度之可行性。如此一來，將可避免回填完畢後尚需進行鉅額費用之改良工程。此外，由於其在回填過程中便進行改良步驟，故此方法並無改良深度之限制，相較於其他改良工法均有改良深度限制的情況下，對於大深度的地層改良提供了一絕佳之方案。以未來台中二期灰塘規劃而言，其灰塘設計深度甚大，兼且處在水平面下，若未能在回填時便同步進行改良，待將來回填完成後，深度較深處之地盤改良工程將是台電公司的一大挑戰。本文之研究內容說明了一次性地改實具有高度未來發展性及實用性之外，對於縱深較大之處亦可藉由回填同步地改思維先行處理，避免將來在此區塊需花費更多人力物力。而此一工法的提出相信可提供給予台電排灰部門及其相關工程單位一種嶄新的地盤改良思維。

## 參考文獻

- [1] 陳泰元，「煤灰回填土工程性質之研究」，海洋大學河海工程研究所碩士論文，1993 年。
- [2] 廖洪鈞，「灰塘煤層以 CLSM 進行地層改良之材料與工法研究」，台灣電力公司，，2009 年。
- [3] 廖洪鈞，「台中電廠灰塘煤灰 CLSM 地層改良鑽探取樣與試驗」，台灣電力公司，2010 年。
- [4] 廖洪鈞，黃兆龍，鄭世豪，王錦伍，郭麗雯，林茂容 (2011)，「灰塘煤灰攪拌改良施工後之工程性質研究」，台灣混凝土學會會刊，第五卷，第四期，第 53-62 頁。
- [5] 廖洪鈞，鄭世豪，王錦伍，郭麗雯，邱善得，林茂容 (2012)，「現地攪拌工法於灰塘煤灰改良之應用效能評估」，台電工程月刊，第 761 期，第 99-109 頁。
- [6] 行政院公共工程委員會，「公共工程飛灰混凝土使用手冊」，1999 年 8 月。
- [7] 行政院環境保護署，「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」，2015 年 1 月。
- [8] TETRA TECH, (2013). “Project Considerations for New Coal Ash Landfills”, Proc., 2013 world of coal ash conference, Lexington, K.Y., USA.
- [9] Yang, K. J., Rechling, J. M., Chenevey, P. M., (2013). “Considerations in the Development of a Coal Combustion Products Landfill”, Proc., 2013 world of coal ash conference, Lexington, K.Y., USA.
- [10] Caldas-Vieira, F., Hans-Joachim F., Saraber, A. (2013). “European Product Standards-Update on status and changes with relevance to CCPs”, Proc., 2013 world of coal ash conference, Lexington, K.Y., USA.

- [11]Caldas-Vieira, F., Hans-Joachim, F. (2013). “Impact of Political Decisions on Production and Use of Coal Combustion Products in Europe”, Proc., 2013 world of coal ash conference, Lexington, K.Y., USA.
- [12]FitzGerald, T. (2009). “Current Issues in The Regulation of Coal Ash”, Proc., 2009 world of coal ash conference, Lexington, K.Y., USA.
- [13]Environmental Protection Agency, (2015). “Hazardous and Solid Waste Management System; Disposal of Coal Combustion Residuals From Electric Utilities; Final Rule”, Federal Register, Vol. 80, No. 74.
- [14]RECOAL consortium, (2008). “Reintegration of Coal Ash Disposal Sites and Mitigation of Pollution in the West Balkan Area”, Handbook on treatment of coal ash disposal sites.
- [15]Bishop P, Gress D, Olafsson J. “Cement stabilization of heavy metals: Leaching rate assessment”, Industrial Wastes-Proceedings of the 14th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, Lancaster, PA, 1982: 80-98.
- [16]Shively W, Bishop P, Gress D, et al. “Leaching tests of heavy metals stabilized with portland cement”, Journal of Water Pollution Control Federation, 1986, 38: 234-241.
- [17]Chen QY, Tyrer M, Hills CD, et al. “Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification /stabilisation: A review”, Waste Management, 2009, 29: 390-403.
- [18]Recent Developments for In Situ Treatment of Metal Contaminated Soils, U.S. EPA, March 1997.
- [19]Wilk, C., “Solidification/Stabilization Treatment and Examples of Use at Port Facilities”, Ports 2004: pp. 1-10, 2004.































## 附錄 B 煤灰推廣手冊

### 燃煤火力發電 知多少？ 報給你知！



「火力發電」是將「熱能」轉化為「機械能」，帶動渦輪機組的發電方式。在臺灣採用燃煤發電的理由簡述如下：

- 1 核能發電既然詭譎，替代發電策略當然不可少！
- 2 風力太陽能及潮汐，發電技術成本效率待考驗！
- 3 燃煤存量相當豐富，取得方便發電經驗很成熟！
- 4 燃煤發電煤灰煤渣，沒有核廢料儲放輻射問題！
- 5 煤灰富含矽鋁礦物，成就永續建築物千年不毀！
- 6 充分應用煤灰煤渣，造就節能減碳綠色混凝土！



### 環保永續心經營 節能減碳是真諦

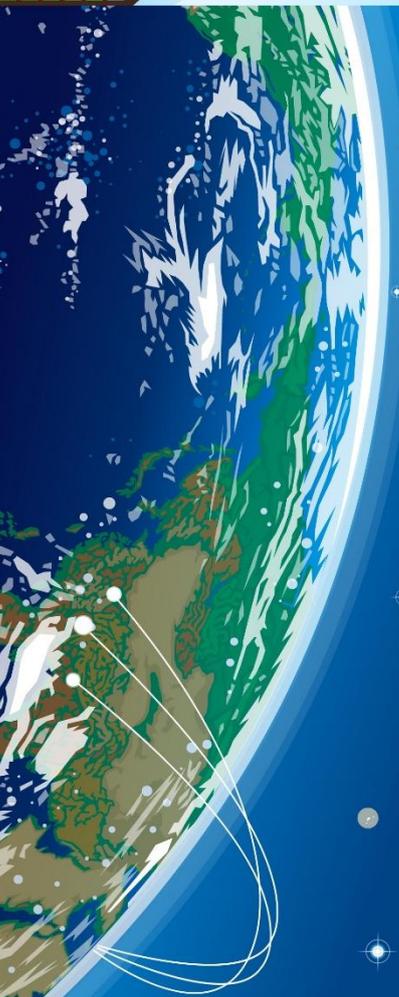


台灣電力股份有限公司  
總機：02-23651234  
客服專線：1911  
E-mail: someone@example.com  
政風檢舉電話：02-23667364

### 燃煤煤灰 知多少？







# 燃煤煉灰清潔無毒 安心可靠！



我們和垃圾焚化灰不一樣哦！  
屬於無毒的工業廢棄物，用於發電。  
燃煤煉灰就是一種可以再利用之資源。  
可以讓鋼筋混凝土長命百歲！



VS.



1 燃煤煉灰為煤粉中的粘土礦物，在燃煤發電高溫燃燒時，粘土礦化膨脹而形成，沒有垃圾焚化灰含有戴奧辛劇毒對人體有害問題，也沒有鋼筋會造成混凝土結構物表面的潰爛及面疤之現象，來源清潔絕對安全！

2 依據國內「毒性特性溶出程序(TCLP)」法規檢驗標準，台電自足長期追蹤試驗結果，顯示燃煤煉灰重金屬含量遠遠低於規範值，而且大部份都是零測出(ND)，足見煤礦來源乾淨，所以煉灰清潔及安全，使用時可以安心！

3 台電經營燃煤發電事業用心又有良心，生產的煉灰不摻雜其他雜質，而且清潔發電，廢氣中已將污染物質如硫化物等清除淨潔，所以煉灰中也不會有造成混凝土腐蝕變化的基因存在，對消費者充分保障，儘管放一百個心！

# 燃煤煉灰的一生

## 煉灰家族

**底灰 20%**

我是與眾不同的粘土雜質礦化成泥，飛不上天空的小胖墩，顆粒粗大，你會以為我是孩子，皮膚灰色有時呈黑色，多角形又多孔隙，很多工程人員會把我拿來當作回填土方，有時後來拿來製造紅磚，或當作是混凝土的骨材及輕質材料，所以我的貢獻很大喲！

**飛灰 80%**

我可不是非常漂亮的中空圓球，小巧可愛又很滑溜，灰色皮膚，我是在煤粉燃燒時附着的細小粘土，受到高溫風穿到爐口被靜電集塵器捕抓住的，所以人類都說我是他們在「空中採礦」，哈哈！就是說抓住我啦！我跟我的胖兄弟血液相同，化學性質也相似。當我們跟石灰及矽灰在一起時會造成結晶物，把石頭牢牢粘住，也同時把造成混凝土骨材腐蝕的物質緊密結合，讓混凝土非常耐久，所以囉，我就有很多功能本事，請大家發揮想象力，好好使用我！

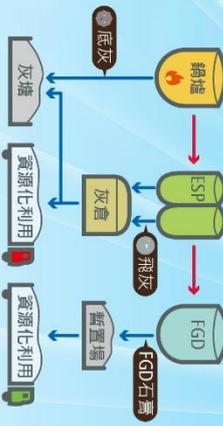
## 再利用率



大家好我是底灰(Bottom Ash)，由於數目不多，又難看，過去都不被看好，利用率只有10%左右，90%都被丟棄在灰堆內，比起我可愛的小兄弟「飛灰」的90%來說，真是少的可憐！我要加油了！不過不要讓我擔心，時來運轉，學校的老師們現在都很關心我，已經進行了「控制低強度材料CLSM」，為我找到很好的出路了！現在可以跟我的胖兄弟通力合作，當做人類開挖埋管管線時，或是路基的回填材料，真的很感謝他們的努力！感恩！以後人們不需要再使用長途運送的砂石來製造「控制低強度材料CLSM」，不但可以減少搬運，也可以減少環境破壞，更不用耗用自然資源了！可以彌補我的出生父母「火力發電廠」造成二氧化碳排放過多的罪過！你對嗎不嫌！

大家好我是飛灰(Fly Ash)，你應該叫我「粉煤灰」才對，這樣才不會跟底灰化過產生的有毒「飛灰」混淆在一起了。由於我天生體質，是「卜作質(Pozzolan)」材料的家族，跟石灰是天生的一對，組合在一起，是混凝土的「長生不老基因」，具有如同「火山灰」的性質，你知道嗎也是這顆古羅馬技師二千年不壞的建築的基因，具有與日月同光的實力！所以1980年代早期，學校的老師就將我運送的研究，知道我們具有增加鋼筋混凝土結構物抵抗自然的侵蝕劣化的超強能力，也是種優良的骨材，所以人類就大守使用我，目前我的使用率超過90%，真的是我的榮幸！有我可以保留你的居住安全。現在我跟的雙兄弟「胖灰」合作，造就「控制低強度材料CLSM」的新趨勢，相信我的實力會有更大的發展空間。

## 煉灰生產標準流程



目前台灣電力公司與學術研究單位通力合作，積極研究尋求煉灰更多的用途，開製製造更多的煉灰產品，達到環保訴求，也可以有效減少臺灣資源的耗損，更增加結構體的壽命，真是一舉二贏！目前台灣電力公司已經將「控制低強度材料CLSM」用在台電灰堆的中隔堤，為台電節首數億新台幣，這也是世界首見的範例，是臺灣之光！我們大家要共同努力為臺灣能源、環保、資源節約，都能貢獻打拚！



## 附錄 C 期中審查意見暨回覆

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
<b>台灣電力股份有限公司</b> <b>台中電廠鍋爐組</b>	(共一點)
1. 實驗中採用之拌合水為淡水，然而，電廠水力排灰採用的是海水，海水對於實驗結果是否會有所差異。	感謝指教，目前實驗用水均為淡水無誤，未來將採用海水進行實驗，比較淡水與海水實驗結果之差異。
<b>台灣電力股份有限公司</b> <b>林口電廠機械組</b>	(共二點)
1. 現地實驗時，若在底灰中加入水泥，是否會影響排放流動性？	感謝指教，現地實驗與室內實驗實際上會有所不同，因此未來於現地時驗時，配比仍會作出調整。
2. 目前實驗結果顯示成本較高，是否可以再次降低成本。	目前成本確實仍然較高，未來將與材料開發廠商研討是否可再次降低成本。
<b>台灣電力股份有限公司</b> <b>環保處</b>	(共七點)
1. 第一章 1-1 節文中說明「…煤灰填海造地所形成之灰塘乃屬於台灣港務公司，…」，但興達電廠煤灰填海造地所形成之灰塘依「海埔地開發管理辦法」部分是屬於本公司，而非全屬國有地(臺灣港務公司)。	感謝指教，將於期中報告中修正敘述。
2. P.4 之 6，灰塘滲出水力年水質監測絕大部分皆稱對環境無影響，因此建議地下水質部分，將比對環保署公告之土水法監測標準，必要時再比對管制標準，以利提早防範及採行因應措施。	感謝指教，未來將審慎考量土水污染比對依據。
3. 教育訓練：由受委託廠商或由受委託廠商和台電公司共同辦理，本段敘述應有一致性。	感謝指教，教育訓練部分乃是由受委託單位與台電公司共同辦理無誤，將於文中進行敘述修正。

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
4. P12、P15、P77、P84，有錯字請修正。	感謝指教，遵照辦理。
5. 建議列出相同劑量下，比較各項添加劑之成本與效果。	在添加劑的試驗過程中，大部分的添加劑均無法改善析離現象，便無繼續研究。而好泥友、特固力 A 及特固力 C 部分，每種添加劑相對於同樣的水泥量糾友一定的配比，並無法以實際相同劑量進行比較。
6. 本公司煤灰處置最終目的乃是盡量解決去化問題，應減低其他材料之使用，如爐石水泥。	爐石水泥部分，僅最為研究測試，未來現地回填試驗並不會採用爐石水泥。
7. 建議煤灰以「去化思維」取代排灰思維之觀念。	本研究之中心思維仍是以煤灰去化為主要目的，本研究知去化方法為將回填煤灰當作回填材來使用，以此想法可最大化煤灰去化能力。
<b>台灣電力股份有限公司 大林電廠</b>	(共一點)
1. 本研究之一次性地改的構想是否可取代舊有改良工法(如：擠壓砂樁工法)?	感謝指教，目前室內實驗驗證，一次性地改強度約可達 5kg/cm <sup>2</sup> 左右，若換算成 SPT-N 值約為 30~40 左右，遠大於擠壓砂樁改良後之還地標準值 13.7。成效應遠比擠壓砂樁更佳。後續將在結論中進行補述。
<b>台灣電力股份有限公司 台中電廠發電處</b>	(共一點)
1. 擠壓砂樁改良後之強度與一次性地改強度有何差異？是否可以取代擠壓砂樁工法？	目前室內實驗驗證，一次性地改強度約可達 5kg/cm <sup>2</sup> 左右，若換算成 SPT-N 值約為 30~40 左右，遠大於擠壓砂樁改良後之還地標準值 13.7。成效應遠比擠壓砂樁更佳。

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
<b>台灣電力股份有限公司</b> <b>環化組</b>	(共一點)
1. 可否比較有無加入特固力 C 之水質?	感謝指教，後續委請綜研所協助檢測有無加入特固力 C 之水質變化。
<b>台灣電力股份有限公司</b> <b>綜合研究所</b>	(共二點)
1. 現地小型實驗更換地點後，是否會增加研究經費?	首先需感謝台電諸多單位協助與民間企業協調此一試驗場址可供試驗，目前協調後應無費用增加之問題。
2. 若現今洽談之場地，地主有所疑慮而不願租借，是否尚有其他配套方案。	若目前規劃之場地有所疑慮，可能需再另尋場址，屆時需再委請台電相關部分提供協助。
<b>台灣電力股份有限公司</b> <b>核火工處</b>	(共一點)
1. 若未來可詳細列出一次性地改改良後之工程強度、複雜度、施工性以及經濟效益，若各項數據皆可行，未來於新工程規劃時，可將此工法加入考量。	感謝指教，後續期末報告將詳細列出各項目與傳統改良工法之優劣比較。

## 附錄 D 期末審查意見暨回覆

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
<b>台灣電力股份有限公司 發電處</b>	(共四點)
1. 加入固化劑之後是否會佔去灰塘體積？	感謝指教，現地煤灰回填時若能有系統的規劃及加入適當添加劑使水力回填時，煤灰與固化材析離降低，使固化材能夠填充至煤灰空隙之中，將可大量降低固化材所占去之體積。
2. 建議可以回填後之灰塘密度做為評估佔據體積的計算基準。	感謝指教，回填後水泥佔用體積多寡需視回填品質而言，若回填時析離狀況不明顯，表示水泥大部分均填入煤灰空隙之中，水泥所造成之額外體積甚少(如報告內圖 5-3-11 及 12)；反之，若析離狀況嚴重，則水泥全部堆積於最上層，則會造成佔用體積較多的情況產生(如報告內圖 5-3-10)。
3. 填加固化材及特固力 C 在環評是否可行？	感謝指教，就現有土壤整治方法中，其中一個方法為現地固化法，而現地固化法所採用之固化材即為水泥。但因煤灰屬於特殊副產物，實際是否可用仍相需相請環保處進行諮詢。
4. 在此工法實行時，雖然規畫中是在排灰管線末端進行續接，但因需加入固化材，未來若發生塞管問題應如何因應？	本研究中所規劃之灌漿設備乃是目前台灣潛盾工法所採用，已行之有年，因此不會有塞管的疑慮。
<b>台灣電力股份有限公司 台中電廠</b>	(共二點)
1. 簡報中有提及灰塘填灰可採用斜面方式逐層堆疊，要如何執行才能提高灰塘效能？	感謝指教，此填灰方式乃是目前所提出的初步構想，仍需後續詳細排灰方式規劃加以進行，且需大面積試驗場進行驗證方可確認排灰方式之可行性。
<b>台灣電力股份有限公司 林口電廠</b>	(共九點)

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
1. P-18「第」盤改良，應修正為「地」	感謝指教，已修正。
2. P-23「土壤組構」建議改為「土壤結構」較為適當。	感謝指教，已修正。
3. P-10「廢棄」煤灰建議改成「副產品」煤灰。	感謝指教，已修正。
4. P-165 表 5-4-1 之出處請註明。	感謝指教，已修正。
5. 在數值模擬章節中未說明所採用之網格大小，並請說明是否有驗證案例。	感謝指教，本次模擬之數值模型尺寸為30×30×20m，採用之實體網格為3×3×1m，符合FLAC所要求。此模型乃依據台電前期報告「煤灰塘格狀改良地層之抗液化能力分析」之內容接續分析，在該報告內容中已有驗證案例證明分析軟體及方法之可行性。
6. 參考文獻第七項「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」，最新版本為2015年1月，請修正。	感謝指教，已更新。
7. 請問試驗時所採用的水源是海水還是淡水，水源的不同會不會對此工法有所影響？	感謝指教，配比中之水源為海水或淡水並不會造成太大的差異，主要還是以水源取得方便為主。

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
8. 請問海平面以上與以下之配比是否需要不同配比？	感謝指教，海平面上及下之配比確實要有所不同。本案主要目的均是針對海平面以下水中灌注進行之研究，報告內容中之配比也均是針對水下灌注所研發。主要是因在水下灌注，容易產生嚴重析離現象。事實上海平面以上因非在水中灌注，所以析離問題並不嚴重，相對來說配比較易設計。
9. 現地實務如果不攪拌直接排灰，那要如何控制配比使其回填後仍有報告內所述之強度。	感謝指教，本研究中之現地實驗是以重量來控制，主要還是以一定比例的煤灰中加入低比例之水泥來控制。但是未來欲實際應用至灰塘排放時，仍需視當地設備及實際狀況進行微調。
<b>台灣電力股份有限公司 核火工處</b>	(共二點)
1. 回填深度縱深較大是否造成析離狀況變得較為嚴重而導致深度較深處土層強度較差？	感謝指教，粒料析離主要原因是因顆粒大小不均造成沉降速度差異而導致，與回填縱深之大小應無太大關係，在本案中，加入添加劑之目的即是為了解決煤灰與固化材沉降速度差異過大之影響。詳細說明可參照報告 3-5 節。
2. 在農業上有採用天車方式施作的工法，可否應用到灰塘排放的作業上，使得灰塘排放更為均勻。	感謝指教，未來在排放工序的規畫上均可再加以討論，若將煤灰是為有用資材詳細規劃其回填方式，雖然在早期成本會較高，但回填完成後將可節省後期大量的地盤改良成本。
<b>台灣電力股份有限公司 營建處</b>	(共一點)
1. 以本案之成果而言對於煤灰塘之改良是一個相當不錯之方式，但以此方式進行回填是否確實可以形成一定深度的硬層，在未來可降低民眾對於煤灰重金屬滲漏的疑慮？	感謝指教，民眾疑慮的部分相信在未來灰塘依然會持續發生，在土壤汙染整治方法裡面，就地固化是其中的一種方式，未來若能在底層先行固化一定厚度的硬層，將可大幅度降低滲漏的影響。

參與會議專家及其所提之意見	合作研究單位處理情形
<b>台灣電力股份有限公司 環保處</b>	(共三點)
1. 報告內容中提及「汙染」部分，請更正為「污染」。	感謝指教，已修正。
2. 目前事業廢棄物處理法與資材再利用，政府方面正在討論是否合併，對於後續灰塘回填利用，技術面雖然可行但仍需考慮法規上之規定。	感謝指教，後續將留意相關法規之發展。
3. 田納西州灰塘事件之後，美國於 2015 年 4 月 17 日重新公佈了新的灰塘管理法規，法規中有規定灰塘均需使用襯砌，避免重金屬滲漏至地下水中。相關資料將提供給予主辦單位及執行單位參考。	感謝指教，在本案執行中，已有將相關訊息傳遞於台電綜合研究所，建議未來應朝向國際趨勢進行施作。
<b>台灣電力股份有限公司 南部施工處</b>	(共一點)
1. 添加特固力 C 後會使得水質澄清，主要是因何種機理所造成？	感謝指教，特固力 C 之主要作用為使其尺寸大小不同之粒料沉降速度變得較為一致(可參照報告內容 3-5 節)，因此原先造成水質混濁的懸浮粒子也會大量的沉降下來，使得水質變得較為清澈。