



桃園市政府航空城工程處
Office of Aerotropolis Public Construction, Taoyuan

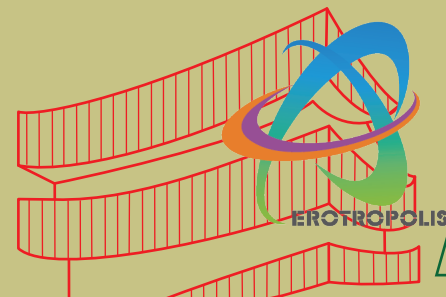
桃園市政府工務局

焚化再生粒料應用於土壤穩定設計與施工手冊

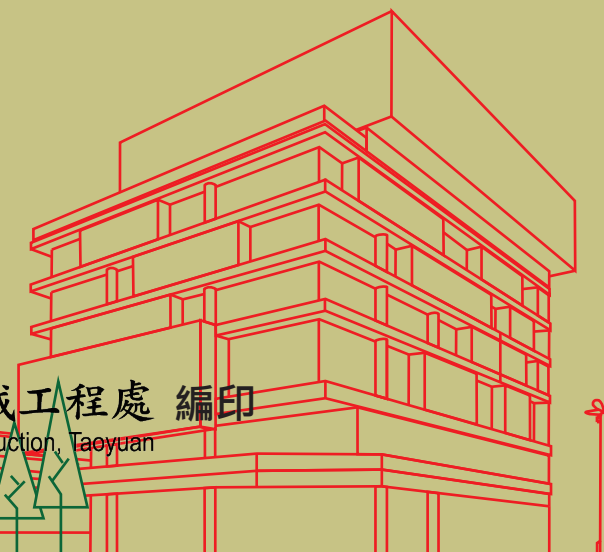
桃園市政府航空城工程處

編印

111
年
11
月



桃園市政府航空城工程處 編印
Office of Aerotropolis Public Construction, Taoyuan



1. 手冊名稱：焚化再生粒料應用於土壤穩定設計與施工手冊	2. 出版日期： 中華民國 111 年 11 月
3. 發行人：鄭文燦	4. 國際標準書號 (ISBN)： 978-626-7159-95-8 (平裝)
5. 編輯主任委員：黃治峯 編輯副主任委員：沈志修、賴宇亭 責任主編：張達德 責任副主編：吳淵洵	6. 出版單位：桃園市政府航空城工程處
8. 編撰委員： 張達德、吳淵洵、房性中、黃奉琦、 江政恩、李泓彥、張家豪、歐立宸	7. 審議委員： 呂紹霖(召集人)、宋以仁、呂明錡、 何順華、莊均緯、黃喬炎、楊士賢、 藍士堯 (以委員姓氏筆畫排序)
9. 受託單位：中原大學	10. 主辦單位：桃園市政府航空城工程處
11. 摘要 本使用手冊提供焚化再生粒料應用於道路領域有關的土壤穩定操作的綱領指導。其應用包括基地路堤填築土壤穩定的設計和施工，可作為在工程中選擇適合土壤穩定配比設計的指南。 本手冊共計十章： 第一章：前言與簡介，與國際通用的設計施工規範相同，首先開宗明義針對焚化再生粒料穩定土壤之目的、背景及定義加以說明； 第二章：土壤穩定添加劑選擇與使用成效，則是針對焚化再生粒料如何在化學與機械穩定機制上，結合過去近 50 多年的相關規範及手冊的內涵與準則，有關焚化再生粒料的來源組成與其對土壤穩定的密切關係亦在本章做了必要的說明； 第三章：土壤穩定添加劑反應特性與評析，係針對近年來焚化再生粒料穩定土壤成效的相關研究成果予以歸納彙整並加以綜合說明； 第四章：焚化再生粒料穩定土壤成效，探討焚化再生粒料針對過濕/極濕土壤之應用； 第五章：焚化再生粒料用量與配比設計，針對焚化再生粒料用量與配比設計在以下條件特別提供配比設計建議； 第六章：施工步驟與機具，針對施工的步驟與施工機具進行說明並提供國內可以方便選用的機具與設備； 第七章：施工品質驗收與特殊考量，針對施工品質的驗收，說明土壤穩定混合料驗收考量與規定； 第八章：鋪面厚度設計，說明鋪面厚度與土壤穩定層設計考量； 第九章：成本單價分析與循環經濟效益評估； 第十章：設計範例。依據編撰團隊的經驗與相關參考資料的彙整，本章提供完整的焚化再生粒料於穩定土壤應用方面的設計範例以供使用者之參考。	
12. 關鍵字： 焚化再生粒料、土壤穩定、循環經濟	13. Keyword： Incinerated Recycle Aggregates、Soil Stabilization、Circular Economy

序

桃園升格至今，在「前瞻基礎建設」、「桃園航空城計畫」及「亞洲·矽谷計畫」推動下，公共建設不僅生氣蓬勃且發展迅速，發展低碳綠能城市更是市府的重大目標，為使資源有效的開發及利用，我們將循環再生的經濟體系與運作模式納入公共工程中，不僅環保，也提升公共工程品質，發揮循環經濟的最大效益。

桃園是環保產業之重鎮，推動循環經濟成效卓著，除與各企業合作，亦配合環保署推廣焚化再生粒料使用比率，於推廣底渣再利用上有良好績效。市府團隊除跨局處共同合作，首創「循環經濟管理平台」，有效掌握全市循環經濟材料應用之管理、監測與追蹤，另與學術單位攜手，委由中原大學依據研究成果編撰「焚化再生粒料應用於土壤穩定設計與施工手冊」，提供業界戮力推動焚化再生粒料去化及合法轉化運用之準據。

這本手冊編撰範圍涵蓋焚化再生粒料之定義、使用目的及使用範疇、土壤穩定設計、施工與品質驗收、鋪面厚度設計、成本單價分析與循環經濟效益評估暨設計與施工範例介紹等，結合市府團隊同仁、編撰單位委員及審定委員之辛勞付出，以期能達成資源再生、循環利用的目標，引領再生粒料運用於公共工程建設，建構「零廢棄、全循環」的永續城市，邁向循環經濟的新紀元。

桃園市市長 鄭文燦

單位換算表

壓力/應力 (Pressure/ Stress)

kg f/cm ²	kg f/m ²	t f/m ²	t f/in ²	t f/ft ²	lb f/in ² (psi)	lb f/ft ²	N/m ² (Pa)	kN/m ² (kPa)	MN/m ² (MPa)
1	10000	10	0.006350	0.9144	14.223	2048.2	98066.5	98.0665	0.098067
0.0001	1	0.001	6.35·10 ⁻⁷	0.00009144	0.0014	0.2048	9806650	0.00980665	9.8066·10 ⁻⁶
0.1	1000	1	0.0006350	0.09144	1.4223	204.82	9806.650	98.06650	0.00980665
157.493	1574928	1574.928	1	144	2240	322560	15444257	15444	15.44
1.0937	10937	10.937	0.00694	1	15.556	2240	107251	107.3	0.1073
0.0703	703.07	0.7031	0.0004464	0.0643	1	144.0	6895	6.895	0.006895
0.000488	4.8824	0.00488	0.0000031	0.00045	0.00694	1	48.77	0.04788	0.00004788
1.0197·10 ⁻⁵	0.1019716	0.00010197	6.475·10 ⁻⁸	0.00000932	0.000145	0.02089	1	0.001	0.000001
0.0101971	101.9716	0.1019716	0.00006475	0.00932	0.1450	20.8854	1000	1	0.001
10.1971	101971.6	101.9716	0.06475	9.3239	145	20885.4	1000000	1000	1

力 (Force)

g f	kg f	t f(US)	lb f	t f(En)	N	kN	MN
1	0.001	0.000001	0.002204	9.84·10 ⁻⁷	0.009806650	9.80665·10 ⁻⁶	9.80665·10 ⁻⁹
1000	1	0.001	2.20462	0.000984	9.806650	0.009806650	9.806650·10 ⁻⁶
1000000	1000	1	2204.62	0.984206	9806.650	9.806650	0.009806650
453.6	0.4536	0.0004536	1	0.000446	4.448	0.004448	0.000004448
1016047	1016	1.016	2240	1	9964	9.964	0.009964
101.9716	0.1019716	0.000101976	0.2248	0.00010036	1	0.001	0.000001
101971.6	101.9716	0.1019716	224.8	0.10036	1000	1	0.001
101971621	101971.6	101.9716	224800	100.36	1000000	1000	1

長度 (Length)

mm	cm	m	km	in	ft	yd	mile
1	0.1	0.001	0.000001	0.0393701	0.00328084	0.00109361	6.2137·10 ⁻⁷
10	1	0.01	0.00001	0.393701	0.0328084	0.0109361	6.2137·10 ⁻⁶
1000	100	1	0.001	39.3701	3.28084	1.09361	6.2137·10 ⁻⁴
1000000	100000	1000	1	37370.1	3280.84	1093.61	0.621371
25.4	2.54	0.0254	0.0000254	1	0.0833333	0.0277778	1.5783·10 ⁻⁵
304.8	30.48	0.3048	0.0003048	12	1	0.333333	0.000189394
914.4	91.44	0.9144	0.0009144	36	3	1	5.68182·10 ⁻⁴
1609344	160934.4	1609.344	1.609344	63360	5280	1760	1

面積 (Area)

mm ²	m ²	in ²	ft ²	yd ²	acre	ha
1	0.000001	1.550003·10 ⁻³	1.07639·10 ⁻⁵	1.196·10 ⁻⁶	2.471055·10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰
1000000	1	1550.003	10.76391	1.19599	0.0002471055	0.0001
645.16	0.00064516	1	0.00694444446	0.000771605	1.5942259·10 ⁻⁷	6.4516·10 ⁻⁸
9.29030436·10 ⁴	0.0929030436	1.43999996·10 ²	1	0.111111	0.0000229569	0.0000092903
836127.3924	0.8361273924	1295.9999666	9	1	0.0002066117	0.0000836127
404685481.2	4046.8544812	6272636.5864	43559.977419	4839.997491	1	0.4046854481
1·10 ¹⁰	10000	15500030	107639.1	11959.9	2.471055	1

體積 (Volume)

mL	L	m ³	ft ³	yd ³	fl. oz.(US)	gal
1	0.001	0.000001	0.0000353147	0.000001308	0.03381402	0.0002641722
1000	1	0.001	0.03531468	0.001307951	33.81402	0.2641722
1000000	1000	1	35.31468	1.307951	33814.02	264.1722
28316.835945	28.316835945	0.0283168359	1	0.0370370339	957.50605697	7.4805208486
764554.63546	764.55463546	0.7645546355	27.000002294	1	25852.665734	201.97408007
29.573531926	0.0295735319	0.0000295735	0.0010443798	0.0000386807	1	0.007812505
3785.4096684	3.7854096684	0.0037854097	0.1336805311	0.0049511304	127.99991824	1

導出單位 (Derived units)

U.S. to S.I.

$$\begin{aligned}
 & \text{lb/ft}^3 \times 16.01846 = \text{kg/m}^3 \\
 & \text{lb/yd}^3 \times 0.593286 = \text{kg/m}^3 \\
 & \text{gal/yd}^3 \times 4.95113 = \text{L/m}^3 \\
 & \text{fl oz/cwt} \times 0.6519 = \text{mL/kg} \\
 & \text{fl oz/yd}^3 \times 0.03868 = \text{L/m}^3
 \end{aligned}$$

S.I. to U.S.

$$\begin{aligned}
 & \text{kg/m}^3 \times 0.06242 = \text{lb/ft}^3 \\
 & \text{kg/m}^3 \times 1.68555 = \text{lb/yd}^3 \\
 & \text{L/m}^3 \times 0.201974 = \text{gal/yd}^3 \\
 & \text{mL/kg} \times 1.534 = \text{fl oz/cwt} \\
 & \text{L/m}^3 \times 25.8526 = \text{fl oz/yd}^3
 \end{aligned}$$

目錄

序	I
單位換算表	II
目錄	III
圖目錄	IX
表目錄	XIII
第一章 前言與簡介	
1.1 目的與範圍	1-1
1.1.1 目的	1-1
1.1.2 範圍	1-1
1.2 背景	1-2
1.2.1 砂石資源現況	1-2
1.2.2 焚化再生粒料對循環經濟創新貢獻	1-3
1.3 定義	1-5
1.3.1 一般定義	1-5
1.3.2 焚化再生粒料穩定土壤	1-7
1.3.3 焚化再生粒料摻石灰穩定土壤	1-8
1.4 資料來源	1-8
1.5 手冊編排	1-10
參考文獻	1-12
第二章 土壤穩定添加劑選擇與使用成效	
2.1 前言	2-1
2.2 土壤穩定目標與穩定添加劑作用	2-2
2.3 土壤穩定添加劑選用準則	2-2
2.3.1 石灰穩定準則	2-2
2.3.2 飛灰穩定準則	2-5
2.3.3 焚化再生粒料穩定土壤準則	2-8
2.4 土壤類別適用性討論	2-10
2.4.1 土壤穩定處理方法概述	2-10

2.4.2 過濕土壤穩定	2-11
2.5 土壤穩定混合料相關性質改善	2-12
2.5.1 化學穩定定義與機理	2-12
2.5.2 機械穩定定義與機理	2-14
2.6 焚化再生粒料來源與組成	2-16
2.6.1 焚化再生粒料來源	2-16
2.6.2 焚化再生粒料製造與儲存	2-17
2.6.3 焚化再生粒料再處理方式	2-18
2.6.4 焚化再生粒料組成	2-20
2.7 焚化再生粒料穩定土壤特性與創新	2-21
參考文獻	2-22
第三章 土壤穩定添加劑反應特性與評析	
3.1 前言	3-1
3.2 石灰穩定黏土成效機理	3-1
3.2.1 土壤摻石灰化學穩定反應	3-3
3.2.2 養治混合料	3-5
3.2.3 石灰用量決定	3-5
3.3 飛灰摻石灰合併應用成效與機理	3-6
3.3.1 國內經驗	3-6
3.3.2 飛灰種類	3-7
3.3.3 飛灰摻石灰化學反應特性	3-7
3.3.4 飛灰摻石灰用量決定	3-8
3.4 混合料強度表現比對與研析	3-9
3.4.1 加州承載比試驗 (California Bearing Ratio Test)	3-9
3.4.2 無圍壓縮試驗 (Unconfined Compression Test)	3-10
3.4.3 耐久性評估 (Durability) – 乾濕循環試驗	3-11
3.4.4 反覆荷重三軸抗壓 (M_R 回彈模數)	3-13
3.5 焚化再生粒料穩定主動和被動成效與機理	3-14
3.5.1 混合料化學穩定與機械穩定雙重效應	3-14

3.5.2 兩種穩定機理同時作用之創新發現	3-15
3.5.3 焚化再生粒料之祛水特性	3-15
參考文獻	3-16
第四章 焚化再生粒料穩定土壤成效	
4.1 前言	4-1
4.2 前階段研究內容說明	4-1
4.2.1 第一階段－2014～2017 年	4-1
4.2.2 第二階段－2017～2019 年	4-1
4.2.3 第三階段－2019～2022 年	4-2
4.3 焚化再生粒料材料特性	4-2
4.3.1 焚化再生粒料物理與化學性質	4-2
4.3.2 焚化再生粒料顆粒微觀特性	4-4
4.4 焚化再生粒料改良土壤化學與機械穩定機制	4-4
4.4.1 改良土壤化學穩定機制	4-4
4.4.2 改良土壤機械穩定機制	4-6
4.4.3 化學與機械穩定合併考量	4-7
4.5 焚化再生粒料改良土壤穩定成效室內試驗研究	4-7
4.5.1 基本物理性質與土壤分類	4-8
4.5.2 夯實試驗與無圍壓縮試驗	4-10
4.5.3 路基土壤強度試驗	4-13
4.6 應力-應變行為研討	4-21
4.6.1 無圍壓縮試驗之應力-應變行為	4-21
4.6.2 CBR 之應力-應變行為	4-24
4.7 焚化再生粒料穩定過濕土壤成效特性	4-25
4.8 耐久性評估試驗研究	4-26
4.9 國內其他地區焚化再生粒料特性與共通性	4-26
4.9.1 國內其他地區粒料特性與化學特性比對	4-26
4.9.2 穩定過濕土壤的強度提升特性	4-30
4.9.3 穩定過濕土方的大型工程粒料成效共通性應用	4-31

參考文獻.....	4-31
第五章 焚化再生粒料用量與配比設計	
5.1 前言	5-1
5.2 強度與成本為基礎.....	5-1
5.2.1 養治後強度考量	5-1
5.2.2 塑性降低考量	5-2
5.2.3 混合料 pH 值考量	5-2
5.3 過濕土壤快速減水成效.....	5-3
5.4 混合料含水量控制配比用量推估法.....	5-3
5.5 配比用量捷徑法「1：1」	5-4
5.6 配比設計綜合討論.....	5-5
5.7 簡化配比與單位用量對照表.....	5-7
參考文獻.....	5-8
第六章 施工步驟與機具	
6.1 前言	6-1
6.2 現地拌和	6-2
6.2.1 現地原狀土	6-2
6.2.2 現地原狀土小搬運至工區使用處	6-9
6.2.3 工區外媒合借土	6-9
6.2.4 坑洞小區塊穩定處理	6-10
6.3 中央預拌工廠.....	6-10
6.4 工區內集中現地拌和場.....	6-10
6.5 施工機具.....	6-10
6.6 總結	6-11
參考文獻	6-11
第七章 施工品質驗收與特殊考量	
7.1 前言	7-1
7.2 現地示範工程應用成效.....	7-1
7.2.1 現地土壤條件	7-1

7.2.2 配比與拌和用量	7-4
7.2.3 壓實度檢測	7-6
7.3 混合料驗收考量與規定	7-8
7.4 特殊考量	7-8
7.4.1 壓實度檢測標準	7-8
7.4.2 現地配比設計變異對穩定成效的影響	7-9
7.5 逆向夯實試驗創新方法與結果	7-11
7.5.1 改良夯實試驗與逆向夯實試驗的差異	7-11
7.5.2 室內逆向式改良夯實試驗步驟	7-13
7.5.3 正向夯實試驗於逆向夯實試驗結果	7-13
7.5.4 室內混合料與現地拌和料逆向夯實試驗結果	7-14
7.6 混合料對現地土水環境影響考量	7-15
參考文獻	7-17
第八章 鋪面厚度設計	
8.1 前言	8-1
8.2 設計考量因子	8-1
8.2.1 AASHTO 柔性鋪面厚度新建工程設計考量因子	8-1
8.2.2 鋪面績效	8-2
8.2.3 交通量分析	8-2
8.2.4 路基土壤強度	8-4
8.2.5 可靠度	8-4
8.2.6 環境因素	8-6
8.2.7 排水係數	8-6
8.2.8 鋪築材料	8-6
8.2.9 分期施工	8-13
8.2.10 路肩設計	8-13
8.3 土壤穩定層設計考量	8-13
8.4 設計計算公式及圖表	8-14
8.5 鋪面厚度設計範例	8-17

參考文獻.....	8-19
第九章 成本單價分析與循環經濟效益評估	
9.1 前言	9-1
9.2 成本單價	9-1
9.2.1 計價項目及參考工率	9-1
9.2.2 單價分析參考範例	9-2
9.3 循環經濟效益評估	9-3
9.3.1 焚化再生粒料應用於土壤穩定之具體效益	9-3
9.3.2 循環經濟效益物質流評估指標	9-4
9.3.3 循環經濟效益資金流評估指標	9-5
9.4 碳排放量計算及減碳成效評估	9-6
參考文獻	9-9
第十章 設計與施工範例	
10.1 前言	10-1
10.2 工程背景介紹	10-1
10.2.1 鋪面設計斷面	10-1
10.2.2 土壤與焚化再生粒料含水狀況	10-2
10.3 配比設計步驟	10-3
10.4 查表法範例	10-5
10.4.1 混合料含水量控制配比用量推估法	10-5
10.4.2 配比用量捷徑法「1：1」	10-5
10.4.3 對照表法	10-5
10.5 鋪面分層結構的總體經濟成本考量	10-5
附件 A	A-1

圖目錄

圖 2-1 土壤粒徑分佈與穩定添加劑選擇關係示意圖	2-3
圖 2-2 焚化再生粒料拌和後土壤粒徑分佈變化關係圖	2-13
圖 2-3 土壤與碎石混合物單位重、OMC、夯實度性質示意圖	2-16
圖 2-4 焚化底渣物理組成成分	2-17
圖 2-5 靜電式集塵器(ESP)+濕式洗滌塔	2-19
圖 2-6 半乾式洗煙塔+袋濾式集塵器	2-19
圖 2-7 桃園 ROT 廠焚化再生粒料化學成分報告-1	2-21
圖 2-8 桃園 ROT 廠焚化再生粒料化學成分報告-2	2-22
圖 3-1 黏土顆粒表面吸附陽離子及水分子示意圖	3-1
圖 3-2 不同土壤添加石灰後塑性指數下降示意圖	3-2
圖 3-3 不同齡期土壤添加石灰後膨脹力下降示意圖	3-2
圖 3-4 黏土顆粒溶蝕與環境 pH 關係示意圖	3-2
圖 3-5 黏土顆粒於鹼性環境溶蝕現象示意圖	3-3
圖 3-6 環境 pH 值決定 LMO 對照圖	3-6
圖 3-7 改良飛灰用量之 FAMO 決定方法示意圖	3-9
圖 3-8 石灰混合料各項強度指標值改善示意圖	3-10
圖 3-9 耐磨損面示意圖	3-11
圖 3-10 頂部磨損操作示意圖	3-12
圖 3-11 側邊磨損操作示意圖	3-12
圖 3-12 路基土壤回彈行為	3-13
圖 3-13 拌和比例及穩定添加劑含量對凝聚力、摩擦角與承載力之影響	3-14
圖 3-14 混合料土樣摩爾圓與摩擦角變化示意圖	3-15
圖 4-1 焚化再生粒料濕篩法之粒徑分佈	4-3
圖 4-2 焚化再生粒料表面特徵及實體顯微鏡影像	4-4
圖 4-3 不同焚化再生粒料狀態、粒徑與紅土穩定混合料之 pH 值	4-6
圖 4-4 不同配比粒徑分佈曲線模擬圖	4-9

圖 4-5 不同配比粒徑分佈與液塑性限度相關圖	4-10
圖 4-6 哈佛小型夯實試驗使用之儀器	4-11
圖 4-7 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治 0 天配比 0.0 強度	4-14
圖 4-8 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.1 各齡期強度	4-14
圖 4-9 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.2 各齡期強度	4-15
圖 4-10 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.3 各齡期強度	4-15
圖 4-11 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.4 各齡期強度	4-15
圖 4-12 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治各配比各齡期強度	4-16
圖 4-13 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.2 強度	4-17
圖 4-14 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.4 強度	4-17
圖 4-15 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.6 強度	4-18
圖 4-16 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.8 強度	4-18
圖 4-17 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 1.0 強度	4-18
圖 4-18 無圍壓縮試驗完成後的配比 0.8 標準夯實試樣	4-19
圖 4-19 哈佛小型夯實試驗 49°C 養治 48 小時平均強度	4-19
圖 4-20 各種土壤分類與承載值間相互關係之近似值轉換查核圖	4-20
圖 4-21 原狀土壤與養治後石灰處理土壤之典型應力-應變曲線(土樣取自 Bryce B).....	4-22
圖 4-22 兩地區土壤和石灰在未固化與固化情況之典型應力-應變曲線 ((a)Vicksburg buckshot clay, (b)Ava B)	4-22
圖 4-23 應力-應變曲線(桃園 A20 第二停車場-未改良原土-OMC 條件)	4-22
圖 4-24 應力-應變曲線(桃園 A20 第二停車場-配比 0.7 改良土-OMC 條件)	4-23
圖 4-25 應力-應變曲線(桃園 A20 第二停車場-配比 1.0 改良土-OMC 條件)	4-23
圖 4-26 不同配比與彈性模數關係圖(桃園紅土為例)	4-23
圖 4-27 不同配比與極限應力圖(桃園紅土為例)	4-24
圖 4-28 CBR 應力-貫入深度曲線(桃園中原大學紅土為例).....	4-25

圖 4-29 各地區焚化再生粒料粒徑分析統整圖	4-27
圖 4-30 高雄粒料不同配比粒徑分佈曲線模擬圖(風化泥岩)	4-28
圖 4-31 北市粒料不同配比粒徑分佈曲線模擬圖	4-29
圖 4-32 各處粒料不同配比混合料 pH 值變化	4-29
圖 5-1 pH 值隨配比增加的變化曲線	5-3
圖 5-2 焚化再生粒料試算表	5-4
圖 5-3 各配比粒徑曲線分析	5-5
圖 5-4 配比設計表	5-6
圖 6-1 施工流程圖	6-1
圖 6-2 焚化再生粒料用料申請流程概要圖	6-2
圖 6-3 焚化再生粒料堆置後蓋上帆布	6-3
圖 6-4 原狀土過篩	6-4
圖 6-5 撒佈石灰	6-5
圖 6-6 鋪築焚化再生粒料	6-5
圖 6-7 挖土機初步上下翻拌	6-6
圖 6-8 農耕機完整拌和	6-6
圖 6-9 隔夜養治使混合料減水作用充分反應	6-7
圖 6-10 滾壓作業將混合料水分再次擠出	6-7
圖 6-11 滾壓與加強拌和作業分階段同時進行	6-8
圖 6-12 滾壓完成後工地密度試驗	6-8
圖 6-13 混合料運回工區進行填築滾壓	6-9
圖 7-1 福元公園示範計畫拌和區域圖	7-2
圖 7-2 現地試坑土方含水量分佈	7-3
圖 7-3 A20 第二停車場示範計畫拌和區域圖	7-3
圖 7-4 忠富路現場示範區域範圍圖	7-4
圖 7-5 福元公園 B 區詳細斷面設計比較	7-4
圖 7-6 A20 第二停車場詳細斷面設計比較	7-5
圖 7-7 忠富路 AB 區塊詳細斷面設計比較.....	7-6

圖 7-8 夯實試驗正向施作順序示意圖	7-12
圖 7-9 逆向式夯實試驗施作順序示意圖	7-12
圖 7-10 正向夯實試驗與逆向夯實試驗結果比較示意圖	7-14
圖 7-11 福元公園室內及現地拌和料改良夯實曲線比較示意圖	7-14
圖 7-12 桃園機捷 A20 第二停車場室內及現地拌和料改良夯實曲線比較示意圖	7-15
圖 8-1 AASHTO 求瀝青混凝土 a_1 係數	8-7
圖 8-2 AASHTO 求底層碎石級配料 a_2 係數	8-8
圖 8-3 AASHTO 求基層級配料 a_3 係數	8-10
圖 8-4 AASHTO 求水泥處理底層 a_2 係數	8-11
圖 8-5 AASHTO 求瀝青處理底層 a_2 係數	8-12
圖 8-6 AASHTO 求鋪面結構強度(SN)計算圖	8-16
圖 9-1 循環經濟之物料流模式	9-3
圖 9-2 碳管理進程	9-4
圖 9-3 基準情境與政策情境比較圖	9-5
圖 10-1 鋪面設計斷面	10-1
圖 10-2 試坑取樣的現地狀況	10-2

表目錄

表 2-1 土壤穩定添加劑選擇指南彙整表（節錄）	2-4
表 2-2 穩定添加劑種類使用時機參照表	2-5
表 2-3 各廠焚化再生粒料化學主要成分對照表	2-9
表 2-4 焚化再生粒料環境標準（用途）.....	2-9
表 2-5 焚化再生粒料環境標準（第一級標準）.....	2-10
表 2-6 焚化再生粒料環境標準（第二級標準）.....	2-10
表 2-7 焚化再生粒料再利用處理機構	2-19
表 2-8 飛灰與焚化再生粒料成分對照表	2-21
表 3-1 穩定劑穩定方法應用指南	3-5
表 3-2 石灰、飛灰物理及化學性質彙整表	3-8
表 3-3 石灰穩定土壤 CBR 值改善彙整表	3-9
表 4-1 天然粒料與焚化再生粒料的比表面積值之比較	4-4
表 4-2 不同狀態焚化再生粒料 pH 值試驗結果	4-5
表 4-3 不同篩號 pH 值試驗結果	4-5
表 4-4 黏土單位重量提供抗壓強度	4-7
表 4-5 基本物理性質試驗項目	4-8
表 4-6 不同配比混合料化學穩定前後阿太堡限度試驗結果比較	4-10
表 4-7 夯實試驗項目	4-10
表 4-8 無圍壓縮試驗項目	4-13
表 4-9 49°C 養治 48 小時哈佛小型夯實試體強度與破壞應變值	4-17
表 4-10 路基土壤強度試驗	4-19
表 4-11 CBR 試驗結果綜整表(桃園粒料為例).....	4-24
表 4-12 耐久性評估試驗中各配比平均重量損失率	4-26
表 4-13 各地區焚化再生粒料粒徑分析與土壤分類統整	4-27
表 4-14 各地區焚化再生粒料氧化鈣含量統計表	4-28
表 4-15 各地區各配比混拌料改良哈佛小型夯實無圍壓縮強度	4-30
表 4-16 各地區各配比混拌料改良夯實無圍壓縮強度	4-30

表 5-1 單位用量對照表	5-7
表 5-2 查表範例-A	5-8
表 5-3 查表範例-B	5-8
表 6-1 焚化再生粒料應用於土壤穩定主要使用機具	6-10
表 7-1 福元公園工地密度試驗結果	7-6
表 7-2 A20 工地密度試驗結果-1	7-7
表 7-3 A20 工地密度試驗結果-2	7-7
表 7-4 忠富路工地密度試驗結果-1	7-7
表 7-5 忠富路工地密度試驗結果-2	7-8
表 7-6 第 02317 章構造物回填	7-8
表 7-7 第 02331 章基地與路堤填築	7-8
表 7-8 三項示範工程的實際配比用量	7-10
表 7-9 三項示範工程夯實度及含水量變化表	7-10
表 7-10 三項示範工程鋪面各層材料反算彈性模數統計	7-11
表 7-11 焚化再生粒料環境標準(二級標準)比對	7-16
表 7-12 混合料有害事業廢棄物認定標準(TCLP)比對	7-16
表 7-13 混合料土壤污染管制標準比對	7-16
表 7-14 現地地下水標準比對	7-16
表 8-1 車道分配率(D_L)	8-3
表 8-2 AASHTO 建議 $R(\%)$	8-5
表 8-3 AASHTO R 與 Z_r 關係查核表	8-5
表 8-4 柔性鋪面基底層級配料排水係數 m_i 查核表	8-6
表 8-5 基底層級配料上瀝青混凝土最小厚度值	8-7
表 8-6 AIIS-181 交通量級別表	8-17
表 9-1 焚化再生粒料應用於土壤穩定單價分析範例	9-2
表 9-2 各載重量規格之運輸車輛耗能數據	9-6
表 9-3 碳排放量成效評估表	9-9
表 10-1 土壤與粒料含水量交叉混拌組合	10-2

表 10-2 9 組混合料含水量	10-3
表 10-3 混合含水條件與配比/工序調整	10-4

第一章 前言與簡介

1.1 目的與範圍

1.1.1 目的

本使用手冊提供焚化再生粒料應用於道路領域有關的土壤穩定操作的綱領指導。內容與行政院公共工程委員會（以下簡稱工程會）施工綱要規範中第 02317 章「構造物回填」及第 02331 章「基地與路堤填築」中與施工、材料與檢驗，以及鋪面設計相關。其應用包括基地路堤填築土壤穩定的設計和施工，可作為在工程中選擇適合土壤穩定配比設計的指南，並為排水、施工流程和面層鋪面（Pavement）厚度設計提供重要資訊。此外，本手冊亦針對焚化再生粒料於化學穩定與機械穩定合併表現機理加以說明；更深入探討與穩定成效有關的材料測試，以及如何在設計與施工過程中進行相關試(檢)驗。

關於土壤穩定於基地與路堤填築的反應機理以及成效控制方面，本手冊特別深入探討相關參考文獻並將其重點內容加以彙整，摘述於手冊相關章節，具體說明焚化再生粒料與傳統土壤穩定添加劑，例如石灰（Lime）、飛灰（Fly Ash）的共通性，以供更深入聯結相關的創新發現。此外，結合編撰團隊的知識和經驗，配合多方資訊與工程現場調查，於相關土方填築、鋪面設計和施工方面，為工程師提供土壤穩定相關豐富之資訊。而這些寶貴的內容，亦涵蓋了與土壤穩定領域有關的專家所提供的額外投入與貢獻。

編撰團隊所有的努力都是為了提供技術上正確的資訊，並且能夠有信心地加以合理應用，介紹並適當引用了傳統與先進的施工與測試技術。然而，工程師必須考慮現地的成本因素、氣候條件和工程在當地的其他影響因素，以便對本手冊所提供的技術設計和應用做出謹慎且合理的決定。

1.1.2 範圍

利用化學或機械方法穩定路基土壤是很常見的工程作為，化學穩定方法乃以化學添加劑加入到土壤中，作為改良劑或膠結劑。機械穩定則是通過拌和或混合不同種類的土壤，續以滾壓夯實程序以獲得滿足特定工程要求的材料【文獻 1.1~1.8】。

選擇合適的穩定方法（化學的或機械的）應考慮各方面的因素，需要對每種穩定類型的工程優點和限制加以瞭解。雖然化學穩定是本手冊的主要重點，但使用本手冊可以對機械穩定和化學穩定進行一些比較，以及合併應用上的優勢條件【文獻 1.9】。這是過去近 60 年來若僅採用傳統單一穩定方法所無法做到的成果，因此有必要更進一步詳細討論化學穩定劑，它與土壤和路基

穩定有密切的關係，常見的化學穩定劑包括【文獻 1.1~1.8】：

- 石灰
- 飛灰
- 焚化再生粒料（創新發現）【文獻 1.9】

1.2 背景

1.2.1 砂石資源現況

由於改良不適用土壤課題的需要性，使得學者專家們多年來不斷地評估新的方法、技術和材料以提升土壤穩定的處理任務。土壤穩定的概念已經存在了至少 5,000 年【文獻 1.1~1.3、1.5、1.6】，當時土壤穩定的方法是使用石灰或火山灰。由於經濟與成本考量，如今的土壤穩定劑替代材料也是一樣的被持續關注。這種對道路建設的獨特貢獻，在過去和現今都是有其正面積極意義的。土壤穩定是經濟道路建設、節省材料、投資保障和提升道路品質的重要手段。在許多情況下，在自然環境狀態下，不適用的土壤可以使用添加劑、添加粒料或適當的夯實等穩定方式使其符合後續的施工條件的要求。

近年來，天然的高品質砂石粒料短缺是一個極為重要的問題。以美國為例，公路建設消耗砂石粒料的年產量一半以上，導致原本可以供應充足粒料的地區，產生嚴重短缺的狀況。在所有類似的工程問題中，必須根據土壤穩定後因道路底層、基層粒料用量減少所帶來的效益去考慮整體成本與經濟性，以確定是否有進行穩定的必要。

每一種穩定添加劑（Stabilization Additive）的成本效益，通常是以一種或多種添加劑的效益作為最終設計準則的考量。然而，該標準可能會因為某一特定的穩定劑可用性而被推翻。無論該穩定劑具有多少的好處或具有多麼高的成本效益，如果不方便取得或成本過高就不會被選用【文獻 1.1~1.8】。

禁止開採和生產砂石粒料的法規，以及土地使用模式常造成砂石粒料無法充分供應，導致粒料成本上升。其結果是公路建設、土開建設，以及維護費用的增加。因此，非常需要找到更經濟的天然粒料替代品，而替代材料和改善劣等材料（Marginal Materials）的穩定技術是這個問題的焦點【文獻 1.3】。而替代材料、再生粒料或改善品質低劣的材料就是循環經濟至為重要課題之一【文獻 1.9】。

1.2.2 焚化再生粒料對循環經濟創新貢獻

近年來國內各縣市逐步開始推動執行，並積極落實焚化底渣再利用之國家政策。焚化底渣再利用處理程序需經過篩分、破碎及篩選等前置處理，且用途為道路的底層及基層級配粒料或路基及路堤填築等。前置處理應採穩定、熟化或水洗方式處理，經上述處理程序後所產生的再生粒料即為「焚化再生粒料」【文獻 1.10】。

桃園市政府工務局曾委託中原大學辦理「桃園市焚化再生粒料示範應用與規範修訂服務」，針對桃園市兩種現地土壤完成一系列分析【文獻 1.9】。此兩種土壤分別為中原大學土木館外側滯洪池施工之開挖土方，以「紅土」稱之（ASTM D2487 分類為 CH，高塑性黏土）；另一為桃園機場捷運 A8 重劃區土壤，以「黑土」稱之（ASTM D2487 分類為 CL，低中塑性黏土）。針對兩種土壤執行 pH 值試驗、哈佛小型夯實試驗（Harvard Miniature Compaction Test）、標準夯實試驗（Standard Proctor Compaction Test），以及以 23°C 溫度養治試體，齡期 0、7、14、28 天的無圍壓縮試驗。無圍壓縮試驗與標準夯實試驗結果顯示，加入焚化再生粒料後，無圍壓縮試樣的抗壓強度為原土的 2~3 倍。因此路基與路堤填築土方穩定性將可提高，遇水軟化的耐沖刷性亦可大幅提升，並達到節能減碳、直接成本降低，以及工進加速等顯著的循環經濟成效【文獻 1.9】。

另於工務局福元公園示範工程委託計畫中，除上述試驗外，並於現場試拌作業前，另針對過濕土壤的「福元土」（含水量>26%）於試驗室內以攪拌機進行「直接試拌」，模擬現場如無充足時間曝曬，直接以焚化再生粒料進行拌和的施工作業程序【文獻 1.11】。

綜合以上研究成果，再於「桃園機場捷運 A20 站區區段徵收工程」與「桃園市觀音區忠富路彎道改善工程」中，針對現地路基土壤，予以穩定化處理【文獻 1.12~1.13】。過濕土壤經添加焚化再生粒料進行拌和後，路基承載力（CBR）試驗值可提升 4 倍以上。若因土壤為極濕土壤，可再添加 1%石灰則 CBR 值可以提升至 6 倍左右【文獻 1.13】。

關於焚化再生粒料之循環經濟分析部分，以前述三項示範工程為例，以焚化再生粒料穩定處理極濕土方，其最大效益在於大幅縮短工期。試範工程皆僅以 1~2 天的時間即活化了不適用之現地土壤材料【文獻 1.11~1.13】。如此成果可有效達成焚化再生粒料的去化任務，並帶動相關產業的循環經濟具體深化與落實。

三項現地示範工程所呈現的成果摘要說明如下（詳細的介紹與評估內容請參閱後續章節）【文獻 1.11~1.13】：

1. 工程品質的提升（行政院公共工程委員會施工綱要規範：構造物回填、基地與路堤填築應用）

- 室內試驗顯示強度為原土的 2~3 倍
- CBR 值上升 4 倍以上
- 施工驗收夯實度容易符合規範需求的 >90% 或 >95%

2. 工期大幅縮短

焚化再生粒料攤散、翻拌、農耕機進場拌和、隔夜養治、滾壓驗收試驗僅需時約 2 天，但如僅針對極濕土方，曝曬、翻晒即可能需時 7~10 天以上，若遇雨天更可能需時數週。

3. 降低施工成本

含水量 >30% 的 B6 營建廢棄土方，若不堪工程使用即應外送棄土場或港灣填築【文獻 1.14】，將衍生額外的運輸費、施工費，以及借土、購土費。相較之下使用焚化再生粒料可降低施工直接工料成本 >30%（縮短工期部分尚未納入計算）。

節省土方運送，可降低 CO₂ 排放達 30% 以上，直接耗能的分析上節能效益顯著，全面推廣對社會、國家貢獻卓越。

回顧近十年來環保署與公共工程委員會關於焚化再生粒料之去化應用多在環保磚及控制性低強度回填料（Controlled Low Strength Material, CLSM），僅達到去化目的。對工程品質正面助益及降低成本效果不明顯且節能減碳亦難有成績，反而浪費了「焚化再生粒料」的潛在價值。

鑒於前述優異的成果，「福元公園」案亦在工程品質方面榮獲行政院公共工程委員會頒發「金質獎」。此外，降低成本、節省公帑及節能減碳之效益，對國家及社會的貢獻，則被中央部會重視肯定，獲得 2020 年「國家貢獻獎」之榮譽。再者，環保署亦於近一年來於全國各地持續推動「焚化再生粒料用於穩定過濕土方」的創新前瞻技術，已有其他縣市環保單位與桃園市工務單位邀請互訪交流與學習。

「焚化再生粒料去化應用」的研究與創新成果逐漸影響至全國各地，並不僅僅是三項示範工程的成果表現，而是累積了國際上近五、六十年的「土壤穩定」技術、工法的深厚理論基礎與實務成果。而行政院公共工程委員會亦接受了桃園市工務局的施工綱要規範編修申請，審查通過相關的條文，並於 2021 年 6 月 22 日正式公告實施【文獻 1.15~1.16】。

爰此，桃園市工務局所主辦的三項現地示範工程，其成果及結合國際相關規範、準則的工作，應再往前推動最重要的一步：編撰「焚化再生粒料穩定土

壤設計與施工手冊」，並以出版單位：「桃園市政府」，的名義呈現於全國各縣市，並可同步積極推向國際舞台。

1.3 定義

關於土壤穩定的深入介紹需要使用一些專業術語，使用者對這些名詞可能並不完全熟悉或者需要進一步了解其定義，以下針對這些專業術語予以簡要說明。

1.3.1 一般定義

1. TRB

運輸研究聯席會 (Transportation Research Board, TRB) 係美國國家學院 (科學院、工程學院、醫學院、創新科技學院) 轄下七大組織之一，成立於 1920 年，至今已達 101 年。相關專業的產、官、學、研的專家參與推動國家在運輸系統的研究發展。1972 年以前稱為 HRB (高速公路研究聯席會, Highway Research Board)，1973 年改為 TRB (運輸研究聯席會)。FHWA、AASHTO、ASTM、FAA 等均為其官方贊助的團體會員，而於各項領域的常設委員會 (如土壤穩定委員會)，前述官方團體均派員參與，並掌握新的發現與建議，配合即時修編前述部門相關的國家規範。

2. FHWA

美國聯邦公路總署 (Federal Highway Administration)，直接隸屬於美國運輸部。

3. USBR

美國墾務局 (United States Bureau of Reclamation, USBR)，是美國內政部下屬的聯邦機構，負責監督水資源管理，特別是引水與輸送的監督和運營。

4. AASHO、AASHTO

在 1973 年之前，AASHO 為美國州高速公路官署協會之簡稱 (American Association of State Highway Officials, AASHO)。1973 年後增加了運輸相關專業 (Transportation)，稱之為美國高速公路與運輸官署協會 (AASHTO)。凡州高速公路局，或州運輸處 (Department of Transportation, DOT)，以及有關執行公部門運輸相關計畫的顧問公司等

均為協會成員。

5. ASTM

美國試驗與材料學會（American Society for Testing and Materials）。

6. CNS

中華民國國家標準（National Standards of the Republic of China），於中華民國國內通行使用，並於國際標準協會註冊登記為“CNS”。

7. 土壤（Soil）

岩石經由物理和化學風化作用而產生的物質，或由其他固體顆粒堆積而成，可能含有也可能不含有有機物（ASTM D-18）。

8. 塑性土壤（Plastic Soil）

依據統一土壤分類法（ASTM D-2487）分類為 CL、CH 的土壤，此處統稱為塑性土壤，又稱黏土質土壤亦可包括 ML、MH、SC。

9. 過濕土壤（Wet Soil）

土方含水量為夯實最佳含水量(Optimum Moisture Content, OMC) +4% ~+8%（OMC+4%~OMC+8%），定義為過濕土壤。

10. 極濕土壤（Very Wet Soil）

土方含水量>OMC+8%或營建廢棄土分類 B6 土壤（含水量>30%）。

11. 土壤穩定（Soil Stabilization）

旨在增加或保持土壤的穩定性，或以其他方式改善其工程性質的化學或機械處理方法(ASTM D-18)。

12. 土壤改良（Soil Modification）

化學或機械處理方法，改善土壤的物理性質：降低塑性、膨脹性，含水量快速降低（Drying），將黏土顆粒粗顆粒化，強度提升不明顯。若穩定添加劑增加使強度可以明顯提升，則屬土壤穩定的土壤性質提升範疇【文獻 1.17~1.19】。

13. 化學穩定（Chemical Stabilization）

通過使用某些化學添加劑改變土壤的性質，當這些添加劑與土壤混合時，

通常會「永久改變」土壤顆粒性質。在某些控制條件下，還會將顆粒凝聚在一起形成較大的顆粒，進而提高強度。

14. 機械穩定 (Mechanical Stabilization)

由以下兩種方式之一以改變土壤性質：(1) 添加或去除顆粒改變土壤的級配，進行提升其強度；(2) 以正確的滾壓夯實方法增加土壤的密度以提升其強度。

15. 穩定添加劑 (Stabilization Additives, Stabilizers)

前述土壤改良或土壤穩定過程中所採用的添加劑或材料，稱為穩定添加劑，本手冊中一致採用「穩定添加劑」，有別於農業用的「穩定劑」。

16. 回彈模數試驗 (Resilient Modulus Test)

求取土壤勁度 (Stiffness) 之試驗 (AASHTO T274-82)。對圓柱形土壤試體 (類似於無圍壓壓縮試體) 施加固定大小、固定時間及固定週期的持續反覆荷重並量測試體產生的反覆變形，必須以重複加載方式為之。

17. 層係數 (Layer Coefficient)

鋪面系統結構數 (Structural Number, SN) 和鋪面層厚之間的經驗關係，用以表達材料作為鋪面結構組成的相對能力。

18. 排水係數 (Drainage Coefficient)

用於校正柔性鋪面的層係數或剛性鋪面強度的係數。這是鋪面結構如何妥善處理由水帶來的不利影響的能力，其係數的選用如同對應於鋪面暴露於接近飽和的潮濕環境。

19. 鋪面使用性能 (Pavement Serviceability)

對鋪面是否滿足該鋪面設計功能的程度評估。

20. 飛灰 (Fly Ash)

用於土壤穩定添加劑的飛灰，為火力燃煤電廠的附產品。若採用高效率的燃煤，則產生 CaO 含量較低的飛灰，自硬性效果低，不適用於土壤穩定目的，屬 F 級飛灰，台電所生產的飛灰屬此類。若採用較低效率的燃煤，其飛灰中 CaO 含量 > 10% 具自硬性，屬 C 級飛灰，適用於土壤穩定添加劑。

1.3.2 焚化再生粒料穩定土壤

焚化再生粒料中 CaO 含量高（約 $>20\%$ ），而焚化再生粒料中的 SiO_2 、 Al_2O_3 則以顆粒狀存在，所以 CaO 在焚化再生粒料中並不會與物、化性穩定的顆粒產生化學反應【文獻 1.17~1.20】。與「C」級飛灰的 CaO 成分所扮演的角色類似，飛灰亦是以細度小於 No.325 篩的細顆粒形成。CaO 在儲置過程中是一直存在或形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，但是在與黏土的拌和過程中，CaO 化學活性高的 Ca^{2+} 容易與帶負電荷的黏土顆粒產生化學反應，使得塑性降低、強度緩慢且持續地上升。而其它的早期功效如「快速減水」亦有著明顯的效果表現，其顆粒特徵：表面毛糙且多孔隙，極容易蒸發消散水分有緊密的關係【文獻 1.21~1.22】。

1.3.3 焚化再生粒料摻石灰穩定土壤

遇到極濕的黏土可考慮增加 1% 的石灰，以加速激發其內含 CaO 的化學反應，惟若考慮 1% 的石灰成本，則亦可以藉由增加一個循環的工地養治（隔夜）以及加強一次拌和方式，以節省該 1% 的石灰成本，但使用添加 1% 石灰的方式亦可使強度較未添加者高。

1.4 資料來源

本手冊引用的資料來源分列如下，主要為國內外慣用的規範、手冊、指南或相關論文。各章節分別引用之參考文獻則列於各章節之後。

1. 美國國家學院運輸研究聯席會（Transportation Research Board, National Academies of Sciences, Engineering, Medicine）相關論文、諮詢通告，以及技術手冊（Technical Report, 或 Circular）。土壤穩定委員會如化學與機械穩定委員會（Chemical and Mechanical Stabilization Committee）、膠結穩定委員會（Cementitious Stabilization Committee）等。
2. 美國聯邦高速公路總署（Federal Highway Administration, Department of Transportation）相關規範與諮詢通告。
3. 美國民航總署（Federal Aviation Administration, Department of Transportation）相關規範與諮詢通告。
4. 美國州高速公路與運輸官署協會（AASHTO）相關規範，以及 1993 年鋪面厚度設計步驟（AASHTO Thickness Design Procedure）。

5. 美國州高速公路與運輸官署協會（AASHTO）相關常設委員會的諮詢通告，另包括相關子委員會的技術報告，例如：
 - 技術子委員會 1a – 土壤與非膠結再生材料（Technical Subcommittee 1a – Soil and Unbound Recycled Materials）。
 - 技術子委員會 1b – 大地工程調查、監測、穩定及工地試驗（ Technical Subcommittee 1b – Geotechnical Exploration, Instrumentation, Stabilization and Field Testing）。
6. 桃園市工務局與相關單位的產學合作研究成果
 - 桃園市焚化再生粒料示範應用與規範修訂服務（2018 年 4 月~12 月）。
 - 焚化再生粒料應用於土石方穩定試辦工程委託專業服務（2019 年 1 月~7 月）。
 - 焚化再生粒料應用於基地填築試驗及輔導工程委託專業服務（2019 年 7 月~2020 年 3 月）。
 - 焚化再生粒料應用於道路路床改善試驗及輔導工程委託專業服務（2020 年 2 月~8 月）。
 - 桃園市焚化再生粒料於土方穩定應用之現地示範工程優化研究及施工規範草案編修（2020 年 5 月~2021 年 1 月）。
 - 焚化再生粒料應用於土壤穩定的循環經濟關鍵技術與工法的研究（2020 年 7 月~2021 年 6 月）。
7. 中原大學土木工程學系大地組碩士論文
 - 焚化爐底渣用於路基土壤或整地基礎穩定的成效與可行性研究-以林口紅土為例（2014 年，李健榮）。
 - 焚化爐底渣用於土石填方的資源化再生材料之成效研究（2015 年，婁智鈞）。
 - 焚化再生粒料穩定桃園紅土配比設計的控制條件研究（2019 年，歐立宸）。
 - 焚化再生粒料含水量管控對過濕土方材料穩定成效的配比設計研究（2019 年，廖文徽）。

- 焚化再生粒料在穩定過濕土方的室內與現場快速減水成效研究（2021 年，許晉偉）。

8. 發表論文

- TRB Journal, TR Record 發表的相關期刊論文。
- ASTM Geotechnical Testing Journal 發表的相關期刊論文。
- 土木水利工程學會學刊發表的相關期刊論文。
- 大地工程、鋪面工程、再生材料相關學術研討會論文。

1.5 手冊編排

本手冊共計十章，各章簡要內容說明如後。本手冊之編撰係由計畫主持人與協同主持人負責邀請編委成立編撰小組，內設組長與副組長。編撰小組的成員主要考慮其修課與專業訓練或研究專長與焚化再生粒料及土壤穩定的關聯性，以及針對土壤穩定相關專業知識的熟悉程度。

本手冊的編撰係參考國際行之有年的相關規範與文獻。第一章前言與簡介，與國際通用的設計施工規範相同，首先開宗明義針對焚化再生粒料穩定土壤之目的、背景及定義加以說明。

第二章土壤穩定添加劑選擇與使用成效，則是針對焚化再生粒料如何在化學與機械穩定機制上，結合過去近 50 多年的相關規範及手冊的內涵與準則。由於焚化再生粒料化學成分中 CaO 的成分較高（>20%），故本章針對 CaO，即石灰的穩定機制加以闡述。而飛灰之應用在國內已行之有年，因此其應用成果亦納入本章加以比較與對照。將石灰及飛灰於穩定土壤之應用一併討論，方可完整的了解焚化再生粒料穩定土壤的機理及效果。此外，有關焚化再生粒料的來源組成與其對土壤穩定的密切關係亦在本章做了必要的說明。

第三章土壤穩定添加劑反應特性與評析，係針對近年來焚化再生粒料穩定土壤成效的相關研究成果予以歸納彙整並加以綜合說明。第四章焚化再生粒料穩定土壤成效，探討焚化再生粒料針對過濕/極濕土壤(B6)之應用，說明添加少量（約 1%）石灰之必要性及其加速混和料化學穩定之成效。本章同時亦針對飛灰添加石灰的穩定效果予以比對與說明。

第五章焚化再生粒料用量與配比設計，針對焚化再生粒料用量與配比設計在以下條件特別提供配比設計建議：

1. 正常含水量的黏土可以降低塑性與膨脹率的成效說明。

2. 改善過濕黏土（如 B4）或極濕黏土（如 B6）的成效說明。

本章亦考量機械穩定中有關顆粒級配調整之應用，例如 1:1 重量比的混合是一個簡單又快速的方法，可直接改變原有土壤的級配，且土壤類別可由黏土改質成為砂土（SC）。相關的試驗步驟與方法包括：阿太堡（Atterberg）試驗之液、塑性限度，以及加州承載比試驗（CBR test）等。由於焚化再生粒料對過濕與極濕土壤均具有快速減水特性，不必經由曝曬降低土壤含水量，故可迅速縮短工期，其成效在節能減碳與降低直接成本均具有非常正面的意義。因此不論是在構造物回填或是路基與路堤的填築，極濕的土壤應用焚化再生粒料均可改質成為可提供交通運輸設施良好的荷重層，這是傳統穩定劑（如石灰）無法達到的（第二章將有重點說明與回顧）。焚化再生粒料改質行為之無圍壓縮試驗強度結果所表現的應力-應變的關係行為是十分重要的，尤其鋪面厚度設計中均可直接或間接影響到設計的厚度，而設計的厚度又直接影響到鋪面使用年限的生命週期，是提升道路品質的依據。

第六章施工步驟與機具，針對施工的步驟與施工機具進行說明並提供國內可以方便選用的機具與設備。第七章施工品質驗收與特殊考量，針對施工品質的驗收，說明土壤穩定混合料驗收考量與規定，以及如何快速決定混拌料的夯實曲線，由此可最迅速地完成工地密度的檢驗，不影響下階段的工進。現場混合料是最直接反應滾壓完成的材料，所以夯實曲線建議直接由混合料，在隔夜養治的過程中由試驗室進行改良夯實試驗取得。

第八章鋪面厚度設計，說明鋪面厚度與土壤穩定層設計考量。土壤穩定在運輸系統中，尤其於道路鋪面下方的承載效果有幾個重要的發展先決條件。由於砂石料源開採的緊縮，焚化再生粒料穩定土壤的目的在於提供一個良好的基礎層，使得上方的構造系統如鋪面可以有效的折減厚度。如此直接降低對砂石需求的依賴，減少施工成本，提升道路品質。所以鋪面厚度的設計是最終的成效表現。焚化再生粒料穩定後的路基、路床或路堤的填築成效，直接反應了鋪面厚度設計的參數選用。

第九章成本單價分析與循環經濟效益評估。成本單價的分析，如手冊前幾章節所述，焚化再生粒料之應用其優勢、方便性、去化的亮點等並非尋求一個設施或地方可以堆置，而是可以直接能於去化應用的場域上達到充分發揮出來的效益，這是本手冊一再強調的重點。因此針對直接成本降低、工期縮短、路面品質提升，以及全生命週期的強化，完備循環經濟的最高需求，在本章中做了完整的說明與結論。

第十章設計與施工範例。依據編撰團隊的經驗與相關參考資料的彙整，本章提供完整的焚化再生粒料於穩定土壤應用方面的設計與施工範例以供使用者之參考。焚化再生粒料對於過濕黏土的穩定具有良好成效，本手冊前述各章針對焚化再生粒料的特性、用量與配比設計、施工步驟與機具，以及施工品質驗

收與特殊考量等細節均已詳加說明。本章針對焚化再生粒料穩定過濕土方的設計與施工，特以過濕（或極濕）土壤及焚化再生粒料各三組的含水量，作為配比設計的依據參數，綜合彙整並配合範例予以說明。

參考文獻

- 1.1 Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J., Mitchell, J. K., and Thompson, M. R., “Soil Stabilization in Pavement Structures. A User’s Manual, Volume 1, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D. C., USA, 1979.
- 1.2 Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J., Mitchell, J. K., and Thompson, M. R., “Soil Stabilization in Pavement Structures. A User’s Manual, Volume 2, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D. C., USA, 1979.
- 1.3 TRB - State of The Art Report 5, “Reactions, Properties, Design, and Construction”, Prepared by Lime Stabilization Committee, TRB, National Research Council, Washington, D. C., USA, 1987.
- 1.4 Army TM 5-822-14, Air Force AFJMAN 32-1019, “Soil Stabilization for Pavements”, Department of The Army, The Navy, and The Air Force, Washington, D. C., USA, 1994.
- 1.5 Carpenter, S. H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations. Volume I, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D. C., USA, 1992.
- 1.6 Carpenter, S.H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume II, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D. C., USA, 1992.
- 1.7 TRB, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials”, NCHRP 144, Washington, D. C., USA, 2009.
- 1.8 Jones, D., Rahim, A. Saadeh, S., and Harvey, J. T., “Guidelines for the Stabilization of Subgrade Soils in California”, California, USA, 2010.
- 1.9 張達德，「桃園市焚化再生粒料示範應用與規範修訂服務」，桃園市政府工務局委託服務案期末報告，中原大學環控防災科技中心，2019。
- 1.10 行政院環保署，「底渣再生粒料用於道路工程試拌計畫」，成果報告，2014。

- 1.11 張達德，「焚化再生粒料應用於土石方穩定及構造物回填輔導工程」，桃園市政府工務局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2019。
- 1.12 張達德，「焚化再生粒料應用於基地填築試驗及輔導工程」，桃園市政府工務局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2020。
- 1.13 張達德，「應用焚化再生粒料於道路路床改善試驗及輔導工程」，桃園市政府工務局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2020。
- 1.14 中華民國內政部營建署綜合計畫組，「營建剩餘土石方處理方案」，2021。
- 1.15 中華民國行政院公共工程委員會施工綱要規範，「第 02317 章構造物回填」，2021。
- 1.16 中華民國行政院公共工程委員會施工綱要規範，「第 02331 章基地及路堤填築」，2021。
- 1.17 Petry, T. M., “The State of Art on International Practice on Soil Stabilization Technology for Pavement and Embankment - Regulation Brief on TRB, FHWA, FAA, AASHTO, and PCA”, 桃園市政府國際研討會，2019。
- 1.18 Petry, T. M., “Soil Stabilization class Note(土壤穩定授課講義)”，2009。
- 1.19 Petry, T. M., “Evaluation of Chemical Stabilizers”, Circulars prepared by Chemical Stabilization Committee, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D. C., USA, 1990.
- 1.20 張達德，「土壤穩定與地盤改良」，中原大學土木工程研究所授課講義，2020。
- 1.21 Chang, Dave. T. T., “The State of Art on Soil Stabilization for Pavement related Regulations - From TRB to FHWA, FAA, AASHTO, and PCA etc.”, 新加坡民航學院受邀講座，2019。
- 1.22 歐立宸，「焚化再生粒料穩定桃園紅土配比設計的控制條件研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2019。

第二章 土壤穩定添加劑選擇與使用成效

2.1 前言

本章介紹之準則內容可作為不適用土壤（黏土）選擇合適類型穩定添加劑的設計與施工指南。由於單一穩定添加劑並不適用於所有類型土壤，因此必須確定土壤穩定添加劑之特性，並應考慮可能影響穩定過程的相關因素。國際常引用之規範與文獻 2.1~2.4 均對土壤穩定添加劑之特性有詳盡說明，並提供嚴謹的設計與施工細節。

基地與路堤填築所採用的土壤和基礎材料考慮其穩定性，通常由以下一個或多個原因而需要進行穩定處理：

- 提供足夠的土壤強度以承載施工設備
- 提高施工之工作性
- 減小土壤吸水軟化和體積變化的特性
- 提高土壤承載能力並增加長期結構穩定性

以上土壤穩定成效皆可提高其構造物的工程性質及服務性能，如道路系統的耐用性並改善路面平順狀況。同時經由有效的土壤穩定處理，可以顯著降低道路的建設與維護成本，提高全生命週期的效益。

擇定合適的土壤穩定機理應用，以及選擇適當的穩定添加劑，必須了解選用材料的特性。透過試驗室測試以確定現地土壤或媒合借土材料的工程特性後，與適當的穩定添加劑進行試拌並進行試驗室與現場試驗驗證，以確認土壤穩定技術機理的適用性，並確定所需的穩定添加劑用量。

單一的土壤穩定添加劑對不同土壤類型的反應不盡相同，由於不同的土壤穩定添加劑性質，使得其與特定土壤反應的能力可能存在相當大的差異。當有多種適用的穩定添加劑選擇時，假設其穩定材料的工程特性相似，則必須考慮設備可適性及材料和施工成本，以達到最佳成本、施工效益，以及循環經濟之目標。

本手冊針對的土壤係以具塑性的細顆粒土壤為對象(如：黏土或塑性粉土)，砂性土壤不在考量範圍內。

2.2 土壤穩定目標與穩定添加劑作用

在選擇土壤穩定添加劑時，本手冊使用者必須了解土壤穩定的目的。土壤穩定的預期用途必須適用該工程之施工特性及服務成效針對不同的穩定添加劑選擇需綜合性考量。過去在國內工程遭遇現地不適土壤(如過濕土壤)，最常採用以水泥系添加劑硬化處理，但卻未考慮不同土壤特性及現場環境條件，進而未能達到長期穩定性之目的，且反而產生額外之碳排放量及揚塵而影響周遭環境。土壤穩定處理的主要目標應包括：

- 改善不良路基或路床條件
- 提高施工性
- 提供揚塵控制成效
- 提高土壤強度和耐久性
- 提供過濕土壤水分控制成效

土壤穩定添加劑如何落實穩定效果的過程取決於穩定添加劑的性質，以及它如何與被穩定的土壤相互作用。土壤穩定添加劑相互作用類型可分三大類如下：

- 主動性穩定添加劑，如：石灰與土壤發生化學反應
- 被動性穩定添加劑，不產生化學反應；只進行物理反應（如：瀝青）
- 中間性穩定添加劑，自身產生化學反應並與土壤或粒料形成物理結合（如：水泥、石灰-飛灰）
- 主動性兼具被動性穩定添加劑，目前國際上首先被發現兩者功能兼備的材料則為國內所推動“焚化再生粒料”之土壤穩定應用

2.3 土壤穩定添加劑選用準則

選擇穩定添加劑須考慮的因素包含與土壤的互制作用類型、穩定層所需的強度和耐久性、成本和環境條件。土壤穩定添加劑的選項根據土壤的粒徑及塑性與現地含水量等，經由下述的相關準則可決定選用最適當的添加劑。

2.3.1 石灰穩定準則

土壤添加石灰作為穩定添加劑，藉由陽離子交換能力產生強度增加的效益。石灰會與中至高塑性的土壤發生反應，可降低塑性、提高工作性並減少收縮膨脹，進一步持續性的增加強度。

一般而言，適用於土壤之類別為 AASHTO 土壤分類法之 A-4、A-5、A-6、A-7，以及某些 A-2-7、A-2-6、A-2-5 之土壤。而美國統一土壤分類法（Unified Soil Classification System, USCS）中，CH、CL、MH、ML、SC、SM、GC、GM、SW-SC、SP-SC、SM-SC、GW-GC、GP-GC 或 GM-GC，均被視為具適用條件的石灰穩定對象。

石灰穩定的一般準則，為對於土壤塑性指數（PI）大於 10 或通過 200 號篩大於 25% 的土壤，石灰可視為主要穩定添加劑，或預穩定添加劑【文獻 2.5】。

如圖 2-1 所示，土壤級配分佈特徵以三角形座標圖呈現，根據土壤粒徑分佈特徵，劃分為 1A、2A、1B、2B、1C、2C 等區域。依通過 No.200 篩之重量百分比和通過 No.4 篩但停留在 No.200 篩之重量百分比，在座標圖中產生交叉點值並呈現於適用區域（如：1A、2A、3 等）。再於表 2-1 檢核每個區域依據粒徑分佈及塑性指數，選擇適用的土壤穩定添加劑。而針對三角座標法的分類與分區，可以很明顯地看到黏土的區域屬於第 3 區，故請參照建議表 2-1，其他類別土壤則不再本手冊探討【文獻 2.4】。

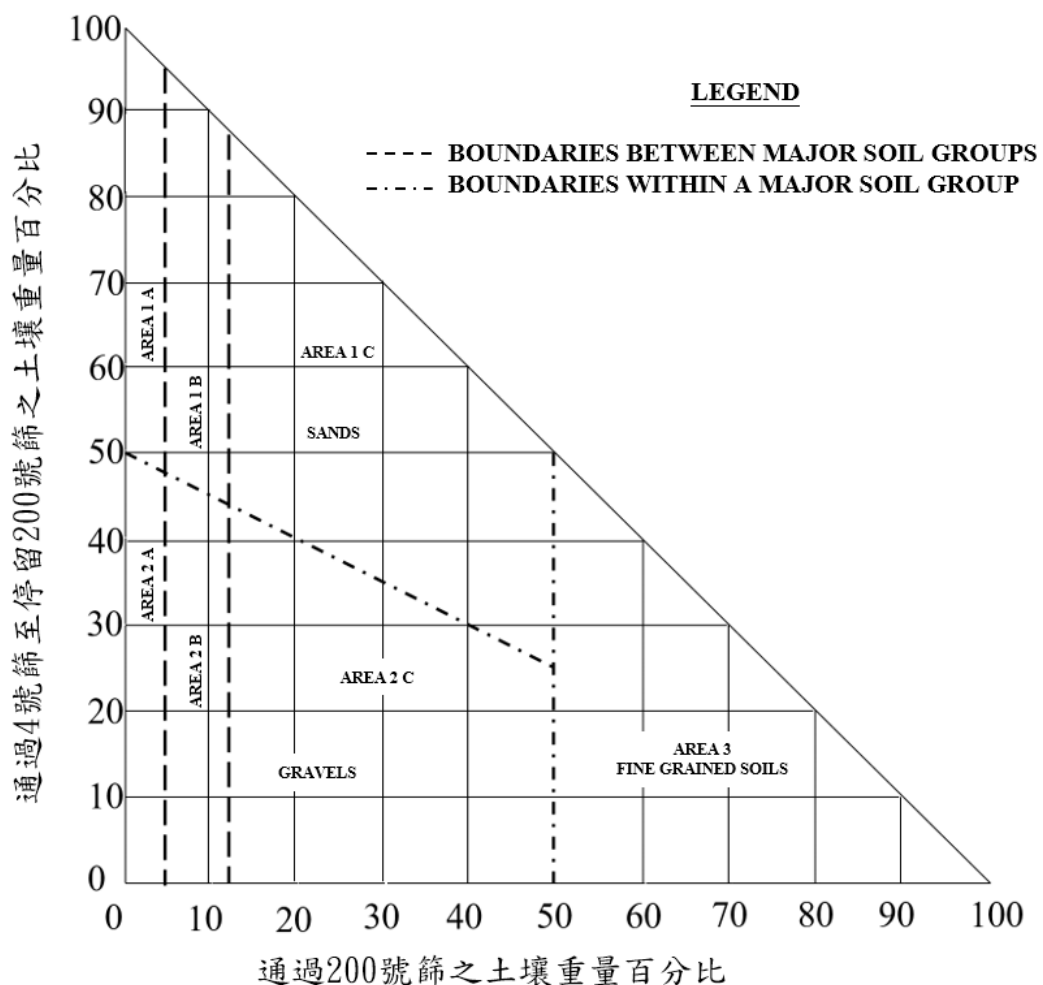


圖 2-1 土壤粒徑分佈與穩定添加劑選擇關係示意圖【文獻 2.4】

表 2-1 土壤穩定添加劑選擇指南彙整表（節錄）【文獻 2.4】

區域	土壤分類 Soil Class	建議添加穩定 添加劑類型 Type of Stabilizing Additive Recommended	土壤液性限 度與塑性指 數的限制 Restriction on LL and PI of Soil	通過 200 號篩 百分比 Restriction on Percent Passing No.200 Sieve	備註 Remarks
3	CH or CL or MH or ML or OH or OL or ML-CL	(1) Portland Cement 水泥 (2) Lime 石灰	LL < 40 PI < 20 PI > 12	>50%	Organic and strongly acid soils falling within this area are not susceptible to stabilization by ordinary means 有機土與酸性土 壤不適用

例如，土壤分類為 CL，其中 93% 通過 No.4 篩，55% 通過 No. 200 篩，液性限度為 LL=49，塑性限度為 PL=18。因此，土壤中有 38% 的重量介於 No. 4 篩和 No.200 篩，塑性指數為 PI=31，依據上述數據輸入圖 2-1，得出的值交於「3」的區域。由表 2-1，「3」區查詢有二種穩定添加劑材料可選用，但是 PI>12 且>20%要選擇的添加劑即為“石灰”，水泥則被排除在外。一旦確定使用的穩定添加劑類型，樣品需在實驗室中進行準備和測試，以符合現場穩定最佳應用的配比設計組合。

針對塑性土壤穩定方法的擇定，提供穩定添加劑的使用時機參照表，見表 2-2 【文獻 2.6】：

表 2-2 穩定添加劑種類使用時機參照表【摘錄文獻 2.6】

Admixture 穩定添加劑	Soil type 土壤種類	Improvement 改良成效	Remark 備註
- Portland Cement 水泥	Plastic 塑性土壤	--	Less pronounced hydration of cement 水泥水化凝結不明顯
	Coarse 粗顆粒土壤		Hydration of cement 水泥水化作用
- Lime 石灰	Plastic 塑性土壤	Drying 減水	Rapid 快速
		Strength gain 土壤強度提高	Rapid
		Reduce plasticity 減少塑性	Rapid
		Coarsen texture 呈粗粒狀	Rapid
	Coarse with fines 含細顆粒之粒 狀土壤	Long-term pozzolanic cementing 長期卜作嵐效應	Slow 反應較慢但持續
		Same as plastic 同塑性土壤	Dependent on quantity of plastic fines 取決於 塑性細粒料含量
	Non-plastic 非塑性	None 不適用	No reactive material 無反應材料
- Lime-fly ash 石灰-飛灰	Same as lime 同石灰	Same as lime 同石灰	Covers broader range 使用範圍更廣

2.3.2 飛灰穩定準則

燃煤電廠所產生之飛灰於早期已作為混凝土之添加使用，但是將飛灰作為路基土壤穩定或回填土方穩定於國內使用之經驗甚少。國科會（今為科技部）於 1986 年之計畫“石灰與飛灰對林口紅土穩定效果之研究”及 1987 年台灣電力公司“台灣電力公司飛灰對台灣公路路基土壤穩定之應用與效果分析”為國內此研究之先驅【文獻 2.7】。其研究成果顯示飛灰應用於路基改良之成果顯著，可做為減少使用碎石級配資源選項，達到循環經濟之功效。以下說明飛灰性質與飛灰穩定原理。

1. 飛灰之物理化學性質

(1) 飛灰成分

飛灰的化學成分，因煤礦源不同而有所差異。飛灰主要成分是由二氧化矽（ SiO_2 ）及氧化鋁（ Al_2O_3 ）組成的微小玻璃質球體（Tiny Glassy Spheres）。而台灣之飛灰 CaO 含量約 3% 以下，

SiO₂ 含量一般約 50%以上。

(2) 物理性質

飛灰的組成中，玻璃狀球體的粒徑大約在 1~50 microns 之間，平均的粒徑多分布在 8μm 左右。飛灰的顏色受到化學組成影響，氧化鈣含量高的飛灰成淡灰色（灰白色）。而無煙煤或煙煤所產生的飛灰則受到鐵化物與碳的影響而成灰色。

飛灰的比重大約分布在 2.1~2.6 間，乾密度約在 1.01~1.78g/cm³ 間【文獻 2.8】，無論比重或乾密度均較一般土壤輕。一般情況下，飛灰分類的原則是依據不同層次工程判斷的需要以簡化分類試驗的程序。臺灣電力公司所生產的飛灰在粒徑分佈上品質均很穩定（70%以上通過 No.325 篩）。

2. 飛灰的自硬性

飛灰具有不同程度的自硬性，為了判斷飛灰膠結性質（Cementitious Property）的強弱，以決定添加劑（飛灰自硬性改良劑）的使用與否，因此，依據飛灰自硬性（Self-hardening）之定義，將飛灰分為自硬性飛灰與非自硬性飛灰二類。其定義與分類原則敘述如下【文獻 2.9】：

(1) 自硬性定義

本身具有膠結性質的飛灰，無需藉助添加劑（自硬性改良劑，如石灰或水泥）的作用，混合水份並經過一段時期的養治後，即可產生可觀的無圍壓縮強度，其性質稱為自硬性。

(2) 飛灰自硬性分類原則

飛灰的氧化鈣（CaO）含量（重量百分比）10%作為自硬性分類的界限，而將自硬性飛灰與非自硬性飛灰可分別定義如下：

● 自硬性飛灰

氧化鈣含量高於 10%的飛灰（C 級）膠結性質顯著，稱為自硬性飛灰。

● 非自硬性飛灰

氧化鈣含量少於 10%的飛灰（F 級），膠結性質不顯著，稱為非自硬性飛灰。若添加適量的石灰，即可提高其自硬性，轉化為與 C 級飛灰相似。

3. 飛灰自硬性改良之型態

針對非自硬性飛灰膠結性質不顯著之特性，本節中定義下列名詞以便於飛灰自硬性改良型態之討論：

(1) 自硬性改良劑 (Self-hardening Modifier)

以改良飛灰膠結性質為目的；使改良後的飛灰具有自硬性，而添加入飛灰成份中的化學弱劑定義為自硬性改良劑。在飛灰穩定示範工程中最常用的自硬性改良劑以石灰為主。

(2) 改良飛灰 (Modified Fly Ash)

添加自硬性改良劑，以改良飛灰自硬性的混合飛灰定義為改良飛灰，以添加石灰為宜。

4. 飛灰之穩定原理

(1) 自硬性飛灰的穩定原理

自硬性飛灰氧化鈣成份含量高，具有明顯的膠結性質，不需添加自硬性改良劑，即可直接應用於土壤穩定上，其工程性質亦與水泥系材料相似。除了對黏土可產生部份的陽離子交換效果以抑制膨脹外，其穩定土壤的原理主要考慮下列效應（僅針對低至高塑性的黏土、粉土）

- 陽離子交換
- 填充效應（應用於顆粒性土壤與粒料）
- 膠結效應
- 卜作嵐效應

(2) 非自硬飛灰的穩定原理

必須添加自硬性添加劑（即石灰），始能有效用於土壤穩定應用。石灰-飛灰混合劑的穩定原理主要是考慮石灰添加後所產生的穩定效應。其穩定原理可歸納如下（僅針對低至高塑性細顆粒黏土、粉土）：

- 石灰與黏土顆粒的陽離子交換（Cation Exchange）作用
- 石灰與飛灰與黏土顆粒間所產生的卜作嵐效應
- 石灰的密簇-凝聚（Flocculation-agglomeration）作用

2.3.3 焚化再生粒料穩定土壤準則

焚化再生粒料是一般廢棄物經焚化處理後，經由焚化底渣再利用機構再次處理後之產物，為經焚化燃燒後所產生之不可燃物。由於各縣市之垃圾廢棄物成分與焚化再生粒料處理廠的處理程序不盡相同，焚化再生粒料的組成來源仍有些許差異存在【文獻 2.10】。

1. 焚化再生粒料之物理特性

焚化再生粒料組成包含有陶瓷、玻璃、鐵及非鐵金屬物質、不可燃物質以及未完全燃燒的有機物質。焚化再生粒料外觀呈深灰色，烘乾後的焚化再生粒料則為淺灰色，且明顯呈現結塊現象，但經由手輕微撥動或是振動其容器，便可輕易將結塊分散。國內外研究顯示焚化再生粒料具惰性、質輕、強度高、壓縮性低及無塑性等特性，但須注意焚化再生粒料較天然材料易脆裂及磨損率較高之問題，相較於砂石具較低之比重和較高的吸水率。

經由 SEM 電子顯微鏡拍攝與比表面積值試驗發現，焚化再生粒料屬於多孔性輕質聚集物，具有高比表面積值的特性。因為焚化再生粒料多孔隙與高比表面積的特性，其物理性排水的效果顯著【文獻 2.10】。

2. 焚化再生粒料之化學特性

因焚化再生粒料為多種一般廢棄物來源所產出，故其在化學組成方面相當複雜，大部分由 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Cl 等氧化物所組成，且以 SiO_2 、 CaO 佔最大部分。依據相關研究成果所示（表 2-3），各焚化廠再生粒料化學成分中， CaO 含量均約在 20~30%， SiO_2 雖佔 25~30%（屬砂土基本成分），但同時存在的環境中，兩者不會互相作用且處於穩定狀態，其中 CaO 含量大於 20% 能發揮與石灰穩定（Lime Stabilization）相同的化學穩定機制與祛水特性【文獻 2.10~2.11】。

表 2-3 各廠焚化再生粒料化學主要成分對照表【文獻 2.11】

檢驗項目	桃園市焚化底渣 ROT 處理場	高雄市焚化廠	新店焚化廠	樹林焚化廠
SiO ₂	33.12%	29.35%	25.49%	28.22%
Al ₂ O ₃	7.64%	8.30%	6.04%	3.57%
Na ₂ O	3.73%	2.69%	-	-
K ₂ O	1.02%	1.60%	-	-
MgO	1.86%	1.91%	-	-
CaO	21.03%	30.93%	19.79%	21.39%
TiO ₂	1.19%	-	-	-
Fe ₂ O ₃	8.71%	7.72%	6.48%	7.46%
SO ₃	2.19%	-	-	-
P ₂ O ₅	4.5%	-	-	-
Mn ₂ O ₃	0.24%	-	-	-
Cl	1.75%	-	1.70%	3.53%
Total	86.96%	82.5%	59.5%	64.17%

3. 焚化再生粒料之重金屬特性

焚化再生粒料須注意的要點之一為其重金屬成分是否有確實穩定化處理。依據行政院環境保護署 2022 年公告「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」，其中定義焚化再生粒料為指底渣經再利用處理程序後之產出物，且為再利用廠出廠前之焚化再生粒料訂定了明確的用途與檢測標準，如表 2-4、表 2-5、表 2-6【文獻 2.13】，完整管理方式見附件 A。

表 2-4 焚化再生粒料環境標準(用途)【文獻 2.13】

使用地點	用途	環境標準
屬公告事項七之 限制使用地點	1. 控制性低強度回填材料 (且用於管溝工程)。(本項不得用於公告事項七第一項第一款規定之相關水質水量保護區)。	第一級標準
	2. 磚品。	
	3. 用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品。	
非屬公告事項七 之限制使用地點	1. 基地填築。	第二級標準
	2. 路堤填築。	
	3. 港區填築。	
	4. 道路級配粒料底層及基層。	
	5. 控制性低強度回填材料。	
	6. 低密度再生透水混凝土。	
	7. 瀝青混凝土。	
	8. 磚品。	
	9. 用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品。	

表 2-5 焚化再生粒料環境標準 (第一級標準)【文獻 2.13】

焚化再生粒料環境標準 (第一級標準)		
檢測項目		標準值
戴奧辛總毒性當量濃度(ng I-TEQ/g) 備註：指含 2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物等 17 種化合物之總毒性當量濃度		≤0.1
粒徑大小(mm)		≤19
雜質		不得含有大小任二尺度（長度、寬度、深度）超過 20mm 之可燃物、鐵金屬、非鐵金屬，以及電池與可辨識之市售產品。
再生粒料環境用途溶出程序 (NIEA R222)	鉛(毫克/公升)	≤0.01
	鎘(毫克/公升)	≤0.005
	鉻(毫克/公升)	≤0.05
	銅(毫克/公升)	≤1.0
	砷(毫克/公升)	≤0.05
	汞(毫克/公升)	≤0.002
	鎳(毫克/公升)	≤0.1
	鋅(毫克/公升)	≤5.0

表 2-6 焚化再生粒料環境標準 (第二級標準)【文獻 2.13】

焚化再生粒料標準 (第二級標準)		
檢測項目		標準值
戴奧辛總毒性當量濃度(ng I-TEQ/g) 備註：指含 2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物等 17 種化合物之總毒性當量濃度		≤0.1
粒徑大小(mm)		≤19
雜質		不得含有大小任二尺度（長度、寬度、深度）超過 20mm 之可燃物、鐵金屬、非鐵金屬，以及電池與可辨識之市售產品。
再生粒料環境用途溶出程序 (NIEA R222)	鉛(毫克/公升)	≤0.1
	鎘(毫克/公升)	≤0.05
	鉻(毫克/公升)	≤0.5
	銅(毫克/公升)	≤10
	砷(毫克/公升)	≤0.5
	汞(毫克/公升)	≤0.02
	鎳(毫克/公升)	≤1
	鋅(毫克/公升)	≤50

2.4 土壤類別適用性討論

2.4.1 土壤穩定處理方法概述

依據【文獻 2.1~2.5】整理之土壤穩定處理方法分述如下：

1. 石灰穩定處理 (Lime Stabilization)

由於石灰 (CaO) 穩定主要源自細粒土壤與石灰的多種反應故適用於低至高塑性黏土或粉土，其塑性行為參數請參考表 2-1。

土壤、石灰之反應產物為水化矽酸鈣與水化鋁酸鈣，其水化形式具多種變化；當足量的石灰拌入土壤其混合料的 pH 值可高達 12.4，因可顯著

提昇土壤 pH 值而促進矽、鋁溶解加速反應。土壤、石灰之反應需能顯著的增加強度才能稱之為「反應」。若於 23 °C 養治 28 天，其無圍壓縮強度小於 345kPa，則稱「無反應」【文獻 2.14】。另一方面， $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ 稱石灰碳化（Lime Carbonation）為負面反應，宜避免，即勿使石灰長期暴露或長時間強烈拌和與翻動。

2. 飛灰穩定處理（Fly Ash Stabilization）

火力發電廠燃煤之灰燼約為燃煤量之 15%；煤灰中顆粒較大者稱底灰約佔 20%，餘為較細顆粒之飛灰。於工程應用上，使用飛灰旨在將其適當處理以降低環境衝擊，並非特別期待其穩定土壤之效果（雖其具與鹼性土壤產生膠結物之自硬效應），故一般需配以石灰或水泥以穩定土壤。飛灰顆粒較大（ $<0.3\text{mm}$ ）成為塑性土填隙料之效果不彰，認為僅粉土較適合飛灰穩定處理。

3. 組合穩定處理（Combination Stabilizers）

即石灰-水泥穩定處理（Lime-cement Stabilization）、石灰-瀝青穩定處理（Lime-asphalt Stabilization）等，均先以石灰處理黏土降低其塑性有利於拌和工作性後，再拌和水泥或瀝青以達穩定之目的。

2.4.2 過濕土壤穩定

1. 水泥穩定

以水泥固化土壤之主要目的為改良其工程性質（抗壓縮、抗剪、透水、表面磨耗），改良後的成效，受土壤、水泥化合物及外在條件等因素影響，包含被穩定土壤種類、土壤 pH 值、土壤有機雜物含量、拌和水質、土壤含水量、水泥含量、拌和及夯實度以及養治期等。其中，被穩定對象的土壤需具適當的含水量以滿足水泥水化反應所需之水量；若其含水量過高，則如同水灰比過大會降低混凝土強度，於拌和夯實過程中土壤孔隙水會增大水灰比致強度降低。因此，「公共工程委員會施工綱要規範」第 02715 章水泥處理土壤中，說明水泥與土壤均勻拌和後之混合料含水量與試驗室試驗所得之最佳含水量比較，不得大於 3% 或低於 2%。再者，水泥成分與水作用時，鈣離子（ Ca^{2+} ）少部分會與黏土顆粒產生陽離子交換作用，但減水效果差。在【文獻 2.5】中明確指出水泥用於乾燥減水的成效不明顯。

2. 焚化再生粒料的過濕土壤穩定（石灰效應）

當現地土壤含水量大於 30%，則被視為極濕土壤（ $w > 30\%$ ），在營建剩餘土石方分類中屬於 B6 類，需運至合法之棄土場並額外購土或以媒合

方式置換土方。若利用焚化再生粒料含有大於 20%之 CaO 的特性與土壤拌和後，同樣能夠透過展現與石灰相同的祛水特性。經由機械拌和穩定後，除改變土壤分類亦可改變營建廢棄物分類，使原本過濕土方活化成為優良的土方填築材料【文獻 2.15】。以桃園機捷 A20 第二停車場為例，其試驗結果如圖 2-2 所示。原現地土方為中—高塑性黏土（CH），且自然含水量大於 30%（31~33%），營建廢棄物分類為 B6。在與焚化再生粒料拌和後，由黏性土壤轉變為砂性土（SC），營建廢棄物分類也從 B6 轉變為 B2，從原必須運棄之過濕土方轉變為可填築之良好材料。其祛水與快速減水（乾燥過濕土）的功效，將於 2.5 節深入說明。

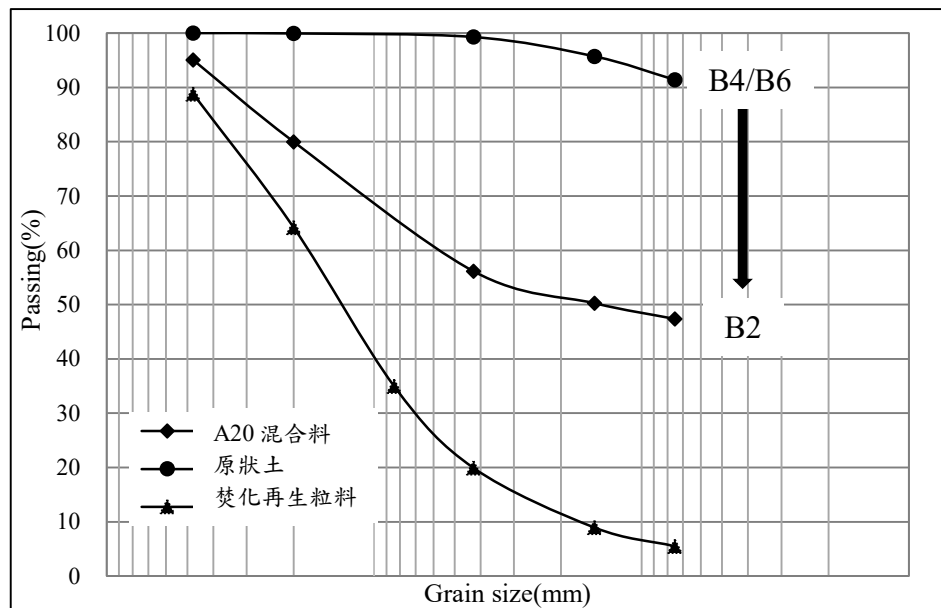


圖 2-2 焚化再生粒料拌和後土壤粒徑分佈變化關係圖【文獻 2.12】

2.5 土壤穩定混合料相關性質改善

2.5.1 化學穩定定義與機理

1. 定義

化學穩定係指以添加物混入土壤，以產生化學反應使其改變土壤對水的靜電電價平衡的吸引能力。常見混合添加物及方法有石灰、飛灰、分散劑、磷酸法、加鹽法、有機離子法等，本節以石灰為例說明其穩定機理。

石灰分成生石灰（Quick Lime）與熟石灰（Hydrated Lime）。近 60 年來（1960 年代以來），在美國已被聯邦高速公路總署（FHWA）以及各州高速公路局（或運輸處，DOT）廣為使用於“穩定路基與路堤填方的標準材料”。早年因石灰價格便宜且容易取得，故常被用來做土壤穩定或土

壤改良的添加物，已是現今最常見添加物。而一些工業的副產品會含有 CaO 成分的也被循環利用於土壤穩定領域中，例如飛灰。

2. 石灰改良改變的土壤性質

石灰改良或石灰穩定機理的前期表現，為土壤添加石灰後 24~72 小時間的反應，提供塑性降低與土壤早期強度。主要反應以石灰提供鈣離子 (Ca^{2+}) 改變黏土顆粒性質，使黏土顆粒改變為“似粉土狀 (Silty-like)”的土壤特性。此時 CaO 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的用量稱為最佳石灰改良用量 (Lime Modification Optimum, LMO)，這個用量均用於降低土壤塑性及提升工作度，惟對強度提升的能效則不明顯。工地土壤過去祛水就是採用 LMO 用量處理，其能效說明如下：

- (1) 膨脹性降低：隨著石灰用量增加，使得鈣離子 (Ca^{2+}) 在土壤中呈飽和狀態時，黏土膨脹性大幅下降。
- (2) 塑性降低：經過石灰改良的土壤其液性限度將會大幅下降、塑性限度將會大幅提升，伴隨著塑性指數將會下降，由高塑性 (H) 降至低塑性 (L)。
- (3) 黏土吸水、保水能力降低 (減水乾燥易)：若使用石灰拌和料進行拌和，石灰會與拌和土壤中的水立即產生水化反應並釋放大量熱量，這是減水原因之一。拌和土壤中的部分水分因與石灰產生水化反應而消失，其餘部分水分則會因拌和土壤受熱而蒸發，進而使得拌和土壤之整體含水量下降。
- (4) 夯實特性的改善：使用石灰改良後的土壤，最大乾密度下降，而最佳含水量上升，使土壤進入易於夯實的含水量範圍，當用於具有高含水量的土壤時，效果會特別明顯。

3. 石灰改良的化學反應原理

石灰在一定程度上可以改變所有細粒土壤的工程性質，在中、高塑性的黏土中會有最顯著的效果。石灰改良主要是由於石灰提供的鈣離子 (Ca^{2+}) 與黏土礦物表面上正常吸附的陽離子 (H^+) 交換而發生的。主要的化學反應有以下四種：

- (1) 陽離子交換作用 (Cation Exchange)
- (2) 密簇-凝聚作用 (Flocculation-agglomeration)
- (3) 水化作用 (Hydration Reaction)

(4) 離子擠塞作用 (Ion Crowding)

4. 石灰穩定與離子飽和狀態卜作嵐效應 (Pozzolanic Reaction)

卜作嵐效應是石灰與火山灰經由膠結效應 (Cementitious Reaction) 與結晶硬化過程而產生強度的化學反應。在常溫時，火山灰效應進行緩慢，且持續相當長的時間，其膠結硬化過程的生成物與波特蘭水泥水化作用生成物相似。

石灰在土壤中陽離子與交換平衡電價作用完成時，稱為鈣離子飽和狀態。鈣離子會增加整體 pH 值，在高 pH 值 (>10.5) 的環境下會溶解片狀黏土表面，形成鋁酸鹽 (Al^{+3}) 與矽酸鹽 (Si^{+4})。當石灰與含有可溶性矽酸鹽和鋁酸鹽 (如黏土和淤泥) 的物質接觸時，它會形成水合鋁酸鈣和矽酸鈣等膠結性化合物 (Cementitious Compounds) 的材料，稱為火山灰 (Pozzolan)。當石灰用量超過 “LMO” 時，即產生卜作嵐效應，分短、中及長期增加土壤強度，此為 “Lime Stabilization” 的功能。石灰穩定的卜作嵐效應反應式如下：

- (1) 火山灰混合料 (石灰) 經水合形成 CSH 凝膠與 CAH 凝膠
- (2) CSH 凝膠經結晶硬化形成 CSH I
- (3) CSH I 經再結晶硬化形成 CSH II
- (4) CSH II 經再結晶硬化形成雪矽鈣石

CAH 為凝膠狀鋁酸鈣水合物 (Gelatinous Calcium Aluminate Hydrates)，產生時間非常快 (24hr)，但提供強度低，難作為早期或長期強度。CSH I 為低階結晶水合矽酸鈣 (Low Order Crystalline Calcium Silicate Hydrates)，快速形成 (7~10 天)，快速產生早期強度，但不會影響長期強度的增量。CSH II 為高階結晶水合矽酸鈣 (High Order Crystalline Calcium Silicate Hydrates)，形成時間緩慢 (10 天 ~3 年)，從 CSH I 和更多 Al^{+3} 、 Si^{+4} 作用以產生較高的長期強度。

石灰穩定係指石灰破壞拌和黏土的黏土礦物，屬於土壤穩定法裡面的化學穩定法 (Chemical Stabilization)。長期的膠化作用下，逐漸增加土壤強度，以提供長期的土壤強度。

2.5.2 機械穩定定義與機理

機械穩定係指以人為、機械或動力的方式，將土壤孔隙變小，或添加碎石提高內摩擦角 (ϕ) 以達到改善工程性質的目的。常見方法有夯實法、改變級

配法等。以土壤-碎石混合理論（Soil Aggregate Mixture）機械穩定法為例，研究指出礫石和細粒土壤對土壤碎石混合物強度變化的影響。其中提到最大密度與碎石（粗顆粒）和黏結劑（Binder 即黏土細粒料）比例之間的關係。如果夯實混合料中的孔隙體積被認為是被黏土所填充，那麼最佳配比將是 22% 黏土和 78% 的碎石，試驗結果如圖 2-3 所示【文獻 2.16】。

研究試驗提出了一種確定最佳承载力混合配比的簡便方法，並表明粗細顆粒之混合物之間有互相箝制的機制。適當比例的混合粗細顆粒，可以使細顆粒填充於粗顆粒間的孔隙，使試體更為緻密，單位重提升，抗壓強度上升。然而就焚化再生粒料而言，其與土壤混合之後，因為化學穩定機理（CaO 的存在）使得凝聚力 $C (=q_u/2)$ 提升 2 倍以上，且摩擦角亦會隨粒料的增加而逐步提升。

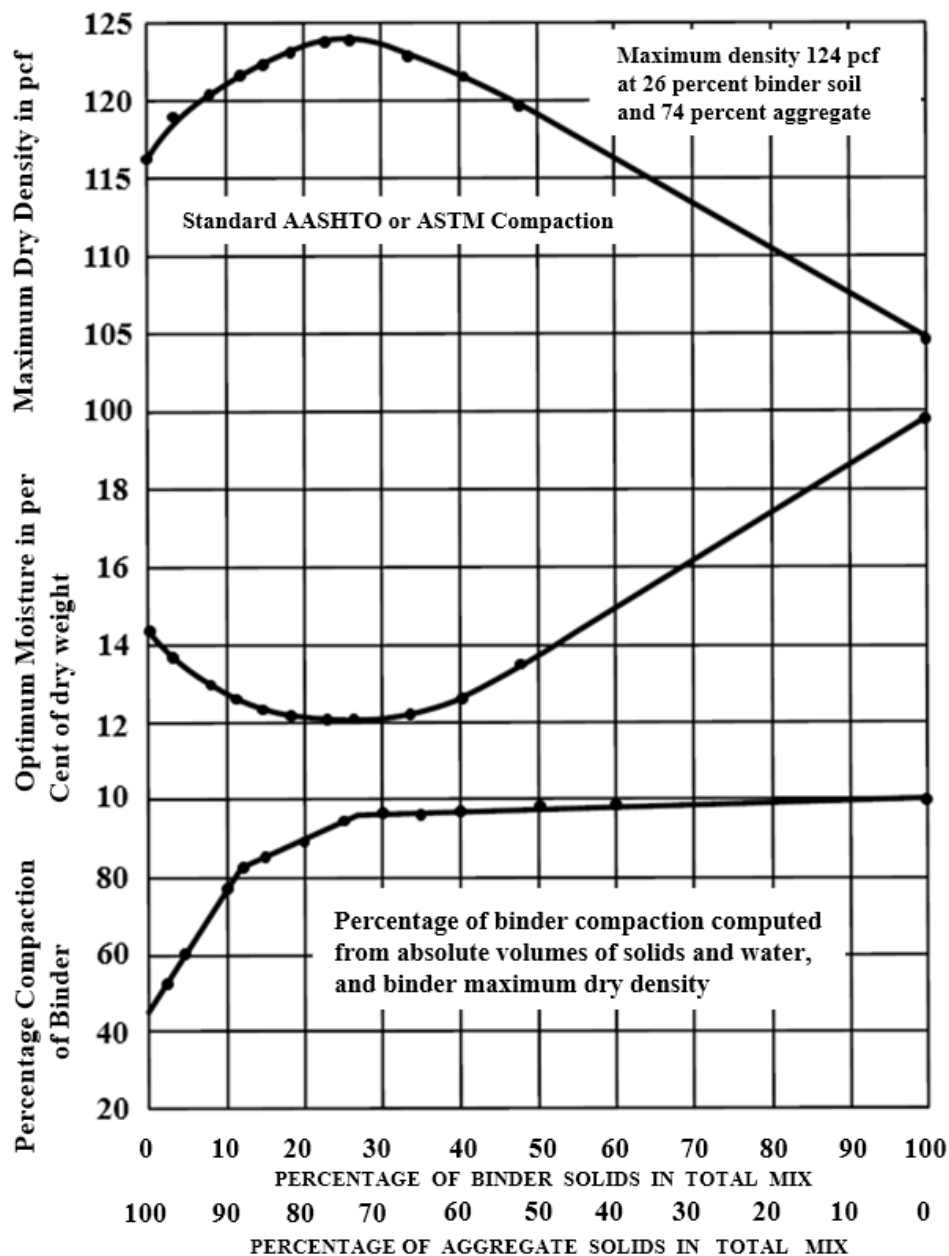


圖 2-3 土壤與碎石混合物單位重、OMC、夯實度性質示意圖【文獻 2.16】

2.6 焚化再生粒料來源與組成

2.6.1 焚化再生粒料來源

焚化再生粒料是經由一般生活垃圾經焚化處理後的底渣，再進行進階處理之後的產物。根據行政院環境檢驗所公告之「一般廢棄物(垃圾)採樣方法」(NIEA R124.00C)中指出，一般廢棄物主要組成可分為下列 11 種：

- 紙類
- 木竹落葉類
- 鐵金屬類
- 廚餘類
- 皮革橡膠類
- 非鐵金屬類
- 纖維布類
- 其他類
- 其他不燃物
- 塑膠類
- 玻璃類

上述廢棄物主要來自家庭垃圾、餐廳及公司等。一般生活垃圾中可燃份約佔 82%，其中含水量約佔 55%，約只有 18% 來自原有的可燃份。垃圾的物理組成，塑膠類約佔 16 %、紙類約佔 39 %、金屬類約佔 0.51 %、玻璃約佔 0.8 %、廚餘約佔 37 %、皮革橡膠類約佔 0.14 %、纖維布類約佔 2.34 %、木竹落葉類約佔 1.31 %、其他可燃物類約佔 0.60 %。

經燃燒後的焚化底渣之基本組成 80 % ~ 90 % 是由 Si、Fe、Ca、Al、Na、K 和 C 等鹼金屬及鹼土金屬構成組成。微量元素部分則多由 Pb、Al、Cu、Zn 等重金屬元素所構成；而化學物質則多以 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 及 Al_2O_3 為主，如圖 2-4 所示【文獻 2.11】。

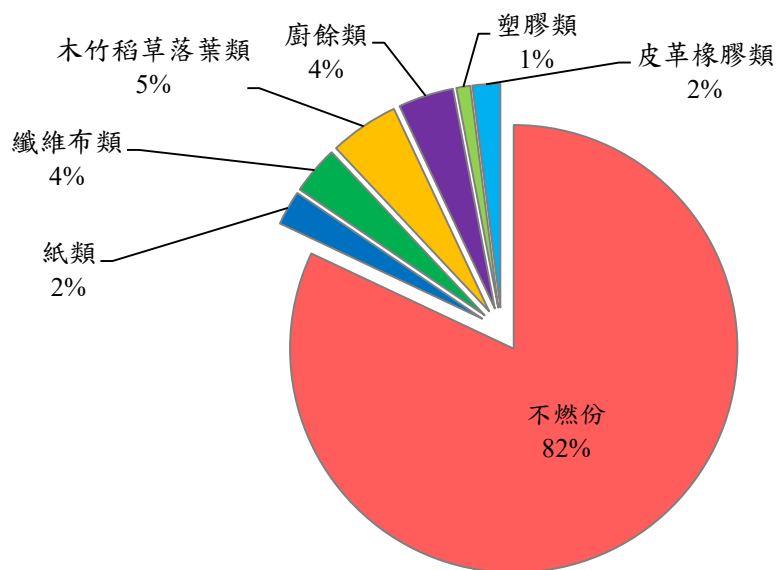


圖2-4 焚化底渣物理組成成分【文獻2.11】

2.6.2 焚化再生粒料製造與儲存

「焚化」為垃圾送至焚化爐燃燒之過程，處理程式如圖 2-5、圖 2-6 所示。垃圾於高溫燃燒過程中，可燃物質將氧化為安定氣體，不可燃物質則轉化為性質安定的無機物。燃燒完成後，一般焚化灰渣因焚化處理流程產生位置不同，主要可分為下列五種產物，其名稱與來源如下所述【文獻 2.10】：

1. 細渣 (Grate Siftings)

由爐床上爐條間之細縫掉落的細粒，其粒徑大小分佈因焚化爐之設計而有所不同，通常小於1.3 cm且80 %小於No.60篩。

2. 洗滌渣 (Scrubber Ash)

為了去除廢氣中的酸性及有害氣體，由乾式或濕式洗滌設備所注入之鹼性物質反應後殘留在洗滌器內所產生。乾式或半乾式洗滌設備會有灰渣的產生，而濕式則會產生洗滌污泥，需要進一步處理。

3. 集塵渣 (Cyclone, Bag-House, Precipitator Ash)

焚化廠空氣污染防治設備所捕集到的粒狀物質，如收集處為旋風集塵器則所收集的粒狀物質之粒徑較袋式集塵器及靜電集塵器收集者為粗。一般在此收集之粒狀物質均為細粉狀，含水量通常小於1 %，其主要組成為燃燒後之無機物、重金屬等，另外當採用乾式或半乾式洗滌時，其中另含有與廢氣中酸性氣體反應之反應物（如 CaCl_2 、 CaSO_4 等），以及一些未反應完成的鹼劑（如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）。

4. 鍋爐渣 (Boiler Ash, Heat Recovery Ash)

大型焚化爐均有廢熱回收裝置（鍋爐），以使得廢熱轉換成其他能量，在廢氣與鍋爐接觸的表面，廢氣的粒子會附著在接觸面上而被收集。一般之粒徑皆低於No. 30篩，對流區灰渣（Convection Ash）、節熱器灰渣（Economizer Ash）及過熱器灰渣（Super-Heater），此鍋爐渣平常是靠吹渣器吹落，並在清爐時才大量清出，併同飛灰做最終處置。

5. 爐渣或底渣 (Bottom Ash)

經由垃圾焚化後留存在火格子（Stoke）上之殘留物，臺灣焚化爐為混燒式，故底渣主要組成微細之灰渣、燃燒終產物，或是未完成燃燒之金屬類、陶瓷屑、玻璃屑、磚塊、石頭類及熔融顆粒，諸如破玻璃、水泥塊、彈簧墊、鐵絲等。爐渣通常由後燃段排出，經水淬冷卻再送至貯坑。細渣和爐渣一起排出，通稱為底渣。

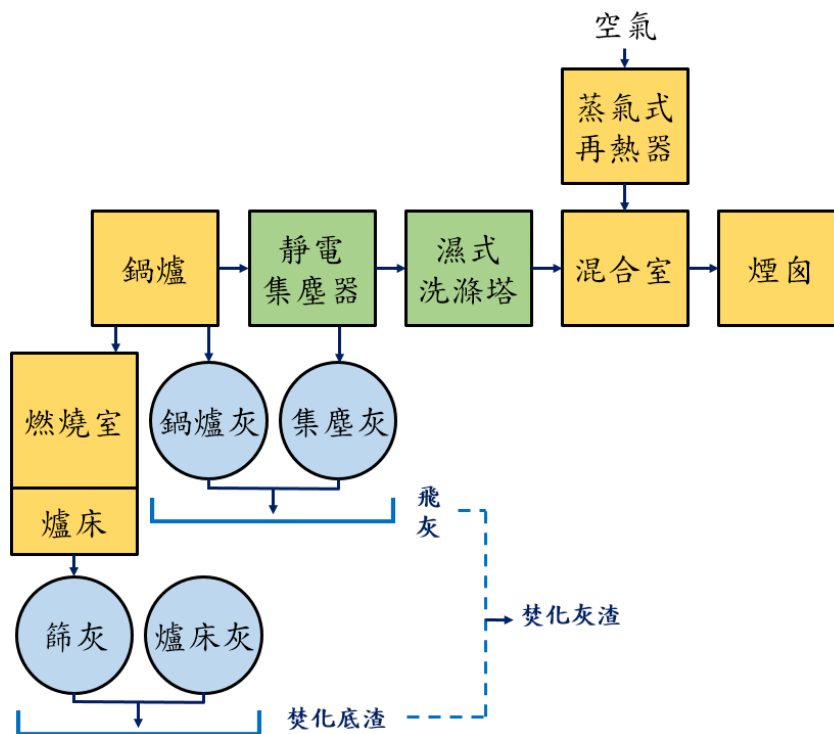


圖2-5 靜電式集塵器(ESP)+濕式洗滌塔【文獻2.17】

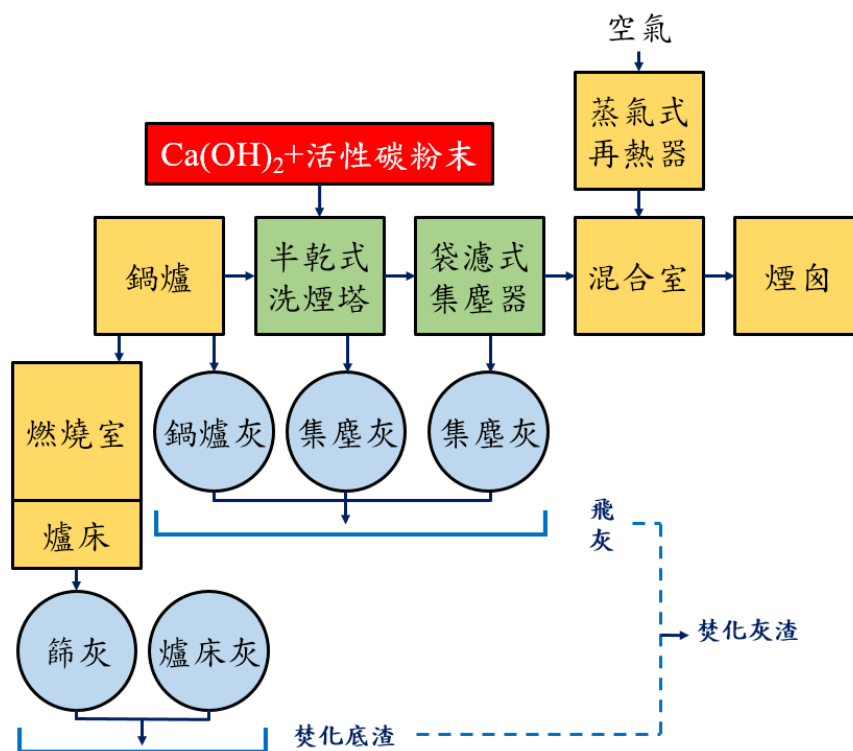


圖2-6 半乾式洗煙塔+袋濾式集塵器【文獻2.17】

2.6.3 焚化再生粒料再處理方式

依照垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式定義，焚化再生粒料係指垃圾經由垃圾焚化廠燃燒後的焚化底渣，再經過再利用處理程序後所產生的產物。目

前全國共有 11 家再利用機構處理各縣市焚化廠產出的焚化底渣，詳細資料如表 2-7 所示【文獻 2.18】。焚化底渣為降低其重金屬溶出率，降低焚化再生粒料對環境形成二次污染，依其用途共有 3 種不同的進階處理方式，其內容如下所述【文獻 2.10】：

1. 熟化

熟化是藉由焚化底渣與空氣中的二氧化碳反應，使焚化底渣之重金屬組成發生礦化以及碳酸化等作用，而形成低溶解性二次礦物，達到降低重金屬溶出之目的，並具降低異味之功效。

2. 穩定化

穩定化是指透過噴灑磷酸鹽系、矽酸鹽系、硫化物系或螯合物系等類之藥劑，其與焚化底渣中重金屬生成低溶解度及穩定性高的化合物，達到降低重金屬之目的。

3. 水洗

水洗是藉由水或摻有化學藥劑之液體，將焚化底渣中重金屬及水溶性物質如氯鹽、硫酸鹽系與微細顆粒洗出，達到降低重金屬及氯離子溶出之目的，亦具降低異味之功效。

焚化底渣經篩分、破碎及篩選等前處理，並視用途採穩定化、熟化或水洗等處理程序後所製成之再生粒料稱為「焚化再生粒料」。依據環保署公告「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」之規定，焚化再生粒料用途可作為路基填築及路堤填築之材料。

表2-7 焚化再生粒料再利用處理機構【文獻2.18】

再利用機構	處理方式	每月允許處理量(噸)
博瑞環保股份有限公司	以乾式前處理搭配藥劑穩定處理	5,000 公噸
永盛開發實業股份有限公司	以乾式前處理搭配熟化處理	8,300 公噸
旭遠科技企業股份有限公司	以乾式前處理搭配熟化處理	13,000 公噸
全精英事業有限公司	以乾式前處理搭配熟化處理	11,700 公噸
榮寶企業股份有限公司	以乾式前處理搭配熟化處理	13,000 公噸
力優勢環保股份有限公司	以濕式方式處理	41,200 公噸
宜蘭縣利澤垃圾資源回收(焚化)廠	以乾式前處理搭配熟化處理	1,500 公噸
臺南市城西底渣處理廠	以乾式前處理搭配熟化處理	13,000 公噸
高雄市政府環境保護局(路竹掩埋場)	以乾式前處理搭配熟化處理	10,000 公噸
新北市政府環境保護局八里掩埋場	以乾式前處理搭配熟化處理	11,500 公噸
臺北市政府環境保護局北投垃圾焚化廠	以乾式前處理搭配熟化處理	4,200 公噸

2.6.4 焚化再生粒料組成

焚化再生粒料其成分複雜，包含許多未完全燃燒物質、玻璃、陶瓷、磁性物、磚瓦、碎石、微量重金屬等物質，屬於非均質性混合物，外觀呈深灰色散發鹼性氣味，烘乾或自然氣乾後呈灰白色有團聚現象。由於一般焚化再生粒料的含水率較高，顆粒形狀變化很大，有形狀不規則且多孔洞的融熔顆粒。其中包含非鐵金屬、陶瓷、玻璃、不可燃物質及未完全燃燒的有機物質，經水洗可以看的出來。

焚化再生粒料主要由 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等氧化物組成，佔比 78~91%，其中又以 SiO_2 和 CaO 佔最大部分。因為焚化再生粒料為不均勻混合物，所以試驗結果又可能因為進料來源、取樣位置、貯存方法、貯存時間、再處理方法的不同可能有些許差異。本手冊引用數據是採用桃園市政府環境保護局委託國立台灣工藝研究發展中心，鶯歌中心化學實驗室施測之桃園 ROT 廠焚化再生粒料，試驗數據如圖 2-7、圖 2-8。

實驗室：鶯歌中心化學實驗室	

檢驗項目	檢驗結果
SiO_2	30.25 %
Al_2O_3	7.14 %
Na_2O	3.33 %
K_2O	1.10 %
MgO	1.96 %
CaO	22.85 %
TiO_2	1.15 %
Fe_2O_3	8.02 %
SO_3	2.43 %
P_2O_5	5.11 %
Mn_2O_3	0.21 %
Cl	2.46 %
燒失量	-
Total	86.01 %

註 1：本報告只對所送樣品負責。
註 2：請參考正本，以保障使用者權益。
註 3：本報告不作任何商業廣告、宣傳推銷或訴訟證明之用。
註 4：以上檢測項目及狀態為廠商指定選測並同意之計算方式，皆為最高值。
註 5：本樣品未做燒失量測試。

圖 2-7 桃園 ROT 廠焚化再生粒料化學成分報告-1【文獻 2.10】

實驗室：鶯歌中心化學實驗室

檢驗項目	檢驗結果
SiO ₂	29.24 %
Al ₂ O ₃	6.82 %
Na ₂ O	3.36 %
K ₂ O	1.15 %
MgO	1.90 %
CaO	23.73 %
TiO ₂	1.12 %
Fe ₂ O ₃	7.58 %
SO ₃	2.62 %
P ₂ O ₅	5.54 %
Mn ₂ O ₃	0.33 %
Cl	2.44 %
燒失量	-
Total	85.83 %

註 1：本報告只對所送樣品負責。

註 2：請參考正本，以保障使用者權益。

註 3：本報告不作任何商業廣告、宣傳推銷或訴訟證明之用。

註 4：以上檢測項目及狀態為廠商指定選測並同意之計算方式，皆為最高值。

註 5：本樣品未做燒失量測試。

圖 2-8 桃園 ROT 廠焚化再生粒料化學成分報告-2【文獻 2.10】

2.7 焚化再生粒料穩定土壤特性與創新

焚化再生粒料與飛灰具有相似的化學成分，如同用於土壤穩定用的飛灰屬「C」級飛灰（CaO>10%，pH>11.0）。而「F」級飛灰 CaO 含量<10%（台電所生產的飛灰屬此類，CaO 含量低約 3%±，pH≒9）【文獻 2.7】，如表 2-8 所述。當 pH 值高的環境能經由化學穩定機理與黏土陽離子交換，並逐漸溶蝕黏土顆粒（Al₂O₃、SiO₂）形成卜作嵐效應的鏈結，提供長期強度的上升發展。

表 2-8 飛灰與焚化再生粒料成分對照表【文獻 2.7】

	F 級飛灰(%)	C 級飛灰(%)	焚化再生粒料（桃園 ROT 廠）(%)
SiO ₂	54.9	39.9	29.24
Al ₂ O ₃	25.8	16.7	6.82
Fe ₂ O ₃	5.8	5.8	7.58
CaO	2.3	24.3	23.73
MgO	0.6	4.6	1.9
SO ₃	0.3	3.3	2.62

焚化再生粒料的 SiO_2 、 Al_2O_3 成份與黏土顆粒的 SiO_2 、 Al_2O_3 存在方式不同，前者為燒結結晶狀（砂礫顆粒）不具電荷，後者以帶「負電荷」方式存在。故 CaO 成分在焚化再生粒料中不會產生陽離子交換作用，減低了 Ca^{2+} 的濃度，稍有降低可能只是空氣中 CO_2 與 Ca^{2+} 產生碳化作用使之形成不能被分解的 CaCO_3 。此部分的 Ca^{2+} 無法游離，行陽離子交換的化學穩定機理，此部分 Ca^{2+} 僅為少量，對 CaO 濃度影響不大。焚化再生粒料在儲存堆置表面見有表層結塊應是水化作用， $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$ 。

參考文獻

- 2.1 Terrel, R. D., Epps, J. A., Barenberg, Mitchell, J. K. and Thompson, M. R, “Soil Stabilization in Pavement Structures. A User’s Manual, Volume 1, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1979.
- 2.2 Terrel, R. D., Epps, J. A., Barenberg, Mitchell, J. K. and Thompson, M. R, “Soil Stabilization in Pavement Structures. A User’s Manual, Volume 2, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1979.
- 2.3 Carpenter, S. H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume II, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1992.
- 2.4 Army TM 5-822-14, Air Force AFJMAN 32-1019, “Soil Stabilization for Pavements”, Department of The Army, The Navy, and The Air Force, Washington, D.C., USA, 1994.
- 2.5 Carpenter, S. H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations. Volume I, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1992.
- 2.6 Rollings, M. P., and Rollings, R. S. Jr., “Geotechnical Materials in Construction”, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.
- 2.7 張達德，「台灣電力公司飛灰對台灣公路路基土壤穩定之應用效果分析計畫」，台灣電力公司委託專業服務計畫，1987。
- 2.8 A. Bhatt et al., “Physical, Chemical, and Geotechnical Properties of Coal Fly Ash: A Global Review”, Case Studies in Construction Materials, Volume 11, 2019, e00263.

- 2.9 Thornton, S. I. and Parker, D. G. “Construction Procedures Using Self-Hardening Fly Ash”, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/AR/80, 004, Washington, DC, 1980.
- 2.10 歐立宸，「焚化再生粒料穩定桃園紅土配比設計的控制條件研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2019。
- 2.11 廖文輝，「焚化再生粒料含水量管控對過濕土方材料穩定成效的配比設計研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2018。
- 2.12 許晉偉，「焚化再生粒料在穩定過濕土方的室內與現場快速減水成效研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2021。
- 2.13 行政院環境保護署，「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」，2022。
- 2.14 Thompson, M. R and Q. L. Robnett, “Second Air Force Stabilization Conference,” Kirtland Air Force Base, 1970.
- 2.15 TRB, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials”, NCHRP 144, Washington, D. C., USA, 2009.
- 2.16 Miller, E. A., Sowers, G. F. “The Strength Characteristics of Soil-Aggregate Mixtures”, Transportation Research Board, No 183, Accession Number: 00231337, 1958.
- 2.17 行政院環境保護署，「推動焚化底渣再利用專案計畫」，2015。
- 2.18 行政院環境保護署，焚化再生粒料流向管理系統
<https://rams.epa.gov.tw/RAMS/Default.aspx>，2022。

第三章 土壤穩定添加劑反應特性與評析

3.1 前言

本章說明土壤穩定添加劑之反應特性包含石灰及飛灰摻石灰，並詳述各添加劑穩定土壤之機理、化學反應、養治方式及添加劑用量決定等，同時針對土壤拌和添加劑後之混合料其強度表現進行比對，檢核試驗包括：加州承載比試驗、無圍壓縮試驗及耐久性評估。

3.2 石灰穩定黏土主動成效機理

添加石灰後的反應主要為黏土顆粒表面帶負電，可以吸引自由陽離子（帶正電的離子）和水（圖 3-1）。當加入石灰時遇黏土所吸附的水則產生多種反應，最先作用的是陽離子交換（Cation Exchange）、密簇-凝聚（Flocculation Agglomeration）、離子擠塞作用（Ion Crowding）、卜作嵐效應（Pozzolanic Reaction）、碳化作用（Carbonation）等【文獻 3.1、文顯 3.2】。如圖 3-2、圖 3-3 所示，土壤添加石灰後，不同地域性的土壤塑性指數（PI）均產生下降的趨勢，且經過養治（7 天、28 天）後，土壤的膨脹力均顯著的降低。

含豐富鈣離子之穩定劑遇水溶解後，其兩價鈣離子（ Ca^{2+} ）會取代黏土顆粒表面雙水層（Double Layer）之大部分一價氫離子（ H^+ ），降低土壤吸水能力，此為陽離子交換反應，接著會使黏土顆粒間排斥力減小，結合成為較大尺寸的粒料。此效應除改良土壤結構外，更使黏土顆粒凝聚成較低塑性行為的顆粒。

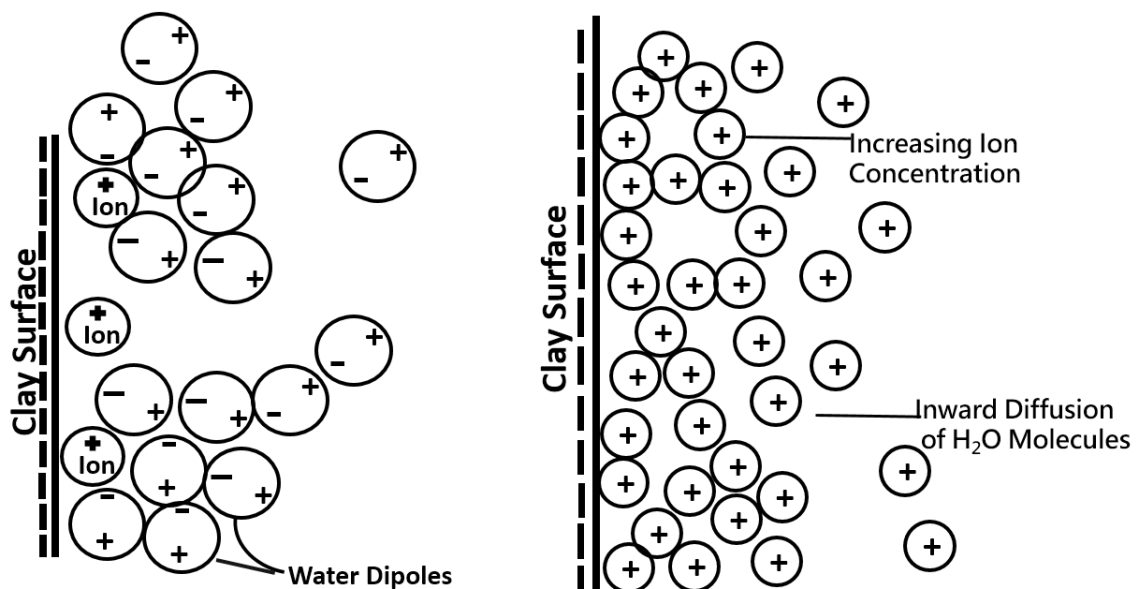


圖 3-1 黏土顆粒表面吸附陽離子及水分子示意圖【文獻 3.2】

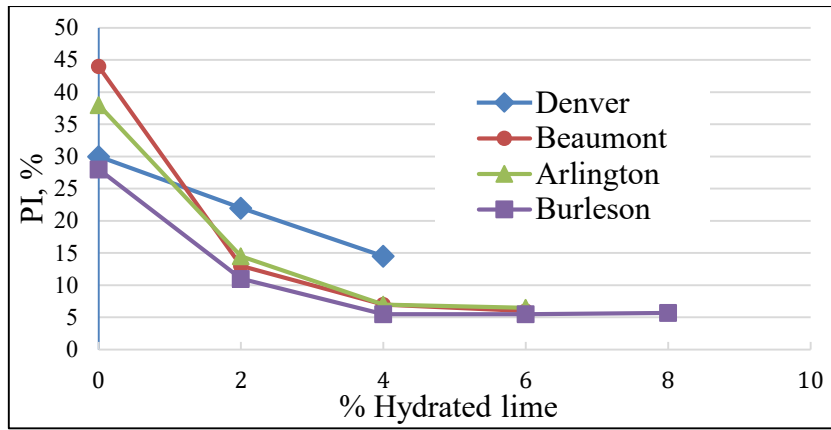


圖 3-2 不同土壤添加石灰後塑性指數下降示意圖【文獻 3.2】

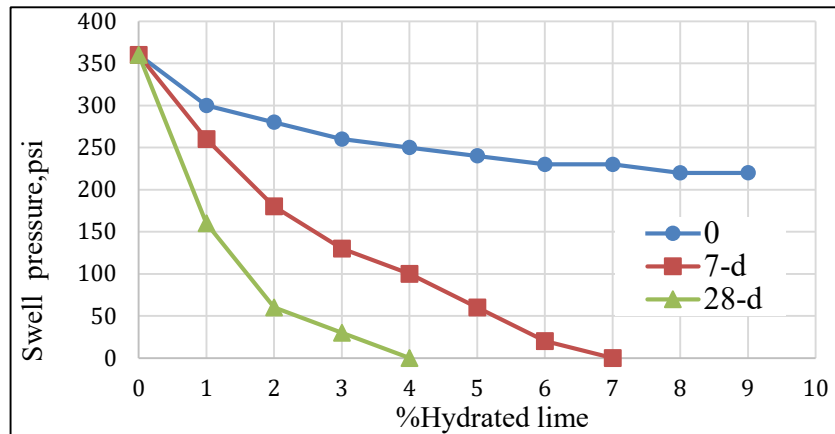


圖 3-3 不同齡期土壤添加石灰後膨脹力下降示意圖【文獻 3.2】

若添加足量的石灰和水時，將使土壤的 pH 值增加。如圖 3-4 所示，黏土材料之 SiO_2 、 Al_2O_3 在 pH 值增加至 10.5 以上的環境時將會發生溶蝕現象。圖 3-5 為電子顯微鏡下蒙脫土添加石灰後發生顆粒溶蝕的影像。

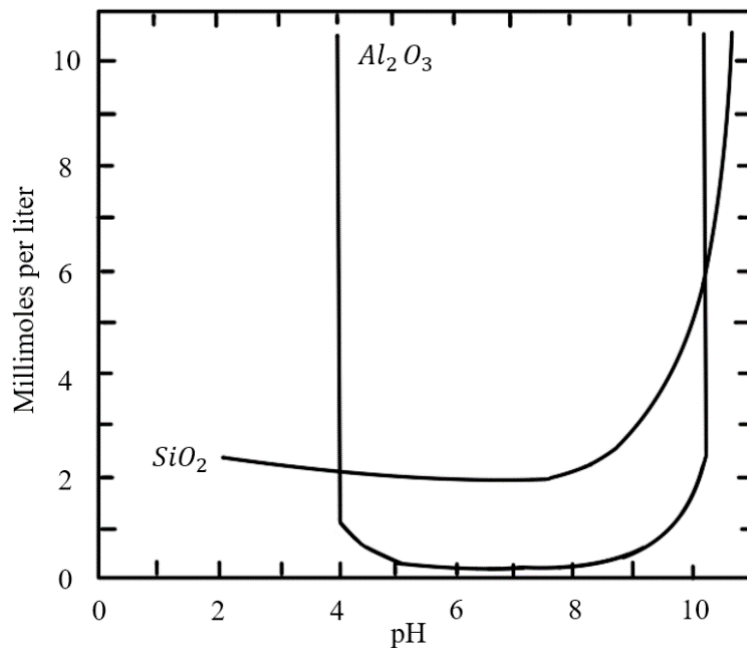
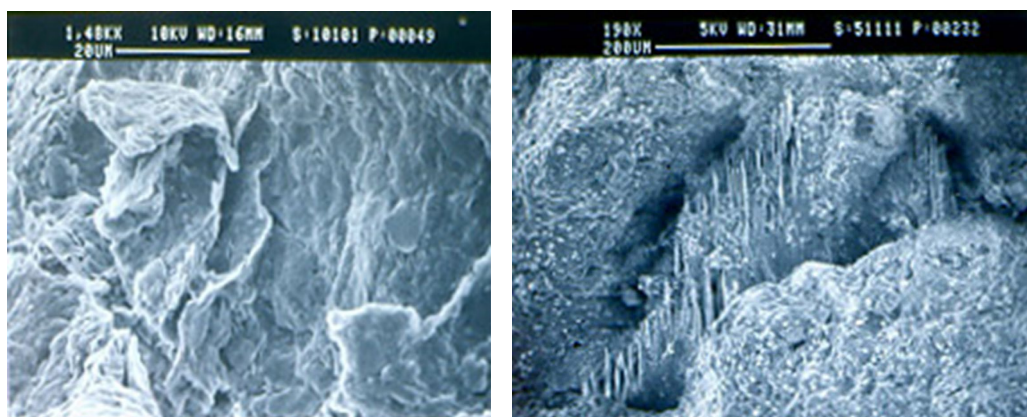


圖 3-4 黏土顆粒溶蝕與環境 pH 關係示意圖【文獻 3.2】



a. 蒙脫土顆粒

b. 蒙脫土顆粒添加石灰後

圖 3-5 黏土顆粒於鹼性環境溶蝕現象示意圖【文獻 3.2】

當土壤中的游離氧化鈣因 pH 值提高而溶蝕黏土顆粒表面鍵結，並釋放出 Al^{3+} 與 Si^{4+} ，將會產生三種化合物如下列所示：

1. 膠狀鋁酸鈣水合物 (Gelatinous Calcium Aluminate Hydrates, CAH)，產生非常快速 (24 小時)，惟強度低，難以作為早期或長期強度。
2. 低階結晶水化矽酸鈣 (Low Order Crystalline Calcium Silicate Hydrates, CSH I)，快速形成 (7~10 天)，產生早期強度，但不會影響長期強度的增量。
3. 高階結晶水化矽酸鈣 (High Order Crystalline Calcium Silicate Hydrates, CSH II)，緩慢地持續發生 (10 天~3 年) 從 CSH I 和更多 Al^{3+} 、 Si^{4+} 作用以產生高的長期強度。

CSH 和 CAH 是類似於卜作嵐作用中形成的膠結產品，其形成有助於石灰穩定土壤強度的基質。當此基質形成時，土壤性質轉變為較堅硬且相對滲透性低，並具有顯著承載能力的特性。該過程在數小時內開始，並且可以在設計合理的前提中持續反應數年，期間所形成的基質是永久性的，可成為堅固又柔韌的結構層。

3.2.1 土壤摻石灰化學穩定反應

石灰與黏土之化學作用須較長時間反應，以提升穩定土壤的工作性質，其化學作用大致可分為四種，如下列所示：

1. 陽離子交換及密簇-凝聚

陽離子交換的行為發生在礦物間電荷不平衡的情況，使黏土礦物有陽離子交換之容量。一般而言，在濃度相等時，常見陽離子交換性順序為 $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$ ，故當石灰成分溶解後，鈣離子會取代黏土顆粒表面的雙層水層 (Double Layer) 中大部分低價陽離子 (H^+)，此過程可

限制雙層水層擴張，使顆粒密簇變大，降低吸水能力，促使顆粒間排斥力減小進而降低液性限度（LL）、塑性指數（PI）以及膨脹性（Swelling Potential）。

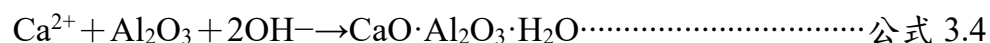
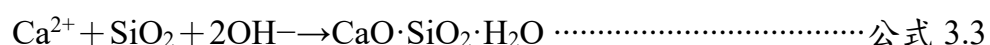
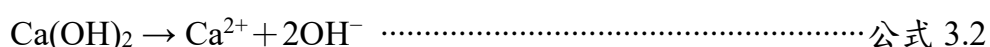
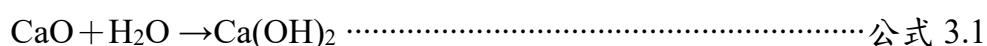
由於 H^+ 被 Ca^{2+} 取代而游離至孔隙水中，以形成高鹼環境。此高鹼環境的 pH 值會因 Ca^{2+} 的來源有所不同，如採用化工原料的石灰（純度）以上，與土壤蒸餾去離子水混合則接近 12.45。若是“C”級飛灰中的游離 CaO，則 pH 值約為 11.3【文獻 3.2】。而焚化再生粒料中的 CaO 含量則提供 pH≈10 以上的高鹼條件。pH 值的測試結果與提供 CaO 來源的純度活定有關。

2. 離子擠塞作用

由於陽離子交換作用，使得陽離子吸附在黏土顆粒表面，當電荷平衡後，環境中多餘的鈣離子充塞於孔隙中會溶蝕黏土顆粒形成膠狀體。此種高濃度之陽離子，具有抑制水滲入孔隙中的特性，因此減小土壤體積改變的能力。

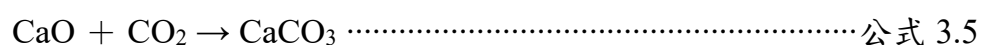
3. 卜作嵐效應

石灰與黏土中的鋁（Alumina）產生膠結作用，形成鈣鋁水化物（Hydrated Calcium Aluminate）之膠體狀物質，逐漸形成穩定的鍵結。當混合料的 pH 值逐漸升高至一定值（Fixation Point）如前所述，二氧化矽和氧化鋁的溶蝕度會因此而增加，故只要石灰裡保留足夠的殘留鈣，且 pH 值能保持高濃度（10 以上），則卜作嵐效應可以持續反應很長一段時間，甚至達到持續反應幾十年，因此，石灰處理可以產生高而持久的強度增益。只要有良好的混合配比設計方案，即可靠施工的方式增加土壤強度，其膠結作用之反應式如下【文獻 3.3】：



4. 碳酸化作用

當石灰與大氣中的二氧化碳反應形成不溶於水的碳酸鹽。石灰碳酸化是一種不良反應，可能發生在石灰混合物中，此反應作用不利於土壤穩定過程，其反應式如下：



其可透過適當地快速執行和有順序的施工程序減緩發生，例如：施工中為減少石灰碳酸化發生，應避免在與土壤混合之前將石灰長時間暴露在空氣中，以及長時間且密集的拌和處理。

3.2.2 養治混合料

混合料改良強度一般隨養治時間而遞增，以石灰混合之穩定土壤中，所含之矽和鋁與石灰產生作用，土壤的剪力強度將隨卜作嵐反應而增加。然而剪力強度的發展通常在養治初期有較快的增加速率，但在後期將隨時間而產生漸緩之趨勢。石灰與土壤之初始反應通常發生在混合後 24~72 小時期間；而第二階段之反應皆發生在初始反應後，且無限期地持續。另外，當養治溫度為 12.8 °C 至 15.6 °C 時會降低反應，故養治溫度較高時反應速度相對較快。而溫度低於 4°C 時，土壤與石灰之反應將受阻或停止，故強度發展亦取決於環境溫度且反覆凍融（Cyclic Freezing and Thawing）現象將導致強度降低。依據相關研究，養治溫度越高時其效果越佳，建議於高溫氣候時使用其效果最為顯著。此一強度發展特性適用於台灣環境氣候條件，然而反覆乾濕循環則是必須給予之考量【文獻 3.3】。

3.2.3 石灰用量決定

美國國家石灰協會（National Lime Association）技術報告中詳列一系列拌和用量設計方法，並說明如何評估環境對改良土壤強度的影響，以及評估土壤採用石灰改良前後的膨脹現象差異，其石灰穩定土壤設計步驟為【文獻 3.3】：

1. 土壤基本性質評估（Initial Soil Evaluation）

參考 ASTM D4318 【文獻 3.4】阿太堡液塑性試驗評估石灰穩定法的適用性，如表 3-1 所示【文獻 3.5】，細顆粒（通過 75 μ m）含量超過 25%，塑性指數（PI）介於 10~20 間，非常適合添加石灰穩定土壤，但是細顆粒含量未超過 25%，塑性指數小於 6 時則石灰不適用為添加劑；另外，如表 3-1 所示，水泥及水泥混合料不適用於 PI>20 的土壤，但是石灰卻是推薦最佳選擇的添加劑。

表 3-1 穩定劑穩定方法應用指南【文獻 3.5】

細顆粒含量	大於 25% 通過 75 μ m			小於 25% 通過 75 μ m		
塑性指標	PI $\leq$ 10	10<PI<20	PI $\geq$ 20	PI $\leq$ 6	PI $\leq$ 10	PI>10
穩定方法適用性						
水泥及混合水泥	■	▲	—	■	■	■
石灰	▲	■	■	—	▲	■
符號說明	適合■、不確定▲、不適合—					

2. 確定石灰用量 (Determine the Approximate Lime Demand)

依據【文獻 3.6】建議的 pH 試驗 ASTM D6276-99a 決定石灰改良土壤最佳用量 (Lime Modification Optimum, LMO)。

3. ASTM D6276-99a

屬於「一小時」的快速測試法主要是以 pH 值判斷與決定 LMO。拌和土壤中的石灰有部分沒有以化合狀態存在，而是以游離狀態存在的氧化鈣，又稱游離石灰、游離氧化鈣 (free-CaO)，其與氧化鈣溶出之鈣離子相同均為鹼性。根據【文獻 3.6】，使用通過 No.40 篩土壤配合不同比例石灰並放置不同時間，觀察 pH 值的變化，且測試其液性限度與塑性限度之變化。結果指出當在室溫下，石灰土漿溶液 pH 值為 12.3 ~ 12.4，此時之石灰比例為最佳石灰用量。易言之，當鈣離子 (Ca^{2+}) 吸收土壤的化學成分（包括土壤陽離子的交換能力）得到滿足時，土壤的物理特性就會發生變化。如圖 3-6 所示【文獻 3.6】，當 pH 值達 12.45 時的石灰含量百分比可以作為石灰穩定的最佳含量 (LMO)，即滿足陽離子交換反應親和力所需的石灰量。

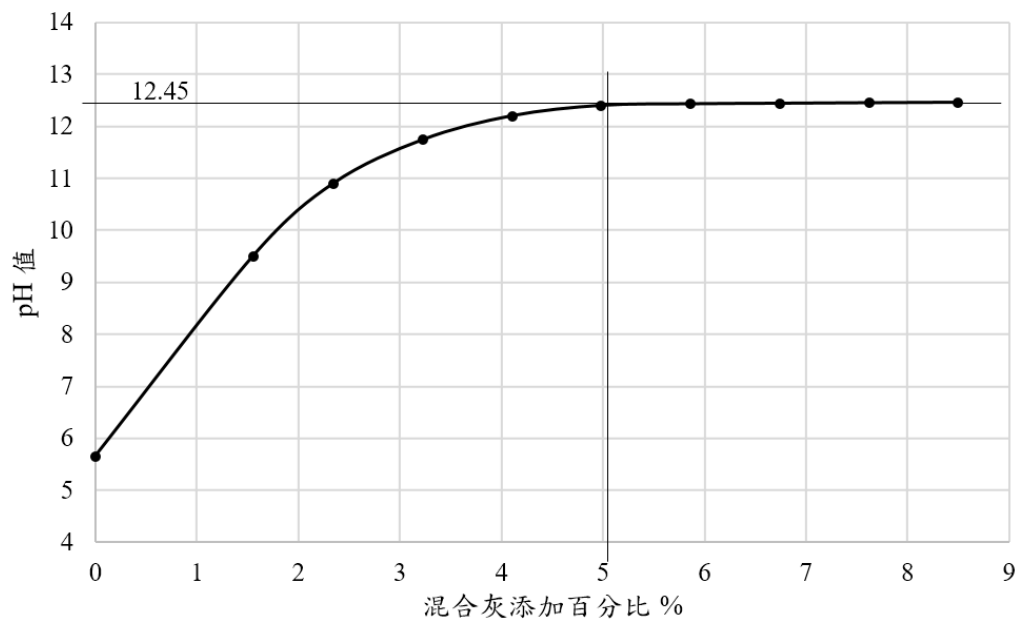


圖 3-6 環境 pH 值決定 LMO 對照圖【文獻 3.6】

3.3 飛灰摻石灰合併應用成效與機理

飛灰為燃煤電廠的副產物與焚化再生粒料化學成分相似，在兼顧環保的原則下，其為循環經濟中最成功的應用材料，將飛灰納入土壤穩定相關規範已近 40 年【文獻 3.7】。

3.3.1 國內經驗

飛灰於國內早期即已作為混凝土之添加使用，但是將飛灰作為路基土壤穩定或回填土方穩定於國內使用之經驗甚少。1986 年國科會（今為科技部）計

畫「石灰與飛灰對林口紅土穩定效果之研究」【文獻 3.8】及 1987 年台灣電力公司「台灣電力公司飛灰對台灣公路路基土壤穩定之應用與效果分析」【文獻 3.9】為國內在此方面研究之先驅，其研究成果顯示飛灰應用於路基改良之成果顯著。

另外，石悅欽（1996）以飛灰、石灰改良紅土，其研究結果指出，添加飛灰 20%、石灰 10%於紅土，經養治 28 天之改良強度最高可達原狀土之 9 倍。若僅添加飛灰 20%於紅土改良時，養治 28 天之改良強度最高則可達原狀土之 1.5 倍。二者相較，添加固定石灰量後，改良強度隨著石灰含量之增加而增加，可能是石灰與紅土所能發生卜作嵐反應較高【文獻 3.10】。

3.3.2 飛灰種類

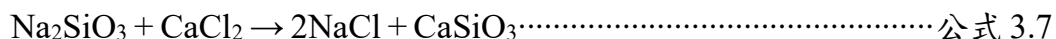
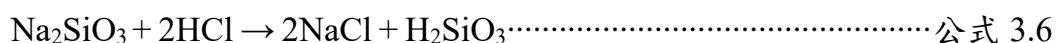
台灣之飛灰 CaO 含量約 3% 以下，SiO₂ 含量一般約 50% 以上。主要種類為 F 級飛灰，其為燃燒無煙煤或煙煤所產生之飛灰，卜作嵐特性不顯著。目前台灣電力公司火力發電廠生產之飛灰均屬 F 級，氧化鈣含量低，鋁離子亦不易分解，故常於其中添加石灰，以增進其改良穩定土壤之效果。此外，影響飛灰之性質及成分因素包括：飛灰之組成成分差異，煤源、煤之細度、燃燒控制條件、集塵系統型式與儲存方式五項因素，敘述如下：

1. 煤之種類與來源為飛灰組成成分差異性主因。
2. 燃燒所用之煤細度越小，則所產出之飛灰細度越小。
3. 燃燒控制條件：煤粉倒入鍋爐中之速率影響煤燃燒完全度，速率越慢則所產出之煤品質越高。
4. 集塵系統型式：可分機械式與靜電式，舊式之機械式所收集之飛灰顆粒較大，而新式之靜電式可沿煙道收集粗至細之飛灰顆粒。
5. 儲存方式：分為乾式與濕式儲存法，乾式主要將飛灰儲存於倉庫或密閉之儲藏室中，濕式則為飛灰經少量水處理後再行儲存。

3.3.3 飛灰摻石灰化學反應特性

飛灰中氧化鈣含量並不高，所能提供之穩定效果有限，故常和其他添加物（如石灰）互相混合以發揮穩定作用。此類反應所形成的矽鈣膠結體和鋁鈣膠結體具有膠結硬化的作用，當膠結體填充於顆粒間的孔隙時，使其產生互相連結的效果。

由穩定反應作用可知，於土壤中添加飛灰-石灰混合穩定劑，可提供陽離子交換、密簇與凝聚作用。在飛灰與石灰之混合穩定劑中，飛灰主要提供氧化鋁與二氧化矽，而石灰則提供鈣離子，兩者各發揮其較佳之穩定功能，產生膠體，增進土壤強度，以達到穩定之功效，飛灰-石灰化學穩定反應式如下：



依據【文獻 3.11】之彙整，建議路基土壤穩定方法中，添加穩定劑混合料包含第 I 型水泥（Portland Cement）、石灰（Lime）及飛灰摻石灰（Lime-fly ash）等 7 項。如表 3-1 所示，混合料中，水泥材料對於塑性土壤的改善較不明顯且混合於粗顆粒土壤則產生水泥水化作用【文獻 3.3】。然而，石灰對於塑性土壤性質的改善包含祛水、改善強度、降低塑性、顆粒質地粗糙化及長期卜作嵐反應，其中除了卜作嵐反應會持續發生外，其他的改善性質均能快速的發生達到穩定土壤的效果，其對於粗顆粒土壤的改善性質與塑性土壤一致。另外，針對「飛灰摻石灰」穩定添加劑所適用的土壤種類及改善性質均與石灰穩定添加劑相同。

3.3.4 飛灰摻石灰用量決定

採用【文獻 3.11】的建議，以 pH 值測試（ASTM D6276-99a）決定抑制黏土膨脹所需之飛灰用量，其決定方法如圖 3-7 所示。當 pH 值試驗中，溶液隨飛灰用量的增加而升高至 pH 值不再改變時，稱為鈣離子飽和。此時的飛灰用量定義為最佳飛灰改良用量（Fly Ash Modification Optimum, FAMO）。因為穩定效果並非只考慮黏土膨脹性的抑制，故上述定義僅針對膨脹性抑制，實際上的應用仍須兼顧膠結效果，因此飛灰用量多半大於 FAMO 之用量。

表 3-2 石灰、飛灰物理及化學性質彙整表【文獻 3.11】

材料 種類	通過 No.100 篩%	通過 No. 200 篩%	通過 No. 325 篩%	比重	燃燒損失 %	
石灰	96.4	88.2	80.2	--	18.0	
飛灰	97.7	92.2	81.6	2.46	--	
化學成分及重量百分比						
材料	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C
石灰	--	--	--	47.4	32.6	1.3
飛灰	45.3	15.6	24.6	4.2	1.3	2.4

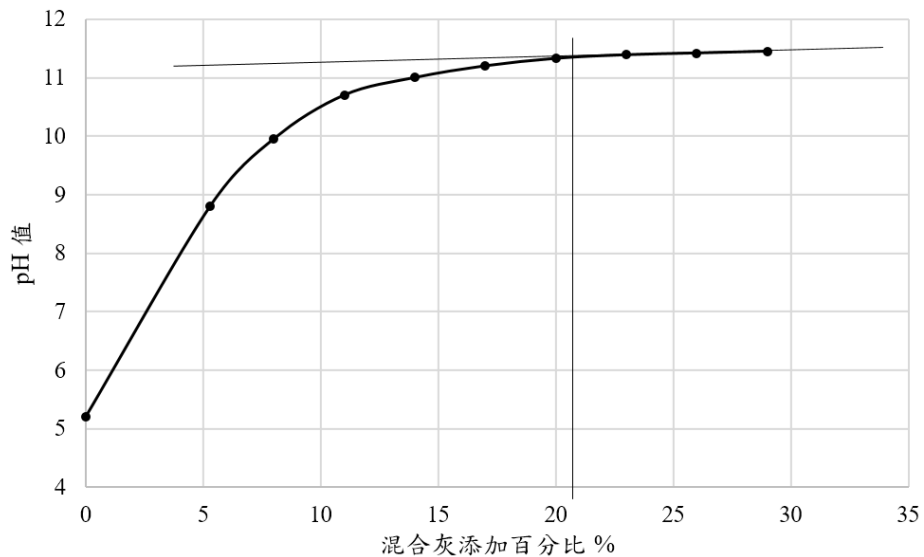


圖 3-7 改良飛灰用量之 FAMO 決定方法示意圖【文獻 3.11】

一般運用的配比設計方式為以 4% 的飛灰含量為基礎，後續每個設計程序中逐漸增加 2% 的含量。混合料的設計原則：石灰與飛灰的比例為 1：2，惟可能依據材料性質而有所不同。

3.4 混合料強度表現比對與研析

3.4.1 加州承載比試驗（California Bearing Ratio Test）

土壤透過穩定添加劑的混拌產生陽離子交換反應，降低黏土顆粒對水的吸附力，進而改善體積膨脹率（Swell Ratio）。如表 3-3 所示，彙整各區域 AASHTO A-7-6 類的土壤添加不同比例石灰穩定後，膨脹率明顯下降。部分混合料經過 49°C（120°F）、48 小時養治後，改善效果更為明顯【文獻 3.12】。另外加州承載比亦有相同的改善趨勢，在經過養治程序後，不同土壤之 CBR 值大多超過 100%，用來評估土壤的結構承載力 CBR 值越高，代表其工程強度愈佳。

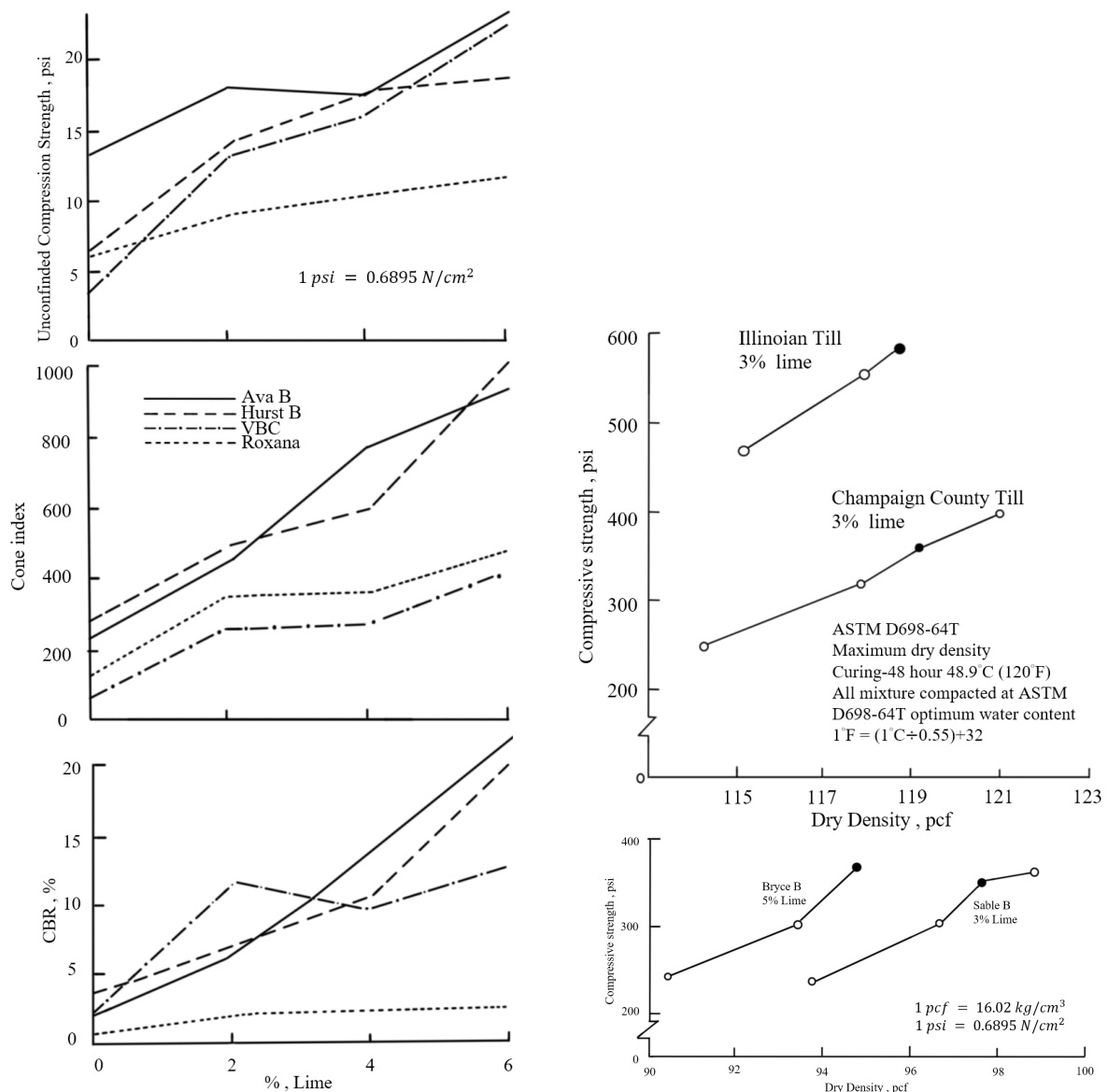
表 3-3 石灰穩定土壤 CBR 值改善彙整表【文獻 3.12】

土壤 類型	自然的土壤		添加石灰 百分比	土壤石灰混合料			
	CBR (%)	Swell (%)		無養治		48 小時 49°C 養治	
				CBR (%)	Swell (%)	CBR (%)	Swell (%)
A1	2.6	2.1	5	15	0.1	351.0	0.0
B1	1.4	5.6	3	20.3	0.2	197.0	0.0
C1	4.0	2.9	5	13.9	0.1	116.0	0.1
D1	1.1	8.8	5	7.7	1.9	13.6	0.1
E1	1.3	7.4	5	5.6	2.0	17.3	0.1
F1	1.3	0.0	5	32.4	0.0	295.0	0.1

備註 A1:Accretion Gley2, B1:Bryce B (LL:53、PI:29), C1:Cowden B (LL:54、PI:33), D1:Darwin B (LL:54、PI:31), E1:East St. Louis Clay
F1:Fayette C
 $t^{\circ}\text{C}=(t^{\circ}\text{F}/0.55)+32$

3.4.2 無圍壓縮試驗 (Unconfined Compression Test)

石灰對細顆粒土壤的剪力強度主要影響為凝聚力顯著增加，摩擦角則略為增加，以下說明石灰混合料對強度的直接影響。圖 3-8 所示，收集四種土壤添加石灰後，驗證各項強度指標值的變化，包括：圓錐指數 (Cone Index, CI)、CBR 及無圍壓縮強度。由圖 3-8a 可知，不同土壤添加 2%~6% 石灰改善土壤性質後，各項強度指標值均產生顯著的效益提升。另外，混合料經過 49°C (120°F)、48 小時養治後，強度的改善如圖 3-8b 所示。壓縮強度隨著乾密度之增加而增加，相同混合料強度增加超過 1,172kN/m² (170psi) 【文獻 3.12】。這四類土壤分別為 Ava B (A-6, LL:36, PI:17)、Hurst B (A-6, LL:35, PI:15)、Vicksburg Buckshot Clay, VBC (A-7-6, LL: 59, PI:30)、Roxana loess, Roxana (A-4, LL: 23, PI:4)；黏土礦物主要以蒙脫土及伊利土為主。



a. 石灰混合料對強度的直接影響

b. 石灰混合料無圍壓縮強度
與乾密度的關係

圖 3-8 石灰混合料各項強度指標值改善示意圖【文獻 3.12】

3.4.3 耐久性評估 (Durability) – 乾濕循環試驗

在美國聯邦高速公路總署 (FHWA) 與墾務局 (USBR) 等單位的設計規範中，土壤穩定的強度提升有效性考量中，耐久性由乾濕試驗 (ASTM D559) 或凍融試驗 (ASTM D560) 做為測試之基準【文獻 3.13】。臺灣的氣候條件適用於乾濕循環試驗。

試驗說明如下：

1. 備土完成後，依 ASTM D1557 備置試體並計算乾濕單位重 W_A ，完成後試體以保鮮膜包裹，置入 49°C 烘箱 48 小時進行快速早強養治。
2. 養治完成試體經 8 小時降溫後脫去保鮮膜，開始進行第一次乾濕循環，試體放入水箱，浸泡 5 小時。
3. 浸泡完畢後，放置到 71°C 烘箱中 42 小時，完成後秤重並記錄磨損前重量。
4. 紀錄後，進行試體表面磨損試驗，為確保每次磨損試驗力道須滿足規範，須將試體置於標準電子秤上，每次磨損須保持電子秤為 3 磅。磨損方式可分為側面與頂面兩種，如圖 3-9 所示。
 - (1) 頂面 (A/A')：如圖 3-9 中 A、A' 面，以刷子垂直長軸方向，由頂面圓周邊向圓心方向刷到另一邊圓周邊。刷完一下後轉 90° 重複執行共 4 次，完成兩圈共 8 下，底面亦同，執行方式如圖 3-10 所示。
 - (2) 側面 (B)：需於任一頂面上以每 90 度作一標記點，使側面 B 亦可找到對應均分點，如圖 3-9 紅點。水平放在電子秤上，以刷子平行長軸方向，由試體頂部刷向底部，以標記點為輔助，每區間刷 5 下，共須刷 20 下，完後水平翻轉試體 180° ，重複 20 下，執行方式如圖 3-11。

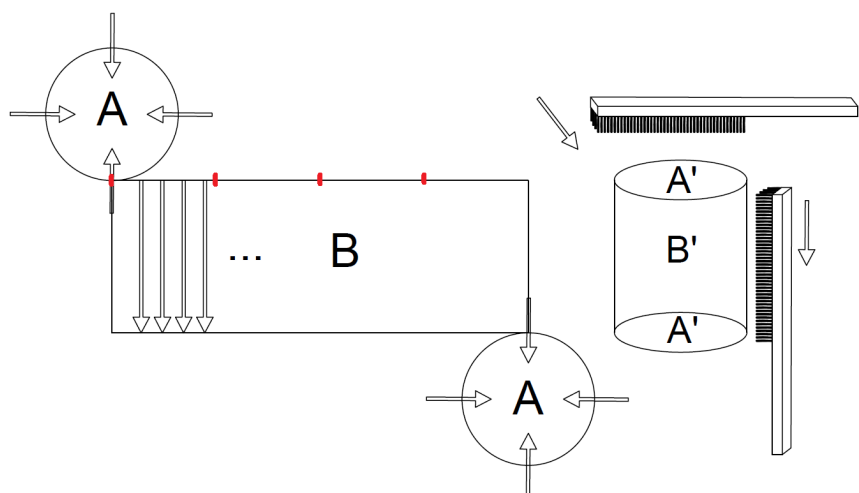


圖 3-9 耐磨損面示意圖【文獻 3.13】



圖 3-10 頂部磨損操作示意圖【文獻 3.13】

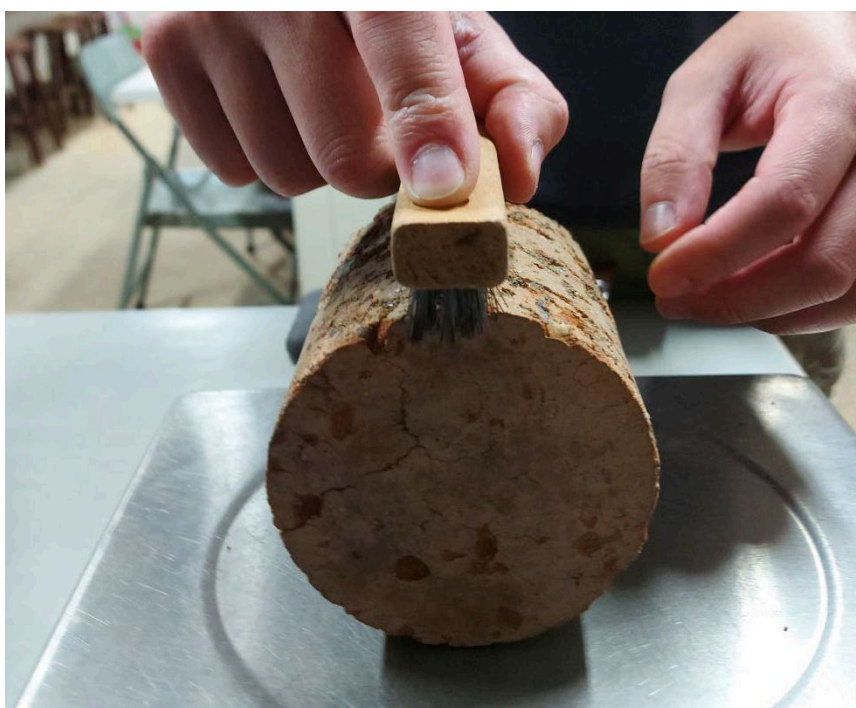


圖 3-11 側邊磨損操作示意圖【文獻 3.13】

5. 磨損操作完畢，將表面塵土清理乾淨後，置於電子秤上，紀錄一次磨損後重量。重新將磨損完試體放入水箱，重複以上循環步驟 12 次。
6. 完成 12 次循環後，將試體放入 105°C~110°C 烘箱，每日量測試體重量，直至試體重量不再變化，紀錄試體完全乾燥重量 W_B 。
7. 計算：參照公式 3.9，以試體夯打完成時試體濕重計算試體乾重 W_A 與 12 次循環完成，試體完全乾燥重量 W_B 差計算損失量，再由初始試體乾重 W_A 計算重量損失率：

$$\text{重量損失率(\%)} = \frac{W_A - W_B}{W_A} \times 100\% \dots\dots\dots \text{公式 3.9}$$

8. 依據 FHWA 之規定，重要道路鋪面系統的土壤穩定耐久性成效，其重量損失率應小於 7%、USBR 則規定損失率應小於 6%【文獻 3.14】。

3.4.4 反覆荷重三軸抗壓 (M_R 回彈模數)

路基土壤回彈模數 (M_R) 於鋪面結構分析中占有重要之地位，因其提供鋪面受車輛載重下之應力與應變反應行為，且回彈模數組成模式為一非線性模式，較符合路基土壤實際行為。鋪面結構系統由上而下分別為面層、底層、基層及路基土壤。路基土壤位在鋪面結構系統最下層，對於鋪面結構而言，其主要功能係承載由面層傳遞而下之輪荷重。因此，路基土壤須具有一定承載力，於交通反覆載重時，避免鋪面產生過量永久變形。

路基土壤受車輪荷重時所產生的變形可分為兩部份。一部份為可回復的，即彈性變形；而不可回復部份則為塑性變形。路基土壤的回彈模數係表示所施加之軸差應力與回彈應變間之關係，詳圖 3-12。回彈模數觀念類似於彈性模數 E 值，路基土壤的回彈模數之定義如下【文獻 3.15】：

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \dots \dots \dots \text{公式 3.10}$$

其中， M_R 為回彈模數； σ_d 為軸差應力 (Deviator Stress)，即重複施加之軸向應力； ϵ_r 為回彈應變。路基土壤的勁度越大，即路基土壤回彈模數越高，路基土壤所產生的總變形量越小，相對地塑性變形量亦越小，因而可增進鋪面之成效。

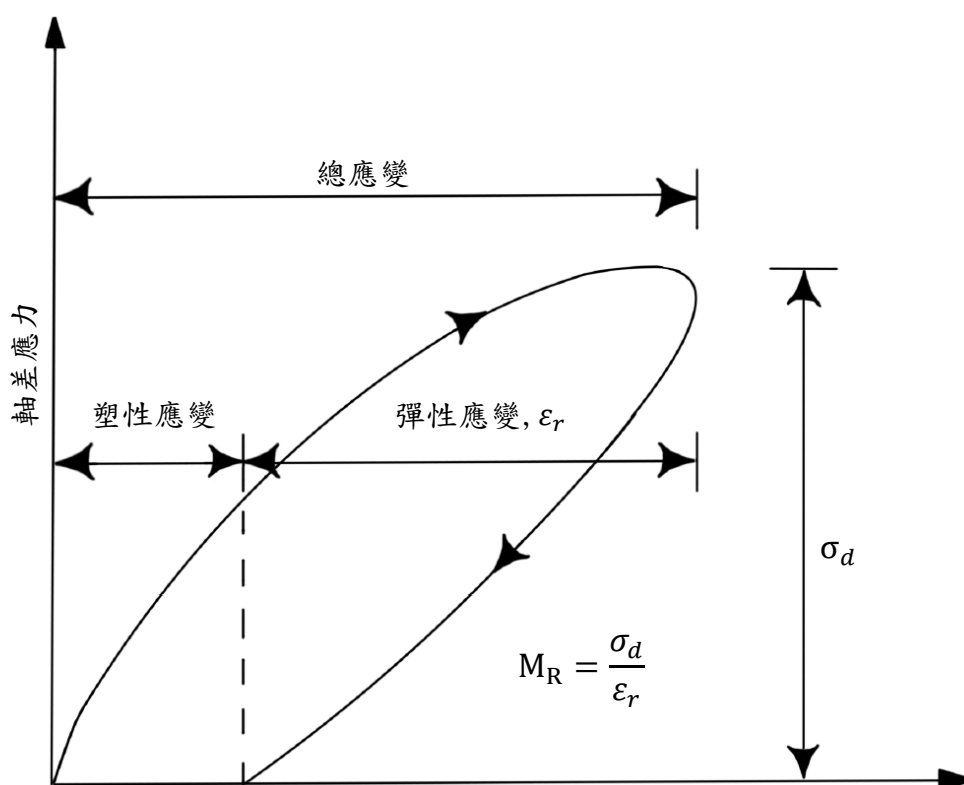


圖 3-12 路基土壤回彈行為【文獻 3.15】

3.5 焚化再生粒料穩定黏土主動和被動成效與機理

3.5.1 混合料化學穩定與機械穩定雙重效應

焚化再生粒料穩定土方主要由主動機制的化學穩定與被動機制的機械穩定（Soil-aggregate Mixtures Theory）所提供的化學與物理強度提升機理。研究指出，在土壤碎石混合理論中，拌和土樣的拌和比例會影響混合料的摩擦角（ ϕ ）與凝聚力（ c ）【文獻 3.16】。由圖 3-13 可以發現，碎石粒料的含量愈高，拌和土樣的凝聚力愈低、摩擦角愈高。然而隨著穩定添加劑含量之增加，在卜作嵐作用反應下，混合料的凝聚力則會逐漸提升，摩擦角則逐漸降低【文獻 3.17】。依據 Terzaghi 承载力公式，土壤承载力係由 c 、 ϕ 決定。由圖 3-13 可知，承载力隨著 c 、 ϕ 值之變化而逐漸達到最大值，此時即表示碎石粒料比例與穩定添加劑含量已達到混合料之最佳比例。

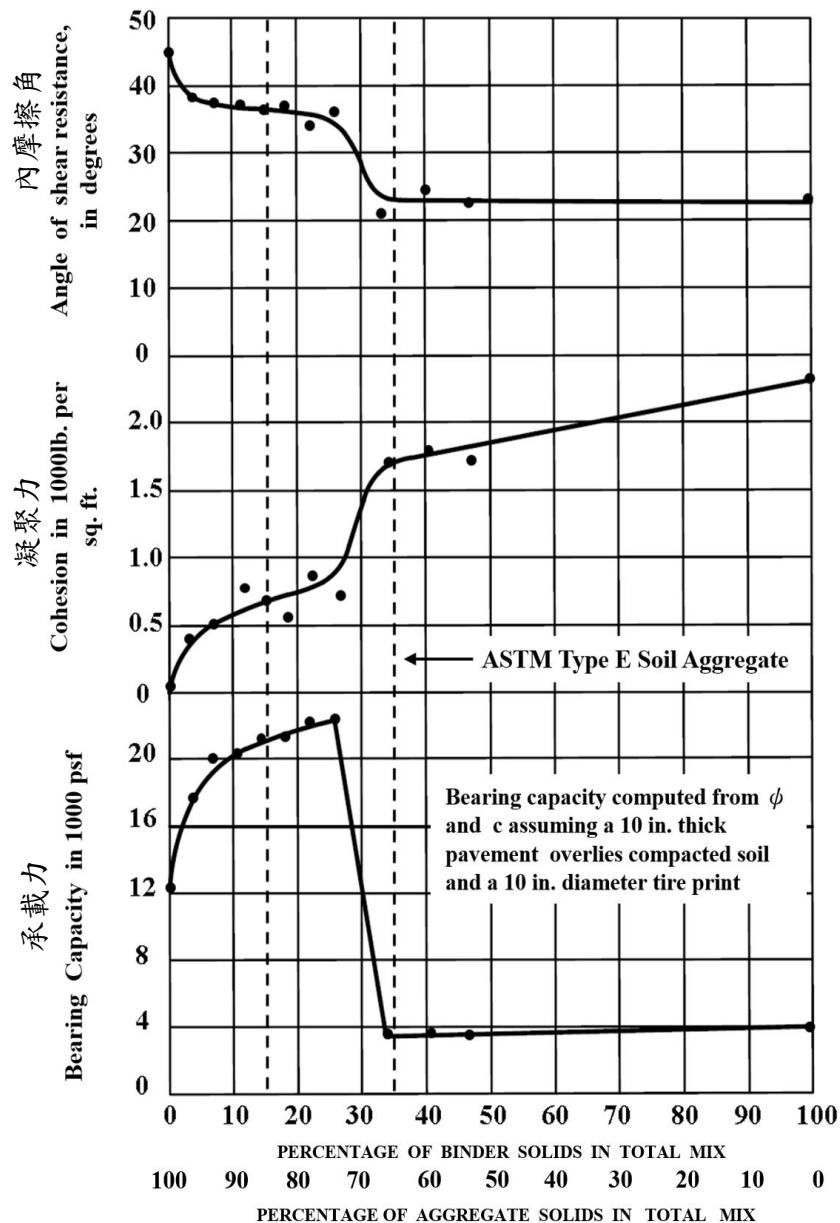


圖 3-13 拌和比例及穩定添加劑含量對凝聚力、摩擦角與承载力之影響
【文獻 3.17】

3.5.2 兩種穩定機理同時作用之創新發現

依據 3.5.1 節所述之兩種主要穩定機理的反應方式，可得一創新理論，並以摩爾圓說明穩定機理與土壤凝聚力及摩擦角之變化。如圖 3-14 所示，黏土未拌和任何粒料時，其原始摩爾圓為 A，該土壤的凝聚力為 c_a 、摩擦角 $\phi_a=0$ 。當加入任一比例的焚化再生粒料後，因拌和土樣含有焚化再生粒料及其因此而產生的穩定機理，相似於拌和的碎石粒料，混合料開始產生摩擦角，而其凝聚力理應下降，但又因為卜作嵐效應的展現，所以凝聚力反而提升。此種變化如摩爾圓 B 所示，凝聚力增加至 c_b ，摩擦角 ϕ_a 則因焚化再生粒料的穩定機理而隨之增加至 ϕ_b 。當混合料達到最佳拌和比例時，凝聚力 c_c 與摩擦角 ϕ_c 將會平衡在一個最佳的比例上，產生最大值之摩爾圓 C。

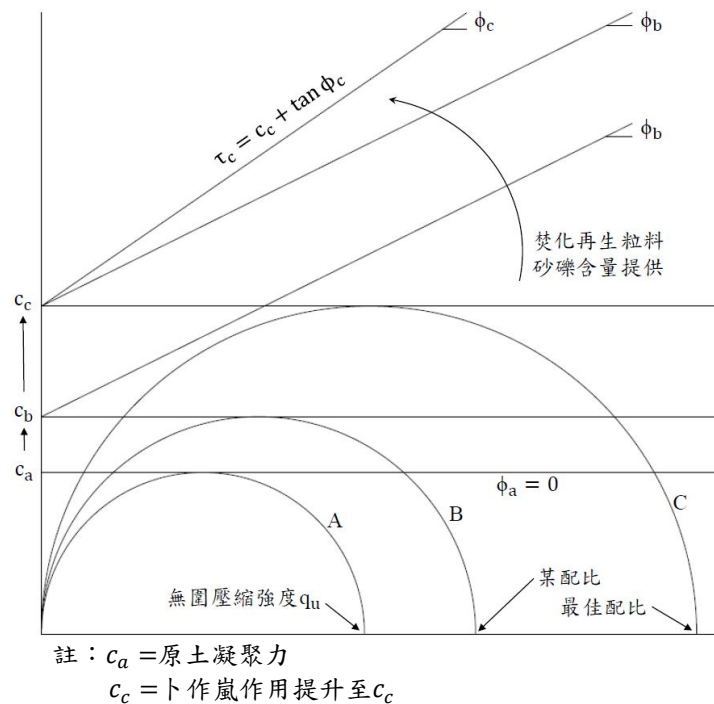


圖 3-14 混合料土樣摩爾圓與摩擦角變化示意圖【文獻 3.16】

3.5.3 焚化再生粒料之祛水特性

觀察不同顆粒的焚化再生粒料、天然砂與天然粗粒料的表面特徵發現，天然砂顆粒結構脆弱形狀不規則，其表面特性與焚化再生粒料一樣粗糙。而天然粗粒料顆粒較大，相對於砂顆粒結構較堅硬但形狀較平整。至於，焚化再生粒料表面多孔洞且粗糙，其粗糙型式更應以「毛糙」表面描述較佳【文獻 3.16】。有關焚化再生粒料顆粒之微觀特性細節說明請參閱 4.5.2 節。在過去的研究中發現焚化再生粒料擁有良好的祛水特性，由於焚化再生粒料表面呈現「多孔洞性」且為「毛糙狀」，推論此為快速祛水的原因。由於「多孔洞」與「高比表面積值」的特性，使焚化再生粒料與細粒土壤混合後，可提供大量的水分蒸散空間，當達到最佳拌和比例時遂使拌和後土壤被架構出最豐富的水分蒸發通道。再者焚化再生粒料與濕土混合能提供高表面張力將細粒土壤的水分吸出，於大氣環境快速氣乾以減水，並加速填築滾壓時程【文獻 3.15】。

參考文獻

- 3.1 Carpenter, S. H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume II, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D. C., USA, 1992.
- 3.2 Petry, T. M., “The State of Art on International Practice on Soil Stabilization Technology for Pavement and Embankment - Regulation Brief on TRB, FHWA, FAA, AASHTO, and PCA”, 桃園市政府國際研討會，2019.
- 3.3 National Lime Association, “Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil”, National Lime Association Technical Brief, 2006.
- 3.4 ASTM D4318, “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, 2018.
- 3.5 Christopher, B. R., Schwartz, C., and Boudreau, R., “Geotechnical Aspects of Pavements”, Reference Manual / Participant Workbook, NHI Course No. 132040, National Highway Institute, FHWA, Washington, D. C., USA, 2006.
- 3.6 張達德，「黏土膨脹性問題的探討與穩定改良方法之分析」，地工技術雜誌（第八期），1984。
- 3.7 Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J., Mitchell, J. K., and Thompson, M. R., “Soil Stabilization in Pavement Structures. A User’s Manual, Volume 2, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D. C., USA, 1979.
- 3.8 張達德、游坤、黃俊青、彭文煌，「石灰與飛灰對林口紅土穩定效果之研究」，行政院國科會專題研究報告，NSC-74-0414-P033-01，1986。
- 3.9 張達德、游坤、張俊陽，「台電飛灰對本省公路路基穩定效果之應用與分析」，台電-公路總局委託專題研究計畫第一期成果報告，1987。
- 3.10 石悅欽，「利用飛灰與石灰改良淡水紅土之工程性質研究」，碩士論文，淡江大學土木工程學系，1996。
- 3.11 張達德，「台電飛灰有效用於本省公路路基土壤之應用與效果分析」，台電-公路總局委託專題研究計畫第二期成果報告，1989。
- 3.12 TRB - State of The Art Report 5, “Reactions, Properties, Design, and Construction”, Prepared by Lime Stabilization Committee, TRB, National Research Council, Washington., D. C., USA, 1987.
- 3.13 張達德，「焚化再生粒料應用於土壤穩定的循環經濟關鍵技術與工法的研究-期末成果報告」，亞新工程顧問股份有限公司，2021。
- 3.14 楊樹榮，「路基土壤之不飽和吸水特性及反覆載重下之力學行為」，博士論文，中央大學土木工程學系，2005。

- 3.15 USBR 5820-89, “Performing Wet-dry Durability Testing of Compacted Soil-cement Mixtures”, United States Bureau of Reclamation, 1990.
- 3.16 歐立宸，「焚化再生粒料穩定桃園紅土配比設計的控制條件研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2019。
- 3.17 Miller, E. A., and Sowers, G. F., “The Strength Characteristics of Soil-Aggregate Mixtures”, Transportation Research Board, No 183, pp 16-32. Accession Number: 00231337, 1958.

第四章 焚化再生粒料穩定土壤成效

4.1 前言

本章針對焚化再生粒料應用於土壤穩定成效加以說明。首先摘述前期相關研究內容；其次依序介紹焚化再生粒料之材料特性及其改良土壤之化學與機械穩定機制，包括改良土壤穩定成效室內試驗及耐久性評估試驗研究成果。最後重點詳述焚化再生粒料應用於過濕/極濕土壤穩定成效特性；此外，針對國內其他地區焚化再生粒料特性與共通性亦一併加以說明。

4.2 前階段研究內容說明

本章探討焚化再生粒料於土壤穩定方面之應用，說明添加少量石灰之必要性及其加速混合料化學穩定之成效。彙整前人研究成果，說明焚化再生粒料對現地不適土壤(過濕土壤)穩定處理的物理性質差異與其化學反應後的效益，並探討各種可控制條件及配比調整，評估焚化再生粒料資源化應用的影響因素。國內研究焚化再生粒料穩定土壤成效可概分為三階段，說明如下：

4.2.1 第一階段—2014~2017 年

第一階段的工作主要是確認焚化再生粒料應用於大區域的土石填方，或重劃區整地與路基土壤處理的適用性。李建榮（2014）探討不同之焚化再生粒料配比含量與養治時間影響穩定效果的變因，利用哈佛小型夯實模製作夯實試體，同時控制恆溫、恆濕環境養治夯實試體，探討焚化再生粒料含量對於紅土改良效果【文獻 4.1】。婁智鈞（2015）利用哈佛小型夯實模與標準夯實模製作夯實試體，探討焚化再生粒料含量對於紅土與粉砂土的改良效果，並利用統計概念進行試驗數據的變異數分析，確認不同齡期、不同配比與強度之間之差異【文獻 4.2】。此階段工作掌握了新北市焚化再生粒料的化學成分（CaO 含量）與混合料強度提高顯著性的確認。

4.2.2 第二階段—2017~2019 年

近十年來行政院環境保護署與行政院公共工程委員會，積極推動焚化再生粒料應用於替代部分道路基、底層材料。若確認可行，將可啟動焚化再生粒料的資源化用途。然而由於相關規範具有混合料品質不能低於碎石級配規範之規定，故在實際使用上，焚化再生粒料與現地土壤若無法充分完成拌和，諸多的現場驗收試驗可能無法悉數通過，進而造成工程驗收的困擾，難以有效

推動此項去化應用。

現地土壤若為過濕土壤，乃工程應用上最為困難之所在。過濕土壤完成試驗室改良夯實試驗之氣乾流程須耗時一週以上，人工敲碎過篩亦須耗時近一週，極為消耗時間與人力。因耗時過長，會使工程進度大幅落後，在工程應用上造成極大的阻礙。焚化再生粒料與現地土壤的拌和作業並未頒布統一的施工流程與採樣步驟，且試驗室中設計的配比在現地作業方面亦難以精準執行。廖文輝（2019）利用焚化再生粒料的含水量控制過濕土方材料穩定成效的配比設計作業流程與採樣步驟，有效改善了此項缺點【文獻 4.3】。歐立宸（2019）利用哈佛小型夯實模與標準夯實模製作夯實試體，以不同養治天數、不同養治環境、不同粒徑、不同配比，分析各種控制條件下之應力-應變曲線變化與其所展現的諸多特性變化，並進行多方面的探討，收斂試驗結果，進而簡化、標準化設計與施工可連貫的依據準則【文獻 4.4】。

4.2.3 第三階段—2019~2022 年

第三階段為桃園市政府工務局委託中原大學環控防災科技中心執行三處示範工程，分別為福元公園、桃園機捷 A20 第二停車場及忠富路彎道改善工程。現地原狀土皆為過濕黏土且夾雜許多營建廢棄物，而使用焚化再生粒料穩定過濕路基土壤，目的在藉由其化學、機械穩定及祛水特性在與過濕黏土進行拌和後，使原先無法達到規範夯實度要求的現地過濕土壤，透過減水效果，不僅可提高夯實度亦大幅降低工期，節省成本【文獻 4.5~4.6】。

根據 CNS、AASHTO 或是 ASTM 等試驗規範規定，對於改良夯實試驗之土樣準備方式皆為將土樣氣乾、打碎過篩後，續由乾側加水至濕側，完成夯實曲線。然而試驗過程耗時過長（氣乾土樣至少須 1 週），並且與現地施工狀況難以符合，因此擬訂以焚化再生粒料直接與不過篩之現地過濕土壤進行拌和，並由濕側反向完成夯實曲線之試驗流程，同時將試驗結果與現地拌和料之改良夯實試驗進行比對及驗證，確認此創新方法之適用性【文獻 4.7】。目前正在執行穩定過濕土壤各地粒料的共通性調查，初步成果已經掌握了其共通性的一致成效【文獻 4.8】。

4.3 焚化再生粒料材料特性

4.3.1 焚化再生粒料物理與化學性質

1. 物理性質

焚化再生粒料主體為高溫燒結顆粒，其中夾雜少量（約<5%）的陶瓷、玻璃、鐵及非鐵金屬物質。

潮濕的焚化再生粒料外觀呈深灰色，烘乾後則為淺灰色並明顯呈現結塊現象，但經由手輕微撥動或是振動，即可輕易將結塊分散，此狀況應該為CaO水化固結現象。焚化再生粒料具質輕、強度高、壓縮性低及無塑性等特性。焚化再生粒料易脆裂，且磨損率較高，其比重為2.62左右，較天然砂石為低。但是由於焚化再生粒料表面毛糙並具許多微小孔洞，故其吸水能力遠高於天然砂石【文獻 4.4】。焚化再生粒料之粒徑分佈範圍如圖 4-1 所示，大於 No.4 篩者約為 10.58%；介於 No.4 篩與 No.200 篩之間者約為 85.42%；通過 No.200 篩者僅約 4.0%。依據美國統一土壤分類法（USCS）或 ASTM D2487 以桃園市 ROT 廠生產之焚化再生粒料為例其分類為級配良好砂土（SW）【文獻 4.6】。

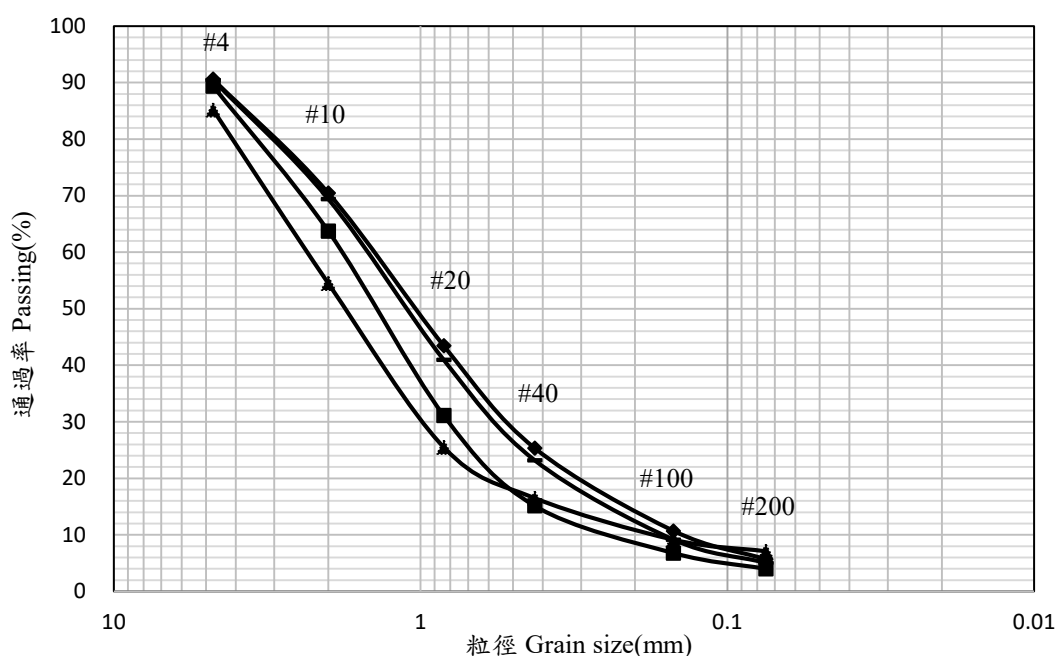


圖 4-1 焚化再生粒料濕篩法之粒徑分佈【文獻 4.6】

2. 化學性質

焚化再生粒料為一不均勻物質，容易隨著進料來源、取樣位置、貯存方法、貯存時間、再處理方法等各項因素而影響其試驗結果。以桃園市焚化底渣 ROT 處理廠所產之焚化再生粒料為例，該廠所生產之焚化再生粒料主要由 SiO₂、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃ 等氧化物組成佔 78~91%，其中 CaO 含量大於 20%，因而可發揮類似石灰穩定（Lime Stabilization）的化學穩定機制【文獻 4.7】。

焚化再生粒料化學性質屬無毒害之物質，行政院環保署和公共工程委員會於 2011 年起，陸續推動底渣再生粒料應用於道路工程試辦計畫，目

前已進行了 8 條試辦路段。焚化再生粒料在化學組成方面雖然較為複雜，惟其中仍以 SiO_2 、 CaO 佔最大部分，且業經國內外相關學者專家及環保署進行採樣檢測及監測，皆證明並無二次污染之虞【文獻 4.6】。

4.3.2 焚化再生粒料顆粒微觀特性

如圖 4-2 所示，利用電子顯微鏡（SEM）觀察焚化再生粒料表面特性，從最低倍率的影像可以觀察出，焚化再生粒料表面呈多孔洞狀，且表面屬於毛糙狀。以 BET 比表面積檢測法施作單顆粒料的比表面積值及孔洞分析試驗。表 4-1 比較量測後實際的單顆粒料比表面積值差異。由試驗數據可以明顯看出，單顆焚化再生粒料的 BET 比表面積值較單顆天然粒料 BET 比表面積值高一倍左右【文獻 4.3~4.4、文獻 4.6】。

表 4-1 天然粒料與焚化再生粒料的比表面積值之比較【文獻 4.4】

種類	BET 比表面積值
天然粒料	$0.3921 \text{ m}^2/\text{g}$
焚化再生粒料	$0.7693 \text{ m}^2/\text{g}$

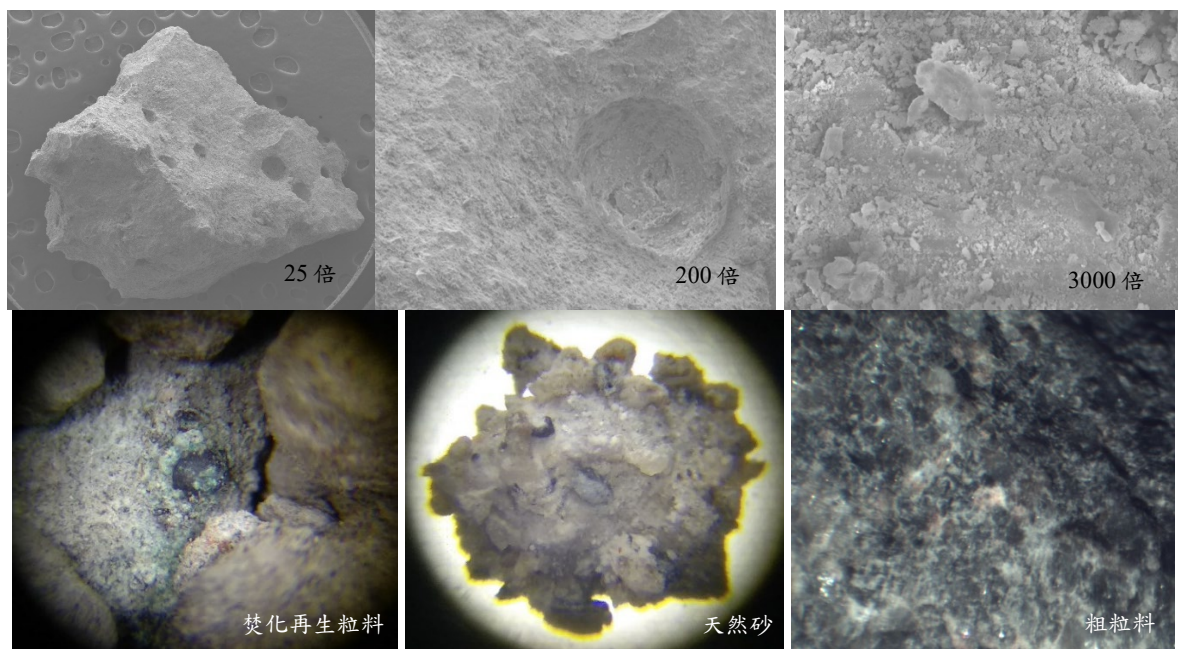


圖 4-2 焚化再生粒料表面特徵及實體顯微鏡影像【文獻 4.4】

4.4 焚化再生粒料改良土壤化學與機械穩定機制

4.4.1 改良土壤化學穩定機制

由於焚化再生粒料、水與黏土拌和後，氧化鈣（ CaO ）會與黏土之氧化鋁

(Al_2O_3)、二氧化矽 (SiO_2) 和氧化亞鐵 (Fe_2O_3) 等產生卜作嵐效應而生成矽酸鈣或鋁酸鈣，填充土壤之間的孔隙，提升顆粒間相互膠結能力，使得土壤顆粒相互緊密結合而增加強度【文獻 4.1】。

焚化再生粒料內的氧化鈣（石灰穩定），在一定程度上可以改變所有細粒土壤的工程性質，在中、高塑性的黏土中會有最顯著的效果。石灰穩定主要是由於石灰提供的鈣離子 (Ca^{2+}) 與黏土礦物表面上正常吸附的氫鍵陽離子 (H^+) 交換而發生的。反應後可使膨脹性降低、塑性指數降低、保水能力降低、夯實特性改善、土壤抗壓強度提升等【文獻 4.9】。

為瞭解黏土與焚化再生粒料在不同粒徑下之拌和土樣 pH 值差異，進行篩號與 pH 值關係試驗。如表 4-2 所示，愈新鮮或愈濕潤的再生粒料其 pH 值濃度有愈高的趨勢，且三種篩號粒料皆符合此現象。圖 4-3 試驗結果顯示，使用通過 No.10 篩以下的細顆粒再生粒料拌和土壤後，可得較高的 pH 值，詳表 4-3 試驗編號 2、3、4、6、8、10。由試驗編號 9 的結果可以看出，經過高溫烘乾後的再生粒料則無法提升 pH 值。由上述試驗結果亦可得到，紅土對 pH 值應該無直接影響。總結上述兩個試驗，若以 pH 值判斷是否適合做為穩定摻料，則應選擇新產出之焚化再生粒料，並以通過 No.10 篩之粒料拌和土壤，始具最顯著的化學穩定效果【文獻 4.4】。

表 4-2 不同狀態焚化再生粒料 pH 值試驗結果【文獻 4.4】

粒料狀態	含水量	通過篩號		
		#4	#10	#40
氣乾焚化再生粒料	6%	9.86	10.047	10.029
微潮焚化再生粒料	10~12%	11.34	11.511	11.26
新產出焚化再生粒料	20%	12.242	12.257	12.022

表 4-3 不同篩號 pH 值試驗結果【文獻 4.4】

篩號 (通過) 和狀態				配比 (焚化再生粒料：土)					
No.	土	焚化再生粒料		0:1	0.2:1	0.4:1	0.6:1	0.8:1	1:1
1	Air Dry	#4	Air Dry #4	6.501	8.257	8.441	8.604	8.993	8.997
2	Air Dry	#10	Air Dry #10	6.614	8.68	9.361	9.904	10.123	10.46
3	Air Dry	#4	Air Dry #40	6.966	9.154	9.781	10.165	10.385	10.56
4	Air Dry	#4	Air Dry #10	6.657	8.694	9.494	9.971	10.274	10.521
5	Air Dry	#40	Air Dry #4	7.048	8.112	8.497	8.723	8.874	9.023
6	Air Dry	#40	Air Dry #10	7.148	8.287	8.646	8.957	9.147	9.601
7	Air Dry	#10	Air Dry #4	7.212	8.11	8.506	8.691	8.948	9.026
8	Air Dry	#40	Wet #40	7.155	9.079	9.666	10.091	10.445	10.555
9	Air Dry	#40	Oven Dry #40	7.165	7.968	8.456	8.804	8.88	8.957
10	Oven Dry	#40	Air Dry #40	6.452	9.008	9.752	10.274	10.576	10.658

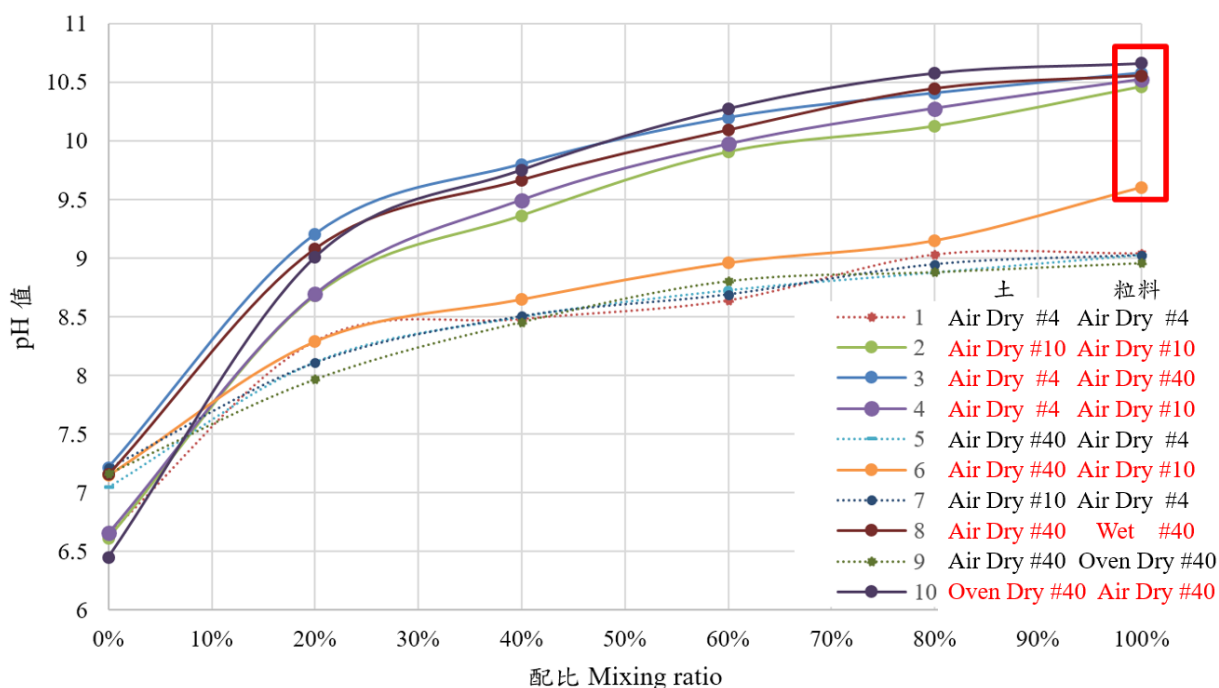


圖 4-3 不同焚化再生粒料狀態、粒徑與紅土穩定混合料之 pH 值【文獻 4.4】

4.4.2 改良土壤機械穩定機制

依據 Soil-aggregate Mixture Theory (「土壤-碎石」混合理論)，焚化再生粒料之顆粒組成中主要以砂成分為主，而砂礫石與土壤拌和後可使土壤顆粒構成更為緻密。卜作嵐效應 (Pozzolanic Reaction) 則為焚化再生粒料與黏土中的鋁 (Alumina) 產生膠結作用，形成鈣鋁水化物 (Hydrated Calcium Aluminate) 之膠體狀物質，逐漸形成穩定的鍵結，進而增加土壤強度。藉由焚化再生粒料之氧化鈣含量相近之配比相互比對，焚化再生粒料於養治 28 天強度增加量較高，焚化再生粒料中砂礫石組成扮演機械穩定重要角色，提供級配調整功能，使黏土改良強度產生顯著提升【文獻 4.4、文獻 4.9】。

游離 Ca^{+2} 的化學穩定成效，只對黏土顆粒發揮作用，亦即提高無圍壓縮強度或是凝聚力。當穩定添加劑配比增加時，混合料中黏土所佔的比例亦隨之下降。由於配比 1.0 是本研究之最高值，相對於黏土的重量比幾乎為一半。因此，針對無圍壓縮強度試樣的黏土單位重量的強度（或凝聚力），特別試算列於表 4-4 中。由這些數據的比對，焚化再生粒料中的 CaO 成分，可進一步確認其提升黏土強度的貢獻是肯定的。由試驗得知 CaO 含量應該大部分存在於 <No.10 篩的粒料中，而大於 No.10 篩的粒料則多為高溫燒結的顆粒，在剪力強度的貢獻上可額外提供摩擦角 ϕ 值，提供了機械穩定的加權效果【文獻 4.4】。

表 4-4 黏土單位重量提供抗壓強度【文獻 4.4】

	配比							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0
CaO 含量(%)	0.00	2.08	3.81	5.27	6.53	8.57	10.16	11.43
細顆粒含量(%)	95.00	86.36	79.17	73.08	67.86	59.38	52.78	47.50
粗顆粒含量(%)	5.00	13.64	20.83	26.92	32.14	40.63	47.22	52.50
混合料無圍抗壓強度(kg/cm ²)	1.05	1.65	1.54	1.71	2.03	2.23	1.84	1.9
黏土單位重量提供抗壓強度 (kg/cm ²)	1.11	1.91	1.95	2.34	2.99	3.76	3.49	4.00

4.4.3 化學與機械穩定合併考量

焚化再生粒料穩定土石方，主要由機械穩定（Soil-aggregate Mixtures Theory）與化學穩定（卜作嵐作用）所提供的物理與化學強度提升機理。在土壤-碎石混合理論中提到，拌和土樣的拌和比例會影響混合料的摩擦角（ ϕ ）與凝聚力（ c ）。由研究結果可以發現碎石粒料的含量越高，則其拌和土樣的凝聚力愈低、摩擦角愈高；而同時在卜作嵐作用反應下，其凝聚力將會隨著反應時間的提升而逐漸提高（細節參見 3.4 節）【文獻 4.4】，因此焚化再生粒料與土壤進行充分的拌和，砂礫石成分拌和黏土提供級配調整效果及高含量氧化鈣組成產生離子交換的功能及卜作嵐效應，結合機械穩定及化學穩定之複合改良機理，使得拌和後達到強度上升、耐久性效果提高的效果【文獻 4.9】。

4.5 焚化再生粒料改良土壤穩定成效室內試驗研究

為使過濕土壤與焚化再生粒料在不同混合比例與控制條件下之特性能完整呈現，俾使各種特性與穩定機制能有更清楚的了解，其相關試驗包含：基本物理性質試驗、夯實試驗及無圍壓縮試驗，其試驗方法規劃如下：

1. 基本物理性質試驗與土壤分類

土樣及焚化再生粒料所使用的基本物理性質試驗包括：土壤顆粒粒徑分佈試驗、阿太堡試驗、自然含水量、比重、統一土壤分類及不同粒徑混合料 pH 值試驗。其中所使用之焚化再生粒料均須向環保局提出供料申請，並由環保局提出供料證明。

2. 夯實試驗與無圍壓縮試驗與養治條件

混合料使用之試樣製作方式有下列三種，分別是哈佛小型夯實試驗、標準夯實試驗及改良夯實試驗三種試驗。製作試樣後分別進行 49°C、48 小時養治後，進行無圍壓縮試驗，取得應力-應變曲線，深入了解其強度改變的特性，以及其與養治齡期的關係。

3. 路基土壤強度試驗

利用國內柔性鋪面結構設計所慣用的路基土壤強度表示法，主要為美國加州公路局採用的加州載重比（CBR）試驗法與路基土壤阻力值（R 值）試驗法，以及美國瀝青協會（AI）與美國州公路及運輸官員協會（AASHTO）採用的路基土壤回彈模數（ M_R ）值試驗法，評估柔性鋪面結構道路路基土壤強度設計，作為提供將來設計道路厚度之參考。

針對國際標準規範或手冊規定之相關試驗，相關研究成果摘要說明如下：

4.5.1 基本物理性質與土壤分類

依據相關規範進行基本物理性質試驗，試驗項目包括：土壤顆粒粒徑分佈試驗、阿太堡液塑性限度試驗、含水量試驗、比重試驗、統一土壤分類系統與 pH 值試驗，試驗結果如表 4-5 所示【文獻 4.10~4.15】。

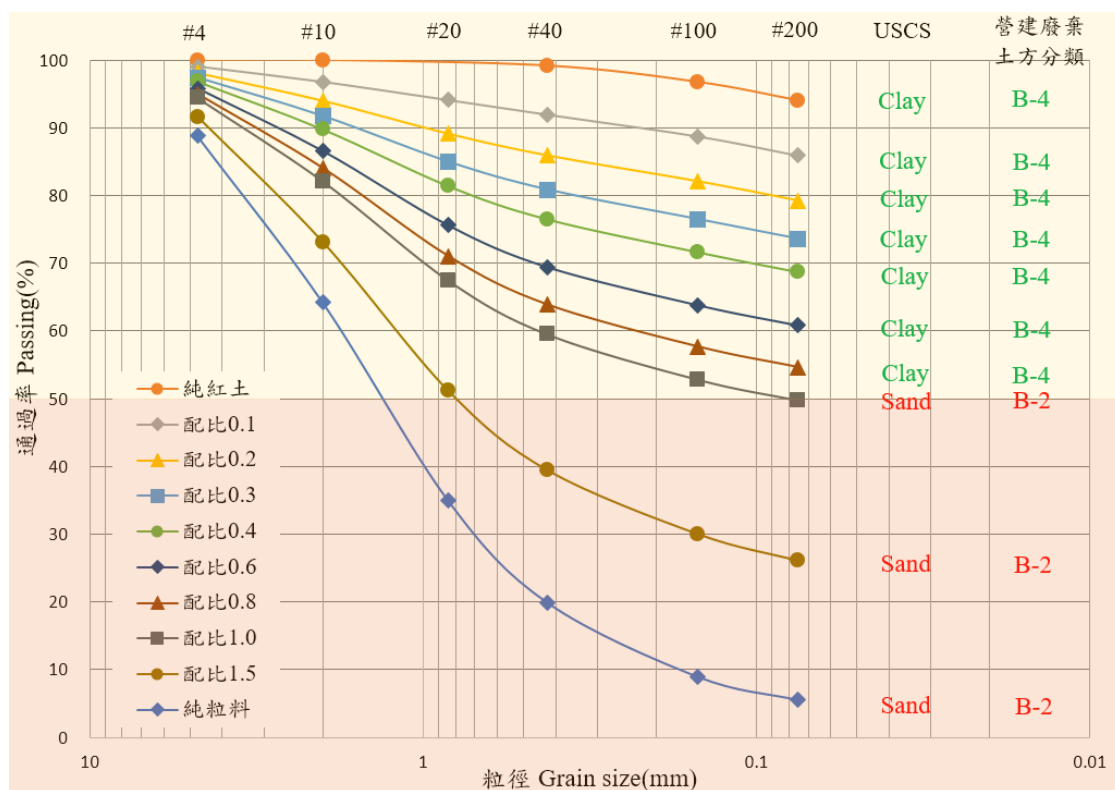
表 4-5 基本物理性質試驗項目

試驗項目	規範
土壤顆粒粒徑分佈試驗【文獻 4.10】	CNS 11776/ ASTM D422
阿太堡液塑性限度試驗【文獻 4.11】	CNS 5087/ ASTM D4318
含水量試驗【文獻 4.12】	CNS 5091/ ASTM D2216
比重試驗【文獻 4.13】	CNS 5090/ ASTM D854
統一土壤分類【文獻 4.14】	ASTM D2487
pH 值試驗【文獻 4.15】	ASTM D6276-99a

1. 不同配比對土壤粒徑變化與分類評估

由粒徑分析數據顯示焚化再生粒料屬於良好級配砂（SW），紅土則為高塑性黏土（CH）。為觀察拌和比例之影響，將二者以不同比例拌和（粒料：黏土）：0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5，拌和後之混合料分別進行粒徑分析試驗。如圖 4-4 所示，各類拌和比例之粒徑分佈曲線顯示，焚化再生粒料比例的增加可使紅土從 CH 逐漸轉變為砂質土壤【文獻 4.16】。

由圖 4-4 可知，原土樣的各篩號通過率隨著焚化再生粒料添加比例之增加而下降，配比到達 1.0 時，No.200 篩通過率剛好低於 50% 達 44.8%。依據統一土壤分類法，拌和料從黏土質土壤改變為砂性土壤。而營建廢棄土方分類則由 B-4（或是 B-6）轉變為 B-2，機械穩定方法簡單而直接，效果立見【文獻 4.16】。



2. 化學穩定對混合料的液塑性限度影響分析

本節分析分為兩個部分，以觀察不同配比之阿太堡液性限度與塑性限度的變化。一為拌和後隔夜室溫養治；另一為抗壓試體經 23℃、28 天恆濕室養治抗壓試驗完成後的試樣。第一部分是先完成不同配比下之阿太堡液性限度與塑性限度，試驗比例包括：0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.8、1.0【文獻 4.16】。試驗結果如表 4-6、圖 4-5 所示，液性限度隨著焚化再生粒料拌和比例的增加而降低，惟隨著拌和比例的增加，液性限度下降的趨勢逐漸減緩。在拌和比例超過 40%時，液性限度開始低於 50。而塑性限度方面，正好與液性限度所展現出來的趨勢相反，隨著焚化再生粒料拌和比例的增加而增加且逐漸趨緩。二者之變化遂導致塑性指數（PI）隨著拌和比例的增加而降低，顯示混合料從高塑性土壤逐漸轉變為低塑性土壤【文獻 4.16】。

第二部分則為養治過後（23°C、28 天）並且完成無圍壓縮試驗之試樣，氣乾打碎過篩後執行阿太堡液塑性限度試驗。部分選用的試樣配比為 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0。從試驗結果可知，由最低的拌和比例開始，液性限度已經低於 50，顯示經過 23°C、28 天養治後之試樣，其降低塑性的效果更為明顯且其統一土壤分類已從 SC 轉變為 SM。此結果亦說明了在再生粒料中的 CaO 活性可能不如單獨添加新鮮石灰的顯著，須經過養治後才能逐漸發揮其化學穩定機制，惟仍然可以顯現，焚化再生粒料的 CaO 成分實為有價資源。在穩定土方及活化土石資源的應用方面有其價值，實不容許輕易掩埋浪費【文獻 4.16】。

表 4-6 不同配比混合料化學穩定前後阿太堡限度試驗結果比較【文獻 4.16】

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
LL _(Before)	59.74	54.99	50.89	50.21	50.54	49.02	48.59	46.35	45.08
LL _(After)	-	-	45.00	-	43.71	-	40.61	41.75	38.36
PL	21.37	21.21	22.92	24.14	25.54	23.15	24.96	24.76	24.66
PI _(Before)	38.37	33.78	27.97	26.07	25	25.87	23.63	21.59	20.42
PI _(After)	-	-	22.08	-	18.17	-	15.65	16.99	13.70

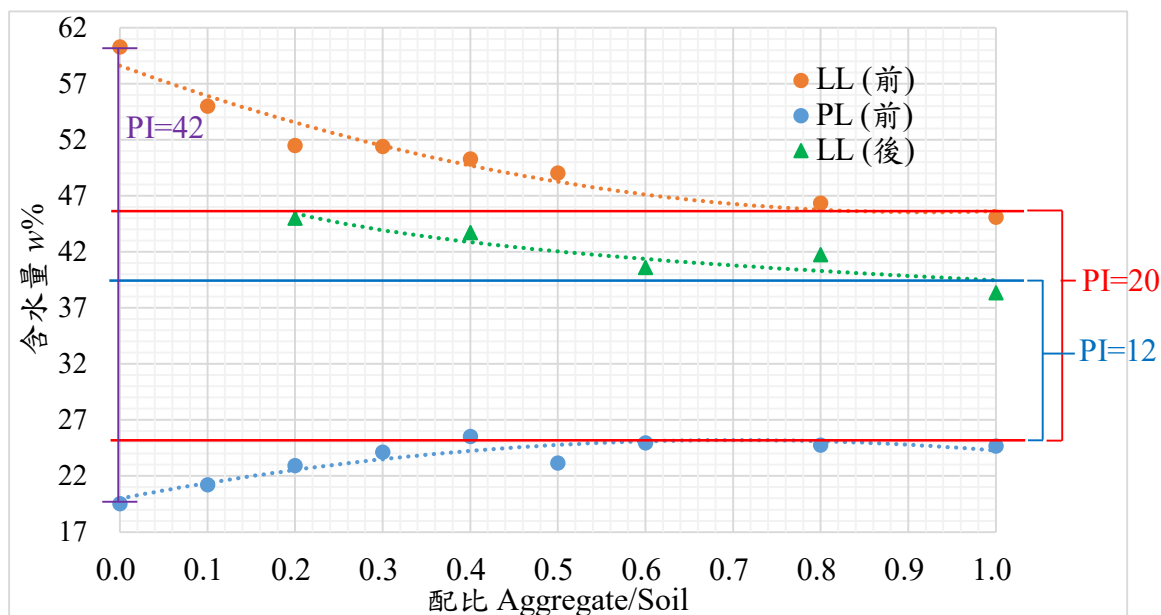


圖 4-5 不同配比粒徑分佈與液塑性限度相關圖【文獻 4.16】

4.5.2 夯實試驗與無圍壓縮試驗

為評估不同再生粒料粒徑、不同配比及養治齡期等各種不同條件對土壤穩定成效顯著性的影響，相關研究依據不同規範進行夯實試驗製作試體，試驗項目包括：哈佛小型夯實試驗、標準夯實試驗與改良夯實試驗，如表 4-7 所示【文獻 4.17~4.19】。

表 4-7 夯實試驗項目

試驗項目	規範
哈佛小型夯實試驗【文獻 4.17】	Humboldt H4165
標準夯實試驗【文獻 4.18】	ASTM D698
改良夯實試驗【文獻 4.19】	CNS 11777-1/ ASTM D1557

1. 哈佛小型夯實試驗 (Humboldt H 4165)

(1) 目的

哈佛小型夯實試驗 (Harvard Miniature Compaction Test) 是由

哈佛大學開發研究的試驗方法，試驗方式與改良夯實試驗相同，僅試驗試樣尺寸不同。主要係用以測定土壤含水量與乾土單位重間之關係，進而決定最大乾單位重及最佳含水量。因試樣尺寸經過特殊設計（特製 $1/454 \text{ ft}^3$ 夯實模具），經公、英制轉換試樣之公制重量（g）的數值，會等於英制單位重（pcf）值，方便工程師簡化計算過程。同時，試樣的直徑：高為 1：2，直接適用於抗壓強度試驗。

在土壤穩定的相關規範與研究成果，均採用多組試樣為之，以此方法製作試樣，具備方便製作並大量減少試驗用土之效益。

(2) 試驗儀器（圖 4-6）

- 20 lb 壓力之彈簧夯錘。
- 專用頂土器及延伸環拆除器。
- 特製 $1/454 \text{ ft}^3$ 夯實模具。
- 電子秤、烘箱、恆濕恆溫箱。
- 拌和工具、修模工具等。



a. 夯實錘



b. 頂土器



c. 延伸環拆除器



e. 哈佛小型夯實試驗
標準夯實模

圖 4-6 哈佛小型夯實試驗使用之儀器

(3) 試驗步驟

- 依照試驗所須之拌和比例，準備適量通過 No.10 篩、No.4 篩之土樣及焚化再生粒料，以土樣乾單位重為 100% 基準，分別添加焚化再生粒料依比例拌和。
- 試驗用土樣拌和方式分為以下兩種：

- 為求夯實曲線之最佳含水量，須先將拌和土樣置於桶內。依照工程師經驗緩慢添加水分至夯實曲線乾、濕側，至少須分為5點以上（乾、濕側至少皆須兩點以上）。每達一個含水量即將製作試體所須用量分裝至盆中，量測當前含水量，上膜密封進行養治。
- 為求最佳含水量 +2% (OMC+2%) 試體強度變化，須在拌和前事先量測試驗用土樣及焚化再生粒料之含水量，再將拌和土樣置於桶內，並以最佳含水量 +2% 範圍內為目標拌和土樣，完成後量測當前含水量，並上膜密封進行養治。
- 試驗用土樣調配好後，皆須上膜密封養治至少一天。
- 進行哈佛小型夯實試驗，須分 5 層進行夯實，每層夯實 25 下。每 5 下一組，每組夯實上、下、左、右、中之後旋轉 15 度，重複進行直至完成 25 下夯實。每層夯實面須以刮刀刮糙接觸面，以利下一層夯實可以完整接合，不會有一層破壞面殘留。第 5 層夯實完畢時，試體土樣位置須於延伸環一半高度位置附近。
- 夯實完成後，使用拆除延伸環。修模，秤重，續使用頂土器取出土樣，測其含水量並繪製夯實曲線。
- 完成後試體須以保鮮膜包裹試體進行養治。
- 達養治齡期後，試體即可以進行無圍壓縮試驗。

2. 標準夯實試驗 (ASTM D698-12)

(1) 目的

本試驗最早由 R. R. Proctor 於 1933 年提出，經過改良後為目前最常用之標準夯實試驗。本次試驗使用標準夯實 A 型試驗，最大顆粒粒徑不大於 No.4 篩 (4.75mm)，透過 5.50 lbf (24.5 N) 夯錘、12 in (30.48 cm) 落距產生 12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³) 的總能量進行夯實，求取已知尺寸模具的乾單位重夯實曲線及重模含水量 (Molding Water Content)，以決定 $\gamma_{d \max}$ (最大乾密度) 與 OMC (最佳含水量)。

(2) 試驗儀器與試驗步驟

詳【文獻 4.18】。

3. 改良夯實試驗 (ASTM D1557-12)

(1) 目的

本試驗由美國工程兵團於 1945 年提出，為標準夯實試驗改良結果，有時被稱為改良 Proctor 試驗 (Modified Proctor Compaction Test)。本次試驗使用改良夯實 A 型試驗，最大顆粒粒徑不大於 No.4 篩 (4.75mm)，透過 10 lb f (49 N) 夯錘、18.00 in (45.72 cm) 落距產生 56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³) 的總能量進行夯實，求取已知尺寸模具的乾單位重 (夯實曲線) 及含水量，以決定 $\gamma_{d \max}$ (最大乾密度) 與 OMC (最佳含水量)。

(2) 試驗儀器與試驗步驟

詳【文獻 4.19】。

4. 養治條件

前期研究規劃 0、0.1、0.2、0.3、0.4 配比的混合料均執行分別於 23°C 養治 7 天、14 天與 28 天的無圍壓縮強度試驗，以了解 CaO 於混合料中對黏土的強度與齡期發展影響。在隨著齡期的強度發展顯著性的確認下，後續研究工作特選定 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 的配比以快速養治環境 (49°C、48 小時) 模擬 23°C、28 天養治齡期強度發展【文獻 4.20】。

4.5.3 路基土壤強度試驗

利用各種夯實試驗分別製作試樣後進行無圍壓縮試驗，取得應力-應變曲線，深入了解其強度改變的特性，以及與養治齡期的關係，如表 4-8 所示【文獻 4.19】。

表 4-8 無圍壓縮試驗項目

試驗項目	規範
無圍壓縮試驗【文獻 4.20】	CNS 12384 ASTM D2166 / D2166M-16

無圍壓縮試驗為三軸不壓密不排水試驗 (UU Test) 的一個特例，因 UU Test 之總應力圓，不論外力增量之變化，其直徑皆相同，且有效應力圓直徑亦與總應力圓相同，因此等同於三軸試驗時圍壓等於零之狀況亦可稱之為單軸壓縮試驗。試驗時以應變控制方式軸向加壓於凝聚性土壤試體，試體破壞時之破壞應力稱之為無圍壓縮強度 (q_u)；無圍壓縮強度之半視為該凝聚性土壤試體之凝聚力 (c)。

1. 抗壓強度與養治齡期關係

配比 0.0~0.4 的應力-應變曲線如圖 4-7~圖 4-12 所示。除低配比 0.1 之齡期 7 天、14 天、28 天 q_u 值差異不大外，其餘 0.2、0.3、0.4 配比之應力-應變曲線斜率與抗壓強度均隨著養治齡期與配比之增加而顯著提高。粒料中的 CaO 含量及其衍生之卜作嵐效應顯然確實發生作用。隨著齡期之增加，強度發展逐漸明顯。其中 7 天、14 天似乎差異不大，但於 28 天養治條件時，抗壓強度值上升接近 2 倍，如圖 4-12 所示【文獻 4.16】。

相關研究指出，當 28 天齡期的強度顯著上升時，鈣離子 Ca^{+2} 飽和的卜作嵐效應可被確認已經產生並將於三年內持續提升強度。而隨著配比增大，其 28 天齡期的強度明顯的逐步上升；其應力-應變的斜率（抗壓模數 E 值）亦可明顯提高。依據試驗結果可推論粒料中的 CaO 成分應該確實提供了強度上升的機制【文獻 4.16】。

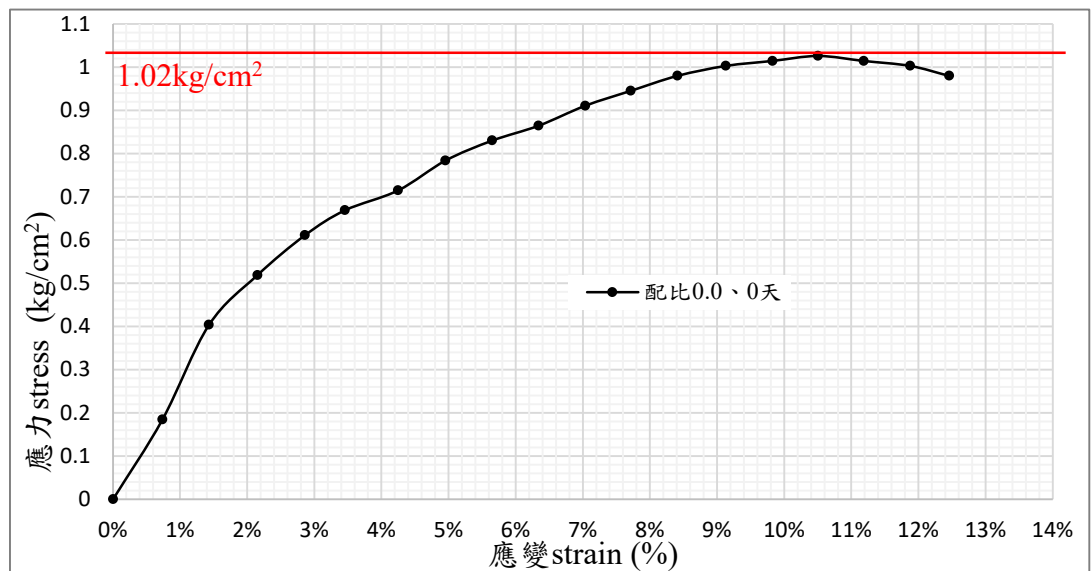


圖 4-7 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治 0 天配比 0.0 強度【文獻 4.16】

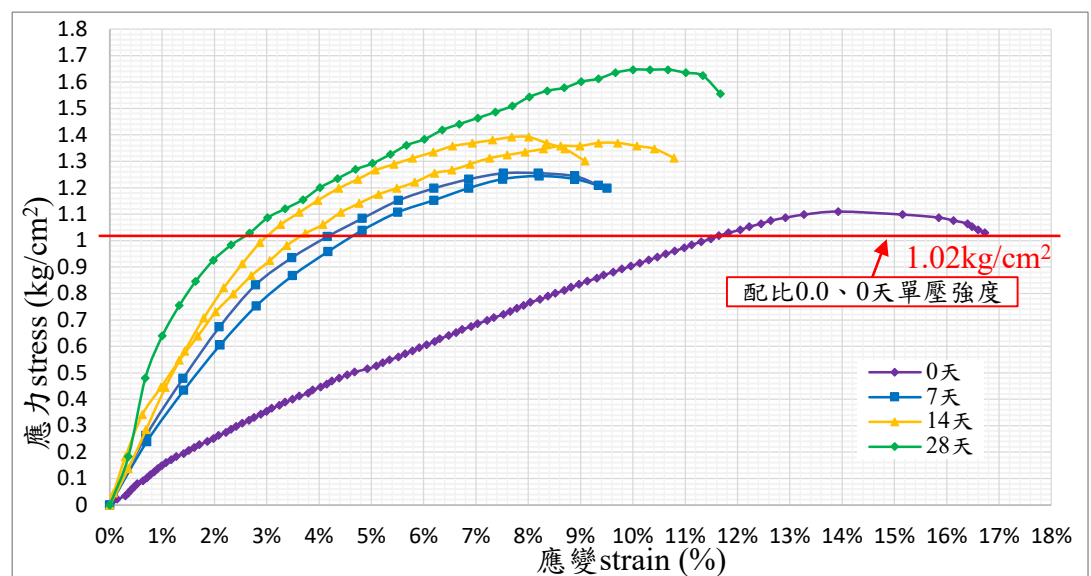


圖 4-8 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.1 各齡期強度【文獻 4.16】

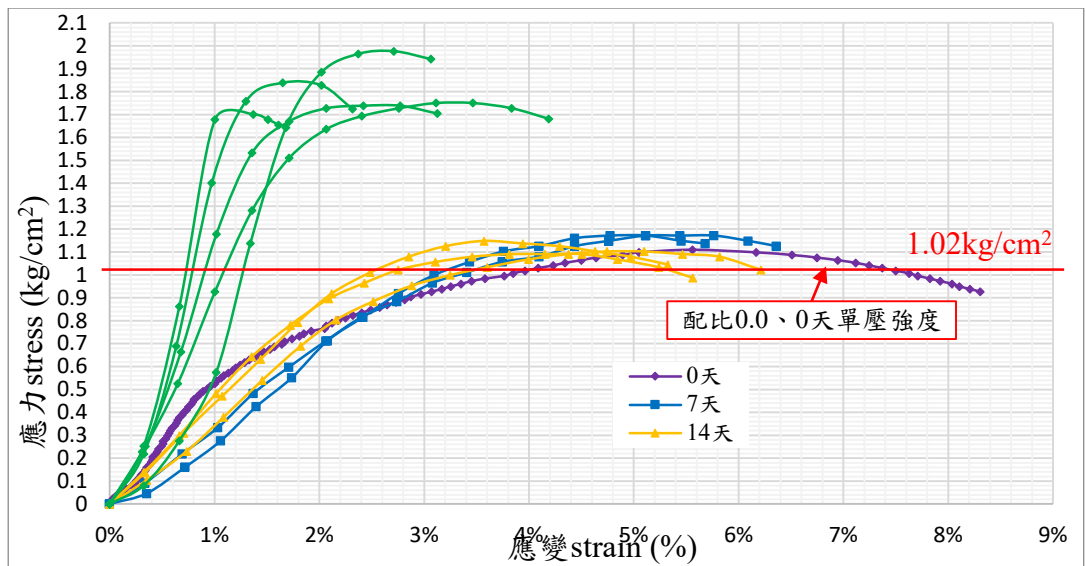


圖 4-9 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.2 各齡期強度【文獻 4.16】

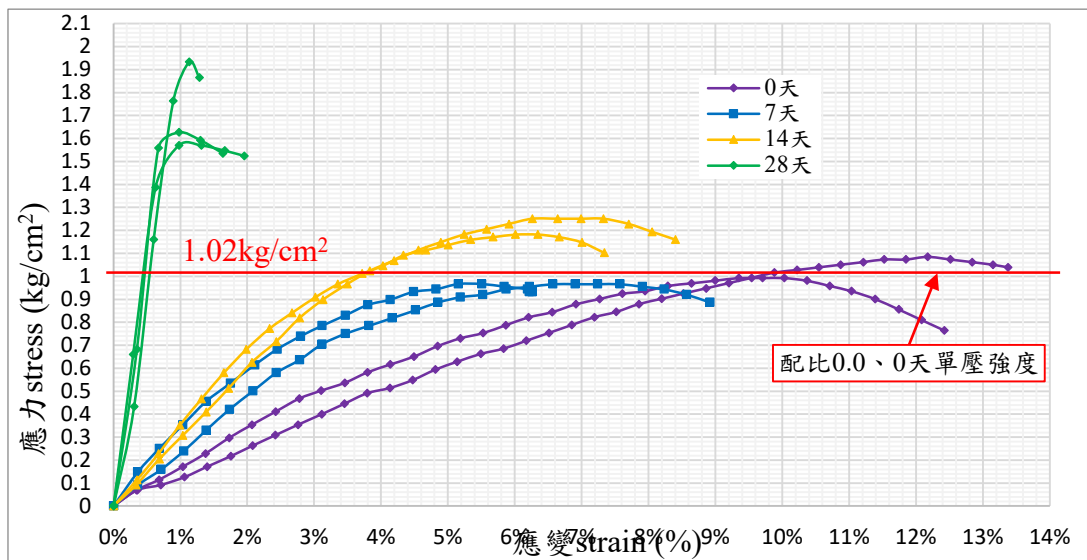


圖 4-10 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.3 各齡期強度【文獻 4.16】

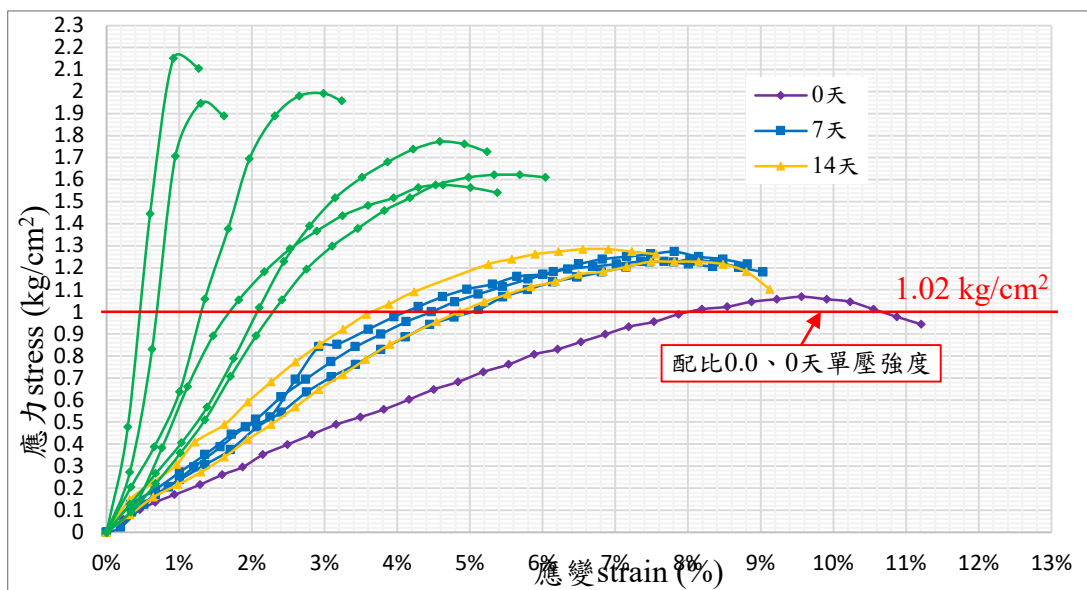


圖 4-11 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治配比 0.4 各齡期強度【文獻 4.16】

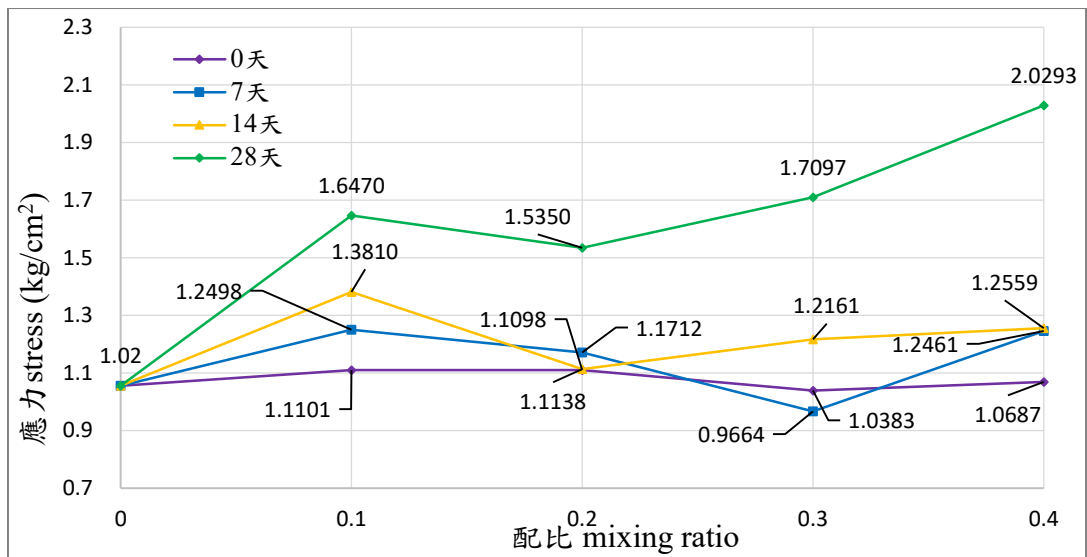


圖 4-12 哈佛小型夯實試驗 23°C 養治各配比各齡期強度【文獻 4.16】

2. 快速養治條件的強度評估

前述抗壓強度與養治齡期的顯著關係，佐證粒料的拌和可具體提升土壤強度，因此規劃進一步的試驗，觀察相同方式製作的試體其他配比（0.2、0.4、0.6、0.8、1.0）之強度變化並採用 49°C、48 小時的濕室快速養治條件，以比較其與 23°C、28 天養治方式之差異。快速養治的抗壓強度成果觀察，只選取接近 OMC 乾、濕側的三只試樣結果呈現，以方便清楚比對評估。相關強度與應變值如表 4-9 所示，而強度的比較對應配比則繪於圖 4-13~圖 4-17。依據圖 4-13~圖 4-17 的結果，清晰可見添加粒料的強度提升，於配比 0.2、0.6 與 1.0 效果顯著，而配比 0.4 與 0.8 的應力則不升反降，其對應的應變也較其他者為高。這個現象則可能因為粒料均須通過 No.10 篩（哈佛小型夯實試驗的要求），其部分粒料均勻度不足所致【文獻 4.16】。

依據強度評估的規範，同時考量粒料顆粒分佈的均勻性，必須採用標準夯實模具備製試樣以了解較大顆粒（No.10~No.4）的影響（哈佛小型夯實試樣採取<No.10 的土樣與粒料），標準夯實試驗的夯壓試樣直接用於抗壓試驗。前述相關規範標準夯實試樣足尺寸的養治後強度施作耗時過長，故直接採用標準夯實試驗的試樣進行強度試驗（圖 4-18），無須另外製作直徑：高=1：2 的強度試樣【文獻 4.16】。

相關試驗結果繪如圖 4-19 所示，此部分的養治條件由於濕室養治空間限制，採用 23°C，0 天、7 天與 28 天的方式。由試驗數據可知，標準夯實試驗 7 天短期強度，在拌和比例 0.1~0.3 時，其無圍壓縮強度略微下降；拌和比例 0.4~0.8 之無圍壓縮強度則有明顯增加。

於齡期 28 天時，所有拌和比例之無圍壓縮強度均呈現上升之趨勢，尤其在拌和比例 0.2~0.8 時之無圍壓縮強度有顯著提升，整體強度約可達到 3.0~3.4kg/cm²。標準夯實試樣的抗壓強度由此可見，於配比 1.0 的強

度表現不夠理想，較 0.6、0.8 配比反而降低約 30%。針對此點說明了粗粒料（No.10 篩~No.4 篩）部分，摻入混合料中超過一定比例（佔混合料的一半）無圍壓縮試驗的結果難以適當的反應試樣的抗剪強度【文獻 4.16】。

表 4-9 49°C 養治 48 小時哈佛小型夯實試體強度與破壞應變值【文獻 4.16】

配比	試樣 1		試樣 2		試樣 3	
	強度(kg/cm ²)	應變(%)	強度(kg/cm ²)	應變(%)	強度(kg/cm ²)	應變(%)
0.2	1.32	4.6	1.18	4.9	1.20	6.6
0.4	1.59	4.5	1.62	5.3	1.77	4.7
0.6	2.17	1.1	2.28	1.5	2.25	1.4
0.8	1.80	6.5	1.85	5.5	1.88	5.6
1.0	1.93	2.2	1.87	2.9	1.91	1.9

註：配比為 0.0 的土樣強度為 1.05kg/cm²，破壞應變為 10.5%。

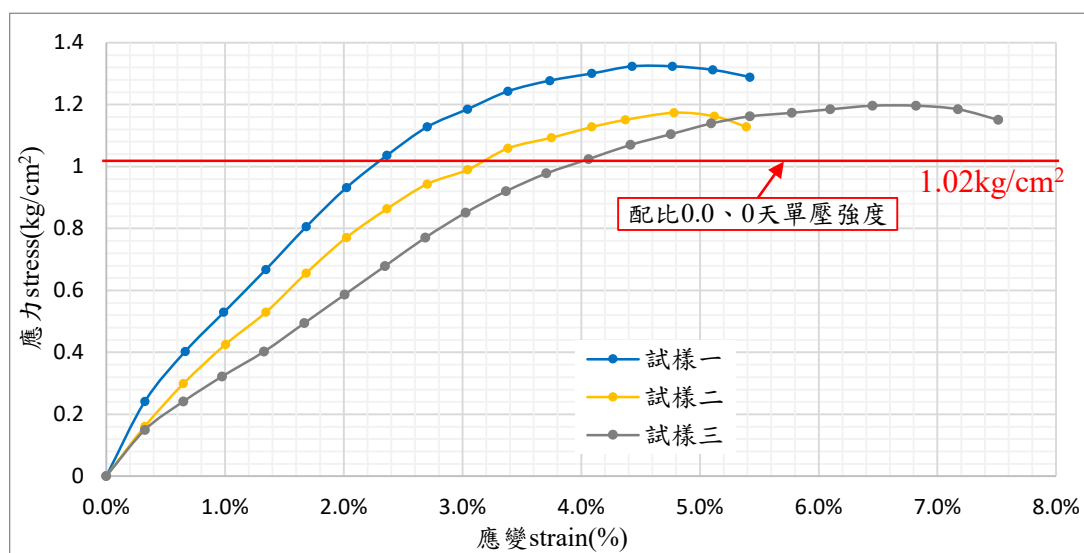


圖 4-13 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.2 強度【文獻 4.16】

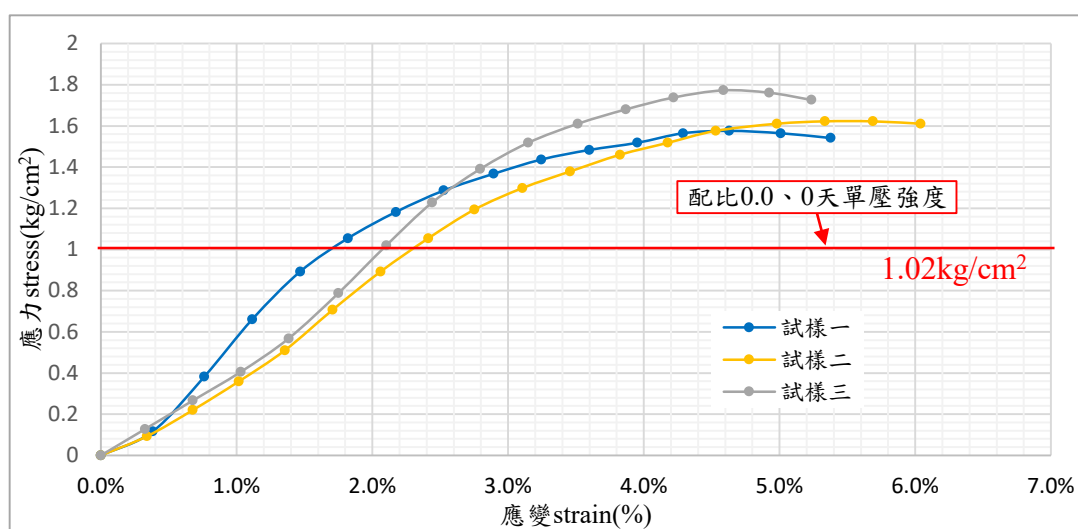


圖 4-14 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.4 強度【文獻 4.16】

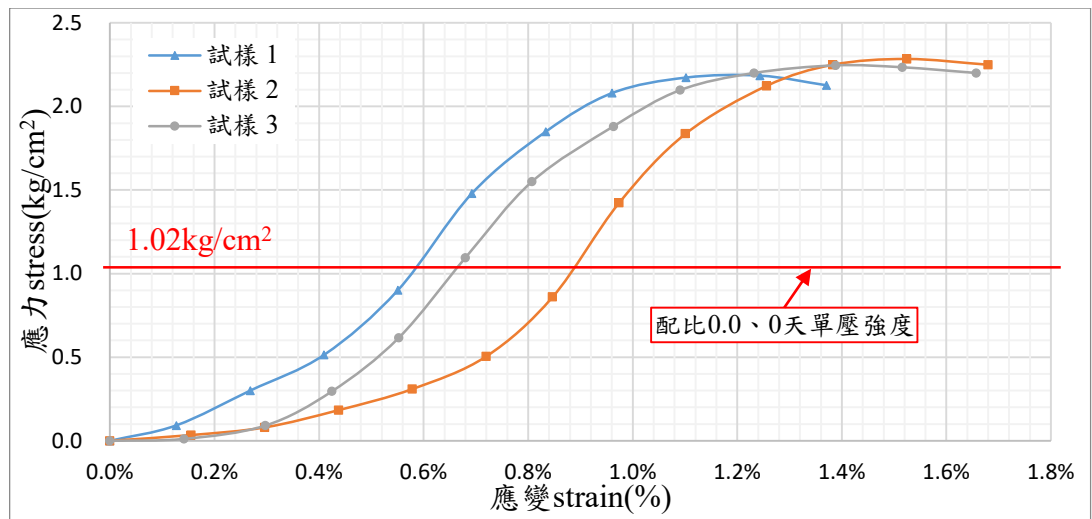


圖 4-15 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.6 強度
【文獻 4.16】

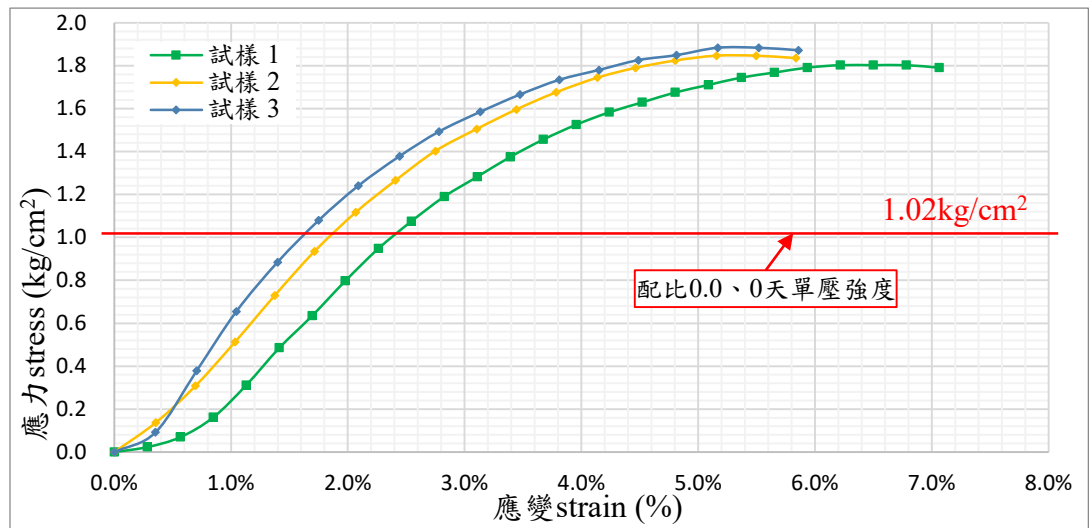


圖 4-16 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 0.8 強度
【文獻 4.16】

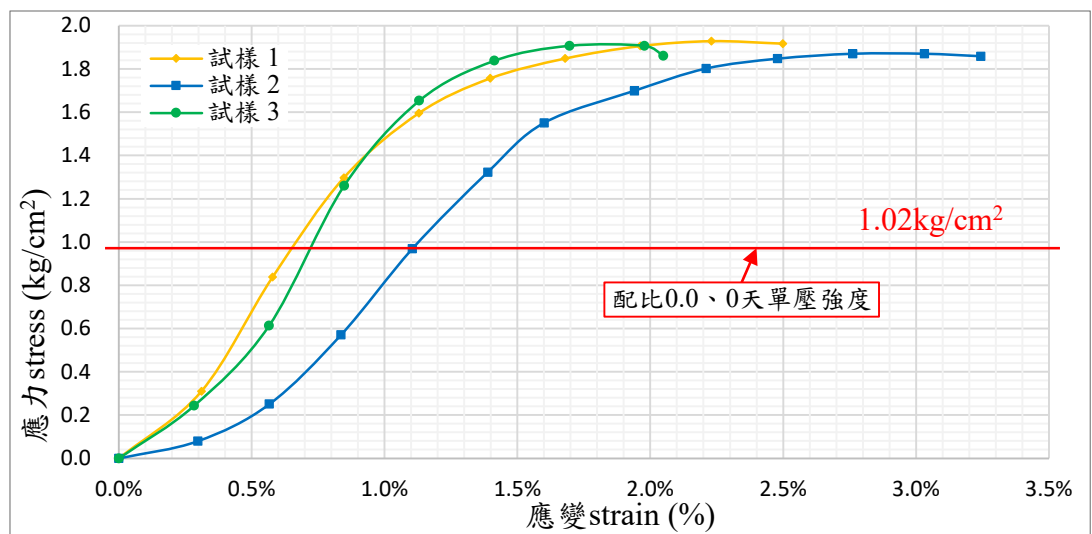


圖 4-17 哈佛小型夯實試驗 49°C、48 小時養治配比 1.0 強度
【文獻 4.16】



圖 4-18 無圍壓縮試驗完成後的配比 0.8 標準夯實試樣【文獻 4.16】

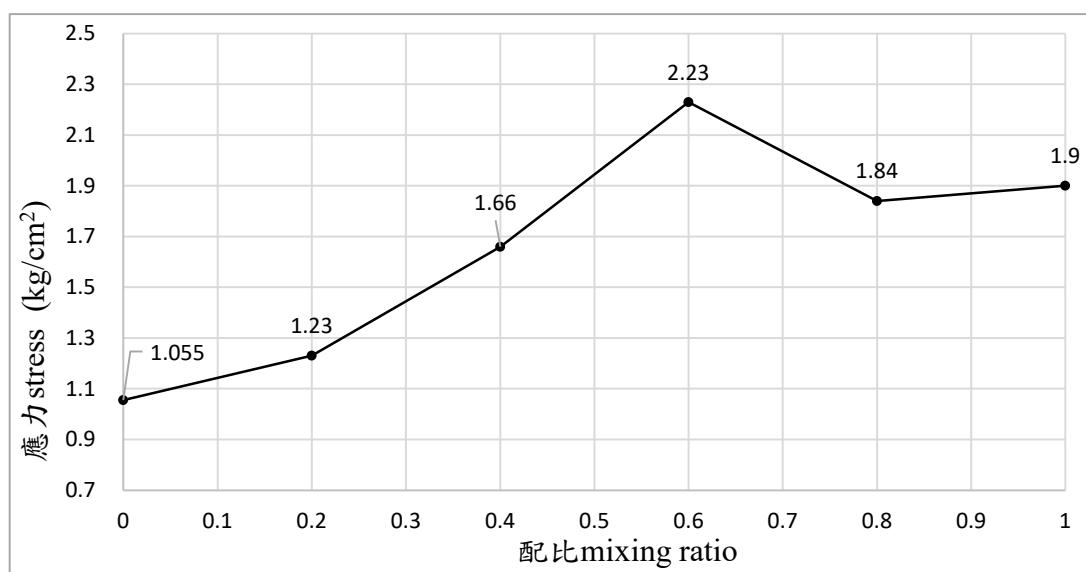


圖 4-19 哈佛小型夯實試驗 49°C 養治 48 小時平均強度【文獻 4.16】

3. 路基土壤強度試驗

為評估路基土壤強度，可依據相關規範進行加州載重比試驗(CBR)或推估路基土壤回彈模數(M_R)如表 4-10 所示【文獻 4.21~4.23】。

表 4-10 路基土壤強度試驗

試驗項目	規範
加州承載比試驗【文獻 4.21、文獻 4.22】	CNS 12382/ASTM D1883-16 / AASHTO T193
路基土壤 M_R 強度試驗【文獻 4.23】	AASHTO T292/ AI MS-10 1993

缺乏試驗數據參考時，至少亦應取得土樣以進行統一土壤分類試驗，俾由圖 4-20 查得路基土壤之土壤分類與承載值間相互關係之近似值，使用圖 4-21 時須特別謹慎，注意各強度的轉換值以免誤植。

(1) 室內 CBR 試驗 (ASTM D1833-16)

試驗儀器與試驗步驟詳【文獻 4.21】。

(2) 現地 CBR 試驗 (ASTM D4429)

試驗儀器與試驗步驟詳【文獻 4.22】。

(3) M_R 試驗 (AI MS-10 1993)

試驗儀器與試驗步驟詳【文獻 4.23】。

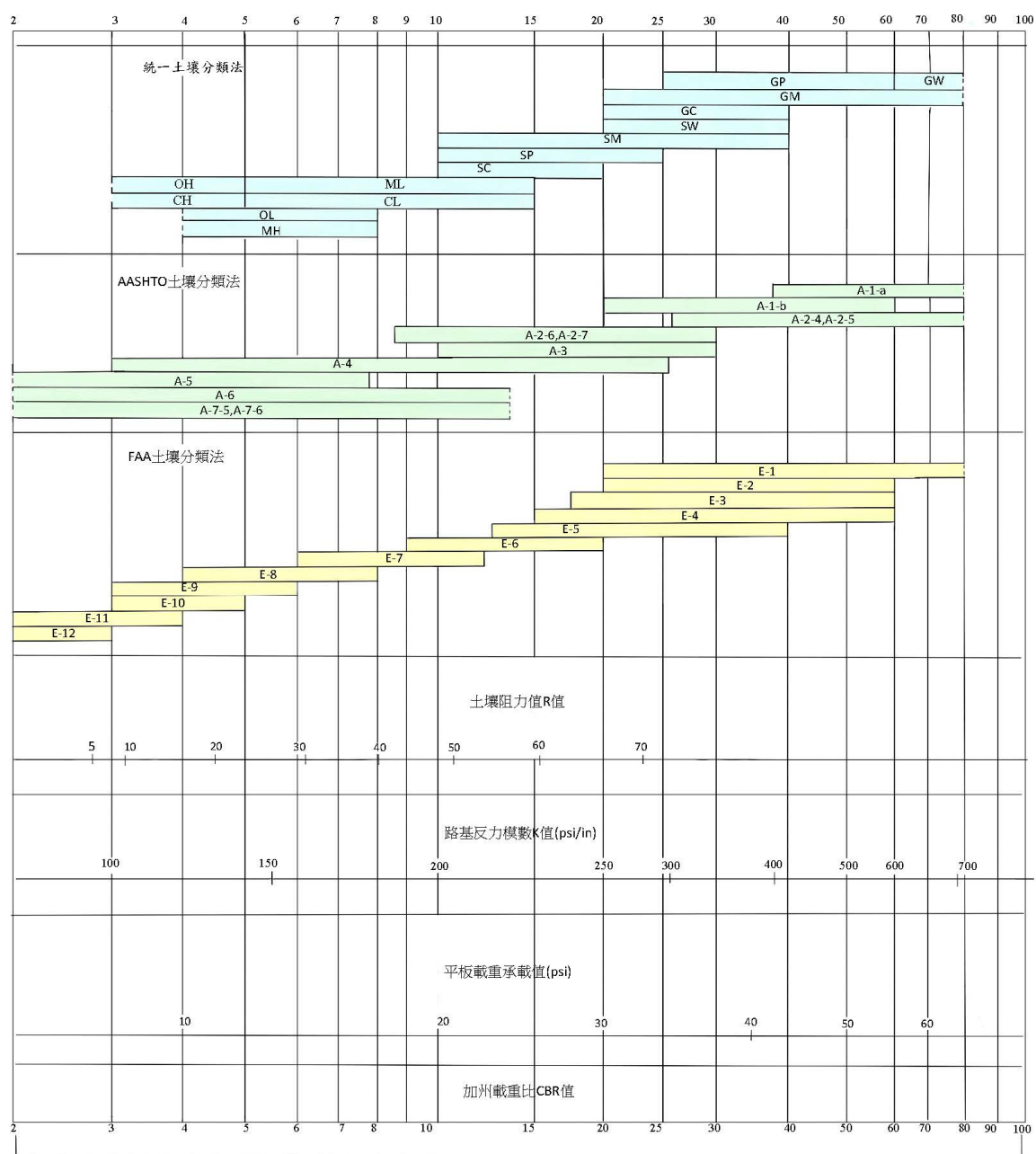


圖 4-20 各種土壤分類與承載值間相互關係之近似值轉換查核圖【文獻 4.24】

4.6 應力-應變行為研討

TRB 相關研究針對土壤穩定的反應、配比設計，以及施工提供了完整的技術資料，並特別指出應力-應變特性對於正確分析土壤-石灰混合物結構層的路面結構的行為特徵十分重要【文獻 4.25】。文獻中說明石灰對細粒土壤的應力-應變特性有顯著影響，相對於細顆粒的原狀土壤，添加石灰之土壤混合料經過養治後將可增加材料的應力強度，降低應變量，如圖 4-21 所示。研究亦指出即使現場是潮濕施工狀態，添加石灰亦可對於濕側土壤之夯實有立即改善之效果，如圖 4-22 所示。

一般常用評估路基土壤強度是由加州承載比（CBR）值及回彈模數（ M_R ）值而得，其應用於鋪面厚度設計方法詳見本手冊第八章。各值定義如下所述：

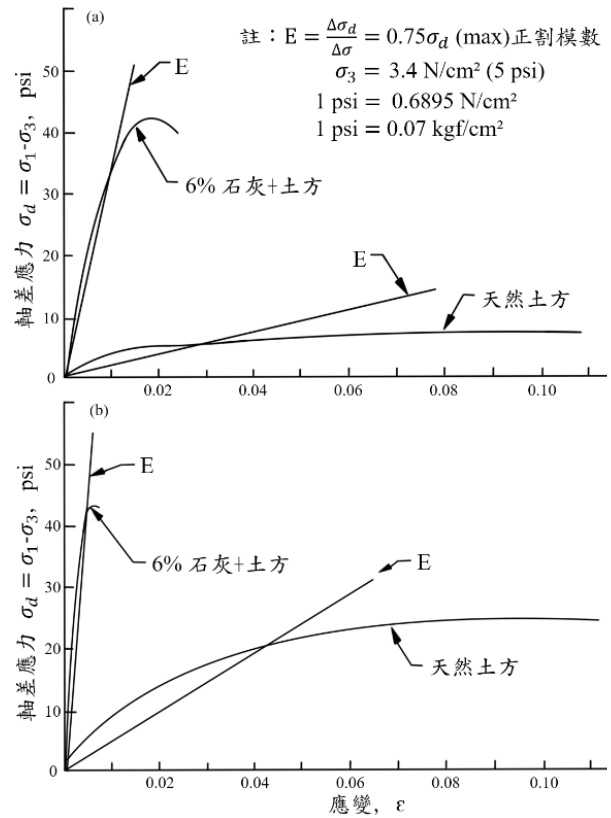
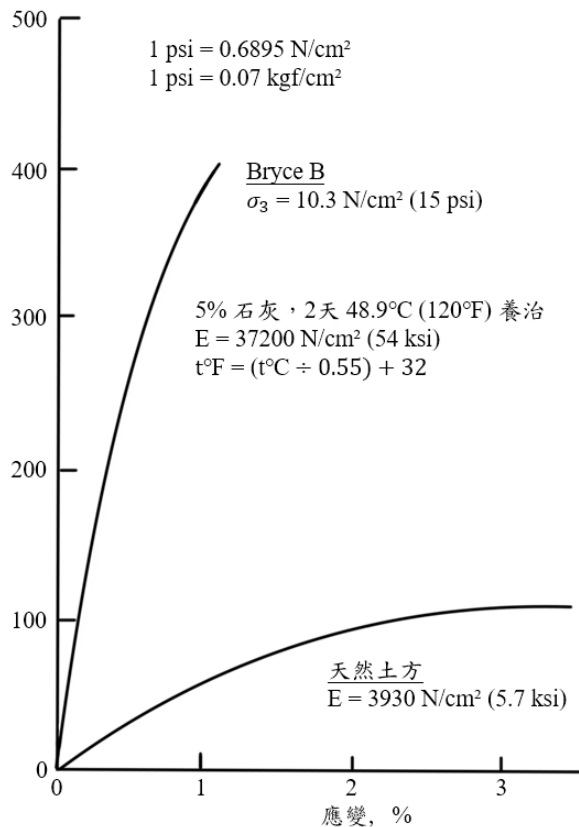
- 加州承載比（CBR）值：為鋪面工程路基及基底層級配料等評估材料強度之方法，其定義為貫入壓力與新鮮碎石貫入壓力之比值。本手冊綜合彙整桃園市各區土樣試驗資料及 CBR 試驗資料，細節參閱 7.4.2 節。
- 回彈模數（ M_R ）值：回彈模數為路基土壤承受反覆軸差應力下，回彈變形量與反覆軸差應力之關係。

4.6.1 無圍壓縮試驗之應力-應變行為

針對土壤-焚化再生粒料混合物之應力-應變行為進行研析，主要是將不同配比的焚化再生粒料，利用無圍壓縮試驗所得之應力-應變曲線（Stress-Strain Curve），求得 AASHTO 設計法（1993 年版）程序之決定路面基層材料所需的彈性模數及焚化再生粒料本身材料極限應力。本手冊彙整許多桃園市各區土樣試驗資料，本節以 A20 第二停車場土樣相關試驗值作為範例加以探討。桃園市 A20 第二停車場取得土樣於配比為 0、0.7 和 1.0 時的焚化再生粒料混合料其無圍壓縮試驗時之應力-應變曲線結果如圖 4-23、圖 4-24 及圖 4-25 所示。圖中試驗結果顯示，在 OMC 條件下，配比為 0 即原土之應力-應變曲線較為平緩且無明顯破壞強度；而同樣在 OMC 條件下，配比為 0.7 及 1.0 時，應力-應變曲率明顯變陡，也出現尖峰強度，說明增加土壤與焚化再生粒料之配比對整體改良之成效。

綜整桃園市各區各配比焚化再生粒料穩定後土壤之無圍壓縮試驗時之應力-應變曲線結果，取得彈性模數 E 值及極限應力值。將配比 0.0~1.2 的彈性模數繪於圖 4-26 中。由圖可知，彈性模數在配比 0.6 前之差異不大。配比 0.6 後的彈性模數趨勢線則均隨著配比之增加而顯著提高。將配比 0.0~1.2 的極限應力繪於圖 4-27 中，由圖可知，極限應力趨勢線均隨著配比之增加而顯著提高。依據上述結果，可推論粒料中的 CaO 成分應該確實提供了極限應

力上升的機制。焚化再生粒料混合料於彈性模數及極限應力較高時，代表其材料工程強度較佳，可進而提升路基承載能力及減少路面發生車轍及變形。



註. 1psi=0.07kgf/cm²

圖 4-21 原狀土壤與養治後石灰處理土壤之典型應力-應變曲線(土樣取自 Bryce B) 【文獻 4.25】

圖 4-22 兩地區土壤和石灰在未固化與固化情況之典型應力-應變曲線 ((a)Vicksburg buckshot clay, (b)Ava B) 【文獻 4.25】

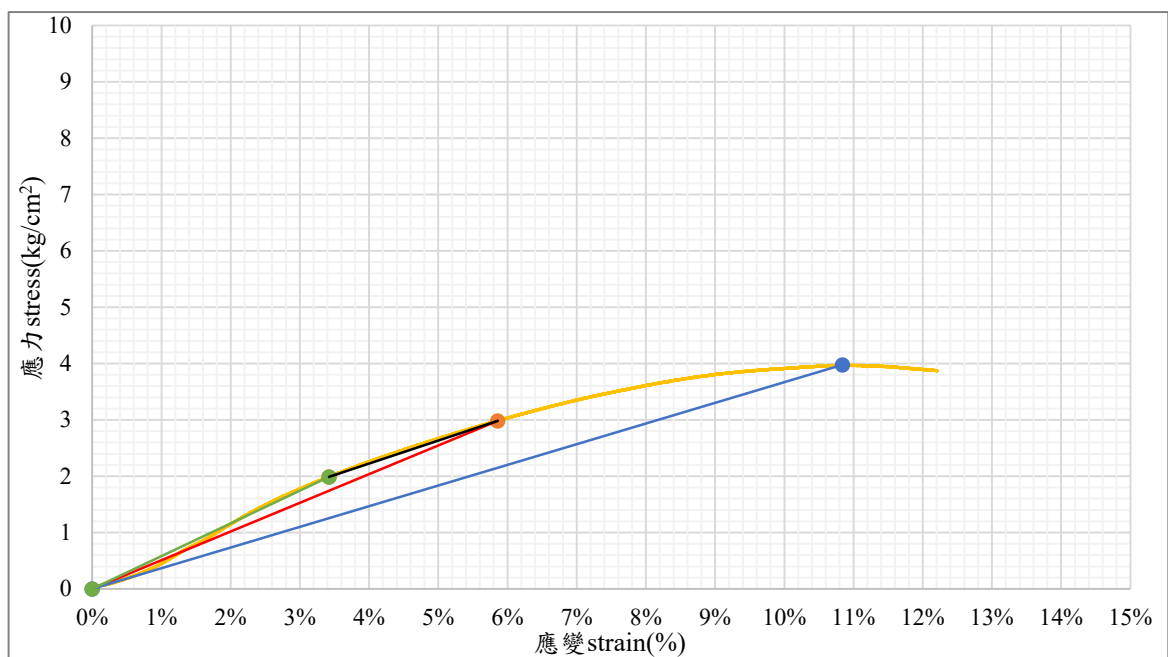
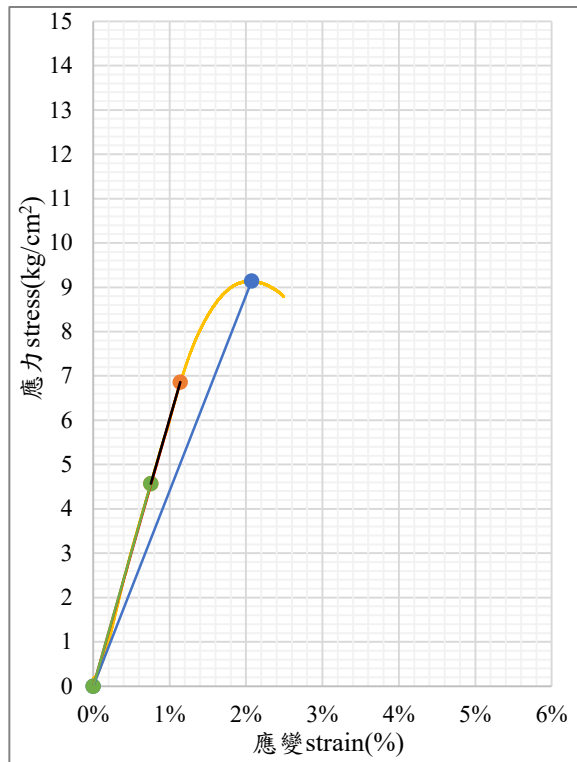


圖 4-23 應力-應變曲線(桃園 A20 第二停車場-未改良原土-OMC 條件)



4-24 應力-應變曲線(桃園 A20 第二停車場-配比 0.7 改良土-OMC 條件)

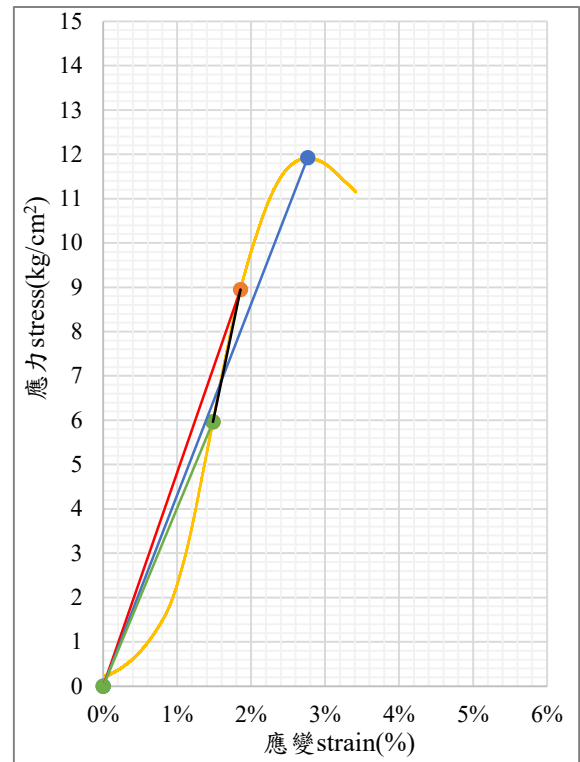
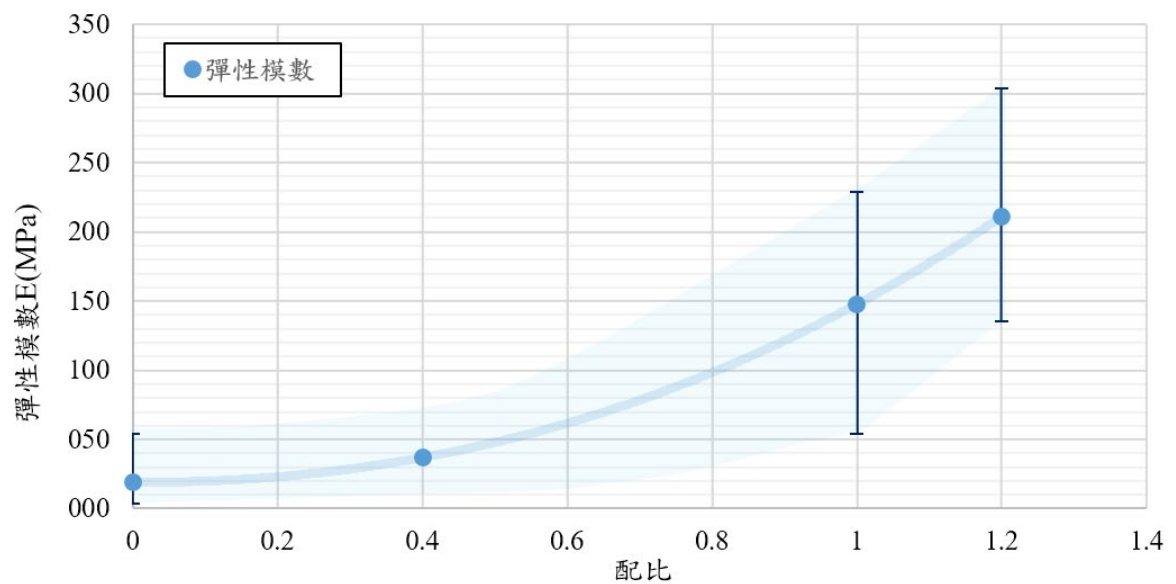
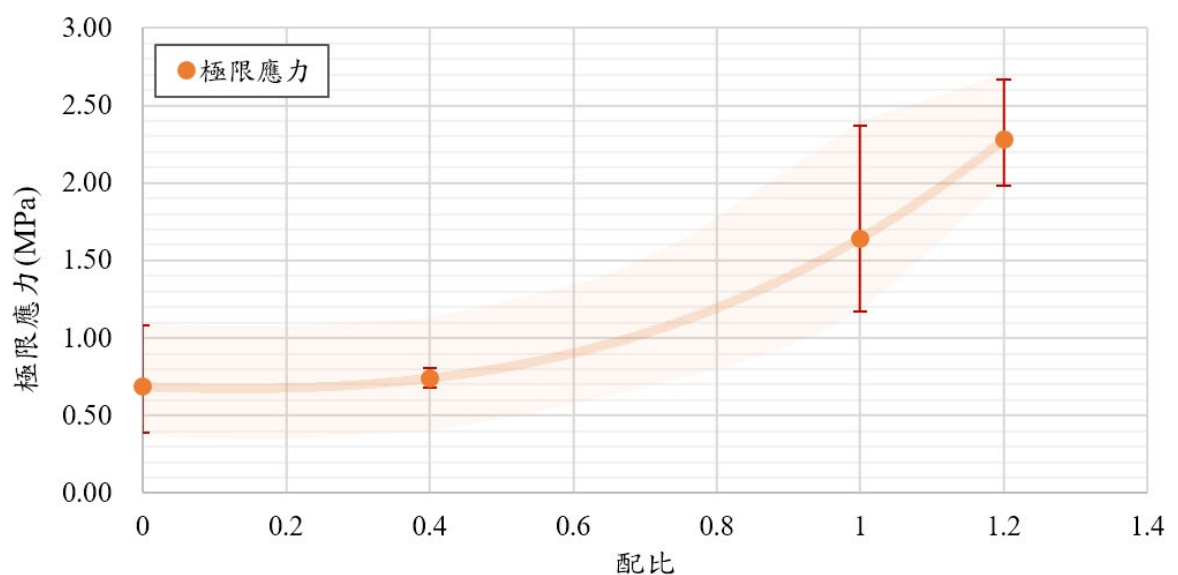


圖 4-25 應力-應變曲線(桃園 A20 第二停車場-配比 1.0 改良土-OMC 條件)



註. 1MPa=10.19kgf/cm²=145.043psi

圖 4-26 不同配比與彈性模數關係圖(桃園紅土為例)



註. 1MPa=10.19kgf/cm²=145.043psi

圖 4-27 不同配比與極限應力圖(桃園紅土為例)

4.6.2 CBR 之應力-應變行為

綜整各區各配比焚化再生粒料之 CBR 試驗結果顯示，原土方 CBR 值約為 4%~22% 左右，兩區拌和配比 1：1 混拌料的 CBR 值皆可提升至 66%~130%，詳表 4-11。表中 CBR 數據有明顯差異，驗證了化學穩定（凝聚力提升）與機械穩定（內摩擦角上升）的合併效果。

表 4-11 CBR 試驗結果綜整表(桃園粒料為例)

	桃園中原大學 原土	桃園中原大學 混拌料	桃園忠富路 原土	桃園忠富路 混拌料
試樣 1	7.80%	66.86%	4.08%	97.38%
試樣 2	5.12%	71.12%	21.82%	104.02%
試樣 3	18.14%	73.97%	N/A	129.73%

針對土壤-焚化再生粒料混合物之應力-應變行為進行研析，主要是將不同配比的焚化再生粒料利用 CBR 試驗時應力-貫入深度曲線，求得材料極限應力。本手冊彙整桃園市各區土樣試驗資料，本節以桃園中原大學土樣相關試驗值作為範例探討。桃園中原大學取得土樣於配比為 0 和 1.0 時的焚化再生粒料混合料，其 CBR 試驗時之應力-貫入深度曲線結果如圖 4-28 所示。圖中試驗結果顯示，在含水量為 OMC 條件下，配比為 0 即原土之應力-貫入深度曲線較為平緩且無明顯破壞強度；而同樣在 OMC 條件下配比為 1.0 時，應力-貫入深度曲線之曲率明顯變陡。於貫入深度 8mm 時，應力由 10kg/cm² 提升為 140kg/cm²，說明增加焚化再生粒料對整體改良之成效。

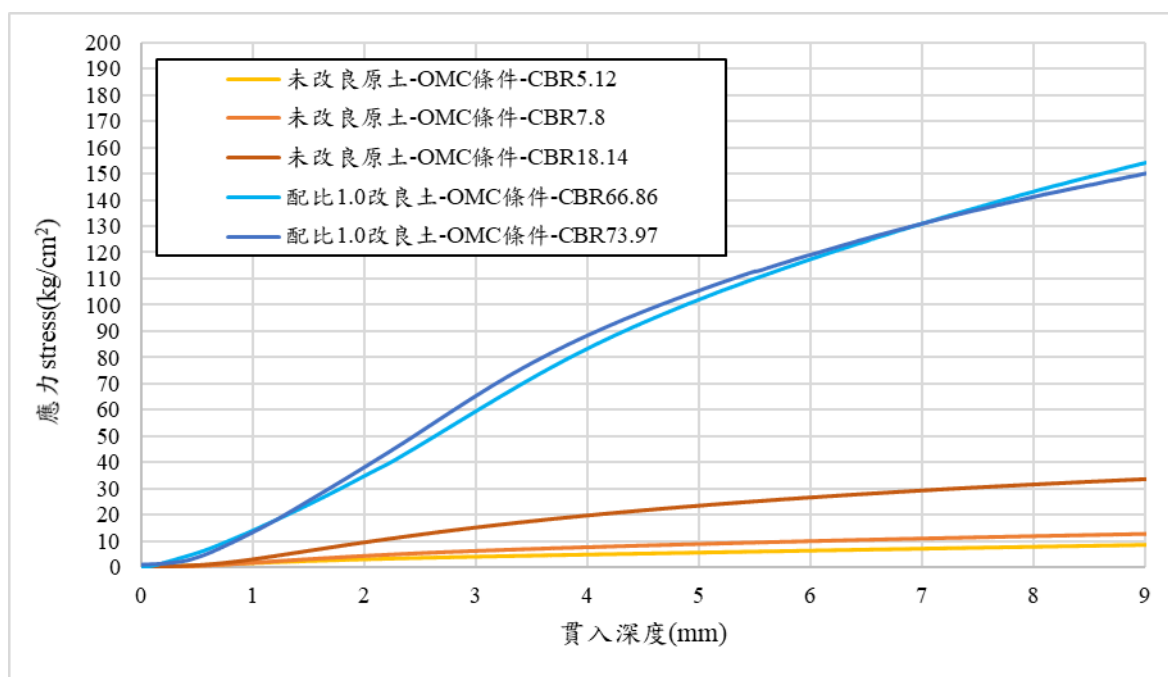


圖 4-28 CBR 應力-貫入深度曲線(桃園中原大學紅土為例)

4.7 焚化再生粒料穩定過濕土壤成效特性

由化學穩定機制瞭解石灰穩定對於黏土具有改變土壤性質、祛水等效果。然而為使石灰完全發揮祛水特性，石灰添加量至少須 4%，才能使石灰產生減水效果。焚化再生粒料含有大於 20% 的 CaO ，因此在與黏土拌和後，同樣能夠產生與石灰相同的祛水特性，其主要機制為陽離子交換作用。當黏土顆粒吸附水的氫鍵產生斷鍵(Broken Bonds)，而使黏土顆粒表面帶負電荷，並透過靜電力吸引游離的 Ca^{2+} 達到電價平衡，此反應稱為陽離子交換。由於 Ca^{2+} 的靜電吸附力遠大於 H^+ ，因此會將水擠出土體外，使水較容易蒸散。依據 4.3.2 節焚化再生粒料顆粒微觀特性所述，推測焚化再生粒料與黏土拌和後提供大量的水分逸散通道，提高表面張力將水分吸出，於大氣環境快速散失水分，達到減水功效，當與過濕土壤進行拌和後之水分加速散失，應對縮短工期有積極正面的成效【文獻 4.3】。

依據 ASTM 對於改良夯實試驗之規定，須將土壤氣乾後打碎通過 No.4 篩。然而現場施工時，面對過濕土壤，施工單位往往沒有足夠的工期可依照試驗室作法進行氣乾、打碎、過篩。前人研究指出，利用常態含水量狀況的焚化再生粒料，以不氣乾過篩方式，直接與過濕黏土拌和並進行反向改良夯實試驗，其最佳含水量及最大乾密度值與標準試驗法所得結果仍具有一致性，且夯實曲線線型與試驗室改良夯實試驗所得者亦極為相似。由此可判斷不氣乾、不過篩方式是可行的。前人研究亦發現，精準配比的室內混合料之最大乾密度、最佳含水量與現地混合料試驗結果之差異僅在 $\pm 2\%$ 內，證明可以室內拌和方式模擬現地施工狀況。此外，藉由比較農耕機拌和時間、養治天數及滾壓作業，觀察現地

施工含水量的變化，可發現經由石灰產生之陽離子交換及水化反應，以及焚化再生粒料的多孔洞特性，可使混合料含水量不斷下降，改善夯實成效，提升乾密度值【文獻 4.9】。

4.8 耐久性評估試驗研究

依據耐久性評估試驗（土壤與焚化再生粒料混合試樣進行乾濕循環試驗）結果，經過 12 次循環後，除原土於第一次循環即癱軟於水箱，無法繼續進行試驗外，除異後每顆試樣 12 次磨損平均重量損失量約在 20g 左右，最少 12.8g，最多 32.7g，平均重量損失率為 1.47%。詳細試驗結果見表 4-12。

表 4-12 耐久性評估試驗中各配比平均重量損失率

	配比				
	0.8 : 1	1 : 1	0.8 : 1 + 1%石灰	1 : 1 + 1%石灰	原土
損失率(%)	1.82%	1.46%	1.21%	1.27%	N/A

試驗結果顯示，4 種試驗配比重重量損失率均遠低 FHWA（7%）與 USBR（6%）之規範值。而添加石灰之試樣重量損失率也較未添加石灰之試樣低。整體結果顯示添加石灰之試樣表現較佳，而未添加石灰之試樣其耐久性亦表現良好，因此整體損失率不大。而比較不同配比試樣之重量損失率，添加石灰者與未添加石灰者二配比間之試樣損失率皆差異不大。

4.9 國內其他地區焚化再生粒料特性與共通性

由行政院環境保護署支持經由桃園市政府環境保護局主辦的「焚化再生粒料穩定過濕土方創新去化成效的全國共通性調查與評估計畫」產學研究計畫，針對國內其他地區焚化再生粒料的特性，以及穩定過濕土壤的共通性做了深入的調查【文獻 4.26】。調查內容包括其他地區產出粒料的物、化性，以及對過濕土壤的穩定成效提供了共通性驗證的正面成果。在本節中對穩定土壤的必要條件的物、化性，提出調查結果，並與桃園地區粒料特性的比對與一致性提出摘要說明。依據物、化條件一致性的顯著成果建立共通性的成果。

4.9.1 國內其他地區粒料特性與化學特性比對

1. 粒徑分佈與分類一致性

將台北市、新北市、台中市以及高雄市等四處國內再處理場依標準管制程序提供的焚化再生粒料及桃園市 ROT 廠焚化再生粒料進行試驗，其粒徑分析與土壤分類統整值詳表 4-13 及圖 4-29 所示。數據顯

示所有地區粒料依統一土壤分類法（USCS）進行分類，焚化再生粒料 Cu 值皆大於 6、Cc 值介於 1~3 之間，試驗結果之統一土壤分類皆為優良級配砂（SW）。

表 4-13 各地區焚化再生粒料粒徑分析與土壤分類統整

	台北市	新北市	台中市	高雄市	桃園市
D60	1.90	2.9	1.4	4.2	1.55
D30	0.56	0.7	0.42	1.05	0.56
D10	0.09	0.09	0.076	0.22	0.165
Cu	21.11	32.22	18.42	19.09	9.39
Cc	1.83	1.88	1.66	1.19	1.23
USCS	SW	SW	SW	SW	SW

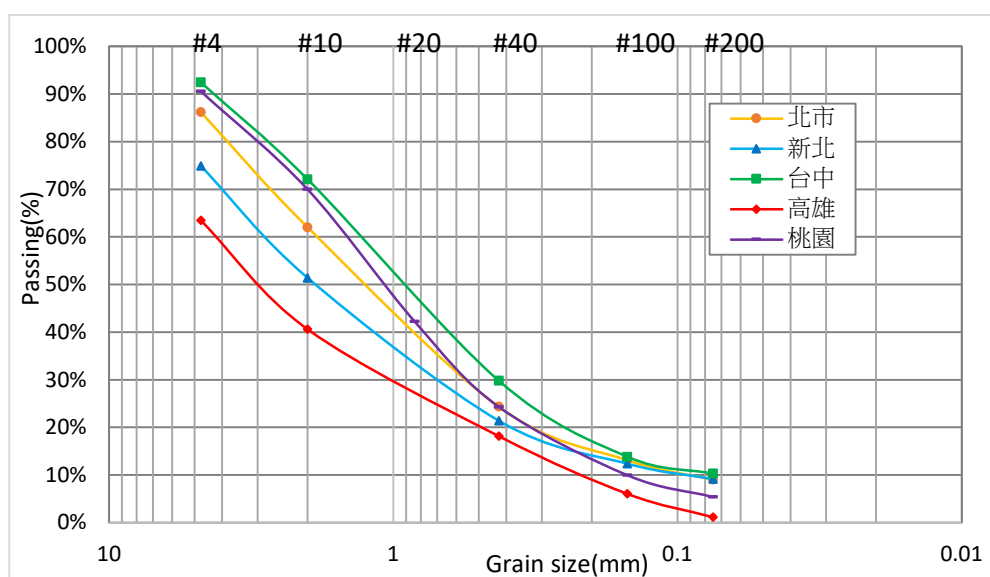


圖 4-29 各地區焚化再生粒料粒徑分析統整圖

2. 化學成分及相關特質的一致性

焚化再生粒料的化學成分與飛灰特性相似，美國材料試驗協會定義，氧化鈣含量高於 10%時，具膠結性、自硬性材料，是一種優良的土壤穩定材料。使用焚化再生粒料處理過濕土方時，需要求焚化再生粒料氧化鈣含量達 10%以上。

將台北市、新北市、台中市以及高雄市等四處國內再處理場依標準管制程序提供的焚化再生粒料及桃園市 ROT 廠焚化再生粒料之氧化鈣含量比較，其氧化鈣含量統計詳表 4-14 所示。

數據顯示台北市、新北市、台中市以及高雄市等四處焚化再生粒料氧化鈣含量皆與桃園市 ROT 廠焚化再生粒料相近，且皆一致滿足

ASTM 建議：氧化鈣含量>10%即屬可自硬性材料，即為適合土壤穩定之材料。

表 4-14 各地區焚化再生粒料氧化鈣含量統計表

地區	桃園市 粒料-1	桃園市 粒料-1	台北市 粒料	新北市 粒料	台中市 粒料	高雄市 粒料
CaO(%)	23.73	22.85	24.06	19.61	27.33	22.72

3. 物化特性的一致性綜合說明

(1) 粒徑分佈與土壤分類

焚化再生粒料應用於過濕土方穩定處理，一大特性是將過濕土方，由原始土壤分類（USCS：C 類、營建廢棄土方類：B4 或 B6），改變為更適合回填滾壓的砂性土壤（USCS：S 類、營建廢棄土方類：B2）。本計畫使用土壤，係針對穩定機理的適用分類條件為黏性土壤（分類系統中以“C”表示）。依據中國土木工程學刊 4.3 節「不同配比對土壤粒徑變化與分類評估（機械穩定）」指出【文獻 4.16】，焚化再生粒料具有優良級配砂特性，其與過濕黏土混拌一定比例後，可使混拌料改變特性。由表 4-12 得知，台北市、新北市、台中市及高雄市等四處焚化再生粒料皆滿足優良級配砂特性，再經由前項統整後之粒料粒徑曲線與桃園紅土粒徑曲線，模擬試算繪製各地區粒料混拌土方之粒徑變化繪製如圖 4-30、圖 4-31 所示。由圖可知，所有地區焚化再生粒料皆於添加配比 0.8：1.0 之後，即可以改變原土壤特性至砂性土壤，惟高雄粒料拌和風化泥岩之結果顯示，由於風化泥岩細顆粒含量較桃園紅土更高，配合較大顆粒之粒料後拌和配比約在 1.0：1.0 時方可以改變原土壤特性至砂性土壤。

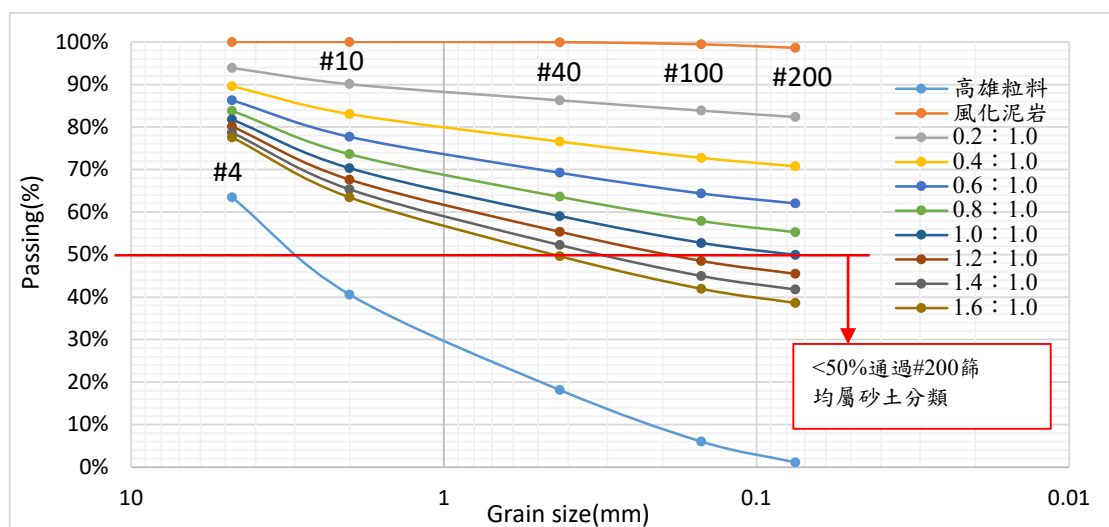


圖 4-30 高雄粒料不同配比粒徑分佈曲線模擬圖(風化泥岩)

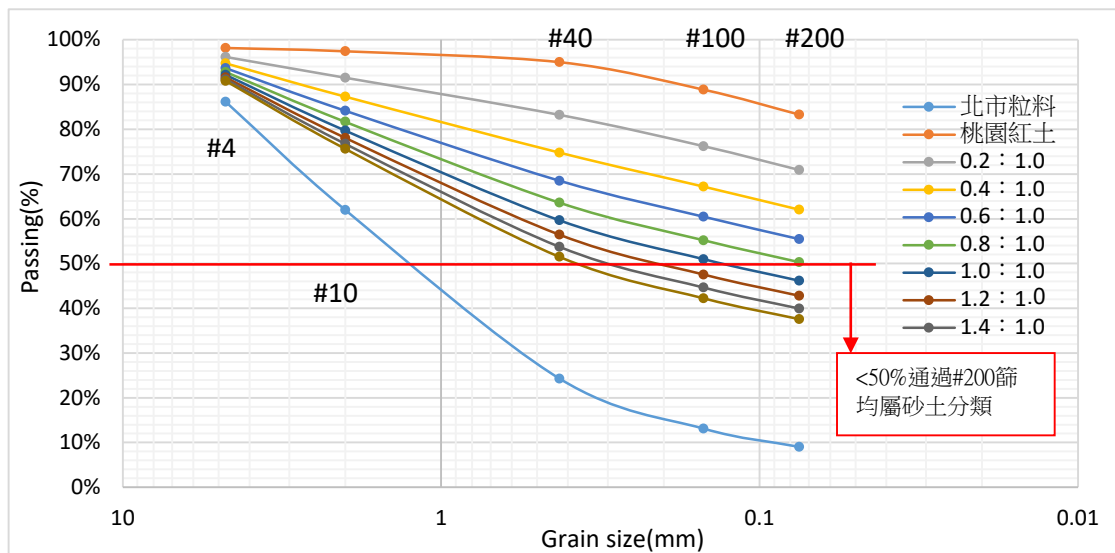


圖 4-31 北市粒料不同配比粒徑分佈曲線模擬圖

(2) pH 值

高鹼環境 ($\text{pH} > 11.0$) 提供了黏土顆粒的化學穩定環境。比較台北市、新北市、台中市以及高雄市等四處國內在處場依標準管制程序提供的焚化再生粒料及桃園市 ROT 廠焚化再生粒料之混合料石灰最佳用量 (LMO) 對應 pH 值，其結果詳圖 4-32 所示。由圖可知，粒料添加配比從 0.2 : 1.0 開始 pH 值隨即開始明顯上升，至配比 1.0 : 1.0 時約達到 pH 值 10.5 左右。最終 pH 值上升趨緩與強度則無明顯的直接關係，這亦說明了 LMO 的明確定義。單以 pH 值大小判斷各地區混合料，於添加粒料後 pH 值皆有明顯上升，惟新北市粒料上升幅度較低。

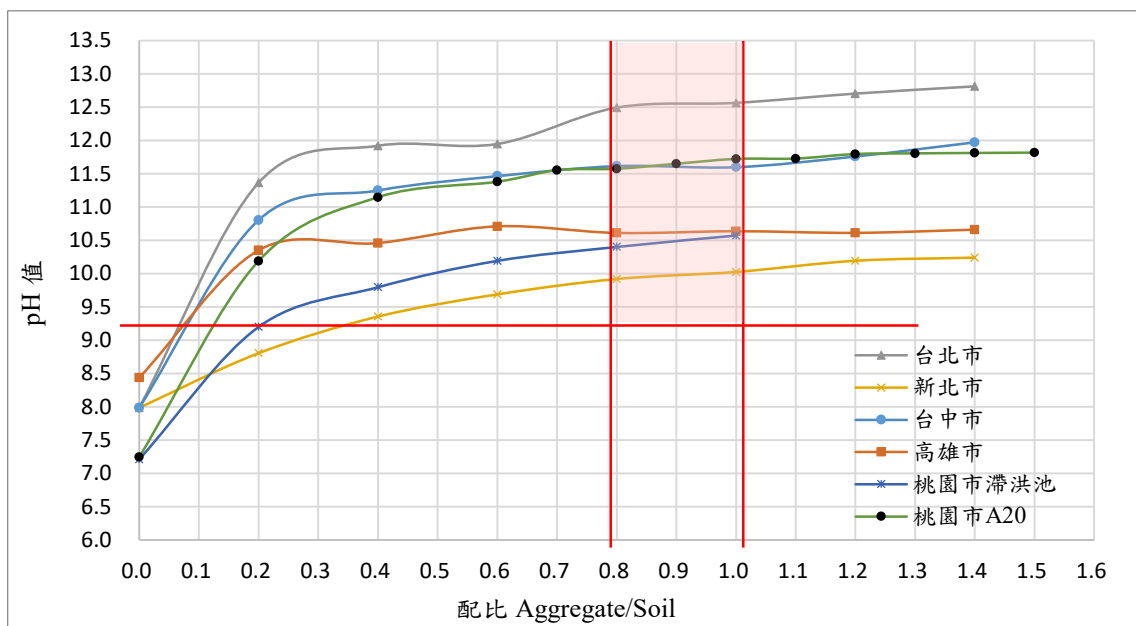


圖 4-32 各處粒料不同配比混合料 pH 值變化

4.9.2 穩定過濕土壤的強度提升特性

1. 改良哈佛小型夯實試驗

各地區各配比混拌料改良小型哈佛無圍壓縮強度詳表 4-14 所示。比對前期計畫案成果後，台北市、新北市、台中市以及高雄市等四處各配比混合料無圍壓縮強度皆明顯上升，可以確定台北市、新北市、台中市，以及高雄市等四處焚化再生粒料作為穩定過濕土方的材料是可行的。表 4-15 顯示含水量於 OMC+2% 內紅土試樣無圍抗壓強度增加率約為 137%~181%。高雄粒料混合料黏土單位重量提供強度提升率約為 111%，但仍可由較接近現地試驗結果的改良夯實試驗結果，取代改良小型夯實試驗結果。

表 4-15 各地區各配比混拌料改良哈佛小型夯實無圍壓縮強度

	台北市	新北市	台中市	桃園市 (滯洪池)	高雄市
0.0 : 1 (kg/cm ²)	1.82	1.82	1.82	1.06	1.98
0.8 : 1 (kg/cm ²)	2.77	2.40	2.75	1.84	2.11
1.0 : 1 (kg/cm ²)	3.31	2.50	2.81	1.90	2.20
增加率 (0.0 : 1.0) (%)	181%	137%	154%	179%	111%

2. 改良夯實試驗

各地區各配比混拌料改良夯實無圍壓縮強度詳表 4-15 所示。比對前期計畫案成果後，台北市、新北市、台中市，以及高雄市等四處各配比混合料無圍壓縮強度皆明顯上升，可以確定台北市、新北市、台中市，以及高雄市等四處焚化再生粒料作為穩定過濕土方的材料是可行的。表 4-16 顯示含水量於 OMC+2% 內紅土試樣無圍抗壓強度增加率約為 130%~166%。

表 4-16 各地區各配比混拌料改良夯實無圍壓縮強度

	台北市	新北市	台中市	桃園市 (滯洪池)	高雄市
0.0 : 1 (kg/cm ²)	10.5	10.5	10.5	9.5	8.8
0.8 : 1 (kg/cm ²)	12.4	13.3	12.4	--	12.8
1.0 : 1 (kg/cm ²)	16.8	16.0	16.0	12.4 (+1%石灰)	14.6
增加率 (0.0 : 1) (%)	160%	152%	152%	130%	166%

4.9.3 穩定過濕土方的大型工程粒料成效共通性應用

前述兩節佐證說明各地焚化再生粒料應用於過濕土壤之穩定，其使用方法與成效均具有共通性。各地粒料的再生處理產品，可以互通使用並定會歸一至工程會相關施工綱要規範供全國一體適用。本手冊的編撰目的，乃提供全國各地區焚化再生粒料穩定過濕土壤通用方法與步驟。

共通性研究成果彙整各項試驗成果包括氧化鈣含量、化學反應高鹼環境及粒徑分佈等，初步判斷焚化再生粒料是否適用於穩定黏性土壤。另一方面，進一步透過混合料無圍壓縮強度變化、應力-應變行為變化，以及 CBR 試驗值等試驗結果之觀察，證明焚化再生粒料確實擁有此穩定效果。最後確認台北市、新北市、台中市，以及高雄市等四處焚化再生粒料與桃園市 ROT 廠焚化再生粒料擁有高度一致性的結果，由此進一步佐證了上述目標的落實【文獻 4.8】。

後續各章的內容，均依此共通性的確認，鋪陳有關方法與步驟，推展至全國共通適用，不再侷限於桃園地區的焚化再生粒料產品。此外，另在處理廠以水洗方式為之的焚化再生粒料產品，因其處理過程大幅洗除 CaO 含量並降低了 pH 值必要條件，本手冊不建議應用於土壤穩定的去化場域。

參考文獻

- 4.1 李健榮，「焚化爐底渣用於路基土壤或整地基礎穩定的成效與可行性研究-以林口紅土為例」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2014。
- 4.2 婁智鈞，「焚化爐底渣用於土石填方的資源化再生材料之成效研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2015。
- 4.3 廖文輝，「焚化再生粒料含水量管控對過濕土方材料穩定成效的配比設計研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2019。
- 4.4 歐立宸，「穩定桃園紅土配比設計的控制條件研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2019。
- 4.5 張達德，「桃園市焚化再生粒料示範應用與規範修訂服務委託專業服務-期末成果報告」，桃園市政府工務局，2018。
- 4.6 張達德，「焚化再生粒料應用於土石方穩定試辦工程委託專業服務 一期末成果報告」，桃園市政府工務局，2019。
- 4.7 許晉偉，「焚化再生粒料在穩定過濕土方的室內與現場快速減水成效研究」，

碩士論文，中原大學土木工程學系，2020。

- 4.8 張達德，「焚化再生粒料穩定過濕土方創新去化成效的全國共通性調查與評估計畫」委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2022。
- 4.9 張達德，「焚化再生粒料應用於土壤穩定的循環經濟關鍵技術與工法的研究-期末成果報告」，亞新工程顧問股份有限公司，2021。
- 4.10 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (D422-63(2007)e2)”. ASTM Standards Vol. 04.09, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2007.
- 4.11 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (D4318-17e1)”. ASTM Standards Vol. 04.09, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2017.
- 4.12 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (D2216-19)”. ASTM Standards Vol. 04.09, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2019.
- 4.13 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (D854-14)”. ASTM Standards Vol. 04.08, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2014.
- 4.14 American Society for Testing and Materials. “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (D2487 – 17)”. ASTM Standards Vol. 04.08, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2017.
- 4.15 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization (D6276-19)”, ASTM Standards Vol. 04.09, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2019.
- 4.16 黃治峯、沈志修、王淳謹、歐立宸、方力、張達德，「焚化再生粒料穩定黏土方的配比設計影響因子研究」，中國土木水利工程學會，Vol. 33，pp. 257-280，2021。
- 4.17 Instruction Manuals and User Guides for Equipment Humboldt, “Harvard Miniature Compaction Apparatus (H4165)”, Manuals Directory, 2003.
- 4.18 American Association of State Highway and Transportation Officials. “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (D698-12)”, ASTM Standards Vol. 04.08, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2021.

- 4.19 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) (D1557 - 12(2021))”, ASTM Standards Vol. 04.08, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2012.
- 4.20 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM D2166/D2166M - 16)”, ASTM Standards Vol. 04.08, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2016.
- 4.21 American Society for Testing and Materials. “Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory Compacted Soils (ASTM D1883-16)”, ASTM Standards Vol. 04.08, Philadelphia, Pa, U.S.A., 2016.
- 4.22 American Association of State Highway and Transportation Officials, “Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place (ASTM D4429)”, AASHTO, Washington D. C., U.S.A., 2009.
- 4.23 Asphalt Institute(AI). “Thickness Design -Asphalt Pavements for Highways and Streets”, Manual Series No.1(MS-1), The Asphalt Institute,1981 and 1991.
- 4.24 內政部營建署道路工程組，市區道路及附屬工程設計規範，2014。
- 4.25 State of The Art Report 5“Reactions, Properties, Design and Construction”, TRB, 1987.

第五章 焚化再生粒料用量與配比設計

5.1 前言

前述各章已介紹土壤穩定的添加劑用量決定方法，以石灰化學穩定為之者係採用 pH 值以決定石灰改良最佳用量（Lime Modification Optimum, LMO）。此用量的主要功能包括：降低塑性、降低黏土顆粒的吸水能力與滾壓、施工的理想作業平台，但是對強度的提升則效果有限，必須增加石灰用量，如 1.5~2.0 倍 LMO，在較高 Ca^{2+} 含量的高鹼性環境中，溶蝕黏土顆粒表面促使卜作嵐效應的鍵結產生。針對原土的含水狀況，若土壤含水量接近 OMC+4%，上述效果是顯著的，但若土壤含水量達到 OMC+4%~8%，甚至>30%（例如：營建剩餘土石方 B6），則石灰的化學穩定減水功能會耗用大量的 Ca^{2+} ，使得強度提升的效果受限。若為了提升強度而增加石灰用量則會造成成本大幅上升而必須放棄化學穩定手段，本手冊不建議就地改善應用。此種極濕土壤（B6）是國內公共工程最常見的外運填海造地、建港（例如台北港）的材料。

5.2 強度與成本為基礎

就焚化再生粒料穩定土壤的目的言之，化學穩定機制與石灰穩定或飛灰穩定雷同。相關的研究成果文獻均掌握了化學穩定成效：降低塑性，降低黏土的吸水能力且強度亦顯著提升。由於焚化再生粒料的去化應用量，政府的作法是有一定的補助額度，與石灰穩定的成本結構是不同的。因此針對過濕土壤（OMC+4%）或極濕土壤（OMC+4%~OMC+8%，B6），配比添加量的決定有其特殊考量。示範工程的試驗與成效表現均屬過濕及極濕的土壤條件，化學穩定考量用量外，機械穩定同時作用下，除強度提升外對減水的成效亦是令人滿意的，這是化學穩定法中採石灰或飛灰添加劑所無法比擬的。

5.2.1 養治後強度考量

參閱 4.5.3 節所述，焚化再生粒料混拌桃園紅土（焚化再生粒料：紅土比例—0.2：1~1：1），其標準夯實試體之無圍壓縮試驗，強度可增加 0.5~1.0 倍左右，且強度隨著養治時間而增加。其中配比 0.2：1~0.8：1 之試體，強度可增加約 1 倍，效果最為顯著【文獻 5.1】。現地試拌計畫研究成果顯示，添加焚化再生粒料之現地混合料（配比皆為 1：1 左右，並添加 1%石灰），其改良夯實試體之無圍壓縮強度可以較現地原狀土增加達 1.0~3.5 倍【文獻 5.2~5.5】。總結上述試驗與研究結果，以強度提升效果而言，添加焚化再生粒料之混合料皆有強度提升之效果。

5.2.2 塑性降低考量

依相關研究成果顯示【文獻 5.1】，凡添加焚化再生粒料之混合料，其阿太堡液性限度會隨粒料添加比例的增加（0：1 → 1：1）而下降約 25% 左右；塑性限度則會隨粒料添加比例的增加（0：1 → 1：1）而上升約 10%~20%。整體塑性指數可較原狀土下降約 50%，塑性指數下降可使黏土的吸水性降低、吸水膨脹及乾燥收縮量的體積降低。

5.2.3 混合料 pH 值考量

使用 pH 值試驗可以快速決定石灰改良土壤的最佳配比（LMO），可作為焚化再生粒料配比設計的參考方法。根據土壤中 H^+ 的存在型態可將土壤酸度分為兩大類型：一是活性酸，是土壤溶液中 H^+ 濃度的直接反映，其強度通常用 pH 值表示。土壤的 pH 值越小，土壤活性酸越強。二是潛性酸，由呈交換態的 H^+ 、 Al^{3+} 等離子所決定。

試驗結果顯示，土壤混拌焚化再生粒料之 pH 值變化，與土壤混拌飛灰之變化較為相似【文獻 5.1~文獻 5.2】，在混拌低配比時已可以快速提升 pH 值，再添加到一定配比時，pH 值開始持續緩慢上升且趨於平緩。相關試拌計畫【文獻 5.2~5.5】經多次試驗結果均顯示（見圖 5-1），混拌焚化再生粒料後 pH 值快速提升，在混拌比例 0.8：1 左右時逐漸趨緩，而在混拌比例約 1.4：1 時趨近定值。圖 5-2 亦提供了飛灰與黏土（紅土）的 pH 值結果供參考。

依照土壤化學穩定原理，在高 pH 值（>10.5）的環境下會溶解片狀黏土表面，形成鋁酸鹽（ Al^{+3} ）與矽酸鹽（ Si^{+4} ）【文獻 5.6】。當氧化鈣與含有可溶性矽酸鹽和鋁酸鹽（如黏土和淤泥）的物質接觸時，它會形成水合鋁酸鈣和矽酸鈣等膠結性化合物（Cementitious Compounds）材料【文獻 5.7】。依據前述研究成果，建議焚化再生粒料混拌配比下限可由 0.5：1 開始，上限則建議至現地試拌計畫上限 1.2：1。

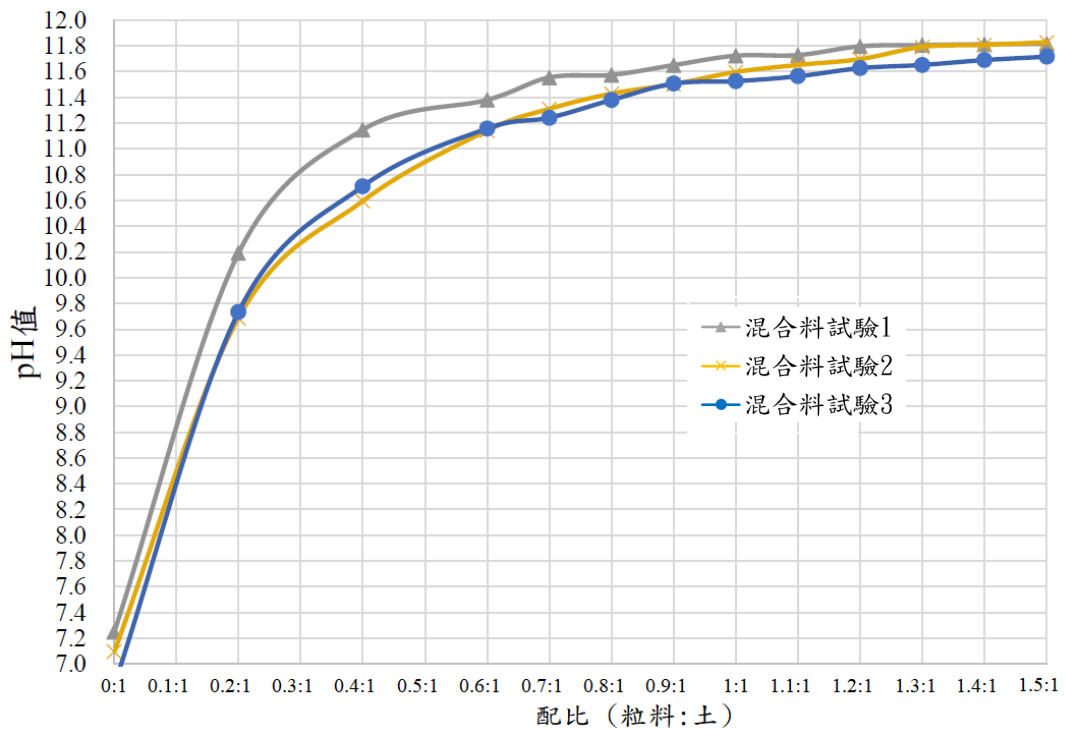


圖 5-1 pH 值隨配比增加的變化曲線【文獻 5.3】

5.3 過濕土壤快速減水成效

文獻 5.1 與 5.2 的研究成果指出，以電子顯微鏡（SEM）觀察焚化再生粒料表面特性，從最低倍率的影像（25 倍影像，圖 4-2）可以觀察出其表面是「多孔洞的」（圓圈標示處）。再由箭頭處進行放大 200 倍及 3,000 倍（圖 4-2）可以發現，焚化再生粒料除了表面佈滿孔洞外，其表面呈「毛糙狀」，比表面積值甚高。焚化再生粒料存在「多孔洞」與「高比表面積值」的特性，使焚化再生粒料與細粒土壤混合後，提供大量的水分蒸散空間，且適當的混合比例與黏土拌和，可使拌和後土壤架構出豐富的水分蒸發通道，故焚化再生粒料與濕土混合能提供高表面張力，更容易將 Ca^{2+} 所切斷的 H^+ ，即水份吸出，於大氣環境快速氣乾，有效快速減水進而加速填築滾壓的施工進度。

5.4 混合料含水量控制配比用量推估法

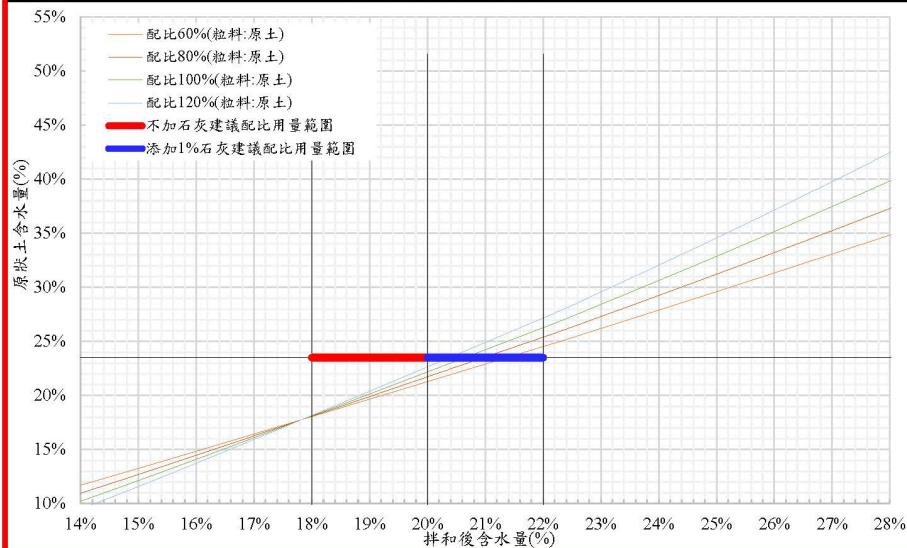
總結前述各項研究成果特色，焚化再生粒料應用於土壤穩定可以有多組的設計配比方式。本手冊提出以含水量控制焚化再生粒料用量配比試算表【文獻 5.5】，如圖 5-2 所示。此含水量的決定係以「加速工進、縮短滾壓夯實準備時間」為目標，因此本表主要以混合料最終滾壓夯實的含水量，於現地土方含水量 $\text{OMC}+2\%$ 內進行配比設計，其配比範圍限制在 0.6:1~1.2:1，且僅適用於桃園市觀音 ROT 灰渣處理廠所產出之粒料【修改自文獻 5.4】。

焚化再生粒料用量試算表

20Y10M-15D

原土含水量	29.00%	%	焚化再生粒料含水量	18.00%	%
原土最佳含水量	18.00%	%	依下圖表選擇拌和比例	100%	%
過濕土壤濕單位重	1.950	t/m ³	是否建議添加石灰	建議添加1%石灰	
焚化再生粒料濕單位重	1.660	t/m ³	現地土方鋪築厚度(鬆)	18.35	cm(實方*1.33)
單層實方厚度	30	cm	焚化再生粒料使用量	538.0	噸
現地面積	2000.00	m ²	石灰用量	10.8	噸

焚化再生粒料用量查核圖



焚化再生粒料用量查核表

比例	原土含水量										
	24.0%	25.0%	26.0%	27.0%	28.0%	29.0%	30.0%	31.0%	32.0%	33.0%	34.0%
	預估拌和土樣含水量 (建議添加1%石灰)										
50%	15.2%	15.8%	16.5%	17.1%	17.8%	18.4%	19.1%	19.7%	20.4%	21.0%	21.6%
60%	15.1%	15.7%	16.4%	17.0%	17.6%	18.2%	18.8%	19.4%	20.0%	20.6%	21.1%
70%	15.1%	15.7%	16.2%	16.8%	17.4%	18.0%	18.5%	19.1%	19.6%	20.2%	20.7%
80%	15.1%	15.6%	16.1%	16.7%	17.2%	17.8%	18.3%	18.8%	19.3%	19.9%	20.4%
90%	15.0%	15.5%	16.1%	16.6%	17.1%	17.6%	18.1%	18.6%	19.1%	19.6%	20.0%
100%	15.0%	15.5%	16.0%	16.5%	16.9%	17.4%	17.9%	18.4%	18.8%	19.3%	19.8%
110%	15.0%	15.4%	15.9%	16.4%	16.8%	17.3%	17.7%	18.2%	18.6%	19.1%	19.5%
120%	15.0%	15.4%	15.8%	16.3%	16.7%	17.2%	17.6%	18.0%	18.4%	18.8%	19.3%
130%	14.9%	15.4%	15.8%	16.2%	16.6%	17.0%	17.4%	17.8%	18.3%	18.6%	19.0%
140%	14.9%	15.3%	15.7%	16.1%	16.5%	16.9%	17.3%	17.7%	18.1%	18.5%	18.8%

圖 5-2 焚化再生粒料試算表【文獻 5.5】

5.5 配比用量捷徑法「1：1」

綜觀上述成果，焚化再生粒料使用量在循環經濟與去化量的考量上應採大量使用為之，但過量使用焚化再生粒料則可能會造成不易夯實滾壓的結果。張達德（2019）針對過濕土壤及極濕土壤，率先提出 1：1 快速決定配比辦法。混拌焚化再生粒料後其土壤分類改變、可快速祛水、塑性指數下降、拌和後含水量控制為

設計理念依據【文獻 5.4】。黏土與焚化再生粒料混拌比例到達 1：1 左右時，整體混合料之 USCS 統一土壤分類可以由黏性土壤(CL 或 CH)轉變為砂性土壤(SC)【文獻 5.4】。如圖 5-3 所示，營建剩餘土石方分類可以由極濕土壤 (B6) 或一般黏性土壤 (B4)，轉換為最適合應用於路基土壤滾壓夯實的土壤與礫石及砂混合物 (B2-2/B2-3)。其分類隨著配比的增加，混合料的土壤分類變動【文獻 5.1】。以此方法進行配比設計不僅可以滿足前節所述所有特點外，以濕重比 1：1 為配比設計，也可在現地實際使用上更為簡便。

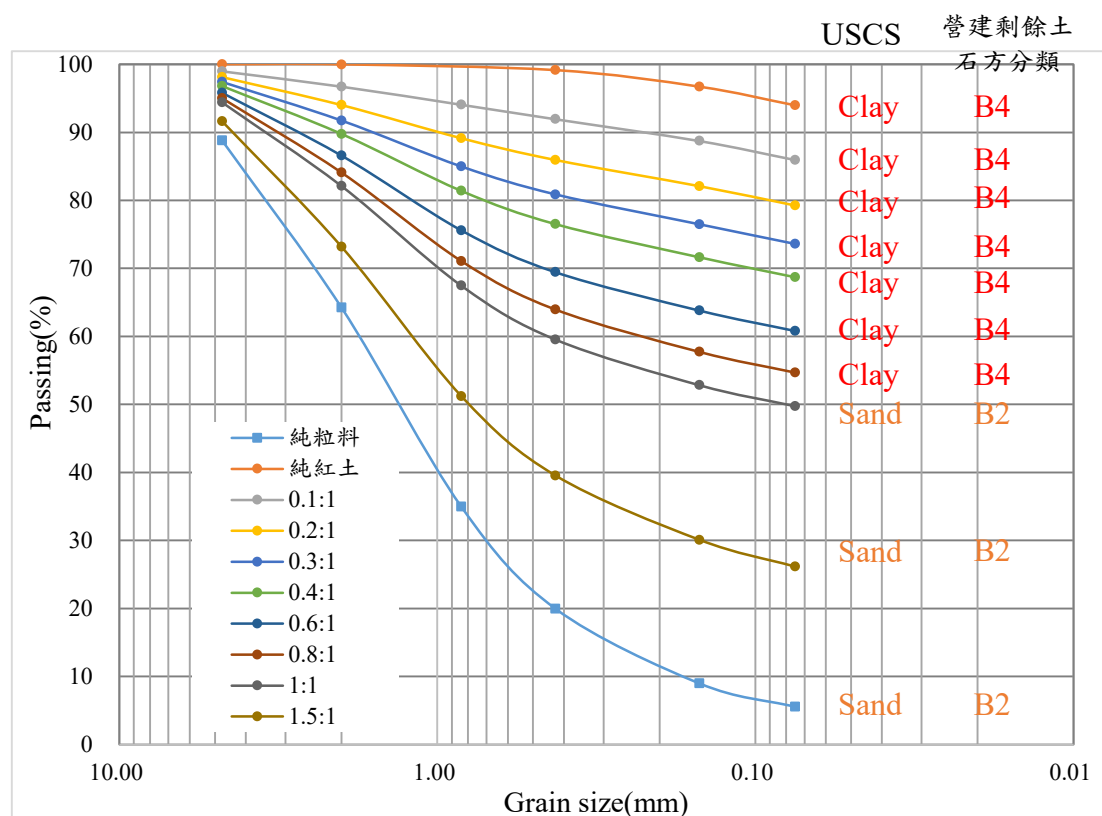


圖 5-3 各配比粒徑曲線分析【文獻 5.1】

5.6 配比設計綜合討論

前節建議之 1：1 快速配比設計於桃園多個試拌工程使用後，均得到令人滿意的成果。然發現焚化再生粒料在各地區的處理廠完成再處理後，因其堆置、暫置方法的不同，以致各地區處理廠粒料含水量均有所不同，例如：桃園市 ROT 再處理廠粒料出廠含水量約為 20%~28% 不等；台中市、台北市、新北市再處理廠出廠粒料含水量則均為 15% 左右；高雄市再處理廠出廠粒料含水量則僅約為 10%。由於含水量不同，導致 5.3 節與 5.4 節所述之配比設計法會因粒料含水量變化而有所不合。因此，本手冊另提供設計用量計算表以滿足不同粒料含水量同時又可滿足前節所述之優點。如圖 5-4 所示，本表改以混合料之含水量與原土最佳含水量之差值判斷是否需要額外添加石灰，並限定配比於 0.5：1~1.2：1，僅需填寫基本設計參數即可完成用量計算。

焚化再生粒料穩定過濕土壤配比用量試算表

21Y11M-24D

基本設計參數				
項目	數值	單位	編號	
原狀土含水量	29.00%	%	A	
原狀土改良夯實最佳含水量	18.00%	%	B	
原狀土壤濕單位重	1.950	t/m ³	C	
焚化再生粒料含水量	18.00%	%	D	
焚化再生粒料濕單位重	1.660	t/m ³	E	
單層實方厚度	30	cm	F	
現地面積	2000.0	m ²	G	
混拌料鬆實比	1.33	%	H	
設計拌和比例(粒料:土)	1.0	: 1.0	I	

判斷是否需要添加石灰			
混拌後含水量	23.50%	%	J
$= (A * 1.0 + D * I) / (I + 1.0)$			
$J > B + 5\%$	V	建議添加總重之1%石灰，或增加拌和時間	
$B + 5\% \geq J > B$			
$J \leq B$			

計算用量				
設計拌和比例(濕重比)	1.0	: 1.0	I	
設計拌和比例(體積比)	1.175	: 1.0	K	$= (I * 100 / E) / (100 / C)$
拌和(土)厚度比例	45.98%	%	L	$= 100 / (K * 100 + 100)$
拌和(料)厚度比例	54.02%	%	M	$= (K * 100) / (K * 100 + 100)$
計算(土)實方厚度	13.80	cm	N	$= F * L$
計算(料)實方厚度	16.20	cm	O	$= F * M$

單位轉換為現地混拌單位				
(土)鬆方厚	18.35	cm		$= H * N$
(料)總重	538.01	t		$= O * G * 0.01 * E$

最終結果		
現地土方鋪築厚度(鬆方)	18.35	cm (實方*1.33)
焚化再生粒料使用量	538.0	噸
1%石灰用量	10.8	噸

第1頁，共1頁

圖 5-4 配比設計表

5.7 簡化配比與單位用量對照表

經大量的室內試驗與示範工程的相關觀察成果，混合料的改良夯實試驗 OMC 均大於原土 1% 左右。考量配比 0.6：1、0.8：1、1.0：1 的變異均在 1% 以內，故不同配比條件下，其混合料 OMC，以原土 OMC 為之，以減少變數。經以前節用量試算表得以下簡化配比選擇方式：

1. 計算現地原土含水量 (w_n) 與原土最佳含水量 (OMC) 差值
2. 過程不考慮原土濕單位重、粒料含水量、粒料濕單位重
3. 規定單層滾壓厚度 30cm、土方鬆實比 1.33、焚化再生粒料單位重 1.66t/m^3 (考慮焚化再生粒料的鬆實方無差異)
4. 單位用量對照表

表 5-1 單位用量對照表

粒料含水量(%)	$\Delta w = w_n - \text{OMC}, \%$ (原土含水量與 OMC 的差異)		
20±2.5	$\Delta w \leq 1$	$1 < \Delta w < 5$	$5 \leq \Delta w$
15±2.5	$\Delta w \leq 4$	$4 < \Delta w < 7$	$7 \leq \Delta w$
10±2.5	$\Delta w \leq 8$	$8 < \Delta w < 12$	$12 \leq \Delta w$
單層土方鬆方鋪設厚度	24 cm	20cm	18 cm
單層粒料鋪設厚度	12cm	15cm	16.5 cm
實際拌和比例(濕重比)	0.58：1	0.84：1	1.04：1
建議添加總重 1%石灰	X	X	V

註：本表以原土最佳含水量 15% 進行試算，配比以 1.0：1、0.8：1、0.6：1 之最接近整數用量進行試算，以維持單層滾壓厚度約在 30cm。

5. 使用範例
 - A. 有一現地原土方含水量 29%，現地原土方最佳含水量 18%，焚化再生粒料含水量 17%。經查表 5-1 結果，可得配比：單層土方鬆方鋪設厚度 18 cm+單層粒料鋪設厚度 16.5 cm+建議添加總重 1%石灰，實際拌和比例約為 1.04：1。使用結果參見表 5-2。

表 5-2 查表範例-A

① 粒料含水量(%)	$\Delta w = w_n - w_{OMC}$, %(原土含水量與 OMC 的差異)		
↓ 20±2.5	$\Delta w \leq 1$	$1 < \Delta w < 5$	$5 \leq \Delta w$
② 15±2.5	$\Delta w \leq 4$	$4 < \Delta w < 7$	7 ≤ Δw ③
10±2.5	$\Delta w \leq 8$	$8 < \Delta w < 12$	12 ≤ Δw ↓
單層土方鬆方鋪設厚度	24 cm	20cm	18 cm
單層粒料鋪設厚度	12cm	15cm	16.5 cm
實際拌和比例(濕重比)	0.58 : 1	0.84 : 1	1.04 : 1 ④
建議添加總重 1%石灰	X	X	V

B. 有一現地原土方含水量 26%，現地原土方最佳含水量 16%，焚化再生粒料含水量 11%。經表 5-1 查表結果得配比：單層土方鬆方鋪設厚度 20 cm+單層粒料鋪設厚度 15 cm，實際拌和比例約為 0.84：1。使用結果參見表 5-3。

表 5-3 查表範例-B

① 粒料含水量(%)	$\Delta w = w_n - w_{OMC}$, %(原土含水量與 OMC 的差異)		
↓ 20±2.5	$\Delta w \leq 1$	$1 < \Delta w < 5$	$5 \leq \Delta w$
↓ 15±2.5	$\Delta w \leq 4$	$4 < \Delta w < 7$	$7 \leq \Delta w$
② 10±2.5	$\Delta w \leq 8$	8 < Δw < 12 ③	12 ≤ Δw
單層土方鬆方鋪設厚度	24 cm	20cm ↓	18 cm
單層粒料鋪設厚度	12cm	15cm	16.5 cm
實際拌和比例(濕重比)	0.58 : 1	0.84 : 1 ④	1.04 : 1
建議添加總重 1%石灰	X	X	V

參考文獻

- 5.1 歐立宸，「焚化再生粒料穩定桃園紅土配比設計的控制條件研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2019。
- 5.2 張達德，「應用焚化再生粒料於道路路床改善試驗及輔導工程」，桃園市政府工務局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2020。
- 5.3 張達德，「焚化再生粒料應用於土石方穩定試辦工程委託專業服務」桃園市政府工務局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2019。
- 5.4 張達德，「桃園市焚化再生粒料示範應用與規範修訂服務」，桃園市政府工務局委託服務案期末報告，中原大學環控防災科技中心，2019。

- 5.5 張達德，「焚化再生粒料應用於基地填築試驗及輔導工程」，桃園市政府工務局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2020。
- 5.6 Petry, T. M. “State of Art on International Practice on Soil Stabilization Technology for Pavement and Embankment Regulation Brief on TRB, FHWA, FAA, AASHTO, and PCA”, International Workshop on Application of Soil Stabilization using Incinerated Recycle Aggregates for Circular Economy Achievement. Taoyuan, Taiwan, 2019.
- 5.7 張達德，「焚化再生粒料應用於土壤穩定的循環經濟關鍵技術與工法的研究」，亞新工程顧問股份有限公司委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2021。

第六章 施工步驟與機具

6.1 前言

本章說明焚化再生粒料現場施工步驟及所需機具，用以協助現場工程人員了解焚化再生粒料施工相關內容，期使焚化再生粒料得以更快速並正確的使用。焚化再生粒料現場施工之簡要流程與使用機具，如圖 6-1 所示，各步驟之詳細內容將於後續各節說明之。

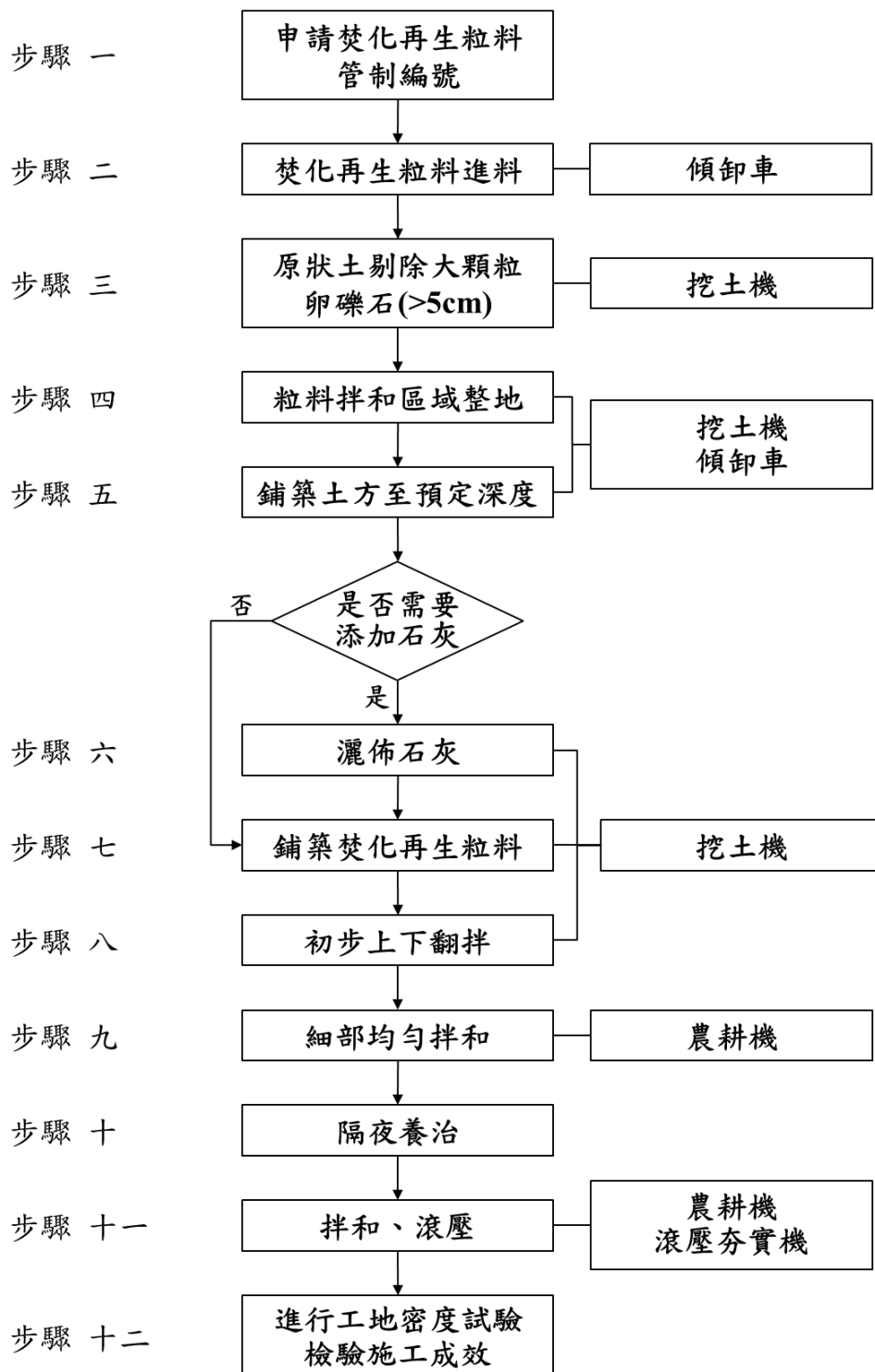


圖6-1 施工流程圖

6.2 現地拌和

6.2.1 現地原狀土

1. 焚化再生粒料申請程序

依照桃園市政府環境保護局之規定，使用焚化再生粒料前應先向環境保護局提出書面申請單位管制編號。獲得單位管制編號後，得向環境保護局申請工程管制編號，環境保護局將依規定審查並核發工程管制編號。獲得工程管制編號後，須於使用前 5 日以上提送供料申請書供環境保護局審查，通過審查後方能進行使用。使用後應提送結案申請書供環境保護局審查並結案，內容應含：(1) 施工日誌（使用日期之相關影本資料）、(2) 監造日誌（使用日期之相關影本資料）、(3) 施工前、中、後照片、(4) 再生粒料出貨重量證明。申請用料之流程概要如圖 6-2 所示【文獻 6.1】。

詳細作業內容應依據「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」、「桃園市公共工程使用再生粒料及再生綠建材標章作業原則」等規定辦理。

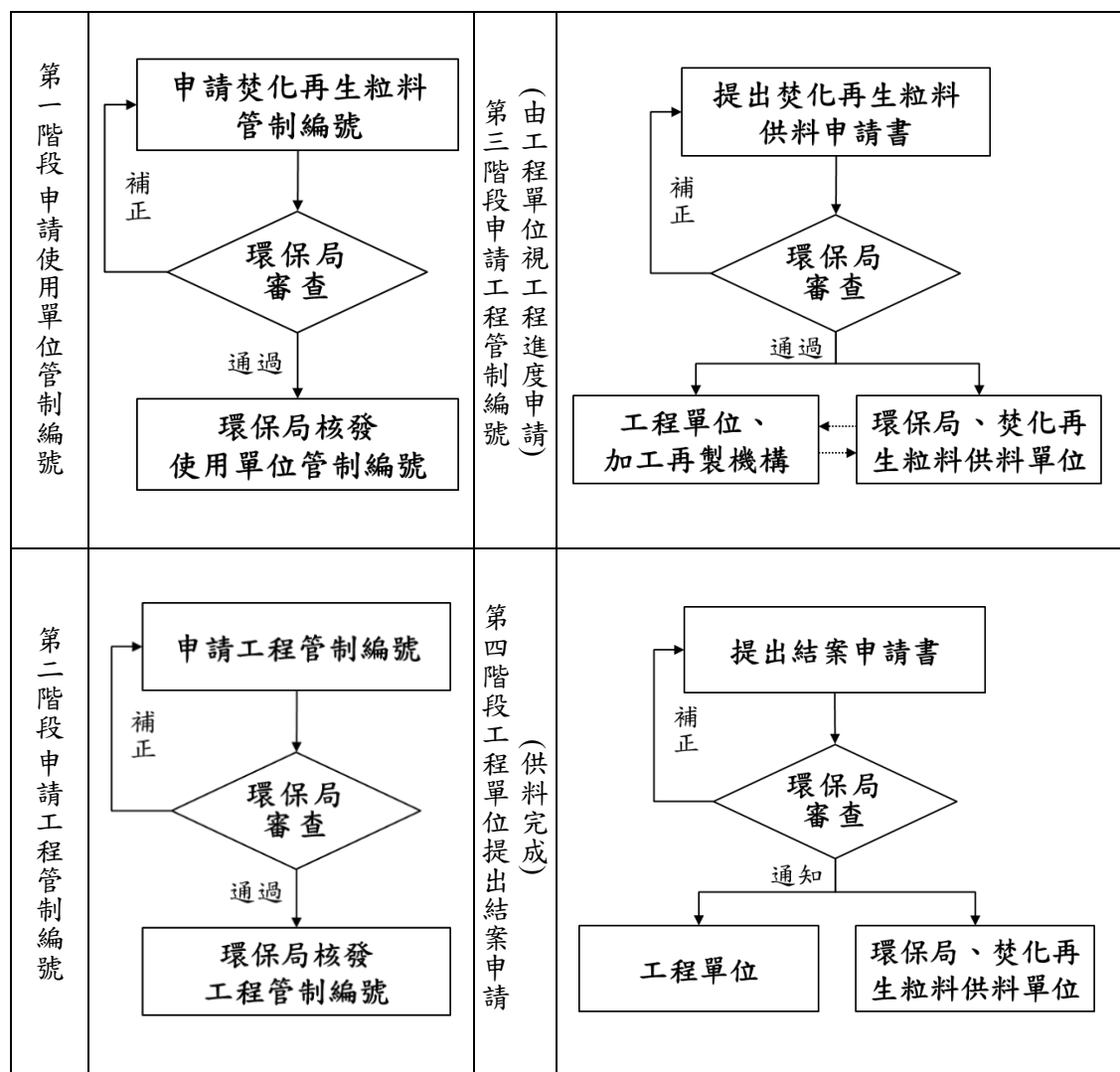


圖6-2 焚化再生粒料用料申請流程概要圖【文獻6.1】

2. 焚化再生粒料進場暫置

由工程單位視工程進度向環保局申請管制編號，並由桃園市觀音灰渣處理場（ROT 廠）統一出料。焚化再生粒料進場後須暫時堆置於事前規劃好之堆置區內統一管理。由於 ROT 廠每日出料車次約為 10~15 車，須先提前規劃進料時間，以防止工程進度延宕。如圖 6-3 所示，為避免遇天氣不穩定或下雨等因素影響粒料性質，須於每日進料完成時蓋上帆布待後續拌和作業，以防止焚化再生粒料被浸濕。已進場之焚化再生粒料須保留進場時由 ROT 廠所提供的供料單，以利後續環境保護局查核。



圖 6-3 焚化再生粒料堆置後蓋上帆布

3. 路床或路基土壤準備

路床或路基土壤之材料須符合工程會施工規範第 02317 章「構造物回填」、第 02331 章「基地及路堤填築」之規定，於填築滾壓前，亦應依據工程會施工規範第 02231 章「清除及掘除」完成填方區內所有清除及掘除作業，並於拌和前完成以下作業準備：

- (1) 原狀土剔除大顆粒卵礫石：在進行拌和作業前須先進行過篩，剔除大顆粒卵礫石/石塊（粒徑 $>5\text{cm}$ ），以利農耕機行後續拌和作業。過篩可於準備及搬運「欲拌和土方」時，同時使用改良挖斗之挖土機進行施作，如圖 6-4 所示【文獻 6.2】。



圖 6-4 原狀土過篩

- (2) 拌和區整地：現地試拌區域首先須依據設計完成面高程以及原地面線之高程，結合依焚化再生粒料穩定土方「設計拌和層數」與「目標完成面高程」，進行填土或降挖以符合設計高程。填土或降挖後之拌和區域依規定須進行整平及滾壓，並達到規定之夯實度。
 - (3) 鋪築原狀土於預定深度：依照現地土方設計鋪築厚度，再次確認及剔除大顆粒卵礫石後，將現地原土平均鋪築於拌和區內。
- ### 4. 焚化再生粒料（或另添加石灰）攤散與拌和（含土壤破碎）
- (1) 撒佈石灰（若不添加石灰，則免此步驟）：現地原土鋪築完成後，使用挖土機將太空包包裝之顆粒狀石灰吊掛至撒佈區

域上方，切開太空包底部，讓挖土機於拌和區域內均勻撒佈，如圖 6-5 所示。石灰可使用顆粒狀石灰、粉狀石灰，惟使用粉狀石灰撒佈時容易產生粉塵，應針對揚塵問題提出對策，以控制施工環境之整潔【文獻 6.3】。



圖 6-5 撒佈石灰

- (2) 鋪築焚化再生粒料：現場以傾卸車將焚化再生粒料從暫置區運至拌和區內，並利用挖土機將焚化再生粒料均勻鋪平至預定高程，以待後續拌和作業，如圖 6-6 所示。



圖 6-6 鋪築焚化再生粒料

- (3) 挖土機初步上下翻拌：須先用挖土機初步上下翻拌，將底部現地原土與上部焚化再生粒料初步拌和，以利下階段農耕機進行細部拌和，並可於此階段進一步篩除剩餘大卵石，如圖 6-7 所示。



圖 6-7 挖土機初步上下翻拌

- (4) 農耕機細部拌和：挖土機完成初步上下翻拌後，如圖 6-8 所示，再由農耕機進行完整細部拌和，直至所有現地原土均已與焚化再生粒料均勻拌和。經細部拌和後的混合料，須要靜置並隔夜養治一晚，使混合料可以完整進行化學反應並持續降低含水量。



圖 6-8 農耕機完整拌和

- (5) 隔夜養治後加強拌和：混合料再經隔夜養治後，須由農耕機於再滾壓前進行加強拌和，使混合料可以於均勻的含水量下

進行滾壓，並持續降低混合料含水量直至達到適合滾壓之含水量。適合滾壓之含水量須依據現地檢測結果或由現場工程師以專業經驗判斷，如圖 6-9 所示。



圖 6-9 隔夜養治使混合料減水作用充分反應

5. 滾壓與工地密度試驗

- (1) 滾壓作業：完成拌和後，進行滾壓作業，將混合料水分再次擠出，如圖 6-10 及圖 6-11 所示。



圖 6-10 滾壓作業將混合料水分再次擠出



圖 6-11 滾壓與加強拌和作業分階段同時進行

- (2) 工地密度試驗：依據工程會施工規範之相關規定進行工地密度試驗，檢驗滾壓成效，如圖 6-12 所示。



圖 6-12 滾壓完成後工地密度試驗

- (3) 其他注意事項：如同一般土方作業，運用焚化再生粒料進行現地拌和作業，應避免於降雨時進行。如於工作執行中遭遇降雨事件，須以帆布覆蓋並應於作業前評估現場排水設施設置需求，以避免作業區域被積水淹沒【文獻 6.4】。

6. 改良夯實最大乾密度試驗

依據改良夯實試驗可求得試驗土樣最佳含水量（OMC）與最大乾密度（ $\gamma_{d, \max}$ ）。然而標準氣乾土配比試驗方法，於現地取土後需經氣乾及敲碎過篩等步驟，其過程較為耗時。若以反向改良夯實試驗，則可將焚化再生粒料直接與過濕土壤進行拌和，降低土樣準備及夯實試驗所需時間【文獻 6.5】。

7. 夯實試驗現地混拌土樣準備

焚化再生粒料混拌完成後，將各含水量試驗土樣依用量需求分裝並量測當前含水量，再上膜密封進行養治。夯實試驗之土樣備製方式及步驟請參照本手冊 4.5.2 節「夯實試驗與無圍壓縮試驗與養治條件」相關內容辦理【文獻 6.5】。

6.2.2 現地原狀土小搬運至工區使用處

進行拌和作業時，可於工區適當場域進行拌和處理，再小搬運至施作位置填築滾壓，如圖 6-13 所示。處理場所應依據「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」等規定辦理。



圖 6-13 混合料運回工區進行填築滾壓

6.2.3 工區外媒合借土

工區外媒合借土之調度方式及土源性質應依據「桃園航空城計畫區段徵收工程土石方交換作業實際計畫」、「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」等規定辦理，並針對土源性質擇定焚化再生粒料用量與配比，以達到縮短工期及提升工程品質之目標。

6.2.4 坑洞小區塊穩定處理

坑洞之成為過濕路基土壤承载力不足所致，可利用焚化再生粒料穩定其性質，提高路基強度（CBR 值），以提升道路服務品質與使用年限，並降低後續維護成本【文獻 6.6】。當工務單位採購發包採開口合約，則應用現場的狀況予以適度調整拌和機具，以及粒料採袋裝方式運至現場較為妥適。

6.3 中央預拌工廠

中央預拌廠可提供連續性拌和且品質均勻穩定之拌和料，同時亦可提升拌和之效率。但若工程為大型專案並採用區外媒合借土，或現地過濕土壤穩定處理，則因分區執行土方工作，採用中央拌和廠連續生產方式為之則不適用，不建議採用【文獻 6.2】。

6.4 工區內集中現地拌和場

雖然現地拌和方式之均勻度通常不如中央預拌工廠穩定，但透過適當的配比及機具設備，亦可達良好之工程性質，且若係以現地原土拌和，現地拌和尤可提供較符經濟效益的穩定方法【文獻 6.2】。

6.5 施工機具

施工主要機具如表 6-1 所示，所列施工機具僅供參考，廠商應依據實際作業需求選用適當機具。

表 6-1 焚化再生粒料應用於土壤穩定主要使用機具

使用機具	主要工項	參考型號
傾卸車	▪ 焚化再生粒料進料 ▪ 粒料拌和區域整地 ▪ 鋪築土方至預定深度	Fuso、Hino MBS
挖土機	▪ 原狀土剔除大顆粒卵礫石(>5cm) ▪ 粒料拌和區域整地 ▪ 鋪築土方至預定深度 ▪ 灑佈石灰 ▪ 鋪築焚化再生粒料 ▪ 初步上下翻拌	PC-138us、Kobelco SK200、PC-300、 Hitachi EX 120
農耕機	▪ 細部均勻拌和 ▪ 拌和、滾壓	John Deere 6920 (Hp 155)、John Deere 6410 (Hp 105)、Kubota Super 131D (Hp 125)
滾壓夯實機	▪ 拌和、滾壓	Volvo SD200

6.6 總結

焚化再生粒料與過濕土方材料拌和後，透過其物理特性加速過濕土壤的排水或吸水效應，並利用其高氧化鈣含量的特性，與過濕土壤的化學反應，提升混合土方的排水性與長期強度，使原先過濕土壤拌和後降低含水量達到要求之滾壓夯實度並減少棄土，以落實循環經濟與節能減碳之目標。

參考文獻

- 6.1 桃園市環保局，「桃園市焚化再生粒料申請流程圖」，2018。
- 6.2 Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J., Mitchell, J. K., Thompson, M. R. "Soil Stabilization in Pavement Structures. A User's Manual, Volume 2, Mixture Design Considerations", FHWA, Washington, D. C., USA, 1979.
- 6.3 王淳謹，「桃園市焚化再生粒料於土方穩定應用之現地示範工程優化研究及施工規範草案編修-期末報告」，中原大學，中興工程顧問股份有限公司委託，2020。
- 6.4 中原大學土木系，「焚化再生粒料於土壤穩定應用之使用手冊」，2020。
- 6.5 許晉偉，「焚化再生粒料在穩定過濕土方的室內與現場快速減水成效研究」，碩士論文，中原大學土木工程學系，2021。
- 6.6 張達德，「應用焚化再生粒料於道路路床改善試驗及輔導工程委託專業服務」，中原大學，桃園市政府工務局委託，2020。

第七章 施工品質驗收與特殊考量

7.1 前言

焚化再生粒料於土壤穩定的應用與驗收考量均以土方工程驗收方式為之，雖然混合料的反應成效與強度提升有直接的關聯，現地混合料的滾壓完工後仍以現地密度與壓實度為驗收依據。這有幾點考量因素是設計與施工者應確實了解的，穩定土壤的混和料經滾壓夯實後，其行為表現與混凝土或瀝青混凝土完全不同，尤其強度表現與現地狀況、施工條件均有密切關連。一般言之，短期、中期與長期強度發展的表現是穩定成長的，然而以驗收計價的工作而言並無法於完工後立即呈現可以做為驗收依據，但是壓實度對混和料的強度表現則是直接關聯的，因此以工地密度或壓實度為驗收依據是被國際上諸多規範一致認可的【文獻 7.1~7.10】。此處必須注意者，鑽心取樣會嚴重破壞混合料試樣的發展中強度，因而試樣所得強度值不具代表性，必須嚴格禁止，除非取樣係用於施工厚度計價的驗證使用【文獻 7.1~7.3】。

7.2 現地示範工程應用成效

依據 110 年 6 月 24 日，行政院公共工程委員會（以下簡稱工程會）相關施工綱要規範「第 02317 章構造物回填」及「第 02331 章基地及路堤填築」【文獻 7.11~7.12】，混合料的滾壓檢驗應考量拌和作業的均勻程度，以及含水量下降狀況（過濕土壤）。工地密度應以〔CNS 14733〕方法試驗，惟若經工程司同意可用其他方法試驗。

7.2.1 現地土壤條件

桃園市政府工務局委託的三處示範工程的土方均為過濕土壤（其中兩處為極濕土壤，屬 B6 分類），標準施工程序曝曬打碎的過程無法執行。直接拌和與加大配比（1：1 以上）是提升機械穩定與快速減水的有效方法。

1. 福元公園

福元公園土方經數次取樣施作土壤基本物性試驗後，其常時含水量達 26% 以上，原土改良夯實最佳含水量 OMC 約為 16%，

屬「極濕土壤」(OMC+8%)。液性限度為 41~45，塑性限度為 20~25，塑性指數為 16~25，篩分析結果 94%以上土壤通過 No. 200 篩。福元公園示範計畫之現地土樣參照統一土壤分類系統 (ASTM D-2487) 進行土壤分類，結果顯示福元現地土壤分類屬於 CL，為低-中塑性黏土。詳細施工範圍如圖 7-1 所示，分別有剖面 11-11 的 A 區，及剖面 6-6 的 B 區【文獻 7.13】。

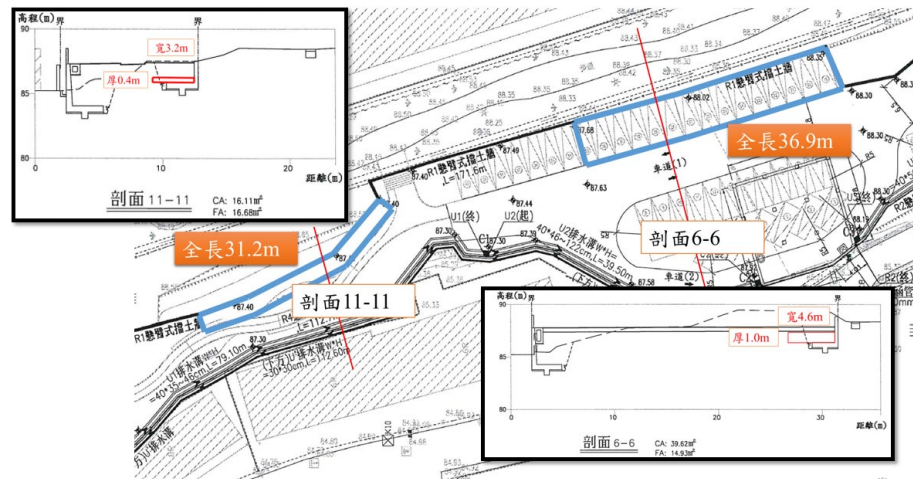


圖 7-1 福元公園示範計畫拌和區域圖【文獻 7.13】

2. 桃園機場捷運 A20 站區第二停車場

A20 第二停車場原為廢農田，依現場試坑觀察結果挑選試驗使用土方來源如圖 7-2 所示。其常時含水量達 30%以上，原土改良夯實最佳含水量 OMC 約為 17%，屬「極濕土壤」。液性限度為 48~50，塑性限度為 19~20，塑性指數為 29~30，篩分析結果 94%以上土壤通過 No. 200 篩。A20 示範計畫之現地土樣參照統一土壤分類系統 (ASTM D-2487) 進行土壤分類，結果顯示 A20 現地土壤分類屬於 CL 夾雜 CH 黏土。詳細施工範圍如圖 7-3 所示【文獻 7.14】。

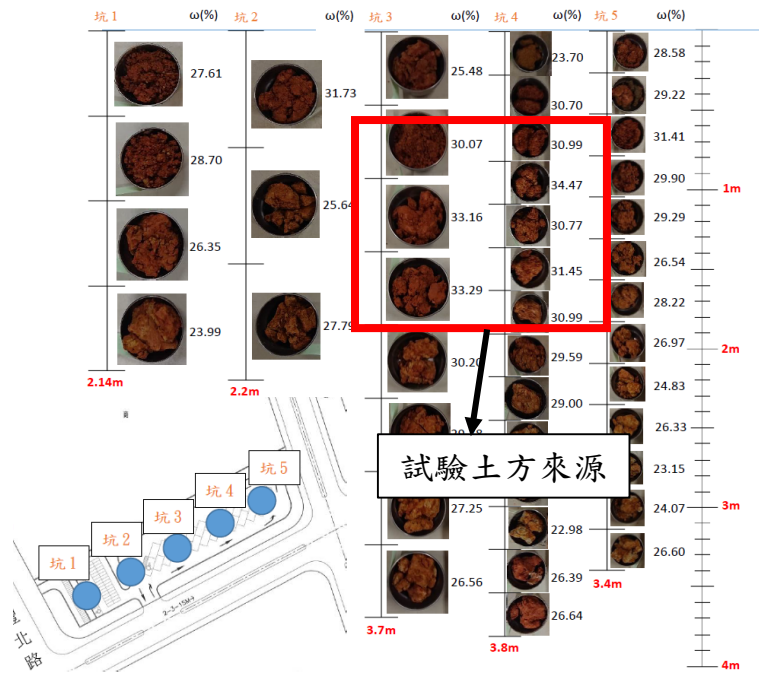


圖 7-2 現地試坑土方含水量分佈【文獻 7.14】

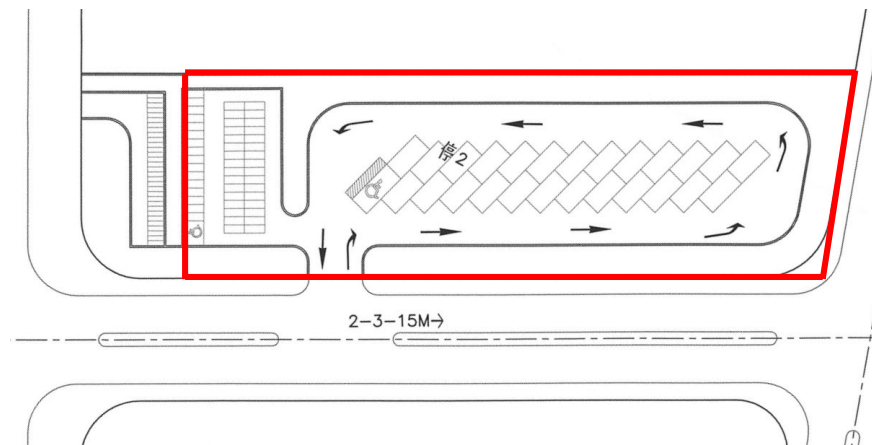


圖 7-3 A20 第二停車場示範計畫拌和區域圖【文獻 7.14】

3. 忠富路

忠富路土方經數次取樣施作土壤基本物性試驗後，其含水量達 33% 以上（鑽探結果為 36%）屬「極濕土壤」，土壤分類為 B6。原土改良夯實最佳含水量 OMC 約為 19.5%。液性限度為 64，塑性限度 22.3 為，塑性指數為 41.7，篩分析結果 95% 以上土壤通過 No. 200 篩。忠富路示範計畫之現地土樣參照統一土壤分類系統（ASTM D-2487）進行土壤分類，結果顯示忠富路現地土壤分類屬於 CH，為高塑性黏土，詳細施工範圍見圖 7-4，依鋪築厚度及範圍分為 A 區（30cm 兩層）、B 區（30cm 兩層）、C 區（30cm 一層）【文獻 7.15】。

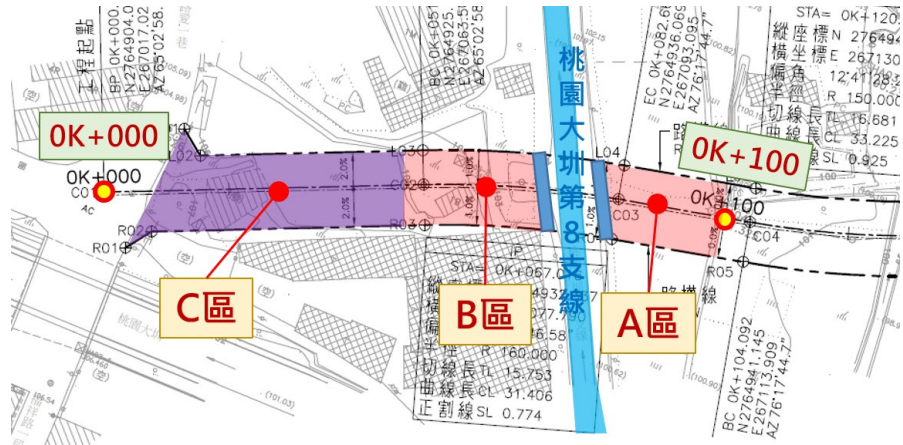


圖 7-4 忠富路現場示範區域範圍圖【文獻 7.15】

7.2.2 配比與拌和用量

1. 福元公園

本示範計畫用於擋土牆回填，目的為減少棄土外運並購土回填，降低工程經費並落實利用焚化再生粒料的循環經濟效益，改善工程品質。本計畫共拌和 200 餘方混合料，拌和配比由於現地土方連日下雨，又有洗水車大量沖洗造成積水，土方更為潮濕，決定增加焚化再生粒料用量 1.2:1 (粒料:土方) 及混合料濕重 1% 之石灰進行拌和，並進行分層拌和後滾壓，斷面設計之比較如圖 7-5 所示【文獻 7.13】。

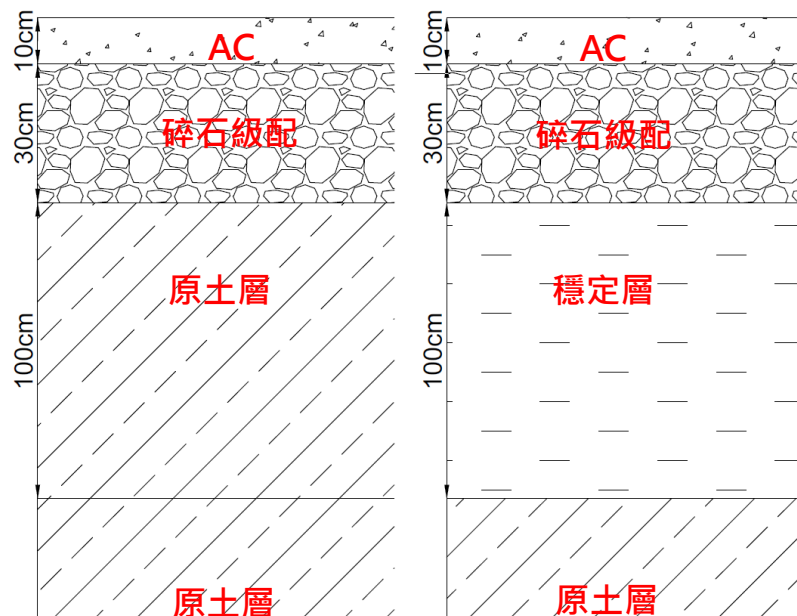


圖 7-5 福元公園 B 區詳細斷面設計比較【文獻 7.13】

2. 桃園機場捷運 A20 站區第二停車場

本試拌作業處理面積約為 $2,000 \text{ m}^2$ (長 $80\text{m} \times$ 寬 25m)，總拌和深度為 60cm 。拌和用量原狀土體積 600m^3 (濕重 1140T) 及 $1,179.97\text{T}$ 焚化再生粒料 (710.83m^3)，另添加 18.75 m^3 石灰，總拌和混合料共 $1,310.83 \text{ m}^3$ 。總拌和比例濕重比，焚化再生粒料：土方約為 $1:1$ ($1,179.97\text{T}:1,140\text{T}$)，配合滾壓前鬆方厚度最多 40cm 之規定將拌和作業分 2 層施工，斷面設計之比較見圖 7-6【文獻 7.14】。

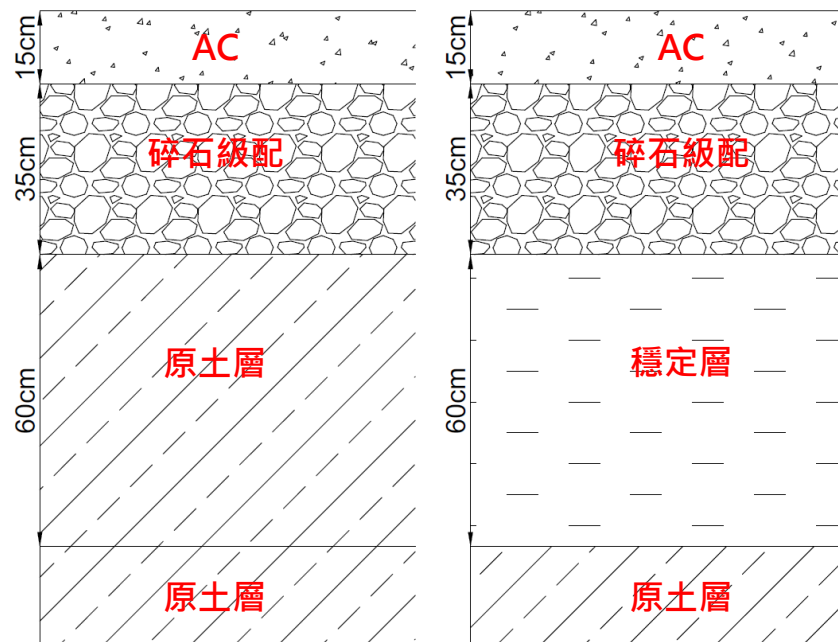


圖 7-6 A20 第二停車場詳細斷面設計比較【文獻 7.14】

3. 忠富路

本示範計畫共計分為 3 區塊，於忠富路 $0\text{K}+000$ 至 $0\text{K}+100$ ，其中 $0\text{K}+007.347$ 至 $0\text{K}+057.883$ 屬於挖方段改良深度 30cm (C 區塊)、 $0\text{K}+057.883$ 至 $0\text{K}+070.551$ 屬於填方段改良深度 60cm (B 區塊)、 $0\text{K}+070.551$ 至 $0\text{K}+080$ 為跨越排水渠道的橋面以及 $0\text{K}+080$ 至 $0\text{K}+098.228$ 屬於填方段改良深度 60cm (A 區塊)，分兩階段完成拌和鋪築作業，斷面設計比較見圖 7-7【文獻 7.15】。

第一階段：A、B 區塊第一層共進 114.16T 焚化再生粒料。第一層土方總鋪築面積 342.95m^2 、原狀土實方體積 54.52m^3 (濕重 103.24T)，使用生石灰粒共 5T ，由於 A、B 兩區塊分別位

於第 8 支線兩端，過程則由小搬運支援土方及粒料跨區運送【文獻 7.15】。

第二階段：進行 A、B 區塊第二層及 C 區塊第一層拌和。三區域總鋪築面積 839.62m²，三區域共進焚化再生粒料總計 244.38T。鋪築 19cm 鬆方原狀土厚度（體積 119.9m³、濕重 227.46T），並添加生石灰粒共 3.75T【文獻 7.15】。

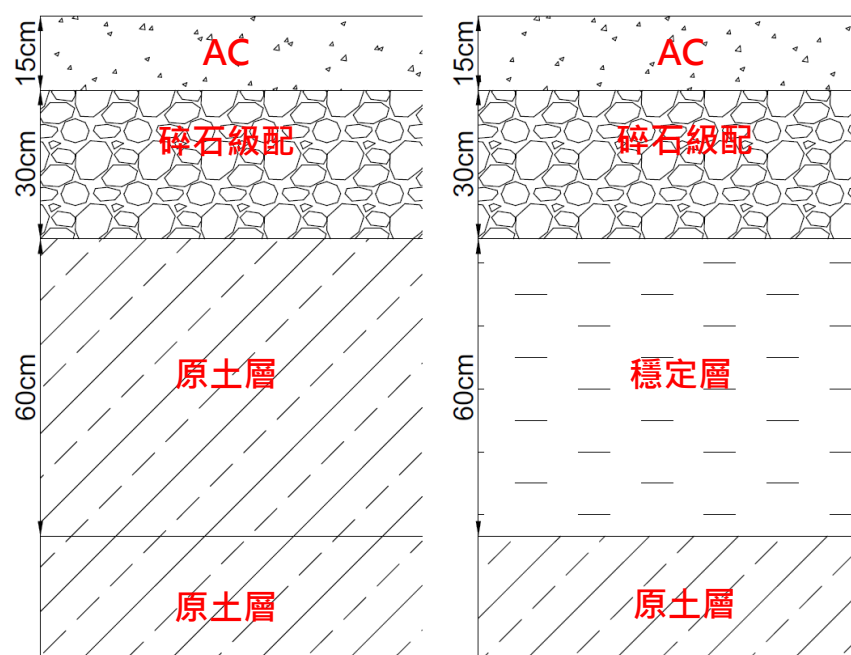


圖 7-7 忠富路 AB 區塊詳細斷面設計比較【文獻 7.15】

7.2.3 壓實度檢測

1. 福元公園【文獻 7.13】

於 6-6 剖面滾壓完成後，施作工地密度試驗以檢驗滾壓夯實度，其試驗結果如表 7-1 所示，夯實度達 101.1%，滾壓滿足工程會施工綱要規範第 02317 章構造物回填之 95%夯實度要求。

表 7-1 福元公園工地密度試驗結果【文獻 7.13】

編號	最大粒徑 mm	試坑 體積 cm ³	現地濕 密度 kg/m ³	總土樣 含水量 %	現地乾 密度 kg/m ³	樣品顆粒含量		修正後 $\gamma_{d,max}$ kg/m ³	壓實度 %	規範值 %
						停留 (3/4")%	通過 (3/4")%			
1	50.0	2892	2221	17.7	1887	2.1	97.9	1866	101.1	-
以下空白										

2. 桃園機場捷運 A20 站區第二停車場【文獻 7.14】

於兩層滾壓完成後，皆施作工地密度試驗以檢驗滾壓夯實度，其試驗結果如表 7-2、表 7-3 所示。第一層夯實度達 98~99%，第二層夯實度達 96~97%，兩層滾壓之結果皆滿足工程會施工綱要規範第 02331 章基地與路堤填築之 90%夯實度要求。

表 7-2 A20 工地密度試驗結果-1【文獻 7.14】

編號	最大粒徑 mm	試驗孔 體積 cm ³	現場 濕密度 kg/m ³	現場 含水量 %	現場 乾密度 kg/m ³	停留 粗料 (NO.4)%	實驗室修正 後最佳含 水量%	實驗室 修正後 $\gamma_{d,max}$ kg/m ³	現場 壓實度 %	規範值 %
1	12.5	2389	1914	12.8	1697	2.3	16.0	1723	99	≥95
2	19.0	2465	1901	12.2	1694	3.4	16.0	1723	98	≥95
以下空白										

表 7-3 A20 工地密度試驗結果-2【文獻 7.14】

編號	最大粒徑 mm	試驗孔 體積 cm ³	現場 濕密度 kg/m ³	現場 含水量 %	現場 乾密度 kg/m ³	停留 粗料 (NO.4)%	實驗室修正 後最佳含 水量%	實驗室 修正後 $\gamma_{d,max}$ kg/m ³	現場 壓實度 %	規範值 %
1	9.5	2360	1915	14.6	1671	2.3	16.0	1723	97	≥95
2	19.0	2303	1892	14.4	1654	0.6	16.0	1723	96	≥95
以下空白										

3. 忠富路【文獻 7.15】

根據工程會施工綱要規範第 02331 章基地與路堤填築規範要求，於單層滾壓後需進行工地密度試驗。滾壓夯實度需達到改良夯實試驗所求得最大乾密度之 95%。本計畫第一層及第二層滾壓完成後皆進行工地密度試驗，試驗結果如表 7-4 及表 7-5 所示，現場過濕土方與焚化再生粒料拌和、養治及滾壓後，夯實度達 95~98%，皆大於規範要求。

表 7-4 忠富路工地密度試驗結果-1【文獻 7.15】

編號	最大粒徑 mm	試驗孔 體積 cm ³	現場 濕密度 kg/m ³	現場 含水量 %	現場 乾密度 kg/m ³	停留 粗料 (NO.4)%	實驗室修正 後最佳含 水量%	實驗室 修正後 $\gamma_{d,max}$ kg/m ³	現場 壓實度 %	規範值 %
1	4.75	948	1741	16.0	1500	0.0	24.0	1556	96	≥95
2	4.75	849	1724	16.0	1486	0.0	24.0	1556	96	≥95
3	4.75	953	1759	15.8	1518	0.0	24.0	1556	98	≥95
以下空白										

表 7-5 忠富路工地密度試驗結果-2【文獻 7.15】

編號	最大粒徑 mm	試驗孔 體積 cm ³	現場 濕密度 kg/m ³	現場 含水量 %	現場 乾密度 kg/m ³	停留 粗料 (NO.4)%	實驗室修正 後最佳含 水量%	實驗室 修正後 Y _{d,max} kg/m ³	現場 壓實度 %	規範值 %
1	4.75	992	1701	14.7	1483	0.0	26.7	1513	98	≥95
2	4.75	898	1654	14.6	1443	0.0	26.7	1513	95	≥95
3	4.75	810	1669	15.0	1452	0.0	26.7	1513	96	≥95
以下空白										

7.3 混合料驗收考量與規定

依據國際的相關規範，土壤穩定混合料的工地施工驗收均採滾壓完成的壓實度為之。焚化再生粒料穩定過濕土方的驗收考量與規定，均依據行政院公共工程委員會施工綱要規範工作執行驗收工作，特摘錄於表 7-6、表 7-7，方便本手冊使用者直接引用【文獻 7.11~7.12】。

表 7-6 第 02317 章構造物回填【文獻 7.11】

名稱	檢驗項目	依據之標準	規範之要求	頻 率
回填材料	土壤分類	CNS 12387	最大粒徑不得大於 10cm，並符合設計圖之規定	每 500m ³ 1 組
施工	壓實度	CNS 14733	CNS 11777 或 CNS 11777-1 試驗所得最大乾密度之 90%或 95%以上	每一層每 1000m ² 1 組

註：構造物回填採≥90%壓實度為之。

表 7-7 第 02331 章基地與路堤填築【文獻 7.12】

名稱	檢驗項目	依據之標準	規範之要求	頻 率
填築 滾壓	壓實度	CNS 14733	CNS 11777 或 CNS 11777-1 試驗所得最大乾密度之 90%以上	每一層每 1000m ² 1 組

註：基地與路堤填築採≥90%壓實度為之。

7.4 特殊考量

7.4.1 壓實度檢測標準

工地密度檢測與驗收的工作項目，在 TAF 認證的試驗項目中並無包括焚化再生粒料穩定土壤混合料。於驗收試驗的委任工作上，甲方或業主的監造工程師應持開放的態度面對委任工作的執行。基本言之，其

試驗步驟與相關需求均與一般土壤無異。而焚化再生粒料幾無 $>3/4$ 英寸的顆粒，於改良夯實試驗的過程與成果計算上無需執行置換的調校步驟。其模具仍可採用標準夯實的尺寸（ $V=1/30\text{ ft}^3$ ）為之，無須更換大模具執行工作。

此處值得一提的是現地混合料，其真實配比必定與室內試驗的控制無法完全一致。因此夯實試驗的成果「 γ_d 與 $w\%$ 關係曲線」，必須特別考量由現地混合料取樣為之。此特殊考量在大型的土方工程中，（如：大壩填築、基地與路堤填築等）必須嚴謹面對。針對現地混合料的取樣與室內夯實試驗的結果呈現，應考量於24小時內完成才不致影響驗收試驗的執行與核可時效，造成工進的延誤。

7.4.2 現地配比設計變異對穩定成效的影響

依據室內實驗的執行步驟，以乾重控制混合料配比的用量是很容易掌握的。但是在現地施作時，採用體積比是最常用的方式，亦即利用鬆實比快速求得現地鋪置式攤散土方與粒料的厚度為之（參閱 5.7 節，表 5-1）。依據三項示範工程的執行經驗得知，由於在 1:1 的高配比用量下，實際施工操作確有誤差產生。在三項示範工程中，實際配比用量的變異性綜合如表 7-8 所示。而針對這範圍的 $\pm 15\%$ ，是否對穩定過濕土方的成效有所折減必須予以說明。澄清這可能有的疑慮，就必須由其反應機理（化學與機械穩定）加以說明。經由焚化再生粒料化學穩定機制提供穩定成效的目標包括：

1. 提供高 pH 值環境
2. 加速減水（drying out）
3. 陽離子交換以降低塑性、膨脹性
4. 卜作嵐反應提升強度，包括短期（24 小時）、中期（7~14 日），以及長期（3 年以上）

而化學穩定所需要的粒料用量，0.4~0.6:1.0 即可達目標需求（見圖 4-19、圖 4-20）。由於強化加速減水的功能，採用了高配比（1.0:1.0）為之，當然遠遠涵蓋了化學穩定的配比準則。針對三項示範工程的實際配比用量，見表 7-8。而現地壓實度的檢核，以及混合料含水量的快速降低，參考表 7-9。

針對強度的提升，現地拌和與滾壓工序是否能與室內試驗有同樣的成效是值得進一步了解的。針對此一關鍵課題，桃園市政府工務局的兩

項計畫已順利完成【文獻 7.16~7.17】，特以非破壞性落重式撓度儀（Falling Weight Deflectometer, FWD），全面進行系列的調查成果十分顯著。有關 FWD 的測試原理不在此贅述，細節詳【文獻 7.1~7.2】。而此方法用於鋪面系統各層材料的檢核，已被美國 FHWA 明訂為鋪面現況調查的標準檢測工作【文獻 7.18】，ASTM 亦納入標準方法供參【文獻 7.19】。

表 7-8 三項示範工程的實際配比用量

	福元公園		A20	忠富路		
	A 區	B 區	全區	A 區	B 區	C 區
第二層 用量(m ³)	未施作		687.2	54.69	212.43	
第二層 配比			0.84 : 1	0.96 : 1	1.1 : 1	
第二層 石灰用量			1.4%	1.3%	0.67%	
第一層 用量(m ³)	40	160	823.6	57.66	71.21	未施作
第一層 配比	1 : 1	1.2 : 1	1.23 : 1	1.3 : 1	1.1 : 1	
第一層 石灰用量	1%	1%	1.07%	2.5%	0.67%	
是否施作 FWD	否	是	是	是	是	否

註：三示範工程分別依序鋪置一至二層混合料，單層實方 30cm。

表 7-9 三項示範工程夯實度及含水量變化表

		福元公園		A20	忠富路		
		A 區	B 區	全區	A 區	B 區	C 區
滾壓完成時間		2019/05/31		2019/11/11	2020/03/17		
第二層	原土 w%	未施作		30.00	33.00		
	原土 OMC w%			17.00	19.50		
	粒料 w%			20.00	20.00		
	完成拌和 w%			21.55	28.30	22.99	24.90
	隔夜養治 w%			N/A	23.61	24.00(雨)	N/A
	滾壓後 w%			16.05	14.7	14.60	15.00
	工地密度 w%			14.50	14.60~15.00		
	夯實度 %			96~97	95~98		
第一層	原土 w%	26.00		30.00	33.00		
	原土 OMC w%	16.00		17.00	19.50		
	粒料 w%	20.00		20.00	27.00		
	完成拌和 w%	19.50	19.98	20.41	N/A	25.52	未施作
	隔夜養治 w%	N/A	N/A	N/A	23.73	23.50	
	滾壓後 w%	N/A	19.03	18.42	16.00	16.00	
	工地密度 w%	N/A	17.70	12.50	15.90		
	夯實度 %	N/A	101.1	98~99	96~98		

註：三示範工程分別依序鋪置一至二層混合料，單層實方 30cm。

利用不同荷重的落錘產生的撓度(變形)，反算求得鋪面各層材料的彈性模數綜合於表 7-10。表中清楚可見混合料穩定層的彈性模數與碎石級配底層的表現幾乎一致，且遠大於現地原狀路基土壤。由表 7-10，可得知完工的時間，應在測試計畫執行的前一年以上。這些令人肯定的結果，充分說明了施工混拌的配比用量即使有所變異，但其後續的成效發展是符合預期成效的。

表 7-10 三項示範工程鋪面各層材料反算彈性模數統計

	福元公園	A20 ^{*1}	忠富路
完工日期	2019/05/31	2019/11/11	2020/03/17
施測日期	2021/07/29	2021/11/05	2020/07/07
1. 路基下原土反算彈性模數(MPa)	250	75	235
改良路基反算彈性模數(MPa)	619	851	880
施測日期	--	--	2021/09/28
2. 路基下原土反算彈性模數(MPa)	--	--	257
改良路基反算彈性模數(MPa)	--	--	1027

註¹：A20 施測時道路鋪面並未完全鋪設完畢，僅完成至 5cm AC 鋪面。

註²：底層碎石級配反算彈性模數約為 750~920(MPa)。

7.5 逆向夯實試驗創新方法與結果

為爭取縮短施工期程及考量現場環境無法滿足大範圍風乾、曝曬的條件，在不違反 ASTM D1557-12【文獻 7.20】規範下，以創新試驗程序，施作改良夯實試驗亦能得到符合規範之結果以作為現場驗收依據。以下為相關說明。

7.5.1 改良夯實試驗與逆向夯實試驗的差異

1. 改良夯實試驗正向施作

根據 ASTM D1557-12【文獻 7.20】，改良夯實試驗，土樣準備階段需將土樣自然氣乾或是以不超過 60°C 進行烘乾。上述案例依工程慣例將採用改良夯實 A 法(Method A)，土樣最大顆粒粒徑不大於 No.4 篩(4.75mm)。因此，於現地取得原狀土後，置於室外經由風吹、日曬等自然氣乾方式進行氣乾。氣乾完成後將土樣打碎並通過 No.4 篩，並由乾側緩慢加水至濕側，過程分 5 個不同含水量之土樣進行改良夯實試驗。以此完成

夯實曲線，並取得最佳含水量 (OMC)、最大乾密度 ($\gamma_{d,max}$)，如圖 7-8，在此處以正向施作稱之。

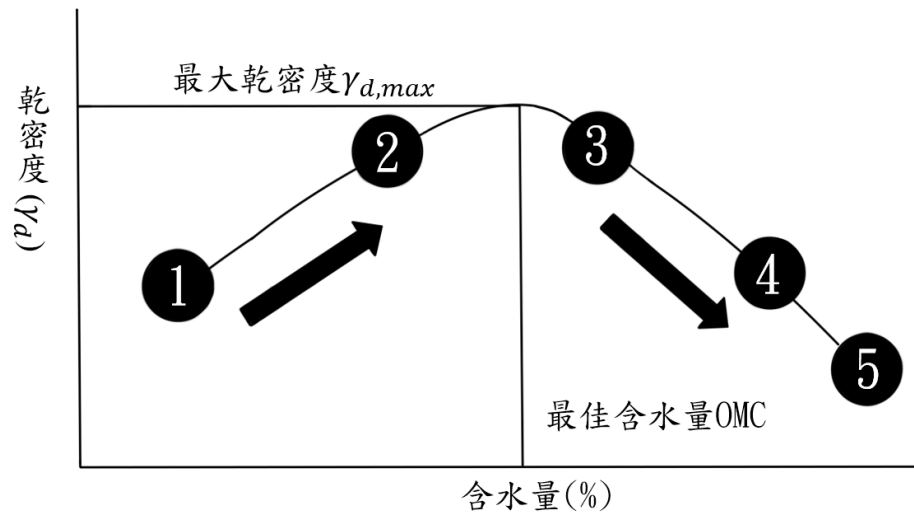


圖 7-8 夯實試驗正向施作順序示意圖【文獻 7.21】

2. 夯實試驗逆向施作

由於黏土具有凝聚力，在高含水量的情況下，黏土顆粒會聚集成團狀難以快速氣乾。以夯實試驗的標準做法（正向施作）則須將過濕土樣氣乾、打碎後通過 No.4 篩，其施作時間可能為 10 天以上。為了縮短試驗時間，在不違背 ASTM D1557-12 對改良夯實試驗之規範下，以逆向施作執行夯實試驗可快速完成夯實曲線，並取得最佳含水量 (OMC)、最大乾密度 ($\gamma_{d,max}$)，如圖 7-9。

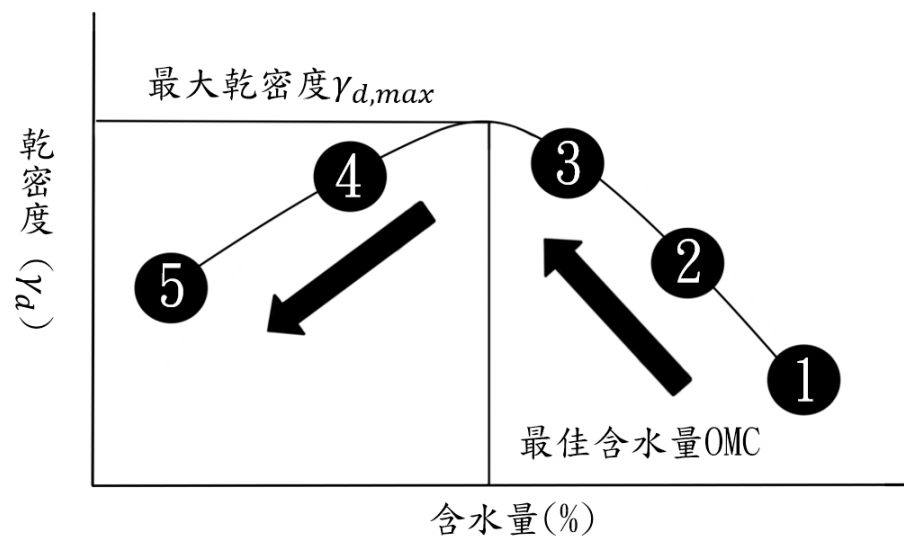


圖 7-9 逆向式夯實試驗施作順序示意圖【文獻 7.21】

7.5.2 室內逆向式改良夯實試驗步驟

參照 ASTM D1557-12 規範，土樣準備方式及五個含水量試驗樣本，由濕側至乾側施作步驟如下：

步驟 1：土樣準備

土樣來源為室內或現場拌和完成混合料初步挑出大於 1cm 的礫石等雜物。

步驟 2：測試階段

取得混合料後立即進行改良夯實試驗，求得含水量($w_1\%$)及乾密度($\gamma_{d,1}$)，此為濕側最濕的第一點，如圖 7-10 所示。

步驟 3：減少含水量階段

混合料充分拌和後分為 4 堆，攤平於金屬盤(4 盤)，以不超過 60°C 溫度烘乾(設定 55°C 為宜)【文獻 7.13】。烘乾時間為每隔 30min 取出 1 盤混合料均勻翻拌並密封 2 小時，使含水量均勻分布後陸續進行夯實步驟。如此可取得其餘 4 點含水量($w\%$)及乾密度(γ_d)，完成夯實曲線繪製，並提供最大乾密度(γ_{dmax})及最佳含水量(OMC)。

7.5.3 正向夯實試驗與逆向夯實試驗結果

以忠富路彎道改善工程為例，「正向」夯實試驗，拌和配比 1:1；現地混合料「逆向」夯實試驗，拌和配比分別為 1.32:1 添加 2.5%石灰、0.96:1 添加 1.3%石灰，如圖 7-10 所示。正向夯實曲線線型與逆向夯實曲線線型相似、OMC 變化在 2%內，且最大乾密度(γ_{dmax}) 1.72~1.75 (g/cm^3)，差異性不大。由於逆向夯實與正向夯實試驗結果相同，故可應證逆向夯實試驗之可行性。

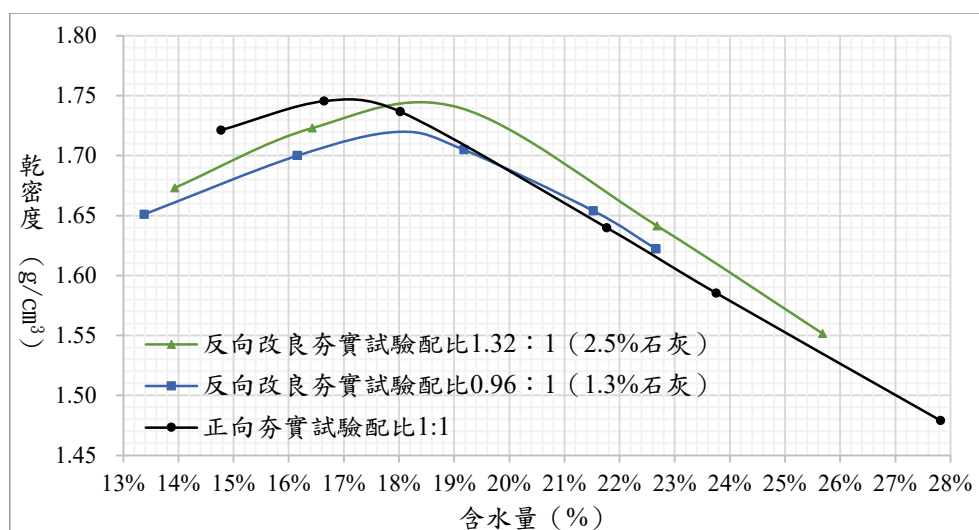


圖 7-10 正向夯實試驗與逆向夯實試驗結果比較示意圖【文獻 7.21】

7.5.4 室內混合料與現地拌和料逆向夯實試驗結果

本節利用兩個案例說明室內混合料與現地混合料夯實試驗結果：

1. 福元公園

現地混合料的配比為 1:1 (焚化再生粒料:土壤) 添加 0.3% 石灰與室內混合料配比分別為 0.5:1 添加 1% 石灰，以及 1:1 添加 1% 石灰，以此混合料進行夯實試驗，如圖 7-11 所示。兩者夯實曲線線型相似、OMC 相差 1% 以內，且最大乾密度 ($\gamma_{d,max}$) 為 1.82~1.84(g/cm³) 差異不大，因此，推論可利用室內拌和方式，模擬現地過濕土壤不經曝曬直接拌和、滾壓之情境，也能滿足工地驗收的夯實度需求。

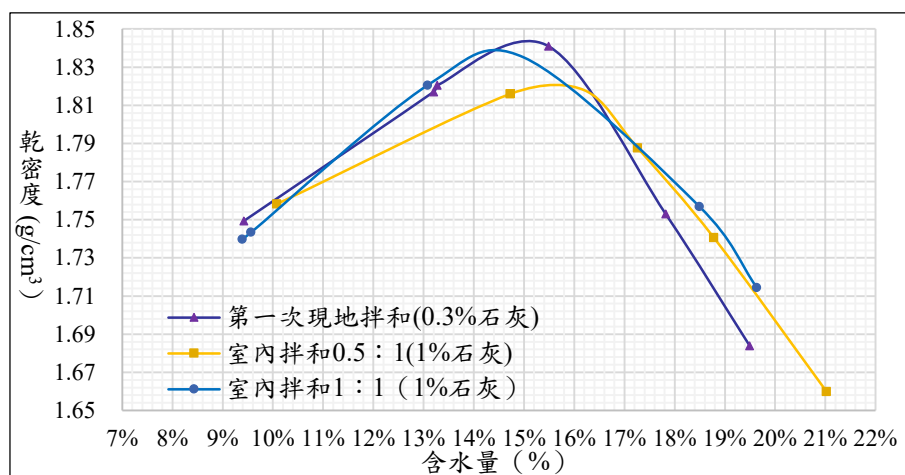


圖 7-11 福元公園室內及現地拌和料改良夯實曲線比較示意圖【文獻 7.21】

2. 桃園機捷 A20 第二停車場

現地混合料配比為 1.23：1 添加 1.07%石灰，以及 0.84：1 添加 1.4%石灰，室內混合料配比為 1：1 添加 1%石灰，以此混合料進行夯實試驗，如圖 7-12 所示。兩者夯實曲線 OMC 的變化在 2%以內且 $\gamma_{d,max}$ 均為 1.77(g/cm³)，故室內夯實與現地混合料夯實試驗結果一致。應證了利用室內拌和方式，可模擬現地過濕土壤不經曝曬直接拌和、滾壓之情境，也能滿足工地驗收的夯實度需求。

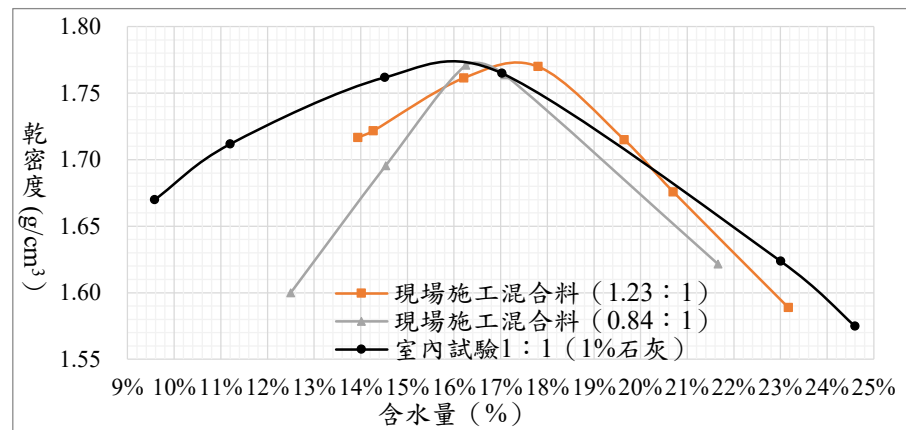


圖 7-12 桃園機捷 A20 第二停車場室內及現地拌和料改良夯實曲線比較示意圖【文獻 7.17】

7.6 混合料對現地土水環境影響考量

各計畫案水質檢監測資料依試驗方法的不同，作以下四種分類方式：

1. 焚化再生粒料環境標準。此標準為焚化再生粒料於再處理廠出廠前所使用的檢驗標準，且此處用途皆非屬公告事項七之限制使用地點，所以使用第二級標準，比對資料見表 7-11【文獻 7-22~7-23】。由表可知，所有粒料出廠交付使用前，皆通過環境標準。

2. 有害事業廢棄物認定標準。針對焚化再生粒料混合料施作事業廢棄物毒性特性溶出程序（TCLP），用以確認混合料滾壓於土中不會達到危害環境的狀態，詳細比對資料見表 7-12【文獻 7-13、7-15】。由表可知，皆無重金屬超標之疑慮。

3. 土壤污染管制標準。目前混合料使用地點皆為一般用地，使用一般用地標準加以比對。施測試樣經常溫儲存約 3~6 個月，特申請環保單位取樣施作溶出試驗，詳細比對數據見表 7-13【文獻 7-23】。由表可以確認，萃取液中皆無重金屬超標問題。

4. 地下水污染管制/監測標準。目前混合料使用地點皆非水源保護區，應使用第二級標準加以比對。為了解現地混合料長時間於地表下有無重金屬溶出污染地下水疑慮，於施工現場設置水質監測井加以比對，詳細數據見表 7-14【文獻 7-14】。

表 7-11 焚化再生粒料環境標準(二級標準)比對【文獻 7-22~7-23】

管制標準(mg/l)	桃園粒料			北市粒料	新北粒料					台中粒料	高雄粒料				
鉛	0.1	ND	ND	ND	0.0048	ND	0.0028	0.0027	0.0036	ND	ND	0.012	0.0024	0.0033	0.007
鎘	0.05	ND	ND	0.015	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
鎘	0.5	ND	ND	0.08	0.008	0.016	0.013	0.017	0.013	0.006	0.09	0.019	0.015	0.036	0.024
銅	10	0.493	ND	1.93	0.027	0.049	0.043	0.051	0.051	0.015	0.983	0.111	0.066	0.175	0.239
鎘	50	N/A	N/A	N/A	0.015	0.019	0.02	0.024	0.022	0.008	0.02	0.07	0.028	0.041	0.058
鎘	1	N/A	N/A	N/A	0.0028	0.0022	ND	0.0021	0.0023	0.0022	ND	0.014	0.0036	ND	0.0032
砷	0.5	ND	ND	ND	ND	0.0044	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
汞	0.02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
戴奧辛	0.1	0.01	0.024	0.009	0.012	0.043	0.037	0.041	0.041	0.039	0.028	N/A	N/A	N/A	N/A

表 7-12 混合料有害事業廢棄物認定標準(TCLP)比對【文獻 7-13、7-15】

管制標準(mg/l)		福元公園案 現地混合料	福元公園案 現地混合料	福元公園案 混合料現地	忠富路案 現地混合料
總汞	0.2	ND	ND	ND	0.0004
總鎘	1	0.011	0.011	ND	0.085
總硒	1	ND	ND	ND	ND
六價鉻化合物	2.5	ND	ND	ND	0.02
總鉛	5	0.016	0.016	0.017	0.084
總鉻	5	0.094	0.094	ND	0.018
總砷	5	ND	ND	ND	ND
總銅	15	0.418	0.418	ND	1.97
總銀	100	0.61	0.61	1.35	2.3

表 7-13 混合料土壤污染管制標準比對【文獻 7-23】

一般用地管制標準(mg/l)	桃園紅土/桃園粒料/1：1 混合料						
砷	60	ND	ND	ND	ND	ND	ND
鎘	20	ND	ND	ND	ND	ND	ND
鉻	250	0.019	0.037	0.026	ND	0.023	ND
銅	400	0.183	0.263	0.182	0.088	0.194	ND
汞	20	ND	ND	ND	ND	ND	ND
鎳	200	0.011	ND	ND	ND	ND	ND
鉛	2000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
鋅	2000	ND	ND	ND	ND	ND	ND

表 7-14 現地地下水標準比對【文獻 7-14】

地下水污染管制二級標準(mg/l)		A20 案水質監測井			
砷	0.5	0.0024	0.0065	0.0029	0.0009
鎘	0.05	ND	0.001	ND	ND
鉻	0.5	0.003	0.004	0.004	0.002
銅	10	N/A	0.006	0.003	0.002
鉛	0.1	ND	0.006	0.005	0.009
鎳	1	0.006	0.013	0.014	0.006
鋅	50	0.026	0.055	0.042	0.014

依據上述的相關成果的說明，原本的底渣再處理程序就提供了重金屬溶出的安全管制條件，而土壤穩定的化學反應機制，更高度顯示混合料強度健結，有效提供了雙重抑制溶出的保證。檢測結果佐證在本手冊的設計與施工程序下，混合料並無重金屬直接溶出的可能性（ND），地下水質的檢測亦無需執行。

參考文獻

- 7.1 Federal Aviation Administration (FAA), “Advisory Circular”, AC No. 150/5370-10F, Washington, D.C., USA, 2011.
- 7.2 Federal Aviation Administration (FAA), “Advisory Circular”, AC No. 150/5370 10G, Washington, D.C., USA, 2014.
- 7.3 Federal Aviation Administration (FAA), “Advisory Circular”, AC No. 150/5370 10H, Washington, D.C., USA, 2018.
- 7.4 PCA, “Guide to Cement-Treated Base (CTB)”, Portland Cement Association, ILL. USA, 2006.
- 7.5 TRB - State of The Art Report 5, “Reactions, Properties, Design, and Construction”, Prepared by Lime Stabilization Committee, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1987.
- 7.6 Army TM 5-822-14, Air Force AFJMAN 32-1019, “Soil Stabilization for Pavements”, Department of The Army, The Navy, and The Air Force, Washington, D.C., USA, 1994.
- 7.7 Carpenter, S. H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume I, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1992.
- 7.8 American Association of the State Highway and Transportation Officials, “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”, AASHTO, Washington, D.C., USA, 1993.
- 7.9 Federal Highway Administration (FHWA), “Geotechnical Aspects of Pavement”, FHWA NHI-05-037, Washington, D.C., USA, 2006.

- 7.10 Chang, Dave. T. T., “Super-Stronged CTBC vs. Series/Continuous Rutting Problems of Taxiway-An Airport Project in Taiwan”, invited presentation for committee of Chemical and Mechanical Soil Stabilization AFS90, TRB 98th Annual Meeting, Washington, D.C., USA, 2019.
- 7.11 中華民國行政院公共工程委員會施工綱要規範,「第 02317 章構造物回填」, 2021 年。
- 7.12 中華民國行政院公共工程委員會施工綱要規範,「第 02331 章基地及路堤填築」, 2021 年。
- 7.13 張達德,「焚化再生粒料應用於土石方穩定及構造物回填輔導工程」, 桃園市政府工務局委託專業服務期末報告, 中原大學環控防災科技中心, 2019。
- 7.14 張達德,「焚化再生粒料應用於基地填築試驗及輔導工程」, 桃園市政府工務局委託專業服務期末報告, 中原大學環控防災科技中心, 2020。
- 7.15 張達德,「應用焚化再生粒料於道路路床改善試驗及輔導工程」, 桃園市政府工務局委託專業服務期末報告, 中原大學環控防災科技中心, 2020。
- 7.16 張達德,「焚化再生粒料穩定過濕路床提升道路鋪面品質的非破壞性檢測與評估分析」, 桃園市政府工務局委託專業服務期末報告, 中原大學環控防災科技中心, 2020。
- 7.17 張達德,「桃園市焚化再生粒料應用土壤穩定預約式成效評估專業服務」, 桃園市政府工務局委託專業服務期末報告, 中原大學環控防災科技中心, 2021。
- 7.18 Kurt, D. S, Bruinsma, J. E. Wade, M. J., Chatti, K., Vandenbossche, J. M. and Yu, H. T. “Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report”, FHWA, Washington, D.C., USA, 2010.
- 7.19 American Society for Testing and Materials International, “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device (D 4694-96)”. ASTM, Philadelphia, Pa. 1996.
- 7.20 American Society for Testing and Materials, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort

(56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) (D1557-12)”, ASTM, Philadelphia, Pa. 2014.

- 7.21 許晉偉。焚化再生粒料在穩定過濕土方的室內與現場快速減水成效研究，碩士論文，中原大學土木工程學系，2021。
- 7.22 王淳謹，「桃園市焚化再生粒料於土方穩定應用之現地示範工程優化研究及施工規範草案編修」，中興工程顧問股份有限公司委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2020。
- 7.23 張達德，「焚化再生粒料穩定過濕土方創新去化成效的全國共通性調查與評估計畫」，桃園市政府環境保護局委託專業服務期末報告，中原大學環控防災科技中心，2022。

第八章 鋪面厚度設計

8.1 前言

本手冊之鋪面厚度設計係採用美國 AASHTO 暨交通部頒布之柔性鋪面設計規範等設計方法【文獻 8.1~8.2】。旨揭設計方法涵蓋柔性鋪面新建與加鋪工程厚度設計，本章限用於新建工程之柔性鋪面厚度設計，設計者可依設計方法規定及限制條件，選擇各種鋪築材料作為鋪築結構層。

焚化再生粒料應用於鋪面工程土壤穩定之措施，擬以基層材料方式設計之，詳本章 8.5 節設計範例。引用前述文獻規範，路基土壤強度均涵蓋土壤穩定層的結構「層係數」(Layer Coefficient)，以及降低總體經濟成本之考量（容第十章詳述）。

8.2 設計考量因子

8.2.1 AASHTO 柔性鋪面厚度新建工程設計考量因子

1. 鋪面績效(Pavement Performance)。
2. 交通量分析(Traffic Analysis)。
3. 路基土壤強度(Subgrade Soil Strength)。
4. 可靠度(Reliability, R)。
5. 環境因素(Environmental Factor)。
6. 排水係數(Coefficient of Drainage, m_i)。
7. 鋪築材料。
8. 分期施工(Staged Construction)。
9. 路肩設計。

8.2.2 鋪面績效

1. 鋪面績效係以鋪面現況服務指數 (Present Serviceability Index, PSI) 為基準，初期之 PSI 以 P_o 表示，柔性鋪面暫訂定為 4.0 或 3.8；終期之 PSI 以 P_t 表示，國道、省道及四車道以上者暫訂定為 2.5 或 2.0，其他者為 1.5。
2. 鋪面績效服務度總損失值，以 ΔPSI 表示。

$$\Delta PSI = P_o - P_t \cdots \cdots \cdots \text{公式 8.1}$$

3. 分析年限

一般國道、省道及四車道（雙方向）以上者為 20 年，其他可設定為 10 年。

8.2.3 交通量分析

1. AASHTO 設計方法以單軸重 80kN (18kips) 為基準，其基數為 1。
2. 軸重當量 (Equivalent Single Axle Load, ESAL) 因素與貨車因素
 - (1) AASHTO 軸重當量因素因 P_t 、軸重、鋪面結構強度指數 (Structural Number, SN) 及軸別等不同而異，相關資料可參閱文獻 8.1 原 AASHTO 設計手冊及文獻 8.2 附錄 A。
 - (2) 當前後軸之軸重當量因素求出後，即可用公式 8.2 求出貨車因素。

$$\text{平均貨車因素} = (\sum (\text{軸數} \times \text{軸重當量因素})) / \text{車輛數量} \cdots \cdots \cdots \text{公式 8.2}$$

A. 成長因素

成長因素由年增加率及分析年限等兩種資料求得，其計算方式如公式 8.3。

$$GF = ((1+r)^n - 1) / r \cdots \cdots \cdots \text{公式 8.3}$$

式中：GF=成長因素。

r =年增加率(%)。

n =分析年限(年)。

B.初期交通量資料

- a. 各類型車輛每日雙方向之數量(不包括機車)。
- b. 各類型車輛之總重、軸數、軸重或輪重,或其他交通量調查資料內找出貨車因素。
- c. 各類型車輛之年增加率。
- d. 車道分配率(Percentage of Trucks in Design Lane, DL):列於表 8-1【文獻 8.1~8.2】。

表 8-1 車道分配率(DL)【文獻 8.1~8.2】

車道數(雙方向)	車道分配率(%)
2	50
4	42(35~50)
6	35(25~40)
8 或 8 以上	30(20~35)

- e. 設計當量軸次求法:詳公式 8.4。

$$W_{18} = D_D \times D_L \times \hat{W}_{18} \cdots \cdots \text{公式 8.4}$$

式中: W_{18} =設計當量軸次。

D_D =方向分配率(Directional Distribution Factor, D_D)。

D_L =車道分配率。

$\hat{W}_{18}$ =雙方向之設計當量軸次。

C.設計值選用

基於台灣地區交通量增加率尚不穩定,且交通量調查工作亦未全面展開,因此,部分機關及參考文獻訂定交通量標準值如下:

- a. 輕級交通量: $ESAL < 1 \times 10^5$ 。

b. 中級交通量：ESAL = $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$ 。

c. 重級交通量：ESAL > 1×10^7 。

8.2.4 路基土壤強度

1. 路基土壤強度表示方法為 M_R (Resilient Modulus, 回彈模數)，設計圖必須註明路基土壤強度之設計值。

2. M_R 試驗值求法

(1) 試驗方法：AASHTO T292。

(2) 加州載重比 (CBR) 值或路基土壤阻力 (R) 值之換算法：

AASHTO 建議採用下列公式：

A. CBR 值：

$$M_R(\text{psi}) = 1500 \times \text{CBR} \cdots \cdots \cdots \text{公式 8.5}$$

B. R 值：

$$M_R(\text{psi}) = 1155 + 555 \times R \cdots \cdots \cdots \text{公式 8.6}$$

使用公式 8.5 及公式 8.6 時，CBR 值要 < 10，R 值要 < 20。(1 psi = $6.89 \text{ kN/m}^2 = 0.07 \text{ kgf/cm}^2$)

3. 土壤穩定效果 (Soil Stabilization Effects)

鋪面設計針對路基土壤材料之設計考量有材料適合性、數量充足性，以及工程強度值等項目。除數量須藉由借方填土方式予以滿足之外，當材料具不適性或工程強度值不足時，設計工程師一般之處理原則為棄土且另覓土方處理或利用土壤穩定方式變更土壤性質及提高工程強度值以為因應之道。至於土壤穩定之效果主要有降低過濕土壤之含水量以達到可快速滾壓之目的，另一主要效果則在於可提高路基土壤之工程強度值，增加整體鋪面結構於開放使用後，可提昇交通載重量之負荷及維持良好的服務品質。

8.2.5 可靠度

1. 涵義

可靠度包括鋪面服務品質、荷重評估、分析年限、交通量及氣候等可靠之程度。

2. AASHTO 設計方法考量之可靠度有三大項目

(1) 可靠度 R (Reliability)。

(2) 標準差 S_0 (Overall Standard Deviation)。

3. 可靠度 (R) 基準

(1) R 與道路類別關係列於表 8-2 內【文獻 8.1~8.2】。

表 8-2 AASHTO 建議 R 值 (%)【文獻 8.1~8.2】

功能類別	道路類別	
	市區道路	郊外道路
高速公路、國道	85~99.9	80~99.9
主要幹道	80~99	75~95
匯集道路	80~95	75~95
社區道路	50~80	50~80

(2) Z_r

求鋪面結構強度值 (Structural Number) SN 值 (詳 8.2.8 節及 8.4 節) 時，須以表 8-3 中 R 與常態標準偏差 (Normal Standard Deviation, Z_r) 關係表求出 Z_r 值。

表 8-3 AASHTO R 與 Z_r 關係查核表
【文獻 8.1~8.2】

R (%)	Z_r	R (%)	Z_r
50	0	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
75	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

4. 標準差 (S_0)

標準差代表當地狀況，以預估績效及交通量因子等混合因

素為主，AASHTO 建議柔性鋪面使用 0.40~0.50。

8.2.6 環境因素

環境因素係以冰凍、排水及膨脹問題為主。由於台灣地區除山區外沒有冰凍現象，同時，當土壤塑性指數值小於 30 且填方厚度小於 60cm 時，不須考量膨脹因素，因此，台灣地區之鋪面在環境因素方面，一般僅考量溫度及自然含水量之變化，如果必須面對冰凍狀況時，則應另行考量。

8.2.7 排水係數

1. AASHTO 設計方法決定排水係數 m_i 之原則列於表 8-4 【文獻 8.1~8.2】。
2. 路基為路堤者，其值應在 1.00 或 1.00 以上。
3. 挖方路段且排水不良時，其值應取 1.00 以下。

表 8-4 柔性鋪面基底層級配料排水係數 m_i 查核表
【文獻 8.1~8.2】

水排除 時間	排水品質	鋪面材料接近飽和程度之時間百分率			
		<1%	1%~5%	5%~25%	>25%
2 小時	優良	1.40~1.35	1.35~1.30	1.30~1.20	1.20
1 天	良好	1.35~1.25	1.25~1.15	1.15~1.00	1.00
1 週	尚可	1.25~1.15	1.15~1.05	1.00~0.80	0.80
1 個月	較差	1.15~1.05	1.05~0.80	0.80~0.60	0.60
無法排除	極差	1.05~0.95	0.95~0.75	0.75~0.40	0.40

8.2.8 鋪築材料

1. 鋪築結構厚度求法

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i \cdots \cdots \text{公式 8.7}$$

式中：SN = 鋪面結構強度值（Structural Number）。

a_i = 各層鋪築材料強度係數。

D_i = 各層鋪築厚度值。

2. 瀝青混凝土面層， a_1 值

(1) a_1 求法

- A. 由圖 8-1 求之，依據瀝青混凝土回彈模數 (E_{AC}) 求得。
- B. 由公式求之， a_1 係數公式詳文獻 8.1~8.2。

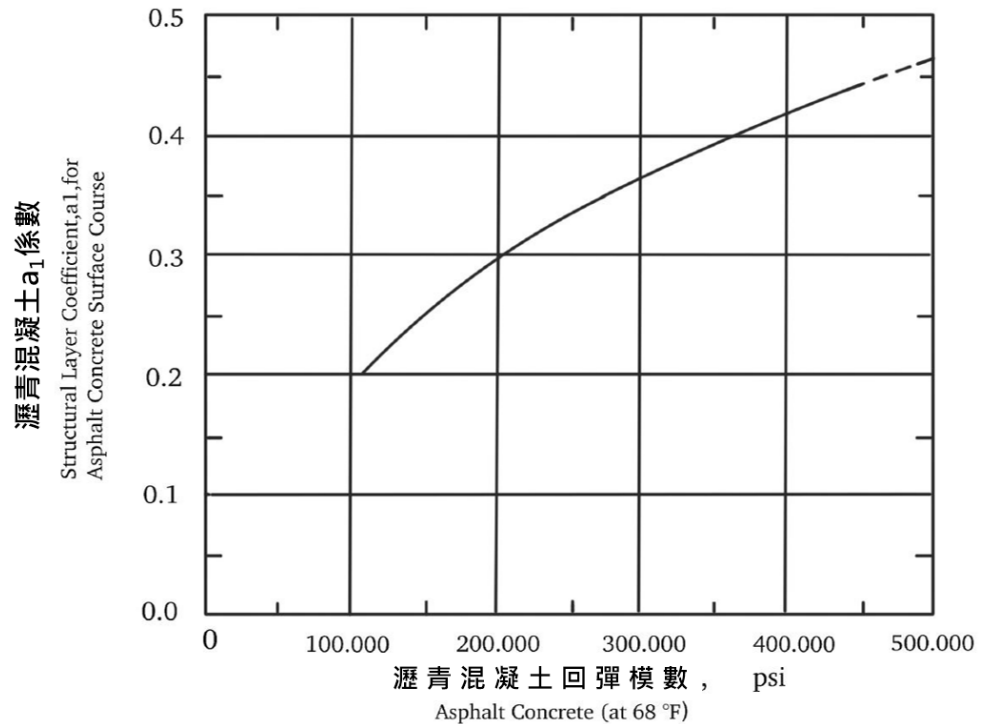


圖 8-1 AASHTO 求瀝青混凝土 a_1 係數【文獻 8.1~8.2】

(2) 瀝青混凝土最小厚度

瀝青混凝土抵抗張力應變破壞所須之最小厚度，由下列兩種方式所求得較大者為基準，以決定其厚度值。

- A. 基於交通量關係所須之厚度值列於表 8-5【文獻 8.1~8.2】。

表 8-5 基底層級配料上瀝青混凝土最小厚度值
【文獻 8.1~8.2】

18 kips ESAL	瀝青混凝土最小厚度值 (cm)
$< 10^4$	7.5
$10^4 \sim 10^6$	10.0
$> 10^6$	12.5

B. 基於基底層鋪築材料所需之面層厚度值。

$$D'_1 > \frac{SN_1}{a_1} \dots \dots \dots \text{公式 8.8}$$

式中：D'₁ = 瀝青混凝土最小厚度值。

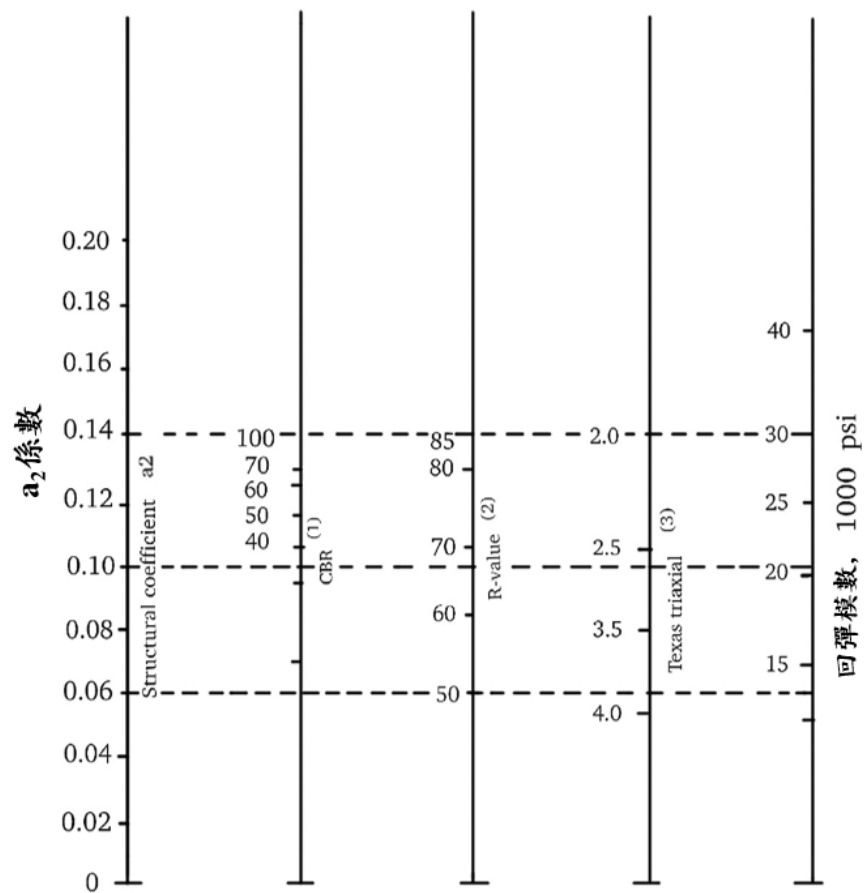
SN₁ = 由基底層 a₂、a₃、M_R、ESAL、S_o 及 ΔPSI 等資料求得瀝青混凝土之結構強度值。

3. 底層碎石級配料 a₂ 值

(1) 由圖 8-2 求之。

底層碎石級配料最小厚度

底層碎石級配料最小厚度，依據 AASHTO 設計方法規定，頂層碎石級配料之最小厚度為 15cm。



- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming.
- (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas.
- (4) Scale derived on NCHRP project (3).

圖 8-2 AASHTO 求底層碎石級配料 a₂ 係數【文獻 8.1~8.2】

(2) 由公式求之。

a_2 係數公式詳【文獻 8.1~8.2】。

4. 基層礫石級配料

(1) 由公式求之。

a_3 係數公式詳【文獻 8.1~8.2】。

(2) 由圖 8-3 求之。

A. 基層礫石級配料之選用性

在實務上，本層結構層厚度有下列兩種選用性：

a. 依公式 8.7 決定 D_3 厚度值。

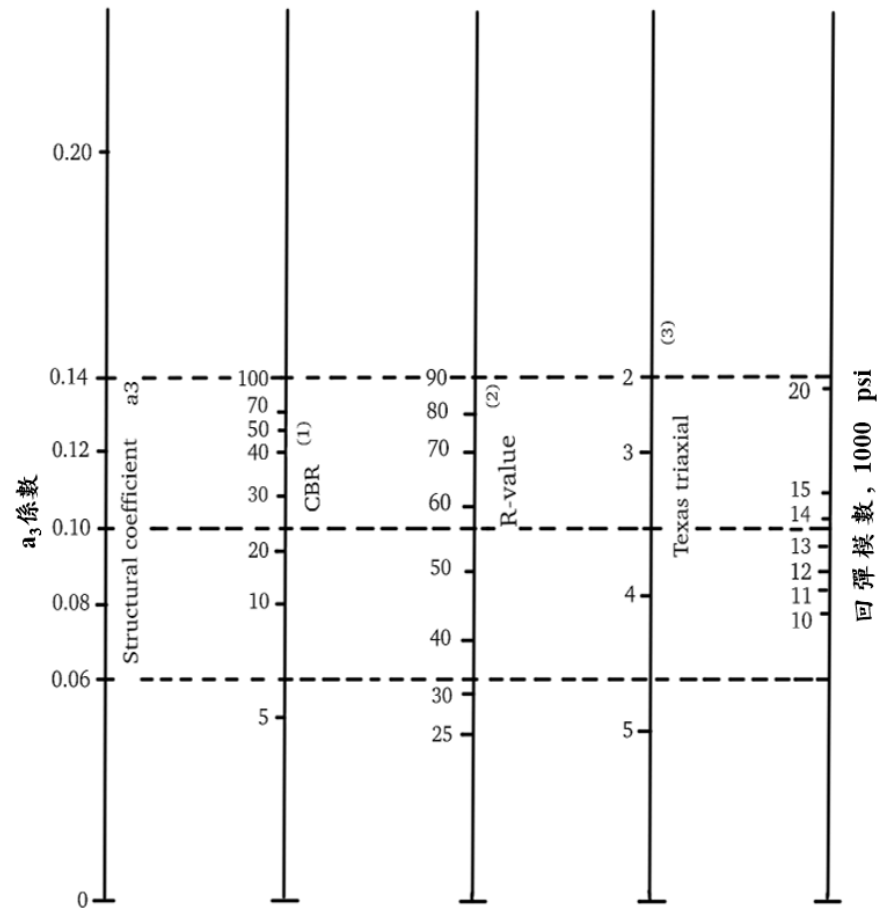
b. 免用基層厚度，將結構強度值納入底層厚度 D_2 內。

5. 水泥處理底層級配料

a_2 係數值由圖 8-4 求之。

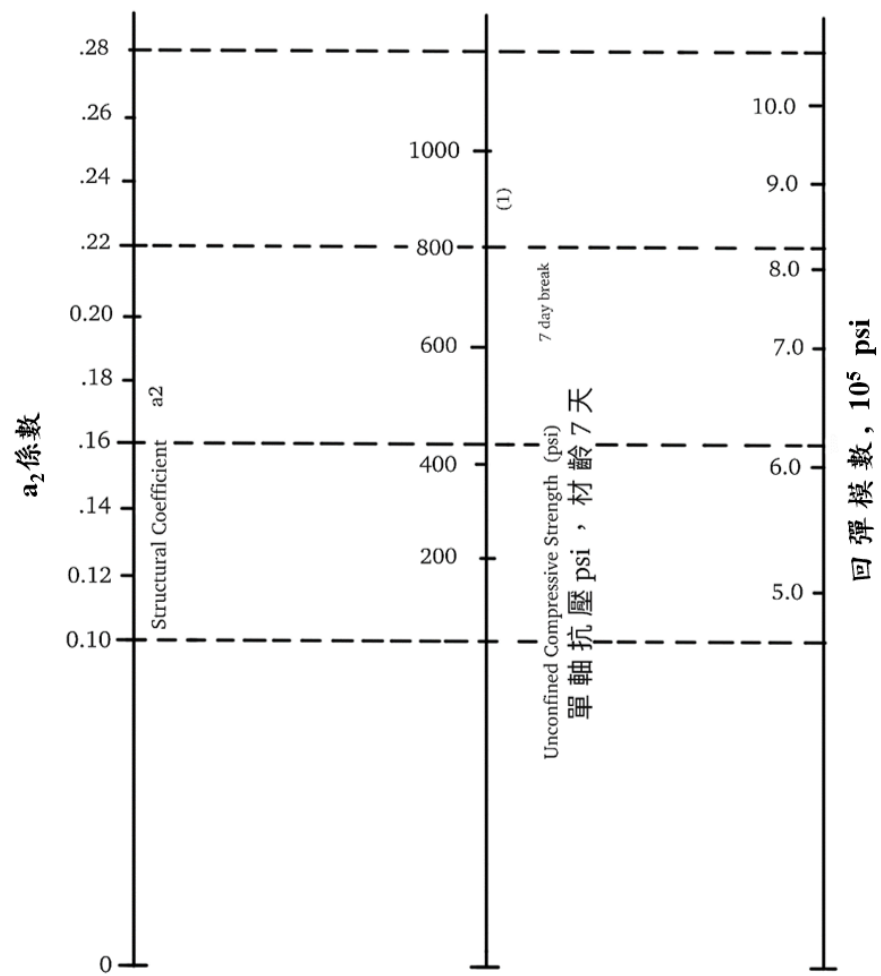
6. 瀝青處理底層

a_2 係數值由圖 8-5 求之。



- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
 (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming.
 (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas.
 (4) Scale derived on NCHRP project (3).

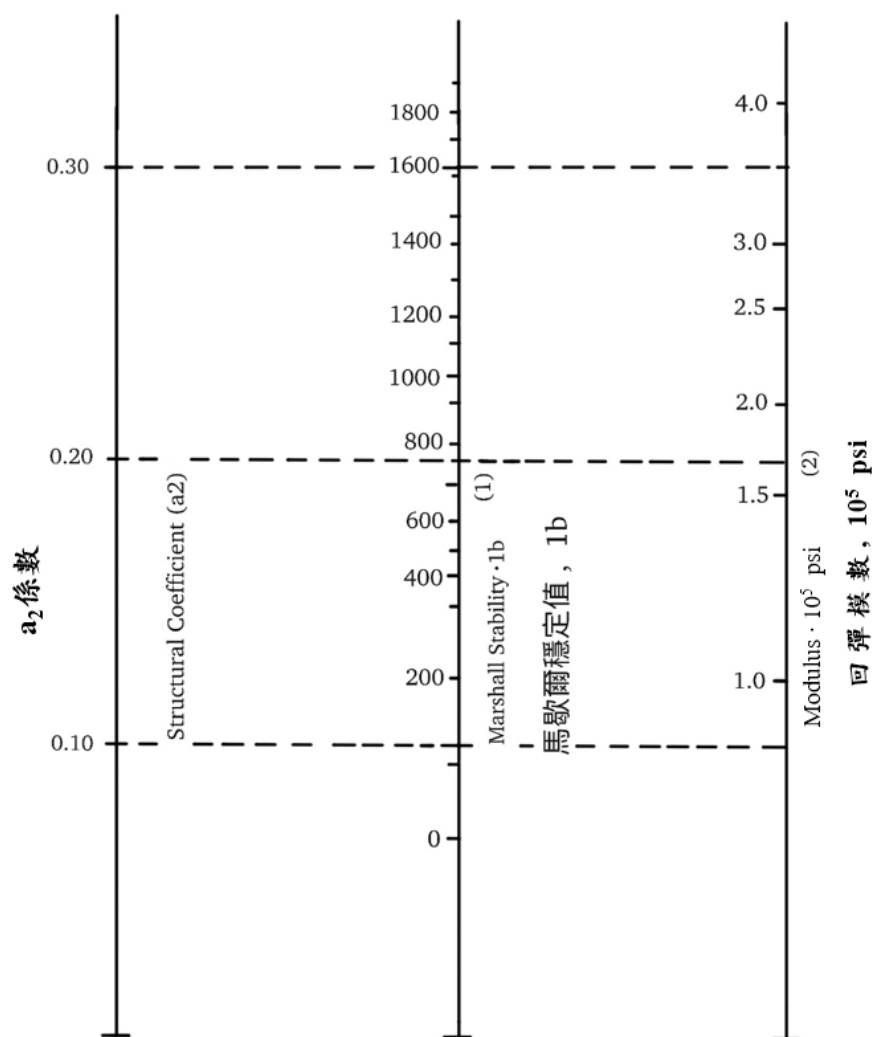
圖 8-3 AASHTO 求基層級配料 a_3 係數【文獻 8.1~8.2】



(1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois, Louisiana and Texas.

(2) Scale derived on NCHRP project.

圖 8-4 AASHTO 求水泥處理底層 a_2 係數【文獻 8.1~8.2】



(1) Scale derived by correlation obtained from Illinois.

(2) Scale derived on NCHRP project

圖 8-5 AASHTO 求瀝青處理底層 a_2 係數【文獻 8.1~8.2】

7. 石灰處理底層

依照【文獻 8.3 與文獻 8.4】規定， a_2 係數=0.15~0.39。

8. 石灰處理基礎

(1) 石灰處理黏土夾礫石

依照【文獻 8.3 與文獻 8.4】規定， a_3 係數=0.14~0.18。

(2) 石灰處理土壤

依照【文獻 8.3 與文獻 8.4】規定， a_3 係數=0.11。

9. 石灰飛灰處理底層

依照【文獻 8.3 與文獻 8.4】規定， a_2 係數=0.25~0.30。

8.2.9 分期施工

1. 交通量分析

依照 8.2.3 節方法分析求得。

2. 分期施工與可靠度關係

$$R_{\text{stage}} = (R_{\text{overall}})^{\frac{1}{n}} \dots \dots \dots \text{公式 8.9}$$

式中：n = 分期之期數。

8.2.10 路肩設計

1. 交通量分析

以主車道之 2% 為基準。

2. 鋪築結構厚度

鋪築結構厚度必須與主車道相同，惟面層厚度可視狀況調整之（維持路基土壤頂面高程之一致性）。

8.3 土壤穩定層設計考量

針對路基土壤，鋪面設計工程師應有下列之基本考量項目：

1. 安全性

- (1) 土壤工程強度值應符合設計強度值（含）以上。
- (2) 土壤材質應為適用材料。
- (3) 當土壤材質不適用時（含強度值不符需求者），應考量借、棄土或以土壤穩定方式予以改善之。

2. 施工性

- (1) 訂定適當之施工方法予以翻鬆、攪拌及滾壓。

- (2) 當土壤含水量過高時（過濕土壤），應考量曝曬或土壤穩定方式予以改善之。

3. 經濟性

在眾多工法中，應考量最經濟且成效最佳又能快速完工之方式處理。設計工程師若採用本手冊建議之土壤穩定處理方式時，其設計考量之基本項目臚列如下：

- (1) 經土壤穩定處理後，可大幅提高工程強度值，惟須特別注意土壤穩定處理仍應有上限值，不能產生超級強度層之現象。
- (2) 在施工前應進行配比設計或以試拌方式決定穩定性添加劑之最佳用量及土壤最佳之施工含水量並檢測穩定性添加劑可改善過濕土壤之成效。
- (3) 土壤與穩定性添加劑現場拌和應配合現場翻鬆、混拌及滾壓夯實作業，且每層滾壓厚度以 25~30cm 為宜。
- (4) 滾壓時之施工機具重量以 5~8 噸為宜，避免滾壓時即產生裂縫。
- (5) 採取廠拌混合料時，應掌握運輸及施工時間，勿因延宕作業時間而降低混合料之品質。

8.4 設計計算公式及圖表

1. AASHTO 設計公式

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r \times S_o \times 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.2$$

$$+ \frac{\log_{10}[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10} M_R - 8.07$$

.....公式 8.10

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \dots \dots \dots \text{公式 8.11}$$

式中：W₁₈ = 設計當量軸次（18kips ESAL）。

Z_r = 常態標準偏差。

S_o = 標準差。

$\Delta PSI = P_o - P_t$ 。

M_R = 路基土壤強度, psi。

SN = 鋪面結構強度指數。

a_1 、 a_2 、 a_3 = 面層、底層及基層等材料強度係數值。

D_1 、 D_2 、 D_3 = 面層、底層及基層等厚度值 (inch)。

(1 inch=2.54cm)

m_2 、 m_3 = 底層及基層排水係數

2. 設計查核圖

詳圖 8-6。

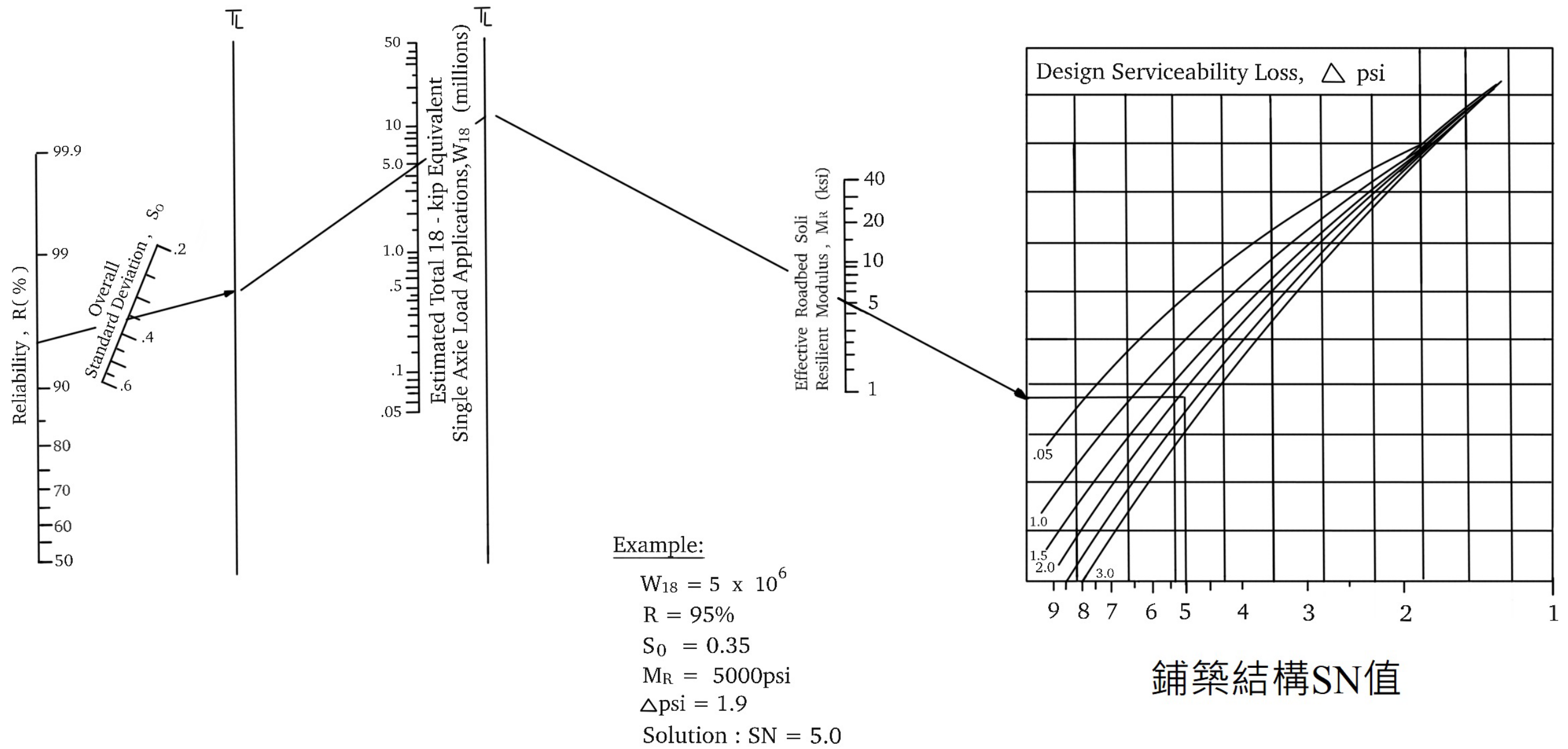


圖 8-6 AASHTO 求鋪面結構強度(SN)計算圖【文獻 8.1~8.2】

8.5 鋪面厚度設計範例

1. 已知資料：

有一都會區快速道路雙向四車道，交通量分析年限 20 年，設計軸重當量 (18kips ESAL) = 3×10^6 (詳文獻 8.2；列如表 8-6)，路基土壤有效 M_R 強度值 $\geq 4,500\text{psi}$ (CBR $\geq 3\%$)，底層採用碎石級配料之強度 $M_R = 29,000\text{psi}$ (CBR $\geq 80\%$)，基層採用焚化再生粒料摻石灰穩定之強度 $M_R \geq 18,000\text{psi}$ (CBR $\geq 50\%$)， $R=90\%$ ， $S_0=0.4$ ，請求出鋪面鋪築結構可為如何？

表 8-6 AI IS-181 交通量級別表【文獻 8.2】

交通量 級別	交通量分析		市街或公路類別
	設計當 量軸次	重型貨車；輛	
1	5×10^3	$\leq 7,000$	● 停車場、住宅道路 ● 輕級交通量住宅街道 ● 輕級交通量農路
2	10^4	7,000~15,000	● 住宅區街道 ● 鄉村農路及住宅區道路
3	10^5	70,000~150,000	● 市區次要集散街道 ● 鄉村次要集散街道
4	10^6	700,000~1,500,000	● 市區次要幹道及輕型工業區道路 ● 鄉村主要集散場及次要公路幹道
5	3×10^6	2,000,000~4,500,000	● 市區高速公路、快速公路及其他主要公路幹道 ● 鄉村州際公路及其他主要公路幹道
6	10^7	7,000,000~15,000,000	● 市區州際公路 ● 工業區道路

2. 解：

(1) ΔPSI ：

因交通分析年限=20 年，且為四車道，故可假設 $P_0=4.0$ 及 $P_t=2.5$ 。
 $\Delta\text{PSI}=P_0 - P_t=4.0-2.5=1.5$ 。

(2) 求 SN：

將 $M_R \geq 4,500\text{psi}$ 、 $18\text{kips ESAL} = 3 \times 10^6$ 、 $S_0 = 0.4$ 、 $Z_r = -1.282$
 (因 $R=90\%$ ，由表 8-3 得之)及 $\Delta\text{PSI}=1.5$ 等資料代入公式 8.10
 或圖 8-6，可求得：

$$\text{SN}=5.02$$

(3) 求 SN_1 (面層需要之結構強度值)：

- A. 假設底層碎石級配料之 $CBR=80\%$ 或 $M_R=29,000\text{psi}$
- B. 將 $M_R=29,000\text{psi}$ 、 $ESAL=3 \times 10^6$ 、 $Z_r=-1.282$ 、 $\Delta PSI=1.5$ 、 $S_0=0.4$ 等代入公式 8.10 或圖 8-6，可求得：

$$SN_1=2.43$$

(4) 求 SN_1^* (面層設計之結構強度值)：

- A. 假設面層瀝青混凝土回彈模數 $|E_{AC}|=300,000\text{psi}$ 。
- B. 從圖 8-1 可求出 $a_1=0.36$ 。
- C. 求 D_1 ：

若採用 6.8inch (18cm)，可得 $SN_1^*=D_1 \times 0.36 = 6.8 \times 0.36 = 2.45 \geq 2.43$ ，OK

(5) 求 SN_2 ：

- A. 假設基層焚化再生粒料摻石灰穩定之 $CBR=50\%$ 或 $M_R=18,000\text{psi}$ ，然後以 $M_R=18,000\text{psi}$ 及 $ESAL=3 \times 10^6$ 、 $\Delta PSI=1.5$ 、 $S_0=0.4$ 、 $Z_r=-1.282$ 等代入公式 8.10 或圖 8-6，可求得：

$$SN_2=2.95$$

- B. 求 D_2 ：

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2} = \frac{2.95 - 2.45}{0.14} = 3.57\text{inch} = 9.1\text{cm}$$

D_2 使用最小厚度 15cm。

(a_2 由圖 8-2 求得為 0.14)

- C. 求 SN_2^* 、 D_2 及 m_2 ：

假設 D_2 使用 15cm， m_2 因路基為路堤，由表 8-4 可求得 $m_2=1.0$ 。

$$SN_2^* = D_2 \times a_2 \times m_2 = \frac{15}{2.54} \times 0.14 \times 1.0 = 0.83$$

$$SN_2 = SN_1^* + SN_2^* = 2.45 + 0.83 = 3.28 \geq 2.95, \text{ OK}$$

D. 求 D_3 ：

$$D_3 \geq \frac{SN - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3} = \frac{5.02 - (2.45 + 0.83)}{0.13 \times 1.0} = 13.4 \text{ inch} = 34 \text{ cm}$$

(a_3 由圖 8-3、文獻 8.5 及文獻 8.6 求得為 0.13; m_3 同 m_2 ，由表 8-4 求得)

D_3 使用 34cm。

(6) 鋪築結構厚度

A. 瀝青混凝土：18cm。

B. 底層碎石級配料：15cm。

C. 基層採用焚化再生粒料摻石灰穩定：34cm。

D. 合計 67cm。

$$3. \text{ 校核：} SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 = \frac{18}{2.54} \times 0.36 + 0.14 \times 1.0 \times \frac{15}{2.54} + 0.13 \times 1.0 \times \frac{34}{2.54} = 5.12 \geq 5.02, \text{ OK}$$

參考文獻

8.1 AASHTO, “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”, 1993.

8.2 中華民國交通部頒布，「柔性鋪面設計規範」，2002。

8.3 Terrel, R.D., Epps, J.A, Barenberg, Mitchell, J.K. and Thompson, M.R, “Soil Stabilization in Pavement Structures. A User’s Manual, Volume 1, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1979.

8.4 Carpenter, S.H., Croveti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, “Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume I, Pavement Design and Construction Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1992.

8.5 張達德，「焚化再生粒料穩定過濕路床提升道路鋪面品質的非破壞性

檢測與評估分析」，桃園市政府工務局服務計劃，2020。

- 8.6 張達德，「桃園市焚化再生粒料應用土壤穩定預約式成效評估專業服務」，桃園市政府工務局服務計劃，2021。

第九章 成本單價分析與循環經濟效益評估

9.1 前言

我國近年積極推動「再利用再生粒料循環應用於公共工程」政策，除國內許多公共工程單位廣泛使用外，為減少天然資源開採及運輸所衍生的碳排放，更加強推動在地循環。透過資源化技術轉換，將焚化再生粒料應用於土壤穩定，在符合環境友善及工程安全前提下，作為工程的替代材料，將傳統掩埋處理轉而重新導入資源利用循環，進而降低天然資源的開採，落實循環經濟及永續公共工程之願景。

本章說明焚化再生粒料應用於土壤穩定之成本單價分析與循環經濟效益評估。以實際施作個案為例，列舉焚化再生粒料應用於土壤穩定之計價項目與參考工率並介紹有關循環經濟之效益評估，作為工程經濟與環境成本效益計算之參考。

9.2 成本單價

本節內容係參考「觀音區忠富路(桃85號)彎道改善工程」試拌成果，為便利參照使用以進行單價分析，實際使用之機具、材料及人力已調整為常用之計價項目。所列項目及工率為參採該案執行成果，相關單價分析內容應審酌實際個案情形(工程需求、工址環境、施工條件/限制等)做適當調整。

9.2.1 計價項目及工率【文獻 9.1】

1. 壓路機：拌和作業使用鐵輪壓路機(三輪自走式，10~12t)，每 m^3 壓路機工作時數為 0.060 小時。
2. 傾卸車：傾卸車(總重 21~21.9t， 8m^3)，每 m^3 需傾卸車1台工作時數為 0.040 小時。
3. 挖土機：以挖土機(履帶式， $0.80\sim 0.89\text{m}^3$ ，總重 20t)進行分析，參考台北市工料分析手冊內第二篇施工機具費率分析及工作量計算。每 m^3 挖土機工作時數為 0.026 小時。
4. 農耕機：每 m^3 農耕機工作時數為 0.056 小時。
5. 大工及小工：大工，每 1m^3 需 0.013 工；小工，每 m^3 需 0.045 工。
6. 焚化再生粒料：計算每 m^3 需 0.553 t 焚化再生粒料。

7. 石灰：計算每 m^3 需 0.022 t 石灰。

8. 放樣：依施作範圍以 m^2 計價。

9.2.2 單價分析參考範例

單價分析參考範例如表 9.1 所示，本表之相關單價可參考「公共工程價格資料庫」或「營建物價」等具公信力之參考資料填列。

表 9-1 焚化再生粒料應用於土壤穩定單價分析範例【文獻 9.1】

工程名稱：		年 月 日	
項次	工程編號：	第 1 頁 共 1 頁	
壹.一.1	工作項目：焚化再生粒料應用於土壤穩定	單位： m^3	計價代碼：
	工料名稱	單位	數量 單價 複價 編碼（備註）
	農耕機（>100hp）	時	0.056 0.056 0.056 E0000010Z0001
	開挖機，履帶式， 0.80~0.89 m^3 ，總重20噸	時	0.026 0.026 0.026 E0000044180C1
	傾卸貨車，總重 21~21.9t，8 m^3	時	0.040 0.040 0.040 E000003421801
	鐵輪壓路機，三輪自走式， 10~12t	時	0.060 0.060 0.060 E000006723001
	焚化再生粒料 （現場交貨）	T	0.553 0.553 0.553 M023195A005
	石灰 （現場交貨）	T	0.022 0.022 0.022 M02319A0005
	其他技術工	工	0.013 0.013 0.013 L000005000002
	普通工	工	0.045 0.045 0.045 L000006000002
	放樣	式	1 1 1 0172540004
	零星工料，約以上項目之2.0%	式	1 1 1 W0127114004
	人工： 機具：	每 m^3 單價計	
	材料： 雜項：		

註 1：本表係依據最新版行政院公共工程委員會經費電腦估價系統格式編制

註 2：本表係依據施做每層 30cm、每 1,000 m^2 之量能作為推估基準

9.3 循環經濟效益評估

循環經濟的模式源自於「由搖籃到搖籃」的概念，英國 Ellen MacArthur Foundation 繪製了一張模式系統圖。整個系統分為「工業原料」(Technical Material) 以及「生物原料」(Biological Material) 兩個循環體系。與原有的線性經濟整合，也就是中間從最源頭開採/原料製造、零件製造、產品製造、服務與產品提供、使用消費、能源回收、最後到廢棄掩埋的一條龍的物料生命週期，如圖 9.1 所示【文獻 9.2】。針對原生材料替代後所衍生之整體效益分別以物質流及資金流等兩部分進行評估。物質流的部分將評估減少原生材料使用量、減少廢棄物產生量及 CO₂ 排放量；資金流將評估節省原生材料及廢棄物處理成本。綜合物質流及資金流評估結果，呈現循環經濟產業體系之整體效益【文獻 9.3~9.4】。後續針對個案可以依據此模式量化循環經濟之效益。

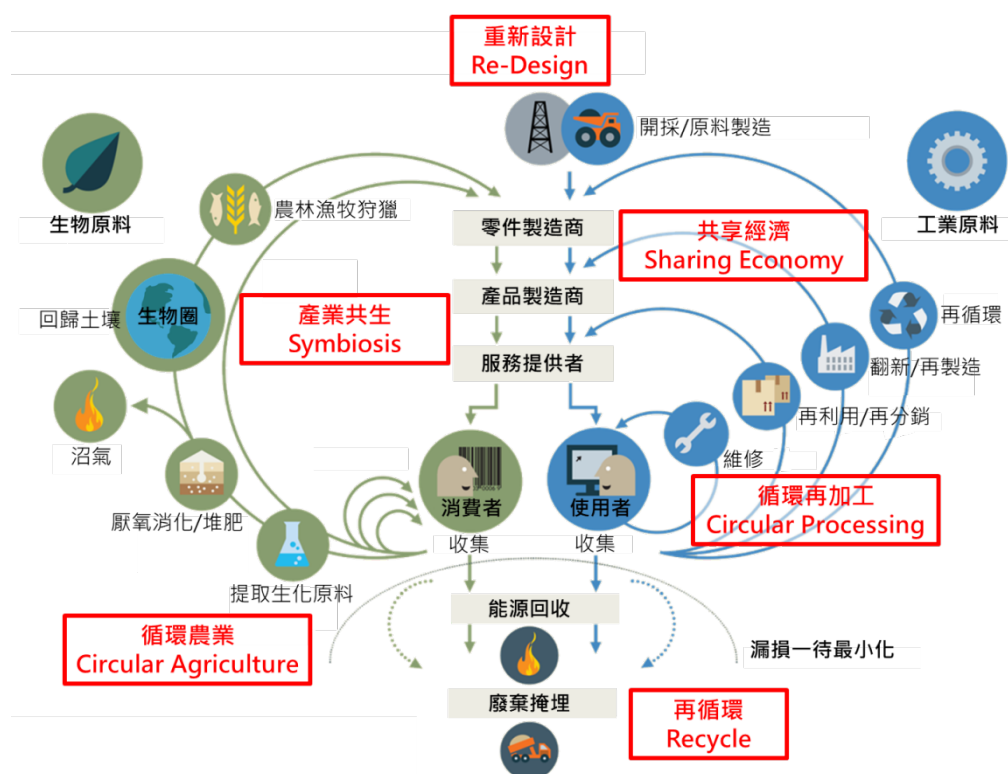


圖 9-1 循環經濟之物料流模式【文獻 9.2】

9.3.1 焚化再生粒料應用於土壤穩定之具體效益

過濕土方傳統的處理方法多為曝曬、運棄或購土置換，但考量到工期須曝曬 10 天以上，及棄、購運輸成本過高又會增加碳排放，影響整體工程進度與效益且不符節能減碳與資源永續原則。桃園市政府的產學

計畫經驗，則充分呈現了焚化再生粒料於祛化應用中的價值。根據桃園市政府就焚化再生粒料於穩定過濕土方的研究成果，其應用的確具有創新的表現與亮眼的成效且已逐步在示範工程中得到確認與肯定。綜合了這些成果，在減碳循環經濟的貢獻方面，焚化再生粒料具有關鍵性的特色【文獻 9.5】：

1. 自然含水量大於夯實最佳含水量 8% (OMC+8%) 以上之「極濕土方」可直接進行拌和再利用。
2. 碳排放減少約>30%，以桃園市 ROT 廠焚化再生粒料年產量 6 萬多噸的該項祛化應用，可減少碳排放約 1,200 噸。
3. 施工直接成本節省約>30%、工期縮短約 70%。
4. 穩定處理後強度增加約3倍，CBR值增加4~5倍。

9.3.2 循環經濟效益物質流評估指標

1. 碳排放量

為因應全球氣候變遷，降低與管理溫室氣體排放，已成為全球環境議題上的重點課題。行政院於 2022 年將「溫室氣體減量及管理法」修正為「氣候變遷因應法」，並增訂氣候變遷調適專章、氣候治理的基本方針等政策，已達我國「2050 年淨零排放」之減碳目標。如圖 9.2 所示，國內外相關規範亦針對碳排放量建構碳盤查、碳足跡、碳揭露、碳中和等制度，為有效管理碳，碳排放量以達永續公共工程之願景【文獻 9.6】。

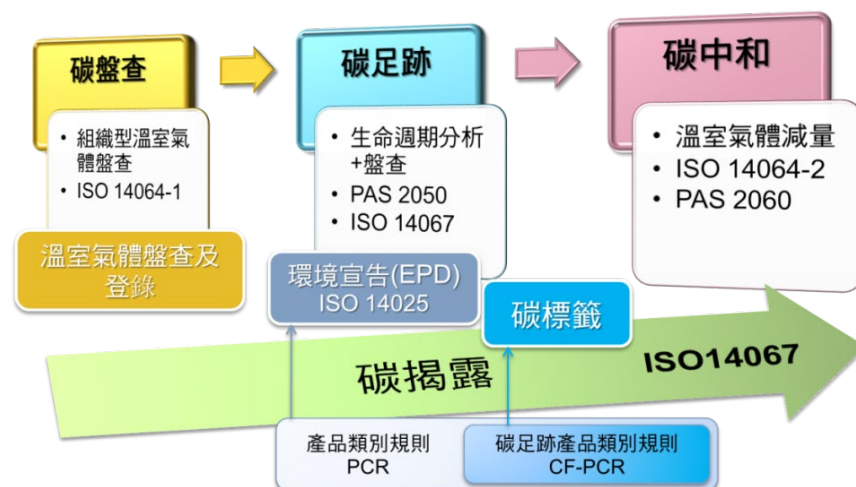


圖 9-2 碳管理進程【文獻 9.6】

2. 循環利用率

循環利用率係指循環利用量與循環利用量加上直接物質投入量之比值，可代表每單位物質投入之資源循環度。

3. 焚化及掩埋量減量率

廢棄物之焚化及掩埋處理依據不同廢棄物種類，可分為一般廢棄物及事業廢棄物，兩種指標事業廢棄物焚化掩埋量減量率將以此作為減量之衡量基準。

4. 廢棄物減量及再利用率

以焚化再生粒料穩定土壤，可改良過濕土壤工程性質，以降低運棄土方之量體及成本。

9.3.3 循環經濟效益資金流評估指標

循環經濟效益資金流評估指標可依據行政院環境保護署(2012年)《環境政策與開發計畫成本效益分析作業參考手冊》所建議之架構進行評估。項目包括：「評估範疇界定」、「基準情境與政策情境之描述及比較(圖 9.3)」、「效益及成本項目」、「成本效益評估方法」、「計算結果與分析」、「研究限制說明及後續研究建議」【文獻 9.4】。

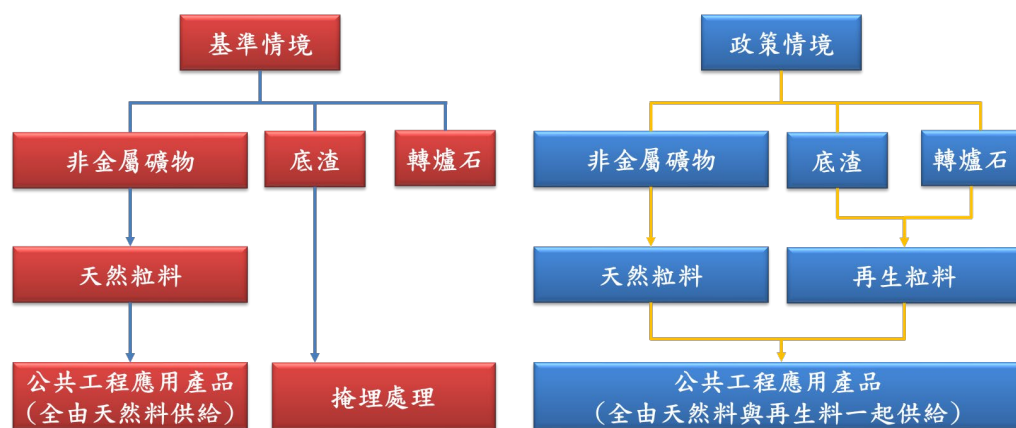


圖 9-3 基準情境與政策情境比較圖【文獻 9.4】

9.4 碳排放量計算及減碳成效評估

1. 運輸過程碳排放量計算

運輸過程碳排放量其概略計算方式為運輸距離除上運輸工具的燃料消耗，再乘上排放係數，即為某段運距之 CO₂ 排放量。而在現場將材料滿載運至工地後，回程採空車燃料消耗計算，此部份也考慮在 CO₂ 排放量內，其計算方式和上述相同，計算式如下【文獻 9.7】：

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \text{排放係數} \times (\text{運距} \div \text{運輸工具耗能}) \cdots \text{公式 9.1}$$

註 1：碳排放係數採用標準係依據行政院環保署-國家溫室氣體登錄平台「溫室氣體排放係數管理表」【文獻 9.8】

註 2：運輸工具耗能：以公里/公升 (km/l) 為單位，載重量不同噸數(t)之運輸車輛會有不同之耗能。

各種規格之運輸車輛耗能數據經整理如表 9.2 所示【文獻 9.1】。

表 9-2 各載重量規格之運輸車輛耗能數據【文獻 9.1】

載重量 (t)	滿載耗能 (km/l)	空車耗能 (km/l)
35	2.0	3.2
25	2.3	3.8
20	2.5	4.3

2. 機具運作碳排放量計算

碳排放量計算依照行政院環境保護署，縣市層級溫室氣體盤查計算指引「能源部門燃料排放量」計算方式計算【文獻 9.9】。

$$\text{排放量} = \sum(\text{排放係數} \times \text{燃料使用量}) \cdots \cdots \text{公式 9.2}$$

註 1：碳排放係數採用標準係依據行政院環保署-國家溫室氣體登錄平台「溫室氣體排放係數管理表」【文獻 9.8】

3. 碳排放量計算參考範例【文獻 9.1】

本節內容係參考「觀音區忠富路（桃 85 號）彎道改善工程」試拌成果，於該案土方回填作業過程中使用挖土機、壓路機、傾卸車等機具，若應用焚化再生粒料改良土方，則另需考量焚化再生粒料運輸及農耕機所產生的碳排放；若不採土方改良方式，則另需考量土方運棄、購土過程所產生的碳排放。所列作業內容為參採該案執行成果，相關碳排放量計算項目應審酌實際個案情形(施工流程、作業機具、工址環境、施作量體等)做適當調整。

碳排放量計算過程如下：

(1) 焚化再生粒料運輸過程碳排放量計算：

排放係數：土木工程所運用之運輸車輛主要以柴油為燃料，依「溫室氣體排放係數管理表」公告之移動源柴油排放係數為 2.606 (kgCO₂/l)。

進場次數：兩層拌和共進 12 車次。

運送焚化再生粒料車輛：以規格 35t 做為計算方式。

運距：17km

參考表 9.2，CO₂ 排放量計算式如下：

CO₂ 排放量 = 排放係數 × 活動數據 = 排放係數 [(運距 ÷ 滿載耗能) × 進場數 + (運距 ÷ 空車耗能) × 回程數] = 2.606 [(17 ÷ 2) × 12 + (17 ÷ 3.2) × 12] = 431.94 (kgCO₂)

(2) 機具運作碳排放量計算：

A. 農耕機碳排放計算

農耕機油耗計算：一般柴油引擎的耗油量是每匹馬力每小時耗柴油約 0.04 gal 或約 0.19 l。此次拌和作業使用兩種農耕機。大型農耕機型號為 John Deere 6410，其穩定馬力輸出為 105 匹，小型農耕機型號為 Kubota GL418 其穩定馬力輸出為 42 匹。依據柴油引擎耗油量與穩定輸出馬力計算，估算 Kubota GL418 油耗為 7.98 l/hr、John Deere 6410 油耗為 19.95 l/hr。小型農耕機拌和作業時間為 14 小時，大型農耕機拌和作業時間為 7 小時。綜合以上數據計算，可求得拌和作業中農耕機總耗油量為 251.37 l。CO₂

排放量計算式如下： CO_2 排放量＝排放係數×活動數據（工作時間×每小時耗油）＝ $2.606(251.37)=655.07(\text{kgCO}_2)$

B. 挖土機碳排放量計算

此次拌和作業使用兩種挖土機 PC-120 及 PC-200，兩種挖土機主要為柴油引擎，柴油排放係數為 $2.606(\text{kgCO}_2/\text{l})$ ，PC-120 馬力為 90 匹估算 PC-120 油耗為 17.1 l/hr ，PC-200 馬力為 147 匹估算 PC-200 油耗為 27.93 l/hr ，每天以 8 小時計算，共 5 天，兩種挖土機各 40 小時。綜合以上數據計算，可求得拌和作業中，挖土機總耗油量為 $1,801.2 \text{ l}$ 。碳排放計算如下： CO_2 排放量＝排放係數×活動數據＝排放係數×（工作時間×每小時耗油）＝ $2.606 \times ((40 \times 17.1) + (40 \times 27.93)) = 4,693.93 (\text{kgCO}_2)$

C. 壓路機碳排放量計算

此次滾壓作業所使用之壓路機，每小時耗油量為 7.56 l ，工作時數約 20 小時（1 層滾壓為 4 小時），柴油排放係數為 $2.606(\text{kgCO}_2/\text{l})$ ，其碳排放量計算如下： CO_2 排放量＝排放係數×活動數據＝排放係數×（施工時數×每小時耗油量）＝ $2.606 \times 20 \times 7.56 = 394.03 (\text{kgCO}_2)$

D. 傾卸車碳排放量計算

現場協助運送及傾卸粒料與土方之貨車，因活動範圍皆在工區內，因此碳排放量參照機具運作算法，以工作時數及每小時耗油量為計算。現場運送及傾卸粒料與土方之貨車工作時數約 12 小時（每天以 3 小時計算，共 4 台-天）。柴油排放係數為 $2.606(\text{kgCO}_2/\text{l})$ ，每小時耗油量為 13.63 l 。其碳排放量計算如下： CO_2 排放量＝排放係數×活動數據＝排放係數×（施工時數×每小時耗油量）＝ $2.606 \times 12 \times 13.63 = 426.24 (\text{kgCO}_2)$

(3) 運棄、購土過程碳排放量計算：

A. 由觀音區運至台北港棄土之碳排放計算

進場次數：以標準值計算（滿載為 12m^3 ），運輸 354.77m^3 棄、餘土石方至台北港需進場次數為 30 次。
運距：40km

參考表 9.2，CO₂ 排放量計算式如下：

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \text{排放係數} \times \text{活動數據} = \text{排放係數} [(\text{運距} \div \text{滿載耗能}) \times \text{進場數} + (\text{運距} \div \text{空車耗能}) \times \text{回程數}] = 2.606 [(40 \div 2) \times 30 + (40 \div 3.2) \times 30] = 2,540.85 \text{ (kgCO}_2\text{)}$$

B. 購土地點運至工區之碳排放計算

進場次數：以標準值計算（滿載為 12m³），運輸 354.77m³ 之購土土方至工區需進場次數為 30 次。

運距：15km

參考表 9.2，CO₂ 排放量計算式如下：

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \text{排放係數} \times \text{活動數據} = \text{排放係數} [(\text{運距} \div \text{滿載耗能}) \times \text{進場數} + (\text{運距} \div \text{空車耗能}) \times \text{回程數}] = 2.606 [(15 \div 2) \times 30 + (15 \div 3.2) \times 30] = 952.82 \text{ (kgCO}_2\text{)}$$

4. 減碳成效評估

前項碳排放計算結果如表 9-3 所整理，可發現應用焚化再生粒料改良極濕土方，使回填作業減少 2,406.66 (kgCO₂) 碳排放量，即降低該項作業近 27% 碳排放量。

表 9-3 碳排放量成效評估表

項目	應用焚化再生粒料改良極濕土方碳排放量(kgCO ₂)	不應用焚化再生粒料碳排放量(kgCO ₂)
焚化再生粒料運輸	431.94	-
農耕機	655.07	-
棄土(運輸)	-	2,540.85
購土(運輸)	-	952.82
挖土機	4,693.93	4,693.93
壓路機	394.03	394.03
傾卸車	426.24	426.24
總計	6,601.21	9,007.87

參考文獻

- 9.1 中原大學環控防災科技中心，「應用焚化再生粒料於道路路床改善試驗及輔導工程委託專業服務案-期末成果報告」，桃園市政府工務局委託，2020。

- 9.2 財團法人中技社，「循環經濟的發展趨勢與關鍵議題」，2015。
- 9.3 陳文卿、陳靖原，「綠建材循環經濟產業鏈結推廣計畫成果報告」，內政部建築研究所業務委託，2018。
- 9.4 劉哲良、朱敏嘉、張耀民、潘姿宇，「轉爐石及焚化再生粒料公共工程應用之成本效益分析」，綠色經濟電子期刊，第5卷，2019。
- 9.5 中原大學環控防災科技中心，「焚化再生粒料應用於土壤穩定的循環經濟關鍵技術與工法的研究 -期末成果報告書」，亞新工程顧問股份有限公司委託，2021。
- 9.6 陳一昌、許書耕、胡智超、許珮蓓、黃榮堯、曠永銓、黃琬淇、周武雄（2012），「交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究」，交通部運輸研究所委託，2012。
- 9.7 行政院農業委員會水土保持局，「公共工程碳排放量試辦計畫-牛欄山上游野溪整治工程碳排放量估算及盤查成果報告」，2014。
- 9.8 行政院環境保護署，國家溫室氣體登錄平台「溫室氣體排放係數管理表」，2018。
- 9.9 行政院環境保護署，「縣市層級溫室氣體盤查計算指引」，2011。

第十章 設計與施工範例

10.1 前言

焚化再生粒料對於過濕黏土的穩定具有良好成效，本手冊前述各章針對焚化再生粒料的特性、用量與配比設計、施工步驟與機具，以及施工品質驗收與特殊考量等細節均已詳加說明。本章針對焚化再生粒料穩定過濕土方的設計與施工，特以過濕（或極濕）土壤及焚化再生粒料各三組的含水量，作為配比設計的依據參數，綜合彙整並配合範例予以說明。

10.2 工程背景介紹

某一政府的區段徵收計畫中擬新建雙向四車道都會區快速道路，此道路將通過多處廢田（水田）。面對廢田的過濕土壤條件，統包商決定採用焚化再生粒料穩定過濕土方技術，加速工程的施作與品質保證。

10.2.1 鋪面設計斷面

同第 8.5 節範例，其設計斷面如圖 10-1 所示：

1. 瀝青混凝土厚度 18cm
2. 底層碎石級配料厚度 15cm
3. 基層焚化再生粒料穩定現地過濕土方厚度 34cm
4. 合計 67cm

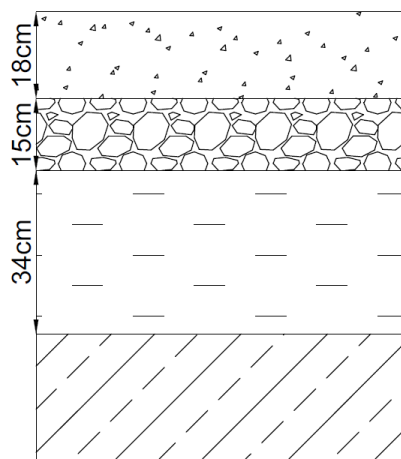


圖 10-1 鋪面設計斷面

10.2.2 土壤與焚化再生粒料含水狀況

1. 原地面下 2.0m 厚為桃園紅土層，下方為卵礫石堆積層，地下水位於原地面下 1.5m。
2. 紅土的改良夯實試驗所得最佳含水量為 17.5%， $\gamma_{d,max}=1.75 \text{ t/m}^3$ 。依據定義：過濕土壤條件為（ $OMC+4\%\sim 8\%$ ），極濕條件為（ $w\%>OMC+8\%$ ）。經計算分別得知過濕土壤含水量為 21.5%~25.5%，以及極濕含水量為 $>25.5\%$ 。
3. 假設現地土壤含水量為 25%、28%與 32%三種狀況；而焚化再生粒料的含水量也考量三種狀況，分別為 10%、15%以及 20%（ $>20\%$ 者，水分容易因泌水降至 $<20\%$ ）。
4. 現地含水狀況的調查，可以挖土機開挖試坑方式取樣（如圖 10-2 所示），無須執行鑽探（必須另行委外發包，增加成本與時間，且樣品數量及尺寸有限，代表性不足）。將上述已知條件彙整如表 10-1 所示，以方便各對應拌和組合。

表 10-1 土壤與粒料含水量交叉混拌組合

種類	土壤			焚化再生粒料		
編號	A1	A2	A3	B1	B2	B3
w%	25%(過濕)	28%(極濕)	32%(極濕)	10%	15%	20%



圖 10-2 試坑取樣的現地狀況

10.3 配比設計步驟

1. 步驟 1

表 10-2 對應的拌和組合共 9 組，若採 1：1 配比混合，其混合料的含水量為土壤及焚化再生粒料兩者含水量相加除以 2，列如表 10-2 所示。

表 10-2 9 組混合料含水量

	組合								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1：1 配比混合料 含水量%	A1/B1	A2/B1	A3/B1	A1/B2	A2/B2	A3/B2	A1/B3	A2/B3	A3/B3
土壤+粒料 (含水量)/2	17.5	19.0	21.0	19.0	21.5	23.5	22.5	24.0	26.0

註：1：1 配比的改良夯實試驗 $OMC=18.5\%$ ， $\gamma_{d,max}=1.72\text{ t/m}^3$ 。由表 10-2 得知，以混合料含水量為決定配合方式十分簡便；同時依各組合的含水量決定乾側或濕側（Dry-side, Wet-side of OMC）狀態。

2. 步驟 2 決定乾側或濕側狀態

將表 10-2 各依施工條件的控制以決定乾/濕側，其考量因素與條件說明如下：

- (1) 表 10-2 的各組合混合料的含水量是直接依配比權重計算，並未納入快速減水的效果。
- (2) 土壤與焚化再生粒料經農耕機拌和後（以 3~4hr 計），再經隔夜養治可減水約 4%。以第 3 組為例，混合料 1：1 的配比其含水量為 21.0%，若經上述拌和、養治很可能降低為 17%，較 $OMC=18.5\%$ 為低，屬乾側。對穩定處理的混合料滾壓後於現地的強度發展屬「缺水」狀態，一般言之，含水量在濕側（ $OMC+2\%$ ）的「略濕」狀態，為適當的強度發展條件。
- (3) 故 1、2、3、4 組應考量拌和時稍加水，或降低配比至 0.5~0.6：1.0，本手冊建議以後者為之。以第 3 組為例，採用 0.5：1 則混合料之 $w\%$

$$= \frac{25 \times 1 + 10 \times 0.5}{1.5} = 20\%$$
，符合略濕狀態（註：因為配比降低，減水效果略降，現地滾壓時接近濕側）。
- (4) 以第 6 組為例，經拌和、隔夜養治；次日再拌和一次即可滾壓並執行工地密度檢測。
- (5) 以第 8 組為例，應於次日追加拌和半日（3~4hr）即可滾壓並執行工地密度檢測。

- (6) 以第 9 組為例，除第 8 組工序外，應考量拌和時添加 1% 石灰以加速減水。

上述各項考量總結於表 10-3 中，方便使用者清楚比對。

表 10-3 混合含水條件與配比/工序調整

	1	2	3	4	組合 5	6	7	8	9
1:1 配比混 合料含水量% (土壤+粒料)/2	17.5% 乾側	19.0% 乾側	21.0% 乾側	19.0% 乾側	21.5% OK	23.5% 略濕	22.5% OK	24.0% 略濕	26.0% 過濕
配比與工序 調整	減配比 0.5:1	減配比 0.6:1	減配比 0.7:1	減配比 0.6:1	OK	追加一 回拌和 (1hr)	OK	追加半 日拌和 (3hr)	追加半 日拌和 +1%石 灰

3. 步驟 3 工序安排與其他考量

- (1) 工地配比管控與粒料搬運方式有直接的關係，若由桃園環保局 ROT 廠送至工地進行拌和作業，則以重量計算。若由工區粒料暫置區搬運，則以每 m^3 計量較方便。不論以重量或體積計算，均考量土方與粒料鬆方的單位重約略相同，差異可不予考慮。
- (2) 工序安排均考量一台農耕機(280 馬力)，一層完成混合料厚度 30cm，工作面積 $1,000 \text{ m}^2$ 計。
- (3) 以 3 天工序為之：
 - A. 第一天上午為材料(土方與粒料)攤置，並剔除土方中 $>5\text{cm}$ 的卵礫石以免損及農耕機。由挖土機上下翻拌使材料上下勻散。第一天下午農耕機進行拌和作業，約 3~4hr，進行隔夜養治。
 - B. 第二天追加拌和的時間參見表 10-3 靈活執行，一般狀況可於下午進行滾壓。
 - C. 第三天上午工地密度取樣與夯實度驗收。
- (4) 針對極濕土壤(如 B6 土方， $w\% > 30\%$)，可考量增加半天拌和與多一次隔夜養治以達到與添加 1% 石灰同樣的減水功能。如此，則於第三天下午滾壓並執行工地密度檢測，完成夯實度驗收。
- (5) 若遇天候不佳，有 2 天~2.5 天的空檔即可完成一層 30cm 厚的填築施作。滾壓完成的工作若遇雨應鋪覆塑膠帆布，即使積水也不受到浸泡沖刷影響。

- (6) 驗收與計價的程序均依據上述工序為之，每層厚度依據施工前、後的高程量測為準。

10.4 查表法範例

10.4.1 混合料含水量控制配比用量推估法

依 5.4 節混合料含水量控制配比用量推估法計算。

組合	組合								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
組合	A1/B1	A2/B1	A3/B1	A1/B2	A2/B2	A3/B2	A1/B3	A2/B3	A3/B3
建議配比	0.6	0.6	0.6~1.0	0.6~0.8	0.6~1.2	X	X	X	X
建議配比(1%石灰)	X	X	0.6	X	0.6	0.8~1.2	0.6~1.2	0.8~1.2	1.2

10.4.2 配比用量捷徑法「1：1」

依 5.5、5.6 節配比用量捷徑法「1：1」計算。

組合	組合								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
組合	A1/B1	A2/B1	A3/B1	A1/B2	A2/B2	A3/B2	A1/B3	A2/B3	A3/B3
單層土方實方厚度	14.6cm	14.6cm	14.6cm	14.6cm	14.6cm	14.6cm	14.6cm	14.6cm	14.6cm
單層粒料實方厚度	15.4cm	15.4cm	15.4cm	15.4cm	15.4cm	15.4cm	15.4cm	15.4cm	15.4cm
石灰使用(1%)	X	X	X	X	X	V	X	V	V

10.4.3 對照表法

依 5.7 節對照表法。

組合	組合								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
組合	A1/B1	A2/B1	A3/B1	A1/B2	A2/B2	A3/B2	A1/B3	A2/B3	A3/B3
w _a % - w _{OMC} %	7.5%	10.5%	14.5%	7.5%	10.5%	14.5%	7.5%	10.5%	14.5%
單層土方實方厚度	24cm	20cm	18cm	20cm	18cm	18cm	18cm	18cm	18cm
單層粒料實方厚度	12cm	15cm	16.5cm	15cm	16.5cm	16.5cm	16.5cm	16.5cm	16.5cm
石灰使用(1%)	X	X	V	X	V	V	V	V	V

10.5 鋪面分層結構的總體經濟成本考量

本手冊於第一章中明確指出土壤穩定技術的成效目標如下：

1. 針對不適用土方或過濕土方，能以土壤穩定的手段改善土壤狀況並同時提升其工程強度。
2. 當上述目標達成時，鋪面分層結構應可相對應的適度節省各層材料，完善總體經濟成本降低的考量。

3. 依據焚化再生粒料穩定過濕土壤的成效達標後，基於工程強度提升之效益，可進一步透過鋪面結構強度指數（Structural Number, SN）值，得以靈活酌減其上層之鋪面結構厚度，且能符合適當的SN設計值。

本節將前設計範例（8.5 節），以及無基層配置的鋪面厚度系統說明於下，並予以比對提出總體經濟的成本分析。

1. 原設計範例說明

原設計範例的各層厚度所提供的 SN 值決定：

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \cdots = 5.02$$

AC 厚度 18cm，底層碎石級配厚度 15cm，基層焚化再生粒料穩定土壤 34cm，其完成的設計斷面 $SN = 5.12 > \text{所需值 } 5.02$ ，OK。

2. 考慮無基層配置的鋪面系統

考慮無基層的配置，則以原路基土壤的有效 M_R 值 $\geq 4500 \text{ psi}$ ($CBR \geq 3\%$) 為設計基礎。

$$SN = 5.02, \text{ 求 } SN_1$$

(1) 同樣條件下求 SN_1 ，得 $SN_1 = 2.43$ ，同前結果 $SN_1^* = 2.45$ （以瀝青混凝土 18cm 計）

(2) 求 SN_2 及 D_2

$$D_2 = SN - SN_1^* = \frac{5.02 - 2.45}{0.14} = 18.4 \text{ inch} = 47\text{cm}, \text{ (} a_2 \text{ 同前取 } 0.14 \text{)}$$

(3) 檢核：實際 $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 = \frac{18}{2.54} \times 0.36 + \frac{47}{2.54} \times 0.14 = 2.55 + 2.59 = 5.14 > 5.02$ ，OK

3. 總體經濟成本分析

上述 1、2 兩點很明確的提供了焚化再生粒料穩定過濕土方的基層配置，可有效去化焚化再生粒料，善盡資源再利用的社會責任。在同等鋪面系統總體結構強度考量下，可節省底層碎石級配厚度 32cm（由 47cm 厚降為 15cm 厚），此乃由焚化再生粒料穩定過濕土方的總體經濟成本節省所提供的貢獻，可謂係一舉數得之舉措，這是必要在此節中加以強調的特殊優異效益。

附件 A

【垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式】

行政院環境保護署公告

中華民國111年5月19日

環署循字第1111056756號

主 旨：修正「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」部分公告事項及第五項附表二，並自即日生效。

依 據：廢棄物清理法第十四條第二項。

公告事項：

一、第二項修正為：本公告用詞，定義如下：

- (一) 再利用機構：指取得底渣處理許可之廢棄物處理業、依促進民間參與公共建設法與主辦機關簽訂投資契約之民間機構設置之廢棄物處理設施、直轄市政府環境保護局或縣（市）政府環境保護局（以下簡稱地方環保局）。
- (二) 焚化再生粒料：指底渣經再利用處理程序後所產生者。
- (三) 公共工程：指符合下列情形之一者：
 - 1、依政府採購法、促進民間參與公共建設法辦理之工程。
 - 2、與政府聯合開發之工程。
 - 3、公用事業辦理公共基礎設施服務相關之工程。
- (四) 供料機關（構）：指提供焚化再生粒料者，包括地方環保局或其委託之再利用機構。
- (五) 使用單位：指工程單位、加工再製機構或其他運用者。
- (六) 民間工程：指公共工程以外之工程。

二、第六項修正為：焚化再生粒料用途如下，其中第一款至第九款應優先使用於公共工程：

- (一) 基地填築。
- (二) 路堤填築。
- (三) 港區填築，僅限使用於商港、工業專用港或已核定造地之工業區。
- (四) 道路級配粒料底層及基層。
- (五) 控制性低強度回填材料。
- (六) 低密度再生透水混凝土，僅限使用於道路工程。
- (七) 瀝青混凝土，僅限使用於道路工程。
- (八) 磚品。
- (九) 用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品。
- (十) 水泥生料，僅限作為水泥廠之水泥原料。

- (十一) 衛生掩埋場非與鋼材接觸用工程材料及衛生掩埋場覆土。但不得作為最終覆土。

焚化再生粒料作為前項第三款用途時，應於港區填築前，辦理實驗室試驗、現地填築試驗及依環境影響評估法相關規定辦理相關事宜，填築前後辦理相關環境監測。

三、第七項修正為：焚化再生粒料之使用地點限制規定：

- (一) 不得位於公告之飲用水水源水質保護區、飲用水取水口一定距離、水庫集水區及自來水水質水量保護區範圍內。
- (二) 不得位於目的事業主管機關公告之自然保留區、自然保護區、重要濕地、野生動物保護區及野生動物重要棲息環境範圍內。
- (三) 不得位於依都市計畫法劃定為農業區、保護區；不得位於依非都市土地使用管制規則劃定為特定農業區、一般農業區及其他使用分區內之農牧用地、林業用地、養殖用地、國土保安用地、水利用地、鹽業用地、古蹟保存用地、生態保護用地，及上述分區內暫未依法編定用地別之土地範圍內。
- (四) 不得位於依國家公園法劃定為國家公園區內，經國家公園管理機關會同有關機關認定作為前款限制使用之土地分區或編定使用之土地範圍內。
- (五) 使用於陸地時，應高於使用時現場地下水位一公尺以上。

用途為港區填築、磚品、用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品、水泥生料、衛生掩埋場非與鋼材接觸用工程材料及衛生掩埋場覆土者，不受前項規定限制。

用途為控制性低強度回填材料者，不受第一項第五款規定限制。其使用於管溝工程者，不受第一項第二款至第五款規定限制。

四、第九項修正為：使用及流向申報：

- (一) 底渣產生地之地方環保局、再利用機構及供料機關（構）應於每月十日前以網路傳輸方式申報前一個月底渣再利用情形；其申報項目，如附表三。如有變更時，應即上網申報變更內容。
- (二) 焚化再生粒料之申報規定及遞送聯單遞送方式，如附表四及附表五。
- (三) 焚化再生粒料使用前，應以書面或網路傳輸方式取得工程管制編號、清運者管制編號及使用者管制編號，供料機關（構）始得供料；另如有變更時，應即上網申報變更內容；各項管制編號申請須知如附件一。

(四) 焚化再生粒料之清運機具應裝置即時追蹤系統，且清運機具裝置之系統規格應符合應裝置即時追蹤系統之清運機具及其規定公告之規定。

(五) 供料機關（構）或加工再製機構於焚化再生粒料供應且完成使用後十五日內，應以網路傳輸方式申報妥善使用證明，並檢送書面資料，包括過磅單及使用地點於施工前、中、後照片或錄影資料，向原核准工程管制編號之地方環保局申請解除列管，副知使用地（或產生地）之地方環保局備查。

(六) 前開機關應依供料機關（構）或加工再製機構提送佐證資料進行查核作業，並依實際查核結果辦理解除列管，並將判定結果登載於網路申報系統，以通知工程單位及供料機關（構）。

五、第十項修正為：焚化再生粒料之再利用，應符合附表六之品質規範。附表六未規定者，應符合各用途相關之公共工程施工綱要規範、國家標準、國際標準或使用規定。

使用焚化再生粒料之民間工程，其供料機關（構）或加工再製機構應檢附符合前項規範、標準或使用規定之相關檢測報告，向原核准工程管制編號之地方環保局申請解除列管。

署 長 張子敬

附表二 焚化再生粒料環境標準

使用地點	用途	環境標準
屬公告事項七之限制使用地點	1.控制性低強度回填材料 (且用於管溝工程)。 (本項不得用於公告事項七第一項第一款規定之相關水質水量保護區)	第一級標準
	2.磚品。	
	3.用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品。	
非屬公告事項七之限制使用地點	1.基地填築。	第二級標準
	2.路堤填築。	
	3.港區填築。	
	4.道路級配粒料底層及基層。	
	5.控制性低強度回填材料。	
	6.低密度再生透水混凝土。	
	7.瀝青混凝土。	
	8.磚品。	
	9.用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品。	
未限制使用地點	1.水泥生料。	特定用途標準
	2.衛生掩埋場非與鋼材接觸用工程材料及衛生掩埋場覆土。但不得作為最終覆土。	
備註 1： 第一級標準 符合本級標準者，除用於本級標準規定之用途外，亦得用於第二級標準及特定用途標準規定之用途。		
檢測項目		標準值
戴奧辛總毒性當量濃度 (ng I-TEQ/g) 備註：指含 2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物等 17 種化合物之總毒性當量濃度		≤0.1
粒徑大小 (mm)		≤19
雜質		不得含有大小任二尺度 (長度、寬度、深度) 超過 20mm 之可燃物、鐵金屬、非鐵金屬，以及電池與可辨識之市售產品。
檢測方法	檢測項目	標準值
再生粒料環境用途 溶出程序 (NIEA R222)	鉛 (毫克/公升)	≤0.01
	鎘 (毫克/公升)	≤0.005
	鉻 (毫克/公升)	≤0.05
	銅 (毫克/公升)	≤1.0
	砷 (毫克/公升)	≤0.05

	汞（毫克/公升）	≤ 0.002
	鎳（毫克/公升）	≤ 0.1
	鋅（毫克/公升）	≤ 5.0
備註 2： 第二級標準 符合本級標準者，除用於本級標準規定之用途外，亦得用於特定用途標準規定之用途。		
檢測項目		標準值
戴奧辛總毒性當量濃度（ng I-TEQ/g） 備註：指含 2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物等 17 種化合物之總毒性當量濃度		≤ 0.1
粒徑大小（mm）		≤ 19
雜質		不得含有大小任二尺度（長度、寬度、深度）超過 20mm 之可燃物、鐵金屬、非鐵金屬，以及電池與可辨識之市售產品。
檢測方法	檢測項目	標準值
再生粒料環境用途 溶出程序 （NIEA R222）	鉛（毫克/公升）	≤ 0.1
	鎘（毫克/公升）	≤ 0.05
	鉻（毫克/公升）	≤ 0.5
	銅（毫克/公升）	≤ 10
	砷（毫克/公升）	≤ 0.5
	汞（毫克/公升）	≤ 0.02
	鎳（毫克/公升）	≤ 1
	鋅（毫克/公升）	≤ 50
備註 3： 特定用途標準 符合本級標準者，僅得用於本級標準規定之用途。		
檢測項目		標準值
戴奧辛總毒性當量濃度（ng I-TEQ/g） 備註：指含 2,3,7,8-氯化戴奧辛及呋喃同源物等 17 種化合物之總毒性當量濃度		≤ 0.1
粒徑大小（mm）		≤ 19
雜質		不得含有大小任二尺度（長度、寬度、深度）超過 20mm 之可燃物、鐵金屬、非鐵金屬，以及電池與可辨識之市售產品。
檢測方法	檢測項目	標準值
毒性特性溶出程序 （NIEA R201）	總鉛（毫克/公升）	≤ 4.0
	總鎘（毫克/公升）	≤ 0.8
	總鉻（毫克/公升）	≤ 4.0
	總銅（毫克/公升）	≤ 12.0

	總砷（毫克/公升）	≤ 0.40
	總汞（毫克/公升）	≤ 0.016
	總硒（毫克/公升）	≤ 0.8
	總鉍（毫克/公升）	≤ 10.0
	六價鉻(毫克/公升)	≤ 0.20

附表三、底渣再利用之申報項目

申報者	地方環保局	再利用機構 (產出)	供料機關(構) (貯存、供料、使用追蹤)
申報項目	一、底渣再利用情形： 1. 底渣產生量。 2. 從既有掩埋或暫置場址清運交付再利用機構處理量。 3. 送往掩埋數量及掩埋場址。 4. 送往暫置數量及暫置場址。 5. 受託代燒縣市回運底渣數量。 6. 送再利用機構處理量，包括經過再利用機構之地磅收受底渣數量及磅差。 二、勾稽作業結果及輔導改善情形，並建立相關紀錄。	1. 前一個月之廠內貯存未處理量。 2. 收受委託底渣處理量。 3. 底渣處理量、產生產品及衍生廢棄物，包括：焚化再生粒料、鐵金屬、非鐵金屬、衍生廢棄物及其他(如水分、磅差及耗損)。 4. 廠內累積貯存未處理量。 5. 每批焚化再生粒料之檢測結果。 6. 每批底渣經處理後之衍生廢棄物比率。 7. 送往供料機構之焚化再生粒料數量(須符合焚化再生粒料環境標準始得遞送)。	一、焚化再生粒料之貯存與供應情形： 1. 前一個月之廠內貯存數量。 2. 收受數量。 3. 供應出廠數量。 4. 受託代燒縣市回運數量。 5. 廠內累積貯存未供應數量。 6. 其他(如水分、磅差及耗損)。 二、焚化再生粒料供應後之使用情形： 1. 前一個月已供應之未完成再利用數量。 2. 供應出廠數量。 3. 仍未完成再利用數量(含本月及前月已供應出廠)。 4. 各項用途之完成再利用數量。

附表四、焚化再生粒料之申報規定及遞送聯單遞送方式（用途為「基地填築」、「路堤填築」、「港區填築」、「道路級配粒料底層及基層」、「水泥生料」、「衛生掩埋場非與鋼材接觸用工程材料及衛生掩埋場覆土」者）。

申報時機	執行者	申報規定	遞送聯單遞送方式
焚化再生粒料出廠前	供料機關(構)	於焚化再生粒料出廠前，應連線申報清運之日期時間、機具車號、用途、數量及清運、使用單位等資料。	應於完成申報作業後，列印遞送聯單一份及轉化為條碼形式之產品資訊交予清運者。
焚化再生粒料清運	清運者	1.應於清運出廠時，於遞送三聯單上載明「實際清運日期時間」、「實際清運機具車號」、「實際清運重量」等資料，經與供料機關(構)書面確認，作為其後續連線申報實際清運情形確認依據。 2.準用「應裝置即時追蹤系統之清運機具及其規定」，於供料機關(構)現場刷取遞送聯單上之「供料機關(構)」條碼及重量資訊條碼以作為連線申報確認接收焚化再生粒料情形。 3.應於焚化再生粒料清運出供料機關(構)後一日內載運至使用單位。	遞送聯單經清運者收受後，隨同焚化再生粒料運送。
焚化再生粒料收受	清運者	1.焚化再生粒料送抵使用單位，應於遞送聯單上載明使用單位之「實際送抵日期時間」、「實際收受重量」等資料，經與使用單位書面確認，作為送抵後連線申報焚化再生粒料實際收受情形及確認是否接受等資料之依據。 2.準用「應裝置即時追蹤系統之清運機具及其規定」，於使用單位現場刷取遞送聯單上之「使用單位」條碼及重量資訊條碼以作為連線申報確認收受焚化再生粒料情形。 3.未依前開申報機制辦理者，需於二十四小時內自行連線上網進行遞送聯單確認申報作業，如適逢假日得順延至次一工作日辦理。 4.使用單位得連線查詢焚化再生粒料收受情形。	1.確認完成收受焚化再生粒料後，遞送聯單由清運者於二日內送交予供料機關(構)留存。如適逢假日得順延至次一工作日簽收。 2.遞送聯單申報程序結束。

最終確認	供料機關(構)	1.應依前開清運者於遞送聯單上載明資料，於焚化再生粒料完成供應後四十八小時內，進行「連線申報實際供應、清運、收受情形」之最終修正確認作業，且應自行保存三年以供查核。 2.使用單位得連線查詢最終確認作業。	
解除列管	供料機關(構)	焚化再生粒料供應且完成使用後十五日內，供料機關(構)應以網路傳輸方式申報妥善使用證明。另並檢送書面資料，包括過磅單及使用地點於施工前中後照片或錄影資料等，報原核准工程管制編號之地方環保局審核以申請解除列管作業，並報使用地(或產生地)之地方環保局備查。	
備註：焚化再生粒料於「異地暫存」及運送至供料機關(構)，依本表申報之，欲再利用時，應依用途別分別依本表及附表五執行申報作業。			

附表五、焚化再生粒料之申報規定及遞送聯單遞送方式（用途為「控制性低強度回填材料」、「低密度再生透水混凝土」、「瀝青混凝土」、「磚品」、「用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品」者）。

申報時機	執行者	申報規定	遞送聯單遞送方式
焚化再生粒料出廠前	供料機關(構)	於焚化再生粒料出廠前，應連線申報清運之日期時間、機具車號、用途、數量及清運、使用單位等資料。	應於完成申報作業後，列印遞送聯單一份及轉化為條碼形式之產品資訊交予清運者。
焚化再生粒料清運	清運者	- 應於清運出廠時，於遞送三聯單上載明「實際清運日期時間」、「實際清運機具車號」、「實際清運重量」等資料，經與供料機關(構)書面確認，作為其後續連線申報實際清運情形確認依據。 - 準用「應裝置即時追蹤系統之清運機具及其規定」，於供料機關(構)現場刷取遞送聯單上之「供料機關(構)」條碼及重量資訊條碼以作為連線申報確認接收焚化再生粒料情形。 - 應於焚化再生粒料清運出供料機關(構)後一日內載運至使用單位。	遞送聯單經清運者收受後，隨同焚化再生粒料運送。
焚化再生粒料收受	清運者/加工再製機構	- 焚化再生粒料送抵使用單位，應於遞送聯單上載明使用單位之「實際送抵日期時間」、「實際收受重量」等資料，經與使用單位書面確認，作為送抵後連線申報焚化再生粒料實際收受情形及確認是否接受等資料之依據。 - 準用「應裝置即時追蹤系統之清運機具及其規定」，於使用單位現場刷取遞送聯單上之「使用單位」條碼及重量資訊條碼以作為連線申報確認收受焚化再生粒料情形。 - 未依前開申報機制辦理者，	- 確認完成收受焚化再生粒料後，遞送聯單由清運者於二日內送交予供料機關(構)留存。如適逢假日得順延至次一工作日簽收。 - 遞送聯單申報程序結束。

		需於二十四小時內自行連線上網進行遞送聯單確認申報作業，如適逢假日得順延至次一工作日辦理。 4. 使用單位得連線查詢焚化再生粒料收受情形。 5. 用途為「磚品」、「用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品」者，申報執行者為「加工再製機構」。	
最終確認	供料機關(構)	1. 應依前開清運者於遞送聯單上載明資料，於焚化再生粒料完成供應後四十八小時內，進行「連線申報實際供應、清運、收受情形」之最終修正確認作業，且應自行保存三年以供查核。 2. 使用單位得連線查詢最終確認作業。	
加工再製產品供應	供料機關(構)/加工再製機構	1. 加工再製產品出廠後四日內，應連線申報加工再製產品供應之日期時間、清運機具車號、用途、數量及清運、最終使用單位等資料，且於解除列管作業時，應檢附加工再製產品出貨單以供佐證。 2. 為急迫性使用，無法於事先申請工程管制編號及依前開方式辦理者，經所屬主管機關同意者，須於二十四小時內完成補正申報作業，如適逢假日得順延至次一工作日辦理。 3. 使用單位得連線查詢加工再製產品供應情形。 4. 用途為「磚品」、「用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品」者，申報執行者為「加工再製機構」。	
解除列管	供料機關(構)/加工再製機構	1. 焚化再生粒料經加工再製後之產品供應且完成使用後十五日內，應以網路傳輸方式申報妥善使用證明。另並檢	

		送書面資料，包括過磅單及使用地點於施工前中後照片或錄影資料等，報原核准工程管制編號之地方環保局審核以申請解除列管作業，並報使用地之地方環保局備查。 2. 用途為「磚品」、「用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品」者，申報執行者為「加工再製機構」。	
--	--	---	--

附件一

各項管制編號申請須知

一、工程管制編號

工程管制編號之申請，除應檢具申報用途、數量、時間及使用數量合理性、申請使用地點之使用分區及用地編定(其中「磚品」、「用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品」及「港區填築」者免檢附)等證明文件外，用途為「基地填築」、「路堤填築」、「道路級配粒料底層及基層」、「衛生掩埋場非與鋼材接觸用工程材料及衛生掩埋場覆土」者，亦應檢附工程設計書圖(或施工計畫書)，另用於民間工程者須併同檢附土地所有人或管理機關使用同意書，以書面或網路傳輸方式向下列機關申請：

- (一)用途為「基地填築」、「路堤填築」、「道路級配粒料底層及基層」、「衛生掩埋場非與鋼材接觸用工程材料及衛生掩埋場覆土」者，向使用地之直轄市政府環境保護局、縣(市)政府環境保護局申請工程管制編號，再由該等機關核發，並副知產生地之地方環保局。
- (二)用途為「控制性低強度回填材料」、「低密度再生透水混凝土」、「瀝青混凝土」、「港區填築」及「水泥生料」者，向產生地之地方環保局申請工程管制編號，再由該等機關核發，並副知使用地之地方環保局。
- (三)用途為「磚品」及「用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品」者：
 - 1. 向產生地之地方環保局申請「加工再製品」工程管制編號，供料機關(構)始得將焚化再生粒料送至加工再製機構。當加工再製品完成後，供料機關(構)得依需求提出階段性確認。待實際運用於工程時，向產生地之地方環保局申請「使用地點」工程管制編號，再由該等機關核發，並副知使用地之地方環保局。
 - 2. 加工再製機構貯存量超出前三個月之累積供料機關(構)出貨量，供料機關(構)應停止供應焚化再生粒料，如有實際工程應用大量需求，得敘明理由向產生地之地方環保局申請免停止供應焚化再生粒料。

二、清運者管制編號

焚化再生粒料之清運者應以書面或網路傳輸方式，檢附文件向產生地之地方環保局申請清運者管制編號。檢附文件如下：

- (一)公民營廢棄物清除機構：應檢具中央主管機關指定之相關證明文件資料，包括清除許可證、公司登記(或商業登記)證明文件。
- (二)事業廢棄物共同清除機構：公司登記證明文件、共同清除許可證。
- (三)運輸業：公司登記證明文件或商業登記證明文件、運輸業執照及與委託人訂定之契約書。
- (四)依廢棄物清理法第二十八條第一項第三款第三目至第五目設置廢棄清除設施之機構：中央目的事業主管機關、主管機關核發之相關證明文件資料。

(五)執行機關：地方環保機關開具之證明文件。

三、使用者管制編號

焚化再生粒料之使用單位為水泥廠、異地暫存場址、預拌混凝土廠及其他使用單位等或其他運用者，應檢附文件，以書面或網路傳輸方式向產生地之地方環保局申請使用單位管制編號。檢附文件如下：

- (一)異地暫存場址：場址基本資料之相關證明文件(地點之使用分區及用地編定等)及地方環保機關核准之證明文件。
- (二)水泥廠、預拌混凝土廠或製磚廠：公司登記證明文件(或商業登記證明文件)及與委託人訂定之契約書。
- (三)其他運用者：可佐證符合使用者之相關文件。

四、另除工程管制編號外，其餘之管制編號，包括供料機構管制編號、清運者管制編號、使用單位管制編號，僅需於使用系統第一次申請即可，無須每一新設工程均須重新申請。

附表六 焚化再生粒料工程品質規範

焚化再生粒料用途	品質規範
基地填築、路堤填築	符合公共工程共通性工項施工綱要規範第 02331 章基地及路堤填築、公共工程共通性工項施工綱要規範第 02319 章選擇性回填材料、公共工程共通性工項施工綱要規範第 02317 章構造物回填之品質規範
道路級配粒料底層及基層	符合公共工程共通性工項施工綱要規範第 02726 章級配粒料底層、公共工程共通性工項施工綱要規範第 02722 章級配粒料基層之品質規範
控制性低強度回填材料	符合公共工程施工綱要規範第 03377 章控制性低強度回填材料之品質規範
低密度再生透水混凝土	符合公共工程施工綱要規範第 03341 章低密度再生透水混凝土之品質規範
瀝青混凝土	符合公共工程共通性工項施工綱要規範第 02741 章瀝青混凝土之一般要求、公共工程共通性工項施工綱要規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面之品質規範
磚品	符合公共工程共通性工項施工綱要規範第 02786 章高壓混凝土地磚、公共工程施工綱要規範第 02795 章透水性混凝土地磚、公共工程共通性工項施工綱要規範第 04220 章混凝土磚之品質規範
用於紐澤西護欄及緣石之水泥製品	符合公共工程共通性工項施工綱要規範第 03410 章工廠預鑄混凝土構件之品質規範

焚化再生粒料應用於土壤穩定設計與施工手冊

發行人：鄭文燦

編輯主任委員：黃治峯

編輯副主任委員：沈志修、賴宇亭

責任主編：張達德

責任副主編：吳淵洵

著者：張達德、吳淵洵、房性中、黃奉琦、
江政恩、李泓彥、張家豪、歐立宸

出版單位：桃園市政府航空城工程處

地址：337017 桃園市大園區中華路 298 號 D 棟 2、3 樓

網址：<https://oapc.tycg.gov.tw/>

電話：(03)386-7400

出版年月：中華民國 111 年 11 月

受託單位：中原大學

審議委員：呂紹霖(召集人)、宋以仁、呂明錡、何順華、
莊均緯、黃裔炎、楊士賢、藍士堯 (以委員姓氏筆畫排序)

GPN：1011102126 ISBN：978-626-7159-95-8 (平裝)