

行政院原子能委員會放射性物料管理局

106 年用過核子燃料處置長期安全評估審驗技術之研究

子項計畫四：處置坑道封塞用低鹼性混凝土

管制資訊研析

期末報告

受委託單位：社團法人中國土木工程學會

子計畫主持人：王韡蒨

業務委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

計畫編號：105FCMA010

中 華 民 國 一 〇 六 年 十 二 月

106 年用過核子燃料處置長期安全評估
審驗技術之研究

子項計畫四：處置坑道封塞用低鹼性混凝土
管制資訊研析

受委託單位：社團法人中國土木工程學會

研究主持人：黃偉慶

協同主持人：王韡蓿

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新台幣陸拾柒萬玖仟伍佰壹拾貳元整

行政院原子能委員會放射性物料管理局 委託研究

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

本子項計畫以矽灰取代部分水泥為主軸製作低鹼性膠結材，進行膠結漿體及混凝土等相關膠結配比的微觀特性、工程性質及耐久性評估，並嘗試建立國內處置設施使用低鹼性水泥混凝土之審查管制要項。進度均依計畫時程完成。已依研究規劃完成各項研究，內容符合。

本年度與 105 年度的研究內容相較，具有更深入的探討內容如下：

- (1) 在膠結漿體的設計是基於 105 年度的研究基礎上，選擇以降低漿體鹼性較具成效的卜作嵐材料比例 40% 為最低用量，並增加卜作嵐材料用量及多種卜作嵐材料併用的設計方式，掌握雙系統及多系統的低鹼性膠結材料性質。
- (2) ESL 標準量測程序之建立與合適性評估，105 年的研究目的於與文獻所提及之影響因子進行初步實驗成果驗證。今年度則為確認細節程序、相關因子影響及重複性行為，已評估適合作為本土化的 pH 值量測方法。
- (3) 依據 SKB 報告中的低鹼性自充填混凝土配比，經改變矽灰取代水泥用量及使用本土粒料等調整，製作 B200 系列混凝土，並進行低鹼性自充填混凝土的工程性質驗證，均滿足低鹼性自充填混凝土的性質要求。並發現添加矽灰可使混凝土黏稠度增加；可以強塑劑控制坍流度符合低鹼性 SCC 要求；混凝土凝結時間可符合封塞用低鹼性 SCC 工作性 ≥ 2 小時的要求，矽灰比例越高，凝結時間越長；B200 系列混凝土 90 天抗壓強度均大於自充填需求強度，10 MPa。孔隙溶液 pH 值均合低鹼性 SCC 的要求， $\text{pH} \leq 11.0$ ，孔隙溶液 pH 值均隨矽灰取代量增加而降低；B200 系列混凝土 90 天彈性模數均符合低鹼性 SCC 彈性模數須 ≈ 20 GPa 的要求。矽灰取代水泥可以減少 B200 系列混凝土的收縮量，增加體積穩定性。B200 系列混凝土，13 週膨脹量僅為對照組的 28%-48%，表現出耐久性，以矽灰 40% 取代水泥的混凝土有最低的膨脹量；B200 系列混凝土，即使在低水泥用量及高水膠比用量等不利條件下，仍能具有極佳的緻密性。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	iii
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xv
第一章、緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究內容	3
1.4 名詞定義	4
第二章、文獻回顧	5
2.1 地質處置設施.....	5
2.2 低鹼性水泥	6
2.2.1 低鹼性水泥之特性	6
2.2.2 處置場用低鹼性水泥	8
2.2.2.1 結構支撐用之低鹼性水泥	8
2.2.3 低鹼性水泥研究概況及應用情形	9
2.3 卜作嵐材料種類及特性.....	11
2.3.1 卜作嵐材料	11

2.3.2	卜作嵐反應及特性	11
2.3.3	卜作嵐材料取代部分水泥之成效	11
2.3.4	矽灰之性質與應用	12
2.3.5	飛灰之性質與應用	13
2.4	pH 量測方法	14
2.4.1	低鹼性水泥與 pH 之關係	15
2.4.2	移地浸取 (ESL) 法	16
2.4.3	新拌混凝土 pH 量測方法	18
2.4.4	硬固混凝土 pH 量測方法	18
2.5	各國之低鹼性水泥混凝土配比	20
2.5.1	西班牙	20
2.5.2	日本	25
2.6	國際間各類型低鹼性混凝土之力學性質	35
2.7	封塞用低鹼性混凝土(Low pH concrete plug)	37
2.8	低鹼性噴凝土(Low pH shotcrete)	41
2.8.1	噴凝土基本噴漿技術	41
2.8.2	噴凝土與傳統混凝土之比較	42
2.8.3	粒料級配與特性	43
2.8.4	封塞用噴凝土的選擇	44
2.8.5	新拌噴凝土配合設計與試驗	45
2.8.6	硬固噴凝土性質探討	46
2.9	封塞用低鹼性自充填混凝土(Low pH SCC)	48
2.9.1	混凝土之性能要求	48

2.9.2 混凝土類型之選用	49
2.9.3 封塞用 SCC 之配比試驗	49
2.9.4 硬固性質	50
2.9.4.1 抗壓強度與抗拉強度	50
2.9.4.2 滲透性質	52
2.9.4.3 水化熱之峰值	52
2.9.5 乾縮與潛變	52
2.9.6 封塞系統與 SCC 之收縮關係	53
第三章、實驗規劃	59
3.1 試驗構想及流程	59
3.2 試驗材料	62
3.3 試體編號及級配	65
3.3.1 膠結漿體研究	65
3.3.2 SCC 混凝土性質研究	65
3.4 實驗設備及儀器	68
3.5 實驗方法	76
3.5.1 新拌試驗	76
3.5.2 硬固試驗	78
第四章、結果與討論	81
4.1 低鹼性膠結材料 pH 量測方法驗證	81
4.1.1 ESL 標準測量程序之建立	81
4.1.2 選用 ESL 法量測低鹼性水泥 pH 的合適性評估	88

4.2	膠結漿體性質分析	90
4.2.1	流度及凝結時間	90
4.2.2	漿體 pH 與抗壓強度	97
4.2.2.1	不同系列配比 pH	99
4.2.2.2	不同系列配比對抗壓強度影響	103
4.2.3	微觀分析	107
4.2.3.1	TGA	107
4.2.3.2	XRD	108
4.2.3.3	SEM (EDS)	109
4.3	處置坑道封塞用低鹼性混凝土新拌及硬固性質研究	114
4.3.1	黏稠性	114
4.3.2	坍流度	114
4.3.3	凝結時間	116
4.3.4	抗壓強度	116
4.3.5	pH	121
4.3.6	彈性模數試驗	125
4.4	處置坑道封塞用低鹼性混凝土耐久性研究	126
4.4.1	不同矽灰取代量體積穩定性	126
4.4.2	不同矽灰取代量耐久性	128
4.4.3	不同矽灰取代量混凝土緻密程度	129
4.5	封塞用低鹼性自充填混凝土之配方分析審查重點及注意事項	132
4.6	綜合討論	134

4.6.1 試驗方法及低鹼性自充填混凝土的工程性質驗證	134
4.6.2 漿體性質探討	135
4.6.3 低鹼性自充填混凝土性質探討	139
4.7 研究成果.....	141
第五章、結論與建議	143
5.1 結論.....	143
5.2 建議.....	144
參考文獻.....	145

圖目錄

圖 2.1 SKB-3V(圖左)與 SKB-3H (圖右)處置坑道示意圖[2]	5
圖 2.2 不同低鹼膠結材摻配量對 pH 的影響[15].....	15
圖 2.3 鈣砂比與 pH 關係圖[17].....	16
圖 2.4 孔隙溶液等距半節榨取(Isometric half-section of a pore fluid expression)[22]	19
圖 2.5 砂漿於 28 天齡期時最大施加壓力對各離子濃度之影響[23].	19
圖 2.6 40%SF 孔隙溶液於養護期間之含量變化[25].....	22
圖 2.7 各配比 90 天之 C-S-H 膠體、CH 重量損失(%) [25]	23
圖 2.8 噴凝土剖面[25].....	25
圖 2.9 不同纖維添加比例與含水量之關係(OPC).....	27
圖 2.10 不同纖維添加比例與含水量之關係(LAC)	27
圖 2.11 不同纖維添加比例與含水量之關係(HFSC)	27
圖 2.12 不同纖維添加比例與含水量之關係(SAC).....	28
圖 2.13 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(OPC)	28
圖 2.14 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(LAC).....	29
圖 2.15 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(HFSC).....	29
圖 2.16 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(SAC).....	29
圖 2.17 OPC 之抗壓強度.....	30
圖 2.18 LAC 之抗壓強度	30
圖 2.19 HFSC 之抗壓強度	30
圖 2.20 SAC 之抗壓強度.....	31
圖 2.21 各類型水泥混凝土不同齡期對 28 天之抗壓強度比值[26] ...	31
圖 2.22 OPC 之彈性模數.....	32

圖 2.23 LAC 之彈性模數	32
圖 2.24 HFSC 之彈性模數	32
圖 2.25 SAC 之彈性模數.....	32
圖 2.26 OPC 之抗拉強度.....	32
圖 2.27 LAC 之抗拉強度	33
圖 2.28 HFSC 之抗拉強度	33
圖 2.29 SAC 之抗拉強度.....	33
圖 2.30 濕拌法流程圖[32].....	42
圖 2.31 乾拌法流程圖[32].....	42
圖 2.32 選擇的粒料級配(破碎的花崗岩)[33].....	43
圖 2.33 粒料分級：(a)細、(b)中等、(c)粗粒料 (最大粒徑: 12 mm) [33]	44
圖 2.34 總粒料級配(紅線)[33].....	44
圖 2.35 各類水泥系材料之強度發展與時間對數之關係[33]	47
圖 2.36 B200 及 B300 91 天齡期不同溫度下之抗壓強度[34].....	51
圖 2.37 B200 和 B300 新拌期間之熱量發展趨勢[34].....	52
圖 2.38 排開液體體積隨時間之變化量(%)[34]	53
圖 2.39 B200 和 B300 之總收縮率[34].....	54
圖 2.40 B200 和 B300 前 24 小時之收縮量[34].....	55
圖 2.41 B200 和 B300 24 小時後至 4.5 個月之收縮量[34].....	55
圖 2.42 使用標準波束測得之 B200 和 B300 收縮量[34].....	56
圖 3.1 子計畫四研究流程圖	62
圖 3.2 飛灰粉末	63
圖 3.3 細粒料混合粒徑分布曲線	63
圖 3.4 粗粒料粒徑分布曲線	64

圖 3.5 水泥砂漿拌合機	68
圖 3.6 水泥砂漿流動台	69
圖 3.7 油壓沖床	69
圖 3.8 研磨棒與鉢	70
圖 3.9 萬能試驗機	70
圖 3.10 承壓座	71
圖 3.11 費開氏試驗儀	71
圖 3.12 混凝土凝結時間試驗儀	72
圖 3.13 酸鹼性計	72
圖 3.14 熱壓膨脹試驗儀	73
圖 3.15 電源供應器與壓克力水槽	73
圖 3.16 數據擷取器	74
圖 3.17 變位計與圓柱試體	74
圖 3.18 V 形漏斗	75
圖 3.19 流下性試驗	76
圖 3.20 坍流度試驗	77
圖 3.21 混凝土抗壓試體	78
圖 3.22 荷重、變位實驗設置	79
圖 3.23 壓克力槽設置	80
圖 3.24 RCPT 試驗情形	80
圖 4.1 試體 pH 量測試驗所考慮的影響因素及評估	82
圖 4.2 不同氣乾時間下之 pH	83
圖 4.3 不同烘乾時間下之 pH	84
圖 4.4 28 天粉料暴露空氣不同時間之 pH	85
圖 4.5 溶液不同暴露時間之 pH	85

圖 4.6 不同粒徑大小之 pH	86
圖 4.7 不同溫度下之 pH	87
圖 4.8 C60 系列的流度 (C60-FA40 為流度控制).....	93
圖 4.9 C50 系列的流度 (C50-FA50 為流度控制).....	93
圖 4.10 C40 系列的流度 (C40-FA60 為流度控制).....	94
圖 4.11 C35 與 SF35 系列的流度 (C35-SF15-FA50 為流度控制).....	94
圖 4.12 C60 系列的凝結時間.....	95
圖 4.13 C50 系列的凝結時間.....	96
圖 4.14 C40 系列的凝結時間.....	96
圖 4.15 C35 系列的凝結時間.....	96
圖 4.16 SF35 系列的凝結時間.....	97
圖 4.17 C60 系列的 pH.....	101
圖 4.18 C50 系列的 pH.....	101
圖 4.19 C40 系列的 pH.....	101
圖 4.20 C35 系列的 pH.....	102
圖 4.21 SF35 系列的 pH.....	102
圖 4.22 矽灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的 pH.....	102
圖 4.23 飛灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的 pH.....	103
圖 4.24 C60 系列的平均抗壓強度.....	104
圖 4.25 C50 系列的平均抗壓強度.....	105
圖 4.26 C40 系列的平均抗壓強度.....	105
圖 4.27 C35 系列的平均抗壓強度.....	105
圖 4.28 SF35 系列的平均抗壓強度.....	106
圖 4.29 矽灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的平均抗壓強度.....	106
圖 4.30 飛灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的平均抗壓強度.....	106

圖 4.31 純矽灰取代 90 天之 TGA.....	108
圖 4.32 各配比 90 天 XRD 分析結果.....	109
圖 4.33 C60-SF40 90 天齡期之 SEM.....	110
圖 4.34 C50-SF50 90 天齡期之 SEM.....	110
圖 4.35 C40-SF60 90 天齡期之 SEM.....	111
圖 4.36 C60-SF40 EDS(a)分析點位 (b)圖譜.....	111
圖 4.37 C50-SF50 EDS(a)分析點位 (b)圖譜.....	112
圖 4.38 C40-SF60 EDS(a)分析點位 (b)圖譜.....	112
圖 4.39 SCC 坍流度試驗圖.....	116
圖 4.40 各配比凝結時間.....	116
圖 4.41 B200 系列各配比抗壓強度.....	117
圖 4.42 B300 系列各配比抗壓強度.....	119
圖 4.43 B200 與 B300 系列 28 天抗壓強度.....	120
圖 4.44 B200 與 B300 系列 56 天抗壓強度.....	120
圖 4.45 B200 與 B300 系列 90 天抗壓強度.....	121
圖 4.46 B200 系列於各齡期之 pH.....	122
圖 4.47 B300 系列於各齡期之 pH.....	123
圖 4.48 B200 及 B300 系列 28 天的 pH 值.....	124
圖 4.49 B200 及 B300 系列 56 天的 pH 值.....	124
圖 4.50 B200 及 B300 系列 90 天的 pH 值.....	124
圖 4.51 彈性模數與抗壓強度關係.....	125
圖 4.52 B200-C100 角柱乾縮試驗前.....	126
圖 4.53 B200-C60-SF40 角柱乾縮試驗前.....	127
圖 4.54 B200-C50-SF50 角柱乾縮試驗前.....	127
圖 4.55 B200-C40-SF60 角柱乾縮試驗前.....	127

圖 4.56 各矽灰取代量之各齡期乾縮量	128
圖 4.57 B200 系列角柱硫酸鹽試體(a)、(b)	129
圖 4.58 不同比例矽灰抗硫酸鹽能力	129
圖 4.59 C60 系列的 pH 及抗壓強度.....	136
圖 4.60 C50 系列的 pH 及抗壓強度.....	136
圖 4.61 C40 系列的 pH 及抗壓強度.....	137
圖 4.62 C35 系列的 pH 及抗壓強度.....	137
圖 4.63 SF 35 系列的 pH 及抗壓強度.....	137
圖 4.64 矽灰取代水泥重量 40~60 % 的 pH 及抗壓強度.....	138
圖 4.65 飛灰取代水泥重量 40~60 % 的 pH 及抗壓強度.....	138
圖 4.66 各配比凝結時間與黏稠性	140
圖 4.67 各配比抗壓強度與 pH	140

表目錄

表 2.1 低鹼膠結材料選用指標[4].....	7
表 2.2 低鹼性水泥所需性能[5][6].....	7
表 2.3 ESDRED 試驗中低鹼性噴凝土的工程性質規範[2].....	9
表 2.4 各國之低鹼膠材配比設計及材料發展目標參考值[7]	10
表 2.5 不同國家使用低鹼性水泥混凝土概況[8]	10
表 2.6 鈣矽比與 pH 之關聯性[16].....	16
表 2.7 不同研究條件下移地浸取法 (ESL) 法測定 pH 環境[12].....	17
表 2.8 真空過濾法測得離子濃度及新拌水泥砂漿孔隙溶液之 pH[19]	18
表 2.9 水泥和礦物混合物的化學成分[25]	20
表 2.10 低鹼性水泥混凝土配比[25].....	21
表 2.11 90 天齡期孔隙溶液之 pH 及離子濃度[25]	21
表 2.12 各漿體配比之結晶相[25].....	22
表 2.13 實驗室與現地之低鹼性混凝土 90 天齡期之性能比較[25] ...	23
表 2.14 力學性能和孔隙溶液 pH 之比較[25].....	24
表 2.15 噴凝土於隧道中各部位之性能比較[25]	24
表 2.16 試驗配比	26
表 2.17 結構支撐(隧道與拱襯)用低鹼性水泥混凝土之力學性質要求 [28].....	35
表 2.18 封填用低鹼性噴凝土之力學性質要求[28]	35
表 2.19 封塞系統低鹼性噴凝土與自充填混凝土之力學性質要求....	36
表 2.20 低鹼性封塞用噴凝土之性質要求[25]	37

表 2.21 各國 GDF 研究計劃中封塞用噴凝土之性能要求[2]	39
表 2.22 各國低鹼性封塞混凝土配比[3][25].....	40
表 2.23 A.3.1、B.1.2、B.3.4 新拌混凝土配合比例[33]	46
表 2.24 新拌混凝土特性[33].....	46
表 2.25 不同低鹼性水泥噴凝土在不同齡期的硬固性質[33]	47
表 2.26 低鹼性 SCC 配比設計[34].....	50
表 2.27 B200 及 B300 於 28 天及 91 天之抗壓強度與抗拉強度[34].	51
表 3.1 水泥成分分析表	62
表 3.2 各系列矽灰、飛灰取代漿體配比	65
表 3.3 B200 系列配比代碼.....	66
表 3.4 B200 系列試驗代碼.....	66
表 3.5 B300 系列試驗代碼.....	66
表 3.6 B200 及 B300 混凝土配比設計	67
表 3.7 SCC 相關試驗規定	76
表 4.1 pH 重複性試驗	87
表 4.2 不同因素對試體 pH 量測影響	89
表 4.3 C60 系列凝結時間與流度.....	90
表 4.4 C50 系列凝結時間與流度.....	91
表 4.5 C40 系列凝結時間與流度.....	91
表 4.6 C35 系列凝結時間與流度.....	91
表 4.7 SF35 系列凝結時間與流度.....	91
表 4.8 單純矽灰取代之凝結時間與流度	92
表 4.9 單純飛灰取代之凝結時間與流度	92
表 4.10 C60 系列配比 pH 值與抗壓強度.....	97
表 4.11 C50 系列配比 pH 值與抗壓強度.....	97

表 4.12 C40 系列配比 pH 值與抗壓強度.....	98
表 4.13 C35 系列配比 pH 值與抗壓強度.....	98
表 4.14 SF35 系列配比 pH 值與抗壓強度.....	98
表 4.15 矽灰取代水泥重量 40%、50%及 60% 配比 pH 值與抗壓強度	98
表 4.16 飛灰取代水泥重量 40%、50%及 60% 配比 pH 值與抗壓強度	99
表 4.17 各配比於各階段重量損失百分比(%).....	108
表 4.18 各配比 EDS 元素與化合物分析.....	113
表 4.19 低鹼性封塞用 SCC 流下試驗結果.....	114
表 4.20 低鹼性封塞用 SCC 坍流度試驗結果.....	115
表 4.21 B200 系列各齡期抗壓強度.....	117
表 4.22 B300 系列各齡期抗壓強度.....	119
表 4.23 B200 系列於各齡期之 pH.....	122
表 4.24 B300 系列於各齡期之 pH.....	123
表 4.25 ASTM C1202 氯離子穿透等級	130
表 4.26 各配比 56、90 天 RCPT 試驗結果	131

第一章、緒論

1.1 研究背景

國內用過核子燃料最終處置計畫可行性方面，台電公司將於 2017 年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」。年度整體研究計畫即針對審查所需資訊與技術，掌握最終處置安全工作要項，以及提升相關審查技術能力為目標，提出四個子項計畫。分別為：

子項計畫一：國際高放最終處置安全分析報告審查資訊研析

子項計畫二：深地層處置設施等效耦合模型之驗證技術建立

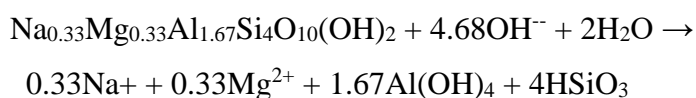
子項計畫三：緩衝材料飽和回脹與熱-水耦合特性試驗技術研析

子項計畫四：處置坑道封塞用低鹼性混凝土管制資訊研析

本報告提出子項計畫四研究成果。對於低鹼性混凝土之發展，著眼於放射性廢棄物處置場之工程障壁由混凝土與緩衝材料(Bentonite Buffer)構成，由於兩者互相接觸，而緩衝材料以膨潤土為主要原料時，會受到混凝土之高鹼性滲出液作用，將影響緩衝材料之預期回脹能力。而膨潤土暴露於鹼性溶液環境中影響其回脹行為之因素包括：

- (1) 膨潤土在高 pH 鹼性溶液中擴散雙層厚度被壓縮，導致回脹量會下降。
- (2) 膨潤土的可變電荷會隨溶液 pH 增加而增加，當溶液 pH 越高，則黏土所帶負電性越強，對可交換陽離子吸附容量越高。當水合陽離子增加，回脹潛能也隨之增加。
- (3) 高鹼性孔隙溶液會對膨潤土產生化學侵襲作用，使得膨潤土的結構產生瓦解，而喪失其功能性。

換言之，膨潤土在不同 pH 的鹼性溶液中，會產生上述壓縮擴散雙層、可變電荷增加與化學侵襲作用三種效應，最終將導致其回脹量逐步下降。此外，當膨潤土遇到鹼性溶液時將會與膨潤土中的蒙脫石產生反應，使蒙脫石溶解，將可能造成膨潤土失去原本應有的工程性質(Savage & Benbow, 2007)，其反應式如下：



由於普通卜特蘭水泥孔隙溶液之 pH 約為 13，當混凝土中高鹼性之孔隙水溶液滲出後遭遇緩衝材料，將使緩衝材料中具回脹能力的主要成分蒙脫石溶解，蒙脫石溶解速率隨 pH 提高而漸增。因此普通混凝土滲出溶液對緩衝材料預期功能的影響不可忽視。

目前瑞典 SKB 與芬蘭 Posiva 對放射性廢棄物最終處置場自充填混凝土 (Self-Compacting Concrete) 及封塞用混凝土 (concrete plug) 皆要求混凝土孔隙溶液之 pH 不大於 11，然而一般使用普通卜特蘭水泥製成之混凝土 pH 約在 13，並不適合作為放射性廢棄物最終處置場混凝土使用，故須使用低鹼性水泥製作混凝土以降低混凝土之鹼度。

找出適合當地環境的處置放射性廢棄物處置場之封塞配比为目前各國高度重視的長期安全性議題，國際間一致認為混凝土需具有高流動性與低滲透性方為最具安全性的施工配比。而混凝土和水泥於最終處置場中不只被用做建造工程時之暫時性結構支撐，同時也用來當作永久之建築構件置放於處置構造中，做為長期安全之屏障。

由於普通水泥之高鹼性溶液，在與作為緩衝材料之膨潤土 (Bentonite) 接觸後，會影響其溶解度及回脹性，降低緩衝材料功能並加速劣化的可能性；自 2002 年起，由瑞典、芬蘭及日本等國開始進行國際合作研究低鹼性水泥 (Low pH cement)，並應用於處置場密封工程。研究提出可作為部分取代卜特蘭水泥之礦物摻料包括飛灰、爐石粉、石膏(少量)、矽灰等，而低鹼性混凝土之設計以達到「水泥混凝土之孔隙溶液 pH 應在 11 以下，使所形成 C-S-H 膠體的鈣矽比 (Ca/Si ratio) 低於 0.8」為目標。

1.2 研究目的

本研究將參考國際相關研究成果，及 105 年「用過核子燃料處置安全審驗技術國際資訊研析」子項計畫三：低鹼水泥混凝土於最終處置設施之應用研究為基礎，擬定實驗計畫，置重點於封塞用低鹼性混凝土配方與資訊研析，探討封塞用低鹼性混凝土之配比技術與工程特性，據以建立未來使用封塞用低鹼性混凝土之審查重點及注意事項。

1.3 研究內容

研究工作內容包括：

1. 國際相關資訊蒐集研析：

蒐集、綜整及分析國際合作研究資訊，有關低鹼性封塞混凝土的配比分析及性質研究，及針對低鹼性封塞混凝土的性質要求事項。

2. 封塞用低鹼性混凝土的膠結漿體配比及性質研究：

參考國際合作研究資訊，嘗試發展用於封塞混凝土的低鹼性水泥可行配比，針對可行之添加材料特性進行試拌及製作試體，並制定配比設計原則。

3. 低鹼性封塞混凝土之工程特性測試及掌握：

預期將使用大量之矽灰等高含矽量之材料，以達成低 Ca/Si 比及低 pH 之要求，另為具有良好的工作性亦會加入較多的用水量及使用強塑劑等，均會引發混凝土的新拌工作性、硬固強度及可能的乾縮問題，亦須透過實驗製作試體加以掌握性質，以確保其封塞功能。

4. 低鹼性封塞混凝土之耐久性質評估：

由於低鹼性封塞混凝土之配比較為特殊，而處置設施的障壁功能須長時間維持，故須對低鹼性水泥混凝土之長期耐久性進行實驗評估，確保長時間之封塞能力。

5. 參考低鹼性水泥國際合作研究成果，配合國內材料特性及預期成效，研擬封塞用低鹼性混凝土之配方分析審查重點及注意事項。

在膠結將體的研究方面，以降低鹼度最為有效的矽灰取代部分水泥，並加入飛灰做配比上之調配，探討膠結材料性質；在低鹼性混凝土之研究方面，本年度計畫先置重點於雙系統(卜特蘭水泥+矽灰)低鹼性水泥混凝土的工程性質及耐久性。

1.4 名詞定義

下列對本文會出現的特有名詞做出定義解釋：

1. 低鹼性膠結材料(Low-pH cementitious materials)：係指水泥膠結材料之孔隙溶液理想上限 $\text{pH} \leq 11$ ，且 C-S-H 膠體鈣矽比 ≤ 0.8 ，使用礦物摻料(矽灰等)部分取代卜特蘭水泥混合而成，有些國外文獻稱為低鹼性水泥(Low-pH cement or low alkali cement)。
2. 鈣矽比(Ca/Si ratio)：係指 C-S-H 膠體的 CaO/SiO_2 的比值。
3. 總含矽量：係指材料組成成分中該混合配比之總 SiO_2 含量。

第二章、文獻回顧

2.1 地質處置設施

KBS-3 是由瑞典及芬蘭所提出的地質處置設施(geological disposal facility, GDF)概念，GDF 使用多重障壁作為設計原則，根據處置罐設計及擺放的方式可大略分為垂直(KBS-3V)及水平(KBS-3H)兩類，如圖 2.1。Jorma Autio 等人[1]於 2008 年針對 KBS-3H 進行了兩類設計概念評估。第一類為基本設計(Basic Design, BD)的進階版本，增強了設計強度與地下水流侵入的容忍度；另一類 DAWE 被設計因應各種流體侵入情況，具有排水，疏散和澆水功能。

在(RD&D)計畫 2002-2007 報告中，亦針對 KBS-3V 與 KBS-3H 進行兩者間之完整性、實用性、可行性與長期安全等差異性質的比較。而相關水平處置場(KBS-3H)之性能分析，由於 SKB 和 Posiva 之概念設計的最初報告僅提供初步信息和分析，其中依然存在大量的不確定性，故 KBS-3H 設計概念的可行性和長期安全性評估因而受到限制。因而目前國內外多數處置場之設計類型多以垂直式儲放為主。

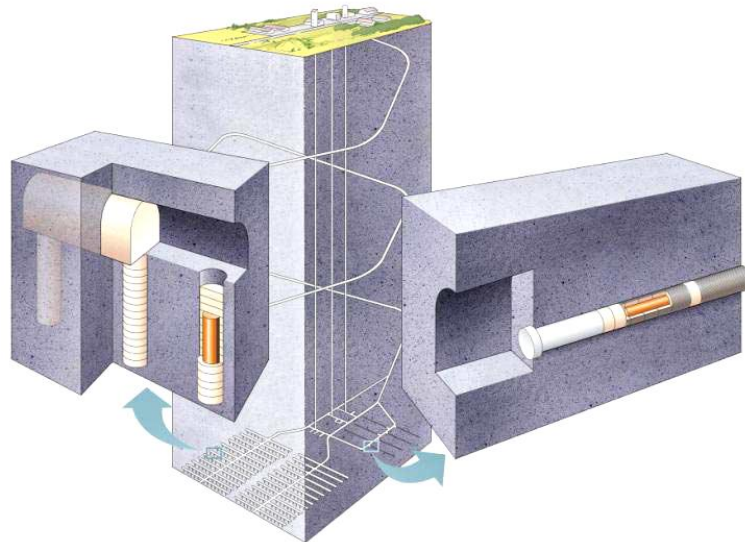


圖 2.1 SKB-3V(圖左)與 SKB-3H (圖右)處置坑道示意圖[2]

2.2 低鹼性水泥

由於純卜特蘭水泥混凝土之高鹼性孔隙溶液，在與膨潤土接觸後會促使膨潤土中之鈣礬石溶解，進而造成緩衝材料性質產生變化，影響處置場之障壁功能，故用於高放射性處置場之水泥系材料需以低鹼性水泥系材料為設計基礎。應用於高放射性處置場之低鹼性水泥，瑞典 SKB、芬蘭 Posiva 與日本 NUMO 等國共同將其定義水泥系材料孔隙溶液 pH 須 ≤ 11 ，同時 C-S-H 膠體之鈣矽比須 ≤ 0.8 。為了達到此目標，一般膠結材之總矽含量須達 55 % 以上，此外，輔助膠結材的使用須取代水泥重量至少須達 40%。

低鹼性水泥具有高強度及低滲透性。矽灰為最佳的低鹼性水泥摻料，最能有效降低孔隙溶液的 pH，且會加速 C_3S 之水化及 C-S-H 膠體形成，故具有高強度，用量需超過 20 % 才能有效消耗氫氧化鈣(CH)，但過高的矽灰比例會導致強度增加緩慢、較低的最終強度及對養護環境有較大的敏感性。水淬爐石粉降低孔隙溶液 pH 效果相較飛灰和矽灰為差。高鹼性溶液對膨潤土緩衝材料之影響評估，可就有效黏土密度對黏土回脹壓力之影響加以判斷[3]。

2.2.1 低鹼性水泥之特性

根據 SKI 2007 報告書[3]，矽灰和水泥混和後之影響可分為兩大特性：

1. 當氫氧化鈣水化完成後，具有低鹼性孔隙溶液，可大幅降低其鹼質濃度，固體氫氧化物會增加卜特蘭水泥鹼性之吸收。
2. 氫氧化鈣與矽灰之間反應主要來自於氫氧化鈣本身會被矽灰消耗，在顯著比例下矽灰能有效影響氫氧化鈣，一般至少需添加矽灰超過 20 %。

有學者[4]研究設計低鹼性低水化熱混凝土，並針對深層廢棄物地下處置場相容性進行設計，如表 2.1 所示，該設計的低鹼性水泥與低熱水泥需進一步改善表內所列之指標，以利於深層地下處置場的安全性及延長使用年限，並可以表中指標作為制定高強度混凝土參考。

表 2.1 低鹼膠結材料選用指標[4]

水泥	混凝土
黏土之化學相容性	高強度
低鹼性之孔隙溶液	20°C和 100% RH 環境養護 90 天後 ≥ 70 MPa
目標 pH 為 11	低水化熱輸出
低水化熱	絕對溫升低於 20°C之條件下
供給容易	體積穩定性
抵抗硫酸鹽侵蝕	低擴散性、滲透性以限制溶液傳送

根據 Posiva 要求，如表 2.2 所示，對於深層地下處置場灌漿要求，會依據相關屬性進行實驗室檢測項目規劃與測定要求，除了表列的要求外，期望在建造深層地下處置場的過程中能夠達到各種性質要求，使在預估期限內，能維持工程特性與使用壽命[5][6]。

表 2.2 低鹼性水泥所需性能[5][6]

目標性能要求	要求	目標
要求的性能	pH 值	≤ 11
	滲透能力， b_{\min}	$\leq 80 \mu\text{m}$
	滲透能力， b_{crit}	$\leq 120 \mu\text{m}$
期望的性能	黏度	$\leq 50 \text{ mPas}$
	滲出率	$\leq 10 \%$
	工作性時間	$\geq 60 \text{ min}$
	剪力強度	$\geq 500 \text{ Pa}$
	降伏強度	$\leq 5 \text{ Pa}$
	抗壓強度	$\geq 4 \text{ MPa}$

2.2.2 處置場用低鹼性水泥

有學者[2]在研究中提到，應用於處置場之水泥一般具有高強度及低滲透性。為利於維持低放射性處置場之近場障壁(barrier)功能，應用於 GDF 概念中之水泥系材料，考慮普通水泥中之高鹼性孔隙溶液易對膨潤土造成不利的影響，故要求使用 pH 低於 11 之水泥，而依水泥之應用方式大約可分為下列種類：

1. 結構支撐，用於處置場施工時之道路、坑道結構內襯以及周圍岩石的錨定(rock bolt)。
2. 密封，用於坑道內各構造的封塞和密封以及裂縫填充。

為了達到處置坑道中各部位之功能需求，上述水泥根據施作的部位不同而有不同的工作性要求。

2.2.2.1 結構支撐用之低鹼性水泥

所有應用於處置場之水泥系材料在作為坑道挖掘時的襯砌、拱頂，緩衝回填材料，以及處置罐的封塞前後的同時，也具有支承結構的功能。其中水泥構件在處置場施作的過程中可以發揮關鍵的結構作用，進而保障施工時的安全。

具有上述特性的水泥系材料常應用於處置場與岩石間錨定螺栓的灌漿填充，用以降低螺栓的腐蝕，並提供坑道內襯以及拱頂支承，以及提供路面載重之坑道路面。施作的形式以噴凝土為主，以氣動的方式施加到挖掘坑道壁和牆壁上，目的在使結構穩定並降低處置坑道的滲透性。各國對於噴凝土的性質要求如表 2.3 所示[2]。由於噴凝土具有可泵送性、快速凝固和高抗壓強度等特性，對於位於較硬的裂縫和較軟的沉積岩中的處置設施，可提供結構上的支撐，這在混凝土於岩石支撐保護中能夠確保挖掘的穩定性。

然而，使用水泥混凝土建造放射性廢棄物處置場時，水泥混凝土中的高鹼性孔隙溶液會影響到工程障壁系統 EBS (Engineered Barrier Systems) 及緩衝材料膨潤土(Notably bentonite)之功能，因此處置場設計主軸旨在降低處置場中總體水泥含量，從而最小化影響膨潤土的水泥孔隙溶液形成。

表 2.3 ESDRED 試驗中低鹼性噴凝土的工程性質規範[2]

時期	早期		現在
參考指標	Previous Nagra	Previous SKB/Posiva	New specification
水力傳導係數	$k \leq 10^{-10} \text{ m/s}$	-	-
抗壓強度	$\approx 10 \text{ MPa}$ (8 小時) $\approx 25 \text{ MPa}$ (7 天) $\approx 35 \text{ MPa}$ (28 天)	$\approx 10 \text{ MPa}$ (8 小時) $\approx 25 \text{ MPa}$ (7 天) $\approx 35 \text{ MPa}$ (28 天)	$\approx 10 \text{ MPa}$ (36 小時) $\approx 20 \text{ MPa}$ (7 天) $\approx 30 \text{ MPa}$ (28 天) $\approx 40 \text{ MPa}$ (90 天)
楊氏模數	-	$\approx 15 \text{ GPa}$ (7 天) $\approx 20 \text{ GPa}$ (28 天)	$\approx 15 \text{ GPa}$ (7 天) $\approx 20 \text{ GPa}$ (28 天)
抗彎強度	$\approx 0.5 \text{ MPa}$ (28 天, 黏土/岩石)	$\approx 0.9 \text{ MPa}$ (7 天)	$\approx 0.5 \text{ MPa}$ (7 天)
	$\approx 1.0 \text{ MPa}$ (28 天, 混凝土)	$\approx 1.5 \text{ MPa}$ (28 天)	$\approx 0.9 \text{ MPa}$ (28 天)
耐久性	≥ 2 年(耐硫酸鹽)	≥ 2 年(耐硫酸鹽)	(耐硫酸鹽)
工作性	≥ 2 小時	≥ 2 小時	≥ 2 小時
泵送性	>100 公尺	~15 公尺	>15 公尺
坍度	15-20 公分	15-20 公分	15-20 公分
水化溫度峰值	<100°C	~40°C	<100°C
熱傳導係數	乾燥: $> 0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 潮濕: $> 1.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	-	-

2.2.3 低鹼性水泥研究概況及應用情形

使用普通卜特蘭水泥(OPC)建造的放射性廢棄物處置場，當與地下水接觸後的孔隙溶液 pH 高達 12.0-13.5，此高鹼性溶液會與膨潤土產生反應，引起溶解與沉澱現象的發生，造成對燃料棒之密封性變差，孔隙溶液 pH 與氫氧根離子濃度有關。各國之低鹼膠結材料配比設計參考值及材料發展目標，如表 2.4[7]。不同國家使用低鹼性水泥混凝土概況，如表 2.5[8]。

表 2.4 各國之低鹼膠材配比設計及材料發展目標參考值[7]

國家	水泥配方	材料發展目標
加拿大	OPC 50%、SF 50%	高強度混凝土
芬蘭	OPC 60%、SF 40%	注入泥漿
法國	OPC 60%、SF 40% OPC 37.5%、SF 32.5%、PFA* 30% OPC 20%、SF 32.5%、BFS* 47.5% OPC 33%、SF 40%、BFS 13.5%、PFA 13.5%	高強度混凝土
日本	OPC 40%、SF 20%、PFA 40%	高強度混凝土 噴凝土
美國	OPC 40%、SF 5%、BFS 30%、PFA 25%	高強度混凝土 噴凝土
西班牙	OPC 60%、SF 40% OPC 35%、SF 35%、PFA 30%	噴凝土
瑞士	OPC 60%、SF 40%	噴凝土

註：PFA 為飛灰、BFS 為爐石粉。

表 2.5 不同國家使用低鹼性水泥混凝土概況[8]

國家	加拿大	瑞典	日本	芬蘭	
混和比例	50% OPC 50% SF	83.3% OPC 16.7% SF	40% OPC 20% SF 40% FA	56% OPC 38% SF 1.5% Gypsum 4.2% CAC	49% OPC 46% SF 1.3% Gypsum 3.7% CAC
pH	10.6	11.7	11.0	10.5	
使用方式	用於密封放射性核廢料施工之混凝土	以注入水泥漿方式穩定岩石之破碎帶或以混凝土替代開挖倒塌之部分	膠結材料用於密封深層之放射性處置場	注入水泥漿於深層之放射性儲存庫	

註：CAC 為鋁酸鈣水泥。

2.3 卜作嵐材料種類及特性

2.3.1 卜作嵐材料

卜作嵐材料根據 ASTM C 595 定義為：

- (1) 含矽質或含矽和鋁成分之材料；
- (2) 具有很小或不具膠結效果；
- (3) 於常溫或有水之情況會與氫氧化鈣產生反應；
- (4) 在常溫下卜作嵐材料與氫氧化鈣進行緩慢之反應，稱為「卜作嵐反應 (Pozzolanic Reaction)」。

2.3.2 卜作嵐反應及特性

卜作嵐反應係藉由不斷消耗易溶於水的氫氧化鈣及水泥中所含之鹼性離子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 OH^-)，生成 C-S-H 膠體填充混凝土之孔隙，使混凝土更為緻密。若要加速卜作嵐反應之進行，可以提高溫度或加入鹼及硫酸鹽方式來達成，其反應過程如下：



卜作嵐反應需藉由水泥水化所生成之氫氧化鈣來進行，所以水泥之水化作用必須先進行，產生氫氧化鈣結晶物，再進行卜作嵐反應，故卜作嵐反應具有低水化熱、反應過程緩慢等特性。卜作嵐材料被視一種含矽質或含矽及鋁之材料，本身具很小膠結性，但是在常溫且有水情況會與氫氧化鈣產生反應[9]，發生反應後可填塞孔隙，使強度與防水滲透性增加，早期強度發展緩慢，對晚期強度及耐久性則相對貢獻較大。

考量水化產物 C-S-H 膠體可能與硫酸鹽作用造成膨脹性的鈣礬石，而此反應對混凝土的品質而言有負面之影響，故在卜作嵐材料的選用上應特別注意其組成成分之比例。

2.3.3 卜作嵐材料取代部分水泥之成效

由於卜作嵐物質產生之 C-S-H 膠體，與卜特蘭水泥中矽酸鈣礦物水化產生之 C-S-H 膠體性質相似，也會凝結並發展強度，且對晚期強度的增加很有幫助，故可用來取代混凝土中部份之水泥，有時也用來減少混凝土內因水化反應產生之

熱量造成溫度上升的問題，及抑制潛在的鹼質與粒料反應(AAR)膨脹量[10]。

2.3.4 矽灰之性質與應用

矽灰為提煉含有矽金屬礦物與鐵矽合金過程中所獲得之副產物。一般矽灰的顏色在淺灰和深灰之間，二氧化矽本身為無色，其顏色之深淺主要取決於碳和氧化鐵的含量，碳含量越高，顏色越暗，比重約 2.2，較水泥比重 3.15 要小，單位重一般約在 200~350 kg/m³。矽灰顆粒非常微小，大多數顆粒的粒徑小於 1 μm，平均粒徑 0.1 μm 左右，且矽灰粒徑比水泥為細，平均粒徑約為水泥的 1/100，因此會填充於粒料間減少空氣孔隙的存在，增加混凝土緻密性。由於矽灰具有高反應性火山材料特性，與水泥水化生成之氫氧化鈣進行卜作嵐反應後，可以形成具膠結性之物質，增加漿體膠結力，可增加粒料間的結合能力；此外，矽灰與氫氧化鈣反應亦可加速水泥的水化速度，進而提高材料的早期強度，並可抑制鹼質與粒料反應。

矽灰應用於水泥漿體和混凝土時存在最優水膠比範圍，一般超過該範圍，矽灰對硬固水泥漿體和混凝土微結構的改善作用就會降低。為此，國內外針對矽灰在水泥漿體和混凝土中的最佳應用條件(包含水膠比、矽灰摻量、化學摻料以及其它卜作嵐摻料的選擇及其用量等)進行比較詳細的研究，以有效利用矽灰對硬固水泥漿體微結構性質改善[10]。

由於矽灰的粒徑小，比表面積大，故能夠改善硬固水泥漿體和混凝土微結構，然而需水量也因此隨著矽灰摻量的增加而增大，乾縮量也隨之增大。因此，一般將矽灰的摻量限制在 5%~10% 之間，並用高效減水劑來減少用水量；同時，考量水泥、矽灰與化學摻料之間存在個別相容性問題；因此，在利用矽灰時必須注意其應用條件。摻配矽灰的混凝土一般是有特殊需求的混凝土，通常會在利用矽灰的同時與其它卜作嵐材料配合使用，降低混凝土的乾縮的比率，使摻配矽灰的優點能夠達到最大。目前研究較多的是採用水淬爐石粉摻配矽灰，或採用飛灰摻配矽灰。

矽灰對硬固水泥漿體微結構的影響機理主要有以下三個方面：

- (1) 提高水泥水化程度，並與氫氧化鈣(CH)發生卜作嵐反應，增加硬固水泥漿體中的 C-S-H 膠體的數量，且改善了傳統 C-S-H 膠體的性能，進而提高硬固後水泥漿體的性能。

- (2) 矽灰及其卜作嵐反應產物填充硬固水泥漿體中的孔隙，水泥漿體中大孔隙和毛細孔孔隙率降低，同時增加了膠體孔隙和過渡孔隙，使孔徑分佈發生較大變化，在大孔隙減少，小孔隙增多，且分佈均勻情形下，進而改變硬固水泥漿體的孔隙結構。
- (3) 摻配矽灰可以消耗水泥漿體中的氫氧化鈣，可改善水泥漿體與粒料的界面鍵結性能。

由於矽灰的吸水及填料效應，新拌混凝土的泌水量大大減少，且矽灰混凝土早期水化反應加快，早期強度提高，彈性模數增大，而潛變和應力鬆弛減小。因此，矽灰混凝土發生塑性開裂(多在混凝土澆築抹面後至混凝土終凝前)和出現早期(28 天前)產生收縮裂縫的機會較普通混凝土來的多，且隨著矽灰摻量的增大而增大，而在晚期(60 天以後)因矽灰混凝土孔隙細小、結構緻密、水分遷移困難、體積變化趨勢相對平緩，其收縮量與普通混凝土相近或減小。

2.3.5 飛灰之性質與應用

飛灰為火力發電廠燃煤燃燒後，以靜電集塵器收集通過排煙道之氣體而得，為燃煤經燃燒後之副產物。

飛灰可分成 F 級及 C 級兩種，F 級飛灰通常燃燒無煙煤或煙煤，僅具有卜作嵐特性，且其 CaO 含量較低，通常小於 10%，而 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 複合物之含量則高 70%；C 級飛灰為燃燒褐煤或次煙煤而得之副產物，具有卜作嵐特性與膠結特性，CaO 含量通常高於 15%， $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量則高於 50%

飛灰會與溶於水之 CH 作用產生卜作嵐反應，生成水化矽酸鈣、水化鋁酸鈣或水化矽鋁酸鈣，卜作嵐反應是伴隨水泥水化反應持續進行。相關研究指出飛灰能有效延後水化反應促成降低水化熱過高的負面效應。以 F 級飛灰作為摻料加入混凝土中混合而成之膠結材料在拌合一週後才開始卜作嵐反應，主要係因於飛灰中的玻璃質混合物結構，須先經過水化反應產生之高鹼性孔隙水(pH 約高達 13.2)破壞，才能促使後續卜作嵐反應的進行[11]。

飛灰以其緻密性，可降低混凝土的滲透性並增加混凝土抵抗離子滲入的能力。研究指出，適當的使用飛灰可降低鹼質與粒料反應，探究其原因可能為：

- (1) 添加飛灰之混凝土，其水化後之膠結物較緻密可抑制離子移動。
- (2) 水泥中鹼性物質先行與飛灰反應，降低孔隙溶液 pH，就會降低鹼質與粒料中活化矽的反應機率。

有報告指出，F 級飛灰的用量應佔總膠結材料重量的 25%~40 % [11]。而使用 F 級飛灰作為部分膠結材可改善混凝土抗硫酸鹽侵蝕的能力，其可能的原因為：(1) 飛灰於進行卜作嵐反應時可減少氫氧化鈣的含量；(2) 飛灰混凝土之結構較為緻密，可有效阻止氯離子侵入；(3) 即使於水泥砂漿中，飛灰所佔達總膠結材重量之 60 %，仍可維持內部鋼筋保護層之穩定性。

2.4 pH 量測方法

由於處置場回填材料之障壁功能會受到水泥孔隙溶液 pH 之影響。為了量測混凝土孔隙溶液之鹼性程度，需要一個準確和可靠的方法。然而，目前尚未制定出一套標準化的檢測程序可以廣泛地應用在混凝土 pH 之量測 [12]。現行各國針對低鹼性封塞混凝土之酸鹼值檢測方式大略可分為破壞性(Destructive methods)與非破壞性(Non-destructive methods)兩類，在破壞性檢測的方法中，移地浸取法(Ex-situ leaching method, ESL)因其便利性與檢測穩定性較高為較多國家所使用。在 SKB 2012 年的一份報告 [13] 中，低鹼性膠結材孔隙溶液 pH 以移地浸取法(Ex Situ Leaching method, ESL)在重複性與再現性之表現上相較於其它量測方法來得適用及精準。ESL 的使用常見於土壤酸鹼值檢測，其標準檢測程序可參照 ASTM D4972 土壤 pH 之標準檢測方法。

105 年「用過核子燃料處置安全審驗技術國際資訊研析」子項計畫三：「低鹼水泥混凝土於最終處置設施之應用研究」 [14] 中提及，pH 量測方法選用 ESL 法，經模擬乾粉狀試樣若與空氣接觸對 pH 量測影響、溶液與空氣接觸後對 pH 量測影響、同一料源製成不同杯溶液對 pH 量測影響、同一杯溶液在不同與空氣接觸時間條件下對 pH 量測影響等四種測試，結果顯示 ESL 法具有穩定性及重複性。

2.4.1 低鹼性水泥與 pH 之關係

有國外研究針對不同低鹼性膠結材摻配量 (矽灰及飛灰) 進行試驗[15]。由圖 2.2 可觀察到，在單純僅以矽灰取代水泥重量之情況下，於 90 天齡期時，pH 有顯著之下降；以矽灰與飛灰分別以重量取代水泥 10% 時，pH 之變化趨勢與普通水泥相似。比較矽灰與飛灰重量總合取代水泥 20%、65% 及 80% 之情況，在兩種低鹼性膠結材取代比例相當(10%SF+10%FA 與 35%SF+30%FA)時，取代水泥比例較高者，其 pH 下降趨勢較為顯著；而在相同飛灰重量取代水泥的情況下(35%SF+30%FA 與 50%SF+30%FA)，使用越多矽灰取代水泥，其 pH 下降趨勢越顯著，且降至目標值之養護時間有提前之現象。

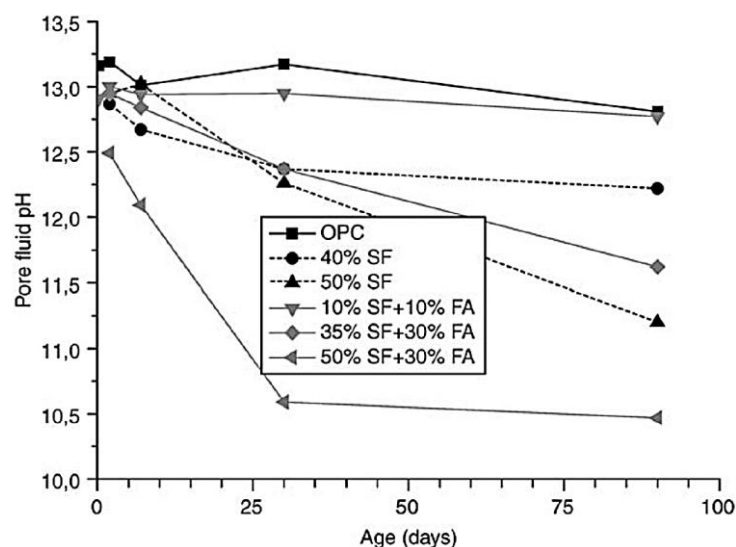


圖 2.2 不同低鹼膠結材摻配量對 pH 的影響[15]

英國學者曾針對 C-S-H 膠體在不同水化程度的情況下進行 pH 變化的相關研究[16]，如表 2.6 所示，可知不同鈣矽比(CaO/SiO₂ ratio)相對應的 pH，當 C-S-H 膠體的鈣矽比越高，pH 值相對也就越高，而發現 C-S-H 膠體鈣矽比在小於 0.8 時，其對應的 pH 為 10.88，符合 pH≤11 的要求，因此鈣矽比可作為控制 pH 重要參數之一。

Harris 等人研究鈣矽比與 pH 的相對關係[17]，如圖 2.3 所示，發現當鈣矽比提高時，其 pH 也越高，可以發現當鈣矽比在 0.8 以下時，pH 均可達到≤11 的要

求，所以在設計配比時，鈣矽比可做為設計的依據。

表 2.6 鈣矽比與 pH 之關聯性[16]

Soilds	pH
Amorphous silica	6.38
Amorphous silica+C-S-H (0.8)	10.17
C-S-H (0.8)	10.88
C-S-H (0.8)+C-S-H (1.1)	10.91
C-S-H (1.1)	11.03
C-S-H (1.1)+C-S-H (1.8)	12.43
C-S-H (1.8)+CH	12.53
CH	12.52

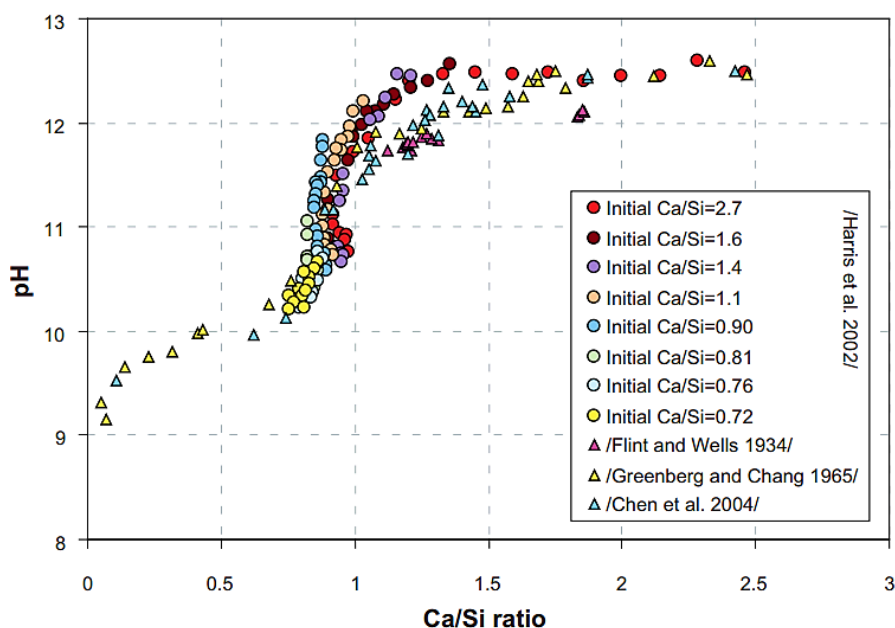


圖 2.3 鈣矽比與 pH 關係圖[17]

2.4.2 移地浸取 (ESL) 法

此方法參考 ASTM D4972 土壤 pH 之標準試驗方法[18]，經常用於測量土壤的 pH 方法，也是建議根據使用該技術對土壤量測之方法。一般而言，類似方法常被用於確定氯化物含量。

ESL 法量測程序方面，先取出試體以沖床壓碎，再以研磨棒於 15 分鐘內完成研磨，並取通過 #200 篩的粉料，分裝至各容器中，單一容器放入重量比 1:1 之試樣粉料與去離子水混合，利用磁力攪拌器攪拌 5 分鐘，隨即進行 pH 之量測(量測須於 5 分鐘內完成)。試體運送過程中需用密封袋密封，以防止孔隙溶液蒸散或接觸空氣受到二氧化碳污染。

Behnood 等人整理出表 2.7，說明不同研究條件下的移地浸取法(ESL) 法測定 pH 環境[12]。可以觀察出用移地浸取法 (ESL) 法量測混凝土之 pH 沒有標準測試程序，僅用於測量石灰石，生石灰和熟石灰之 pH，此量測方法之標準程序參考 ASTM C25 所述。

表 2.7 不同研究條件下移地浸取法 (ESL) 法測定 pH 環境[12]

No.	測量環境	材料	養護條件	水固比	浸出時間	pH 量測	參考文獻
1	-	混凝土	無	1:3.5~1:4	24 小時	電極	Haque & Kayyali
2	-	混凝土	脫模後以蒸餾水養護 7 天	1:2	1 小時	電極	Arya et al.
3	-	漿體	密封 35 天	1:2、1:5、1:50	1、6、24 小時後攪拌	OH 滴定	Arya & Newman
4	以 N ₂ 隔絕	砂漿	100%RH	1:0.67	攪拌 30 秒後 24 小時再攪拌一次	OH 滴定	Alonso et al.
5	-	混凝土 砂漿	45%RH 20°C	1:1.5 ~ 1:0.67	15 分鐘	電極	Räsänen & Penttala
6	-	混凝土 漿體	-	1:0.7、 1:1、1:2、 1:4	1、3、10、30 天	OH 滴定	Li et al.
7	與 CO ₂ 隔絕	混凝土 砂漿	100%RH	1:1	3 分持續攪拌	電極	Thangavel & Rengaswamy
8	以 N ₂ 隔絕	漿體 砂漿	-	1:9	緩慢攪拌，觀測 pH 直至穩定	電極	Pavlik

2.4.3 新拌混凝土 pH 量測方法

新拌混凝土由於水泥摻雜攪拌之影響，使 pH 在攪拌後的第一小時後落在 13 左右。新拌混凝土之 pH 變化，通常較硬固混凝土 pH 變化還容易預知，一般可透過低鹼玻璃 pH 電極(Low-alkali error glass pH electrode)直接與混凝土接觸做量測，但由於 pH 感應器脆弱又昂貴，且在長期量測使用下，pH 感應器會殘留泥漿而影響到 pH 量測之準確性。量測新拌混凝土之 pH 常見的方法為 OH⁻ 滴定，透過壓力(加壓)過濾後，榨取新拌混凝土之孔隙溶液。Larbi 等人利用新拌混凝土榨取孔隙溶液，以真空過濾法進行化學成份分析及 pH 測量[19]，結果如表 2.8 所示。

表 2.8 真空過濾法測得離子濃度及新拌水泥砂漿孔隙溶液之 pH[19]

時間(h)	水泥漿之 pH 及離子濃度 (mmol/l)						
	Na	K	Ca	Si	S	OH	pH
1	76	395	21	0.11	168	170	13.2
2	77	404	21	0.13	175	160	13.2
3	78	401	21	0.13	176	160	13.2
4	83	408	19	0.17	180	160	13.2
水泥漿之離子濃度(mmol/l)在 2 小時水化後，60°C							
水泥漿	47	296	29.4	0.05	185	160	-
砂漿	30	234	25.5	0.07	142	140	-

2.4.4 硬固混凝土 pH 量測方法

Behnood 等人[12]將量測硬固混凝土之 pH 方法分為兩大部分，破壞性方法(Destructive methods)與非破壞性方法(Non-destructive methods)，其中破壞性方法包含榨取法(Expression method)、現地浸出法(In-situ leaching method)及移地浸取法(Ex-situ leaching method)，而非破壞性方法包含嵌入電位電極(Embedded potentiometric electrodes)及光纖傳感器(Optic fiber sensors)。萃取小塊硬固混凝土碎片，透過液壓(Hydraulic pressure)技術，量測取得孔隙溶液之 pH。

根據 Taylor [20]與 Longuet [21]等人之研究，用此方法萃取水泥爐石漿體之孔隙溶液(水膠比 0.5)，經過兩年養護後，再用最大液壓 343 MPa 榨取孔隙溶液。為了自砂漿中獲取更多之孔隙溶液，Barneyback and Diamond 等人將榨取壓力提高到 550 MPa [22]，如圖 2.4 所示。

一般常見之孔隙溶液榨取裝置(A pore fluid expression device)包含了一個中空的鋼筒，裡面放著混凝土試體，再由鋼活塞放置在混凝土試體中空鋼筒的上面，同時在鋼底板有幾個排水孔，收集萃取混凝土之孔隙溶液。在萃取混凝土孔隙溶液後，研究指出 pH 可藉由市售的 pH 電極或透過氫氧根離子濃度計算出 pH。圖 2.5 為 Rivard 等人針對水灰比 0.5 之砂漿在 28 天齡期被施加最大壓力時對各離子濃度之影響[23]。

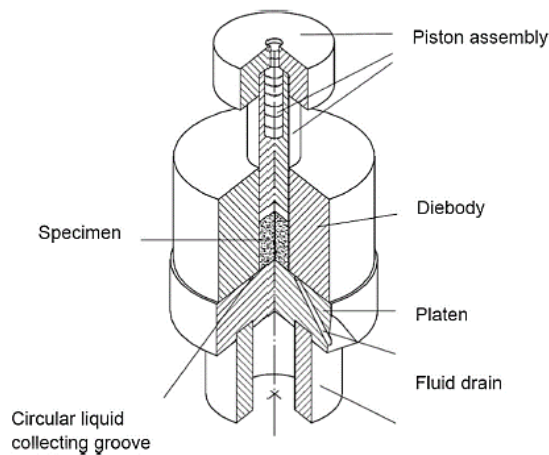


圖 2.4 孔隙溶液等距半節榨取(Isometric half-section of a pore fluid expression)[22]

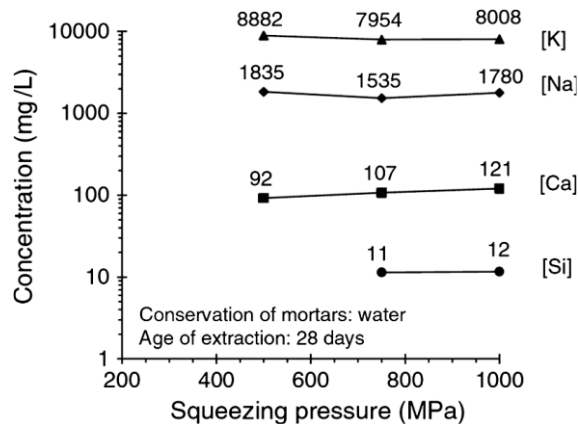


圖 2.5 砂漿於 28 天齡期時最大施加壓力對各離子濃度之影響[23]

2.5 各國之低鹼性水泥混凝土配比

目前各國發展應用於處置場之低鹼性水泥混凝土大致如表 2.4；較為常見的取代水泥之膠結材料包括矽灰、飛灰、爐石粉等。

2.5.1 西班牙

根據純水泥過去的研究顯示，為了降低矽酸鹽的含量，應使用高二氧化矽含量的礦物添加物，以消耗混凝土中的氫氧化鈣。然而，在膠結材料中大量地使用礦物質添加物將可能顯著地改變大部分混凝土的「標準」性能，並在邏輯上顯著改變水泥產品的微觀結構。J.L. García 等人[25]於 2007 年針對低鹼性水泥之微觀結構演化，以及其在封塞用噴凝土的施工中的應用進行相關的研究。此外，考慮到處置場封塞用噴凝土的功能要求，研究分別於現地與實驗室中進行，並根據各別獲得的結果進行比較，摘述如下。

1. 微觀性質測試

該研究分別針對低鹼性水泥漿體以及混凝土進行研究。在漿體的部分，以純水泥，添加相應比例的矽灰與飛灰製成水膠比 0.5 之低鹼性水泥漿體，並在不同齡期終止水化，以加入乙醇和丙酮的混合溶液除去游離水來維持膠結漿體的水化狀態。然後，透過 DTA / TG 和 XRD，以及 EDAX 研究水泥漿體中固相顯微組成的演變與分析觀察到的一些膠結物。表 2.9 為低鹼性水泥漿體之水泥和礦物混合物的化學成分。

表 2.9 水泥和礦物混合物的化學成分[25]

	LI*	IR*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO (Total)	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO (Free)
OPC	4.34	1.13	18.0	4.85	5.26	62.4	1.84	3.28	0.18	0.35	1.92
SF	0.09	0.08	91.8	0.59	3.74	1.30	0.92	-	0.15	0.37	0.01
FA	2.24	0.53	55.63	27.92	5.51	4.63	2.30	-	0.63	3.25	0.15

*LI 為燒失量(Lost of ignition)，IR 為不溶殘渣(Insoluble residue)。

2. 硬固性質測試

在低鹼性混凝土的部分，該研究分別以 OPC60-SF40、OPC35-SF35-FA30 兩組配比，以圓柱試體進行 90 天齡期之性質試驗。兩組配比如表 2.10。

表 2.10 低鹼性水泥混凝土配比[25]

成分組成	OPC60-SF40	OPC35-SF35-FA30
	kg/m ³ (OD)	
膠結材料	307.0	316.0
水	277.0	237.0
水膠比	0.9	0.8
粗粒料 1	615.0	635.0
粗粒料 2	200.0	205.0
細粒料	818.0	843.0
減水劑(1.8%)	5.5	5.7
輸氣劑(0.2%)	0.6	0.6

漿體之孔隙水部分，表 2.11 為水化作用進行到第 90 天齡期時，根據孔壓試驗所得的三種低鹼水泥漿孔隙溶液組成。相對於做為參考之無礦物質添加物的純水泥試體，鹼含量在具有高含量礦物添加物的膠結材料配比中有明顯的下降。這表示，在這些低鹼性漿體中，隨著孔隙溶液中[Ca²⁺]的增加，鹼含量會有相應的減少。圖 2.6 為矽灰含量 40% 樣品孔隙溶液中[Na⁺]、[K⁺]和[Ca²⁺]於養護期間的含量變化。圖 2.6 顯示，雖然鹼含量從孔隙溶液中逐漸消失，但鈣的量也在增加。

表 2.11 90 天齡期孔隙溶液之 pH 及離子濃度[25]

樣品	pH	OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻
		ppm				
OPC (參考)	13.17	2550	382.0	3628.0	461.0	27.0
40%SF	12.22	539	119.7	321.8	612.1	84.4
50%SF	11.20	51	165.1	368.6	650.9	2180.0
35%SF-30%FA	10.90	15	175.1	387.9	486.1	1819.0

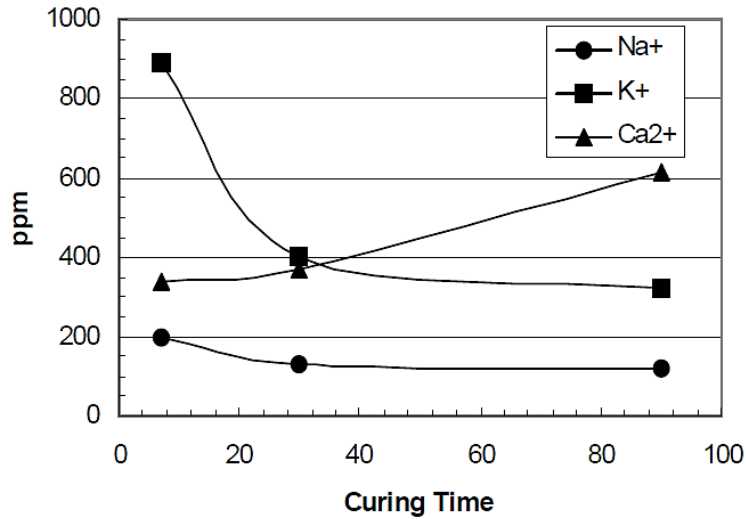


圖 2.6 40%SF 孔隙溶液於養護期間之含量變化[25]

表 2.12 為 XRD 所得之三種漿體中存在的結晶相。在含有礦物添加之膠結材料中，矽酸鹽含量隨著養護時間的增加而降低，在取代量含量達 50% 以上時，90 天時之矽酸鹽含量則會完全消失。在純水泥中可以較為清楚地觀察到屬於純水泥的矽酸二鈣 (C_2S) 和矽酸三鈣 (C_3S) 的無水顆粒峰值；而在礦物添加量高的配比中，這些峰值則趨向於隨著水合作用的進行而降低。此外，在低鹼性的環境下，同樣可以於高礦物添加量的漿體中判定鈣礬石的峰值。

表 2.12 各漿體配比之結晶相[25]

配比	OPC100				OPC60-SF40				OPC35-SF35-FA30			
	2	7	30	90	2	7	30	90	2	7	30	90
C_2S/ C_3S	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	X	XX	XX	X	X
C_4AF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
氫氧鈣石	XX	XXX	XXX	XXX	XX	XX	X	X	XX	XX	X	
鈣礬石	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
無含量	X	些微含量			XX	中等含量			XXX	高含量		

DTA/TG 分析的部分，證實了 XRD 得到的結果。隨著礦物添加量的增加，矽酸鹽的吸熱峰（CH，在 400-500°C 之間）跟著降低，並且在配比的二氧化矽含量 > 45% 時完全消失。CSH 膠體的含量（100-300°C 之間的吸熱峰）隨著水泥漿中的水化作用而有顯著的上升；而在礦物添加含量較多的漿體中，水化作用的早期（2 天）具有較高的質量損失，如圖 2.7，為 TG 分析中的重量損失。

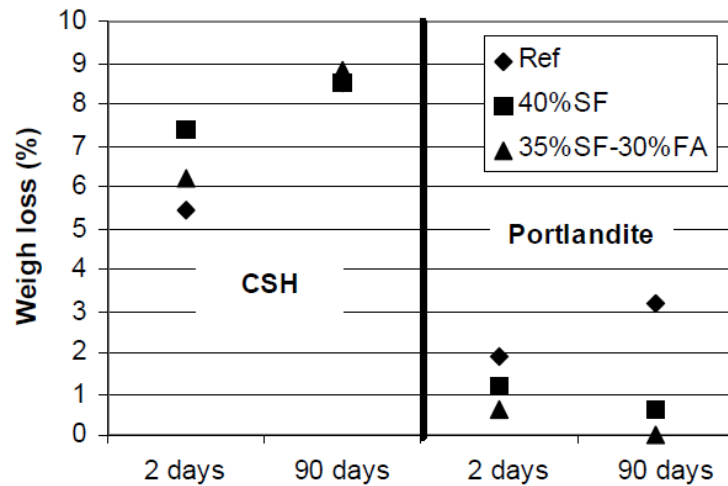


圖 2.7 各配比 90 天之 C-S-H 膠體、CH 重量損失(%) [25]

以工業拌和及實驗室拌和之圓柱試體力學性能如表 2.13。將工業規模製成的試體所獲得的結果與實驗室所獲得的結果進行稠度、靜彈性模數以及抗壓強度於 90 天齡期之性能比較，工業規模拌和之噴凝土必須在不改變混凝土基本力學性能的條件下，達到 pH < 11、抗壓強度 > 10MPa，以及靜彈性模數 < 20GPa 等性能要求 [25]。

表 2.13 實驗室與現地之低鹼性混凝土 90 天齡期之性能比較 [25]

配比	靜彈性模數(GPa)		抗壓強度(MPa)		稠度(cm)	
	工業	實驗室	工業	實驗室	工業	實驗室
OPC60-SF40	21.7	21.7	37.5	39.0	12	12
OPC35-SF35-FA30	18.3	17.2	29.3	29.3	12	13

以配比 OPC60-SF40 探討在標準條件下，噴凝土之各項性質。試體以鑽心取樣之方式自噴漿 35 天過後的噴凝土板上取樣，並在標準條件下養護 55 天。表 2.14 為鑽心取樣樣本與實驗室試體 90 天之力學性能和孔隙溶液 pH。在與實驗室中之混凝土試體進行比較後，可以發現，噴凝土以噴佈的方式施作時，所得到之彈性模數和抗壓強度將會有顯著下降，但此時之噴凝土仍可符合功能要求。此外，現地施作獲得的孔隙溶液 pH 值與實驗室內之 pH 值無明顯差異，顯示現地施作條件並不會影響原低鹼性混凝土配比的設計 pH 值[25]。

表 2.14 力學性能和孔隙溶液 pH 之比較[25]

混凝土取樣	實驗室試體	隧道鑽心取樣
靜彈性模數(GPa)	21.7	13.7
抗壓強度(MPa)	39.0	26.8
pH	10.6	10.5

由於部分噴凝土於處置場中設計用於封塞；於是在隧道中進行了一些試驗，將噴凝土噴佈於隧道之面板(panel)與處置孔(pipe)中不同位置堆積。分析結果如表 2.15。而實驗結果顯示，在施工面上的幾何形狀不影響噴凝土的性能，仍可滿足功能要求。而不論在圓柱形或扁平構造中噴佈施工，噴凝土之性能皆沒有顯著差異性。

表 2.15 噴凝土於隧道中各部位之性能比較[25]

混凝土取樣	面板之噴凝土	處置孔之噴凝土
靜彈性模數(GPa)	27.5	25.0
抗壓強度(MPa)	13.6	14.8
pH	10.4	10.3
密度(t/m ³)	2.21	2.19

此外，使用雙目顯微鏡對面板混凝土/處置孔混凝土的界面進行觀察，顯示出非常好的密合性，幾乎沒有孔隙，並且噴凝土剖面可看出粒料分佈十分良好，如圖 2.8。上述實驗結果顯示，使用低鹼性水泥配比，可以建造符合高放射性廢棄物地下處置場所需功能要求的噴凝土封塞。



圖 2.8 噴凝土剖面[25]

2.5.2 日本

基於低鹼性水泥混凝土被用於高放射性廢棄物（HLW）地質處置場各類設施，例如隧道支撐、表面襯砌和封塞之可能性。從長期安全性的角度來看，保護緩衝區和周圍岩石不受來自混凝土高鹼性溶液的侵蝕被視為一項重要課題。因此，普通卜特蘭水泥（OPC）於處置場設計使用中必須受到相當的限制。

1. 水泥材料配比

為了研究低鹼性混凝土的力學性質，Tatsuo Nishiuchi 等人即針對 OPC 和三種類型的低鹼性水泥(即 LAC、HFSC 和 SAC)之新拌混凝土以及硬固混凝土進行力學強度的試驗[26]。

其中，LAC 為日本 CRIEPI 和 Taiheiyo 顧問有限公司開發，為一改進熟料設計之水泥；HFSC 由日本原子能機構（JAEA）和日本的 Obayashi Corporation 開發，以飛灰（FA），矽粉（SF）和 OPC 重量比 4：2：4 之比例混合而成；SAC 則由烏克蘭基輔技術研究所開發，此水泥於生產過程中未經過鍛燒。表 2.16 為此研究所設計之試驗配比。

表 2.16 試驗配比

試驗水泥類型	OPC	LAC	HFSC	SAC
粗粒料 (碎石灰石)	最大粒徑：13 mm 密度：2.73 g/cm ³			
細粒料 (碎石灰石)	密度：2.68 g/cm ³			
強塑劑(SP)	-	-	Rheobuild SP8N*	-
碳纖維(C)	試體總體積之 0.5~2.0 % 長度：30 mm 密度：1.90 g/cm ³ 楊氏模數：24,000 N/mm ² 抗拉強度：780 N/mm ²			
聚丙烯纖維(P)	試體總體積之 0.5~1.0 % 長度：48 mm 密度：0.91 g/cm ³ 楊氏模數：10,500 N/mm ² 抗拉強度：530 N/mm ²			

註：在配比設計中避免使用強塑劑 (SP)，但由於 HFSC 含有大量的吸水性膠結材料，故使用日本 Pozzolith Bussan 生產的 Rheobuild SP8N。

2. 新拌混凝土之性質要求

根據 JNC (2005) 高放射性處置場研究之設計，新拌混凝土的坍度約為 8-12cm，28 天後混凝土之抗壓強度須大於 40 N/mm²[27]。新拌混凝土的空氣含量要求，則因混凝土用於深層地下建造的高放射性處置場中，預計沒有地下水凍結問題，不會造成後續的損壞而沒有做出規定。

3. 纖維對含水量的影響

在圖 2.9 至圖 2.12 為目標坍度範圍內(8-12cm)，相同配比之不同纖維添加量混凝土對含水量(W)之影響關係。各圖分別改變了水泥類型、纖維類型和水灰比進行研究[26]。結果顯示，纖維對 W 的影響的降低僅在總體積 2.0%的纖維添加量下觀察到。在此範圍內，各類型水泥和纖維的單位含水量 W 幾乎保持不變。

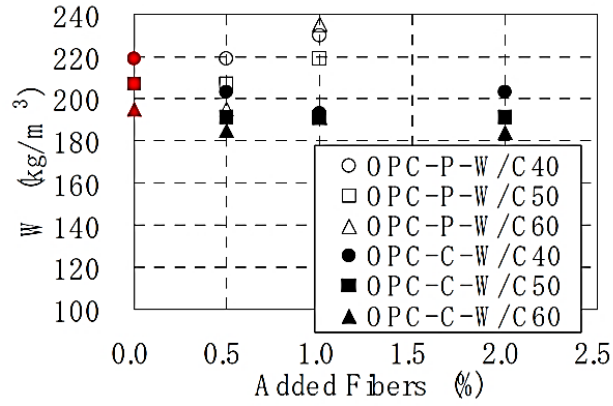


圖 2.9 不同纖維添加比例與含水量之關係(OPC)

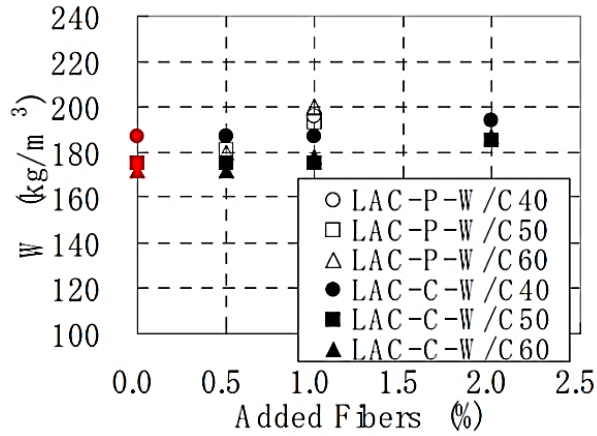


圖 2.10 不同纖維添加比例與含水量之關係(LAC)

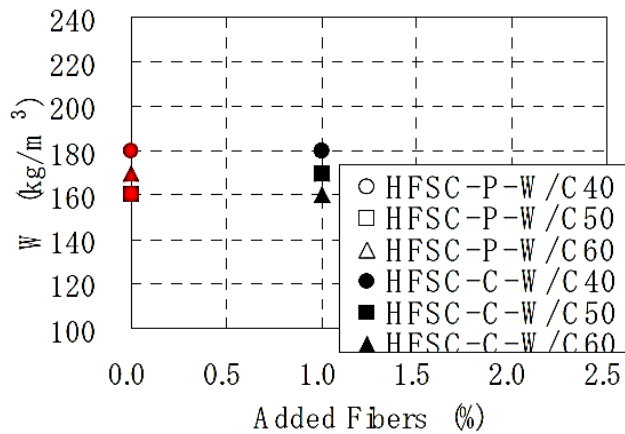


圖 2.11 不同纖維添加比例與含水量之關係(HFSC)

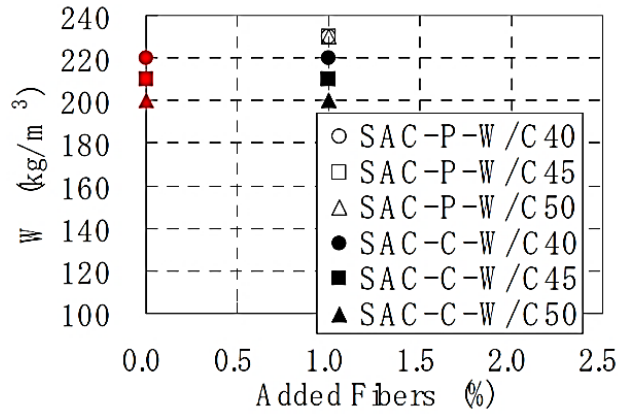


圖 2.12 不同纖維添加比例與含水量之關係(SAC)

4. 不同灰水比(C/W)於 28 天之抗壓強度

28 天後 C/W 對混凝土抗壓強度的影響如圖 2.13 至圖 2.16 所示。28 天後，硬固混凝土的抗壓強度明顯受到不同 C/W、水泥類型，以及加入不同纖維類型(C, P)和纖維體積含量(%)之影響[26]。滿足「硬固混凝土於 28 天之抗壓強度大於 40N/mm²」的 C/W，於低鹼性 HFSC 混凝土中擁有最高的抗壓強度。隨著 C/W 的增加，不同水泥類型間之 28 天抗壓強度的增加幅度幾乎相同。

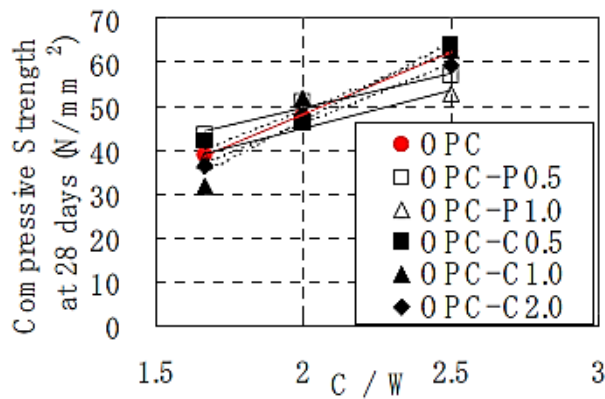


圖 2.13 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(OPC)

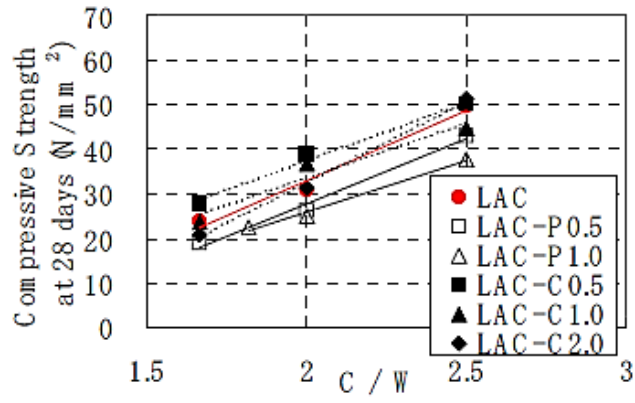


圖 2.14 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(LAC)

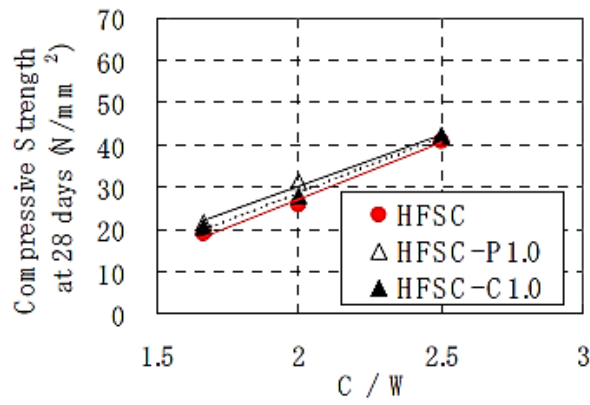


圖 2.15 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(HFSC)

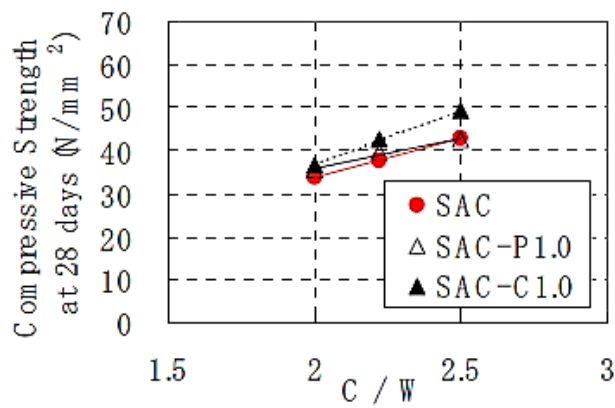


圖 2.16 C/W 對混凝土抗壓強度的影響(SAC)

5. 硬固混凝土之性質要求

硬固混凝土在單軸抗壓強度試驗和抗拉強度試驗中，分別使用直徑為 100mm，高度為 200mm 之圓柱試體進行抗壓強度與楊氏模數試驗，以及直徑為 150mm，高度為 200mm 之圓柱試體進行劈裂強度試驗[26]。試體於 20°C 水中養護 28 天，然後暴露於 20°C、RH 50% 之環境下進行各項性質測試。

6. 硬固混凝土之抗壓強度

抗壓強度和養護時間之關係如圖 2.17 至圖 2.20，改變了水泥類型、添加纖維的類型(C, P)和體積百分比作為參數，混凝土的抗壓強度隨著養護時間的延長而增加[26]。添加纖維對不同類型水泥混凝土所造成的影響並不顯著。HFSC 混凝土的抗壓強度相較於水中養護，於空氣中所增加的幅度並不大；這種趨勢可以認為是由於空氣暴露期間卜作嵐反應受到限制所致。

而 28 天之 LAC 混凝土的實際抗壓強度遠超過了設定條件(40 N/mm²)，造成實際抗壓強度與設計強度之間的差異可能源於混合過程中溫度的影響(混合設計試驗於 1 月，冬季進行，力學性質試驗試體在夏季 7 月份生產，意味著實驗室溫度控制上的不足)[26]。

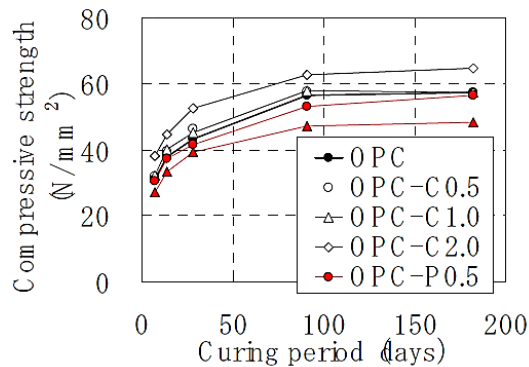


圖 2.17 OPC 之抗壓強度

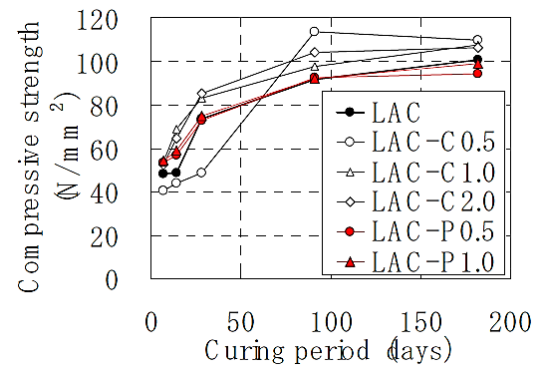


圖 2.18 LAC 之抗壓強度

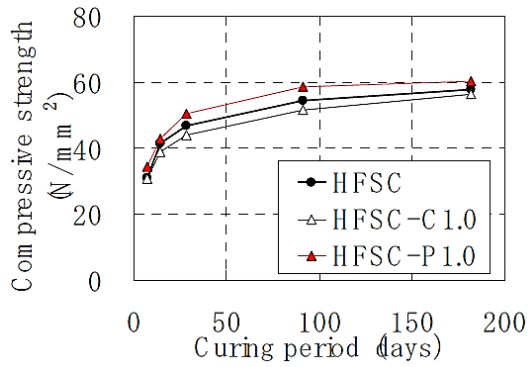


圖 2.19 HFSC 之抗壓強度

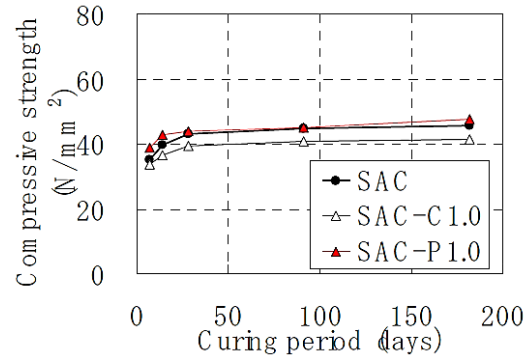


圖 2.20 SAC 之抗壓強度

圖 2.21 為各齡期之抗壓強度與 28 天抗壓強度之比值，用以評估各類型水泥暴露於空氣中的時間與抗壓強度發展之關係[26]。圖 2.21 中各類型混凝土之抗壓強度，除了 SAC 混凝土之外，皆隨著時間的推移而增加。由上述結果可知，在養護期間，水分的供給對混凝土抗壓強度的發展有一定的影響。

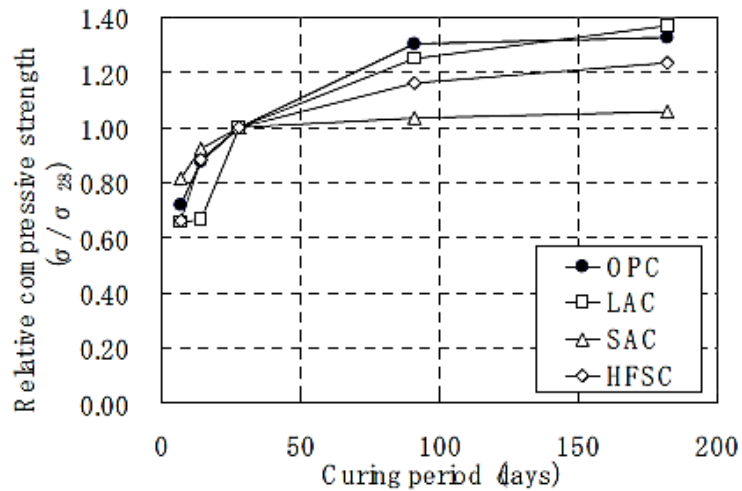


圖 2.21 各類型水泥混凝土不同齡期對 28 天之抗壓強度比值[26]

7. 楊氏模數測定

不同水泥類型混凝土之楊氏模數與養護時間關係如圖 2.22 至圖 2.25 所示。OPC 混凝土和 LAC 混凝土的楊氏模數隨著養護時間的延長而增加；HFSC 混凝土和 SAC 混凝土則在 28 天後隨時間有些微下降[26]。此種發展趨勢被認為是由於混凝土於空氣中暴露期間水分蒸發所造成之影響，即由於乾縮而引起的細微裂紋使楊氏模數有下降的趨勢。對於所有的水泥類型，添加纖維之類型與體積含量變化對混凝土的影響則未呈現明顯變化趨勢。

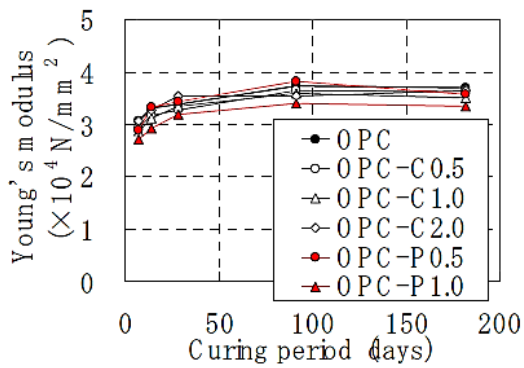


圖 2.22 OPC 之彈性模數

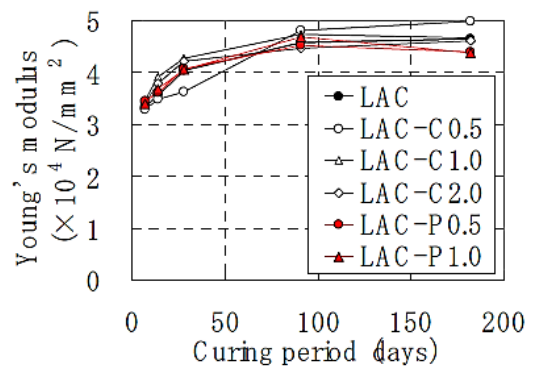


圖 2.23 LAC 之彈性模數

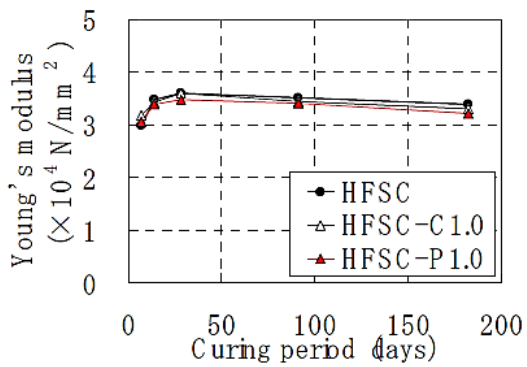


圖 2.24 HFSC 之彈性模數

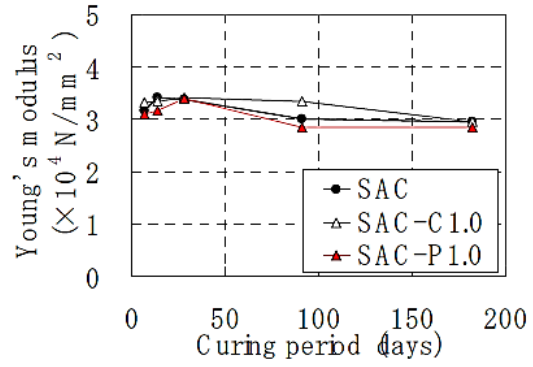


圖 2.25 SAC 之彈性模數

8. 抗拉強度分析

各水泥類型，配合不同纖維類型和體積百分比之不同養護時間抗拉強度關係如圖 2.26 至圖 2.29 所示[26]。OPC 混凝土和無纖維的 LAC 混凝土的抗拉強度保持不變；HFSC 混凝土和 SAC 混凝土之抗拉強度則在 28 天後隨時間略有下降，與楊氏模數之發展趨勢相同。造成此發展趨勢的原因可認為是水分蒸發所致。

而纖維的添加對 LAC 混凝土和 HFSC 混凝土抗拉強度造成明顯影響，含有纖維之 LAC 混凝土和 HFSC 混凝土，其抗拉強度高於無纖維添加者，此種結果可以認為抗拉強度增加的原因是由於纖維的添加提供額外的抗拉能力。

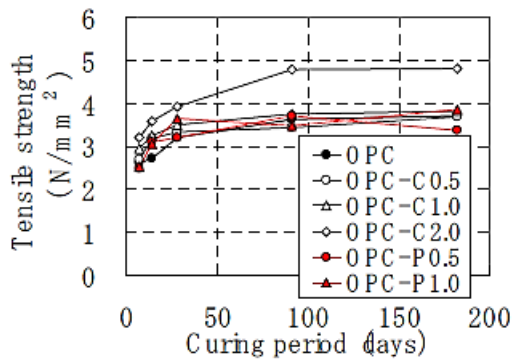


圖 2.26 OPC 之抗拉強度

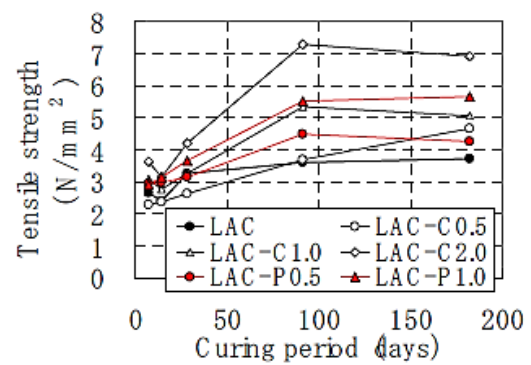


圖 2.27 LAC 之抗拉強度

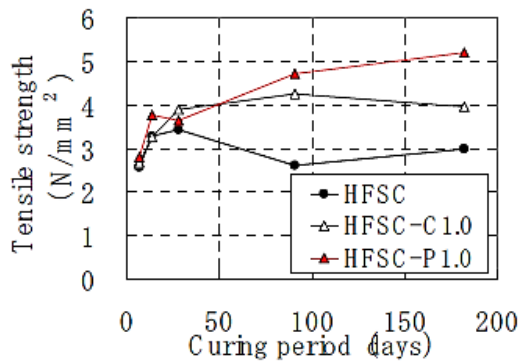


圖 2.28 HFSC 之抗拉強度

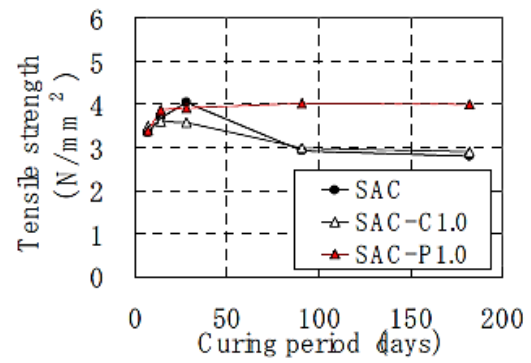


圖 2.29 SAC 之抗拉強度

根據低鹼性混凝土之設計要求，上述各類水泥以滿足坍度及抗壓強度為前提，可知低鹼性混凝土的抗壓強度隨時間增加。纖維的添加對特定水泥類型抗壓強度具有一定的影響，並且對增加低鹼性混凝土之抗拉強度有正面效應。空氣暴露期間，由於水蒸發導致的卜作嵐反應受到限制，造成 HFSC 混凝土的抗壓強度產生些微的變化。空氣暴露 28 天後，LAC 混凝土的楊氏模數值幾乎維持固定，而 HFSC 混凝土和 SAC 混凝土的楊氏模數則因乾燥收縮的影響而有些微下降。

2.6 國際間各類型低鹼性混凝土之力學性質

前述 2.2.3 節提及，應用於處置場之低鹼性混凝土，依照應用部位與功能性不同，可分為結構支撐與密封兩類。根據各國之研究報告[28]，針對處置場中結構支撐與裂縫填補用之低鹼性混凝土，其力學性質要求分別如表 2.17、表 2.18。而應用於封塞系統中之低鹼性噴凝土與低鹼性自充填混凝土之工程性質要求則如表 2.19。

表 2.17 結構支撐(隧道與拱襯)用低鹼性水泥混凝土之力學性質要求[28]

力學性質	要求
抗壓強度	≈ 10 MPa (36 hours)
	≈ 20 MPa (7 days)
	≈ 30 MPa (28 days)
	≈ 40 MPa (90 days)
彈性模數	≈ 15 GPa (7 days)
	≈ 20 GPa (28 days)
握裹力	≈ 0.5 MPa (7 days)
	≈ 0.9 MPa (28 days)
工作性	≥ 2 hours
泵送性	>15m
坍度	15-20m

表 2.18 封填用低鹼性噴凝土之力學性質要求[28]

	力學性質	開發中	現地試驗 (芬蘭)	試點試驗 (ONALKO)	
要求性質	滲透能力	b _{min}	≤ 80 μm at 60 min	≤ 80 μm at 60 min	≤ 80 μm at 30 min
		b _{crit}	≤ 120 μm at 60 min	≤ 120 μm at 60 min	≤ 120 μm at 30 min
期望性質	黏滯度	50 mPa s	-	50 mPa s	
	降伏點	≤ 5 Pa	-	≤ 5 Pa	
	流動性	-	-	45 s at 30 min	
	泌水性	≤ 10%	≤ 10%	≤ 2%	
	工作度	≥ 60 min	≥ 60 min	≥ 30 min	
	剪力強度	≥ 0.5 MPa at 6 h	≥ 2 kPa at 6 h	2 kPa at 8 h	
	抗壓強度	≥ 4 MPa	≥ 8 MPa (其他試驗亦可接受 7 MPa)	≥ 4 MPa	

表 2.19 封塞系統低鹼性噴凝土與自充填凝土之力學性質要求

力學性質 \ 應用	封塞		國家/研究單位
	噴凝土	自充填	
施工類型	噴凝土	自充填	瑞士/Nagra 瑞典/SKB 芬蘭/Posiva 西班牙/ENRESA
水力傳導係數	$\leq 10^{-10}$ m/s	-	
彈性模數	≈ 20 GPa (90days)	≈ 20 GPa (90days)	
抗壓強度	≥ 10 MPa (90days)	≥ 10 MPa (90days)	
柏松比	0.2-0.3	-	
抗彎強度	≈ 0.9 MPa (28days)	-	
耐久性 (耐硫酸鹽)		-	
工作性	≥ 2 hours	≥ 2 hours	
泵送性	250 m	Full scale	
坍度/坍流度	坍度 15-20 cm	坍流度 55-70 cm (文獻實驗值)	
水化溫度峰值	$\leq 40^{\circ}\text{C}$	$\leq 30^{\circ}\text{C}$	

2.7 封塞用低鹼性混凝土(Low pH concrete plug)

KBS-3 處置場在建造時，首先挖掘處置隧道(deposition tunnels)和處置坑道(holes)，接著設置緩衝區，並於用過核子燃料以封裝處理後回填處置隧道[29][30]。由於處置隧道與運輸的主隧道或中央隧道相連接，考慮中央隧道的開放時間多過處置隧道，在處置隧道口處必須設置一個具有塞子作用之構件，用以防止處置隧道的回填材料膨脹並擴展到相鄰連接的隧道[31]。封塞混凝土在用過核子燃料儲放階段，負責保護和保存已處理的處置坑道直到主隧道或中央隧道關閉為止；然而，此構件在處置程序完成後以及 KBS-3 處置場關閉時，則不具有緩衝和回填一類安全功能[29][30]。

為了在用過核子燃料儲放階段維持與外界隔絕之功能，封塞構件必須具有足夠的力學強度和水密性。為了不影響隔離系統的安全功能，封塞混凝土構件在配比的選擇與功能性的要求上顯得格外重要，必須保持原位，不要過多減少體積，不要包含影響貯存庫化學有利條件的材料。以下即針對處置坑道封塞用低鹼性混凝土進行工作性要求與其相關配比設計進行探討。

2.7.1 封塞用低鹼性混凝土工作性

應用於最終處置場之低鹼性混凝土最主要之要求為 $\text{pH} \leq 11$ ，用以防止膨潤土接觸高鹼性材料而導致劣化。在混凝土的設計階段，僅使用預先選定的低鹼性配比設計。預選的過程中，需考慮不同的因素，如對用水量的要求、化學摻劑的相容性、凝結時間和抗壓強度等。一般在設計封塞用混凝土時，需考量封塞功能性，包含稠度、可泵送性和在工作性上以低損耗的時間進行，混凝土的設計與優化須有基本要求，如表 2.18 所示，低鹼性封塞噴凝土之基本要求如表 2.20 所示[25][28]。

表 2.20 低鹼性封塞用噴凝土之性質要求[25]

抗壓強度(MPa)	>10
靜態彈性模數(GPa)	<20
水力傳導係數(m/s)	10^{-10}
孔隙溶液 pH	<11

2.7.2 封塞用混凝土

在 GDF 中，封塞作用之水泥系材料其應用部位大約分為二類：一類用於處置坑道與拱頂交會處裂縫的填補；另一類則使用在拱頂、隧道(tunnel)、處置坑道(drift)，以及處置罐回填等部位的封塞。封塞用混凝土應用於上述二類部位主要的目的，在使地下水的流動能夠最小限度影響施工中或封閉狀態之 GDF。

1. 填補用低鹼性混凝土

填補用低鹼性混凝土主要應用於處置設施中各部位裂縫以及孔隙之填補，由於需要填補的孔隙尺度從數十微米的斷裂岩石區域，變化到用於橫向處置坑道及隧道封塞和密封的幾十公尺，而填補用低鹼性水泥依不同試驗而有不同的各項性質要求。

2. 封塞用之低鹼性混凝土

封塞用低鹼性混凝土則主要負責處置罐與對外交界處的密封、隔絕，以「密封、填塞」功能為導向，阻止處置罐中之放射性核種與外界接觸。ESDRED (2002-2006)計畫，各國針對含有膨潤土作為緩衝的 GDF 隧道和處置坑道用於封塞的混凝土配比進行了各項性質試驗，如表 2.21。表中相關各項基本性質，如：水力傳導係數、物理性質、泵送性、工作性等，於 ESDRED 計畫模型中與母岩環境有高度影響，為固定之規範設計值。這些封塞用混凝土的主要目的為限制地下水流量或提供暫時性的物理力學性質（或液壓）限制，用以緩衝和密封設置在處置罐周圍的材料。

表 2.21 各國 GDF 研究計劃中封塞用噴凝土之性能要求[2]

項目		ENRESA	SKB	POSIVA
水力傳導係數		$k \leq 10^{-10} \text{m/s}$	$k \leq 10^{-10} \text{m/s}$	$k \leq 10^{-10} \text{m/s}$
物理性質	楊氏模數	$\approx 20 \text{GPa}$	$\approx 20 \text{GPa}$	$\approx 20 \text{GPa}$
	柏松比	0.2 – 0.3	0.2 – 0.3	0.2 – 0.3
	張力	$> 1 \text{MPa}$	$> 1 \text{MPa}$	$> 1 \text{MPa}$
	摩擦角	$\geq 37^\circ$	$\geq 37^\circ$	$\geq 37^\circ$
	抗壓強度	$\geq 10 \text{MPa}$	$\geq 10 \text{MPa}$	$\geq 10 \text{MPa}$
耐久性		≥ 100 年	≥ 100 年	≥ 100 年
工作性		≥ 2 小時	≥ 2 小時	≥ 2 小時
泵送性		250 公尺	250 公尺	250 公尺
水化溫度峰值		$\leq 40^\circ\text{C}$	$\leq 40^\circ\text{C}$	$\leq 40^\circ\text{C}$
預期界面壓力*		7 MPa	15 MPa	15 MPa
封塞長度		-	能維持預期界面壓力*之最小長度	能維持預期界面壓力*之最小長度

* 界面壓力為封塞混凝土與緩衝材料的接觸面。

2.7.3 封塞用低鹼性混凝土配比

應用於處置場封塞之低鹼性混凝土大多以噴凝土為主，部分封塞則因應不同國家之地質環境設計使用自充填混凝土施作，各國應用情形如表 2.22。其中，使用矽灰取代水泥重量 40% 之配比為較多國家所使用之低鹼性混凝土配比。

表 2.22 各國低鹼性封塞混凝土配比[3][25]

應用類型	配比	水膠比	粗粒料 (kg)	細粒料 (kg)	填料 (kg)	國家
噴凝土	C60-SF40	0.90 0.84	615	1018	- 70	西班牙 瑞士
	C35-SF35-FA30 (SF35 系列*)	0.75	635	1048	-	西班牙
	C100	0.90	616	1018	-	西班牙
	C40-SF5-FA25-BFS30	0.45	545	1183	60 (鋼纖維)	美國
	C40-SF20-FA40 (HFSC424N 系列*)	0.35 (424N) 0.40 (325N) 0.45 (226N)	632 645 663	931 950 976	-	日本
SCC	C60-SF40 (B200、B300 系列*)	0.825 (B200) 0.550 (B300)	558 557	1037 1035	369 269 (石灰石)	瑞典

註：系列為固定其中一項膠結材料之配比，變動剩餘膠結材料比例做設計；或固定各項膠結材料比例，改變水膠比進行設計。

2.8 低鹼性噴凝土(Low pH shotcrete)

噴凝土又稱為噴射混凝土，為一種於剛性岩土表面上噴上混凝土的施工技術，透過輸送泵和壓縮空氣將混凝土以高速噴漿方式噴佈緊貼於施工面，經噴灑作用之混凝土會立即凝結在表層上，添加速凝劑的噴凝土即形成了支撐層。噴凝土除了於施作時設定的噴漿速度來決定噴凝土層的支撐能力以及結構強度的發展速度，通常也藉由添加加速劑以及調整噴凝土的配比來控制。在正常條件下，噴凝土層的厚度範圍為 5~15 公分。由於使用的配比與噴塗工法的不同，噴凝土與一般的標準混凝土相比，具有較高的密度和較低的滲透性等特性，因而能有效的降低表面開裂。

噴凝土可以應用在不同的地下處置場，在某些情況下，它比一般傳統灌漿混凝土技術更便利與經濟實惠，但在使用噴凝土進行地下處置場之封塞時，由於噴凝土的設計需使用多種摻劑，考量長期不確定因素和岩石與膨潤土屏障之化學反應情形下之案例會比一般傳統混凝土還多。

應用於封塞之低鹼性水泥混凝土，其施作方式以噴凝土為主。噴凝土的使用被認為是地下施工中用於岩石支撐的高效率節約成本方法，同時也可用於封塞。

2.8.1 噴凝土基本噴漿技術

噴凝土的噴漿技術可分為濕拌法(wet mix)及乾拌法(dry mix)兩種類型，如圖 2.30、圖 2.31，二者間的區別性在於：濕拌法之拌和程序為將配比規定之材料於拌和機中拌和均勻後用輸送機以壓縮空氣壓送至噴嘴，再與速凝劑混合後噴佈於施工面上。乾拌法則為以拌和機先行將水泥及粒料乾拌均勻，再用輸送機以壓縮空氣壓送至噴嘴處加水後噴出[32]。

現代噴凝土的施工法中，多數工程選擇濕拌法，由於濕拌法可以提供較長的泵送距離(達上百公尺)，在成品上也能提供更均勻的流動性與一致性的品質。

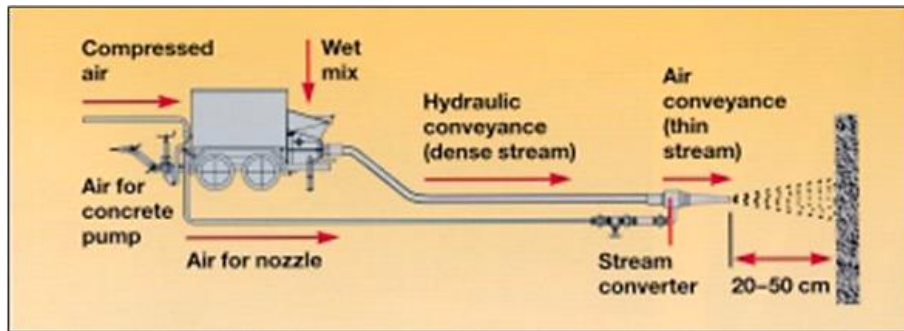


圖 2.30 濕拌法流程圖[32]

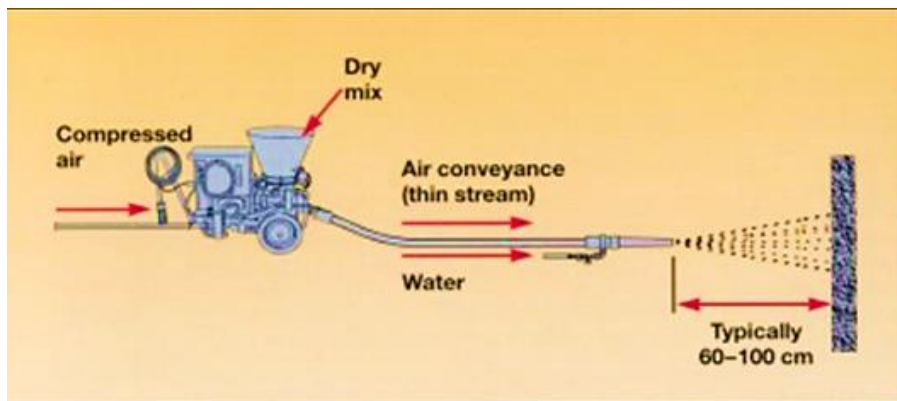


圖 2.31 乾拌法流程圖[32]

使用低鹼性水泥設計及生產結構用的噴凝土是一個複雜的過程，由於水膠比和拌合的特殊要求多，包含了新拌屬性與硬固狀態，在相關的結構設計上須考慮到一致性、可泵送性、可計劃性和硬固狀態。

執行濕拌法噴凝土需要加速摻料(Accelerator admixture)裝置在噴嘴上，同時在拌和上也需要相容性的成分組合，包含低鹼性水泥、減水劑和速凝劑等必須進行評估。低鹼性封塞噴凝土在設計和優化混凝土，必須考慮到硬固所需的性能包含抗壓強度、彈性模數和滲透係數等。

2.8.2 噴凝土與傳統混凝土之比較

純水泥是噴凝土膠結材料中最常使用的水泥系材料，而混合水泥則可用於調整混凝土在塑性或硬固狀態下的性能。在摻料中，添加矽灰可顯著的提高噴凝土的泵送性、粘結性以及粘附性[32]，並且能夠在單趟的泵送過程中形成較厚的噴凝土層。

噴凝土與傳統混凝土差異性在於要輸送、泵和噴漿，因此，在減少強度、彈性模數及增加水的滲透性時必須要考慮目標值。實際上，減少強度必須透過試驗驗證來比較鑽心與圓柱體作為配合設計之依據。它可以被估計為 50% 左右，假設噴凝土強度目標值是 10 MPa，傳統混凝土設計強度應為在 20 MPa 左右[32]。

粒料間的粒徑分佈為影響噴凝土性質的關鍵因素。噴凝土之配比須使用符合標準規範中規定的曲線，最大粒徑通常為 4、8 或 16 mm，取決於噴凝土工程所要求的細度。相較於傳統混凝土，噴凝土需要較高比例的細粒料，特別是使用濕拌法拌和之噴凝土。

其他因素需考慮到在現場製作混凝土試體時必須要有嚴格控制的實驗室，因此，降低到 10-15 % 的抗壓強度是可被預期的。當考慮到這些因素時，傳統混凝土在實驗階段之抗壓強度目標值範圍設定在 20-25 MPa、當噴凝土鑽心試驗結果得到後，水膠比和水泥用量在拌合時需做稍微調整改變。

2.8.3 粒料級配與特性

該試驗使用當地粒料，來自 ASPO 的花崗岩(crushed granite)，使用破碎花崗岩作為細粒料，粒料之最大粒徑為 12 mm，圖 2.32 中的虛線表示粒料級配目標值。圖 2.33 為 ASPO 所提供的三種尺寸粒料:0-4 mm(細粒料)、4-8 mm(中等粒料)及 8-12 mm(粗粒料) [33]。

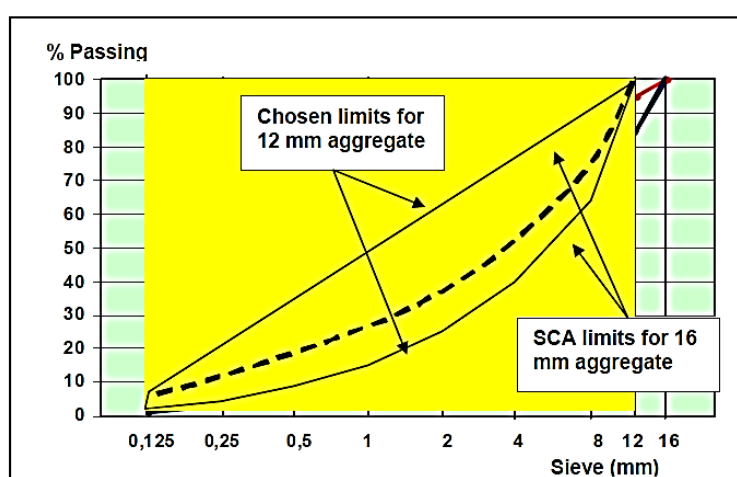


圖 2.32 選擇的粒料級配(破碎的花崗岩)[33]

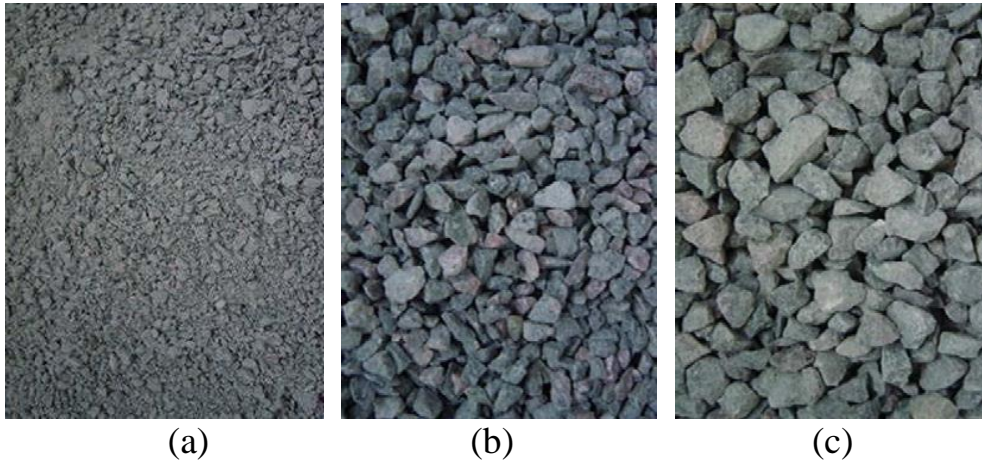


圖 2.33 粒料分級：(a)細、(b)中等、(c)粗粒料 (最大粒徑: 12 mm) [33]

混和粒料試驗結果顯示粒料級配需要在工作性做進一步改進，在級配曲線上取代細粒料，從理論最佳值來看，砂漿總量稍微增加，圖 2.34 為最後選用的級配 [33]。

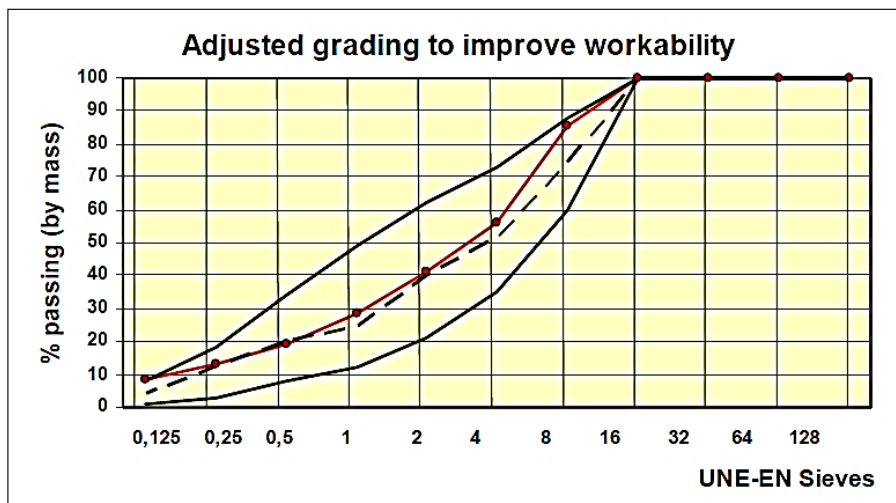


圖 2.34 總粒料級配(紅線)[33]

2.8.4 封塞用噴凝土的選擇

噴凝土經由混凝土試驗後，結果顯示，相較於傳統混凝土可以在第 90 天的齡期範圍內達到 20-25 MPa 的抗壓強度，噴凝土的最終強度值可能折減為 10MPa；而根據規範要求，傳統混凝土彈性模數須達到 20GPa，在噴凝土的部分同樣可以預期數值的折減。

然而，因噴凝土本身所具有之工程性質可藉由調整配比與級配，達到高泵送性與工作性等工程需求；此外，噴凝土層可在短時間內散熱，降低水化溫度，故從工程角度來看，噴凝土成為處置場封塞系統臨時和最終施工的優先選擇。

2.8.5 新拌噴凝土配合設計與試驗

1. 試驗材料

西班牙研究使用 3 種低鹼性水泥砂漿配比進行測試，分別為 B.1.2，B.3.4 和 A.3.1 [33]。鋁酸鈣水泥(Calcium-aluminate cement)為後來對應的配合設計，另兩組配合設計所對應的為抗硫酸鹽卜特蘭水泥(Sulphate resisting portland cement)。粒料分為粗、中等及細粒料，為破碎的花崗岩，使用重量法分配粒料比例：細粒料 51 %、中等粒料 12 %及粗粒料 37 %。為了提高水泥之工作性，應用於低鹼性水泥試驗之減水劑分別為碳化鈣(CAC)選用 SP1 聚羧酸(Policarboxylate)，pH 為 4.25、卜特蘭水泥(OPC)選用 SP2 萘甲醛(Naphtalene Formaldehyde)，pH 為 7.5。對於傳統混凝土而言，用非常低的輸氣劑劑量即可提高工作性，而增加的空氣含量是可忽略。而在設計低鹼性水泥配比時必須使用高效能減水劑，硬固混凝土的實際用量大約是 2 kg/2200 kg 混凝土，相當於 0.09%(質量比)。

2. 試驗方法

坍度和倒錐(Inverted cone)試驗用於描述工作性的特性。坍度試驗可說明混合物的流動性，水含量的添加是關鍵；倒錐試驗則可測定設計配比之潛在泵送性。為了估計坍度損失量，坍度試驗分別以 A.3.1、B.1.2、B.3.4 三種配比進行試驗，配比如表 2.23。新拌混凝土配合比例在拌和後 15 和 45 分鐘作量測，並評估新拌單位重，各別性質特性如表 2.24。根據 ASTM C 231，以 Type A 空氣儀量測空氣含量。凝聚力和泌水未做定量評估但進行定性評估[33]。

表 2.23 A.3.1、B.1.2、B.3.4 新拌混凝土配合比例[33]

組成	A.3.1	B.1.2	B.3.4
水膠比	0.85	0.9	0.75
水泥	309.70	307.0	337.00
水	262.30	277.0	316.00
粗粒料	621.00	615.0	635.00
中等粒料	201.00	200.0	205.00
細粒料	825.00	818.0	843.00
高效減水劑(1.8%)	5.58	5.5	5.70
輸氣劑(0.2%)	-	-	0.60

表 2.24 新拌混凝土特性[33]

性質	A.3.1	B.1.2	B.3.4
單位重 (t/m ³)	2.23	2.23	2.25
坍度 (cm)	17.00	12.00	13.00
凝聚力	良好	良好	良好
外觀	良好	良好	良好

2.8.6 硬固噴凝土性質探討

以砂漿試驗之數據評估混凝土最終特性。隨著時間變化，強度會隨著不同類型的水泥與齡期而有所改變。Luís Fernandez-Luco 等人[33]藉由砂漿試驗，發現噴凝土之強度相較於被噴佈的混凝土基礎有 50%的強度損失。

圖 2.35 為不同水膠比與不同類型水泥之試體，以任意齡期與 28 天齡期強度百分比進行強度與時間對數之關係比較，明顯可看出鋁酸鈣水泥 (Calcium-Aluminate)的強度發展快速，且後期強度發展趨於平緩；而卜特蘭水泥之強度則以後期為發展重點，在第 90 天齡期時之強度增加 40%。混凝土之硬固性質如表 2.25。

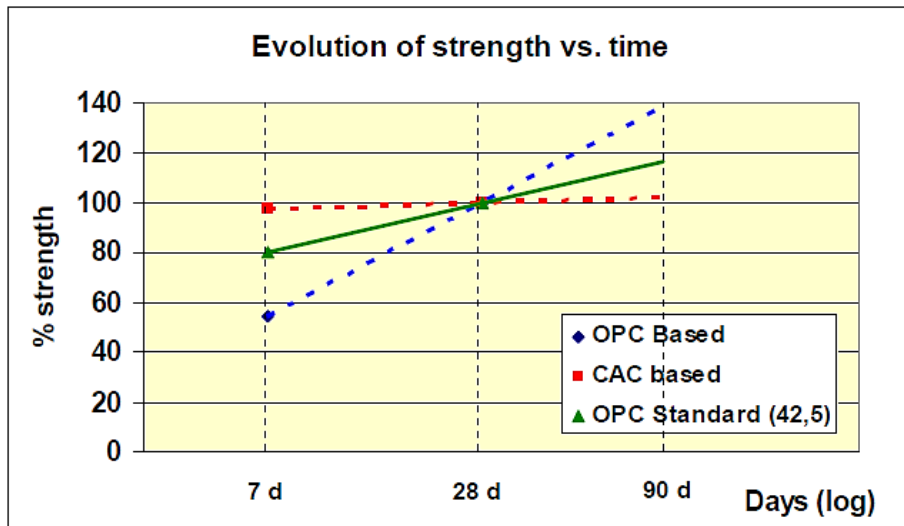


圖 2.35 各類水泥系材料之強度發展與時間對數之關係[33]

表 2.25 不同低鹼性水泥噴凝土在不同齡期的硬固性質[33]

性質		A.3.1	B.1.2	B.3.4
抗壓強度 (MPa)	7 天	18.3	16.2	11.8
	28 天	-	29.0	22.3
	35 天	18.7	-	-
	90 天	-	20.2 (1)	29.4
彈性模數 (GPa)		15.5 (35 天)	21.7 (90 天)	18.3 (90 天)

2.9 封塞用低鹼性自充填混凝土(Low pH SCC)

為了因應工程需求、提昇混凝土之流動性及充填能力，自充填混凝土(self-compacting concrete, SCC)於設計時將粗粒料用量大約減少至傳統混凝土之80%，粒料最大尺寸為通過鋼筋間隙亦有所限制，並增加化學摻料用量至臨界析離狀況，以避免高流動性造成析離。SCC 常大量利用再生材料飛灰、爐石粉及矽灰等礦物摻料，以增加漿體比重及稠度，使其有足夠懸浮力托住粗細粒料而達到材料不析離之目的。由於 SCC 本身具有足夠之稠度，在施工時可降低析離現象的發生，材料之均勻性優於經過振動搗實之傳統混凝土，並且在施工澆置時具有免振動搗實、高流動性等特性，擁有能夠通過鋼筋間隙及模版間充填能力，可藉由自身重力，立即充填成型。

SKB R-09-07 報告書[34]中提到，地下處置隧道(Deposition tunnel)入口的暫時性封塞有三個目的：(1)使處置洞(deposition holes)迅速產生水壓力，以濕潤緩衝區。(2)降低回填區域的地下水壓梯度，防止管湧(piping)發生。(3)確保運行階段回填到位，直到主隧道回填完成。處置場對於 SCC 在新拌狀態與硬固狀態分別有不同的需求；由於封塞設施不規則的幾何形狀，處於新拌狀態之 SCC，其自充填的特性須維持至少兩小時以上。此外，SCC 在硬固養護期間水化放熱溫度不可過高、混凝土的體積變化應盡量減少。

在處置場之設計概念中，應使用低鹼性混凝土代替傳統混凝土。現行開發的低鹼性混凝土大多藉由使用矽灰取代水泥重量 40%之比例達成 pH<11 之條件。根據目前研究顯示，混凝土之孔隙溶液通過 SiO₂ 消耗混凝土中之鈣化合物以降低溶液之 pH。低鹼性 SCC 之材料通常包含卜特蘭水泥、矽灰、石灰石填料、高效減水劑、優質天然細粒料、粗粒料等。

2.9.1 混凝土之性能要求

於工程施工前，針對處置場封塞設施所使用之混凝土特性要求大致如下：

1. 須具有可泵送。
2. 自密實特性，須保持自身密實性至少 2 小時。
3. 可以在普通混凝土工廠生產。

4. 最終抗壓強度至少為 10MPa。
5. 盡量降低水化反應時所產生之熱量，以減少冷卻措施之使用。膠結料之使用須控制在低用量，以減少混凝土所產生之熱量和體積上之收縮。
6. 各部件可供商業使用。
7. 混凝土與地下水接觸後之 pH 須小於 11。
8. 混凝土應盡量減少有機強塑劑，並且不得使用其他有機成分。

2.9.2 混凝土類型之選用

造成新拌和硬固混凝土發生體積變化的原因有幾項，而這對不同結構有很重要的影響。由於處置場中的封塞構造與處置場周圍的岩石呈現鑲嵌之關係，即封塞構造被固定在岩石中，因此不同情況下所造成的體積變化，如熱膨脹和各類型的收縮，可能導致混凝土和岩石之間的介面產生開裂與間隙。為了使混凝土有最小的體積變化，降低水泥水化反應時會引起熱收縮、開裂，進行設計時應使水泥所佔比例下降。有學者針對不同類型的低鹼性混凝土進行開發和測試，並獲得以下相關資訊：

1. SCC 可製成低鹼性 SCC，應用於處置場。
2. 由於低鹼性混凝土黏滯度比普通混凝土高，使得泵送的難度更大。
3. 超細填料的添加可以降低膠結材料的使用量。
4. 與普通混凝土相同或更高含量的膠結材料可使低鹼性混凝土之強度發展與普通混凝土相當。
5. 低鹼性混凝土之收縮率高於普通混凝土，且自生收縮持續時間比普通混凝土長。

2.9.3 封塞用 SCC 之配比試驗

Carsten Vogt 等人於報告中針對兩種配比進行了各別的基本性質測試[34]。現行低鹼性混凝土之配比可以藉由使用矽灰取代水泥重量 35%~40% 來實現。報告中之配比以使用之膠結材總重量進行區分，根據處置場配比設計原則應盡量減少膠結材料的使用量。

考量膠結材料含量若過低，則由於混凝土的高粘度引起的泵送性問題可能會發生，故研究分別使用每立方公尺的混凝土中加入 200 kg (B200)和 300 kg (B300)的膠結材(水泥與矽灰)，並以矽灰取代水泥重量 40%進行後續各項試驗。配比設計如

表 2.26 所示。實驗室低鹼性 SCC 拌合程序為：先加入粒料和矽灰拌合，接著加入水泥及石灰石填料拌合，再加入水及強塑劑拌合。

表 2.26 低鹼性 SCC 配比設計[34]

材料	單位	B200	B 300
水泥*	kg	120	180
矽灰	kg	80	120
水	kg	165	165
石灰石填料*	kg	369	269
砂 (0-8 mm)	kg	1,037	1,035
碎石 (8-16 mm)	kg	558	557
強塑劑*	kg	6.38	7.08
水灰比	-	1.375	0.917
水膠比	-	0.825	0.55
水固比	-	0.29	0.29

註：水泥使用 CEM I 42.5 MH/SR/LA，石灰石為 L25，強塑劑則使用 Glenium 51。

2.9.4 硬固性質

2.9.4.1 抗壓強度與抗拉強度

試體根據 SS-EN 12390-3 2001 規範，儲存在 5°C、20°C 和 35°C 三種不同溫度的水中，使用 100×100×100 mm³ 之立方試體測試抗壓強度，結果如圖 2.36、表 2.27。抗拉強度測試則根據 SS-EN 12390-6000，以 150×150×150 mm 的立方體，在 20°C，100% R.H. 下養護，試驗結果如表 2.27。

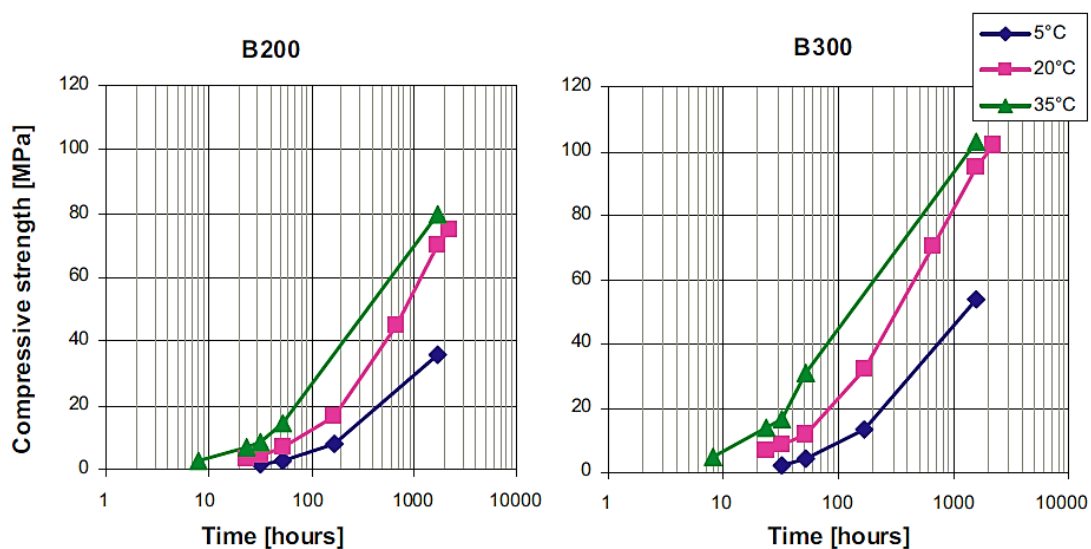


圖 2.36 B200 及 B300 91 天齡期不同溫度下之抗壓強度[34]

表 2.27 B200 及 B300 於 28 天及 91 天之抗壓強度與抗拉強度[34]

試驗	配比	B200		B300	
	齡期(天)	28	91	28	91
抗壓強度	平均值(MPa)	43.4	72.6	68.1	98.7
	最小值(MPa)	42.5	71.6	66.2	97.8
抗拉強度	平均值(MPa)	4.20	5.70	5.5	6.27
	最小值(MPa)	3.88	5.52	5.03	6.0

根據 B200 及 B300 系列在不同溫度下的抗壓強度的發展，如圖 2.36。可以發現，B300 中較高的膠結材料含量會有較高的抗壓強度。91 天齡期時，分別測出 B200 及 B300 之 150 mm 立方體在 20°C 下具有約 75MPa、100MPa 的抗壓強度。與 B200 具有相同的水膠比和膠結材含量的傳統混凝土比較，在 91 天所測得之抗壓強度約為 20MPa。相似水分配比和膠結材料含量的情況下，B200 與 B300 設計配比相較於普通混凝土在強度發展相對緩慢。然而，最終強度則遠高於傳統混凝土[37]。

2.9.4.2 滲透性質

根據 SS-EN 12390-8 2000 規範，150×150×150 mm 的試體經過 3 個月的養護後進行滲透性試驗。B200 測得之透水性約為 5 mm，B300 則為 3 mm，故上述低鹼性 SCC 配比滿足「滲透性小於 50 mm」的要求，可視為具有防水效果[38]。然而，考慮岩石和混凝土之間介面可能有裂縫或接觸區域未完全緊密貼合，仍可能有水分傳輸的情形發生。

2.9.4.3 水化熱之峰值

水化作用期間的水化熱發展為影響新拌混凝土裂縫生成之因素。圖 2.37 為 B200 和 B300 於新拌期間所測得之熱量發展。相較於傳統混凝土新拌時之溫度上升差值為 40°C ~ 45°C；B200 的溫度差值約 7°C，B300 的溫度差值則約 9°C，後兩組配比之溫度上升幅度非常低[39]，顯示低鹼性 SCC 的低熱發展與緩慢的強度發展具有良好相關性。

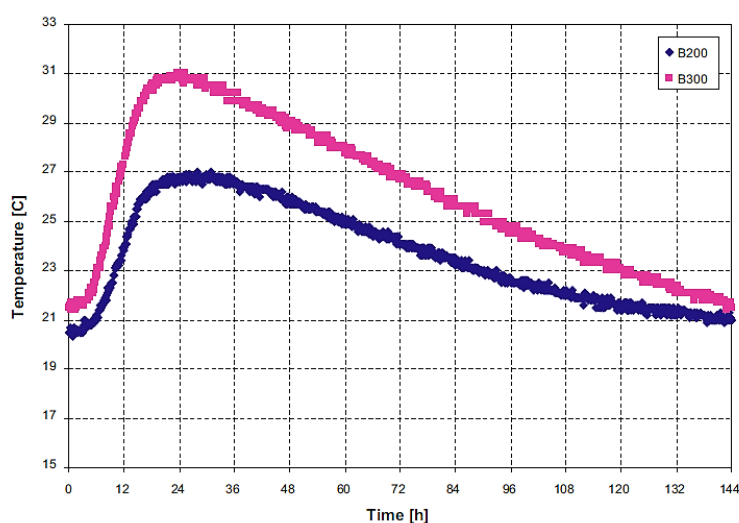


圖 2.37 B200 和 B300 新拌期間之熱量發展趨勢[34]

2.9.5 乾縮與潛變

SCC 是一種能夠在重力作用下流動的混凝土，無需額外的壓實工作，能夠完全填充模板，實現完全壓實。通常認為在新拌狀態下具有與常規混凝土不同的性能，但在硬固時具有相似的性能。然而，有研究數據顯示自充填混凝土具有比普通混凝土更高的潛變比[35]。

由於低鹼性 SCC 需使用高含量的細粉，使得混凝土本身對早期的體積變化更敏感[36]。因此，使用低鹼性 SCC 時，須注意其早期體積變化和潛變性能。

2.9.6 封塞系統與 SCC 之收縮關係

低鹼性 SCC 的收縮性能對於封塞結構的密封性能有非常重要的影響。處置場中的封塞構件將被設置在濕度不斷變化的隧道內。由於封塞整體結構十分巨大，因此可以認為只有封塞的表面可能受到環境的影響，而大多數封塞體積變化主要源自於密封條件下的收縮(即自生收縮，autogenous shrinkage)。

根據瑞典 SS 13 72 15 2000 標準規範所定義，收縮率的測量從養護齡期第 7 天開始。由於以前述方式無法獲得低鹼性 SCC 前 7 天之體積變化量，將會導致封塞系統安全性評估上的不便，故分別以阿基米德原理、數字膨脹計[40]以及標準波束(standard beams)三種方式進行體積變化量之測定，並進行討論分析。

1. 阿基米德原理

通過排開液體體積測定試體體積變化量，測量結果如圖 2.38 顯示，兩種混合物於前 6 小時之體積變化量很大。之後，B300 的速度略趨緩慢，探討其可能原因為 B300 具有更多的膠結材含量與較低水膠比，促使微結構和強度的發展更快，因此在硬化過程中體積變化將會減慢。兩配比於 24 小時後的長度變化約為 1.3mm / m [34]。

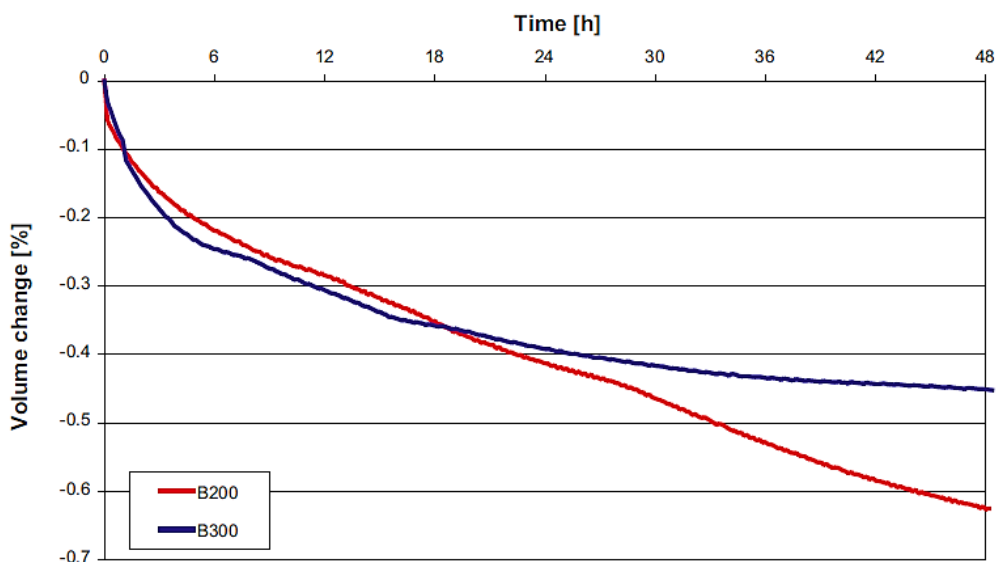


圖 2.38 排開液體體積隨時間之變化量(%) [34]

2. 數字膨脹計

以膨脹計長時間測量 B200 和 B300 的收縮，二者之總收縮率如圖 2.39 所示，約 4.5 個月後測得的總變形量約為 1.2mm / m；約有 2/3 的總變形量於測量的前 24 小時發生，圖 2.40 為前 24 小時之收縮量，圖 2.41 為 24 小時至 4.5 個月之收縮量。在兩個測試的混合設計中，前 24 小時內的變形幾乎相同，顯示兩種配比以相同的水含量和水粉比（粉末=水泥+砂灰+石灰石填料）可得到相似的體積變化量[34][40]。

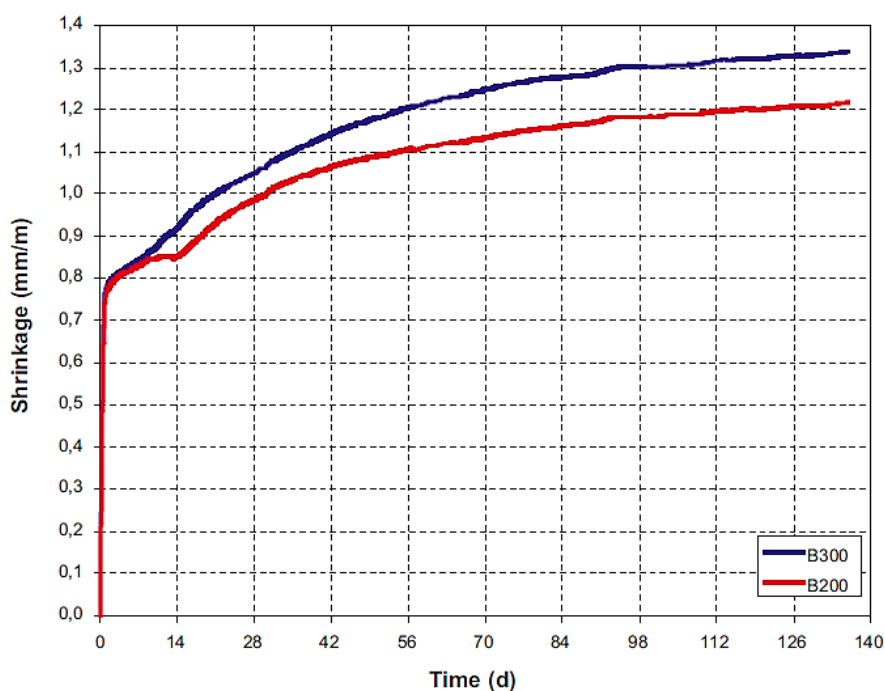


圖 2.39 B200 和 B300 之總收縮率[34]

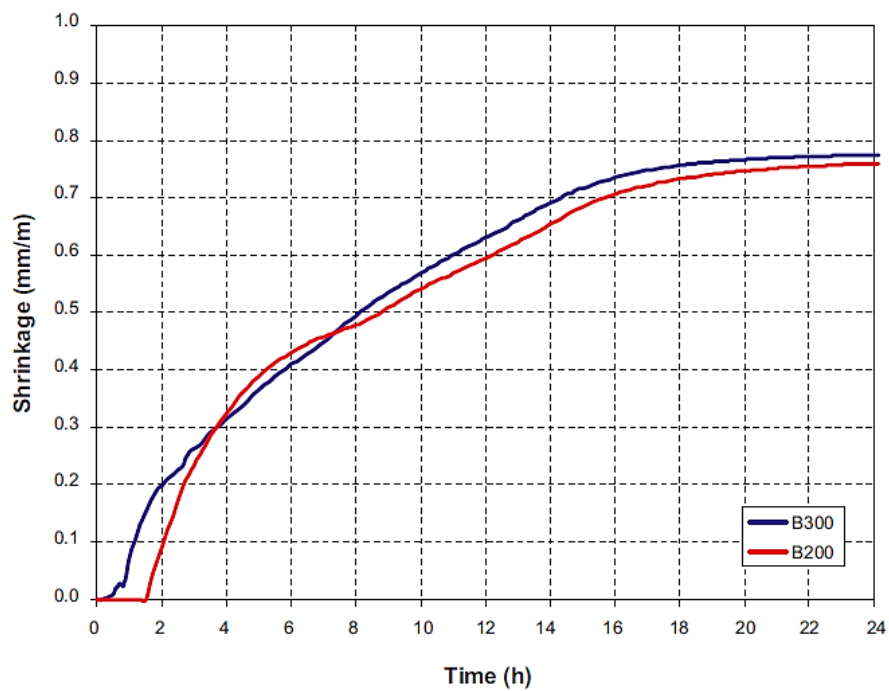


圖 2.40 B200 和 B300 前 24 小時之收縮量[34]

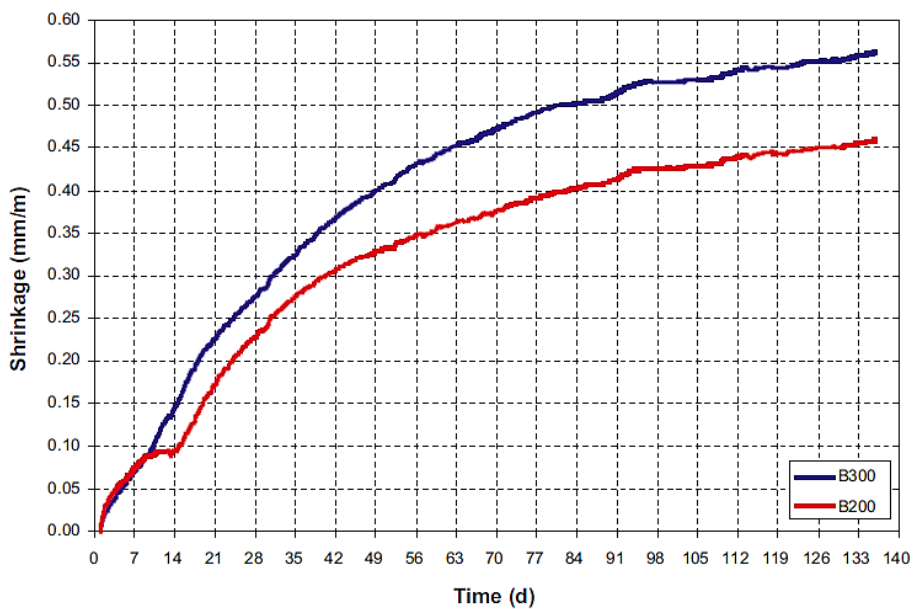


圖 2.41 B200 和 B300 24 小時後至 4.5 個月之收縮量[34]

3. 標準波束(standard beams)

比較使用膨脹計(圖 2.41)以及使用標準波束(圖 2.42)各別測得之收縮率時，試體使用膨脹計所測得之收縮率為使用標準波束的兩倍以上，可能造成此現象的原因為使用之試體及壓密程度不同的關係所致。使用標準波束所測得的收縮率明顯較低，B300 為 0.28 mm / m，B200 為 0.17 mm / m；然而，測試起始時間為 24 小時後，因此實際總變形應較量測值來的大。由於未密封波束狀態下紀錄之收縮率結合了自生收縮和乾燥收縮，B200 及 B300 兩種混合物之收縮率大致相同，故 B200 的乾燥收縮率勢必高於 B300 的乾燥收縮率。

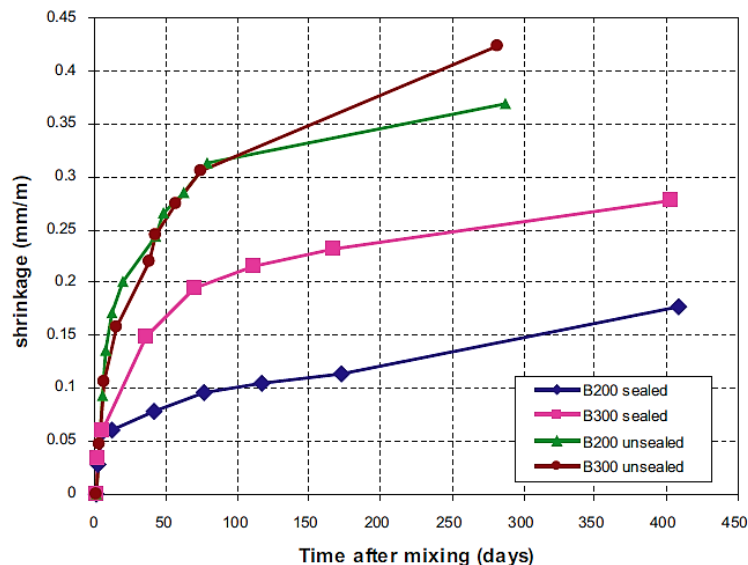


圖 2.42 使用標準波束測得之 B200 和 B300 收縮量[34]

根據上述結果，使用膨脹計量測封塞系統之變形量僅適用於早期之測量；而密封之標準光束則適用於 24 小時後密封條件下的收縮率測量。將膨脹計於 24 小時內所測得之數據配合標準波束於 24 小時後所測得之收縮率曲線做組合可能可以得到最接近封塞系統之實際自生收縮情形。

綜合前述試驗結果，低鹼性 SCC 具有高流動性，結合良好的穩定性。由於低水泥用量，所以水化反應放熱也相對較傳統混凝土來得低。在強度發展方面，在早期強度發展較為緩慢，並於 28 天後抗壓強度分別達到 53 MPa (B200)和 71 MPa (B300)；三個月後抗壓強度 B200 達到 75 MPa，B300 達到 100 MPa。

硬固後之低鹼性 SCC 其抗拉強度與一般傳統混凝土相似。兩種配比設計之間沒有太大的差距，但 B300 有更高的抗壓強度和抗拉強度。而早期體積變化相當高，但密封條件下的收縮率較低，且 B200 的自生收縮率低於 B300。

第三章、實驗規劃

3.1 試驗構想及流程

本子項計畫四的研究流程如圖 3.1 所示。

在進行子項計畫四「處置坑道封塞用低鹼性混凝土管制資訊研析」研究時，首先進行「國際處置坑道封塞用低鹼性混凝土相關資訊蒐集研究」，重點包括(1)低鹼性水泥介紹與國際規範要求、(2)封塞用低鹼性混凝土研究及應用現況、(3)封塞用低鹼性混凝土性質要求、工程特性及耐久性質。

其次，進行「處置坑道封塞用低鹼性混凝土膠結漿體配比設計及性質研析」，膠結材料使用矽灰及飛灰取代部分水泥，取代量介於 40~65%，根據相關研究顯示，矽灰取代部分水泥是最有效降低水泥孔隙溶液 pH 的方法，另一方面，考量矽灰使用成本相對於其他礦物摻料而言相對偏高，故膠結材料以矽灰取代水泥方式為主，並加入飛灰作為第二項礦物摻料，並參考各國文獻配比設計，進行試驗項目如下：

(1) 膠結漿體 pH 測定方法細節步驟建立

由於目前並無對水泥混凝土 pH 的標準檢測方法，因此需要對量測方法加以研究，參考國際研究成果建立實驗室中檢測水泥混凝土 pH 的標準方法與能力，並以 105 年「用過核子燃料處置安全審驗技術國際資訊研析」子項計畫三：「低鹼水泥混凝土於最終處置設施之應用研究」為基礎，針對各項影響因素進行重覆驗證，以建立 pH 測定方法。

(2) 膠結漿體研究

設計固定水膠比 0.5 之膠結漿體，並製作 5×5×5 cm 立方試體。膠體配比改變矽灰及飛灰取代水泥用量，分別為 40、50、60 及 65%，及固定矽灰取代量為 35% 等五個系列共 18 個配比進行試驗。

量測流度(參考 CNS 1010 水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法 8.3 流動性之測定)及凝結時間(參考 CNS 786 水硬性水泥凝結時間檢驗法(費開氏針法))，並進行齡期 14、28、56 及 90 天試體的 pH、抗壓強度(CNS 1010 水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法)等試驗。以瞭解矽灰取代水泥量對漿體凝結時間、pH、化學成分、

CaO/SiO₂ 比及工程性質等影響。

由上述結果選擇可以有效降低漿體 pH 及具有預期工程性質的卜作嵐材料取代量，再進行混凝土配比設計及性質研究。

本次計畫內容目標在設計自充填混凝土，前述所探討的漿體配比，除配合自充填混凝土膠結材料將使用雙系統(水及矽灰)為目標而設計外，並以去年度漿體研究配比作為今年度漿體配比規劃的先導研究，進而探討參系統(水泥、矽灰及飛灰)的漿體性質，而本次研究之漿體配比為參考 105 年子計畫三之實驗成果所進行之漿體設計。

(3) 封塞用低鹼性混凝土性質要求、工程特性及耐久性

先以前述膠結漿體試驗結果為基礎，再參考國外低鹼性封塞用混凝土研究及應用的設計配比，設計本子項流程的混凝土配比，以驗證國外的混凝土設計配比性能。試驗系列部份，參考國外文獻配比，依據膠結材料重量不同分為 B200 系列與 B300 系列。B200 系列係指 1m³ 之混凝土中，膠結材料重用量為 200 kg；B300 系列則指 1m³ 之混凝土中，膠結材料重用量為 300 kg。以前述二系列作為混凝土設計根據，於 B200 系列，設計固定水膠比 0.825，配比改變矽灰取代水泥用量，分別為 40、50 及 60% 進行試驗，並以添加強塑劑方式使混凝土達到設計坍度；試驗項目於新拌性質部份包括：凝結時間、坍流度及流下性試驗；硬固及耐久性則包含：抗壓強度、角柱乾縮、角柱硫酸鹽侵蝕、彈性模數與快速氯離子滲透等試驗。B300 系列則作為驗證系列，設計固定水膠比 0.55，配比改變矽灰取代水泥用量，分別為 40、50 及 60% 進行試驗，試驗項目僅包含抗壓強度與 pH。

據以提出「處置坑道封塞用低鹼性混凝土新拌及硬固性質研析」、及「處置坑道封塞用低鹼性混凝土耐久性研析」，進而「探討封塞用低鹼性混凝土之配比技術與工程特性」。

最後，綜整國際資訊及試驗成果，提出「處置坑道封塞用低鹼性混凝土之配方分析審查重點及注意事項」，以完成結案報告。

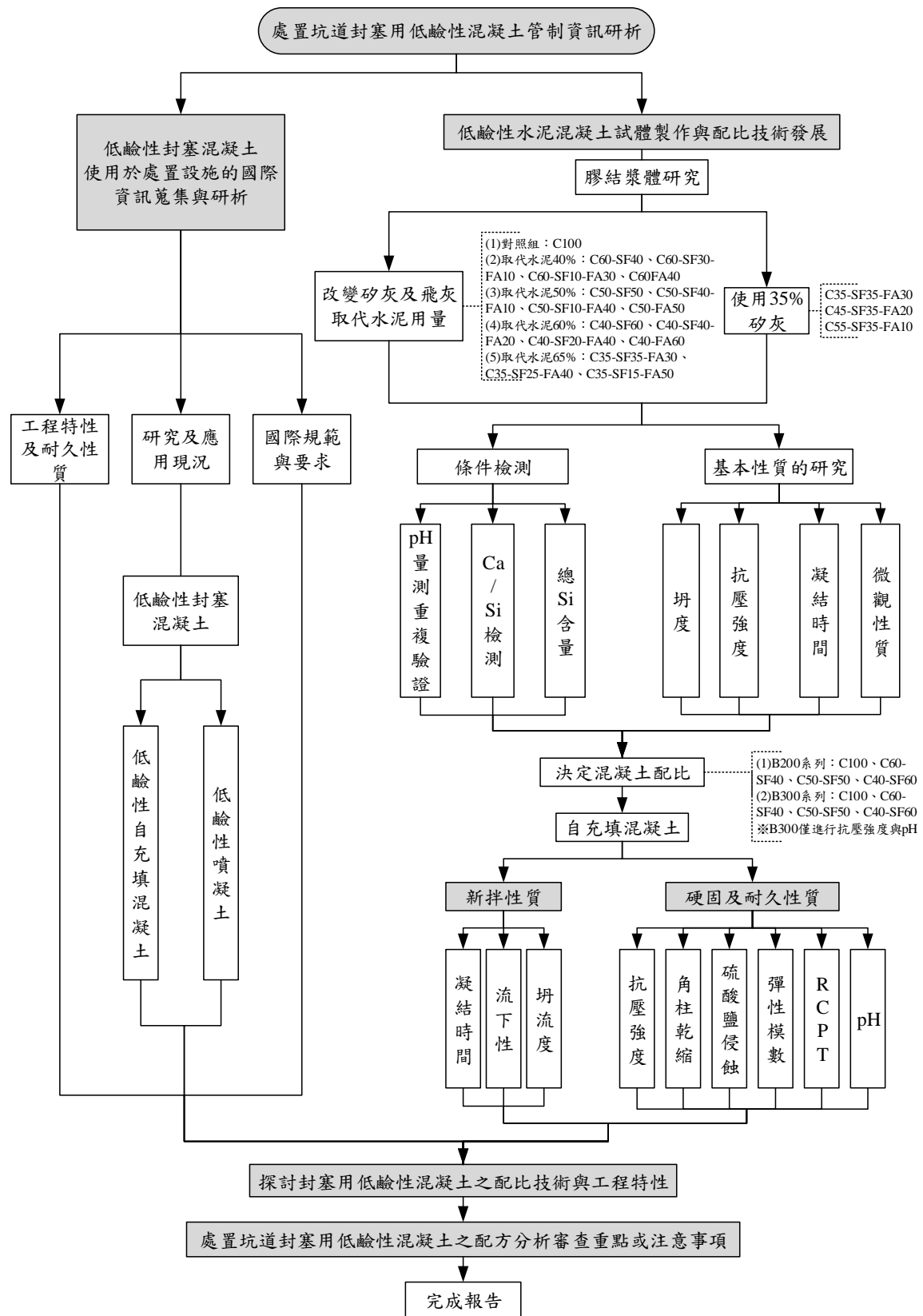


圖 3.1 子計畫四研究流程圖

3.2 試驗材料

(1) 卜特蘭水泥

水泥採用台灣水泥公司所生產之卜特蘭水泥第一型，採一批次購置，將其密封包裝後放置乾燥貯藏空間，以避免受潮而影響水泥性質。水泥化學成份如表 3.1 所示。

表 3.1 水泥成分分析表

試驗項目	CNS 61 R2001 規格	試驗結果(%)
二氧化矽(SiO ₂)	---	22.10
三氧化鋁(Al ₂ O ₃)	---	5.40
三氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	---	3.10
氧化鈣(CaO)	---	64.60
氧化鎂(MgO)	Max.6.0	1.40
三氧化硫(SO ₃)	Max.3.0	-
游離石灰(F-CaO)	---	-
含鹼當量 Na ₂ O _{eq} = Na ₂ O+0.658K ₂ O	Max.0.6	-
燒失量(I.L)	Max.3.0	1.06
鈣矽比		2.92

(2) 矽灰

使用 ELKEM Microsilica Grade 951-U 型，顏色為灰色的粉末，粒徑大小為 0.1-0.2 μm，比重 2.2 (交泰興有限公司提供)，比表面積為 2,200-2,600 m² /kg，SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 及 SO₃ 含量分別為 95、0.6、<0.05、0.4、0.3 及 <0.20 %，鈣矽比 0.004，細度(通過 325 號篩) > 90%。

(3) 飛灰

使用燃煤電廠飛灰，如圖 3.2，由臺灣電力公司林口發電廠提供，其用為膠

結材之主要基質，細度約為 $447 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，比重為 2.2。



圖 3.2 飛灰粉末

(4) 細粒料

本研究中，膠結材料相關試驗用砂，採用天然河砂與機制砂混合使用，天然砂為久大建材所提供之天然粒料，取自花蓮河砂；機制砂為廣州機制砂。本研究根據 CNS1240 規範，以天然比機制 8：2 混合，級配之粒徑分布曲線如圖 3.3，混合後之乾密度 2.72、吸水率 1.22%、細度模數 2.70。

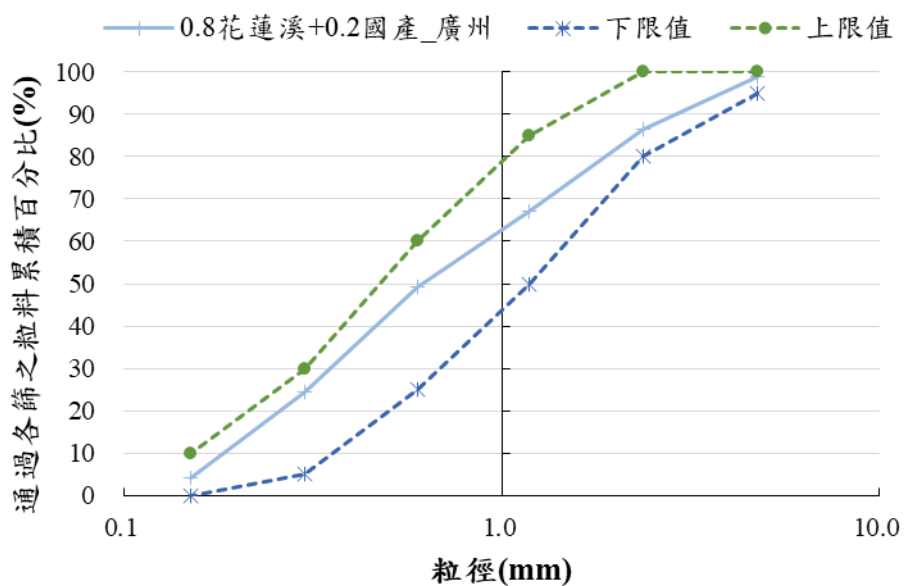


圖 3.3 細粒料混合粒徑分布曲線

(5) 粗粒料

粗粒料使用久大建材之粗粒料，取自新竹油羅溪，最大粒徑為 19 mm，乾密度 2.55、吸水率 2.09。圖 3.4 為其根據 CNS1240 規範選定之粒徑分布曲線。

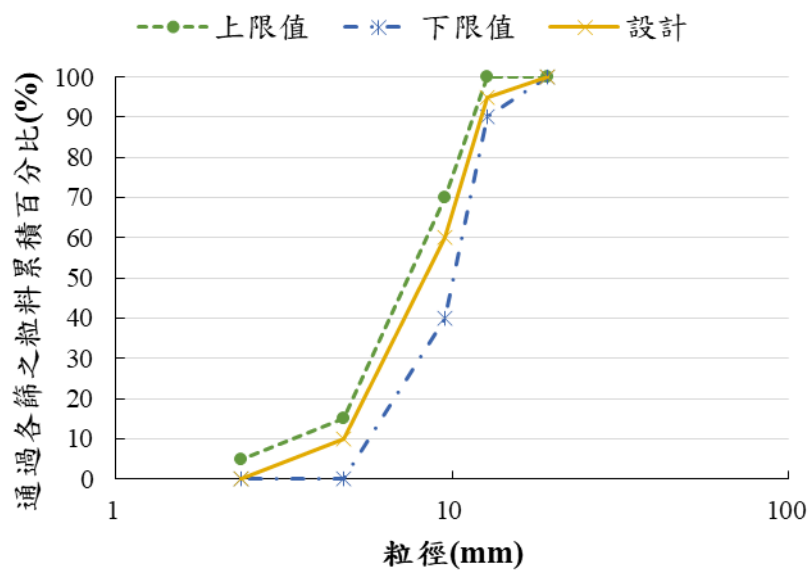


圖 3.4 粗粒料粒徑分布曲線

3.3 試體編號及級配

3.3.1 膠結漿體研究

(1) 以矽灰與飛灰取代不同水泥重量的漿體性質

以矽灰與飛灰取代 40、50、60 及 65% 水泥重量，水膠比固定為 0.5，共 16 組配比編號分別如

表 3.2 所示；其中，C 代表水泥，SF 為矽灰，FA 為飛灰，而各英文代號後出現之數字為各別材料於膠結材料中所佔比例。

表 3.2 各系列矽灰、飛灰取代漿體配比

系列			
C60-SF40	C50-SF50	C40-SF60	C35-SF35-FA30
C60-SF40-FA 0	C50-SF50-FA 0	C40-SF60-FA 0	C35-SF15-FA50
C60-SF30-FA10	C50-SF30-FA20	C40-SF40-FA20	C35-SF25-FA40
C60-SF10-FA30	C50-SF20-FA30	C40-SF20-FA40	C35-SF35-FA30*
C60-SF 0-FA40	C50-SF10-FA40	C40-SF 0-FA60	C45-SF35-FA20*
	C50-SF 0-FA50		C55-SF35-FA10*

註：C35-SF35-FA30、C45-SF35-FA20、C55-SF35-FA10，3 組配比为考量經濟成本問題而固定矽灰取代比例 35%，以調整水泥與飛灰取代比例，進行漿體抗壓與 pH 之探討。

3.3.2 SCC 混凝土性質研究

混凝土系列參考國外文獻，可分為 B200 及 B300 二部份：

1. B200 系列部份：以矽灰取代 40、50 及 60% 水泥重量，水膠比固定為 0.825，表 3.3 為試驗配比代碼，表 3.4 則為相應試驗代碼。以進行流下性試驗為例，如試驗配比为 C100，則試驗代碼表示為 B200-C100-FDA，B200 為試驗系列(與 B300 作區別)，C 為水泥，SF 為矽灰，接於二者之後之數字為佔膠結材料中之重量比例；FD 取自乾縮之英文單字字首縮寫。

表 3.3 B200 系列配比代碼

試驗配比
C100
C60-SF40
C50-SF50
C40-SF60

表 3.4 B200 系列試驗代碼

試驗項目	代碼
流下性試驗	FD
坍流度	SL
凝結時間	F
抗壓強度+ pH	C
角柱乾縮乾縮	DS
角柱硫酸鹽侵蝕	SFA
彈性模數	Ec
RCPT	R

2. B300 系列部份：以矽灰取代 40、50 及 60% 水泥重量，水膠比固定為 0.55，表 3.5 為其試驗項目與其對應試驗代碼。以進行抗壓強度試驗為例，如試驗配比为 C100，則試驗代碼表示為 B300-CA，B300 為試驗系列，與 B200 作區別，C 取自抗壓強度之英文單字字首縮寫，A 則代指為配比 C100。

表 3.5 B300 系列試驗代碼

試驗項目	C100	C60-SF40	C40-SF60	C50-SF50
抗壓強度+ pH	CA	CB	CC	CD

3. B200 及 B300 混凝土配比設計如
 4. 表 3.6 所示，各配比以控制坍流度 60cm~70cm 之方式添加強塑劑。

表 3.6 B200 及 B300 混凝土配比設計

單位：kg/m³

系列	配比	水泥	矽灰	水	強塑劑	粗粒料	細粒料
B200	C100	200	-	189.31	6.37	558	1037
	C60-SF40	120	80	189.31	7.80	558	1037
	C50-SF50	100	100	189.31	10.39	558	1037
	C40-SF60	80	120	189.31	11.04	558	1037
B300	C100	300	-	189.27	8.32	557	1035
	C60-SF40	180	120	189.27	7.15	557	1035
	C50-SF50	150	150	189.27	10.39	557	1035
	C40-SF60	120	180	189.27	11.04	557	1035

3.4 實驗設備及儀器

(1) 水泥漿體拌合機

實驗採用之水泥拌合機出產型號為 YSL-11007，具有五段變速與數位定時設定，其轉速為 100-500 rpm，如圖 3.5 所示。主要用於膠結材、細粒料及拌合水之混合料攪拌均勻使用，並依 CNS 3655 水硬性水泥可塑稠性水泥漿及壩料之力學拌合法中所規定之拌合步驟進行砂漿試體之製作。



圖 3.5 水泥砂漿拌合機

(2) 水泥砂漿流動台

水泥流動台符合 CNS 1012 水硬性水泥試驗用之流動性台規定，為控制砂漿試體之流動性，以期表現出不同配比間之流動性。如圖 3.6 所示。



圖 3.6 水泥砂漿流動台

(3) 油壓沖床

本實驗作為破碎漿體、砂漿及混凝土試體之油壓沖床，如圖 3.7 所示。將試體破碎後以研磨棒與鉢，研磨至所需之粒徑大小，如圖 3.8 所示。



圖 3.7 油壓沖床



圖 3.8 研磨棒與鉢

(4) 自動抗壓機

本研究採用之萬能試驗機為 ELE 公司所生產之 200 噸自動萬能試驗機，如圖 3.9 所示。可設定各種類試體之加壓範圍及加壓速率，並依試體種類搭配承壓座使用。承壓座如圖 3.10 所示。



圖 3.9 萬能試驗機



圖 3.10 承壓座

(5) 費開氏試驗儀

儀器如圖 3.11 所示，其裝置為支架上一支 $300\pm 0.5\text{g}$ 之活動圓桿，上端為直徑 $10\pm 0.05\text{mm}$ ，長度為 50mm 之活動圓柱，量測漿體之標準稠性；下端為直徑 $1\pm 0.05\text{mm}$ ，長 50mm 之標準針(費開氏針)，用以量測純漿體之初終凝時間。



圖 3.11 費開氏試驗儀

(6) 混凝土凝結時間試驗儀

圖 3.12 為混凝土凝結時間試驗儀，以不同尺寸之貫入針量測混凝土篩分後之砂漿初凝、終凝時間。



圖 3.12 混凝土凝結時間試驗儀

(7) 酸鹼檢測儀

儀器如圖 3.13 所示，用以量測漿體、砂漿及混凝土在不同齡期之孔隙溶液 pH。手動溫度補償，量測範圍 0-14 pH、解析度 0.001 pH、精準度 ± 0.01 pH。



圖 3.13 酸鹼性計

(8) 數位式熱壓膨脹試驗儀

圖 3.14 為熱壓膨脹試驗儀，於本計畫中用以量測混凝土角柱乾縮與角柱硫酸鹽侵蝕之長度變化量，最大量測範圍 $\pm 6.0\text{mm}$ ，使用前須以鋼棒進行長度校正，並確認儀器是否處於水平狀態。



圖 3.14 熱壓膨脹試驗儀

(9) 電源供應器與壓克力水槽

進行快速氯離子滲透試驗(RCPT)時，使用之直流電源供應器與壓克力水槽如圖 3.15。電源供應器部份，電壓輸出範圍為 0-60V，電流輸出範圍 0-3A。壓克力水槽則分為陰極與陽極兩側；陰極置放氯化鈉溶液，陽極則為氫氧化鈉溶液。

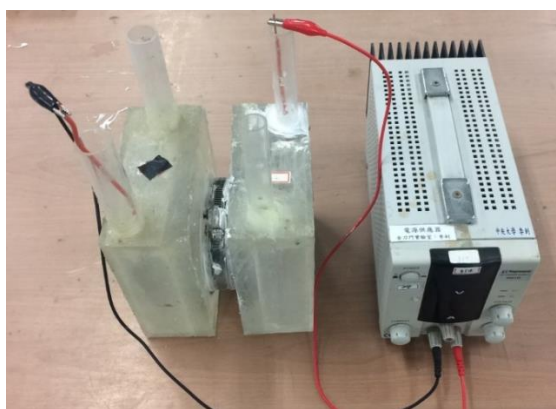


圖 3.15 電源供應器與壓克力水槽

(9) 彈性模數試驗儀器

進行彈性模數試驗之設備包含：TDS-530 數據擷取器，用以擷取混凝土圓柱試體於抗壓過程中承受之瞬時荷重與試體形變量，如圖 3.16；變位計，量測混凝土圓柱試體於抗壓過程中試體各側承受之形變量，如圖 3.17。



圖 3.16 數據擷取器



圖 3.17 變位計與圓柱試體

(10) V 形漏斗

如圖 3.18，以卸出口斷面 6.5×7.5 cm 之 V 形漏斗進行混凝土流下性試驗，根據固定體積混凝土之流下時間判斷混凝土品質。



圖 3.18 V 形漏斗

3.5 實驗方法

3.5.1 新拌試驗

相關自充填混凝土之新拌性質試驗係根據行政院公共工程委員會之施工網要規範 03315 與 CSN 14841 進行實驗，試驗要求如表 3.7。

表 3.7 SCC 相關試驗規定

流動障礙等級		1	2	3
流動性	坍流度(mm)	650~750	600~700	500~600
材料析離 抵抗性	V ₇₅ 漏斗 流下時間(sec)	10~25	7~20	7~20
	500mm 坍流度 到達時間(sec)	5~20	3~15	3~15

1. 流下性試驗

根據 CNS 14841 自充填混凝土流下性試驗法(漏斗法)，以卸出口斷面 6.5×7.5 cm 之 V 形漏斗進行混凝土試驗，根據固定體積混凝土之流下時間求出流下速度判斷自充填混凝土之黏稠性質，圖 3.19 為現場實驗狀況。



圖 3.19 流下性試驗

2. 流度試驗

根據 CNS 1010 水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法要求，於拌合完成後，將砂漿分兩層填入模具中，每層以搗棒搗實 25 下，並將模具提起，並在流動台上 15 秒內振動 25 下，每次落距 12.7 公厘，並量測其直徑 4 次，取平均值。

3. 坍流度試驗

根據 CNS 14842 高流動性混凝土坍流度試驗法進行混凝土坍流度試驗，並以添加強塑劑的方式控制各配比之坍流度範圍 60-70cm。圖 3.20 為現場實驗狀況。使用 CNS 1176 所規範之平截圓錐試體模具進行試驗，將混凝土於 2 分鐘內不分層一次填入坍度錐形模內，並在刮除餘料後於 2-3 秒內將模具垂直向上拉起 30cm，待混凝土停止流動後，量測試體之最大直徑以及垂直於最大直徑之直徑，並取平均。

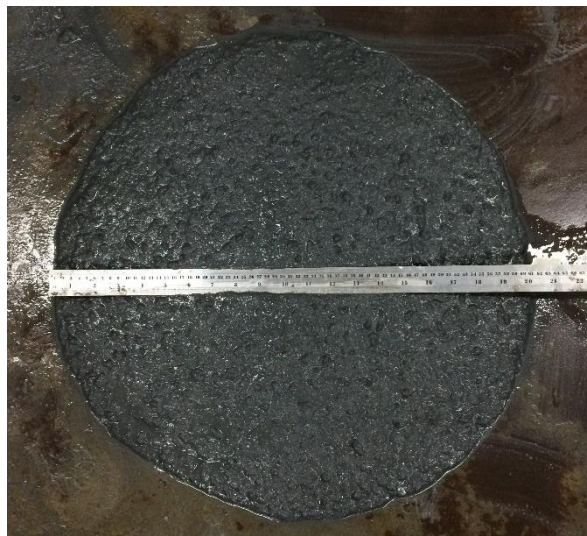


圖 3.20 坍流度試驗

4. 凝結時間試驗

漿體部份，根據 CNS 786 水硬性水泥凝結時間檢驗法(費開氏針法)進行初凝時間及終凝時間量測，以判定標準費開氏針自漿體表面，於 30 秒內貫入深度達 25mm 之時間為凝結時間為初凝時間，而直至費開氏針無法在將體表面留下痕跡時，即為終凝時間。

混凝土部份，根據 CNS 14220 混凝土凝結時間試驗法進行初凝時間及終凝時間量測，初凝時間判定標準為水泥與水接觸後，直至混凝土體篩分出之水泥砂漿，其貫入阻抗達 3.5 MPa 時所經過之時間；終凝時間判定標準則為水泥與水接觸後，直至混凝土體篩分出之水泥砂漿，其貫入阻抗達 27.6 MPa 時所經過之時間。

3.5.2 硬固試驗

1. 抗壓強度

漿體部份，依據 CNS 1010 規範之要求，將水泥漿灌入試體尺寸 5×5×5 cm 立方塊之模具中，並以保鮮膜加以覆蓋後置入溫度 23°C 相對溼度 90% 以上之環境養護，一天後拆模，並依齡期進行抗壓強度試驗。

混凝土部份，依據 CNS 1232 規範之試驗程序，將混凝土試體灌入尺寸 $\phi 10 \times 20$ cm 圓柱模具中，並以保鮮膜及濕布加以覆蓋後於室溫環境下養護，一天後拆模、浸泡於飽和石灰水中養護，並於設計試驗齡期將試體自水中取出，以面乾狀態進行抗壓強度試驗，如圖 3.21。



圖 3.21 混凝土抗壓試體

2. 彈性模數試驗

參照 ASTM C469，如圖 3.22。將混凝土圓柱試體側邊套上變位計，並在下方設置荷重檢測儀，檢測試體承受荷重時相對之形變量，並以數據擷取器擷取各側變位計之瞬時數據資料，探討混凝土於齡期 28 天及 90 天之應力與應變關係。



圖 3.22 荷重、變位實驗設置

3. 角柱乾縮試驗

參考 CNS 11056 卜特蘭水泥砂漿乾燥收縮量測定法，製作 $7.5 \times 7.5 \times 28.5$ cm 之混凝土角柱試體。試體拆模後進行濕養護三天，再置於室溫下乾養護，並於乾養護之第 4、11、18 及 25 天，以熱壓膨脹試驗儀量測試體之於原始長度之變化量，探討混凝土之體積穩定性。

4. 角柱硫酸鹽試驗

參考 CNS 14794 水硬性水泥砂漿棒暴露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法，製作 $7.5 \times 7.5 \times 28.5$ cm 之混凝土角柱試體，拆模後進行濕養護直至 $5 \times 5 \times 5$ cm 方塊試體抗壓強度達 20MPa 時，再將試體浸泡於濃度 50.0g/L 之硫酸鈉溶液中，並於浸泡後 1、2、3、4、5、13 及 15 週，以熱壓膨脹試驗儀進行試體膨脹量量測，探討混凝土之抵抗硫酸鹽侵蝕之能力。

5. 快速氯離子滲透試驗

試驗程序參照 ASTM C1202，以 $\phi 10 \times 5$ cm 之混凝土試體進行 56 天與 90 天之試驗；試體側面以環氧樹脂塗封後進行抽真空 3 小時，於浸泡於去氣水中 18 小時後進行試驗。試體置放於兩壓克力槽之間，如圖 3.23，各槽內均放置一 20 號篩徑的不鏽鋼網做為電極，並於試驗槽內置入 0.3 N 氫氧化鈉溶液作為陽極，另一側則置入 3% 氯化鈉溶液作為陰極；試驗期間施加 60 V 直流電壓，於 6 小時試驗期間內，紀錄每 30 分鐘通過試體電流，如圖 3.24。



圖 3.23 壓克力槽設置



圖 3.24 RCPT 試驗情形

第四章、結果與討論

4.1 低鹼性膠結材料 pH 量測方法驗證

現行各國針對低鹼性封塞混凝土之酸鹼值檢測方式大略可分為破壞性(Destructive methods)與非破壞性(Non-destructive methods)兩類，在破壞性檢測的方法中，移地浸取法(Ex-situ leaching method, ESL)因其便利性與檢測穩定性較高為較多國家所使用[13]。ESL 的使用常見於土壤酸鹼值檢測，其標準檢測程序可參照 ASTM D4972 土壤 pH 之標準檢測方法[12]。在 105 年「用過核子燃料處置安全審驗技術國際資訊研析」子項計畫三：「低鹼水泥混凝土於最終處置設施之應用研究」的成果中也得到初步驗證。

去年度子計畫三之 ESL 標準量測程序之建立與合適性評估，其研究目的主要在於與文獻[2]所提及之影響因子進行初步實驗成果驗證，並藉由穩定性試驗確認實驗操作與結果之穩定性。今年度則為確認細節程序、相關因子影響及重複性行為，以評估是否適合作為本土化的 pH 量測方法。

4.1.1 ESL 標準測量程序之建立

常見之 ESL 法量測程序為取出試體以油壓沖床壓碎，再以研磨棒於 15 分鐘內完成研磨，並取通過#200 篩的粉料，分裝至數只燒杯中，每只燒杯放入重量比 1:1 之試樣粉料與去離子水混合後，利用磁力攪拌器攪拌 5 分鐘，隨即進行 pH 之量測(量測須於 5 分鐘內完成)。

以下，針對破壞性檢測中之 ESL 法進行影響因素探討，探討的因素包括(1)試體測試時之不同含水狀態、(2)粉料暴露空氣時間、(3)試體顆粒尺寸大小、(4)不同溫度環境，及(5)重複性等，進行試體 pH 之檢測，以確定各影響因素對試體 pH 檢測結果之影響，如圖 4.1 所示，並建立完整之 pH 檢測程序。試驗配比選用固定 W/B=0.5，矽灰取代水泥 0% 及 40% 的水泥漿體，試體編號分別為 C100 及 C60-SF40。

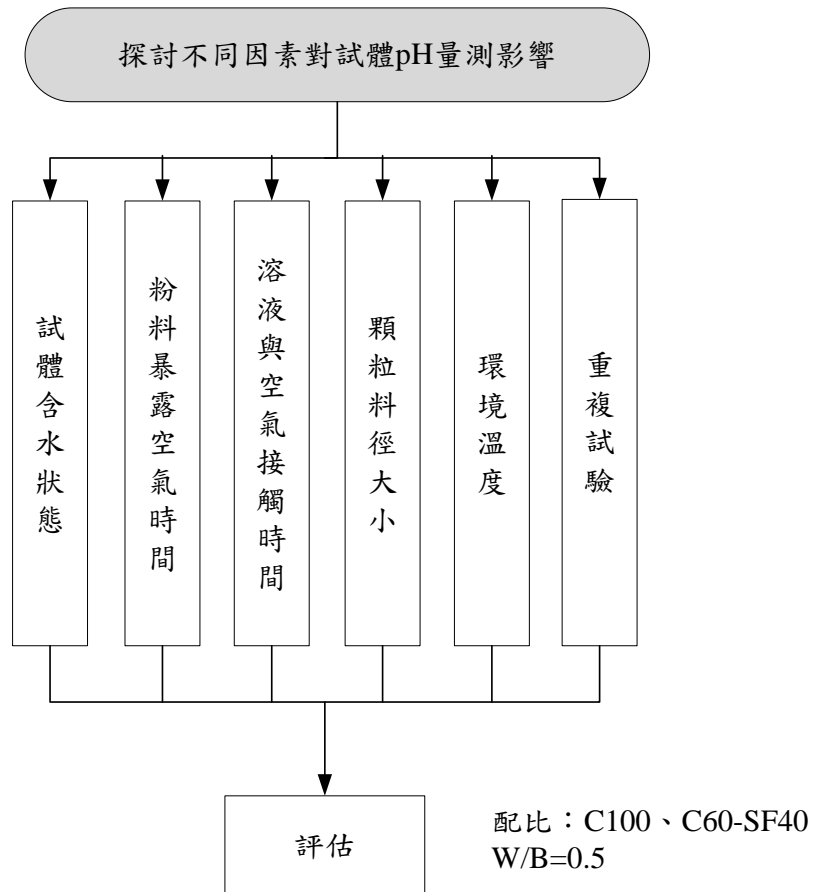


圖 4.1 試體 pH 量測試驗所考慮的影響因素及評估

1. 試體含水狀態影響

ESL 法之測試通常使用於土壤之範疇[12]，應用於低鹼性混凝土之檢測尚未建立一套標準檢驗程序，實驗程序參照 ASTM D4972 土壤 pH 之標準檢測方法，其中試體之測試狀態多以飽和面乾為主，尚未探討試體在乾燥狀態及潮濕狀態下對 pH 之量測影響，故本實驗分別探討試體在烘乾、氣乾及潮濕狀態下，其 pH 之差異性。分別使用矽灰取代水泥重量 0% 及 40%，水膠比 0.5 之漿體，於室溫條件養護室養護 14、28 天後，進行試驗。欲烘乾之試體自養護室取出後，以乾布擦拭試體表面，然後將之置入 60°C 之烘箱進行乾燥；氣乾試體則於濕布擦拭後靜置於室溫下進行測試。圖 4.2、圖 4.3 分別為不同氣乾與烘乾時間下，pH 之變化趨勢。

由圖 4.2 觀察到以下現象：

- (1) 對於同一種膠結配比、同一靜置氣乾時間，無論是 C100 或 C60-SF40，pH 隨養護齡期增加而降低，亦即 pH 最高發生在試體水化程度較低時。
- (2) 對於同一種膠結配比、同一養護齡期，pH 會隨氣乾靜置時間增加而減少，除 C60-SF40 外，降幅並不顯著。

由圖 4.3 也觀察到上述現象。比較圖 4.2 及圖 4.3，發現烘乾的試體會量測到較低的 pH，而且第 1 個小時下降較明顯。

綜合上述結果，研判對於同一配比，水化程度越高，其 pH 越低。因此，進行試體 pH 量測時，需要(1)控制在同一試體含水量及養護齡期條件。(2)建議以養護 28 天或是 56 天的試體為對象，因為這樣才能量測到試體穩定狀態的 pH。

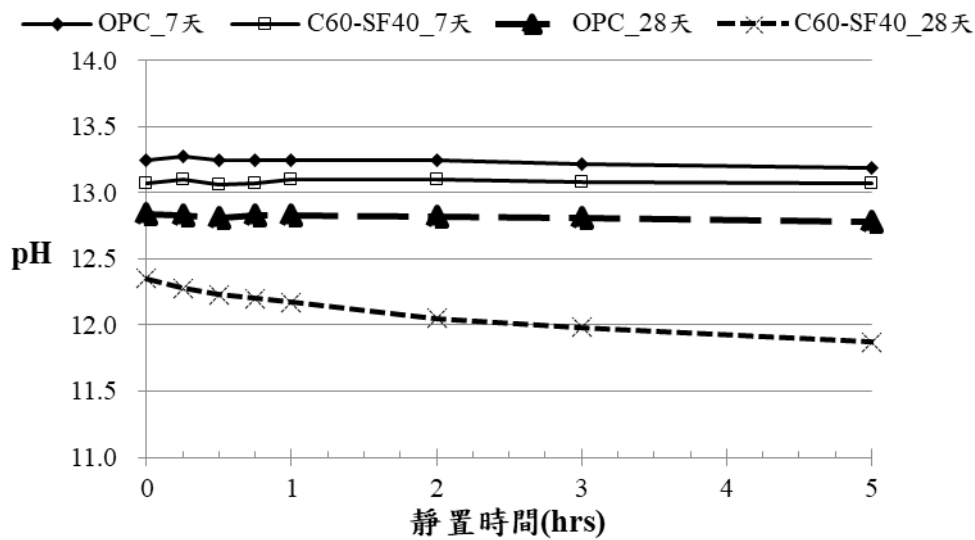


圖 4.2 不同氣乾時間下之 pH

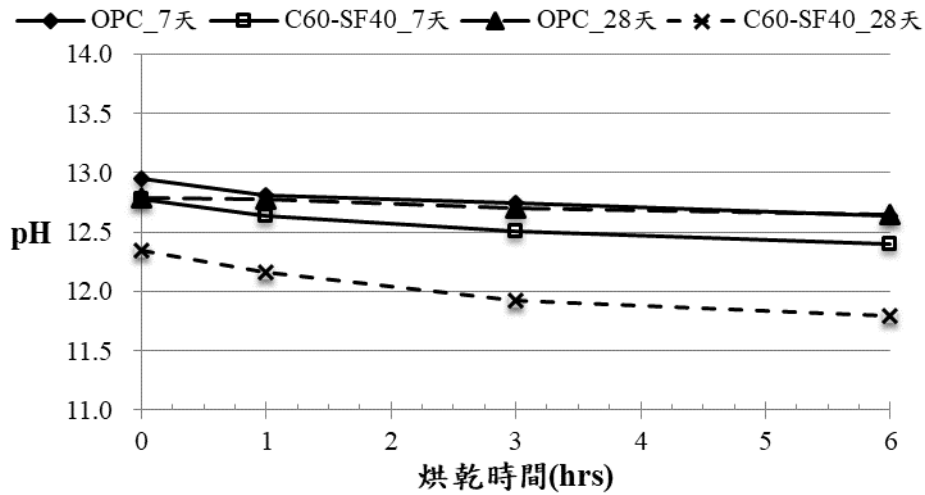


圖 4.3 不同烘乾時間下之 pH

2. 粉料暴露空氣時間

為避免空氣中之二氧化碳等酸性物質與試體接觸，進而影響 pH 之檢測結果 [41]，試體自養護室取出後以密封狀態防止試體本身與空氣接觸，然而測試前為使試體尺寸大小足以通過 200 號篩，常以沖床壓碎及人工篩選之方式進行試樣之選擇，此過程及造成試體與空氣接觸。此外，根據用過核子燃料處置安全審驗技術建立之國際資訊研析[14]之報告顯示，以乾粉狀態之試體進行 pH 測試，不同配比之試體與空氣接觸時間的長短對檢測結果所造成的影響並不明顯。

本研究對於粉料在與去離子水混合前暴露於空氣中的時間，是否會對 pH 之檢測結果造成影響，亦進行研究，結果如圖 4.4 所示，顯示普通卜特蘭水泥漿體的 pH 雖隨粉料暴露空氣時間增加而略降，但降幅並不明顯；而 40% 矽灰取代水泥的漿體 pH，則隨粉料暴露空氣時間增加而有些微降低的趨勢，因此，在進行 pH 檢測時，粉狀試體暴露於空氣中的時間不宜超過 30 分鐘。

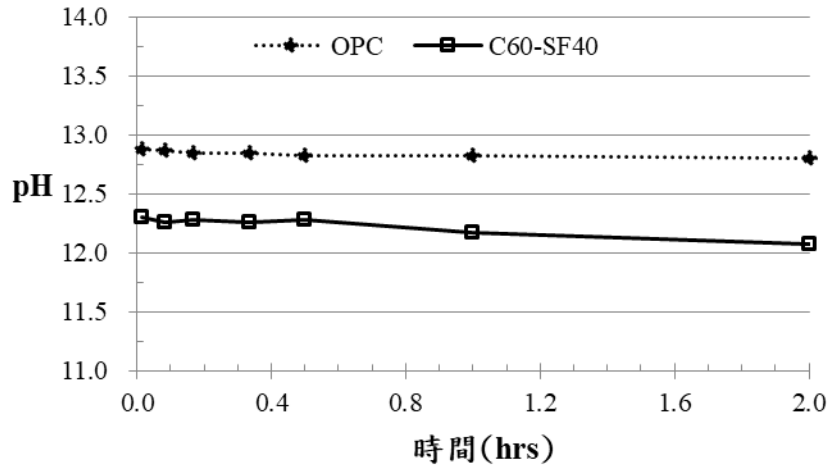


圖 4.4 28 天粉料暴露空氣不同時間之 pH

3. 溶液與空氣之接觸時間

本研究對於粉料與去離子水混合後的溶液，暴露於空氣中的時間，是否會對 pH 之檢測結果造成影響，亦進行研究，結果如圖 4.5 所示，顯示溶液暴露空氣時間在 60 分鐘內，並未發生明顯改變溶液的 pH。

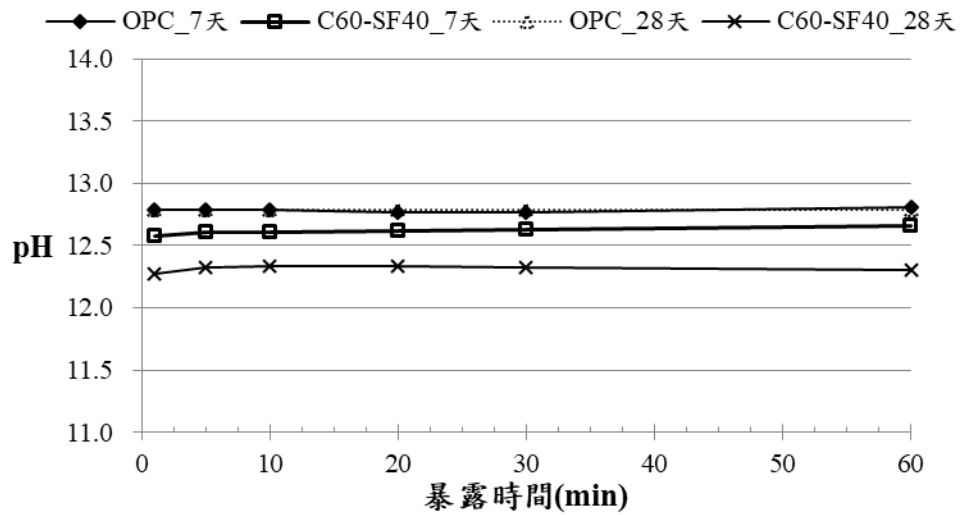


圖 4.5 溶液不同暴露時間之 pH

4. 試體顆粒尺寸大小對 pH 之影響

在探討不同試體大小進行 ESL 法檢測對 pH 影響方面，顆粒大小包括 #30~#50、#50~#100、#100~#200、通過#200、#200~#325，結果如圖 4.6 所示。除了 C60-SF40 養護 28 天試體的 pH 隨粒徑減小而有些微增加外，其餘配比及養護齡期試體，粒料尺寸小於#30 後，粒料尺寸對 pH 的量測結果並未產生明顯影響。

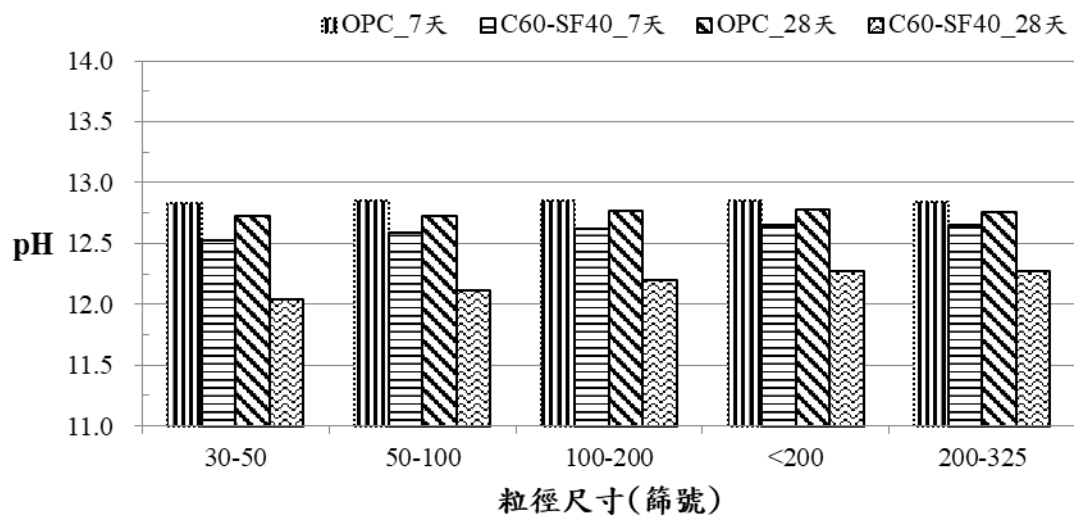


圖 4.6 不同粒徑大小之 pH

5. 不同溫度環境下 pH 之變化

考慮不同測試環境溫度對於實驗結果可能造成之影響，粉末狀試體在與去離子水進行混合後，藉由磁石攪拌機加熱至各設定的溫度，再量測溶液的 pH，結果如圖 4.7 所示，隨攪拌溫度增加，pH 有下降的趨勢，24.6~25.0°C 之間所檢測出的 pH 最高。

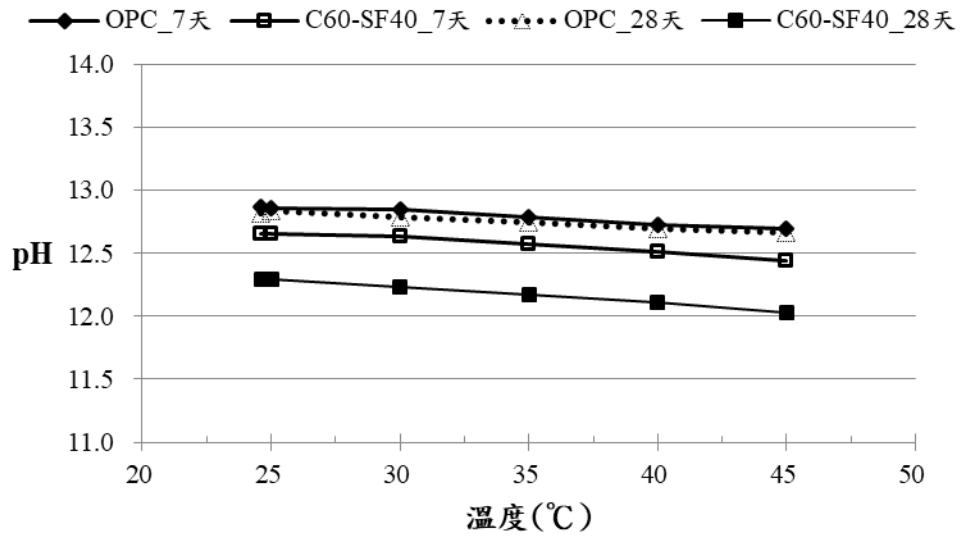


圖 4.7 不同溫度下之 pH

6. pH 檢測之重複性試驗

在進行養護齡期 28 天試體之 pH 量測的重複性量測分析，每組試驗重複進行至少五次以上，並配合 SKB R12-02(2012)報告第 3.6 節重複性變異數之分析方法，探討 ESL 法是否符合 ISO 5725 之規範值。試驗結果如表 4.1，根據該表所計算而得之純水泥重複性變異值 r 趨近於 0，C60-SF40 則為 0.047；純水泥與 C60-SF40 於重複性變異率之部分則分別為 0.00%、0.37%，顯示使用 ESL 法測得之孔隙溶液 pH 量測具有穩定性與重複性。

表 4.1 pH 重複性試驗

檢驗次數(第_次)	1	2	3	4	5	平均
C100	12.82	12.82	12.82	12.82	12.82	12.82
C60-SF40	12.28	12.31	12.28	12.31	12.31	12.30

4.1.2 選用 ESL 法量測低鹼性水泥 pH 的合適性評估

綜合前述進行之測試，結果如表 4.2 所示。我們可得獲得以下結果：

1. 試體含水狀態(氣乾)：

卜特蘭水泥漿體養護 7 及 28 天，及 C60-SF40 養護 7 天，pH 隨氣乾時間增加(即含水量下降)會下降，但不明顯；C60-SF40 養護 28 天，pH 隨氣乾時間增加會下降，而且明顯。

2. 試體含水狀態(烘乾)：

卜特蘭水泥漿體養護 7 及 28 天，及 C60-SF40 養護 7 天，pH 隨烘乾時間增加(即含水量下降)會下降，且第 1 個小時下降較明顯；C60-SF40 養護 28 天，pH 隨烘乾時間增加會下降，而且明顯。

3. 粉料暴露空氣時間：

卜特蘭水泥漿體養護 28 天，及 C60-SF40 養護 28 天，pH 隨暴露時間增加(即含水量下降)會下降，但前 30 分鐘內不明顯變化。

4. 溶液與空氣接觸時間：

卜特蘭水泥漿體養護 7 及 28 天、C60-SF40 養護 7 及 28 天，pH 在暴露時間 60 分鐘內無明顯變化。

5. 顆粒粒徑大小：

卜特蘭水泥漿體養護 7 及 28 天，及 C60-SF40 養護 7 天，粒徑縮小對 pH 不明顯變化；C60-SF40 養護 28 天，pH 隨粒徑縮減而有些微增加。

6. 溫度環境：

卜特蘭水泥漿體養護 7 及 28 天、C60-SF40 養護 7 及 28 天，pH 在溫度增加而下降，在 24.6~25.0°C 時 pH 最高。

7. 重覆性試驗顯示量測到的數值穩定。

本研究使用的 ESL 法量測程序，參考 ASTM D4972 土壤 pH 之標準試驗方法，先取出試體以沖床壓碎，再以研磨棒於 15 分鐘內完成研磨，並取通過 #200 篩的粉料(未氣乾及烘乾)，分裝至各容器中，單一容器放入重量比 1:1 之試樣粉料與去離子水混合，利用磁力攪拌器攪拌 5 分鐘，隨即進行 pH 之量測(量測須於 5 分鐘內完成)。由以上結果顯示，本研究試驗流程的 ESL 法是適合作為低鹼性

水泥 pH 的量測方法。

表 4.2 不同因素對試體 pH 量測影響

配比及 養護時間	試體含 水狀態 (氣乾)	試體含 水狀態 (烘乾)	粉料暴 露空氣 時間	溶液與 空氣接 觸時間	顆粒 粒徑 大小	溫度環境	重複 性試 驗
C100 7 天	↓ 不明顯	↓第 1 小時較 明顯	-	55 min 內不明 顯變化	不明 顯變 化	↓24.6~25.0 °C 最高	穩定
C100 28 天	↓ 不明顯	↓第 1 小時較 明顯	30 min 內不明 顯↓	55 min 內不明 顯變化	不明 顯變 化	↓24.6~25.0 °C 最高	穩定
C60-SF40 7 天	↓ 不明顯	↓第 1 小時較 明顯	-	55 min 內不明 顯變化	不明 顯變 化	↓24.6~25.0 °C 最高	穩定
C60-SF40 28 天	↓ 明顯	↓ 明顯	30 min 內不明 顯↓	55 min 內不明 顯變化	↑	↓24.6~25.0 °C 最高	穩定

註：表中「↓」與「↑」分別為各配比在不同測試條件下孔隙溶液 pH 值之影響程度；「↓」表示影響程度低，「↑」則表示影響程度高。

4.2 膠結漿體性質分析

本子項計畫於漿體性質研究部分，固定水膠比 0.5，以矽灰與飛灰取代不同水泥重量，並額外增加固定矽灰取代比例 35%之 3 組配比(C35-SF35-FA30、C45-SF35-FA20 及 C55-SF35-FA10)，製作的膠結漿體進行流度試驗及凝結時間試驗，於養護齡期 28、56 及 90 天量測試體的 pH、抗壓強度。另 TGA、XRD 及 SEM(EDS)等微觀性質試驗則選擇純矽灰取代之配比(C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60)與對照組 C100，進行各成分含量分析。各系列配比皆加做 14 天的 pH 量測，並與對照組 C100 進行比較。

4.2.1 流度及凝結時間

探討各系列不同礦物摻料取代比例對漿體流度與凝結時間之影響，表 4.3~表 4.9 為不同矽灰、飛灰取代比例流度與凝結時間試驗結果。圖中紅線為各系列配比流度控制之標準；各系列配比之流度，以添加強塑劑之方式，控制各配比之流度與飛灰取代量最高配比流度百分比相差 $\pm 10\%$ 。C35 系列與 SF35 系列使用相同之配比(C35-SF15-FA50)進行流度控制；由於 C35-SF35-FA30 於未加入強塑劑之情況下，流度即超過 C35-SF15-FA50 (8%) 2 倍，故該配比之試驗結果為未添加強塑劑之流度。

表 4.3 C60 系列凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C60-SF40-FA 0	100	8.62	9.38
C60-SF30-FA10	106	10.52	11.42
C60-SF10-FA30	108	10.27	11.05
C60-SF 0-FA40	103	11.35	12.38

表 4.4 C50 系列凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C50-SF50-FA 0	88	8.43	9.20
C50-SF30-FA20	99	10.75	11.52
C50-SF10-FA40	121	11.38	12.27
C50-SF 0-FA50	95	11.58	12.70

表 4.5 C40 系列凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C40-SF60-FA 0	81	8.08	8.97
C40-SF40-FA20	87	8.88	9.85
C40-SF20-FA40	91	11.13	11.98
C40-SF 0-FA60	86	12.08	13.05

表 4.6 C35 系列凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C35-SF15-FA50	8	11.30	12.25
C35-SF25-FA40	11	10.22	11.20
C35-SF35-FA30	27	9.70	10.68

表 4.7 SF35 系列凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C35-SF35-FA30	27	9.70	10.68
C45-SF35-FA20	5	9.40	10.30
C55-SF35-FA10	8	9.30	10.15

表 4.8 單純矽灰取代之凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C60-SF40	100	8.62	9.38
C50-SF50	88	8.43	9.20
C40-SF60	81	8.08	8.97

表 4.9 單純飛灰取代之凝結時間與流度

漿體編號	流度 百分比(%)	凝結時間(hrs)	
		初凝	終凝
C60-FA40	103	8.62	9.38
C50-FA50	95	8.43	9.20
C40-FA60	86	8.08	8.97

(1) 流度變化

各配比趨勢如圖 4.8~圖 4.11 所示，觀察結果如下；

- A. 對於矽灰單獨取代部分水泥，C60-SF40、C50-SF50、C40-SF60，流度分別為 100%、88%及 81%，隨取代量增加，流度減少。
- B. 對於飛灰單獨取代部分水泥，C60-FA40、C50-FA50、C40-FA60，流度分別為 103%、95%及 86%，隨取代量增加，流度減少。且發現矽灰取代較飛灰取代對流度折減影響較大。
- C. 矽灰及飛灰取代水泥，二類摻料總和比例未超過 60%時，同時取代相較單一矽灰或飛灰取代有較大的流度。
- D. 矽灰及飛灰單一或同時取代部分水泥，取代量愈多，除 C50-SF10-FA40 外，流度愈低。
- E. 矽灰及飛灰同時取代水泥達 65%時，流度大幅降低。

由上述結果顯示，

- A. 矽灰及飛灰取代水泥量愈多，流度折減愈大，未來在進行混凝土配比設計時，若以增加水量方式增加工作性，但會造成混凝土其它性質達不到

要求時，則添加強塑劑以維持工作性是必然的。

- B. 高比例飛灰取代量配合矽灰取代部分水泥，以及單純使用飛灰取代水泥均可增加流度。

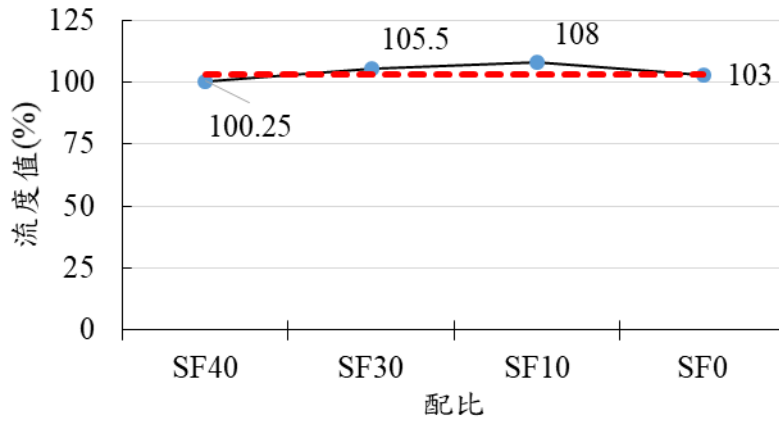


圖 4.8 C60 系列的流度 (C60-FA40 為流度控制)

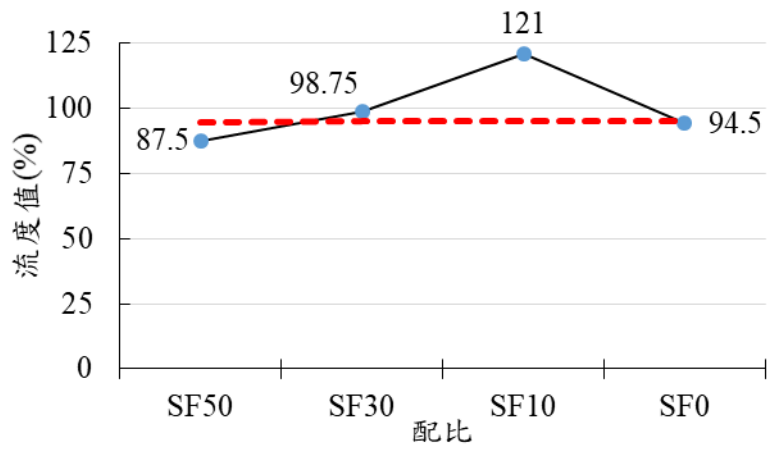


圖 4.9 C50 系列的流度 (C50-FA50 為流度控制)

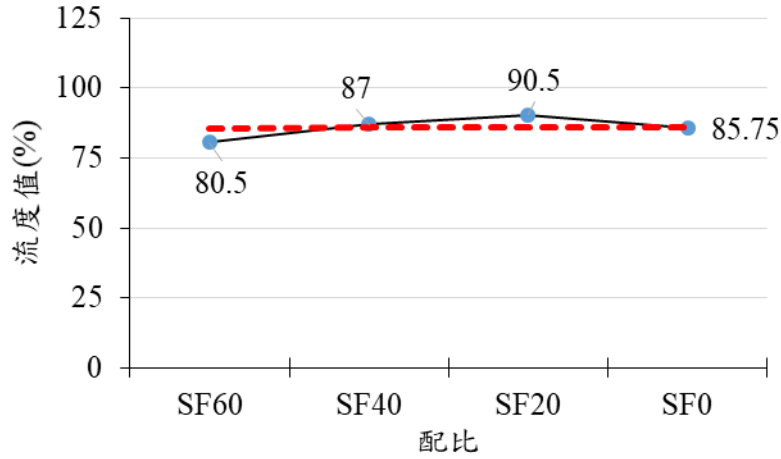


圖 4.10 C40 系列的流度 (C40-FA60 為流度控制)

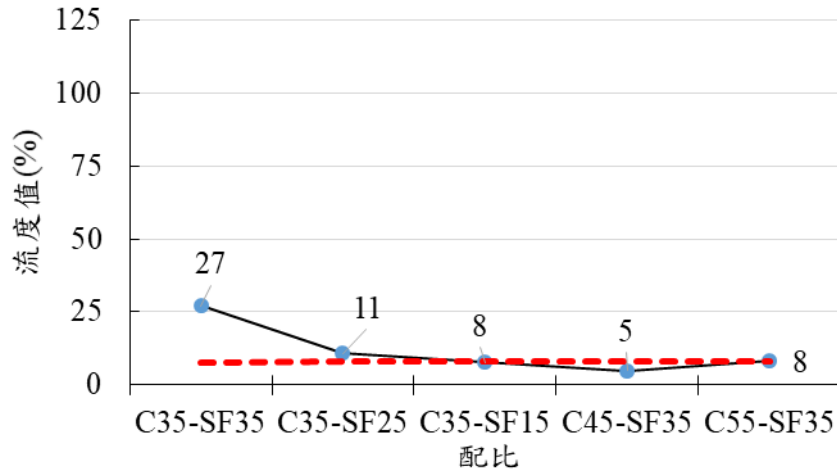


圖 4.11 C35 與 SF35 系列的流度 (C35-SF15-FA50 為流度控制)

(2) 凝結時間變化

結果如圖 4.12~圖 4.16 所示，純水泥漿體對照組 C100 的初凝及終凝時間分別為 435 及 516 分鐘，隨著卜作嵐膠結材矽灰與飛灰取代量增加，初凝及終凝時間逐漸增加，C60 系列，矽灰與飛灰分別取代水泥重量 40%，初凝及終凝時間分別為 517 及 563 分鐘和 681 及 743 分鐘，與對照組比較，40%矽灰增加 18.9% 及 9.1%，40%飛灰增加 56.3% 及 44.0%。

C50 系列，矽灰與飛灰分別取代水泥重量 50%，初凝及終凝時間分別為 506 及 552 分鐘和 695 及 762 分鐘，與對照組比較，50%矽灰增加 16.3% 及 7.0%，50%飛灰增加 60.0% 及 47.7%。

C40 系列，矽灰與飛灰分別取代水泥重量 60%，初凝及終凝時間分別為 485 及 538 分鐘和 725 及 783 分鐘，與對照組比較，60% 矽灰增加 11.5% 及 4.3%，60% 飛灰增加 66.7% 及 51.7%。C35 系列，卜作嵐膠結材矽灰與飛灰取代水泥重量 65%，以 C35-SF15-FA50 為例，初凝及終凝時間分別為 678 及 735 分鐘，與對照組比較，增加 55.9% 及 42.4%，由各系列配比凝結時間可得知，初凝與終凝時間會隨著飛灰取代水泥重量增加而增加，而矽灰取代水泥重量增加而縮短了初凝及終凝時間。

綜合上述試驗結果可觀察到：

- A. 卜作嵐材料取代部分水泥會增加初、終凝時間。
- B. 以矽灰單一取代，加入矽灰會增加凝結時間，但加入矽灰比例愈多，凝結時間會縮短，但仍高於純水泥。
- C. 以飛灰單一取代，加入飛灰會增加凝結時間，加入飛灰比例愈多，凝結時間會增加。

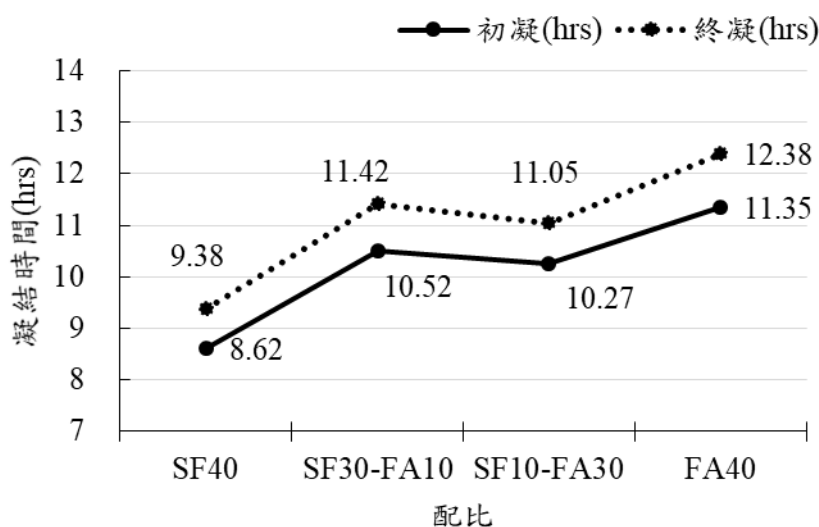


圖 4.12 C60 系列的凝結時間

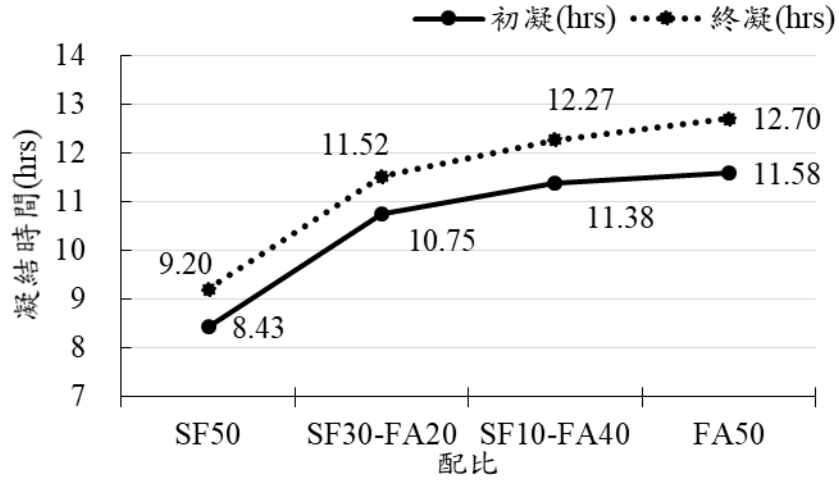


圖 4.13 C50 系列的凝結時間

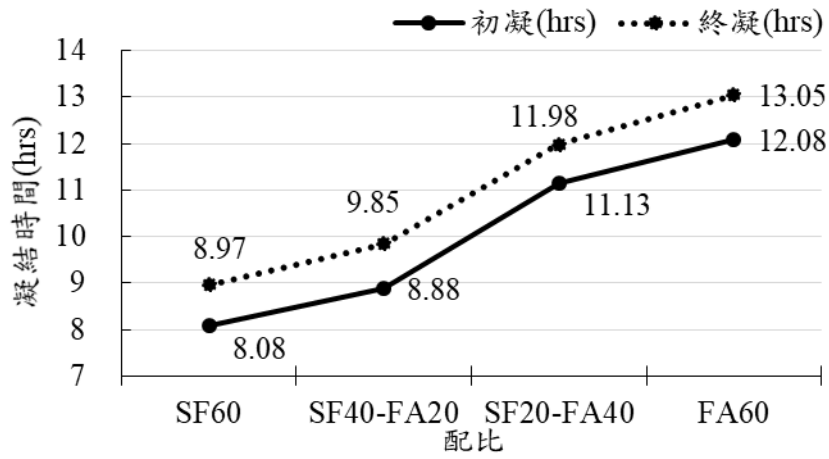


圖 4.14 C40 系列的凝結時間

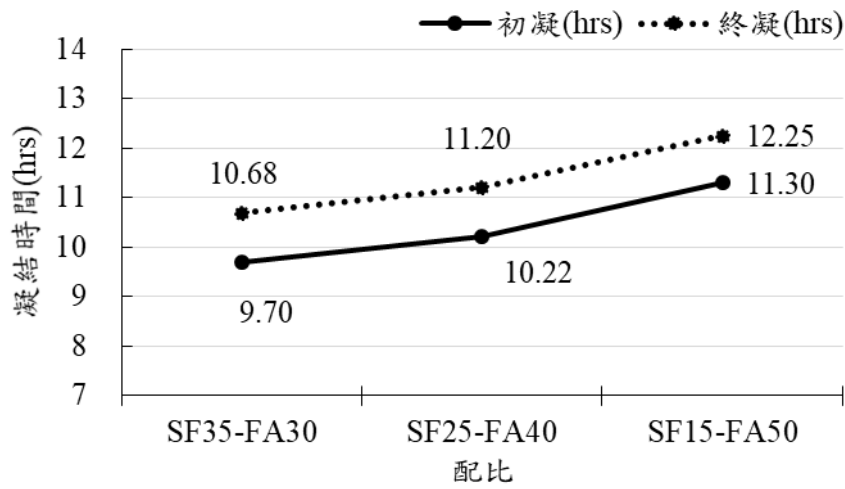


圖 4.15 C35 系列的凝結時間

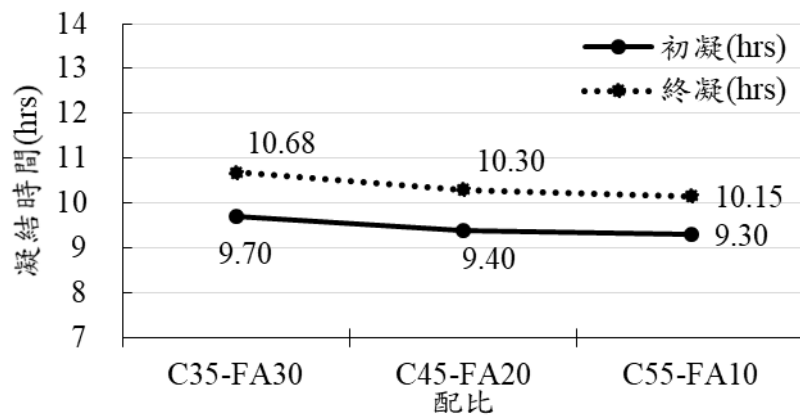


圖 4.16 SF35 系列的凝結時間

4.2.2 漿體 pH 與抗壓強度

相關各系列配比之 pH 值與抗壓強度試驗結果如表 4.10~表 4.16 所示，以下分別針對各礦物摻料(矽灰、飛灰)取代比例進行 pH 與抗壓強度於各齡期之變化趨勢探討。

表 4.10 C60 系列配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C60-SF40-FA 0	12.44	12.42	11.98	11.37	34.85	43.35	47.24
C60-SF30-FA10	12.59	12.57	12.33	12.03	34.41	42.31	45.86
C60-SF10-FA30	12.74	12.71	12.56	12.53	20.79	40.02	42.24
C60-SF 0-FA40	12.76	12.78	12.74	12.72	20.26	37.15	40.38

表 4.11 C50 系列配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C50-SF50-FA 0	11.78	11.76	11.23	10.75	33.15	37.95	45.37
C50-SF30-FA20	12.48	12.45	11.89	11.36	28.71	36.10	40.67
C50-SF10-FA40	12.59	12.58	12.54	12.42	20.43	32.94	37.73
C50-SF 0-FA50	12.69	12.71	12.68	12.64	18.53	31.00	36.85

表 4.12 C40 系列配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C40-SF60-FA 0	11.29	11.26	11.04	10.46	28.43	36.05	37.73
C40-SF40-FA20	11.68	11.65	11.19	10.71	27.18	34.13	35.38
C40-SF20-FA40	12.48	12.46	12.14	11.48	19.24	29.21	32.93
C40-SF 0-FA60	12.73	12.75	12.66	12.54	15.77	27.48	31.85

表 4.13 C35 系列配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C35-SF15-FA50	12.32	12.26	12.13	11.49	11.20	20.79	25.28
C35-SF25-FA40	12.27	12.25	11.72	11.1	14.06	23.38	28.03
C35-SF35-FA30	11.74	11.7	11.17	10.58	25.96	36.09	37.53

表 4.14 SF35 系列配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C35-SF35-FA30	11.74	11.7	11.17	10.58	25.96	36.09	37.53
C45-SF35-FA20	12.13	12.1	11.54	10.95	25.69	34.60	44.20
C55-SF35-FA10	12.19	12.16	11.92	11.43	34.79	43.80	52.14

表 4.15 矽灰取代水泥重量 40%、50%及 60% 配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C60-SF40	12.44	12.42	11.98	11.37	34.85	43.35	47.24
C50-SF50	11.78	11.76	11.23	10.75	33.15	37.95	45.37
C40-SF60	11.29	11.26	11.04	10.46	28.43	36.05	37.73

表 4.16 飛灰取代水泥重量 40%、50%及 60% 配比 pH 值與抗壓強度

漿體編號	pH				平均抗壓強度(MPa)		
	14 天	28 天	56 天	90 天	28 天	56 天	90 天
C100	12.88	12.95	12.97	12.78	37.34	45.20	50.47
C60-FA40	12.76	12.78	12.74	12.72	20.26	37.15	40.38
C50-FA50	12.69	12.71	12.68	12.64	18.53	31.00	36.85
C40-FA60	12.73	12.75	12.66	12.54	15.77	27.48	31.85

4.2.2.1 不同系列配比 pH

在養護齡期對 pH 的影響方面，孔隙溶液 pH 會隨著水化時間而有所改變，不同系列配比漿體的 pH，均隨養護時間增加而降低，如 C60 系列配比 C60-SF40，14 天 pH 為 12.44，至 56 天時降為 11.98，減少 3.7%，顯示 pH 隨著時間增加而減少。配比 C60-FA40，14 天 pH 為 12.76，至 56 天時降為 12.74，減少 0.2%。可觀察出矽灰及飛灰取代水泥重量各 40% 時，氫氧化鈣被消耗速率不同，矽灰比飛灰降低 pH 來得迅速。C50 系列配比 C50-SF50，14 天 pH 為 11.78，至 56 天時降為 11.23，減少 4.7%，配比 C50-FA50，14 天 pH 為 12.69，至 56 天時降為 12.68，減少 0.07%。可觀察出矽灰及飛灰取代水泥重量各 50% 時，矽灰能有效降低 pH 而飛灰降低 pH 能力有限，孔隙中仍有大量氫氧化鈣無法消耗，使得孔隙溶液 pH 仍然偏高。C40 系列配比 C40-SF60，14 天 pH 為 11.29，至 56 天時降為 11.04，減少 2.2%，配比 C40-FA60，14 天 pH 為 12.73，至 56 天時降為 12.66，減少 0.5%。可觀察出矽灰及飛灰取代水泥重量各 60% 時，矽灰在消耗氫氧化鈣速率比飛灰迅速，降低 pH 比飛灰明顯。

使用膠結材取代卜特蘭水泥之孔隙溶液 pH 如圖 4.17~圖 4.23 所示，由試驗結果得知，孔隙溶液 pH 會隨著水化時間而有所改變，pH 會隨著低鹼膠結材料矽灰取代水泥量增加而減少，由於氫氧化鈣已被消耗掉，以純水泥漿體為例，可發現其孔隙溶液 pH 下降幅度有限，代表孔隙中仍有大量氫氧化鈣無法消耗，使得孔隙溶液 pH 仍然偏高，而藉由低鹼性膠結材矽灰及飛灰來取代水泥用量，由圖可觀察到在各系列配比中的 pH，水泥用量低於 40% 時，其 56 天的孔隙溶液之 pH 相當接近 11。

在矽灰用量對 pH 的影響方面，pH 隨矽灰取代水泥重量增加而降低，以養護 56 天試體為例，矽灰取代水泥重量 40 %、50 % 及 60 % 的 pH 分別為 11.98、11.23 及 11.04，與對照組(C100)56 天齡期 pH 為 12.97 比較，分別降低了 7.6 %、13.4 % 及 14.9 %。由圖 4.24 可以發現，當矽灰取代量 40-60 % 範圍時，56 天齡期的 pH 降低幅度最大，因此，降低水泥用量，藉由摻配低鹼膠結材進行卜作嵐反應，可消耗孔隙溶液中之氫氧化鈣含量，促使 C-S-H 膠體及 C-A-S-H 膠體的形成，以降低孔隙溶液 pH。

在飛灰用量對 pH 的影響方面，pH 隨飛灰取代水泥重量增加而降低幅度有限，以養護 56 天試體為例，飛灰取代水泥重量 40 %、50 % 及 60 % 的 pH 分別為 12.74、12.68 及 12.66，與對照組(C100)56 天齡期 pH 為 12.97 比較，分別降低了 1.8 %、2.2 % 及 2.4%。由圖 4.25 可以發現，當矽灰取代量 40 %-60 % 範圍時，由於孔隙中仍有大量氫氧化鈣無法消耗，56 天齡期的 pH 降低幅度有限，孔隙溶液 pH 仍然偏高。

綜合性的觀察如下：

- A. 圖 4.22 顯示，單一以矽灰取代部分水泥，取代量愈多，pH 下降越多；pH 隨養護齡期增加而下降，達 56 天齡期時，下降明顯。
- B. 圖 4.23 顯示，單一以飛灰取代部分水泥，取代量在 40%~60% 範圍內，pH 略低於純水泥漿體，但飛灰用量多寡，在齡期未超過 56 天時，對 pH 影響並不明顯，也未顯著降低 pH。
- C. 圖 4.17~圖 4.20 顯示，同時以矽灰及飛灰取代部分水泥，飛灰比例增加，pH 就會隨之增加，但仍低於純水泥漿體。
- D. 圖 4.21 顯示，同時以矽灰及飛灰取代部分水泥，固定矽灰取代 35%，則飛灰取代量越多，pH 越低。
- E. 圖 4.22 顯示，以單一矽灰取代部分水泥對降低 pH 才有明顯效果，而且取代量要達到 50%，在養護 90 天時較有機會將 pH 降至 11 以下。
- F. 上述研究使用純膠結材料及水膠比固定為 0.5，若對於砂漿或混凝土，且用水量增加，試體的 pH 可能又會降低。

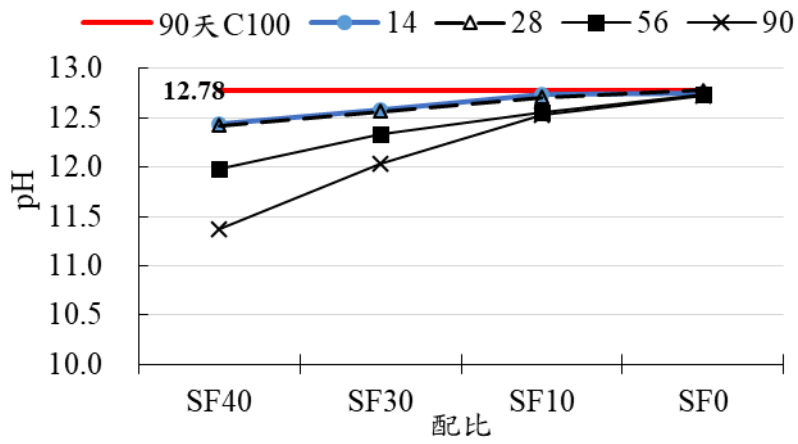


圖 4.17 C60 系列的 pH

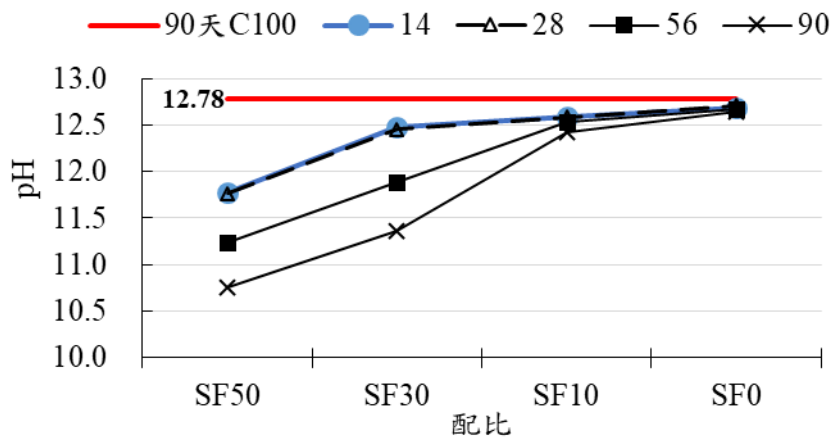


圖 4.18 C50 系列的 pH

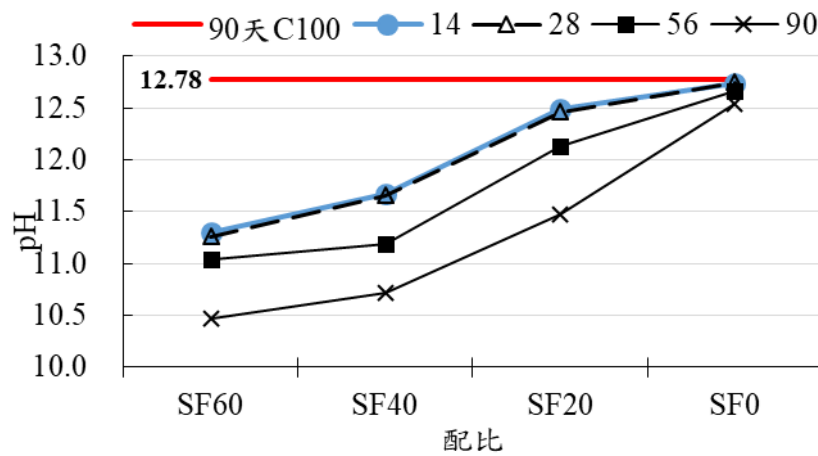


圖 4.19 C40 系列的 pH

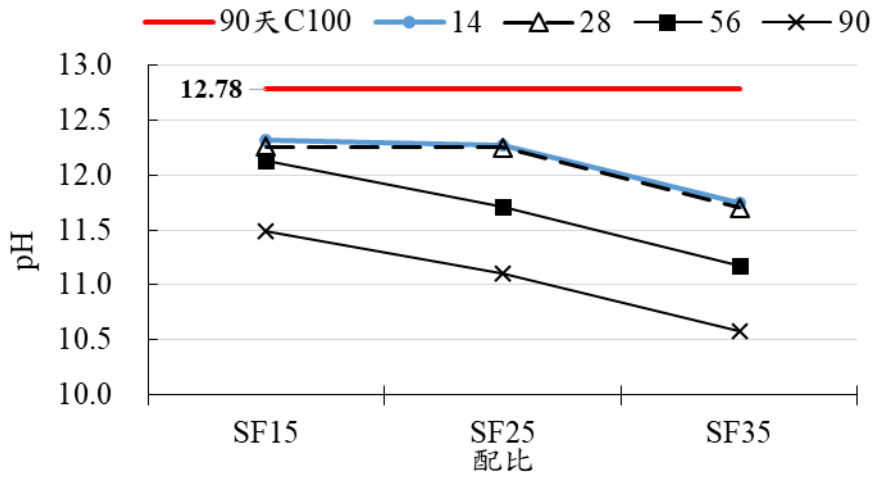


圖 4.20 C35 系列的 pH

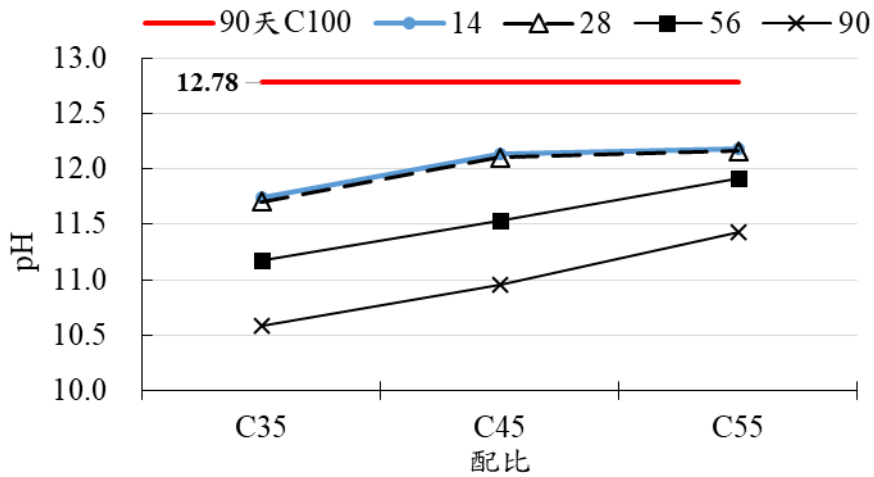


圖 4.21 SF35 系列的 pH

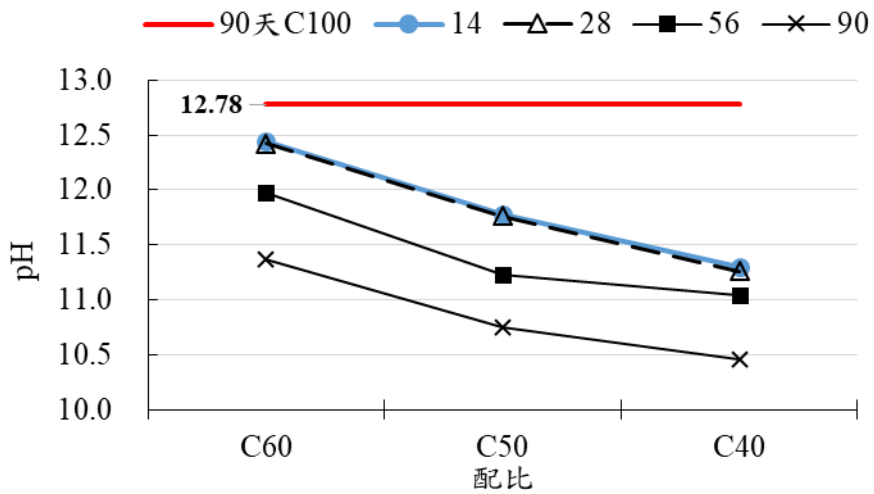


圖 4.22 砂灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的 pH

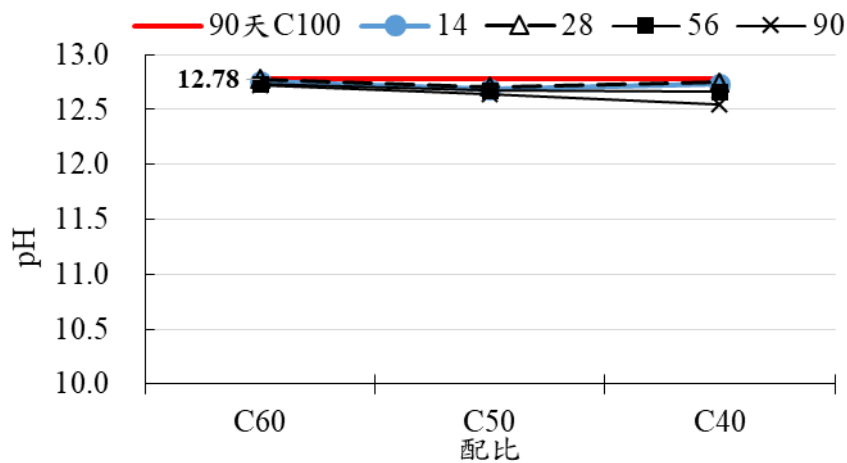


圖 4.23 飛灰取代水泥重量 40%、50% 及 60% 的 pH

4.2.2.2 不同系列配比對抗壓強度影響

抗壓強度變化結果如表 4.10~表 4.16 及圖 4.24~圖 4.30 所示。

在養護齡期對抗壓強度的影響方面，不同漿體的抗壓強度，均隨養護時間增加而增加，如對照組 C100，28 天抗壓強度為 37.34 MPa，至 56 天時增加為 45.20 MPa，增加 21 %。C60 系列配比 C60-SF40，28 天抗壓強度為 34.85 MPa，至 56 天時增加為 43.35 MPa，增加 18.8 %，配比 C60-FA40，28 天抗壓強度為 20.26 MPa，至 56 天時增加為 37.15 MPa，增加 83.0 %。C50 系列配比 C50-SF50，28 天抗壓強度為 33.15 MPa，至 56 天時增加為 37.95 MPa，增加 14.5 %，配比 C50-FA50，28 天抗壓強度為 18.53 MPa，至 56 天時增加為 31.00 MPa，增加 67.3 %。C40 系列配比 C40-SF60，28 天抗壓強度為 28.43 MPa，至 56 天時增加為 36.05 MPa，增加 26.8 %，配比 C40-FA60，28 天抗壓強度為 15.77 MPa，至 56 天時增加為 27.48 MPa，增加 74.3 %。

以養護 56 天試體為例，與對照組(C100) 56 天齡期抗壓強度為 45.20MPa 比較，矽灰取代水泥重量 40 %-60 % 範圍皆低於對照組(C100)，抗壓強度分別為 43.35 MPa、37.95 MPa 及 36.05 MPa，分別降低了 4.1 %、16.0 % 及 20.2 %。

在矽灰用量對抗壓強度的影響方面，齡期 28 天時，矽灰取代水泥的漿體抗壓強度皆低於對照組(C100)抗壓強度。齡期 28 天，40%矽灰取代量之抗壓強度 34.85 MPa，60%矽灰取代量之抗壓強度 28.43 MPa，減少 18.4%。

在飛灰用量對抗壓強度的影響方面，飛灰取代水泥的漿體抗壓強度皆低於對照組(C100)與 40%~60%矽灰之抗壓強度，由於矽灰單價比飛灰貴將近六倍，但抗壓強度比飛灰取代高，故在考慮添加礦物摻料飛灰時不得高於 30%。

綜合性的觀察如下：

- A. 圖 4.29 顯示，單一以矽灰取代部分水泥，取代量愈多，抗壓強度下降越多；抗壓強度隨養護齡期增加而增加，於 56 天齡期時，矽灰取代量 40%(配比 C60-SF40)的強度發展與純水泥試體之強度相當。
- B. 圖 4.30 顯示，單一以飛灰取代部分水泥，取代量愈多，抗壓強度下降越多；抗壓強度隨養護齡期增加而增加。
- C. 圖 4.24~圖 4.27 顯示，同時以矽灰及飛灰取代部分水泥，抗壓強度均較純水泥試體抗壓強度低。飛灰比例增加，抗壓強度也會隨之降低。
- D. 圖 4.29 及圖 4.30 顯示，抗壓強度隨養護齡期增加而增加，且取代水泥比例越高，抗壓強度越高。

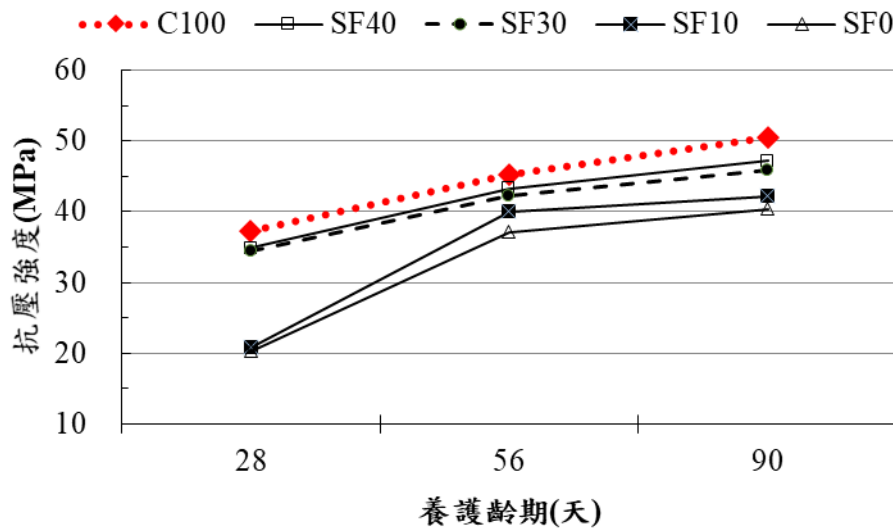


圖 4.24 C60 系列的平均抗壓強度

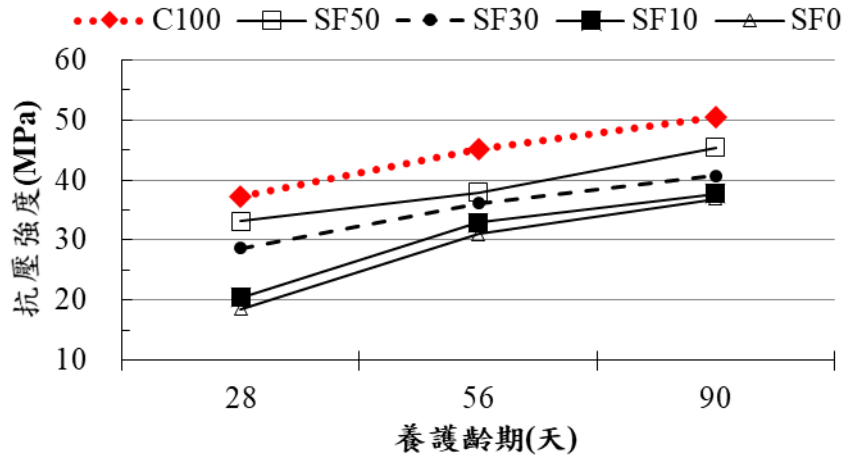


圖 4.25 C50 系列的平均抗壓強度

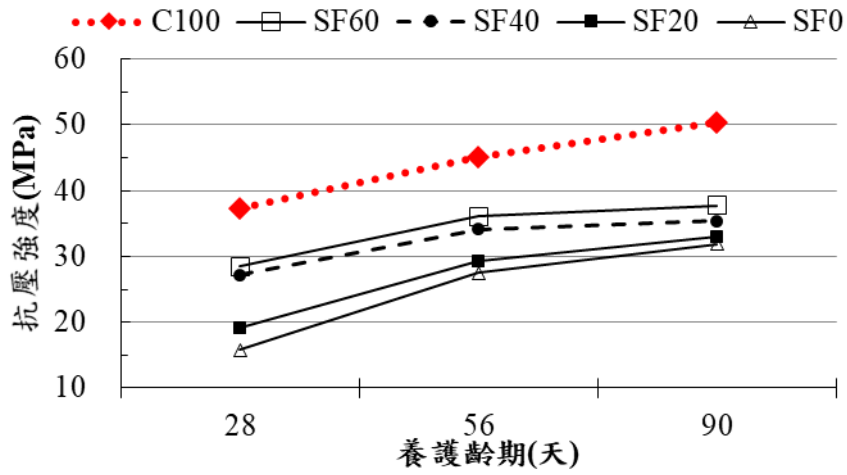


圖 4.26 C40 系列的平均抗壓強度

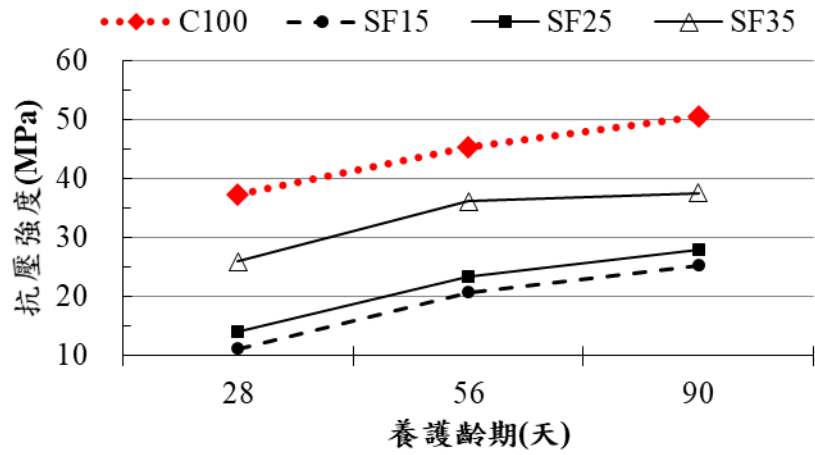


圖 4.27 C35 系列的平均抗壓強度

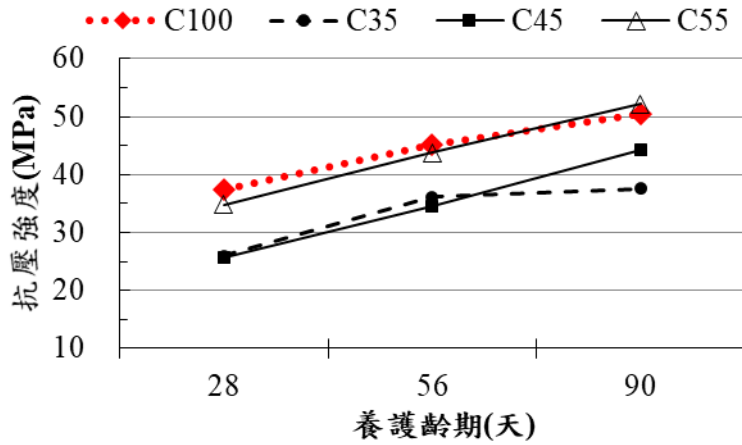


圖 4.28 SF35 系列的平均抗壓強度

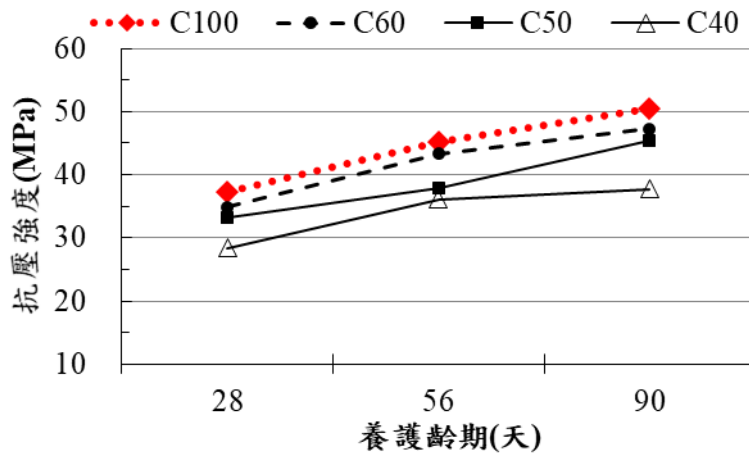


圖 4.29 矽灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的平均抗壓強度

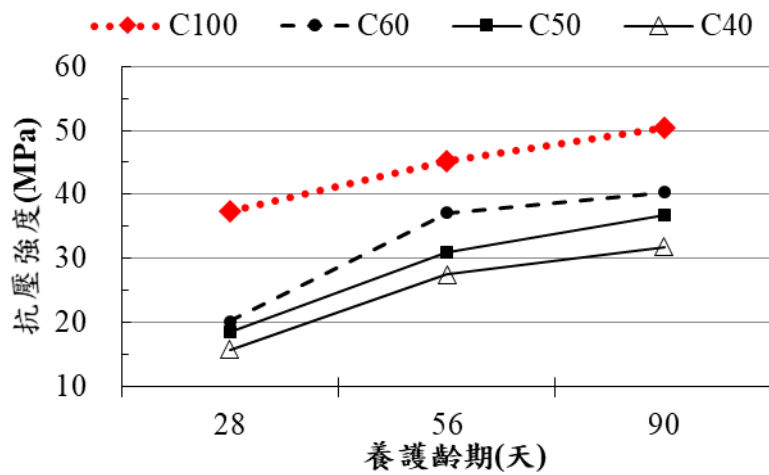


圖 4.30 飛灰取代水泥重量 40%、50%及 60%的平均抗壓強度

4.2.3 微觀分析

微觀性質試驗如 TGA、XRD 及 SEM(EDS)等，於本子項計畫中選擇純矽灰取代之配比(C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60)與對照組 C100，於養護齡期 90 天時進行各成分含量分析，探討於純矽灰取代情況下，各漿體配比 CaO/SiO₂ 與總矽含量。

4.2.3.1 TGA

本試驗使用矽灰取代水泥比例 40、50 及 60%與對照組 C100 進行 TGA 試驗，表 4.17 為各配比於各溫度階段之重量損失百分比。純水泥漿體於 TGA 升溫過程中可分為四階段之重量損失：第一階段，25-100°C，為粉末損失來自空氣中所吸附之水重；第二階段，100°C-350°C，將損失 C-S-H 膠體、鈣礬石(Ettringite)及水化鋁酸鈣(Calicium aluminate hydrate)之鍵結水分子；第三階段，430-460°C，重量損失主要是 Ca(OH)₂ 的分解；第四階段，約在 790°C 左右，此階段主要為 CaCO₃ 分解的重量損失。

圖 4.31 為單純以不同比例之矽灰取代水泥於 90 天齡期之 TGA 趨勢。由圖中可發現，相較於對照組 C100，於溫度達 400°C-500°C 區間時有明顯重量損失之情況外，其餘使用不同比例矽灰取代水泥之配比，於該溫度區間皆未有明顯重量損失。配比 C100、C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60 於此溫度區間損失之重量百分比分別占總重量之 2.86%、0.27%、0.25%及 0.30%。顯示純水泥漿體 C100 於 90 天齡期時，試體中存在氫氧化鈣(CH)比例較使用矽灰取代部水泥之配比(C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60)來得高；而配比 C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60 於此溫度區間，以矽灰取代量 50%試體重量損失情形最為不明顯，顯示在此取代比例情況下，漿體中之 CH 能夠最有效地消耗並形成 C-S-H 膠體。

表 4.17 各配比於各階段重量損失百分比(%)

溫度範圍(°C)	C100	C60-SF40	C50-SF50	C40-SF60
25-105	2.27	3.47	3.26	4.95
110-350	7.61	7.98	9.00	9.17
430-460	2.86	0.27	0.25	0.30
790-900	0.44	0.78	0.79	1.58

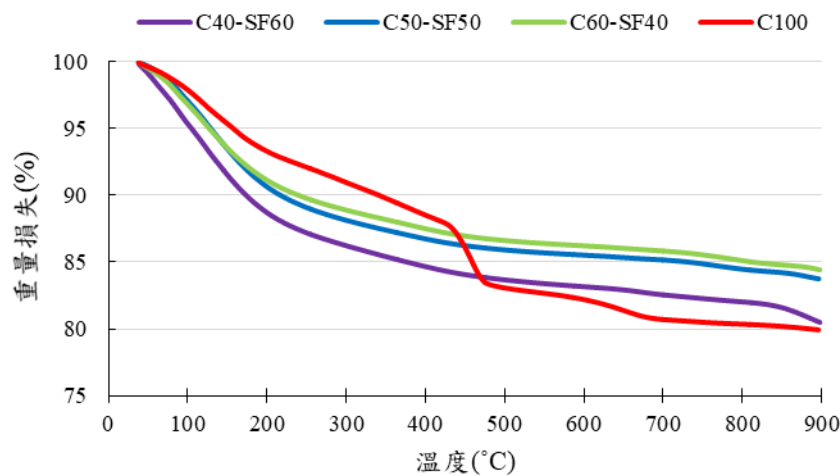


圖 4.31 純砂灰取代 90 天之 TGA

4.2.3.2 XRD

不同砂灰取代水泥的水化產物變化可透過 XRD 分析進行探討，本研究漿體之水化產物主要包含 C-S-H 膠體、 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C_2S 、 C_3S 、 C_4AF 、 SiO_2 (Quartz) 及鈣礬石 (Ettringite)；其中，使用砂灰取代水泥所影響之水化產物主要以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 、 C_2S 、 C_3S 為主。

各配比漿體於 90 天齡期 XRD 試驗結果如圖 4.32 所示。對照組 C100 於 90 天 XRD 結果顯示有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C_2S 、 C_3S 、C-S-H 及 CaCO_3 等成分，仍有氫氧化鈣存在；使用砂灰取代水泥之配比(C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60)在 90 天齡期產物主要以 C_2S 、 C_3S 、C-S-H 膠體為主，幾乎觀察不到氫氧化鈣的存在，顯示砂灰的使用能有消耗氫氧化鈣，而 C-S-H 膠體的生成與漿體孔隙溶液 pH 的下

降則存在著高度相關性。

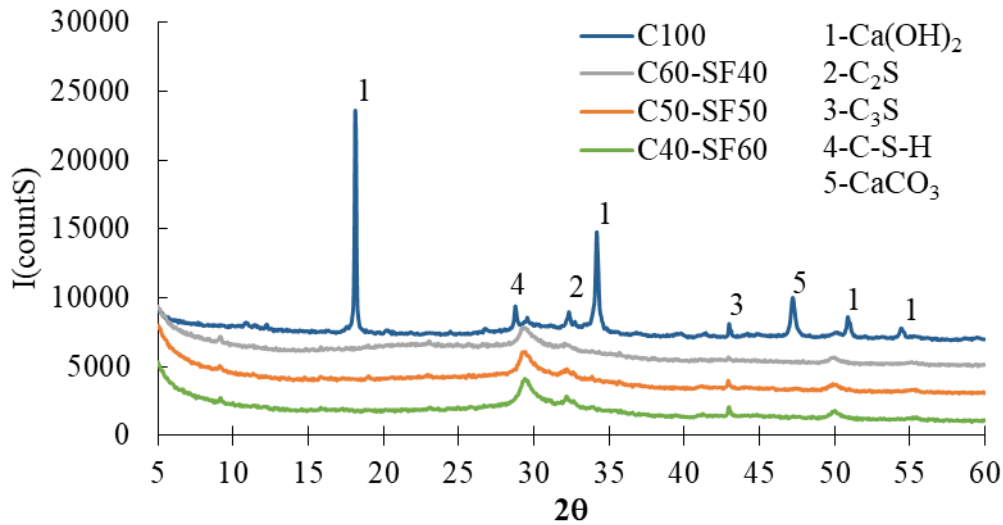


圖 4.32 各配比 90 天 XRD 分析結果

4.2.3.3 SEM (EDS)

本研究以矽灰取代水泥比例 40%、50% 及 60% 進行 SEM 影像觀察，探討配比表面於 90 天齡期相關水化產物生成狀況，並使用 EDS 進行成分分析，檢視使用矽灰取代水泥之配比其 CaO/SiO_2 與總矽含量是否符合低鹼性水泥應用於處置場之要求。

SEM 影像如圖 4.33 至圖 4.35。圖 4.33 為配比 C60-SF40，表面平滑且結晶較大的成分比例居多；圖 4.34 為配比 C50-SF50，此配比之結晶表面更為平滑，可以觀察到雲霧狀物質分布於圖中各處，並發現小顆粒結晶較配比 C60-SF40 增加；圖 4.35 為配比 C40-SF60，雲霧狀物質分布比例介於前述二配比，且結晶顆粒分布亦介於前述二配比。根據上述觀察到之 C-S-H 膠體生成狀況與分布情形，矽灰取代水泥重量為 50 % 可最有效率地促使 C-S-H 膠體的生成。

EDS 各配比之分析點位及其對應之圖譜如圖 4.36 至圖 4.38 如所示。表 4.18 則為各配比化學元素與其對應氧化物於總成分中之重量百分比。由表中可發現，Si 含量百分比會隨矽灰取代水泥比例增加而增加；而根據 CaO 與 SiO_2 含量百分比計算而得之 CaO/SiO_2 於 90 天齡期皆小於 0.8，符合低鹼性混凝土之要求，並且各別 CaO/SiO_2 值亦隨著矽灰取代比例的增加而有下降之趨勢，顯示當矽灰取

代水泥量達 40%即可使 CaO/SiO_2 有效降低，符合低鹼性混凝土使用要求。

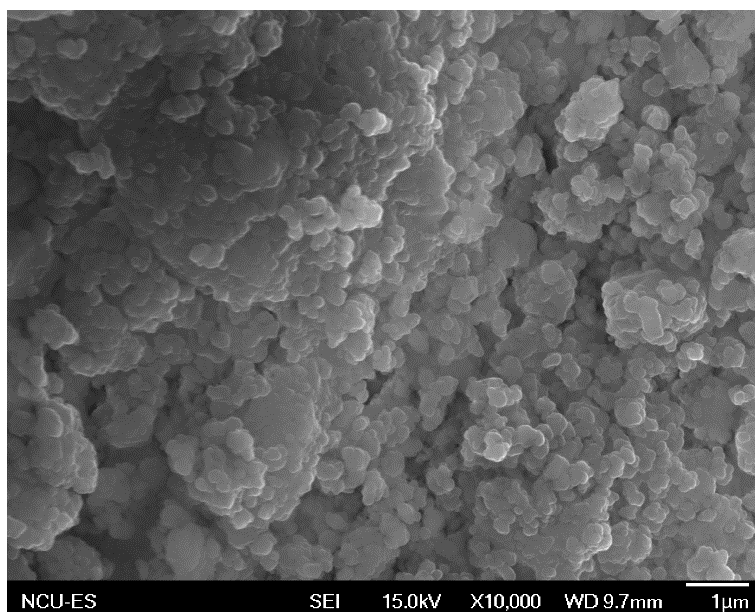


圖 4.33 C60-SF40 90 天齡期之 SEM

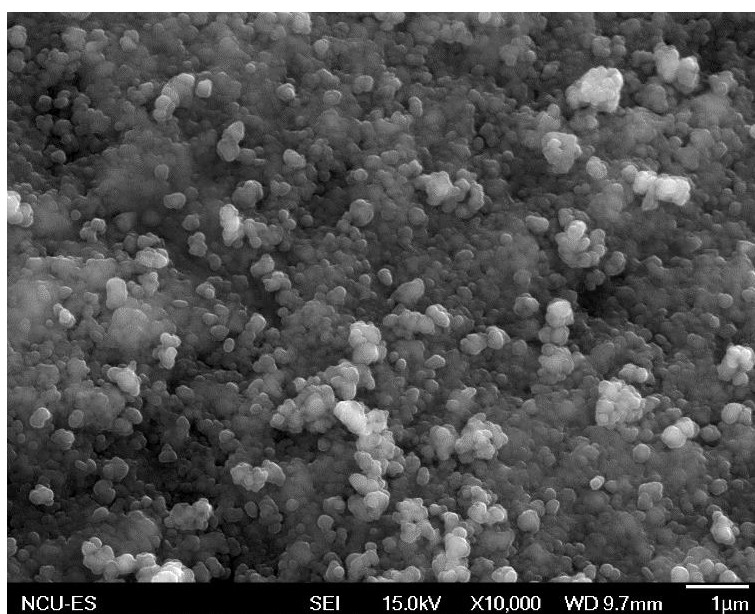


圖 4.34 C50-SF50 90 天齡期之 SEM

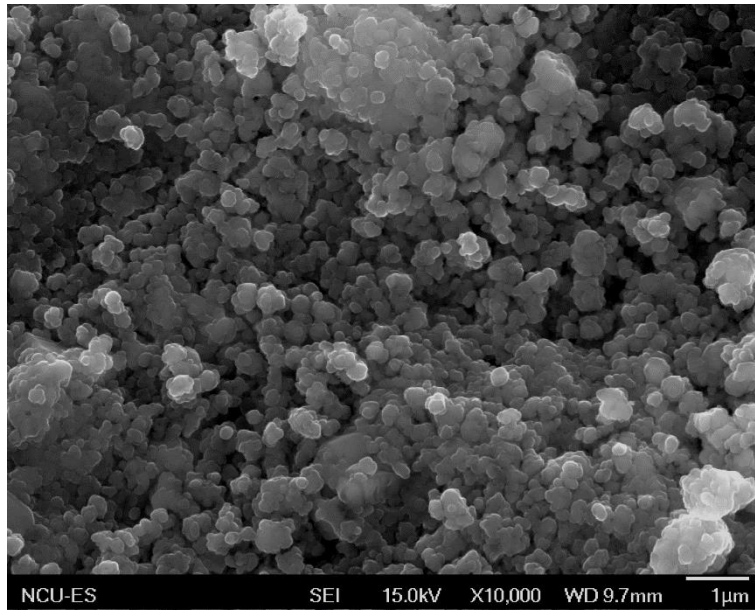
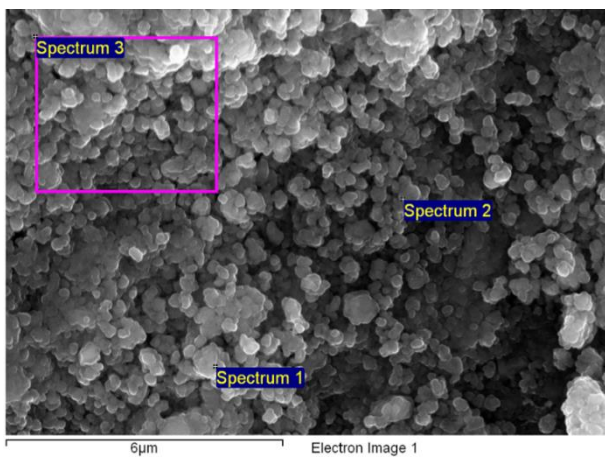
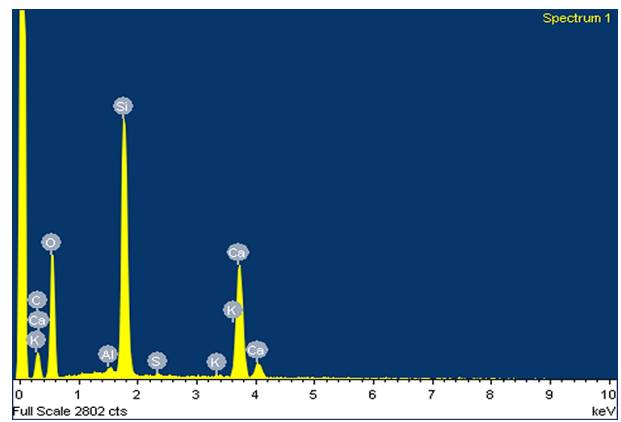


圖 4.35 C40-SF60 90 天齡期之 SEM



(a)



(b)

圖 4.36 C60-SF40 EDS(a)分析點位 (b)圖譜

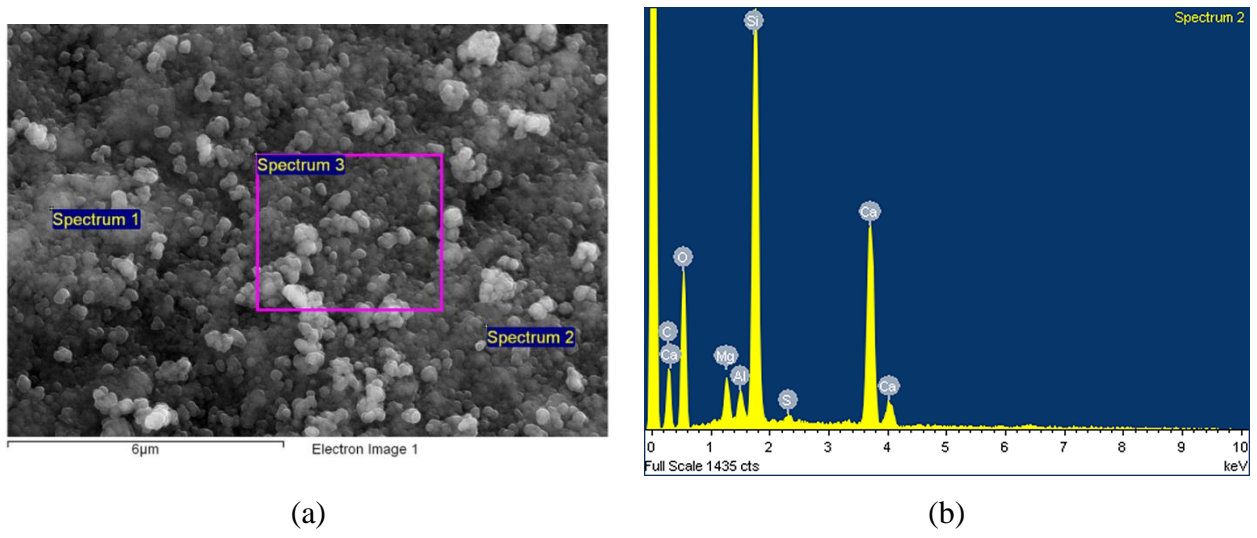


圖 4.37 C50-SF50 EDS(a)分析點位 (b)圖譜

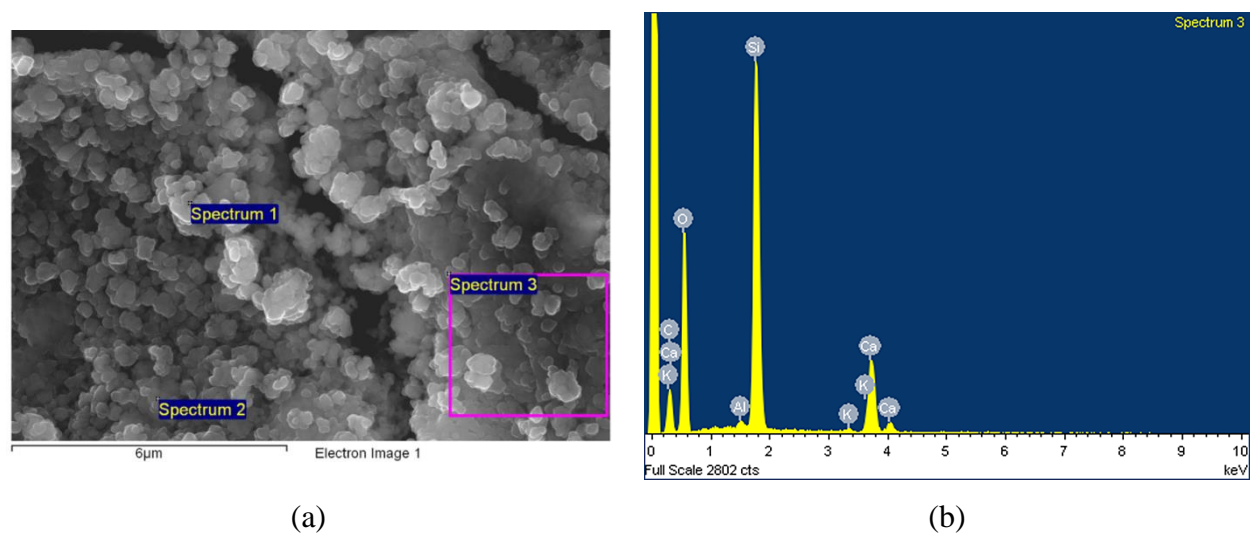


圖 4.38 C40-SF60 EDS(a)分析點位 (b)圖譜

表 4.18 各配比 EDS 元素與化合物分析

分析項目		重量(%)		
		C60-SF40	C50-SF50	C40-SF60
元素	Ca	10.79	20.81	13.21
	Si	14.35	25.92	27.61
氧化物	CaO	24.05	34.37	26.04
	SiO ₂	32.55	49.92	39.53
鈣矽比		0.74	0.69	0.66

4.3 處置坑道封塞用低鹼性混凝土新拌及硬固性質研究

分別設計 B200 系列與 B300 系列作為混凝土配比進行試驗。於 B200 系列之部分，為探討低鹼性自充填混凝土之新拌及硬固性質，以矽灰取代量 0%、40%、50% 及 60% (配比 C100、C60、C50 及 C40)，固定水膠比 0.825，並以添加強塑劑之方式控制坍流度 60-70cm 進行黏稠性(流下性試驗)、坍流度及凝結時間等新拌性質，抗壓強度、pH 值、角柱乾縮、硫酸鹽侵蝕、彈性模數、RCPT 等硬固及耐久性質試驗。B300 系列部份，則作為對應膠結材料用量系列，以矽灰取代量 0%、40%、50% 及 60% (配比 C100、C60、C50 及 C40)，固定水膠比 0.55，進行 pH 與抗壓強度試驗。

4.3.1 黏稠性

低鹼性封塞用自充填混凝土之黏稠性與坍流度分別根據 CNS 14841 自充填混凝土流下性試驗法，以及 CNS 14842 高流動性混凝土坍流度試驗法進行試驗。流下性試驗結果如表 4.19 所示。各配比以固定體積 196.4 cm³、卸出口斷面 6.5×7.5 cm 之 V 行漏斗進行試驗；有添加矽灰之配比，其流下速度為未添加之 2 倍，顯示添加矽灰可提高混凝土之流動性。而在相對流下速度(R_m)部分，使用矽灰取代水泥之配比具有較高之 R_m 值，顯示矽灰的添加會使混凝土黏稠度增加。

表 4.19 低鹼性封塞用 SCC 流下試驗結果

配比	流下時間 t ₀ (sec)	流下速度 V _m (m/s)	相對流下速度 R _m	是否 堵塞
C100	18.10	0.0022	113.33	否
C60	7.48	0.0054	274.24	否
C50	7.74	0.0052	265.02	否
C40	7.15	0.0056	286.89	否

4.3.2 坍流度

坍流度試驗結果如表 4.20 所示。圖 4.39 為現場各配比實驗狀況。各配比以強塑劑控制坍流度範圍 60-70cm，均可以符合封塞用低鹼性 SCC 坍流度 60-70 cm 的要求。

當矽灰 40%取代水泥時(C60)，所需的強塑劑用量低於對照組配比(C100)，但隨矽灰取代水泥比例增加，所需的強塑劑用量也隨之增加，並超過對照組的用量；直徑達 50cm 所需時間及停止流動時間，矽灰取代水泥的影響行為均與強塑劑用量試驗的結果趨勢相符。

表 4.20 低鹼性封塞用 SCC 坍流度試驗結果

配比	SP (kg/m ³)	直徑達 50cm 時間 (sec)	停止 流動 時間 (sec)	坍流度(cm)		
				最大直徑	與最大直徑 垂直之直徑	平均
C100	8.32	4.36	25.44	71.0	67.0	69.0
C60-SF40	7.15	3.06	24.10	62.0	61.0	61.5
C50-SF50	10.39	4.80	22.30	60.0	60.0	60.0
C40-SF60	11.04	4.70	41.00	69.5	69.0	69.3



(a) C100



(b) C60-SF40



(c) C50-SF50



(d) C60-SF40

圖 4.39 SCC 坍流度試驗圖

4.3.3 凝結時間

圖 4.40 為各砂灰取代量之凝結時間。砂灰取代水泥 0%、40%、50%及 60% 的初凝時間分別為 2.75、3.80、4.20 及 4.13 小時，均能符合封塞用低鹼性 SCC 工作性 ≥ 2 小時的要求，使用砂灰取代比例越高者，達初凝時間越長，達終凝所需時間亦有相同趨勢，且趨勢較初凝時更加顯著，顯示砂灰取代水泥比例越高者，混凝土達終凝時間越長。

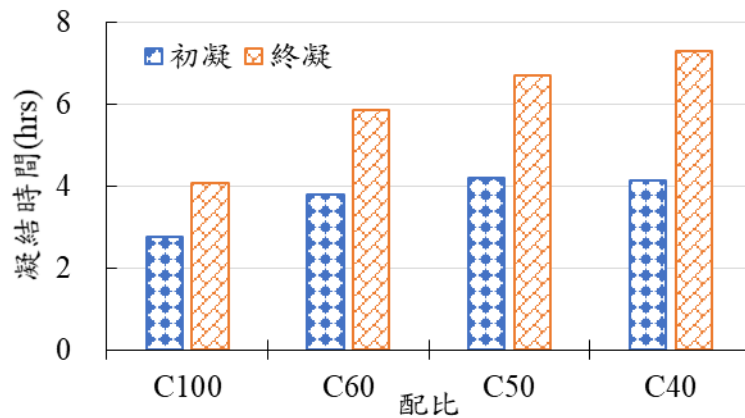


圖 4.40 各配比凝結時間

4.3.4 抗壓強度

抗壓強度部份試驗系列分為 B200 系列與 B300 系列，以下分別針對各系列進行說明。

1. B200 系列抗壓強度

各砂灰取代比例抗壓強度變化結果如表 4.21、圖 4.41 所示。

在養護齡期對抗壓強度影響方面，各配比(C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60) 之抗壓強度均隨養護時間增加而增加。如對照組 C100，28 天及 90 天抗壓強度分別為 20.51 MPa 及 23.61 MPa，成長 15.1%；配比 C60-SF40 抗壓強度分別為 26.59 MPa 及 31.27 MPa，成長 17.6%；配比 C50-SF50，抗壓強度分別為 25.07 MPa 及 29.63 MPa，成長 18.2%；而配比 C40-SF60 抗壓強度分別為 22.68 MPa 及 27.93 MPa，成長 25.2%。

在矽灰取代量對晚期強度成長的影響方面，由上述各矽灰取代比例的 90 天齡期相對於 28 天齡期之強度成長幅度，以取代量 60% 之幅度最大，顯示使用矽灰取代水泥量越高，晚期強度成長幅度越大。

在矽灰取代部分水泥量對混凝土強度影響方面，矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥，28 天齡期抗壓強度分別較對照組增加 29.6%、22.0% 及 10.6%；90 天齡期抗壓強度分別較對照組增加 32.4%、25.5% 及 20.2%。對於 B200 系列而言，可觀察到：(1) 矽灰取代 40% 有較佳的強度表現，隨矽灰取代量再增加，強度會降低，但矽灰取代量達 60% 時，強度仍高於對照組。(2) 齡期越長，矽灰部分取代水泥之混凝土強度高出對照組強度之幅度越大。

在矽灰取代部分水泥量對低鹼性 SCC 抗壓強度要求之符合性方面，B200 系列 90 天抗壓強度均大於 10 MPa 的要求。

表 4.21 B200 系列各齡期抗壓強度

配比	平均抗壓強度(MPa)		
	28	56	90
C100	20.51	21.67	23.61
C60-SF40	26.59	28.57	31.27
C50-SF50	25.07	27.08	29.63
C40-SF60	22.68	27.99	28.39

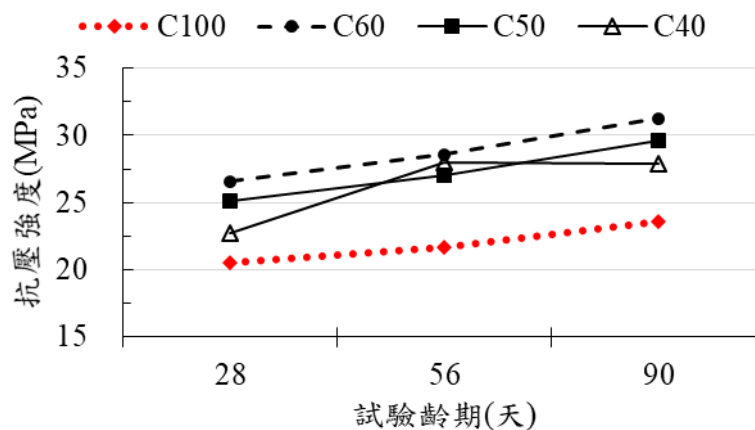


圖 4.41 B200 系列各配比抗壓強度

2. B300 系列抗壓強度

此系列與 B200 系列之最大不同為每立方公尺膠結材之使用重量；B200 系列 200 kg/m³，B300 系列則為 300 kg/m³。各矽灰取代比例抗壓強度變化結果如表 4.22、圖 4.42 所示。

在養護齡期對抗壓強度影響方面，各配比(C60-SF40、C50-SF50 及 C40-SF60)之抗壓強度均隨養護時間增加而增加。如對照組 C100，28 天及 90 天抗壓強度分別為 33.68 MPa 及 36.52 MPa，成長 8.4%；配比 C60-SF40 抗壓強度分別為 47.54 MPa 及 51.47 MPa，成長 8.3%；配比 C50-SF50，抗壓強度分別為 49.70 MPa 及 51.81 MPa，成長 4.2%；而配比 C40-SF60 抗壓強度分別為 45.31 MPa 及 56.87 MPa，成長 25.6%。

在矽灰取代量對晚期強度成長的影響方面，由上述各矽灰取代比例的 90 天齡期相對於 28 天齡期之強度成長幅度，以取代量 60%之幅度最大，顯示使用矽灰取代水泥量越高，晚期強度成長幅度越大。

在矽灰取代部分水泥量對混凝土強度影響方面，矽灰分別取代 40%、50%及 60%水泥，28 天齡期抗壓強度分別較對照組增加 41.2%、47.6%及 34.5%；90 天齡期抗壓強度分別較對照組增加 40.1%、41.9%及 55.7%。對於 B300 系列而言，可觀察到：(1)矽灰取代 60%有較佳的強度表現，隨矽灰取代量增加，強度會增加，強度均高於對照組，但與 B200 系列以矽灰取代 40%有較佳的強度表現不同，顯示對於抗壓強度而言，最佳矽灰取代量與膠結材的總量有關。(2)對於混凝土具有較高的膠結使用量時，在較短的 28 天養護齡期時，矽灰部分取代水泥之混凝土強度即有高出對照組強度 34.5%-41.2%的表現，至 90 天齡期時則有高出 40.1%-55.7%的表現。

在矽灰取代部分水泥量對低鹼性 SCC 抗壓強度要求之符合性方面，B300 系列 90 天抗壓強度均大於 10 MPa 的要求。

表 4.22 B300 系列各齡期抗壓強度

配比	平均抗壓強度(MPa)		
	28	56	90
C100	33.68	34.89	36.52
C60-SF40	47.54	48.47	51.47
C50-SF50	49.70	51.13	51.81
C40-SF60	45.31	56.02	56.87

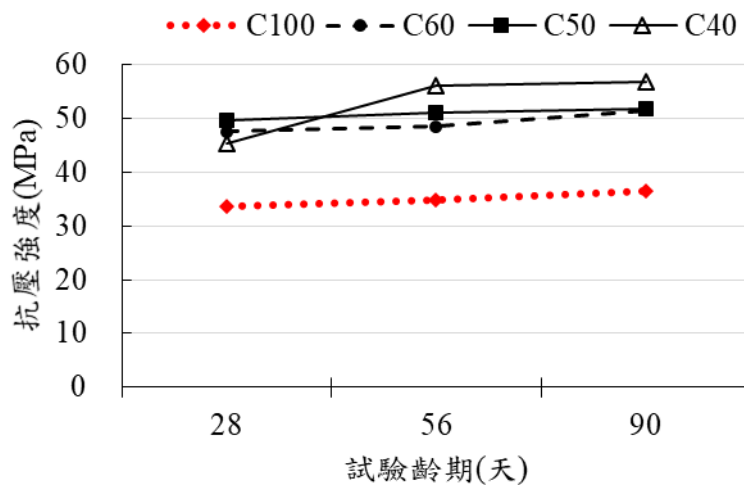


圖 4.42 B300 系列各配比抗壓強度

根據前述 B200 系列與 B300 系列之抗壓強度試驗結果，將兩系列進行綜合比較後，整理如圖 4.43 至圖 4.45，結果如下：

1. 圖 4.43 為 B200 系列與 B300 系列於 28 天各配比之抗壓強度。矽灰取代水泥 0%、40%、50% 及 60% 時的抗壓強度，B300 系列分別為 B200 系列的 1.64、1.78、1.98 及 1.99 倍。
2. 兩系列於 56 天各配比之抗壓強度比較如圖 4.44 所示。矽灰取代水泥 0%、40%、50% 及 60% 時的抗壓強度，B300 系列分別為 B200 系列的 1.61、1.70、1.89 及 2.00 倍。

3. 兩系列 90 天之抗壓強度比較如圖 4.45 所示。矽灰取代水泥 0%、40%、50% 及 60% 時的抗壓強度，B300 系列分別為 B200 系列的 1.35、1.39、1.43 及 1.50。
4. B300 系列於膠結材料使用比例較 B200 多出 1.5 倍重量，故各齡期整體之抗壓強度均較 B200 系列為高。對於相同的矽灰取代量，養護齡期超過 56 天時，B300 系列強度高出 B200 系列的比例會降低，以矽灰 60% 取代水泥為例，B300 系列 28 天、56 天及 90 天齡期的抗壓強度分別為 B200 系列的 1.99、2.00 及 1.50 倍。

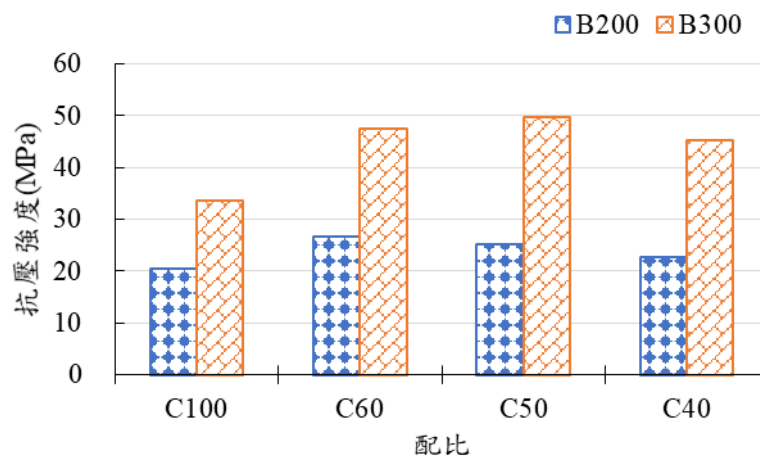


圖 4.43 B200 與 B300 系列 28 天抗壓強度

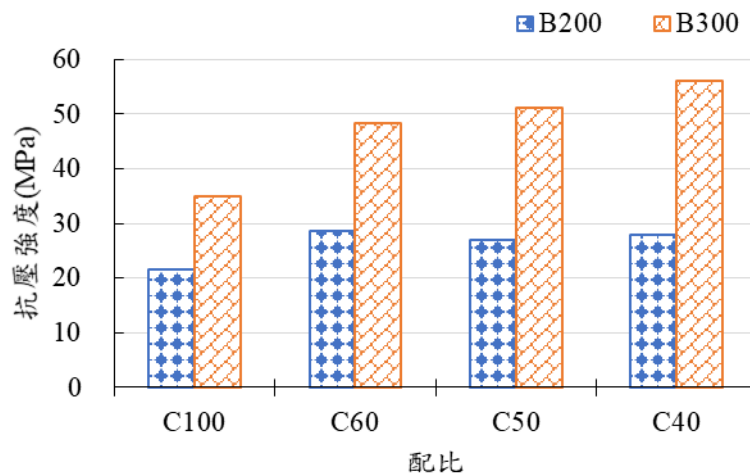


圖 4.44 B200 與 B300 系列 56 天抗壓強度

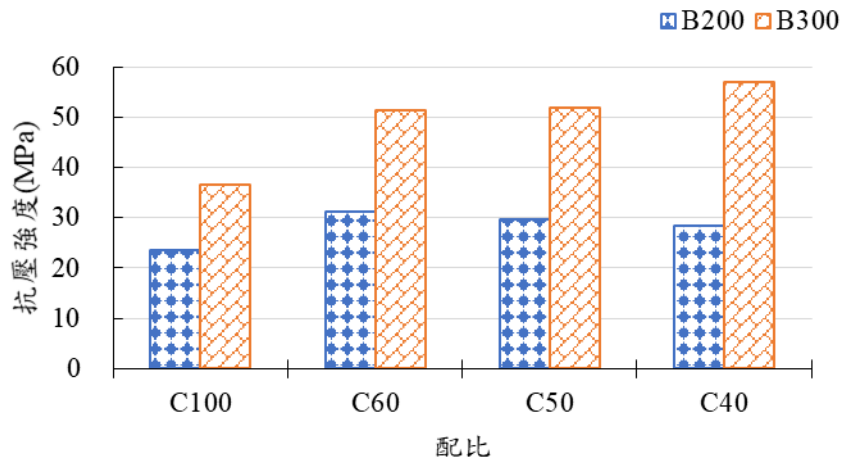


圖 4.45 B200 與 B300 系列 90 天抗壓強度

4.3.5 pH

B200 系列與 B300 系列均進行 28、56 及 90 天 pH 之量測，說明如下。

1. B200 系列的 pH 值

表 4.23 與圖 4.46 為 B200 系列各配比於 28、56 及 90 天之 pH 值。對於對照組，具有高的 pH 值，齡期 28 天後的 pH 值無明顯變化，介於 12.49~12.63。對於矽灰 40%、50% 及 60% 取代水泥之配比 C60、C50 及 C40，觀察如下：

- (1) 孔隙溶液 pH 值均隨養護時間增加而降低，對於矽灰 40%、50% 及 60% 取代水泥之配比，分別於 56 天、28 天及 28 天，pH 值即符合低鹼性 SCC 的要求， $pH \leq 11.0$ 。
- (2) 孔隙溶液 pH 值雖隨養護時間增加而降低，但齡期 56 天之後，pH 值降低的幅度較小，以矽灰 40% 取代水泥之配比為例，28 天、56 天及 90 天的 pH 值分別為 11.13、10.80 及 10.75。
- (3) 孔隙溶液 pH 值均隨矽灰取代量增加而降低，以 28 天齡期為例，矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥，pH 值分別為 11.13、10.72 及 10.53。

表 4.23 B200 系列於各齡期之 pH

配比	平均 pH		
	28	56	90
C100	12.49	12.59	12.63
C60-SF40	11.13	10.80	10.75
C50-SF50	10.72	10.71	10.68
C40-SF60	10.53	10.24	10.21

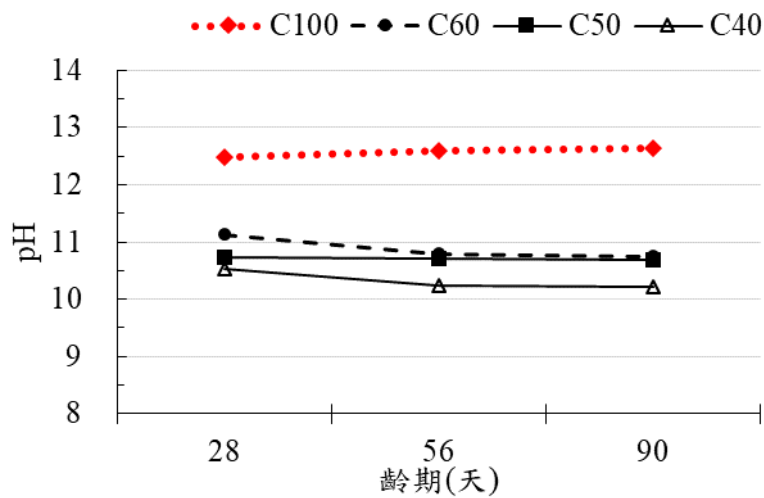


圖 4.46 B200 系列於各齡期之 pH

2. B300 系列 pH

表 4.24 與圖 4.47 為 B300 系列各配比於 28 天、56 天及 90 天之 pH 值。對於對照組，具有高的 pH 值，齡期 28 天後的 pH 值無明顯變化，介於 12.53~12.69。對於矽灰 40%、50% 及 60% 取代水泥之配比 C60、C50 及 C40，觀察如下：

- (1) 孔隙溶液 pH 值均隨養護時間增加而降低，對於矽灰 40%，90 天時 pH 值為 11.07，仍未能符合低鹼性 SCC 的要求；50% 及 60% 取代水泥之配比，分別於 56 天及 28 天，pH 值即符合低鹼性 SCC 的要求， $pH \leq 11.0$ 。
- (2) 孔隙溶液 pH 值雖隨養護時間增加而降低，但齡期 56 天之後，pH 值降低的幅度仍未見趨緩，以矽灰 40% 取代水泥之配比為例，28 天、56 天及 90 天的 pH 值分別為 11.27、11.26 及 11.07。

(3) 孔隙溶液 pH 值均隨矽灰取代量增加而降低，以 28 天齡期為例，矽灰分別取代 40%、50%及 60%水泥，pH 值分別為 11.27、11.01 及 10.76。

表 4.24 B300 系列於各齡期之 pH

配比	平均 pH		
	28	56	90
C100	12.59	12.69	12.53
C60-SF40	11.27	11.26	11.07
C50-SF50	11.01	10.92	10.71
C40-SF60	10.76	10.48	10.34

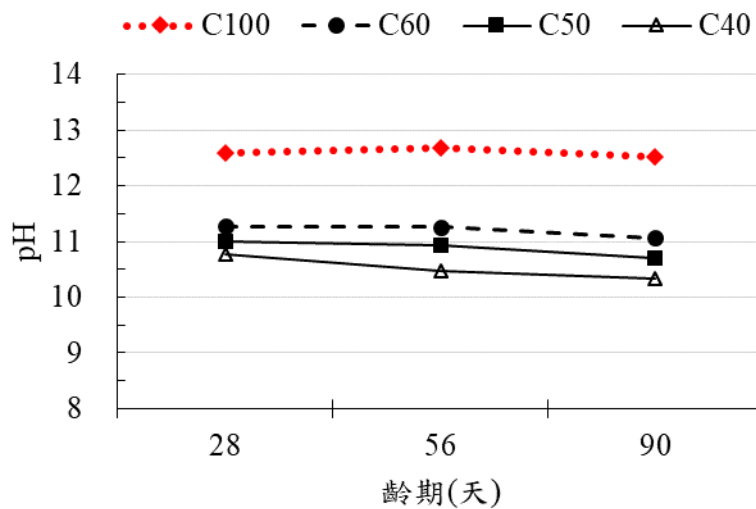


圖 4.47 B300 系列於各齡期之 pH

根據前述 B200 系列與 B300 系列之 pH 試驗結果，將兩系列進行綜合比較後，整理如圖 4.48 至圖 4.50，顯示：

1. 對於對照組混凝土，混凝土內的膠結材料用量對同一齡期的 pH 值未產生明顯影響。
2. 矽灰以相同重量比例取代部分水泥時，混凝土內的膠結材料總量的增加，會增加相同齡期混凝土的 pH 值。

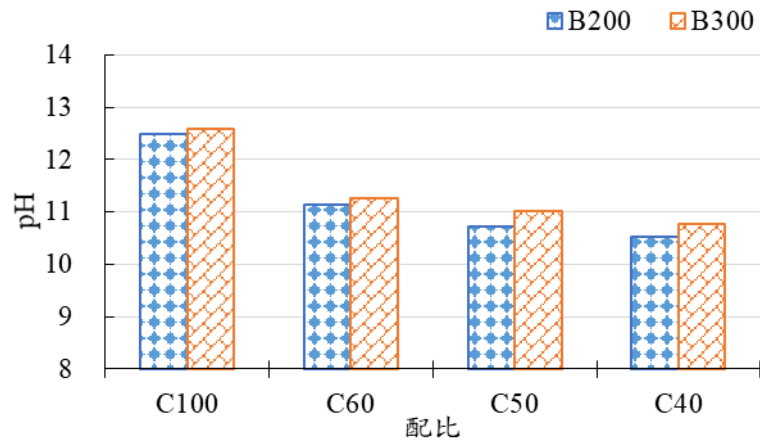


圖 4.48 B200 及 B300 系列 28 天的 pH 值

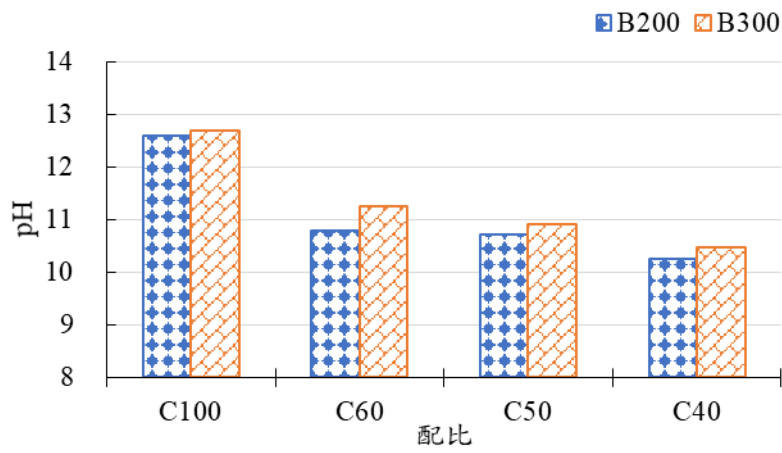


圖 4.49 B200 及 B300 系列 56 天的 pH 值

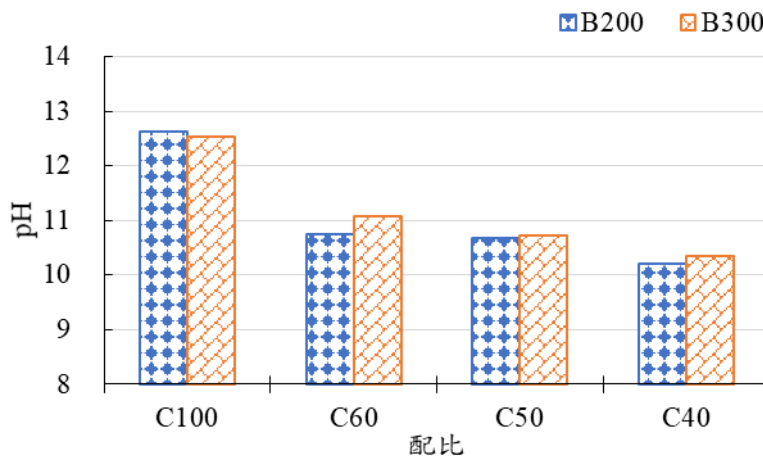


圖 4.50 B200 及 B300 系列 90 天的 pH 值

4.3.6 彈性模數試驗

彈性模數試驗參照 ASTM C469，以 B200 系列進行各混凝土配比於齡期 28、90 天之彈性模數與抗壓強度關係，試驗結果如圖 4.51。結果顯示：

- (1) 各配比之彈性模數隨養護齡期增加而增加，與抗壓強度的成長趨勢相符。
- (2) 砂灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥，90 天彈性模數分別為 24.52GPa、22.29GPa 及 23.99GPa，均符合低鹼性 SCC 彈性模數要求，90 天齡期之彈性模數 ≈ 20 GPa。

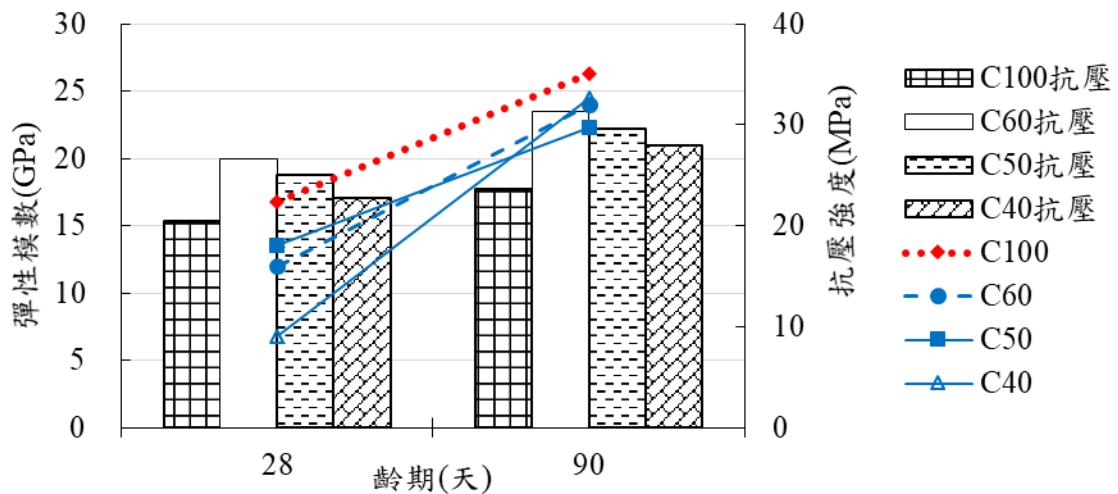


圖 4.51 彈性模數與抗壓強度關係

4.4 處置坑道封塞用低鹼性混凝土耐久性研究

4.4.1 不同矽灰取代量體積穩定性

針對 B200 系列混凝土進行角柱乾縮試驗評估各配比之體積穩定性，圖 4.52~圖 4.55 為各配比之角柱乾縮試體試驗前之狀態。

角柱乾縮試驗部分，試驗程序參照 CNS11056 卜特蘭水泥砂漿乾燥收縮量測定法，以 7.5×7.5×28.5cm 之混凝土角柱於濕養護 72 小時後於氣乾養護之第 4 天、11 天、18 天及 25 天，以比長儀進行各配比角柱長度變化量之量測。

試驗結果如圖 4.56 所示。顯示：

- (1) 收縮量隨試驗齡期增加而增加。以 0-4 天收縮量增加幅度較小，4-11 天的增加幅度最大。
- (2) 矽灰 0%、40%、50% 及 60% 取代水泥的試體試驗 25 天的收縮量分別為 0.0402%、0.0313%、0.0356% 及 0.0312%。矽灰取代水泥可以減少混凝土收縮量，增加體積穩定性。符合低鹼性 SCC 要減少混凝土體積上的收縮要求。
- (3) 矽灰取代 40% 水泥的混凝土收縮量最小，試驗 25 天的收縮量與對照組比較，減少 21% 的收縮量。各矽灰取代量之收縮量與對照組比較的減少幅度落在 11%~22% 之間，當矽灰取代 40% 水泥時，試驗前 5 天的收縮量約為對照組收縮量之 13%。



圖 4.52 B200-C100 角柱乾縮試驗前



圖 4.53 B200-C60-SF40 角柱乾縮試驗前



圖 4.54 B200-C50-SF50 角柱乾縮試驗前



圖 4.55 B200-C40-SF60 角柱乾縮試驗前

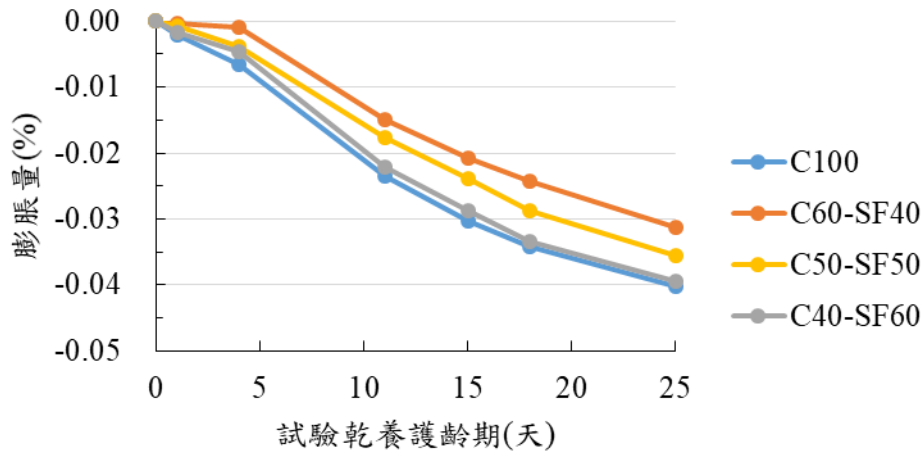


圖 4.56 各矽灰取代量之各齡期乾縮量

4.4.2 不同矽灰取代量耐久性

耐久性質試驗係參照 CNS 14794 水硬性水泥砂漿棒暴露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法，製作 7.5×7.5×28.5cm 之 B200 系列混凝土角柱試體，並浸泡於濃度 50.0g/L 之硫酸鈉溶液，進行 1、2、3、4、5、13 及 15 週之膨脹量量測，圖 4.57 為浸泡於硫酸溶液中之混凝土角柱。試驗結果如圖 4.58 所示。顯示：

- (1) 對於對照組，膨脹量隨試驗齡期增加而增加。以 0-2 週增加幅度較大，而後維持概略相同的膨脹速率，至第 13 週，膨脹量的增加仍未見減緩。
- (2) 對於矽灰部分取代水泥混凝土，0-4 週的膨脹量增加較快，而後膨脹量維持相對穩定。
- (3) 矽灰 40%、50% 及 60% 取代水泥的試體試驗 13 週膨脹量分別為 0.0052%、0.0088% 及 0.0081%，並均較對照組(0.0185%)小，僅對照組膨脹量的 28%-48%，表現出耐久性，以矽灰 40% 取代水泥的混凝土有最低的膨脹量，即最佳的耐久性。



圖 4.57 B200 系列角柱硫酸鹽試體(a)、(b)

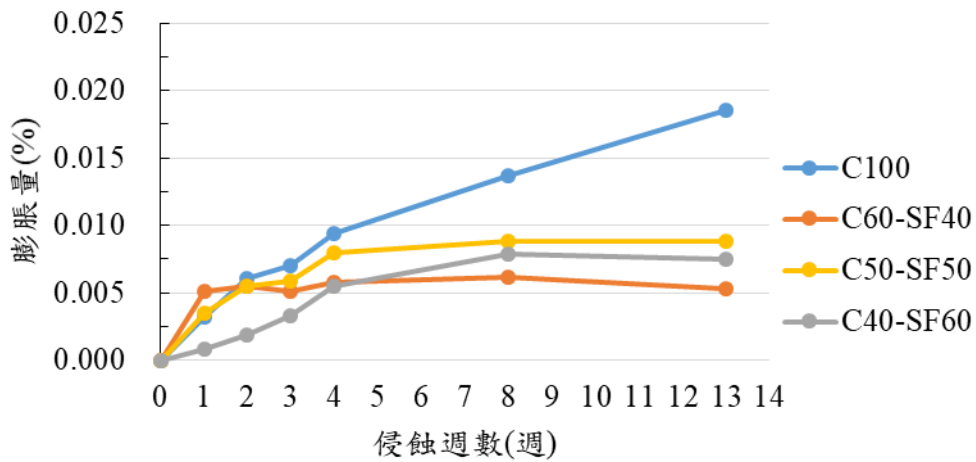


圖 4.58 不同比例矽灰抗硫酸鹽能力

4.4.3 不同矽灰取代量混凝土緻密程度

試驗根據 ASTM C1202 進行 B200 系列配比之快速氯離子滲透試驗(RCPT)，所測得之 RCPT 累積通過電量可依表 4.25 由高至低分為各範圍，以此辨別氯離子於混凝土中穿透性的高低，並依此判斷混凝土緻密程度。本試驗以 $\phi 10 \times 5$ cm 之混凝土試體進行 56 天與 90 天氣離子穿透性試驗，試驗結果如表 4.26，單純以矽灰取代之配比 C60、C50 及 C40。

各配比於 56、90 天齡期氯離子之穿透能力，除對照組 C100 有下降之趨勢外，其餘各配比皆呈現上升之趨勢，顯示純水泥混凝土之孔隙緻密程度會隨著養護齡期增加而增加，應證混凝土之強度發展與孔隙緻密程度存在一定相關性。

根據表 4.25 所提供之分類等級，除對照組 C100 屬氯離子穿透性高之外，使用矽灰取代水泥之配比 C60、C50 及 C40，氯離子穿透性幾乎可視為無，並且由表 4.26 可看出，在取代量 40% 至 60% 區間內，累積通過電量隨著取代量增加而增加，顯示混凝土之孔隙緻密程度隨矽灰取代量增加而下降。以取代量 60% 做正規化，取代量 40% 及 50% 之配比於 56 天、90 天之累積通過電量分別為 C40(矽灰取代量 60%) 之 23.39%、29.49% 及 39.29% 及 42.77%。顯示，矽灰取代量越高，混凝土晚期孔隙緻密程度越低。

然則，以添加矽灰所製成之混凝土進行 RCPT 之檢測結果於 2000 年由 T. H. Wee 等人提出 [42]，添加礦物摻料之混凝土，其藉由 RCPT 所檢測出之累積通過電量與氯離子穿透性並不具高度相關性，無法斷定與氯離子於混凝土中遷移的能力高低 [2]，故本試驗檢測之結果僅可作為參考資訊，相關矽灰取代比例對混凝土緻密程度之影響尚需藉由其他試驗進行驗證。以本試驗成果可歸結，矽灰添加比例越高，可測得之累積通過電量越高。

表 4.25 ASTM C1202 氯離子穿透等級

累積通過電量(C)	氯離子穿透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	極低
< 100	可視為無

表 4.26 各配比 56、90 天 RCPT 試驗結果

配比	累積電量(C)	
	56 天	90 天
C100	9888.015	8067.03
C60-SF40	19.29	35.37
C50-SF50	32.40	51.30
C40-SF60	82.47	119.94

4.5 封塞用低鹼性自充填混凝土之配方分析審查重點及注意事項

放射性廢棄物最終處置場需使用低鹼性水泥混凝土，因純水泥混凝土，試體內的 pH 值很高，一般可使用具有卜作嵐材料特性的礦物摻料，以降低膠結材料的孔隙溶液 pH 值，同時可增加漿體比重及稠度，使其有足夠懸浮力托住粗細粒料而達到材料不析離之目的。

於設計時將粗粒料用量大約減少至傳統混凝土之 80%，粒料最大尺寸為通過鋼筋間隙亦有所限制，並增加化學摻料用量至臨界析離狀況，以避免高流動性造成析離。

檢測 pH 值的方法可直接選擇混凝土利用 ESL 法加以評估，pH 值需小於 11.0；工作性可藉添加強塑劑加以改善，並需進行坍流度試驗，用量需達到實務需求。

發展應用於最終處置場之低鹼性混凝土，需掌握應用之場合，針對其功能需求進行考量，以達到使用低鹼性水泥混凝土的預期目標，一般型式包括封塞用混凝土、噴凝土及自充填混凝土等，而各種不同之應用所要求之功能不同，故對於低鹼性水泥混凝土之配比，需具體考量其不同功能的要求及應用方式。例如，封塞用混凝土對於工作性之要求高，而噴凝土則對強度之要求較高，另一方面，自充填混凝土則同時對工作性及強度皆相當重視。除此之外，不論何種應用，最終處置場使用之混凝土皆需具備良好的水密性。

對於最終處置場進行低鹼混凝土配比設計時，經參採瑞典、芬蘭、日本及本研究結果，列出審查管制要項建議：

1. 卜作嵐材料如矽灰、飛灰或爐石等取代卜特蘭水泥量須達 40% 以上且配比總矽量須達 55% 矽含量。
2. 水泥孔隙溶液目標 pH 值降至 11 以下，且水化產物 C-S-H 膠體鈣矽比降至 0.8。

3. pH 值量測方法評估方面，目前各國尚未制定出一套標準化的測試程序，根據瑞典報告書 SKB R-12-02 (2012)及本研究結果，均發現使用 Ex Situ Leaching method (ESL)，量測程序是根據 ASTM D4972 土壤 pH 值之標準試驗方法，在重複性與再現性會比其它量測 pH 值方法來的適用及精準。
4. 低鹼性封塞混凝土 90 天齡期之抗壓強度須達到 10 MPa 以上、楊氏模數須落在 20 GPa 左右，而工作性須維持至少 2 小時以上。
5. 矽灰為最有效降低孔隙溶液 pH 值之卜作嵐摻料，會加速 C₃S 之水化及 C-S-H 膠體形成，故具有高強度，用量需超過 20 % 才能消耗氫氧化鈣，但過高的矽灰比例會導致強度增加緩慢、較低的最終強度及對養護環境有較大的敏感性。

於工程施工前，針對處置場封塞設施所使用之自充填混凝土特性要求大致如下：

1. 須具有可泵送性。
2. 自密實特性，須保持自身密實性至少 2 小時。
3. 可以在普通混凝土工廠生產。
4. 最終抗壓強度至少為 10Mpa。
5. 盡量降低水化反應時所產生之熱量，以減少冷卻措施之使用。膠結料之使用須控制在低用量，以減少混凝土所產生之熱量和體積上之收縮。
6. 混凝土與地下水接觸後之 pH 值須小於 11。
7. 混凝土應盡量減少有機強塑劑，並且不得使用其他有機成分。

4.6 綜合討論

4.6.1 試驗方法及低鹼性自充填混凝土的工程性質驗證

去年度子計畫三之 ESL 標準量測程序之建立與合適性評估，其研究目的主要在於與文獻[2]所提及之影響因子進行初步實驗成果驗證，並藉由穩定性試驗確認實驗操作與結果之穩定性。今年度則為確認細節程序、相關因子影響及重複性行為，已評估適合作為本土化的 pH 值量測方法。

此外，本研究也依據 SKB 報告中的低鹼性自充填混凝土配比，經改變矽灰取代水泥用量及使用本土粒料等調整，製作 B200 系列混凝土，並進行低鹼性自充填混凝土的工程性質驗證，驗證成果如下，均滿足 4.6 節的低鹼性自充填混凝土的性質要求：

1. 根據 CNS 14841 自充填混凝土流下性試驗結果，顯示矽灰的添加可使混凝土黏稠度增加。
2. 以強塑劑控制坍流度範圍 60-70cm，均可以符合封塞用低鹼性 SCC 坍流度 60-70 cm 的要求。
3. 矽灰取代水泥之混凝土凝結時間可符合封塞用低鹼性 SCC 工作性 ≥ 2 小時的要求，使用矽灰取代比例越高者，達初凝時間越長，達終凝所需時間亦有相同趨勢。
4. 使用矽灰取代水泥量越高，晚期強度成長幅度越大。矽灰取代 40% 有較佳的強度表現，隨矽灰取代量再增加，強度會降低，但矽灰取代量達 60% 時，強度仍高於對照組。在矽灰取代部分水泥量對低鹼性 SCC 抗壓強度要求之符合性方面，B200 系列混凝土 90 天抗壓強度均大於 10 MPa 的要求。
5. 孔隙溶液 pH 值均隨養護時間增加而降低，對於矽灰 40%、50% 及 60% 取代水泥之 B200 配比，分別於 56 天、28 天及 28 天，pH 值即符合低鹼性 SCC 的要求， $\text{pH} \leq 11.0$ 。孔隙溶液 pH 值均隨矽灰取代量增加而降低，以 28 天齡期為例，矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥，pH 值分別為 11.13、10.72 及 10.53。

6. B200 系列各配比之彈性模數隨養護齡期增加而增加，與抗壓強度的成長趨勢相符。矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥，90 天彈性模數分別為 24.52GPa、22.29GPa 及 23.99GPa，均符合低鹼性 SCC 彈性模數要求，90 天齡期之彈性模數 \approx 20 GPa。
7. 矽灰 40%、50% 及 60% 取代水泥的試體試驗 25 天的收縮量分別為 0.0061%、0.0055% 及 0.0049%。矽灰取代水泥可以減少 B200 系列混凝土的收縮量，增加體積穩定性。符合低鹼性 SCC 要減少混凝土體積上的收縮要求。
8. 對於對照組，膨脹量隨試驗齡期增加而增加。B200 系列混凝土，0-4 週的膨脹量增加較快，而後膨脹量維持相對穩定。矽灰取代水泥的試體試驗 13 週膨脹量均較對照組小，僅為對照組膨脹量的 28%-48%，表現出耐久性，以矽灰 40% 取代水泥的混凝土有最低的膨脹量，即最佳耐久性。
9. B200 系列的對照組混凝土，因低水泥用量(200 kg/m³)及高水灰比(0.825)的卜特蘭水泥混凝土的特性，故具有高的氯離子穿透性。矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥時，養護 56 天混凝土的累積電量分別為 19.29、32.40 及 82.47 庫倫，均可視為無氯離子穿透性，矽灰取代 40% 水泥的混凝土緻密性最佳，顯示低鹼性水泥混凝土，即使在低水泥用量及高水膠比用量等不利條件下，仍能具有極佳的緻密性。

4.6.2 漿體性質探討

圖 4.59~圖 4.65 為綜合前述漿體試驗結果之比較，根據漿體所提供之抗壓強度、pH 等試驗結果，可獲得下列資訊：

1. 要達到低鹼性水泥混凝土性質的要求，最重要是要掌握膠結材料的性質，本計畫利用矽灰取代部分水泥作為配比設計基礎，並新增飛灰作為膠結材料，配合矽灰發展不同漿體配比。
2. 矽灰取代量在 40%-60 % 範圍養護達 56 天齡期時，漿體的 pH 即接近低鹼性水泥的要求，但飛灰取代量在 40~60% 範圍時，漿體 pH 降低幅度有限，因此，在選用不同膠結材比例必須考慮到降低 pH 的折損率，應使用足量的矽灰。

3. 強度方面，可藉由調整膠結性材料的用量以符合所要的強度要求。在用水量方面，因為加入了高比例的矽灰，會影響混凝土的工作性，因此，添加少量飛灰取代部分水泥可改善工作性，但仍未達到工作性要求且需控制用水量情形下，則加入適當的強塑劑以改善工作性有其必要性。

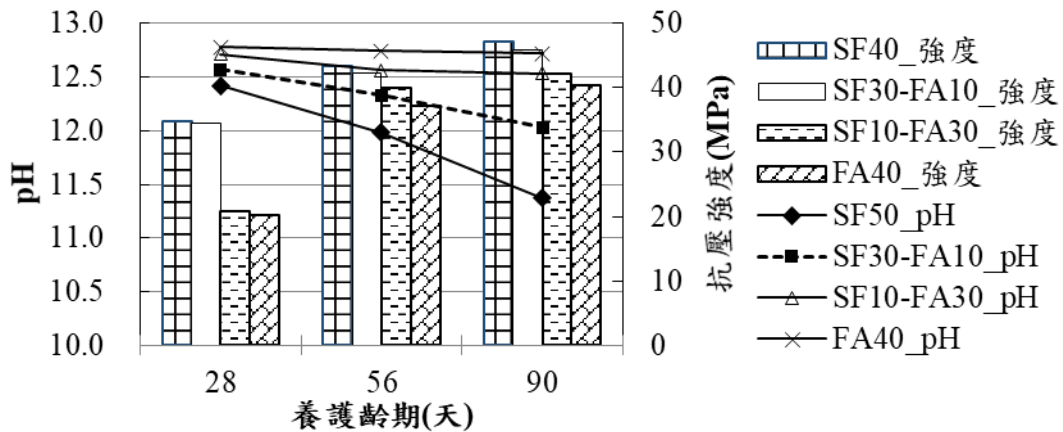


圖 4.59 C60 系列的 pH 及抗壓強度

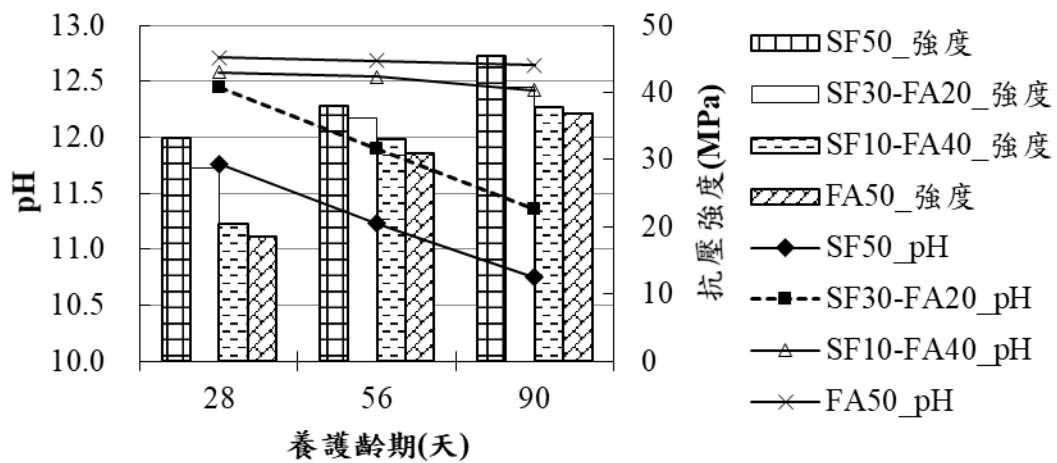


圖 4.60 C50 系列的 pH 及抗壓強度

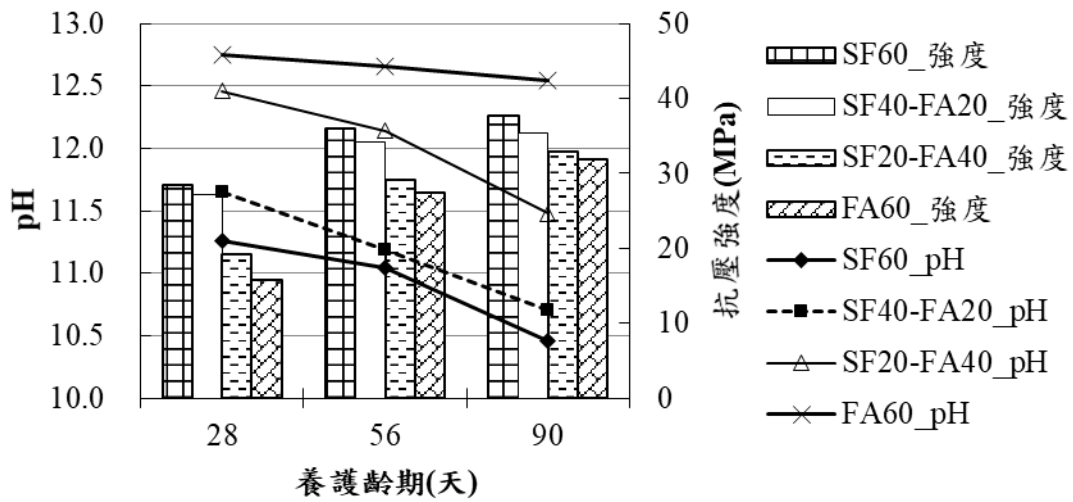


圖 4.61 C40 系列的 pH 及抗壓強度

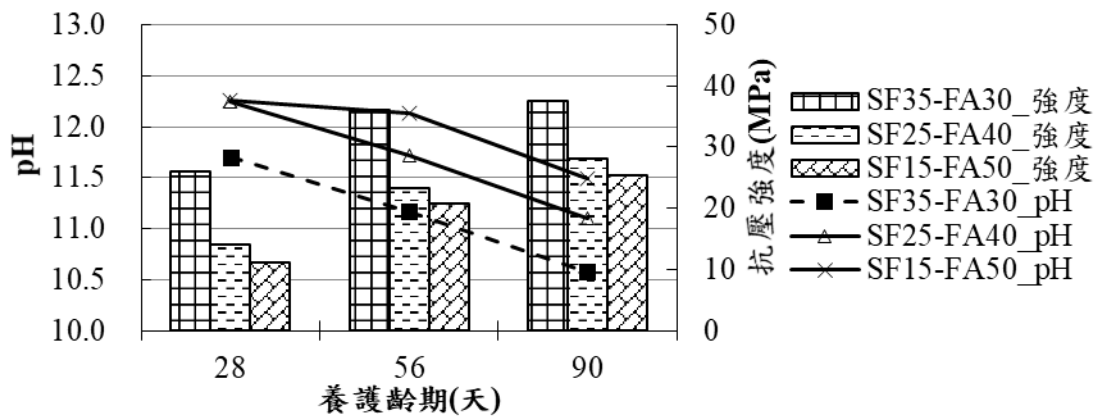


圖 4.62 C35 系列的 pH 及抗壓強度

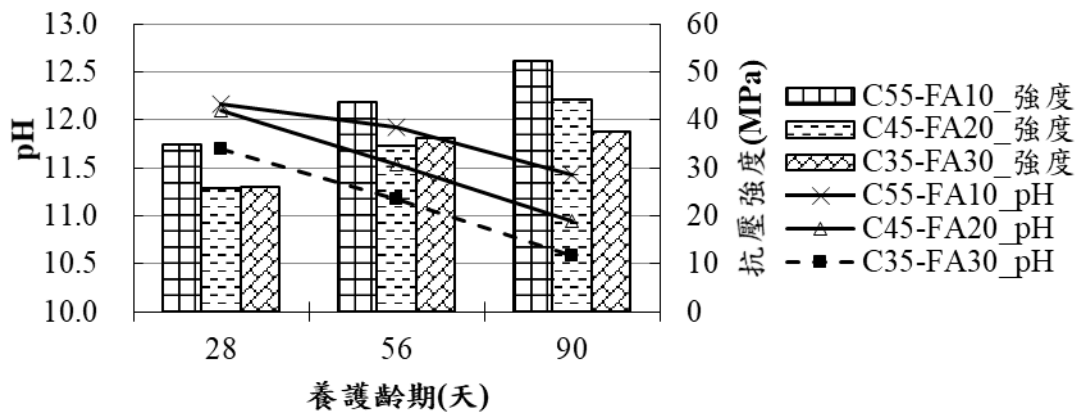


圖 4.63 SF 35 系列的 pH 及抗壓強度

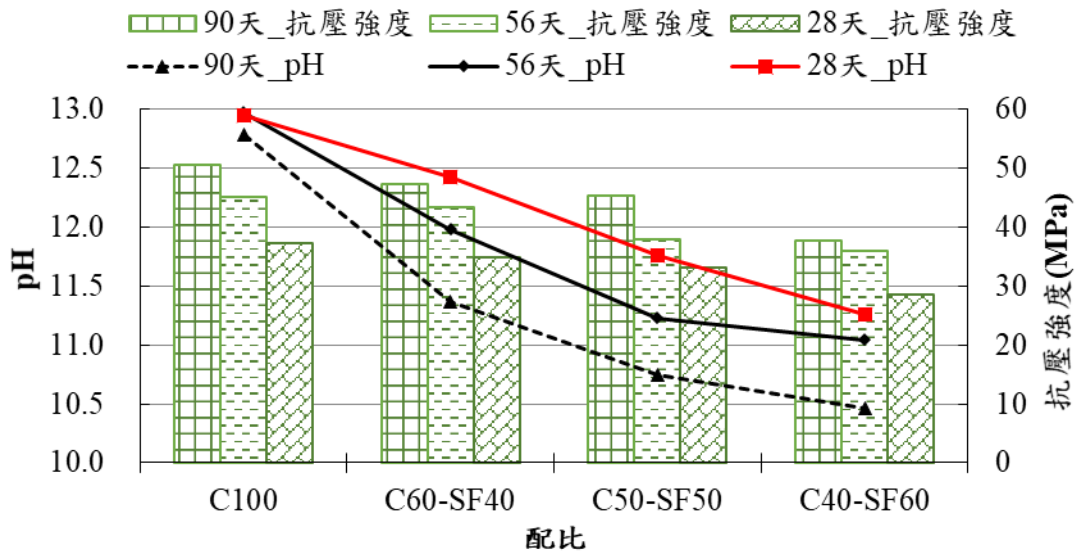


圖 4.64 矽灰取代水泥重量 40~60 % 的 pH 及抗壓強度

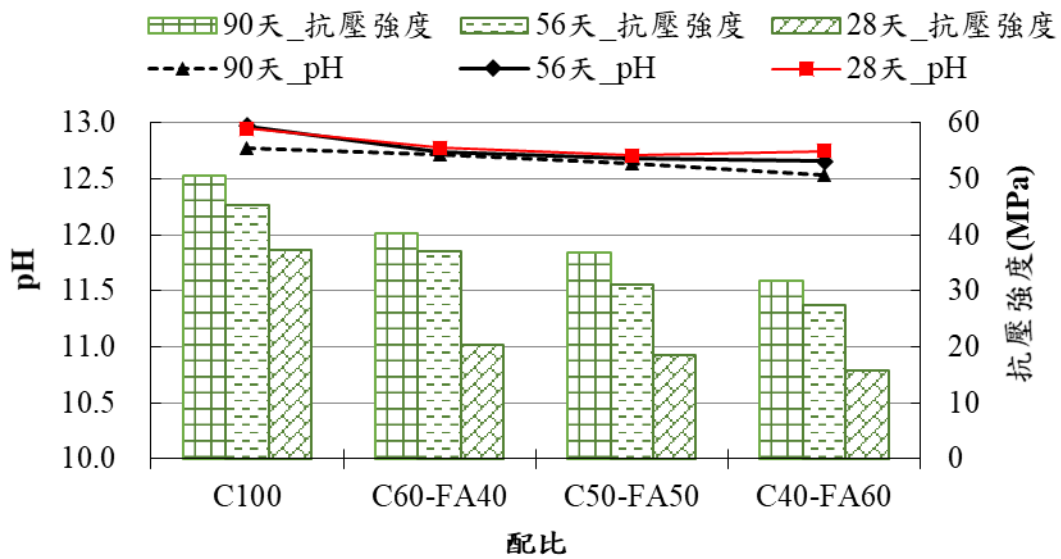


圖 4.65 飛灰取代水泥重量 40~60 % 的 pH 及抗壓強度

4.6.3 低鹼性自充填混凝土性質探討

綜合前述相關試驗結果，可獲得下列資訊：

1. 圖 4.66 顯示，使用矽灰取代水泥比例越高之配比，其凝結時間與相對流下速度皆較高，顯示高矽灰取代比例於控制坍流度範圍 60-70cm 之情況下，可提供較長之澆置作業時間，但同時亦會因高黏滯性而增加施工難度；取代量達 40%、50% 則可獲得較低之黏稠性，使澆置作業較易進行並提供良好之工作性。
2. 圖 4.67 顯示，於抗壓強度之部份，以矽灰部份取代水泥之配比 C60、C50 及 C40，各齡期強度隨取代比例越高，有下降之趨勢，然而，矽灰取代量最高之 C40 於各齡期強度發展仍較對照組 C100 來得高，顯示使用矽灰取代部分水泥，於取代量 40-60% 之間，可使混凝土強度增加。
3. 各配比於 pH 部份，除對照組 C100 於各齡期維持持平外，皆在齡期達 28 天時下降至 pH 11 附近，並且於 56 天齡期即符合低鹼性混凝土之要求。此外，各配比測得之 pH 隨矽灰取代比例增加而降低，顯示增加矽灰取代比例可有效降低混凝土孔隙溶液 pH。

4. 比較各矽灰取代量之體積穩定性與耐久性，如圖 4.56、圖 4.58。

體積穩定性部份，圖 4.56 顯示，使用矽灰取代比例越高，其乾縮量越大、越接近對照組 C100 之乾縮曲線；乾縮量隨取代比例下降而減少，並在矽灰取代比例達 40% 時，可獲得較穩定之混凝土體積。

耐久性部份，由圖 4.58 可發現，使用矽灰部份取代水泥之配比 C60、C50 及 C40 於進行硫酸鹽侵蝕第 4 周後，各別之體積變化量趨於穩定，顯示使用矽灰部份取代水泥可增加混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕之能力；其中，以取代比例 40% 時，可獲得較好之硫酸鹽抵抗性。

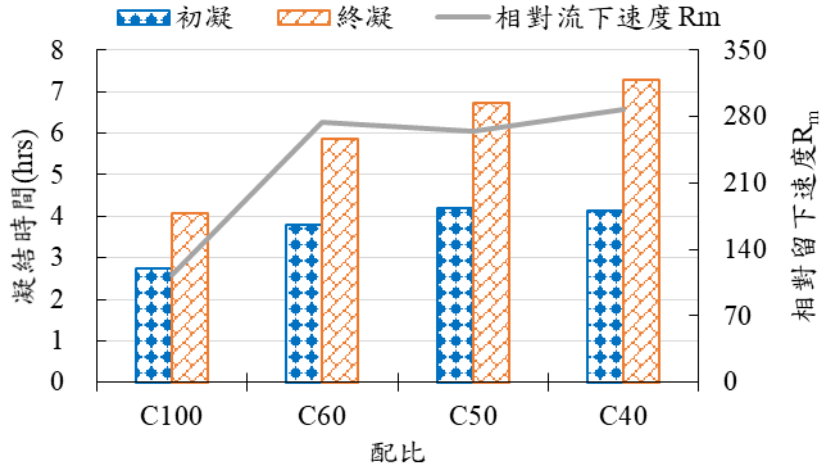


圖 4.66 各配比凝結時間與黏稠性

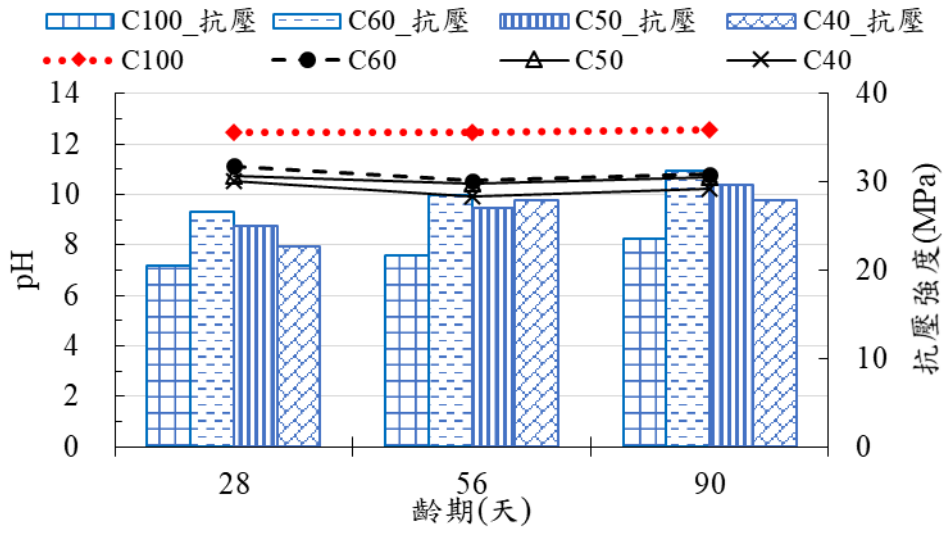


圖 4.67 各配比抗壓強度與 pH

4.7 研究成果

本子計畫已依研究規劃完成各項研究，內容符合，獲得成果摘述如下：

1. 國際相關資訊蒐集研析：

相較於 105 年度的研究內容，持續及更深入蒐集、綜整及分析國際合作研究資訊，有關低鹼性封塞混凝土的配比分析及性質研究，及針對低鹼性封塞混凝土的性質要求事項。

2. 封塞用低鹼性混凝土的膠結漿體配比及性質研究：

參考國際合作研究資訊，嘗試發展用於封塞混凝土的低鹼性水泥可行配比，針對可行之添加材料特性進行試拌及製作試體，並制定配比設計原則。

相較於 105 年度的研究內容，膠結漿體的設計是基於 105 年度的研究基礎上，選擇以降低漿體鹼性較具成效的卜作嵐材料比例，40%，為最低用量，並增加卜作嵐材料用量及多種卜作嵐材料併用的設計方式，掌握雙系統及多系統的低鹼性膠結材料性質。

3. 低鹼性自充填混凝土之工程特性測試及掌握：

相較於 105 年度計畫，今年度進行之高矽灰取代量的低鹼性混凝土研究已完成自充填形式應用於封塞系統之工程特性測試。

4. 低鹼性自充填混凝土之耐久性質評估：

已進行高矽灰取代水泥量的低鹼性混凝土體積穩定性、耐久性及緻密度等性質評估。

5. 參考低鹼性水泥國際合作研究成果，配合國內材料特性及預期成效，已完成低鹼性自充填混凝土之配方分析審查重點及注意事項。

第五章、結論與建議

5.1 結論

本子計畫已依研究規劃完成各項研究，包括：國際相關資訊蒐集研析、封塞用低鹼性混凝土的膠結漿體配比及性質研究、低鹼性自充填混凝土之工程特性測試及掌握、低鹼性自充填混凝土之耐久性質評估、參考低鹼性水泥國際合作研究成果，配合國內材料特性及預期成效，已完成低鹼性自充填混凝土之配方分析審查重點及注意事項。

相較於 105 年度的研究內容，今年度之膠結漿體的設計是基於 105 年度的研究基礎上，選擇以降低漿體鹼性較具成效的卜作嵐材料比例，40%，為最低用量，並增加卜作嵐材料用量及多種卜作嵐材料併用的設計方式，掌握雙系統及多系統的低鹼性膠結材料性質。

去年度子計畫三之 ESL 標準量測程序之建立與合適性評估，其研究目的主要在於與文獻[2]所提及之影響因子進行初步實驗成果驗證，並藉由穩定性試驗確認實驗操作與結果之穩定性。今年度則為確認細節程序、相關因子影響及重複性行為，已評估適合作為本土化的 pH 值量測方法。

此外，今年度之研究也依據 SKB 報告中的低鹼性自充填混凝土配比，經改變矽灰取代水泥用量及使用本土粒料等調整，製作 B200 系列混凝土，並進行低鹼性自充填混凝土的工程性質驗證，均滿足低鹼性自充填混凝土的性質要求，驗證成果如下：

1. 根據 CNS 14841 自充填混凝土流下性試驗結果，添加矽灰可使混凝土黏稠度增加。
2. 可以強塑劑控制坍流度符合低鹼性 SCC 坍流度要求。
3. 矽灰取代水泥之混凝土凝結時間可符合封塞用低鹼性 SCC 工作性 ≥ 2 小時的要求，使用矽灰取代比例越高者，凝結時間越長。
4. 矽灰取代 40% 有較佳的強度表現，隨矽灰取代量再增加，強度會降低，但矽灰取代量達 60% 時，強度仍高於對照組。矽灰取代部分水泥量的 B200 系列混凝土 90 天抗壓強度均大於自充填需求強度，10 MPa。

5. 孔隙溶液 pH 值均隨養護時間增加而降低，對於矽灰 40%、50% 及 40% 取代水泥之 B200 配比，分別於 56 天、28 天及 28 天，pH 值即符合低鹼性 SCC 的要求， $pH \leq 11.0$ 。孔隙溶液 pH 值均隨矽灰取代量增加而降低。
6. B200 系列各配比之彈性模數隨養護齡期增加而增加，與抗壓強度的成長趨勢相符。矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥，90 天彈性模數均符合低鹼性 SCC 彈性模數需 ≈ 20 GPa 的要求。
7. 矽灰取代水泥可以減少 B200 系列混凝土的收縮量，增加體積穩定性。符合低鹼性 SCC 要減少混凝土體積上的收縮要求。
8. B200 系列混凝土，0-4 週的膨脹量增加較快，而後膨脹量維持相對穩定，13 週膨脹量僅為對照組的 28%-48%，表現出耐久性，以矽灰 40% 取代水泥的混凝土有最低的膨脹量，即最佳耐久性。
9. B200 系列混凝土，矽灰分別取代 40%、50% 及 60% 水泥時，養護 56 天混凝土的累積電量結果顯示混凝土可視為無氯離子穿透性，且以矽灰取代 40% 水泥的混凝土緻密性最佳，顯示低鹼性水泥混凝土，即使在低水泥用量及高水膠比用量等不利條件下，仍能具有極佳的緻密性。

5.2 建議

1. 本研究使用矽灰作為膠結材料取代部分水泥為主軸，並於漿體部份已嘗試加入飛灰，進行孔隙溶液 pH 與抗壓強度之檢測，成果可提供進一步進行三系統(水泥+矽灰+飛灰)低鹼性水泥混凝土的工程性質探討。
2. 本研究針對 B300 系列混凝土之試驗僅進行基礎抗壓強度與 pH 試驗，未來可針對其耐久性、體積穩定性等性質進行各項試驗，進行 B300 系列混凝土之工程性質驗證。
3. 針對封塞用低鹼性自充填混凝土部分，未來可進行水力傳導係數相關試驗，以驗證混凝土之水密性與緻密程度。

參考文獻

- [1] Jorma Autio, Saanio & Reikkola Oy, “KBS-3H design description 2005”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB Rapport R-08-29, 2008.
- [2] Bamforth P.B., Baston G.M.N., Berry J.A., Glasser F.P., Heath T.G., Jackson C.P., Savage D. and Swanton S.W., “Cement materials for use as backfill, sealing and structural materials in geological disposal concepts. A review of current status.” Serco, United Kingdom, RP0618-252A, 2012.
- [3] David Savage, Steven Benbow, “Low pH Cements”, SKI Report 2007:32, ISSN 1104-1374, 2007.
- [4] Céline Cau Dit Coumes, Simone Courtois, Didier Nectoux, Stéphanie Leclercq, Xavier Bourbon, “Formulating a low-alkalinity, high-resistance and low-heat concrete for radioactive waste repositories”, Cement and Concrete Research, 36(12), 2152-2163, 2006.
- [5] Kronlöf A, “Injection Grout for Deep Repositories – Low pH Cementitious Grout for Larger Fractures: Testing Technical Performance of Materials”, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland. Working Report 2004-45, 2004.
- [6] Kronlöf A, “Injection Grout for Deep Repositories – Low pH Cementitious Grout for Larger Fractures: Testing Effect of Superplasticiser on Technical Performance”, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland. Working Report 2005-08, 2005.
- [7] Cau Dit Coumes C., “Low pH cements for waste repositories: a review, in Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions”, Le Croisic, France, October 12-16, 2008.
- [8] Vuorinen U, Lehtikoinen J, Imoto H, Yamamoto T, Cruz Alonso M, “Injection Grout for Deep Repositories, Subproject 1: Low pH Cementitious Grout for Larger Fractures, Leach Testing of Grout Mixes and Evaluation of the

- Long-Term Safety”, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland. Working Report 2004-46, 2005.
- [9] Pablo Cardoso Jacoby, Fernando Pelisser, “Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement”, *Journal of Cleaner Production*, 84–88, 2015.
- [10] Rossen J.E., Lothenbach B., Scrivener K.L., “Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition”, *Cement and Concrete Research*, 14–22, 2015.
- [11] Lee N.K., Jang J.G., Lee H.K.,” Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages”, *Cement and Concrete Composites*, 239–248, 2014.
- [12] Ali Behnood, Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, “Methods for measuring pH in concrete: A review”, *Construction and Building Materials* 105 (2016), 176–188, 2016.
- [13] Alonso M C, García Calvo J L, Walker C, Naito M, Pettersson S, Puigdomenech I, Cuñado M A, Vuorio M, Weber H, Ueda H, Fujisaki K, “Development of an accurate pH measurement methodology for the pore fluids of low pH cementitious materials”, SKB R-12-02, 2012.
- [14] 用過核子燃料處置安全審驗技術建立之國際資訊研析 子項計畫三：低鹼性水泥混凝土於最終處置設施之應用研究，《行政院原子能委員會放射性物料管理局》，2016。
- [15] Alonso M.C., Garci´a Calvo J. L., and Hidalgo A., “Development and application of low-pH concretes for structural purposes in geological repository systems”, Eduardo Torroja Institute for Construction Sciences, Spain, 286-322, 2010.
- [16] Stronach S.A., Walker N.L., Macphee D.E., Glasser F.P., “Reactions between cement and As (III) oxide: The system CaO-SiO₂-As₂O₃-H₂O at 25°C”, *Waste*

- Management, Volume 17, Issue 1, 1997, 9-13, 1997.
- [17] Harris A.W, Manning M.C, Tearle W.M, Tweed C.J, “Testing of models of the dissolution of cements—leaching of synthetic CSH gels”, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 5, May 2002, 731-746, 2002.
- [18] Sagüés A.A., Moreno E.I., Andrade C., “Evolution of pH during in-situ leaching in small concrete cavities”, *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 11, November 1997, 1747-1759, 1997.
- [19] Larbi J.A., Bijen J.M.J.M., “Interaction of polymers with portland cement during hydration: A study of the chemistry of the pore solution of polymer-modified cement systems”, *Cement and Concrete Research*, Volume 20, Issue 1, January 1990, 139-147, 1990.
- [20] Taylor H.F.W., “Cement Chemistry”, Thomas Telford, London, 1997.
- [21] Longuet P., “La protection des armatures dans le beton arme elabore avec des ciments de laitiers”, *Silic. Ind.* 8 (1976), 321–328, 1976.
- [22] Barneyback R.S., Diamond S., “Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars”, *Cem. Concr. Res.* 11 (2) (1981), 279–285, 1981.
- [23] Cyr M., Rivard P., Labrecque F., Daidie A., “High-pressure device for fluid extraction from porous materials: application to cement based materials”, *J. Am. Ceram. Soc.* 91, 2653–2658, 2008.
- [24] Codina M., Cau-dit-Coumes C., Le Bescop P., Verdier J., Ollivier J.P., “Design and characterization of low-heat and low-alkalinity cements”, *Cement and Concrete Research*, Volume 38, Issue 4, April 2008, 437-448, 2008.
- [25] García J.L., Alonso M.C., Hidalgo A., Fernández Luco L., “Design of Low-pH Cementitious Materials Based on Functional Requirements”, *R&D on low-pH cement for a geological repository. 3rd workshop, Paris June*, 40-51, 2007.
- [26] Tatsuo Nishiuchi, Takeshi Yamamoto, Michihiro Hironaga and Hiroyoshi Ueda,

- “Mechanical Properties of Low pH Concretes, LAC, HFSC AND SAC”, R&D on low-pH cement for a geological repository. 3rd workshop, Paris, 62-71, 2007.
- [27] JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute), “H17: Development and management of the technical knowledge base for the geological disposal of HLW – Supporting report 2: Development of engineering technology –“, JNC-TN1400 2005- 015, Tokai, Japan (in Japanese), 2005.
- [28] Holt E., “Durability of low-pH injection grout”, Posiva Working Report 2007-57, 2007.
- [29] SKB, 2010f. “Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels”, SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010.
- [30] Paula Keto (ed.), Md. Mamunul Hassan, Petriikka Karttunen, Leena Kiviranta, Sirpa Kumpulainen, “Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfi II and Plug”, Backfi II Production Line 2012, FI-27160 EURAJOKI, FINLAND, 2013.
- [31] Posiva SKB Report 01. ” Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository”, Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group, Kärnbränslehantering AB and Posiva Oy, 2017.
- [32] José-Luis Fuentes-Cantillana, Fernando Huertas, Jaime Cuevas, “Potential applications of shotcrete techniques in HLW repositories”, Engineering aspects and chemical implications. 2nd low-pH workshop. Madrid, June, 2005 Enresa, SKB and the ESDRED-project, 150-160, 2005.
- [33] Luís Fernandez-Luco, Maria Cruz Alonso, Jose Luís Garcia, Ana Hidalgo, “Shotcrete development for low-pH cements”, 2nd low-pH workshop. Madrid, June 15-16, 2005 Enresa, SKB and the ESDRED-project, 161-171, 2007.
- [34] Carsten Vogt, Björn Lagerblad, Kjell Wallin, Franziska Baldy, “Low pH self-compacting concrete for deposition tunnel plugs”, Swedish Cement and

- Concrete Research Institute (CBI), SKB Rapport R-09-07, 2009.
- [35] Reinhardt H W, Wuestholz T., “Tensile deformation behaviour of self-compacting concrete under sustained loading”, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete 2007, Ghent, Belgium, 2007.
- [36] Esping O., “Early age properties of self-compacting concrete- Effects of fine aggregate and limestone filler, doctoral thesis”, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- [37] Neville, “Properties of concrete”, 4th Ed, 1994.
- [38] Betonghandbok Material, AB Svensk Byggtjänst, in Swedish, 1994.
- [39] Ekerfors K, “Mognadsutveckling i ung betong, temperaturkänslighet, hållfasthet och värmeutveckling” (in Swedish), “Maturity development for young concrete, temperature sensitivity, strength growth and heat evolution”, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering. Licentiate thesis 1995:34 L, 1995.
- [40] Esping O, “Early age properties of self-compacting concrete- Effects of fine aggregate and limestone filler”, doctoral thesis, 2007, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- [41] Alonso M C et al., August, “Development of an accurate pH measurement methodology for the ore fluids of low pH cementitious materials”, 11-18, 2012.
- [42] T.H. Wee, A.K. Suryavanshi, S.S. Tin, “Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixture”, ACI Mater. J. 97 (2) (2000) 221-232, 2000.