

# 混凝土收縮開裂機理及防制技術之研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



# 混凝土收縮開裂機理及防制技術之 研究

受委託者：國立臺灣海洋大學

研究主持人：黃 然

協同主持人：紀茂傑

研究員：林世堂

研究助理：謝紹恒

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



## 目次

目次.....	I
表次.....	V
圖次.....	VII
摘要.....	XIII
ABSTRACT.....	XV
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景 .....	1
第二節 研究目的.....	3
第三節 研究計畫之重要性 .....	4
第四節 研究流程.....	6
第五節 研究方法及進度說明 .....	8
第二章 文獻回顧 .....	11
第一節 前言.....	11
第二節 水泥基複合材料體積不穩定性 .....	11
第三節 水泥質複合材料乾燥收縮 .....	14
第四節 減少乾縮方法.....	20
第五節 混凝土開裂機理 .....	23
第六節 飛灰.....	28

第七節 高爐石 .....	34
第三章 試驗計畫 .....	43
第四章 結果與討論 .....	57
第一節 前言 .....	57
第二節 化學摻料對抗壓強度的影響 .....	57
第三節 化學摻料對收縮的影響 .....	66
第四節 化學摻料對碳化收縮的影響 .....	74
第五節 化學摻料對自體收縮的影響 .....	81
第六節 砂率對塑性收縮的影響 .....	88
第七節 化學摻料對開裂時間與應變之影響 .....	92
第八節 依據材料試驗結果建議裂縫防制對策 .....	94
第五章 混凝土收縮開裂防制技術 .....	95
第一節 混凝土結構劣化與開裂原因 .....	95
第二節 結構裂縫防制策略 .....	105
第三節 非結構裂縫防制對策 .....	105
第六章 結論與建議 .....	109
第一節 結論 .....	109
第二節 建議 .....	110
附錄一 .....	113

附錄二.....	117
附錄三.....	121
附錄四.....	125
參考書目.....	129





## 表次

表 2-1 水泥漿體孔隙與影響性質 .....	20
表 2-2 飛灰物理性質之規定 .....	29
表 2-3 高爐石之一般氧化物 .....	35
表 2-4 CNS12549 對高爐石粉的化學成分標準規定 .....	36
表 2-5 CNS12549 對高爐石物理性質標準規定 .....	37
表 3-1 卜特蘭水泥成分 .....	43
表 3-2 粉煤飛灰主要化學成分 .....	44
表 3-3 高爐石主要化學成分 .....	44
表 3-4 細粒料篩分析結果 .....	45
表 3-5 試驗變數 .....	46
表 3-6 水泥砂漿試體配比(kg/m <sup>3</sup> ) .....	47
表 4-1 不同砂率塑性收縮產生之裂縫分析表 .....	91
表 4-2 不同化學摻料之開裂時間與最大應變 .....	93
表 4-3 本研究材料試驗彙整結果 .....	94
表 5-1 混凝土收縮開裂原因彙整表 .....	97
表 5-2 裂縫型式 .....	103



## 圖次

圖 1-1 收縮抑制劑對抗壓強度的影響 .....	2
圖 1-2 膨脹劑對抗壓強度的影響 .....	2
圖 1-3 飛灰對乾縮應變的影響 .....	3
圖 1-4 高爐石對乾縮應變的影響 .....	3
圖 1-5 收縮抑制劑對乾縮應變的影響 .....	4
圖 1-6 膨脹劑對乾縮應變的影響 .....	4
圖 1-7 研究流程 .....	7
圖 1-8 研究期程 .....	9
圖 2-1 凝結時間與收縮的關係 .....	12
圖 2-2 水泥漿體乾燥及濕潤所造成的體積變化 .....	15
圖 2-3 毛細管應力產生之示意圖 .....	16
圖 2-4 解離壓力產生之示意圖 .....	16
圖 2-5 表面自由能產生之示意圖 .....	17
圖 2-6 混凝土內部因乾濕循環引致之體積變化 .....	18
圖 2-7 (a)總收縮量(b)不可逆收縮與孔隙結構之關係 .....	20
圖 2-8 火力發電廠蒐集飛灰示意圖 .....	28
圖 2-9 水泥及卜作嵐材料在 C-S-A 系統之三相圖 .....	35
圖 3-1 SRA 霍式轉換紅外光譜圖 .....	45

圖 3-2 膨脹劑 XRD 圖 .....	46
圖 3-3 膨脹偵測錶與其配件 .....	51
圖 3-4 塑膠螺紋低密度聚乙烯模與兩端塞口尺寸 .....	51
圖 3-5 模具尺寸與鐵片配置圖 .....	53
圖 3-6 試驗環境剖面圖 .....	53
圖 3-7 試驗環境平面圖 .....	54
圖 3-8 ACI 針對蒸發速率列線圖 .....	54
圖 3-9 環形試體尺寸示意圖 .....	55
圖 3-10 三軸應變計配置情形 .....	55
圖 4-1 抗壓強度 (水膠比 0.65) .....	57
圖 4-2 抗壓強度 (水膠比 0.45) .....	58
圖 4-3 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)..	59
圖 4-4 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)..	59
圖 4-5 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)..	60
圖 4-6 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)..	61
圖 4-7 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 30%)..	61
圖 4-8 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 45%)..	62
圖 4-9 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)..	63
圖 4-10 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)	63

圖 4-11 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)	64
圖 4-12 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)	65
圖 4-13 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)	65
圖 4-14 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)	66
圖 4-15 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45)	67
圖 4-16 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45)	67
圖 4-17 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)	68
圖 4-18 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)	68
圖 4-19 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)	69
圖 4-20 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)	69
圖 4-21 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)	70
圖 4-22 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)	70
圖 4-23 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)	71
圖 4-24 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)	71
圖 4-25 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)	72
圖 4-26 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)	72
圖 4-27 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)	73
圖 4-28 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)	73
圖 4-29 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65)	74

圖 4-30 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45) .....	74
圖 4-31 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)	75
圖 4-32 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)	75
圖 4-33 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)	76
圖 4-34 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)	76
圖 4-35 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 30%)	77
圖 4-36 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)	77
圖 4-37 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)	78
圖 4-38 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)	78
圖 4-39 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)	79
圖 4-40 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)	79
圖 4-41 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)	80
圖 4-42 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)	80
圖 4-43 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65) .....	81
圖 4-44 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45) .....	82
圖 4-45 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)	83
圖 4-46 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)	83
圖 4-47 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)	84
圖 4-48 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)	84

圖 4-49 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 30%)	85
圖 4-50 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 45%)	85
圖 4-51 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)	86
圖 4-52 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)	86
圖 4-53 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)	87
圖 4-54 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)	87
圖 4-55 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)	88
圖 4-56 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)	88
圖 4-57 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1/1)	89
圖 4-58 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1.25/1)	90
圖 4-59 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1.5/1)	90
圖 4-60 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1.75/1)	91
圖 4-61 砂率對失水速率的影響	92
圖 4-62 不同化學摻料下應變與開裂時間關係圖	93
圖 5-1 樹狀裂縫分類圖	101
圖 5-2 混凝土裂縫產生原因	102





## 摘要

關鍵字：收縮開裂、水泥基質材料、化學摻料

### 一、研究緣起

混凝土為國內建築結構物最常使用之材料之一，然而混凝土為脆性材料，內部與外部均易開裂，此不僅會降低混凝土強度，更可能加速因暴露環境影響而產生的劣化，縮短了混凝土結構物的使用壽命，造成混凝土開裂的因素甚多，與構件設計、材料配比、澆置、養護及使用維護等均有關係。所以彙整分析開裂現象，進行機理分析，並提出改善防制策略，成為研發永續耐久混凝土建築物的重要課題之一。

混凝土的開裂依照發生原因可概分為受外力作用產生應力超過材料強度及於水化過程或使用過程中產生內應力導致混凝土開裂兩類。其中外力作用包含拉力、壓力及剪力。產生內應力主要因為收縮、潛變、凍融、鹼質粒料反應、酸鹼侵蝕、鹽害侵蝕及鋼筋腐蝕等。本研究主要進行混凝土的塑性收縮、自體收縮、碳化收縮及乾燥收縮開裂試驗，並探討混凝土開裂的機理以提出防制策略，降低房屋建築因混凝土開裂而導致劣化發生的機率。

### 二、研究方法及過程

本計畫主要探討混凝土收縮開裂機理及防制技術，先就影響混凝土收縮開裂之原因進行探討，然後添加化學摻劑或輔助膠凝材料於混凝土中進行塑性收縮、水泥自體收縮、碳化收縮及乾燥收縮試驗後，探討其對於混凝土收縮開裂影響，並提出防治方法。整個研究可分下列三階段：

第一部分：蒐集國內外與混凝土收縮開裂及防制技術相關文獻進行整理分析。

第二部分：透過添加化學摻劑或輔助膠凝材料於混凝土中並進行各項試驗。

第三部分：根據試驗所得之數據進行分析討論提出防制混凝土收縮開裂方法。

### 三、重要發現

本研究發現降低水灰比可降低混凝土的乾燥收縮，但其自體收縮應變反而增大，並導致前期產生開裂情形。利用添加收縮抑制劑可降低孔隙水的表面張力，

對抵抗早期收縮應變有較好的效益，並能有效延緩開裂時間及降低開裂時的最大應變。在收縮補償方面，使用膨脹劑對於抵抗收縮的效益並不顯著。另外砂率是影響塑性開裂重要的因素，增加砂率能有效抑制塑性收縮。

#### **四、主要建議事項**

根據本案研究進行之後，提出立即可行建議及中長期建議。

##### **建議一**

**建立現地監測混凝土收縮行為，提供解決開裂行為之對策：立即可行建議**

**主辦機關：內政部建築研究所**

**協辦機關：中華民國全國建築師公會、中國土木水利工程學會**

早期混凝土收縮行為受溫溼度改變的影響很大，目前現地對於混凝土收縮行為的監測並無完善的制度，導致各式裂縫時常發生，因此若能對於現地監測之各項指標找出影響開裂的原因，才能有效抑制裂縫的發生。

##### **建議二**

**針對目前國內混凝土收縮行為制訂標準規範：中長期建議**

**主辦機關：內政部建築研究所**

**協辦機關：經濟部標準檢驗局**

對於自體收縮及塑性收縮及環形試驗並未訂立出相關規範，若能參考國外規範並考量國內情形制訂標準規範，對於評估混凝土收縮行為有相當大的助益。

# ABSTRACT

**Keyword :** shrinkage cracking, cementitious materials, chemical admixture

## **1. Background**

Concrete is one of the most commonly used construction materials for making architectural structures. However, due to its characteristics of brittleness, concrete is easy to crack, and then reduce its strength. Thus, it is more likely to accelerate the deterioration and shorten the service life of concrete structures. There are many factors, such as component design, mix design, placing, curing and maintenance, leading to concrete cracking. Therefore, it has become an important issue of concrete structures on mechanism analysis of shrinkage cracking and proposal of the control strategies.

Concrete cracks are produced by external force, hydration or internal stress generated during use. External force includes tensile stress, compressive stress and shear stress and internal stress is generated by shrinkage, creep, freezing and thawing, alkali aggregate reaction, chemical erosion, salt damage, and corrosion of reinforcing steel. The study investigates the effect of plastic shrinkage cracking and hardened solid state drying shrinkage on concrete. Several tests, such as plastic shrinkage, autogenous shrinkage, carbonation shrinkage, ring contraction and drying shrinkage, were carried out to analyze the cracking mechanism and to reduce the probability of structure failure caused by the cracking of concrete.

## **2. Research Method and Process**

The purpose of this project is to investigate the mechanism of shrinkage cracking and control technology of concrete. Chemical admixtures and supplementary cementitious materials were added in concrete and plastic shrinkage test, autogenous shrinkage test, carbonation shrinkage test and drying shrinkage test were performed to explore the main reasons causing cracking of concrete and factors influencing on

concrete cracking. Meanwhile, the control technology and prevention strategies of concrete shrinkage cracking were proposed. The whole study can be divided into the following three parts:

Part I: Searching and collecting related literatures and data distributed journal papers, conference papers and research reports on the mechanism of shrinkage cracking and control technology of concrete.

Part II: Chemical admixtures and supplementary cementitious materials were added in concrete and various tests concerning shrinkage of concrete were conducted.

Part III: Based on the test results, the control technology and prevention strategies of concrete shrinkage cracking were proposed and discussed.

### **3. Important Research Results**

This study found that reducing the water-cement ratio can reduce the drying shrinkage, however instead of increasing autogenous shrinkage of concrete. The results may lead to the pre-generated cracking of concrete. The addition of contraction inhibitors can reduce the surface tension of the pore water, increase the resistance to early shrinkage strain, delay the cracking time effectively, and reduce the maximum strain as cracking of concrete. In shrinkage compensation, the study found that the use of expansion agents have less significant influence on shrinkage. In addition, the rate of sand is a key factor on the plastic cracking. The increase of sand rate would reduce plastic shrinkage.

### **4. Major Suggestions**

This study is to investigate the mechanism of cracking of concrete and control technology. The following are major suggestions from this study.

#### **Suggestion 1:**

For immediate strategies—to establish the concrete shrinkage monitoring in site and provide strategies for solving cracking problem of concrete.

Executive Institution : Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior

Cooperative Institution : Architects Association of the Republic of China,  
Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

The shrinkage behavior of concrete was affected by temperature and humidity greatly at early age. At present, the methods for concrete shrinkage monitoring in site is not completed, leading to all kinds of cracks often occur. Thus, the most important work is to identify the impact of the reasons for cracking and establish the system for concrete shrinkage monitoring in site.

**Suggestion 2:**

For long-term strategies- to develop the domestic specifications or standards for concrete shrinkage.

Executive Institution : Architecture and Building Research Institute, Ministry of the  
Interior

Cooperative Institution : Bureau of Standards Metrology and Inspection, MOEA.

At present, the relevant domestic specifications or standards for autogenous shrinkage, plastic shrinkage and shrinkage ring test of concrete do not be formulated. It is beneficial to evaluate the behavior of concrete shrinkage if the domestic specifications or standards considered with references to foreign standards were worked out.



# 第一章 緒論

## 第一節 研究緣起與背景

### 壹、研究緣起

混凝土為國內建築結構物最常使用之材料之一，然而混凝土為脆性材料，內部與外部易受應力開裂，此不僅會降低混凝土強度，更可能加速因暴露環境影響而產生的劣化，縮短了混凝土結構物的使用壽命，造成混凝土開裂的因素甚多，與構件設計、材料配比、澆置、養護及使用維護等均有關係。所以彙整分析開裂現象，進行機理分析，並提出改善防制策略，成為研發永續耐久混凝土建築物的重要課題之一。

混凝土的開裂依照發生原因可概分為受外力作用產生應力或於水化或使用過程中產生內應力導致混凝土開裂兩類。其中外力作用產生應力包含拉力、壓力及剪力等。無外力作用產生內應力主要原因為收縮、潛變、凍融、鹼質粒料反應、酸鹼侵蝕、鹽害侵蝕及鋼筋腐蝕等。本研究主要針對目前國內常用配比混凝土進行塑性收縮、自體收縮、碳化收縮及乾燥收縮試驗並探討開裂機理以提出防治策略，減少建築物因混凝土開裂發生的機率。

### 貳、研究背景

一般鋼筋混凝土構造物構件經常會有裂縫，水分、氧氣、氯離子等因子，易從裂縫中進入，加速鋼筋的腐蝕，對鋼筋混凝土結構物耐久性產生不利的影響[1]；裂縫發生與混凝土收縮特性有密切關聯，目前國內常使用飛灰與爐石代替部份卜特蘭水泥，水泥漿收縮的性質影響開裂時間與程度，水泥質複合材料的初始開裂時間很重要，可以直接反應其抵抗乾燥收縮開裂的能力。

許多構造物皆會有開裂現象如木造、磚造、鋼筋混凝土等構造物，可能因風化作用、外力作用、設計施工與材料使用之缺失，使材料劣化而產生裂縫。如以物理現象說明，表面水分蒸發時表層毛細管中的水面會形成彎月面，彎月面上表

面張力的垂直分量對管壁產生拉應力，如此時材料的抗拉強度低，表層毛細管失水收縮產生的拉應力大於材料抗拉強度時，則會發生開裂。另外拉應力產生的原因很多，如因構造物局部所產生的沉陷較大而造成偏心所致或受到束制作用不得隨意伸縮而產生拉應力，也可能因外力作用而產生拉應力。許多工程案例顯示結構物的裂縫是不可避免的，這種裂縫大部分寬度小，深度不大，長度較短，在性能上的破壞性不大，如因材料乾縮造成的體積變化，發生的部分大多在次要構材或是裝修層，這些裂縫常因外在水分、氧氣、氯離子等有害因子的進入，使裂縫變大，造成構造物性能上的破壞，因此如何延緩因材料收縮造成的裂縫與降低裂縫寬度是值得深入研究。

本計畫主要探討水泥質複合材料的收縮行為對混凝土開裂的影響，水泥質複合材料的收縮行為在國內外有許多的研究，但主要集中於水泥質複合材料的自由收縮，與外在環境的影響，其試驗法皆為量測硬固混凝土及水泥砂漿的變形，而在束制條件下，內部應力及開裂可能性預測方面的研究卻缺乏，單純的自由收縮不會產生裂縫，只有在收縮變形受到束制時才會產生拉應力，當拉應力超過拉力強度時會生成裂縫，因此束制作用為造成開裂的主要原因之一；在實際工程中，混凝土會受到鋼筋、模板及相鄰構件等的束制作用，而發生收縮開裂的情形，當開裂發生後，水分、氧氣、氯離子等因子，易從裂縫中進入，加速鋼筋的腐蝕[2]。然而混凝土主要係由水泥質複合材料、粗細粒料及水所組成，普通天然粒料不會發生收縮，主要收縮來自於水泥漿體。



## 第二節 研究目的

本計畫擬參考相關文獻進行配比設計與試體製作，並進行塑性收縮、水泥自體收縮、碳化收縮及乾燥收縮試驗，根據量測之數據，評估添加不同化學摻劑或輔助膠凝材料，對於混凝土收縮的影響，本計畫研究目的如下：

1. 蒐集國內外與混凝土收縮開裂及防治技術相關文獻進行整理分析。
2. 針對抑制混凝土收縮開裂或是收縮補償機理的確立。
3. 評估添加化學摻劑或輔助膠凝材料對於混凝土收縮開裂的影響
4. 提出改善混凝土收縮開裂的對策。

### 第三節 研究計畫之重要性

一般建築構造物皆有裂縫產生，以鋼筋混凝土構造物最為顯著，因收縮易致使裂縫產生，水分、氧氣、氯離子等因子，極易從裂縫中進入，加速鋼筋的腐蝕，對結構物耐久性產生不利的影響，造成結構物需要修補甚至是拆除重建，額外所需要耗費的人事與材料成本增加，因此在使用化學摻劑或輔助膠凝材料，希望能有效改善普通水泥質材料體積穩定性，減緩混凝土劣化對結構物的影響，增加結構物使用壽命，不論是在經濟上亦或是安全性都相當有效益的。

#### 添加添加化學摻劑或輔助膠凝材料對抗壓強度的影響

在不影響降低混凝土強度的前提下，透過添加化學摻劑或輔助膠凝材料改善混凝土收縮開裂性質，在許多文獻中對於添加適量膠凝材料(爐石、飛灰)替代水泥能增加緻密性使強度上升，而添加化學摻劑(SRA 及硫鋁酸鹽膨脹劑)對抗壓強度的影響如下圖 1-1 及圖 1-2 由圖可知添加 SRA 之抗壓強度在各齡期中階較控制組低。主要原因為添加 SRA 對於 100nm 以上孔隙有明顯趨勢[3]，文獻[4]中認為孔徑大於 100nm 對於強度的影響相當大。添加硫鋁酸鹽膨脹劑在各齡期中階較控制組高，原因為硫鋁酸鹽膨脹劑所產生之鈣礬石均勻的分布於孔隙中，使結晶壓力不會過度集中，進而增加強度。

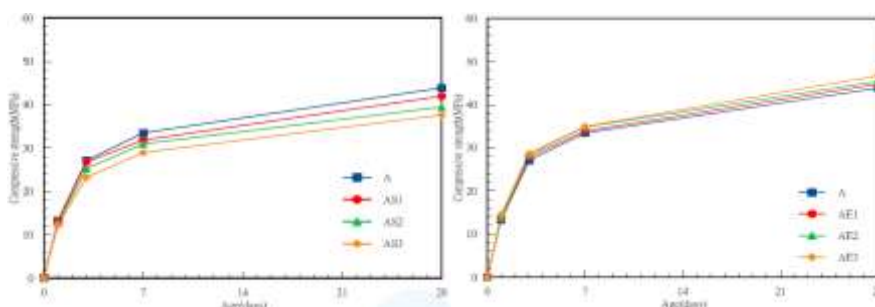


圖 1-1 收縮抑制劑對抗壓強度的影響

圖 1-2 膨脹劑對抗壓強度的影響

(資料來源：參考書目[4])

### 添加添加化學摻劑或輔助膠凝材料對乾燥收縮的影響

由及圖 1-3 得知添加飛灰(10%、20%、30%、40%)取代膠結料後，乾燥收縮隨著飛灰的取代量增加而有減少之趨勢，且由文獻[5]指出，添加飛灰大致有減少乾縮的趨勢，因飛灰含有少量 MgO 與 SO<sub>3</sub>，與水接觸後反應速度快，產生膨脹現象而抑制收縮。

由圖 1-4 得知添加高爐石(10%、20%、30%、40%)取代膠結料後，乾燥收縮隨著高爐石的取代量增加而提高，文獻[6]指出爐石粉取代部分水泥時，會增加自體收縮及乾燥收縮，且當高爐石粉含量增加，乾縮有增加的趨勢，但若有充分養護，可減少乾縮。因此推論高爐石粉造成乾縮增加的原因與養護條件有密切關聯，若充分濕潤養護，膠體產生多，尤其為卜作嵐反應產生之膠體，有助於孔隙之填塞，乾縮可相對減少。

由圖 1-5 得知添加 SRA(1%、2%、3%)後，乾燥收縮隨著添加量的增加而降低，研究指出[4]SRA 對於減少水泥基材的乾燥收縮，主要原因為降低毛細孔隙中水的表面張力，使在水份散失的同時，對毛細管壁產生較小的壓縮應力，進而減少漿體收縮。

由圖 1-6 得知硫鋁酸鹽系膨脹劑(1%、2%、3%)後，乾燥收縮隨著添加量的增加而降低，推論硫鋁酸鹽系膨脹劑產生之鈣礬石在水泥水化階段即形成，初期鈣礬石具有凝結及強度作用，使水泥質材料更緻密，繼續水化產生的鈣礬石，均勻的分佈於孔隙中，產生膨脹，具有收縮補償效應。

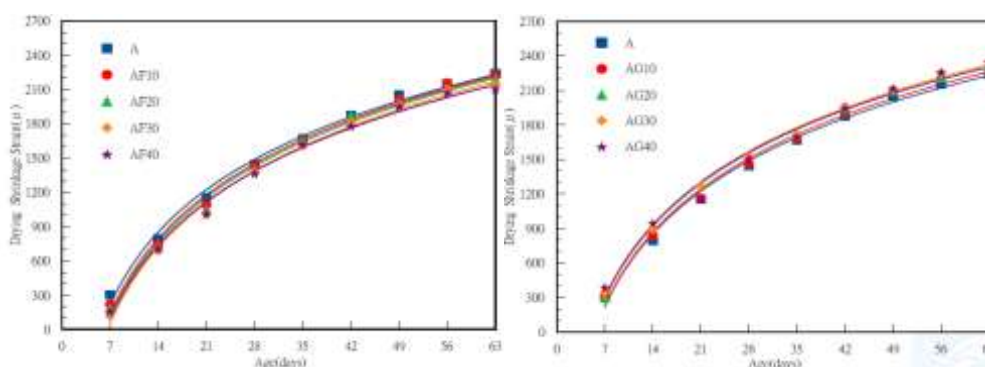


圖 1-3 飛灰對乾縮應變的影響

圖 1-4 高爐石對乾縮應變的影響

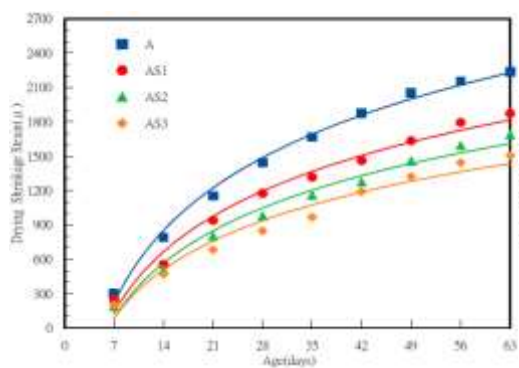


圖 1-5 收縮抑制劑對乾縮應變的影響

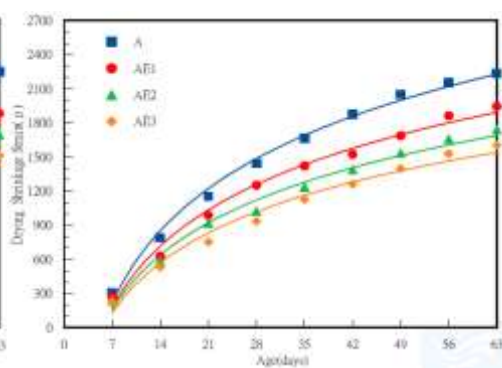


圖 1-6 膨脹劑對乾縮應變的影響

(資料來源：參考書目[4])

#### 第四節 研究流程

本計畫先定義出明確目的與研究範圍，透過文獻蒐集並彙整後確認配比製作試體，進行抗壓強度、乾燥收縮與自體收縮等試驗量測後，評估收縮抑制劑及膨脹劑對於飛灰與高爐石的影響，再選取其中幾組進行環形試驗及塑性收縮試驗。本計畫之研究流程如圖 1-7。

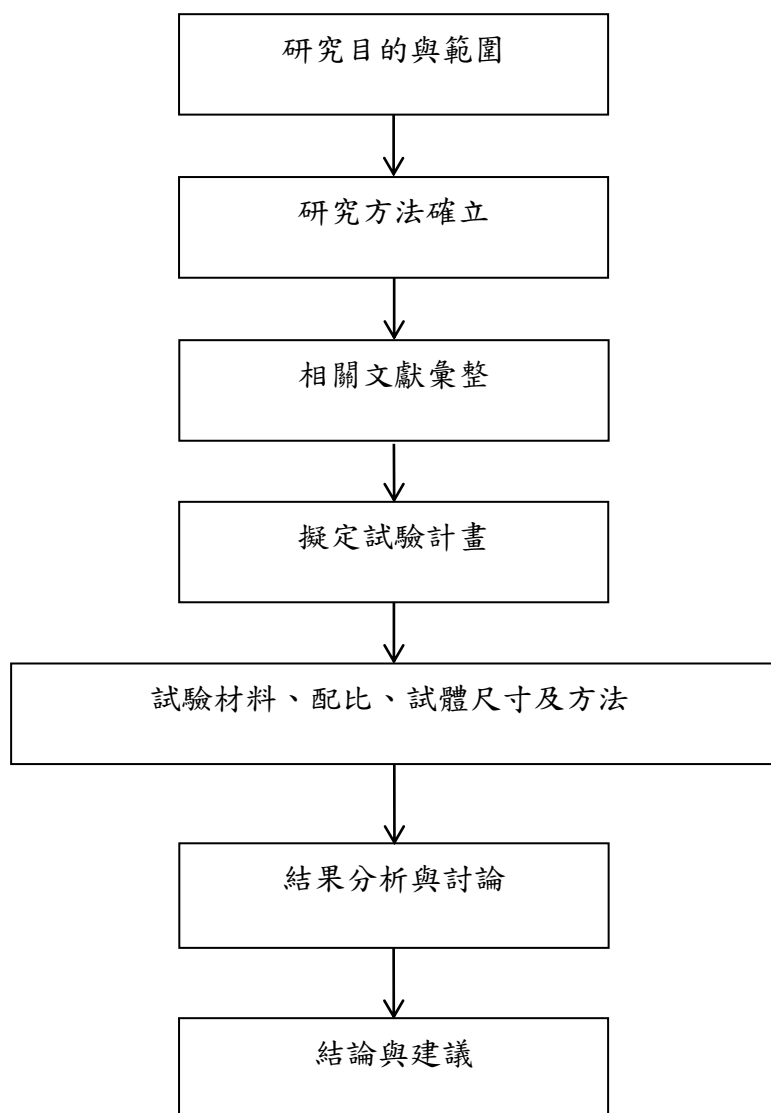


圖 1-7 研究流程

(資料來源：本研究)

## 第五節 研究方法及期程說明

本計畫主要探討混凝土收縮開裂機理及防制技術，先就影響混凝土收縮開裂之原因進行探討，然後添加化學摻劑或輔助膠凝材料於混凝土中進行塑性收縮、水泥自體收縮、碳化收縮及乾燥收縮試驗後，探討其對於混凝土收縮開裂影響，並提出防治方法。整個研究可分下列三階段：

第一部分：蒐集國內外與混凝土收縮開裂及防制技術相關文獻進行整理分析。

第二部分：透過添加化學摻劑或輔助膠凝材料於混凝土中並進行各項試驗。

第三部分：根據試驗所得之數據進行分析討論提出防制混凝土收縮開裂方法。

期程說明詳如圖 1-8。

月次	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	第 9 月	第 10 月	第 11 月	備註
工作項目												
確立研究目的與範圍	■											
文獻蒐集及試體製作		■	■	■								
膠凝材料對塑性收縮開裂的影響				■	■							
化學摻料對塑性收縮開裂的影響					■	■						
外在條件對塑性收縮開裂的影響							■	■				
評估成果與結論									■	■		
成果報告書											■	
預定進度 (累積數)	7.7 %	15.4 %	23.1 %	38.5 %	53.9 %	61.6 %	69.3 %	77 %	84.7 %	92.4 %	100 %	
<p>說明：1 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起訖日期。</p> <p>2 預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每 1 小格粗組線為 1 分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。</p> <p>3 科技計畫請註明查核點，作為每 1 季所預定完成工作項目之查核依據。</p>												

圖 1-8 研究期程

(資料來源：本研究)





## 第二章 文獻回顧

### 第一節 前言

現今鋼筋混凝土被廣泛運用在各種不同的地方，不僅是樓房建築、道路、各式水利設施，也可以應用在海洋開發、地熱工程等特殊工程，已經可以說是目前世界上使用最多的建築材料。但隨著時間的推移，鋼筋混凝土結構在使用多年以後，不可避免地有了老舊劣化的問題；而且隨著工程的進步，很多工程的建築會建造在嚴酷的環境中，但是在這嚴酷的環境中，結構物的耐久性跟使用年限往往達不到本身預定的服務年限就被淘汰，特別是在沿海及近海地區的混凝土結構，由於海洋環境對於鋼筋銹蝕影響很大，導致鋼筋銹蝕使結構物損壞的時間提前，早期損壞的混凝土必須花費比原定設計更多的金錢來進行修補。

氯離子的入侵以及混凝土的中性化是導致鋼筋發生銹蝕的主因，而鋼筋的銹蝕會造成混凝土結構的破壞，使鋼筋混凝土的承载力下降及延性的降低，影響整個結構的安全性和耐久性。

鋼筋混凝土的耐久性研究可以說是社會經濟持續發展的需求，延長結構的使用年限可以節約材料、降低經濟損失、減少維修混凝土的鉅額費用，避免結構因過早損壞而拆除也可以減少建築垃圾的產生，減輕工程所導致的環境問題及能源的消耗，達到環境保護及節約能源的目的。

### 第二節 水泥基複合材料體積不穩定性

水泥質複合材料的體積穩定性是指在凝結硬化與硬固後，在無外力、無侵蝕的作用下，不因體積變形而對其性能產生不良影響。水泥質複合材料的體積穩定性對耐久性有很大的影響，耐久性係指其抗滲透性、抗硫酸鹽侵蝕能力等，其中以抗滲透性最為重要的[5]。如果水泥質複合材料的體積穩定性不好，在澆置完成後，會因體積變化而在生成內應力，當內應力超過本身抗拉強度時，就會在最薄弱部位產生裂縫；裂縫的產生將使該處的力學性能降低，進而影響結構安全

性，更重要的是抗滲透性將降低，環境中有害的介質提供了侵入的管道，對耐久性影響更為嚴重。

水泥質複合材料的體積變形可分為隨時間成長所造成的體積變形與立即變形兩大類，其中以隨時間成長的體積變形最為重要，對於構造物的安全性及耐久性影響甚鉅，主要可分為收縮變形與潛變(Creep)兩大類。

### 收縮變形

當水泥質複合材料澆置完成後，因水化反應或外在環境溼度的改變，導致水分被消耗或移除，體積隨著時間成長而不斷收縮。為了能夠有效解決收縮有造成的體積變形，必須對其產生機理充分了解，依其作用機理與發生時間的先後順序，可分為以下五種[6、7]，如圖 2-1 所示：

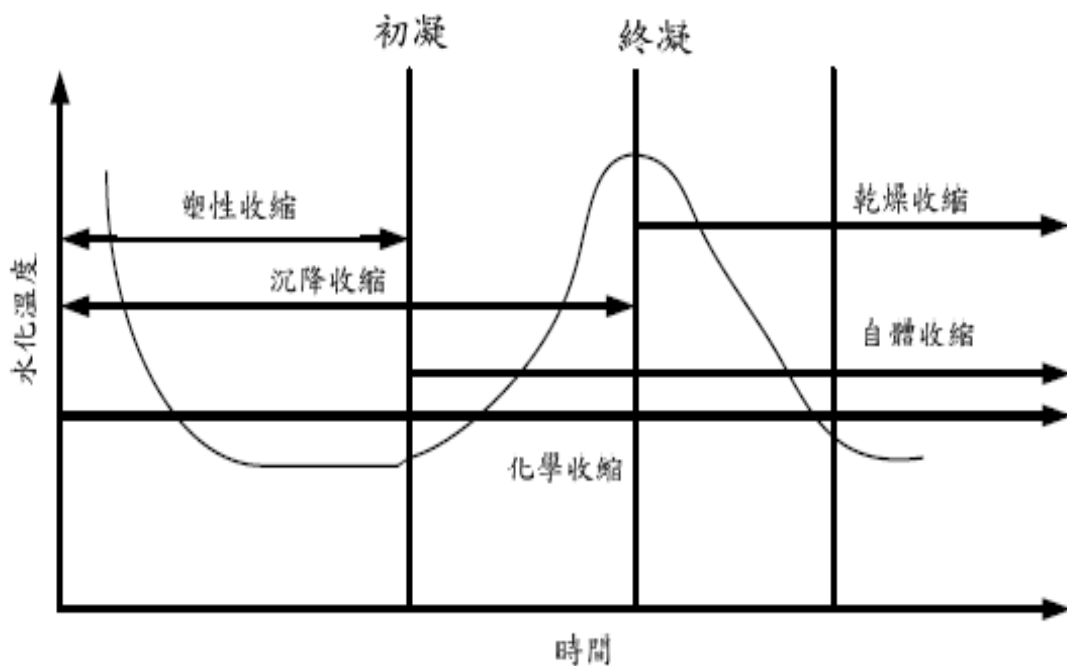


圖 2-1 凝結時間與收縮的關係

(資料來源：參考書目[6、7])

#### 1. 沉降收縮

沉降收縮是指水泥質複合材料在澆置完成後至終凝前，由於組成成分密度的差異，密度大的顆粒有向下沉降的趨勢，而密度小的水則有向表面集中的趨勢，

造成在水泥質複合材料表面的泌水，進而使得硬化體積減少。沉降收縮是不可避免的，在用水量及凝聚性不好的情況下，沉降收縮會比較大。

## 2. 塑性收縮

塑性收縮主要發生於澆置完成初期的水泥質複合材料，由於毛細孔隙中表層的水分受外界環境移除後，原有水所佔的孔隙產生負孔隙壓力，而增加表面的張應力，造成的收縮變形。這種收縮經常會使表面產生表面細微裂痕，此部分的收縮與毛隙孔隙中的水份有關，故又稱為毛隙孔隙收縮(Capillary Shrinkage)。

## 3. 自體收縮

水泥質複合材料與外界環境在無溼度交換下，隨著水化作用進行，消耗內部的水分，產生自乾現象而導致的收縮，稱為自體收縮；自體收縮主要包括水解收縮 ( Dehydration shrinkage )，碳化收縮( Carbonation shrinkage ) 及轉化收縮 ( Conversion shrinkage ) 等，此體積變形均由於化學反應產生[7]。

## 4. 碳化收縮

碳化收縮主要是由於濕潤狀態下  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  與大氣中的  $\text{CO}_2$  所造成的[8]，主要影響僅限於混凝土表層，影響大小相較於其他收縮相當微小[9]。碳化作用會影響混凝土微觀結構排列、增加孔隙率和造成表層和裡層因體積改變的不同而生成裂紋[10]。

$\text{CO}_2$  存在於空氣中在潮潤狀態下形成  $\text{H}_2\text{CO}_3$  與  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  發生反應生成  $\text{CaCO}_3$ ，此反應使得混凝土 pH 值降低進而導致鋼筋混凝土構造物發生鏽蝕。產生碳化收縮的主要原因為水份的散失[11]，碳化收縮的影響因子為混凝土的滲透性、含水量、相對濕度、水灰比及空氣中  $\text{CO}_2$  的含量。

## 5. 化學收縮[9]

在水泥水化過程中，無水的熟料礦物轉變為水化產物，固相體積逐漸增加，但水化產物的體積小於水泥和水的總體積，由於這種體積減縮是因化學反應所致，故稱化學收縮，這種體積變化的量與水泥水化的程度成正比。

## 6. 乾燥收縮

乾燥收縮是造成體積不穩定性的最主要原因[12]，所謂乾燥收縮，為水泥質複合材料在未承受載重，並處於乾燥環境下，試體內部的水分會逐漸向外移動而散失，將使得漿體中毛細管應力大於漿體強度，使體積產生收縮變形。

### 7. 潛變

當水泥質複合材料承受一持續荷重，首先產生立即變形，而後隨時間成長而產生的變形，稱為潛變。潛變為一種擴散行為，只要涉及溫度、時間、載重等相關因素，都將會產生潛變。在上述的體積變形中，以自體收縮和乾燥收縮具有較大的影響，但從測量方法來講，自體收縮是很難測量的，這主要是自體收縮的測量條件很苛刻；第一、其測量時間要從水泥質複合材料初凝開始，開始點很難準確控制，而且又要防止模具對自體收縮的束制；第二、自體收縮的測量要扣除溫度的影響，因此還要測量溫度的變化並加以扣除，這樣一方面增加了工作量，另一方面也帶來了更多的誤差；第三、自縮的測量要避免水分的散失，對試體進行密封而不帶來束制是非常困難的。而乾燥收縮相對於自體收縮來講測量較方便，且更接近水泥質複合材料的實際體積變形情況，因此對於乾縮產生之機理及其防治方法，是必須加以了解。

## 第三節 水泥質複合材料乾燥收縮

在乾燥的初期，所排出大孔隙內的自由水，僅會造成非常小的收縮量，當乾燥作用持續進行時，就會使得膠體間的吸附水與層間水被排出，導致膠體間的相互移動，使得水泥質複合材料產生乾縮變形[13]。根據 Lim 的研究結果認為，如果不發生乾燥收縮，強度將可以提高兩倍左右[14]，說明乾燥收縮是水泥質複合材料一項重要的工程性質，甚至會影響其他工程性質的表現。如果在此時乾縮受到束制，將在其內部產生複雜的內應力模式，甚至因而導致開裂，強度降低、滲透性增加，使內部鋼筋受到外界溼氣及氯離子作用，導致鋼筋腐蝕、耐久性降低。水泥質複合材料的乾縮行為，在工程特性上來說較塑性收縮更為重要，倘若無法適當估計其乾縮行為，則可能導致結構嚴重的開裂及變形，降低了其原有之功用。

## 壹、乾縮機理

水泥質複合材料的乾燥收縮，是影響耐久性的主要因素，造成的因素相當多，至今尚未完整的被界定出來。根據 Young 研究指出，乾燥收縮是以是否可逆做為劃分的，可分為可逆收縮與不可逆收縮兩種[15]，如圖 2-2 所示；若以混凝土內部結構來劃分，可分為 C-S-H 膠體特性、孔隙水及孔隙結構等因素。

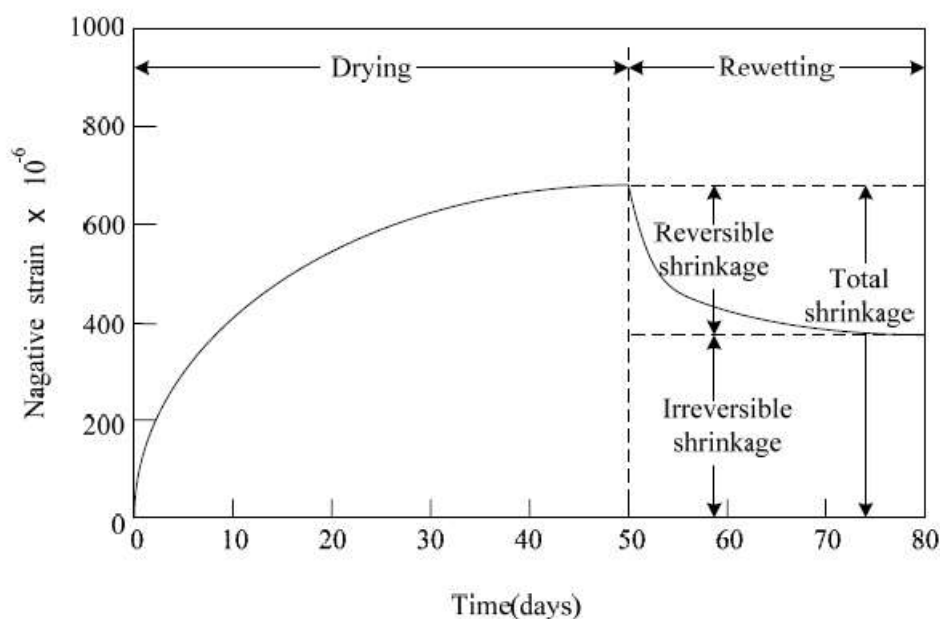


圖 2-2 水泥漿體乾燥及濕潤所造成的體積變化

(資料來源：參考書目[15])

### 1. 可逆收縮

造成可逆收縮這種現象產生，主要包括毛細管應力  $P_{cap}$ 、分離力  $P_{dis}$  及表面自由能  $P_{sfe}$ ，這些作用將使水泥漿體的體積產生變化，但經過適當的條件控制下，仍可回復其體積。

#### (1) 毛細管應力 (capillary stress)

毛細孔隙為水泥漿體中，水化水所填充的空間，當相對濕度逐漸降低時，毛細管中的水面形成彎月面，會對毛細管產生一毛細管應力，而引致壓縮應力，造成漿體體積收縮；其作用機理如圖 2-3。毛細管應力所造成孔隙壓力為  $P_{cap}=2\gamma/r$ ，式中  $\gamma$  為水的表面張力， $r$  為彎月面之半徑；當漿體內部之孔隙越小，孔隙

內壁承受的毛細管應力越大，體積收縮越明顯。另一方面，當相對濕度低於 45% 時，因彎月面已不穩定，使毛細管應力不再存在。

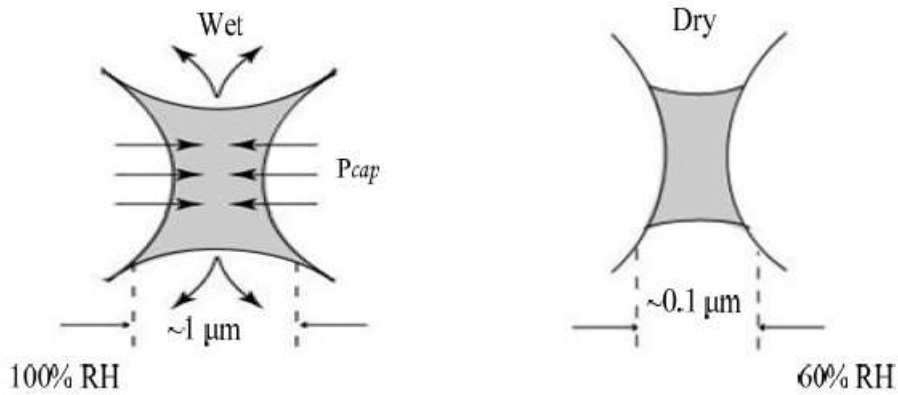


圖 2-3 毛細管應力產生之示意圖

(資料來源：參考書目[15])

#### (2) 解離壓力(disjoining pressure)

C-S-H 膠體因凡德瓦爾力作用，使得顆粒與顆粒間相互吸引，但因水分吸附於 C-S-H 膠體表面，會產生一相反之應力，此應力為分離壓力。當分離壓力超過凡德瓦爾力時，會導致顆粒與顆粒間分離而產生膨脹。吸附在 C-S-H 膠體表面的水膜厚度會隨著濕度的增加而增加；此時分離壓力隨吸附水膜厚度的增加而提高，當相對濕度小於 45% 時，分離壓力已不存在，造成漿體體積收縮。其機理如圖 2-4。

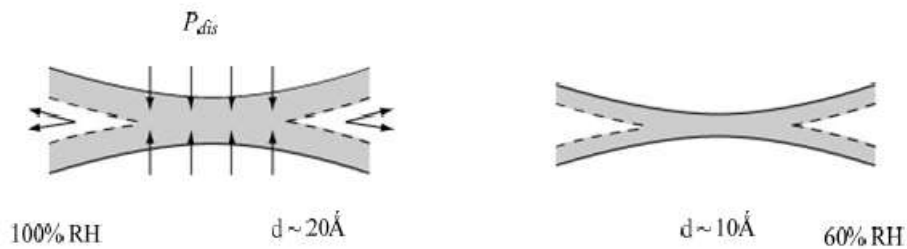


圖 2-4 解離壓力產生之示意圖

(資料來源：參考書目[15])

分離壓力與毛細管應力作用之差異，主要在於其所存在之孔隙位置。毛細管應力主要純在於毛細孔隙中，而分離壓力則主要存在於為微孔內。此兩種孔隙最大的差別在於毛細孔隙在充滿水時，液體與氣體之交界面會形成一彎月面；而在

微孔內因相鄰表面緊密的結合在一起，以致於當充滿水時無法形成一彎月面，故存在於內的水份與存在於毛細管內的水份行為是不同的。

### (3)表面自由能

當相對濕度低於 45%時，毛細管應力與分離應力以不存在，此時所造成之收縮為表面自由能所引起； $P_{sfe}=2\gamma S/3$ ，其中  $\gamma$  為表面能， $S$  為固體比表面積。對於 C-S-H 膠體而言，比表面積越大，自由能也越大，將使得內部產生壓縮，導致體積收縮。當相對濕度降低至一定程度時，表面自由能將取代毛細管應力及分離壓力而成為引起收縮的主要原因。一般來說，相對溼度越低表面自由能越高，所產生的壓應力也越大，造成的收縮力也就越大。其作用機理如圖 2-5。

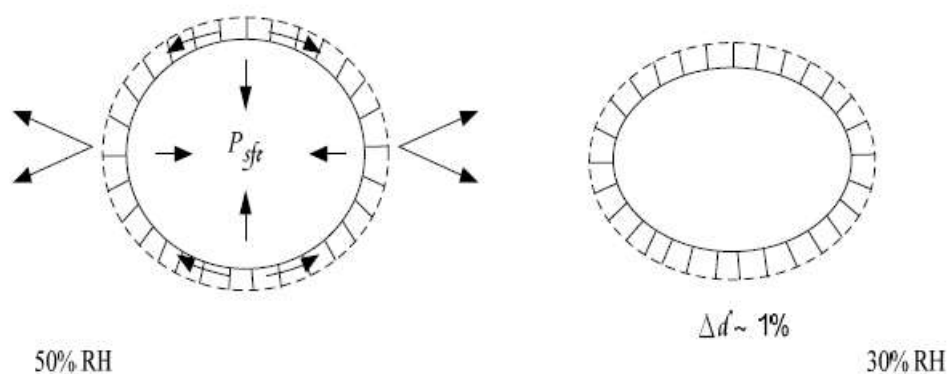


圖 2-5 表面自由能產生之示意圖

(資料來源：參考書目[15])

### 2.不可逆收縮

水泥漿體乾燥後再加水，其體積無法回復而稱之不可逆收縮，導致不可逆收縮的真正原因，至今仍不清楚。主要認為與水泥水化產物 C-S-H 膠體特性有關，隨時間、溫度與濕度改變有關。影響不可逆收縮之試驗條件包括試體養護環境及水灰比等因素。一般而言，若在濕養護時漿體處於高溫狀態，則可減少不可逆收縮量，但不影響可逆收縮。其主要原因是因為在高溫中養護可顯著增加 C-S-H 膠體顆粒間化學黏結的數量，使得 C-S-H 膠體穩定，故在水分散失時變形較小；而試體收縮量的減少與養護溫度有關，且收縮的減少取決於養護時的最高溫度，例如在 65°C 下不可逆收縮能減少 2/3，以及總收縮減少約 1/3。另外，改變水灰

比或使用摻料亦可改變 C-S-H 膠體的排列；因為改變水灰比或使用摻料等於改變了漿體粒子間的黏結，同時也能改變漿體內部孔徑分佈的情形。

C-S-H 膠體對收縮影響是很重要的，由其對不可逆收縮作用更為顯著，其主要原因為膠體層間水分損失對於體積收縮影響相當大，由其在相對濕度較低的狀況下。許多學者甚至認為該原因比表面自由能或分離壓力對於體積收縮的影響更大。

### 1.C-S-H 膠體特性

Jennings 認為 C-S-H 膠體可分為高密度膠體及低密度膠體兩類，高密度膠體較為緻密，具有較佳之抗收縮能力及體積穩定性[16]，在相對濕度 50% 環境下仍可保持飽和之狀態，且低密度膠體與高密度膠體體積之比值越大，C-S-H 膠體抵抗體積收縮之能力則越低。當混凝土之水灰比及水化程度相同時，雖其 C-S-H 膠體含量相同，但低密度膠體對高密度膠體體積之比值仍會受到養護溫度及添加礦物或化學摻料與否等因素影響。當環境之相對濕度再度達到飽和時，高密度膠體(HD)具回復原體積之能力，但低密度膠體(LD)則未能完全回復，故可知低密度膠體濕水所造成之行為不可逆之行為[17]，如圖 2-6。

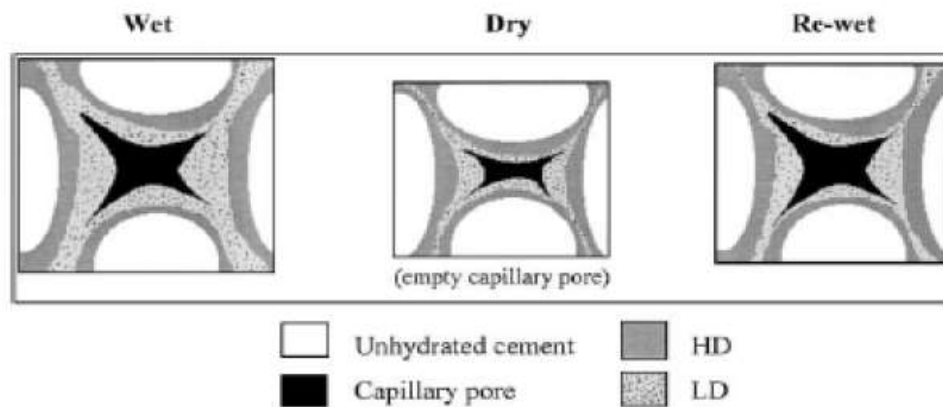


圖 2-6 混凝土內部因乾濕循環引致之體積變化

(資料來源：參考書目[17])



## 2. 孔隙水[18,19]

水泥漿體中含有固態水泥漿體及許多的毛細孔隙，而孔隙佔水泥漿體總體積的 40~55%，一般而言使水泥漿體產生乾縮變形的原因就存在於水泥漿體中之水分，伴隨著水分的轉移、蒸發及排除而產生的變形才是混凝土收縮之主因。水泥漿體中水分存在的方式有以下幾種：

### (1) 毛細孔隙水

毛細孔隙水分為兩種，一種存在半徑大於 50nm 之孔隙中，此種毛細孔水之表面張力非常微小，可視為自由水，水分散失後並不會影響水泥漿體體積，另一種存在於 2.5~50nm 之間的孔隙內，此種毛細孔水具有較大之表面張力，一旦受外界環境影而散失後，則會受毛細孔隙表面張力知影響而造成體積收縮變形。

### (2) 吸附水

水分子受到固態水泥漿體的凡德瓦爾力吸引而附著於膠體附近，當外在環境的相對濕度小於 30% 時，吸附水變會發生移動且排除，進而引起混凝土產生收縮。

### (3) 層間水

此類水分子藉氫鍵以單水分子型態存在於 C-S-H 膠體的層間，除非外界環境特別乾燥(相對濕度>11%)H 才會失去；當失去層間水時 C-S-H 膠體結構會有明顯的收縮。

## 3. 孔隙結構

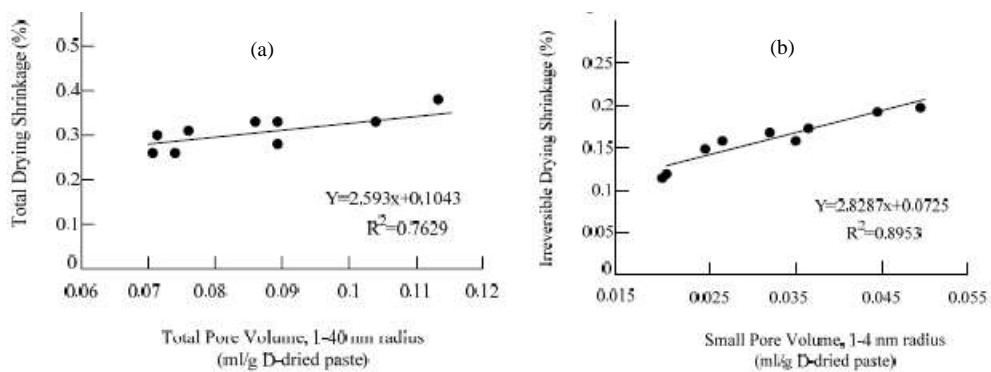
孔隙結構除了對強度具影響外，對於體積收縮及滲透性亦有很大之影響。混凝土孔隙結構常因外在因素之改變而有所不同，其中包括水膠比、溫度、化學添加劑等均會影響孔隙結構之型態。在水泥漿體中孔隙結構主要分為兩大類：膠體孔隙及毛細孔隙[15]，如表 2-1 所示，兩者各影響混凝土中的物理及力學性質，孔隙結構對於漿體體積收縮之影響程度和孔隙水之種類是相關的。在相對濕度介於 40%~100% 知環境下，分佈於 2.5nm~50nm 孔隙範圍內的孔隙水，其具有較大表面張力，當水分失去後，因表面張力作用，使得孔隙內部產生一較大之壓力，造成體積收縮。

**表 2-1 水泥漿體孔隙與影響性質**

分類	孔隙	孔隙尺寸	影響性質
毛細孔隙	大毛細孔隙	$d > 50\text{nm}$	強度、滲透
	中毛細孔隙	$10\text{nm} < d < 50\text{nm}$	強度、滲透、乾縮
膠體孔隙	小毛細孔隙	$2.5\text{nm} < d < 10\text{nm}$	乾縮
	微孔隙	$0.5\text{nm} < d < 2.5\text{nm}$	乾縮、潛變

(資料來源：參考書目[15])

Maria[18] 研究指示，導致水泥漿體發生乾縮的孔徑範圍主要分佈於 1~40nm，不可逆收縮主要孔徑範圍在 1~4nm，且收縮量均會隨著該範圍孔隙增加而增加，如圖 2-7 所示。



**圖 2-7 (a)總收縮量(b)不可逆收縮與孔隙結構之關係**

(資料來源：參考書目[18])

#### 第四節 減少乾縮方法

如何減少乾縮長久以來一直是許多專家學者不斷在努力的目標，若乾燥收縮過於嚴重，除了造成美觀問題外，強度發展也會受到限制，進而影響結構物安全，因此如何降低乾燥收縮為不可不考慮及面臨之問題，主要可以歸納出以下三點：

- 1.降低水灰比(水膠比) [19-20]

水泥漿體內未被水泥或水化產物所占的空間，即為毛細孔隙，漿體內毛細孔隙的尺寸和體積則取決於水灰比與水化程度，當水化程度一定時，漿體內之毛細孔隙體積將隨著水灰比的提高而增加，故漿體之乾縮係數將隨著水灰比之增加而愈趨明顯，所謂的乾縮係數為乾縮應變與彈性應變之比值；當漿體之乾縮係數愈高，漿體之乾縮量愈大，愈不利於漿體之體積穩定性[6]。降低水灰比之方法包括直接減少用水量與添加減水劑兩種，如在不影響工作性的情況下，以添加高性能減水劑較為理想。

### 2.降低孔隙水的表面張力[3,21-23]

水泥質複合材料乾燥收縮機裡較為複雜，在上述提到的乾縮機理中，以毛細管應力最具說服力；當相對濕度低於 100%時，毛細孔隙(2.5~50nm)中的水分經由毛細傳輸現象逐漸向外移動，由於毛細管中的水因表面張力作用呈彎月面，當內部水分向外傳輸的速度小於水分散失的速度時，彎月面上表面張力的垂直分量對管壁產生了拉應力使曲率半徑不斷減小，膠體顆粒逐漸向內部移動，進而產生乾燥收縮，因此減少毛細孔隙中水的表面張力，可進一步減少對孔壁的拉應力，其乾縮應變也相對應減少。

收縮抑減劑(Shrinkage Reducing Admixture)為一種化學添加劑，添加量為水泥重量的 1%~2%，當添加於水泥質複合材料後，因與水產生化學作用後，可大幅的減少乾燥收縮和自體收縮。由研究結果證明，其最主要的原因為降低毛細孔隙(2.5~50nm)中水的表面張力( $\gamma$ )，毛細孔隙中充滿水的小孔將會蒸發，形成彎曲的半月形液面，水的表面張力便對孔壁產生拉應力(P)；當孔徑大於 50nm 時，與孔徑尺寸相關的張力數值可以忽略不計，孔徑尺寸小於 2.5nm 的孔隙無法形成半月形液面結構。SRA 能減少毛細孔隙中水的表面張力，進而減少對孔壁的拉應力，其乾縮應變也相對應減少，最終收縮量可減少 20%至 50%不等。

### 3.收縮補償[22-23]

收縮補償是水泥質複合材料在新拌與硬化階段，經水化反應生成鈣礬石與氫氧化鈣，可適度產生體積膨脹，具有收縮補償效應，大幅的減少乾燥收縮；如在

束制條件下，因膨脹作用產生壓應力，可抵消部分收縮所產生的拉應力，抗拉強度在此時獲得增長，進而減少裂縫的發生。以其膨脹來源劃分，可分為硫鋁酸鹽系、石灰系與鋁粉系三大類，其機理敘述如下：

(1).硫鋁酸鹽系膨脹劑：

硫鋁酸鹽系膨脹劑係由高鋁熟料與石膏研磨而成，其主要成分為  $\text{CaSO}_4$ ，膨脹源為鈣礬石，添加於水泥質材料中，因熟料中的鋁酸鈣  $\text{CA}$  及  $\text{CA}_2$  與石膏水化反應生成鈣礬石而產生膨脹，其反應機理如下：

由反應式可知添加硫鋁酸鹽系膨脹劑可提供適當的硫酸根離子，使鈣礬石在水泥水化塑性階段即形成，具有收縮補償之能力。

(2).石灰系膨脹劑：

石灰系膨脹劑其主要膨脹源為氫氧化鈣，研究認為造成膨脹原因為氫氧化鈣結晶產生及結晶壓力所致。其反應機理如下：

(3).鋁粉系膨脹劑：

在鹼性水溶液中，鋁金屬會變得不穩定，會與  $\text{OH}^-$  離子產生反應，生成鋁酸鹽及氫氣。其反應式如下：

形成許多分散均勻的氣泡，在漿體凝固之前，因氣泡不斷的產生而體積逐漸膨脹，隨漿體逐漸凝結，發泡反應所產生之體積變化趨於平緩，當漿體終凝後，體積便穩定不再變化。要證實金屬鋁粉在混凝土漿體中之反應，可藉由 XRD 觀測來確定物種，可得到物種有 gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、calcium aluminate  $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ 。

#### 4.改變孔隙大小

對於硬固水泥質複合材料之收縮行為而言，孔隙具有重要之地位。一般而言，孔隙半徑小於 50 nm 孔隙，對於試體之乾縮與潛變有不利之影響，而大於 50 nm 孔隙則不利於試體之強度發展與滲透性。添加輸氣劑主要為改變漿體內部之孔隙分佈，以減少漿體內部與體積收縮有關之孔隙比例。

## 第五節 混凝土開裂機理

任何建材組成的構造物皆會存在開裂現象，如：木造、磚造、鋼筋混凝土等，因經過風化作用、外力作用、設計施工、材料之缺陷，都將會使建材劣化而產生裂縫。以物理現象來說，水分蒸發時表層毛細管中的水面形成彎月面，彎月面上表面張力的垂直分量對管壁產生了拉應力。此時的抗拉強度較低，若表層毛細管失水收縮產生的拉應力大於抗拉強度時，則表層出現開裂現象。且拉應力產生的原因繁多，可能因構造物局部所產生的沉陷較大而造成偏心所致，或因建材受到束制作用不得隨意伸縮而產生張應力，也可能因外力作用而承受張應力。由許多工程經驗告訴我們，結構物的裂縫是不可避免的，這種裂縫大部分寬度都很小，所及的深度也不大，長度較短，在性能上的破壞性不大，但因材料本身乾縮或自體收縮造成的體積變化，發生的部分大多在次要構材或是裝修層，這些裂縫常因外在水分、氧氣、氯離子等有害因子的進入，使裂縫變大，造成構造物性能上的破壞，因此如何延緩因材料本身乾縮或自體收縮造成的裂縫與降低裂縫寬度是值得再深入研究的[19]。

### 壹、裂縫原因分析

由於混凝土的組成材料、微觀構造以及所受外界影響的不同，混凝土中產生裂縫有多種原因，主要是溫度和濕度的變化，混凝土的脆性和不均勻性，以及結構不合理，原材料不合格，變形，基礎不均勻沉降等。

(1) 混凝土在硬化的過程中，由於乾縮引起的體積變形受到約束時產生的裂縫，這種裂縫的寬度有時會很大，甚至會貫穿整個構件。

(2) 混凝土在硬化期間水泥產生大量水化熱，內部溫度不斷上升，在混凝土表面引起拉應力。後期在降溫過程中，由於受到基礎或老混凝土的約束，又會在混凝土內部出現拉應力。氣溫的降低也會在混凝土表面引起很大的拉應力，當這些拉應力超出混凝土的抗裂能力時，即會出現裂縫。

(3) 在厚度較大的構件中，由於混凝土的塑性塌落受到範本或頂部鋼筋的抑制，在澆搗後數小時會發生這種由於混凝土塑性塌落引起的裂縫。

(4) 當有約束時，混凝土熱漲冷縮所產生的體積漲縮，因為受到約束力的限制，在內部產生了溫度應力，由於混凝土抗拉強度較低，容易被溫度引起的拉應力拉裂，從而產生溫度裂縫。由於太陽暴曬產生裂縫也是工程中最常見的現象。

(5) 混凝土加水拌和後，水泥中的鹼性物質與活性粒料中活性氧化矽等起反應，析出的膠狀碱——矽膠從周圍介質中吸水膨脹，體積增大三倍，從而使混凝土漲裂產生裂縫。

(6) 許多混凝土的內部濕度變化很小或變化較慢，但表面濕度可能變化較大或發生劇烈變化，如養護不當、時乾時濕，表面乾縮變形受到內部混凝土體的約束，也往往產生裂縫。

(7) 構件超載產生的裂縫，例如：構件在超出設計的均布荷載或集中荷載作用下產生內力彎矩，出現垂直於構件縱軸的裂縫，構件在較大剪力作用下，產生斜裂縫，並向上、下延伸。

(8) 當結構的基礎出現不均勻沉陷，就有可能會產生裂縫，隨著沉陷的進一步發展，裂縫會進一步擴大。

(9) 當鋼筋混凝土處於不利環境中，例如：侵蝕性水，由於混凝土保護層厚度有限，特別是當混凝土密實性不良，環境中的氯離子等和溶於水中的氧會使混凝土中的鋼筋生銹，生成氧化鐵，氧化鐵的體積比原來金屬的體積大的多，鐵銹體積膨脹，對周圍混凝土擠壓，使混凝土脹裂。

(10) 由於原材料質地不均勻、水灰比不穩定以及運輸和澆置過程中的離析現象，在同一塊體混凝土中其抗拉強度也是不均勻的，存在著許多抗拉能力很低，易於出現裂縫的薄弱部位。而在施工過程中，我們最為常見的多是因溫度而引起的裂縫。

## 貳、裂縫分類

裂縫的分類：按裂縫的方向、形狀分類有水準裂縫、垂直裂縫、橫向裂縫、縱向裂縫、斜向裂縫以及放射狀裂縫等；按裂縫深度分類有貫穿裂縫、深層裂縫及表面裂縫三種；按成因分類主要有塑性裂縫、乾縮裂縫、溫度裂縫及不均勻沉降裂縫。按成因分類主要有塑性裂縫、乾縮裂縫、溫度裂縫及不均勻沉降裂縫。

### (1) 因混凝土本身各部分沉落不同產生的沉降收縮裂縫：

在混凝土澆灌後的 1-2 小時內，當混凝土尚未凝固期間，主要是沿鋼筋的走向，在混凝土表面產生的裂縫。其形成原因是由於混凝土澆置後，骨料沉落受到鋼筋、預埋件等局部阻礙，在鋼筋骨架上方的混凝土因為有鋼筋托著與鋼筋間隙間的混凝土收縮下沉不一致而產生的。此種裂縫的特點是裂縫較寬，且沿著箍筋或受力筋方向規則分佈。通常，這種裂縫出現的原因是工人在澆置混凝土過程中沒有振搗或振搗不密實，造成混凝土縫隙較大產生沉降形成裂縫。這種沉降裂縫直到混凝土硬化時才停止。

### (2) 由於混凝土塑性收縮產生的裂縫：

它是指混凝土尚未凝固時，在其表面所產生的細微裂縫。其原因是由於混凝土澆築後數小時、硬化之前仍處於塑性狀態的時刻，混凝土澆築後表面沒有及時覆蓋及澆水養護，由於水分過快地蒸發，混凝土產生急劇的體積收縮而導致塑性收縮裂縫。現如今建築施工中基本都是使用泵送商品混凝土，泵送高強混凝土，流動性要求大、水泥用量高、水灰比大、骨料偏細、塌落度大等特點，所以泵送混凝土易出現塑性收縮裂縫，這類裂縫通常是橫向的微裂。一般來講，這類裂縫並不深，很少會延伸到鋼筋保護層以下，它一般不會對建築結構產生真正的危害。施工中這類裂縫產生較多的原因就是現場施工中一些施工隊伍對混凝土養護知識瞭解不夠，施工人員缺乏相應的責任心，沒有及時正確的對混凝土進行養護。

### (3) 由於混凝土乾燥收縮產生的裂縫

混凝土的乾燥過程是由表面逐步擴展到內部的，在混凝土內部呈現出水的分佈梯度，於是產生了表面收縮大、內部收縮小的不均勻收縮，致使表面混凝土受

到拉應力，內部混凝土承受壓應力，當表面混凝土的拉應力大於混凝土抗拉強度時，便使得混凝土表面開裂，而形成乾縮裂縫。

影響乾縮的因素主要有以下幾點：

1. 混凝土的配合比。用水量越大，乾縮越大。
2. 水泥的組成和細度。水泥越細，乾縮越大。
3. 骨料的品質。使用彈性係數小的粒料，乾縮增大。
4. 相對濕度和乾燥長短。構件處於相對溫度大的環境中，乾縮會變小。

#### (4) 由於溫度作用產生的溫度收縮裂縫

混凝土和其他材料一樣，有著熱脹冷縮的特性。在混凝土凝固和初期硬化過程中，由於水和水泥之間發生化學反應而釋放出大量的水化熱，而混凝土是熱的不良導體，造成混凝土內部溫度較高，由此使混凝土內外產生較大的溫度差，形成溫度應力。這種應力通常為拉應力，當這種拉應力超過混凝土的抗拉強度時，裂縫就會產生。這種裂縫形成之初往往很細小，寬度一般不會超過 0.05mm，屬於肉眼不能看見的微觀裂縫。但混凝土的正常乾縮會加大這種溫度裂縫，甚至會穿透混凝土構件產生嚴重的破壞。

#### (5) 設計構造問題產生的裂縫

由於該種裂縫對結構的有效性有很大影響，但可通過正確合理的結構設計加以控制。

## 參、預防措施

### (1) 原材料品質控制措施：

#### 1. 水泥

應選用品質優良且穩定，生產規模大，在類似工程中成功使用的水泥。品質優良的水泥強度富餘係數高，配製相同強度等級的混凝土需要較少的水泥，可減少水泥水化放熱量，同時降低混凝土的收縮，減少裂縫的產生。

#### 2. 外加劑



應選用具有較高減水率、緩凝時間較長及和易性良好的高效減水劑或泵送劑。較高的減水率，可大幅度降低混凝土用水量，進而降低混凝土的水泥用量，降低總水化放熱量、提高混凝土耐久性並減小收縮。

### 3. 摻合料

應選用品質優良而且穩定的礦物摻和料，比如優質粉煤灰或磨細礦渣粉。

### 4. 粒料

應選用潔淨、級配好、強度高的粒料，而且粗粒料在滿足泵送及結構要求的情況下儘量採用較大粒徑，可減少水泥用量，降低水化熱。

#### (二) 配合比設計控制措施

1. 在保證混凝土強度及工作性要求的前提下，儘量提高骨料的含量，以最大限度地降低混凝土的水泥用量，減少水泥水化總的發熱量，同時，也可降低混凝土的收縮，降低混凝土產生溫度裂縫的機率。

2. 複合摻加較大比例的Ⅱ級粉煤飛灰和爐渣作為混凝土的礦物摻合料，大幅度降低混凝土水泥用量，改善混凝土和易性及硬化混凝土耐久性能，提高硬化混凝土的抗裂性能和降低總的發熱量。

3. 為了延緩水化放熱，混凝土的凝結時間要比普通混凝土適當延長，根據以往施工經驗，混凝土凝結時間控制在：初凝為 12-15h，終凝為 18-22h。

#### (三) 混凝土澆築品質控制措施：

1. 商品混凝土澆築採用混凝土輸送泵時，混凝土坍落度應控制  $60\pm 20\text{mm}$ 。

2. 因故停滯過久或其他原因造成坍落度損失無法泵送時，須退回預拌廠處理，嚴禁現場加水，以確保混凝土品質，防止出現收縮裂縫。

3. 混凝土澆注時振搗要充分但不過振（過振亦可造成混凝土表面乾縮裂縫），振搗時間以混凝土開始泛漿和不冒氣泡為準，注意不漏振，振點佈置應滿足相關規定。必要時進行二次振搗，以排除混凝土由於泌水而在粗骨料下和鋼筋下部形成的水袋、空隙，彌合細小裂紋，提高混凝土與鋼筋的握裹力，防止因混凝土沉降而產生的裂縫，減少內部微裂，提高混凝土密實度。

## 第六節 飛灰

### 壹、飛灰的來源

飛灰是燃煤火力發電廠的副產物，粉煤經過鍋爐燃燒後粉煤灰爐隨著氣體的排放回收後被靜電集塵器所吸附，此無機物粉末就被稱作「飛灰」，程序如圖 2-8 所示。依不同燃煤來源、燃燒因素與集塵設備等影響，所產出的飛灰品質也會有所不同。

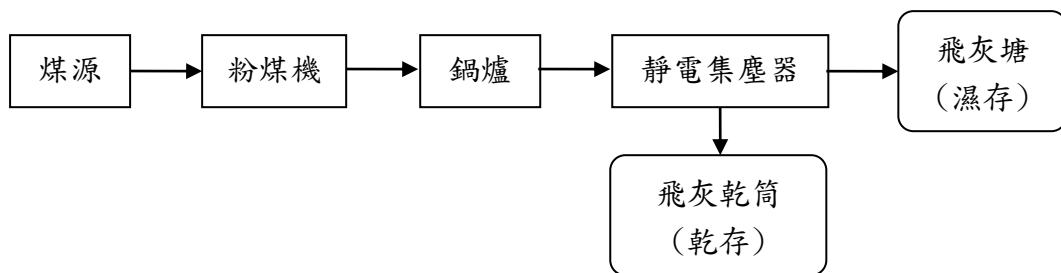


圖 2-8 火力發電廠蒐集飛灰示意圖

(資料來源：參考書目[24])

依據 ASTM C618 規範中，飛灰可區分為 Class F 及 Class C 兩大類，F 級飛灰主要是燃燒無煙煤及煙煤，其化學組成  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  大於 70%，CaO 含量較低，長時間在空氣中不會硬化；C 級飛灰則是燃燒亞煙煤及褐煤，其化學組成  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  大於 50%，CaO 含量高於 15%，長時間暴露於空氣中會自行水化結塊。飛灰屬於卜作嵐材料，於存在含水分的條件下，即可和水泥水化生成物中的氫氧化鈣產生卜作嵐效應(pozzolanic reaction)，生成水化矽酸鈣、水化鋁酸鈣以及水化矽鋁酸鈣。

### 貳、飛灰物理性質

了解飛灰化學成分之規定，針對煤成分、研磨、燃燒、收集等過程皆須有所控制，以利生產飛灰時能夠控制其品質；故限制物理性質，是為了確保於混凝土中添加飛灰能夠達到增進品質的效果，如表 2-2 所示。

表 2-2 飛灰物理性質之規定

區分	試驗項目	飛灰類別	
		F 類	C 類
標準規定	細度：試驗篩 0.044CNS 386(篩濕法)，%最大值	34	34
	卜作嵐活性指數：與卜特蘭水泥攪和，經 28 天之強度比，%(最小值)	75	75
	與石灰攪和 7 天之強度，kgf/cm <sup>2</sup>	56	56
	需水量之控制百分率，%(最大值)	105	105
	健度：高壓蒸煮膨脹或收縮率，%(最大值)	0.8	0.8
	均值性之規定： 每個試樣比重及細度值與其 10 個試樣(如前試樣總數不足 10 個時，則採全部試樣)之試驗平均值之差異： 比重，%(最大值)	5	5
	細度，試驗篩 0.044 CNS 386 篩餘量，%(最大值)	5	5
任選規定	複因數：燒濕量與試驗篩 0.044 CNS 386 篩餘量之相乘積，%	225	-
	水泥砂漿柱體乾縮增加率，28 天，%(最大值)	0.03	0.03
	均值性之規定：如為輸氣混凝土，產生空氣含量達水泥砂漿體積之 18%時所需輸氣劑量與前 10 次試驗(不足 10 次時，則與前所有試驗)結果平均值之百分率差異，%(最大值)	20	20
	與水泥所含鹼成分之反應性： 水泥砂漿柱體膨脹性降低率，14 天，%(最小值)	-	-
	水泥砂漿柱體膨脹率，14 天，%(最大值)	0.020	0.020

(資料來源：參考書目[24])

### 1. 細度

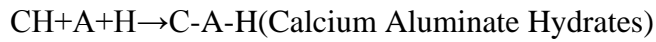
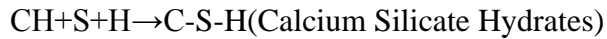
依 CNS 3086 濕篩洗法規定，以停留於 No. 325 篩最大百分率為 34%；停留率越大，顯示飛灰越粗，含碳量越大。顆粒越小，則飛灰比表面積越大，卜作嵐活性指數越高，影響混凝土的工作度及卜作嵐活性。

### 2. 卜作嵐活性指數

指數越大表示飛灰與氫氧化鈣之反應能力越佳，能促使混凝土的品質更緻密，一般依 CNS 3036 規定，養護 28 天之飛灰與卜作嵐水泥砂漿試體強度對控制組(純卜作嵐水泥砂漿試體)之比率稱為卜作嵐活性指數；CNS 規定其最小值為 75%。[25]

### 參、飛灰混凝土特性

飛灰組成中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  能夠水泥中的氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )反應，進而產生晶狀的 C-A-H 膠體以及低密度的 C-S-H 膠體[26]：



上兩式中的 C、S、A、H，分別指氧化鈣( $\text{CaO}$ )、氧化矽( $\text{SiO}_2$ )、氧化鋁( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、以及水( $\text{H}_2\text{O}$ )的縮寫，CH 則是指氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )。

飛灰應用在混凝土中此兩種產物可以填充混凝土中的微小孔隙，並產生膠結效果提升粒料與粒料間的界面鍵結強度，降低混凝土滲透性與乾縮反應、改善工作性、降低水化反應所產生的熱能、增加抗硫酸鹽侵蝕能力以及降低鹼粒料反應的發生，以上卜作嵐反應活性將大幅度的提升混凝土的耐久性[27]。

### 肆、新拌飛灰混凝土性質

#### 1. 凝結時間

在一般混凝土中添加飛灰來替代水泥用量，會因為飛灰的水化反應較為緩慢而延長混凝土的凝結時間及降低早期的強度，因此混凝土的澆置施工及拆模的時間必須要多加注意；但在一般的情況下，添加飛灰對於混凝土並沒有明顯的緩凝效果。

#### 2. 工作性

飛灰表面為光滑的球形，因此在混凝土拌合的過程中，飛灰能夠促使粒料間有潤滑的效果，進而改善混凝土的工作性，並且在相同的坍度下，飛灰能夠影響混凝土拌合的用水量；但對不同的混凝土配比而言，飛灰的摻量具有一個最佳值，超過時反而導致混凝土的工作性會下降。

飛灰的品質也是其中的關鍵，若飛灰品質不良或拌合不均，混凝土中會有結球或不均勻的現象；但若改善飛灰品質及有足夠的攪拌，則飛灰混凝土的均勻性提高有助於增加混凝土的黏滯性。

### 3. 降低混凝土溫度

飛灰替代部分水泥，能夠使混凝土中的水泥用量減少，降低混凝土早期的水化熱，可減少巨積混凝土的內外溫度差與因水化熱而產生的裂縫，有利於巨積混凝土的施工。

## 伍、硬固飛灰混凝土性質[28]

### 1. 早期強度

飛灰會與水泥水化產物中的氫氧化鈣在有足夠的水分供應的環境中發生卜作嵐反應，但須注意飛灰混凝土的養護溫度不能夠過低，否則卜作嵐反應會無法完全發揮，因此養護條件會很明顯地影響飛灰混凝土的強度成長。在正常的溫度條件下，28 天齡期時卜作嵐反應尚在初期階段，故飛灰混凝土的早期強度會低於一般混凝土。

### 2. 長期強度

飛灰的卜作嵐反應隨著齡期的增加不斷進行，產生的晶狀鈣鋁鹽類(C-A-H)以及低密度的鈣矽膠體(C-S-H)，來填塞混凝土中的微小孔隙，並提高粒料界面鍵結強度，使混凝土結構緻密化；一般齡期達 91 天，飛灰混凝土強度通常就可以超過同齡期的普通混凝土。

### 3. 彈性模數

飛灰混凝土之彈性模數與抗壓強度的關係，基本上與普通混凝土並無顯著得差別；故相關規範中之以抗壓強度推算彈性模數的公式，仍可以適用。

### 4. 體積穩定性

大多數飛灰混凝土的乾縮量與潛變量與普通混凝土稍有差異，故應適當養護，否則乾縮的潛變量可能明顯增加。[29]

#### 5. 耐久性

因飛灰會與水泥的氫氧化鈣起反應生成膠體堵塞孔隙與水路，增加緻密性，降低滲透性。飛灰混凝土的抗滲透性與一般混凝土一樣隨著水膠比的增大而降低。在 28 天齡期前，飛灰混凝土的水密性較一般的混凝土差，且隨飛灰摻量的增加而降低水密性；約 56 天齡期時，飛灰混凝土的水密性可能接近一般混凝土；到 91 天齡期時，飛灰混凝土的水密性能夠繼續提高而超過一般混凝土。因為飛灰的卜作嵐反應對於混凝土的微小孔隙有填充及堵塞的作用，能抑制外界有害因子對混凝土的侵蝕。

飛灰的卜作嵐反應可消耗氫氧化鈣與降低混凝土中的鹼度，抑制氫氧化鈣與硫酸根離子生成鈣礬石，防止混凝土體積膨脹發生龜裂。添加飛灰相對的減少水泥中所含的鋁酸三鈣，減少其與硫酸鹽類反應生成硫鋁酸鹽機率，提高抗硫酸鹽類的性能。

#### 6. 鹼-粒料反應

混凝土中添加適當飛灰可與水泥中的鹼性物質發生反應進而減少鹼粒料發生的機率。

### 陸、飛灰混凝土作用機制[30]

#### 1. 改善混凝土孔隙結構

飛灰的卜作嵐反應會生成水化矽酸鈣 C-S-H 膠體填充毛細孔隙，降低孔隙與孔隙間的連通性，增強混凝土的緻密性，使其滲透的通道比普通混凝土彎曲，增強抗滲透能力；隨著混凝土的齡期增加，卜作嵐反應更進一步發揮，抗滲透性能提高。

#### 2. 抗凍融性佳

飛灰對混凝土的抗凍融性影響有三個方面：

- (1) 卜作嵐反應減少氫氧化鈣數量，避免因浸析及冰凍劣化而產生的裂縫或孔隙。
- (2) 降低用水量，有利於減少孔隙。
- (3) 因填充效應降低空氣含量和泌水性，能夠使孔隙細化，微小孔隙均勻分布在混凝土中，改善了混凝土的抗凍性能。

### 3. 抗中性化

飛灰取代部分水泥，降低混凝土中水泥熟料的含量，使得析出的氫氧化鈣數量減低，同時飛灰的二次水化反應與氫氧化鈣作用，生成 C-S-H 膠體，降低混凝土鹼度，可能導致混凝土的抗中性化能力的減弱。

### 4. 抗氯離子滲透能力

添加飛灰能夠使混凝土中的孔隙結構發生改變，卜作嵐反應下生成的 C-S-H 膠體填充了水泥砂漿中的孔隙，增強混凝土的緻密性，降低混凝土的滲透性，使外界有害離子不易侵入，且 C-S-H 膠體能夠吸附氯化物，因而提高混凝土的抗氯離子能力。[\[31\]](#)

### 5. 抗硫酸鹽能力

混凝土中的飛灰含量增加，替代的水泥含量越多，其減少水泥用量也就會減少因水泥而帶入的  $C_3A$  含量，也減少了水泥水化生成的氫氧化鈣，另外飛灰的二次反應減少了氫氧化鈣的含量，從而降低硫酸鹽類與氫氧化鈣產生反應的機會，不容易形成具有膨脹破壞作用的鈣礬石，且添加飛灰減少混凝土孔隙率，也可以降低硫酸鹽介質的侵入及腐蝕速度。

### 6. 抗鹼粒料能力

添加飛灰不僅對混凝土中鹼的稀釋作用，也使得游離的氫氧化鈣固定到 C-S-H 膠體中，故能夠抑制鹼粒料反應。

### 7. 抗壓強度

飛灰會與水泥水化產物中的氫氧化鈣發生卜作嵐反應，添加飛灰的混凝土養護溫度不宜太低，若養護溫度太低，卜作嵐反應將無法完全發揮。在正常溫度下，

添加飛灰的混凝土在 28 天齡期時，由於卜作嵐反應尚未完全反應，因此在 28 天時抗壓強度比一般的混凝土還低。

隨著養護齡期的增加，卜作嵐反應也隨之作用，因此卜作嵐反應所產生的 C-A-H 以及 C-S-H 膠體也在增加，此兩種產物的增加，填充了混凝土的孔隙，也提高了粒料間的鍵結強度，故當齡期到達 91 天時，添加飛灰的混凝土強度能在往上提升。

#### 8. 飛灰混凝土對鋼筋腐蝕的影響

文獻[30]指出在混凝土中飛灰摻量為 0%，30%，40%，50%，60%，70% 時，混凝土的 pH 值分別為 12.56，12.50，12.46，12.24，12.15，12.06，都仍在 pH 值 12 以上，高於鋼筋表面鈍化膜破壞的臨界值，因此鋼筋在混凝土中仍能夠形成緻密的氧化膜來保護鋼筋。

## 第七節 高爐石

### 壹、高爐石來源

高爐石主要是在煉鐵過程中，高爐所併同產出的工業副產品—「高爐渣」，後因兩種不同方式將高爐渣由高溫狀態降低至室溫：一種為置於空氣中，令其能夠自然冷卻，稱為「氣冷高爐石」；另一種方式為將高爐渣從高爐移出後，立即灑水使之快速冷卻，則稱為「水淬高爐石」，在經過其後的研磨及篩析處理後，即為「水淬高爐石粉」。煉鋼廠在高爐煉鐵過程中，每生產一噸的生鐵伴隨著產生了 300 公斤的高爐石，早期中鋼公司僅生產氣冷高爐石，用於路基或用作混凝土粒料，因其使用量有限，一般視為廢棄物，而將其用作填海處理。隨著中鋼之工廠陸續擴建，產能的提升，高爐石每年的產量已超過百萬噸。

### 貳、高爐石性質



水淬高爐石粉含有一些典型的化學氧化物，如表 2-3 所示，其中主要成分為  $\text{SiO}_2$  以及  $\text{CaO}$ ，在圖 2-9 的 C-S-A 系統相位圖中可發現高爐石的成分與水泥非常接近，同時具備膠結性和卜作嵐反應兩種特性。

表 2-3 高爐石之一般氧化物

種類	氧化物					
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	燒失量
水淬高爐石粉 (%)	28~38	8~24	1~3	30~50	1~18	-
波特蘭水泥 (%)	21	6	3.3	64	2.0	1.1

(資料來源：參考書目[32])

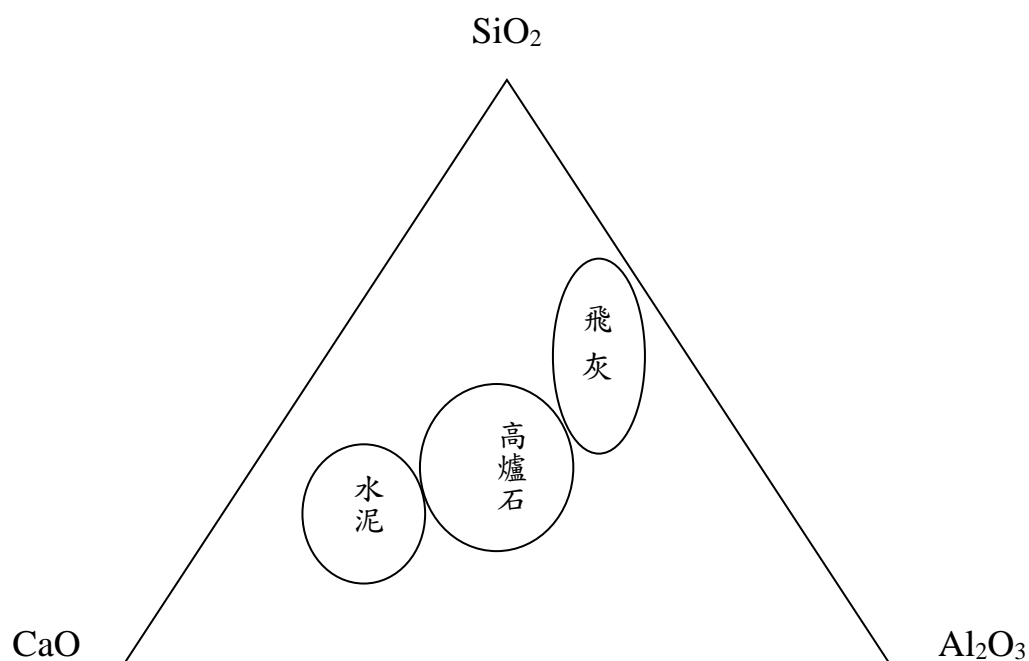
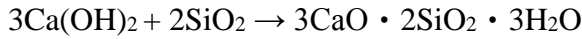


圖 2-9 水泥及卜作嵐材料在 C-S-A 系統之三相圖

(資料來源：參考書目[32])

針對激發水淬高爐石粉本身潛在的膠結性，Palomo[28]等學者指出有兩種方式，第一種是與波特蘭水泥混合使用，藉由普通波特蘭水泥水化後所生成的Ca(OH)<sub>2</sub>與水淬高爐石粉中的SiO<sub>2</sub>生成C-S-H膠體，即為卜作嵐反應，其反應方程式如下：



這也是目前營建業使用高爐石的主要方式，它具有下列特點：

1. 將原本易溶解析出的Ca(OH)<sub>2</sub>，轉化成不易溶解的C-S-H膠體，阻斷孔隙的連通性，使混凝土能夠更加的緻密。
2. 由於高爐石部分取代水泥，使早期可進行水化反應的水泥量減少，有效降低水化熱，減少因為溫度變化所產生的熱裂縫問題。
3. 因為隨齡期的增長，卜特蘭反應會持續地進行，使混凝土整體性質的發展歷程有延緩、拉長的趨勢，因此比一般混凝土在長齡期時，混凝土的各項性質仍可因卜作嵐反應而持續成長。

另一種方式為直接利用純高爐石來做為主要的膠結材料，但因純高爐石的顆粒結構非常穩定，單純的以水之極性不足以打斷高爐石的化學鍵結，必須加入極性更強的離子才能夠打斷高爐石的鍵結來達到水化的效果，目前普遍的做法是加入鹼性溶液來激發高爐石的水化反應進行，有文獻[33]提到利用鹼液激發高爐石的效果，在各項性質上會比前一種方式更為優良。

為了控制高爐石的品質，CNS 12549「混凝土及水泥壩料用水淬高爐渣料」對水淬高爐石粉的化學成分標準規定如表 2-4 所示。

**表 2-4 CNS12549 對高爐石粉的化學成分標準規定**

化學成分	要求
硫化物最大值%	2.5
硫酸鹽離子(以 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 表示)	4.0

(資料來源：參考書目[33])

限制高爐石中 S 與  $SO_4^{2-}$  含量的主要目的，因為過多的硫化物與硫酸根會與水泥中的鋁酸三鈣(C<sub>3</sub>A)或單硫型鋁酸鈣，共同水化後容易結合生成鈣礬石，影響高爐石混凝土的強度以及體積變化的穩定性。CNS 15429 有針對水淬高爐石粉的物理性質做更進一步的規定，如表 2-5 所示，水淬高爐石的品質優劣，可依照 CNS12223 或 JISR5211 的規範，從水化模數的判定公式如下：

$$\text{水化模數} = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1.4$$

**表 2-5 CNS12549 對高爐石物理性質標準規定**

試驗項目	要求	
以試驗篩 0.045mm CNS386 最大值%	20	
比表面積 CNS2924 最小值(m <sup>2</sup> /kg)	380	
高爐石壩料之空氣含量最大值%	12	
高爐石活性指數：	最近連續五個試樣平均值	任一個別試樣
7 天指數最小值，%		
80 級	-	-
100 級	75	70
120 級	95	90
28 天指數最小值，%		
80 級	75	70
100 級	95	70
120 級	115	110

(資料來源：參考書目[33])

### 參、高爐石粉水化機理

高爐石本身性質與卜特蘭水泥相近，但高爐石的鹼基度偏低，且高爐石內的共價鍵多，離子鍵少，所以高爐石的結構比較緻密，當高爐石粉與水接觸後，在高爐石的表面形成一層低滲透性的假形層(pseudomorphic layer)，這層假形層有阻止水分子進入高爐石顆粒內，水的極性不足以破壞高爐石的結構鍵結，導致高爐石無法直接與水產生水化反應。因此，為了促使高爐石與水發生反應，需要活化劑來激發高爐石的水化作用。一般激發高爐石的方式有兩種，一種將水泥與水淬高爐石粉同時作為膠結材料，利用水泥水化後生成的鹼鹽來激發高爐石的活性，另一種就是直接添加鹼性溶液來促使高爐石的水化反應。另外將水淬高爐石粉細度的提升也是有助於增加水淬高爐石粉的水化速率。

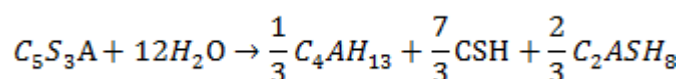
使用鹼基化合物作為活化劑時，水淬高爐石粉與鹼質溶液接觸，會在其表面產生一層分子比 C/S 值很低的 C-S-H 不透水薄膠膜及  $C_4AH_{13}$ 、 $C_2ASH_8$  等化合物；以少量的氫氧化鈣( $Ca(OH)_2$ )作為活化劑時所生成的化合物與鹼基化合物作為活化劑時的水化產物相同，但使用大量的氫氧化鈣( $Ca(OH)_2$ )作為活化劑時，並不會產生  $C_2ASH_8$  化合物。

如果使用硫酸鹽類作為激發劑時，水化產物則會產生鈣礬石(ettringite)、單硫型水化物(monosulfate hydrate)、和  $Al(OH)_3$  等化合物。

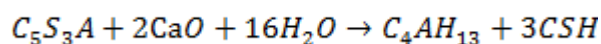
利用鹼活化劑激發高爐石，這些含大量的鹼金屬正離子和  $OH^-$  離子，這些強大的離子力，足以破壞高爐石內部的鍵結，使其結構解體，產生  $SiO_4^{4-}$  和  $AlO_4^{5-}$  和  $Ca^{2+}$ 、 $Ca(H_2O)^{2+}$  或  $Ca(H_2O)(OH)^+$  等離子。學者發現雖然高爐石以及卜特嵐水泥的水化過程雖然極為的相似，但水化後的產物卻大不相同。

在不同的激發介質中的水化方程式如下：

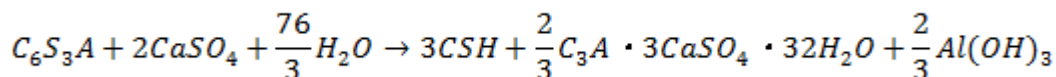
(1) 水中：



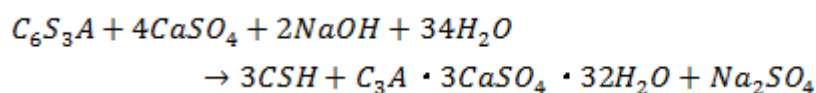
(2) 氫氧化鈣溶液中：



(3) 硫酸鈣激發劑：



(4) 硫酸鈉激發劑：



由此可見，化學激發劑對水化產物的影響很大，這些鹼激發劑所產生的主要水化產物均為 C-S-H，但次要的產物則會隨著不同的激發劑會引起激發劑的種類而產生變化，也會導致水化過程以及圍觀結構形式的變化，最終影響水泥強度的發展。

## 肆、高爐石水泥水化機理

水泥內的四種主要化合物，矽酸三鈣(C<sub>3</sub>S)，矽酸二鈣(C<sub>2</sub>S)，鋁酸三鈣(C<sub>3</sub>A)，以及鋁鐵酸四鈣(C<sub>4</sub>AF)均會進行水化作用，當高爐石添加進水泥的水化過程時，會與當中的兩種活化劑進行反應促使水淬高爐石粉產生水化反應：

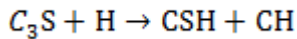
(1) 石膏(硫酸鹽活化能)(sulfate activation)

(2) 氫氧化鈣(石灰活化能)(lime activation)

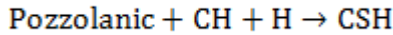
其中氫氧化鈣是由水泥中的矽酸三鈣(C<sub>3</sub>S)與矽酸二鈣(C<sub>2</sub>S)水化後的產物，這兩種鹼質活化劑會破壞水淬高爐石粉中的玻璃質結構 Si-O 與 Al-O 的鍵結，加速 Si 與 Al 離子的溶解，使得溶解度高的矽化鈣及鋁化鈣逐漸析出，當石膏在其中也產生化學作用時，由於 Ca 和 Al 離子會與石膏中的硫酸鹽起作用，形成鈣礬石，使得溶液中的 Ca 和 Al 離子濃度降低，但一般情況下，溶液的 pH 值仍能夠達到 12 以上，鈣礬石生成穩定，此時仍能夠激發水化作用進行。

高爐石為卜作嵐材料的一種，故高爐石水泥的水化機理可以用卜作嵐反應來說明，卜作嵐反應與水泥水化後的 CH 再產生反應生成 C-S-H 膠體，但其反應速率較卜特嵐水泥的水化機理來的緩慢，兩者反應是可表示如下：

卜特嵐水泥水化機理：



卜作嵐反應機理：



卜作嵐反應消耗易溶於水之 CH，增加 C-S-H 膠體的含量，此膠體也是水泥硬固後產生強度的主因，由於卜作嵐反應的出現，消耗 CH 所生成的 C-S-H 膠體具有填充孔隙的功效，增加混凝土的緻密性。

## 伍、新拌高爐石混凝土性質

### 1. 凝結時間

高爐石替代水泥用量較大時，對於混凝土凝結時間的影響跟混凝土初始溫度有很大的關聯性，當初始溫度較為高(約高於 30°C)時，凝結時間並沒有太大的差異，但如初始溫度太低(約低於 15°C)時，則有明顯的緩凝，在常溫下，混凝土的初凝時間較為一般混凝土可能延長半小時至一小時。

### 2. 坍度

高爐石粉的比重略小於水泥，將體積亦將增加，且高爐石粉的表面較水泥不易吸附水分，因此游離水增加而使得坍度增加，固可以改善工作性；但又因為高爐石的水化反應較為緩慢，新拌混凝土的坍損減緩。[\[34\]](#)

## 陸、硬固高爐石混凝土影響

使用高爐石替代水泥用量，會影響到硬固混凝土的強度發展、彈性模數、體積穩定性、水和熱以及混凝土的溫度、水密性、耐久性等。

### 1. 改善混凝土孔隙結構

與飛灰的反應相同，高爐石的卜作嵐反應會消耗 CH 來生成水化矽酸鈣 C-S-H 膠體填充毛細孔隙，降低孔隙與孔隙間的連通性，增強混凝土的緻密性，使其滲透的通道比普通混凝土彎曲，增強抗滲透能力；隨著混凝土的齡期增加，卜作嵐反應更進一步發揮，抗滲透性能提高。

## 2. 強度發展

高爐石會與水泥水化產物中的氫氧化鈣在有足夠的水分供應的環境中發生卜作嵐反應，隨著齡期的增長，卜作嵐反應會持續的，在正常的溫度條件下，28 天齡期時卜作嵐反應尚在初期階段，故高爐石混凝土的早期強度會低於一般混凝土。

高爐石的卜作嵐反應隨著齡期的增加不斷進行，產生的鈣矽膠體(C-S-H)，能夠填充混凝土中的微小孔隙，並提高粒料界面鍵結強度，使混凝土結構緻密化；一般齡期達 91 天，高爐石混凝土強度通常就可以超過同齡期的普通混凝土。

## 3. 體積穩定性

高爐石水泥漿體由於孔隙率較一般的純水泥漿體來的低以及比一般的水泥漿體中含有更多的凝膠體，因此高爐石水泥的收縮比之一般水泥漿體來的更大。

## 4. 耐久性

添加卜作嵐材料於混凝土中，對混凝土耐久性提升的機理，源自於卜作嵐材料與較高密度之氫氧化鈣反應後，形成較低密度的 C-S-H 膠體填充了混凝土的微小孔隙，使毛細孔隙更小或消失，增加混凝土的緻密性，從而抵抗外界有害離子的入侵。但在 28 天齡期前，由於卜作嵐反應尚未完全發揮，因此早期的水密性反而較一般的混凝土來的差，但隨著齡期的增長，約 56 天齡期時，高爐石混凝土已接近與一般混凝土的水密性且還能夠持續成長；到 91 天齡期時高爐石混凝土的水密性已經超過一般混凝土。





## 第三章 試驗計畫

### 1. 試驗變數

本計畫試驗變數包括飛灰、高爐石粉、水膠比、收縮抑制劑、膨脹劑來製作砂漿試體，進行相關試驗來探討收縮機理，相關試驗變數說明如下：

#### 水泥

本研究使用由台灣水泥公司生產之I型卜特蘭水泥，主要化學性質成分如下表3-1。

**表 3-1 卜特蘭水泥成分**

化學成分	含量(wt%)
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )	21.04
三氧化二鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.46
三氧化二鐵(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.98
氧化鈣(CaO)	63.56
氧化鎂(MgO)	2.52
三氧化硫(SO <sub>3</sub> )	-
三氧化硫 C <sub>3</sub> A ≤ 8%	-
(SO <sub>3</sub> )% C <sub>3</sub> A ≥ 8%	2.01
燒失量(L.O.I)%	1.38
不溶殘渣%	0.1
有效鹼類	0.78
氧化鈉(Na <sub>2</sub> O)	0.32
氧化鉀(K <sub>2</sub> O)	0.7
游離氧化鈣(Free CaO)%	0.76
矽酸三鈣(C <sub>3</sub> S)%	49.08
矽酸二鈣(C <sub>2</sub> S)%	23.3
鋁酸三鈣(C <sub>3</sub> A)%	9.43
鋁鐵酸四鈣(C <sub>4</sub> AF)%	9.07

(資料來源：台灣水泥公司)

### 飛灰與高爐石

本計畫擬採用台塑石化公司麥寮六輕廠燃煤產生之F級飛灰(比重 2.39)與中鋼公司煉鐵過程產生之 S6000 高爐石(比重 2.89)其主要化學性質如表 3-2 及表 3-3。

**表 3-2 粉煤飛灰主要化學成分**

化學成分	含量(wt%)
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )	56.66
三氧化二鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	23.97
三氧化二鐵(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.56
氧化鈣(CaO)	1.94
氧化鎂(MgO)	1.34
三氧化硫(SO <sub>3</sub> )	0.57

(資料來源：台塑石化公司)

**表 3-3 高爐石主要化學成分**

化學成分	含量(wt%)
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )	34.58
三氧化二鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13.69
三氧化二鐵(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.44
氧化鈣(CaO)	40.67
氧化鎂(MgO)	7.05
三氧化硫(SO <sub>3</sub> )	0.56

(資料來源：中聯資源公司)

細粒料

本研究使用天然河砂，F.M=3.1，比重為2.62，篩分析結果如表3-4。

**表 3-4 細粒料篩分析結果**

篩號	各篩停留量(g)	停留百分率(%)	累積停留百分率(%)
#4	0	0	0
#8	123.5	24.7	24.7
#16	110.4	22.1	46.8
#30	91.1	18.2	65.0
#50	87.9	17.6	82.6
#100	54.4	10.9	93.5

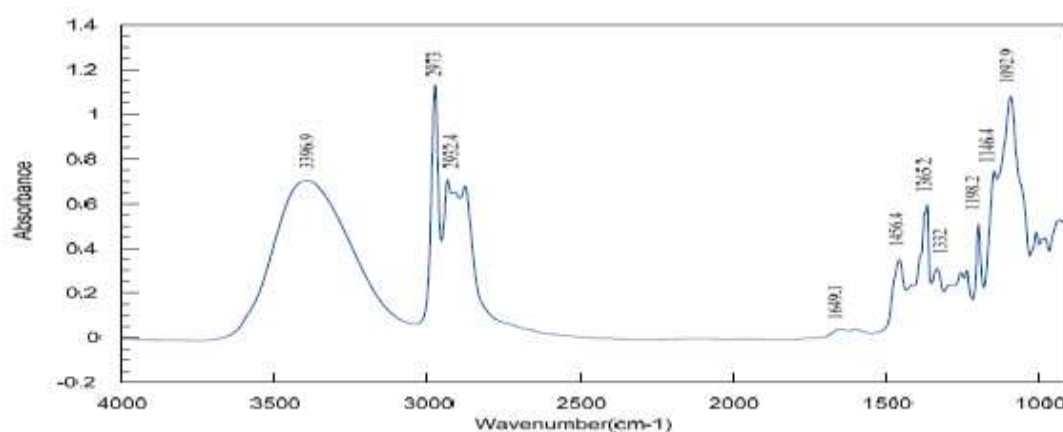
(資料來源：本研究)

水膠比

水膠比係指水溶液與礦物摻料（飛灰、水淬高爐石粉與水泥）重量之比值，類似於水與波特蘭水泥重量之比值，即一般所謂之水膠比。通常水膠比越低，其孔隙結構越緻密，力學性質、物理性質、耐火性與耐久性質的表現上會更佳，本研究設計擬採用之水膠比為 0.45 與 0.65 的水泥砂漿。

收縮抑制劑

SRA 的化學主要成分為聚醚類或聚醇類有機物，呈淡黃色液體狀。所用 SRA 之利用 SRA 透過霍氏轉換紅外光譜儀(Fourier-Transform Infrared Spectrometer, FTIR)分析後如圖 3-1 及所示。



**圖 3-1 SRA 霍式轉換紅外光譜圖**

(資料來源：本研究整理)

### 膨脹劑

本研究所使用的膨脹劑外觀為粉末狀，經 XRD 分析其主要成分為  $\text{CaSO}_4$ ，如圖 3-2 所示。

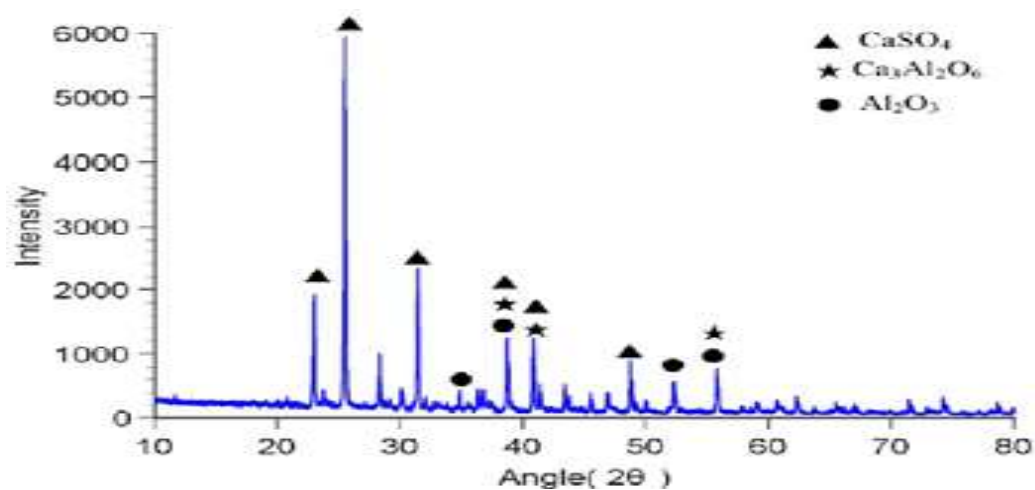


圖 3-2 膨脹劑 XRD 圖

(資料來源：本研究整理)

試驗變數整理如表 3-5：

表 3-5 試驗變數

試驗變數	項目
飛灰	0%、10%、20%、25%
高爐石	0%、15%、30%、45%
水膠比	0.45、0.65
收縮抑制劑	0%、1%、2%、3%
膨脹劑	0%、1%、2%、3%

(資料來源：本研究整理)

2. 水泥砂漿配比

表 3-6 水泥砂漿試體配比(kg/m<sup>3</sup>)

水膠比	水泥	飛灰	高爐石	砂	水	收縮抑制劑	膨脹劑
0.45	531	0	0	1420	239	0	0
						5	0
						11	0
						16	0
						0	5
						0	11
						0	16
	478	53	0	1451		0	0
						5	0
						11	0
						16	0
						0	5
						0	11
						0	16
	425	106	0	1437		0	0
						5	0
						11	0
						16	0
						0	5
						0	11
0					16		
398	133	0	1429	0	0		
				5	0		
				11	0		
				16	0		
				0	5		
				0	11		
				0	16		
451	0	80	1454	0	0		
				5	0		
				11	0		
				16	0		
				0	5		
				0	11		

續表 3-6 水泥砂漿試體配比(kg/m<sup>3</sup>)

水膠比	水泥	飛灰	高爐石	砂	水	收縮抑制劑	膨脹劑		
0.45	451	0	80	1454	239	0	16		
	372	0	159	1449		0	0		
						5	0		
						11	0		
						16	0		
						0	5		
						0	11		
	292	0	239	1443		0	16		
						0	0		
						5	0		
						11	0		
						16	0		
						0	5		
	0.65	478	0	0		1316	311	0	0
								5	0
11					0				
16					0				
0					5				
0					11				
430		48	0	1303	0	16			
					0	0			
					5	0			
					11	0			
					16	0			
					0	5			
382		96	0	1291	0	11			
					0	16			
					0	0			
	5				0				
	11				0				
	16				0				
0	5								
0	11								

續表 3-6 水泥砂漿試體配比(kg/m<sup>3</sup>)

水膠比	水泥	飛灰	高爐石	砂	水	收縮抑制劑	膨脹劑
0.65	382	96	0	1291	311	0	16
	358	120	0	1284		0	0
						5	0
						11	0
						16	0
						0	5
						0	11
						0	16
						0	0
	406	0	72	1310		5	0
						11	0
						16	0
						0	5
						0	11
						0	16
						0	0
						5	0
	334	0	144	1305		11	0
						16	0
						0	5
0					11		
0					16		
0					0		
5					0		
11					0		
263	0	215	1300	16	0		
				0	5		
				0	11		
				0	16		
				0	0		
				5	0		
				11	0		
				16	0		
0	5						
0	11						
0	16						

(資料來源：本研究)

3. 編號

編號說明: **X X X X X X X**

第一碼:表示水膠比,4表示水膠比0.45,6表示水膠比0.65。

第二碼:表示摻料,S表示高爐石,F表示飛灰。

第三碼:表示取代率。

第四碼:表示收縮抑制劑,R表示SRA。

第五碼:表示收縮抑制劑添加量。

第六碼:表示膨脹劑,A表示硫鋁膨脹劑。

第七碼:表示膨脹劑添加量。

#### 4. 材料與試體製作

依計畫各個試驗的需求不同分別製作各尺寸試體,進行試驗。

#### 5. 試驗方法

本計畫採用之試驗法概述如下:

##### 抗壓強度試驗

本計畫依據 ASTM C109 混凝土抗壓強度試驗法進行抗壓試驗,將漿體灌入  $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$  模具內,凝固後拆模置入養護槽內養護至各齡期,將試體取出並以抹布拭乾及石膏蓋平,至於抗壓試驗機上以每秒  $1.4 \sim 3.4 \text{ kgf/cm}^2$  的加壓速率進行單軸載重試驗[35]。

##### 水泥自體收縮試驗

本計畫依據 ASTM C1698-09 之規定方法進行水泥自體收縮試驗,試驗骨材最大粒徑為  $4.75 \text{mm}$ 。量測自體收縮的設備有波紋狀模具,其模具長度  $420 \text{mm}$ ,兩端端塞口徑為  $29 \text{mm}$ ;兩個錐形端頭長度為  $19 \text{mm}$ ,其直徑為  $21 \text{mm} \sim 23 \text{mm}$ ;膨脹儀工作臺直徑為  $20 \pm 1.0 \text{mm}$ ,由兩個桿件支撐試樣的水平定位;長度量測計測量範圍應至少為  $10 \text{mm}$ ,分辨率應至少為  $0.0025 \text{mm}$  和對照桿,其長度為  $425 \text{mm}$ ,直徑為  $20 \pm 1.0 \text{mm}$  (圖 3-3、3-4) [36]。



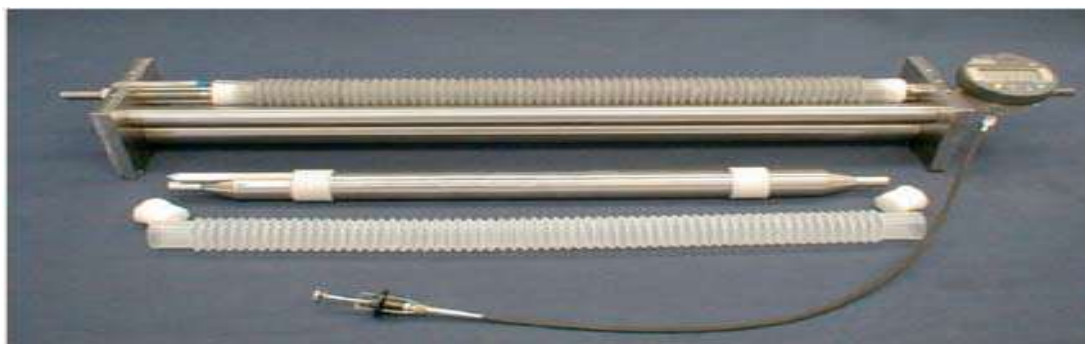


圖 3-3 膨脹偵測錶與其配件

(資料來源：本研究)

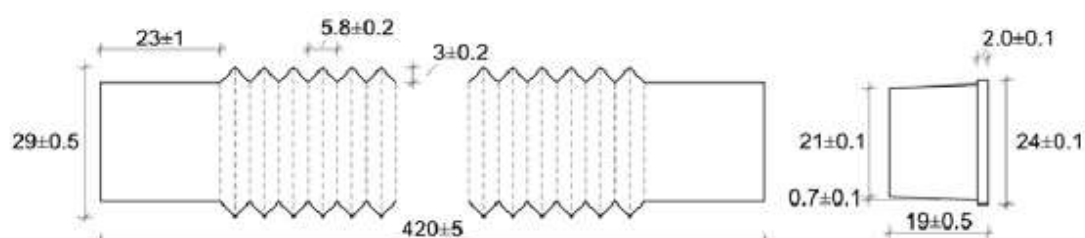


圖 3-4 塑膠螺紋低密度聚乙烯模與兩端塞口尺寸

(資料來源：參考書目[36])

試驗環境為  $23.0 \pm 1^\circ\text{C}$ ，試樣灌漿並封口模具後，應水平擺置，避免導致試樣長度受到影響而變化。為了確認在測量過程中試樣在凝固時間內的水分流失量，故採用相同組成之水泥砂漿。測量試樣長度與讀取壓力錶時，換取時需注意移動時都需用雙手捧取，小心避免造成損壞。為了精確測量精度，將試樣與對照桿在相同方向標記，確認與測量針得位置。其長度與水分流失的量測分別為齡期 1 天、3 天、7 天與 28 天。

該水泥砂漿長度隨時間變化其公式為：

$$L(t) = L_{ef} + R(t) - 2 * L_{pivg}$$

式中：

$L_{ef}$  = 對照棒的長度(mm)

$R(t)$ =試樣在熱膨脹儀記錄針讀數 (mm)

$L_{pivg}$ =端塞的平均長度 (mm)

其自體應變計算公式為：

$$\varepsilon = \frac{L(t) - L(t_{fs})}{L(t_{fs})} * 10^6 = \frac{R(t) - R(t_{fs})}{L(t_{fs})} * 10^6$$

式中：

$t_{fs}$ ：終凝時進行第一次長度量測

### 碳化收縮試驗

將試體置於二氧化碳壓力在 15atm, CO<sub>2</sub> 濃度 100%, 溫度 20°C 相對溼度 90% 的碳化箱一周後, 測量其長度變化的情形。

### 乾燥收縮試驗

本計畫依據 ASTM C596 之規定, 試體拌和澆置完成後, 於模具內濕養 23.5 小時, 拆模後置入水中養護 48 小時, 於齡期 72±0.5 小時將試體從水中取出量測其長度與重量, 並以此長度為基準, 將試體存放在自 20°C 環境中養護至齡期第 7、14、21、28 天, 量測其長度變化, 其乾縮公式如下[37]：

$$\text{乾縮應變 } \varepsilon = \frac{L_0 - L_t}{L_0}$$

式中：

$L_0$ =試體初始量測之長度 (mm)

$L_t$ =試體在第七天量測之長度 (mm)

### 塑性收縮試驗

本計畫依據 ASTM C1579-06 之規定方法進行塑性收縮試驗。使用模具尺寸為 560mm×355mm, 高 160mm, 並在模具中置入三個鋼片, 尺寸及位置如圖 3-5 所示。之後將試樣放置於規範要求之試驗環境 (圖 3-6、圖 3-7) 並使用指定的空氣速率進行實驗, 水的蒸發速率保持在 1000g/m<sup>2</sup>、環境溫度控制於 32±2°C、濕度於 40±5%, 在空氣流動速度為 10.8±1 /h, 且遵從 ACI 針對蒸發速率繪出列

線圖 (圖 3-8) 於 24 小時內每隔 10 秒監測其重量變化並記錄，並為了檢視在無空氣流動影響的重量變化數據，故空氣循環設定為每隔 10 分鐘會停止流動將所得數據代入公式求得重量損失率，其公式為[38]：

重量損失率：
$$\frac{\text{混合物在規定時間內的重量變化}}{\text{控制組在規定時間內的重量變化}}$$

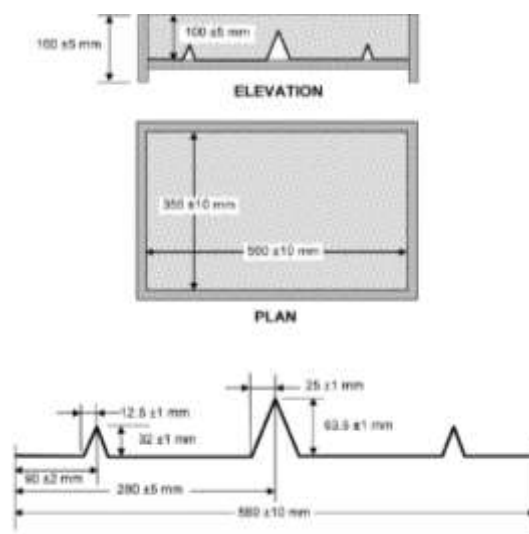


圖 3-5 模具尺寸與鐵片配置圖

(資料來源：參考書目[38])

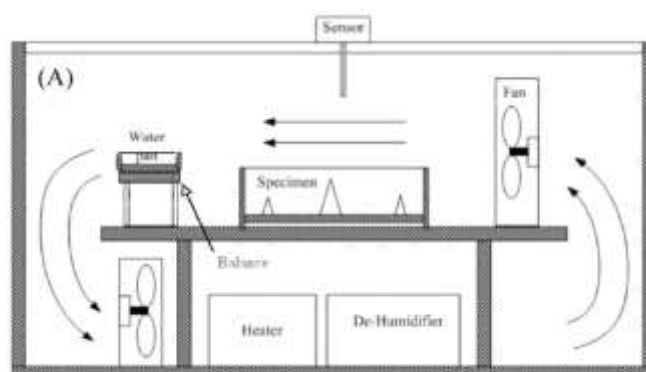


圖 3-6 試驗環境剖面圖

(資料來源：參考書目[38])

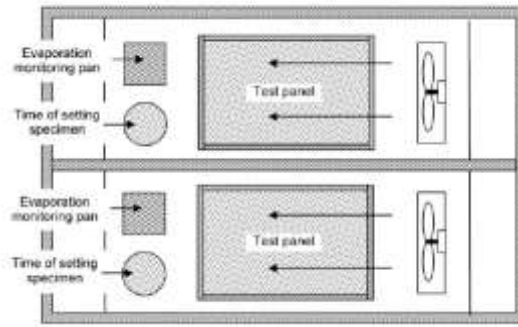


圖 3-7 試驗環境平面圖

(資料來源：參考書目[38])

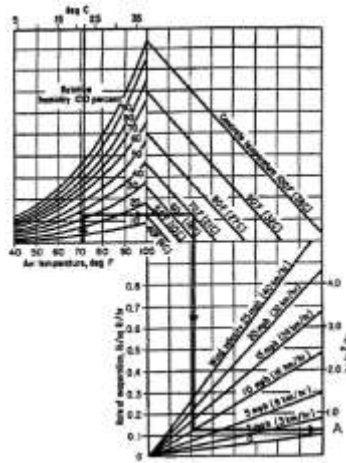


圖 3-8 ACI 針對蒸發速率列線圖

(資料來源：參考書目[38])

### 環型試驗

本試驗參照 ASTM C1581-04 規定其詳細規格如圖 3-9 所示(鋼環外直徑 426mm、內直徑 350mm、高 150mm)。透過鋼環產生的微小應變，可計算開裂齡期與承受之拉應力大小。其試驗方法如下所述：將水泥質複合材料試體澆置在鋼環的周圍，形成一個環型試體，澆置完成後，立即移至特定的養護環境中養護 24 小時，將上表面用不透水之環氧樹脂密封上表面，使水分只能從表面散失，並在其內環三軸貼上應變計如圖 3-10 所示。將試體存放在溫度  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相對溼度  $65 \pm 10\%$  的環境下，每 2 分鐘讀取應變資料一次，開裂時間以應變計讀數突然的顯著變化為依據[39]。

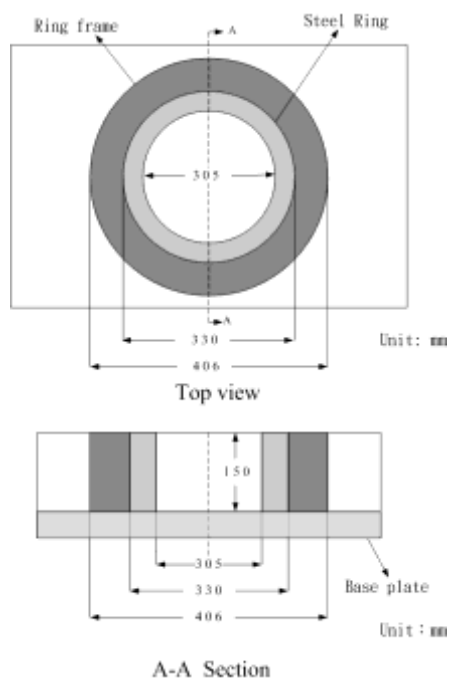


圖 3-9 環形試體尺寸示意圖

(資料來源：參考書目[39])

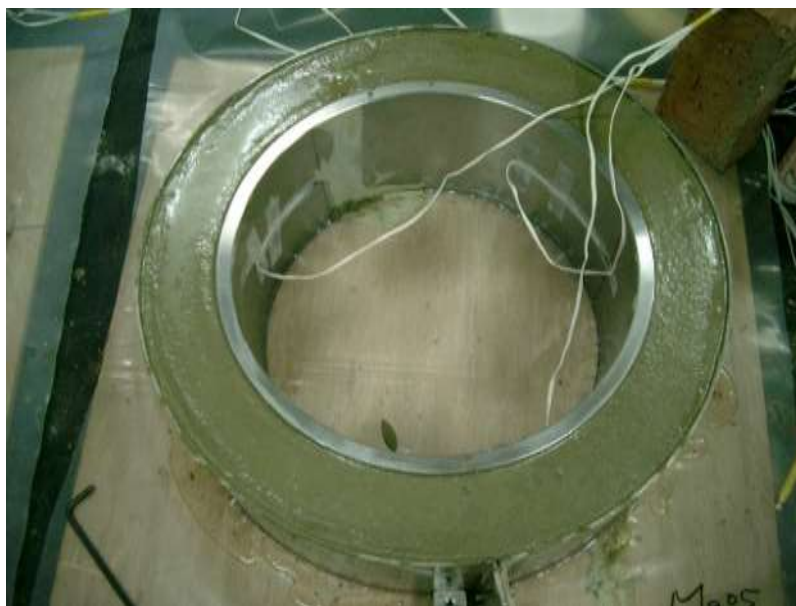


圖 3-10 三軸應變計配置情形

(資料來源：本研究)



## 第四章 結果與討論

### 第一節 前言

本章節主要討論化學摻料對於水泥砂漿強度及體積穩定性的影響，分別討論對於爐石及飛灰的影響，後續再評估在強度折減率較低收縮抑制效果相對較佳及較差的組別，再進一步進行環型及塑性收縮試驗。目前已完成水膠比 0.65 的部分，水膠比 0.45 的部分已灌製完成，但齡期尚未到達。下述初步結論主要針對 0.65 部分作討論。收縮試體尺寸為  $2.5 \times 2.5 \times 28.5\text{cm}$ ，各試驗每組配比用 3 個樣本作平均，得到以下結果。

### 第二節 化學摻料對抗壓強度的影響

圖 4-1 至圖 4-2 為化學摻料對於純水泥無礦物摻料取代所拌製水泥砂漿試體之抗壓強度的影響，以水膠比 0.45 與 0.65 純水泥無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組，對照添加 SRA 與膨脹劑之水泥砂漿抗壓強度的影響。相較於對照組，水泥砂漿之強度會隨著 SRA 添加量越高，抗壓強度降低；隨著膨脹劑添加量越高，抗壓強度增加。整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 水泥砂漿試體化學摻料添加對強度影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體抗壓強度皆大於水膠比 0.65。

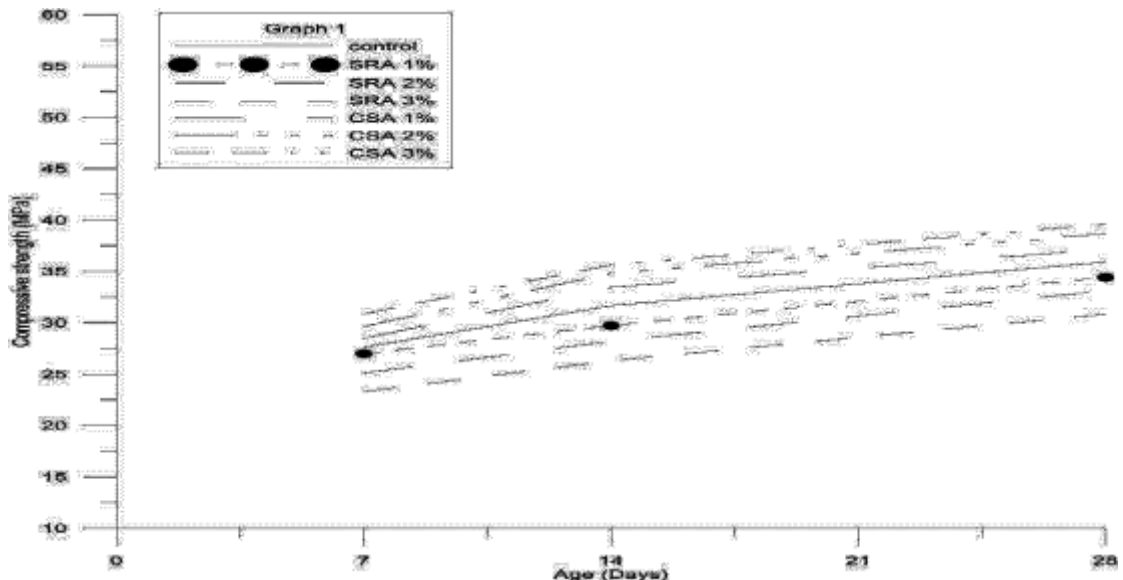


圖 4-1 抗壓強度 (水膠比 0.65)

(資料來源：本研究)

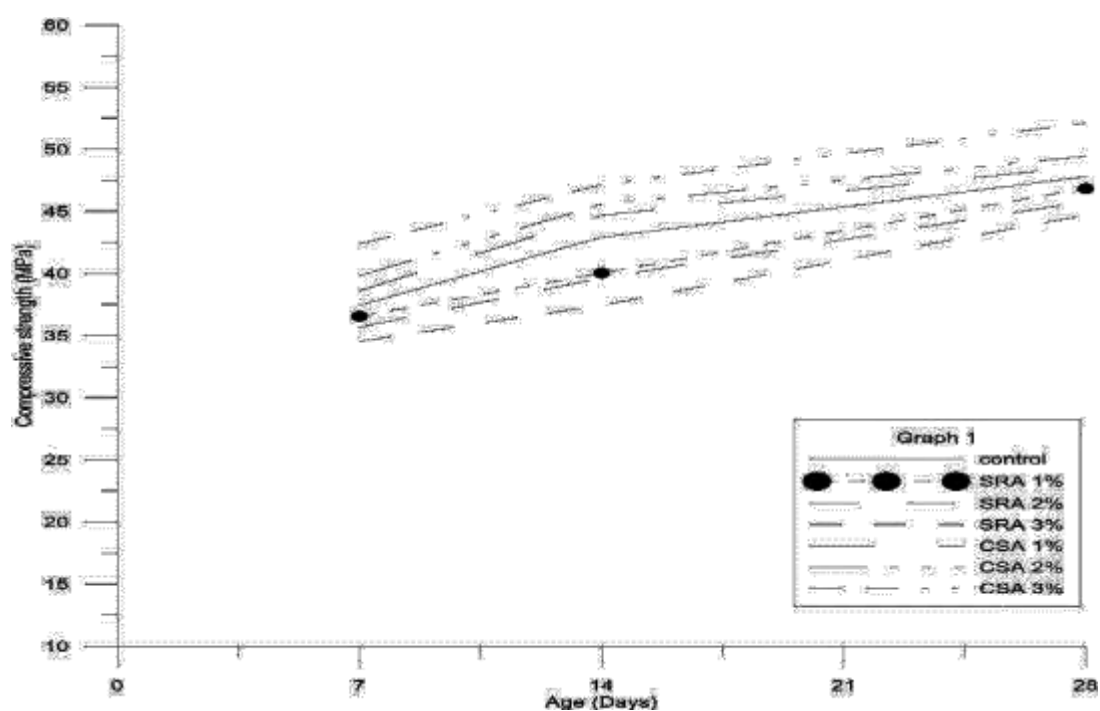


圖 4-2 抗壓強度 (水膠比 0.45)

(資料來源：本研究)

## 壹、高爐石部分

圖 4-3 至圖 4-5 為化學摻料對於高爐石以 15%、30% 及 45% 重量百分比取代水泥所拌製水泥砂漿試體之抗壓強度的影響，以水膠比 0.65 在高爐石 15%、30% 及 45% 取代水泥情況下無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組。相較於控制組，水泥砂漿之強度會隨著 SRA 添加量越高，抗壓強度降低；隨著膨脹劑添加量越高，抗壓強度增加。高爐石取代率 15% 之 7 天抗壓強度較取代率 45% 高，但 28 天之抗壓強度隨高爐石取代率越高，抗壓強度越高，且試體齡期強度成長亦隨高爐石取代率越高，抗壓強度成長越大。



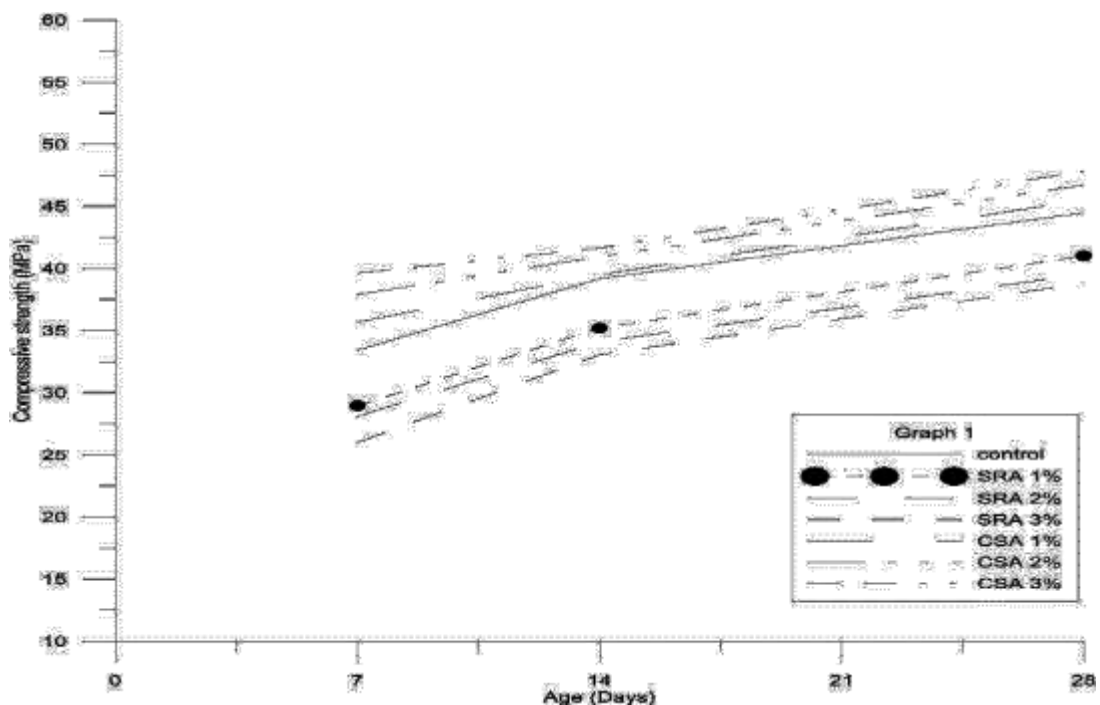


圖 4-3 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

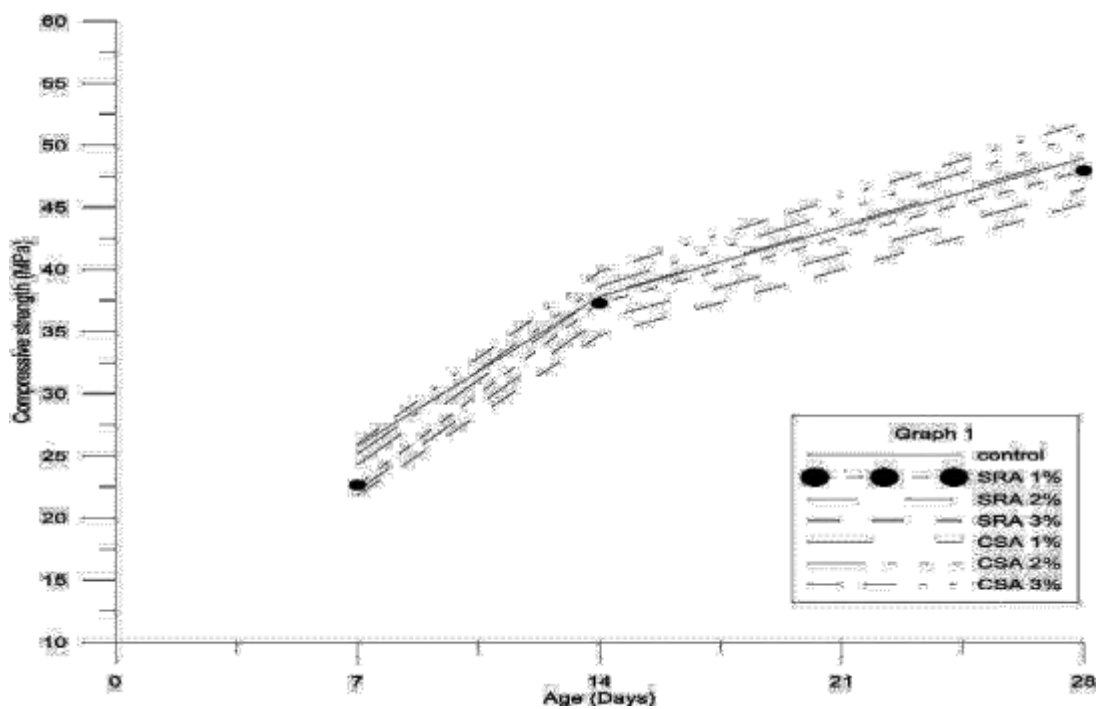


圖 4-4 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

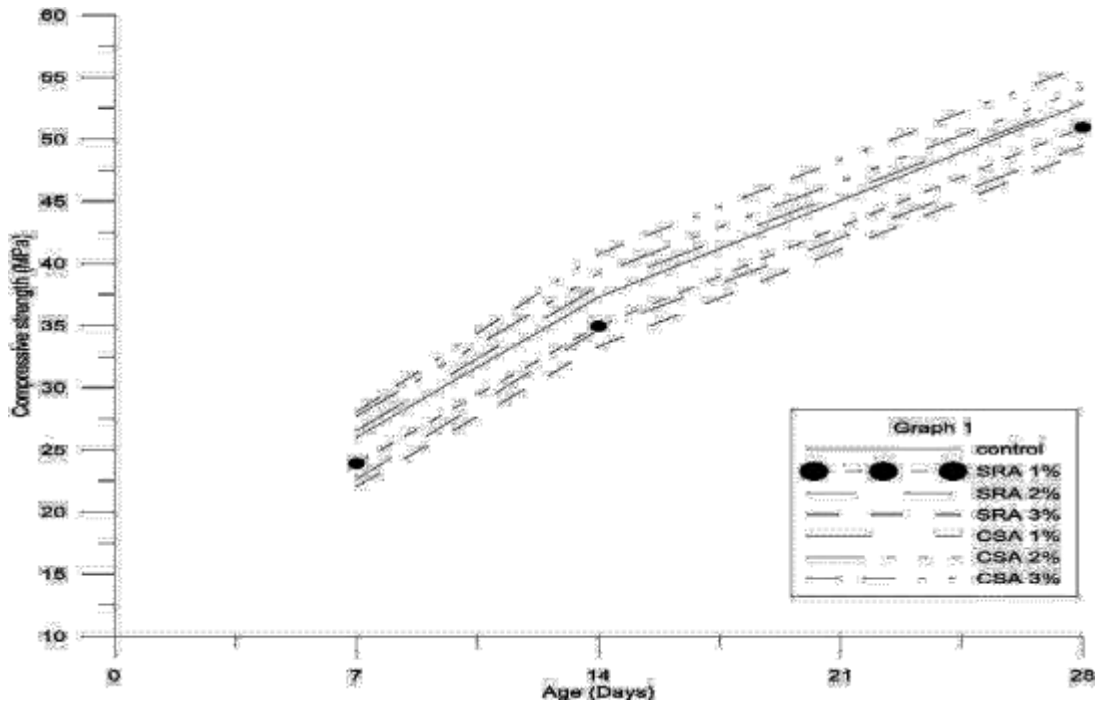


圖 4-5 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

圖 4-6 至圖 4-8 為化學摻料對於高爐石粉以 15%、30% 及 45% 重量百分比取代水泥所拌制水泥砂漿試體之抗壓強度的影響，以水膠比 0.45 在高爐石 15%、30% 及 45% 取代水泥情況下無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組。相較於控制組，水泥砂漿之強度會隨著 SRA 添加量越高，抗壓強度降低；隨著膨脹劑添加量越高，抗壓強度增加。高爐石取代率 15% 之 7 天抗壓強度較取代率 45% 高，但 28 天之抗壓強度隨高爐石取代率越高，抗壓強度越高，且試體齡期強度成長亦隨高爐石取代率越高，抗壓強度成長幅度越大。

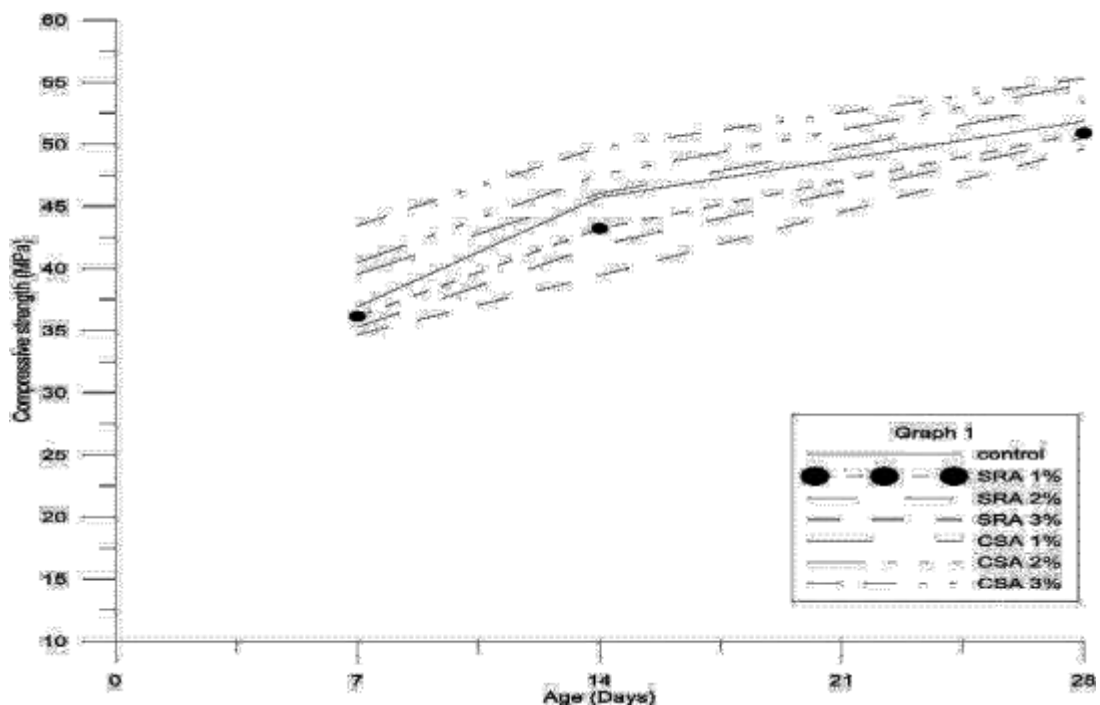


圖 4-6 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

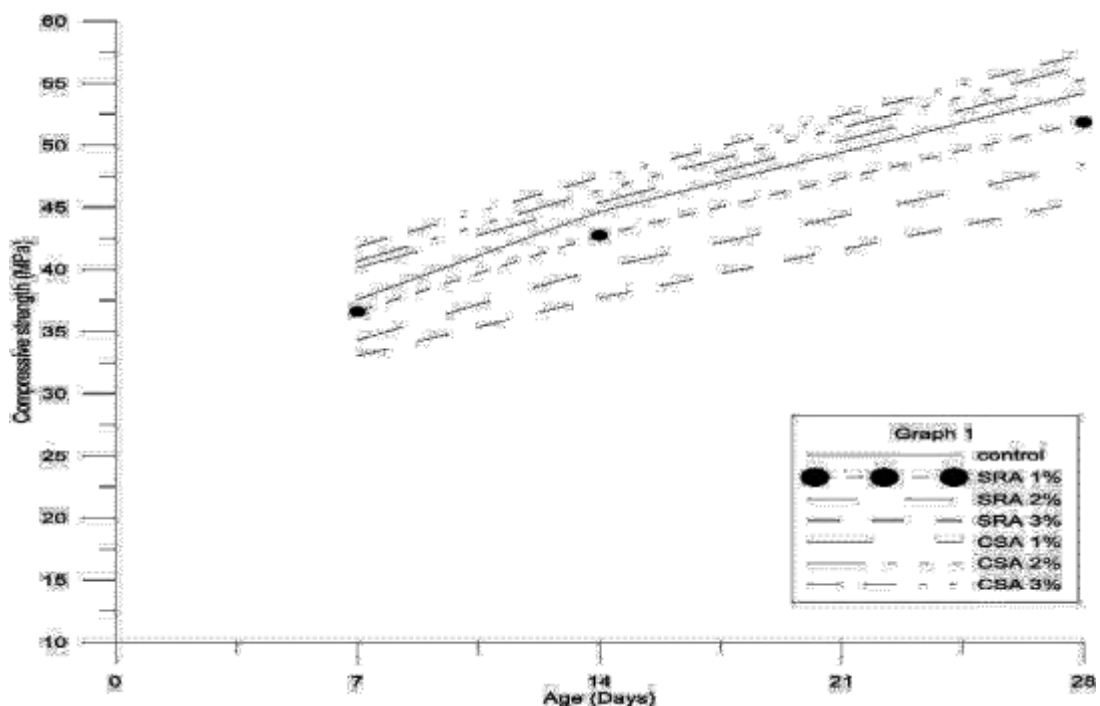


圖 4-7 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

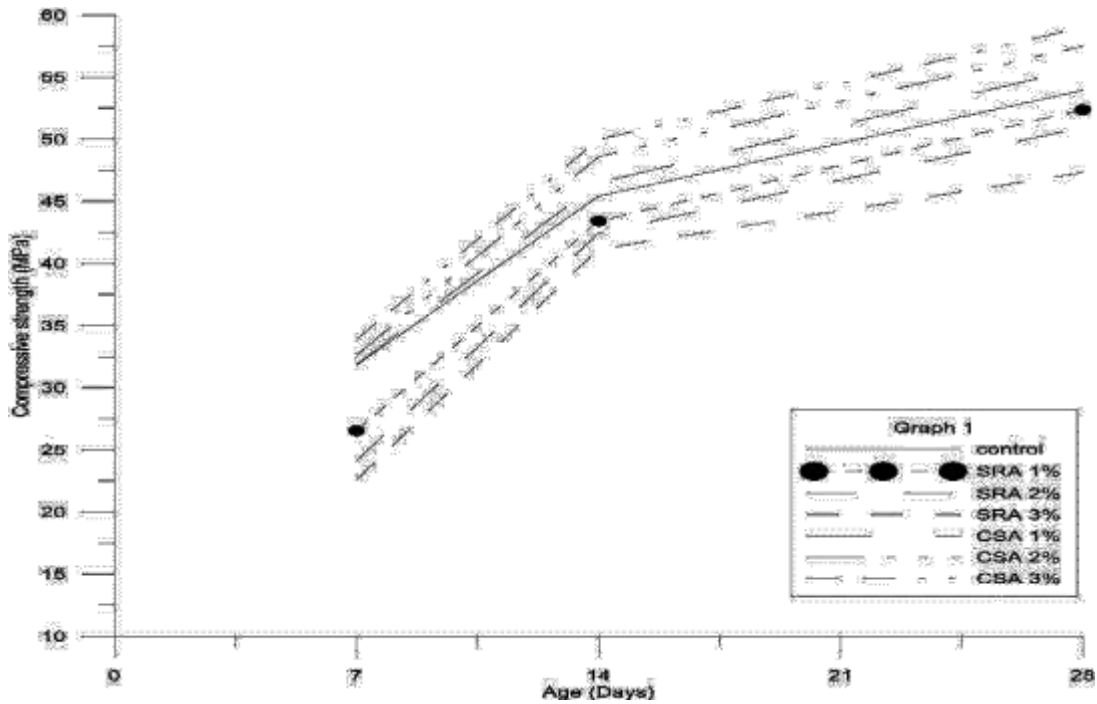


圖 4-8 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之高爐石以 15%、30% 及 45% 重量百分比取代水泥所拌制之水泥砂漿試體化學摻料添加對強度影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體抗壓強度皆大於水膠比 0.65。

## 貳、飛灰部分

圖 4-9 至圖 4-11 為化學摻料對於飛灰以 10%、20% 及 25% 重量百分比取代水泥所拌制水泥砂漿試體之抗壓強度的影響，以水膠比 0.65 在飛灰 10%、20% 及 25% 取代水泥情況下無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組。相較於控制組，水泥砂漿之強度會隨著 SRA 添加量越高，抗壓強度降低；隨著膨脹劑添加量越高，抗壓強度增加。飛灰取代率 10% 之抗壓強度相對於取代率 25% 皆較高，抗壓強度隨飛灰取代率越高，抗壓強度越低。

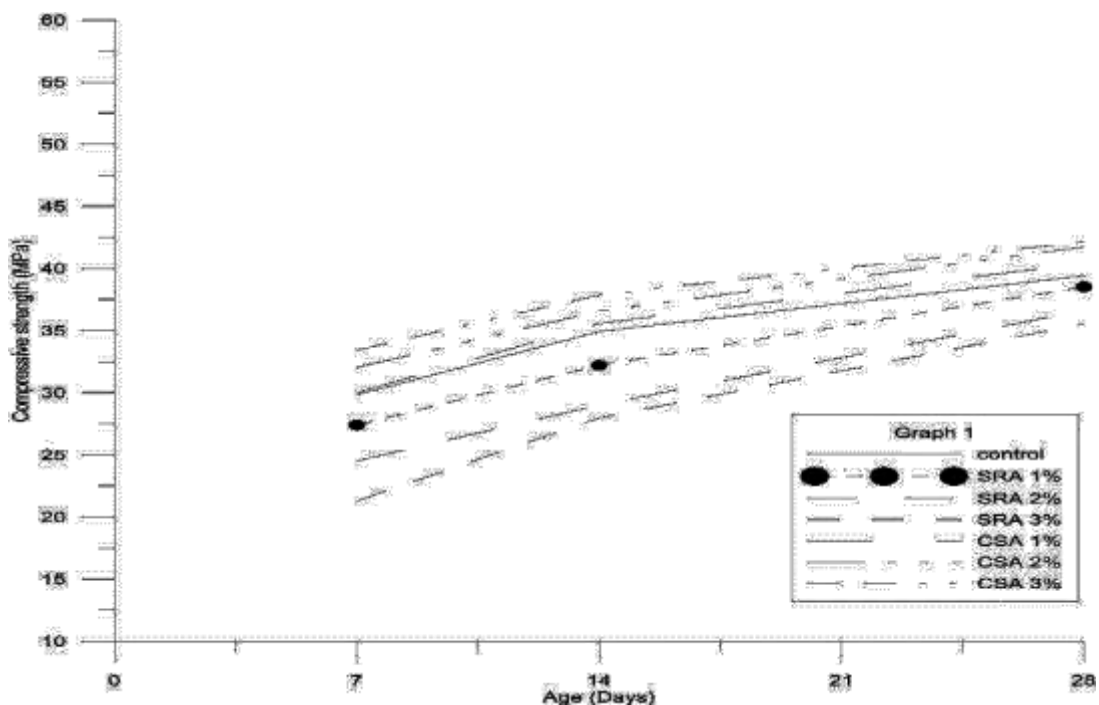


圖 4-9 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

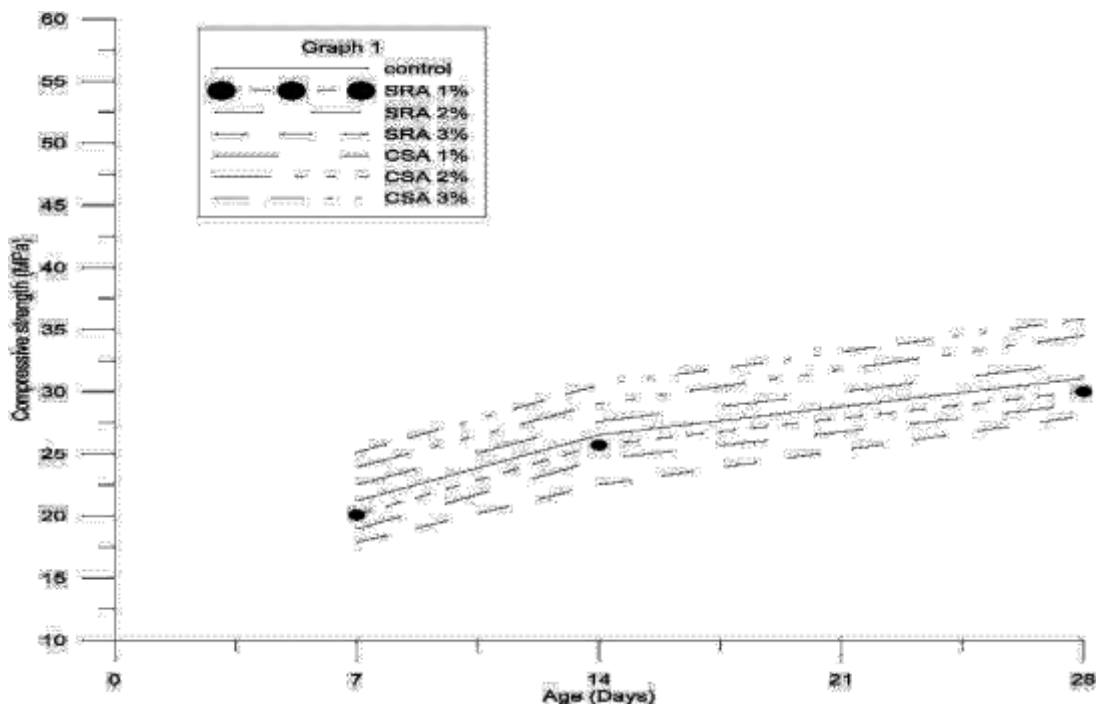


圖 4-10 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

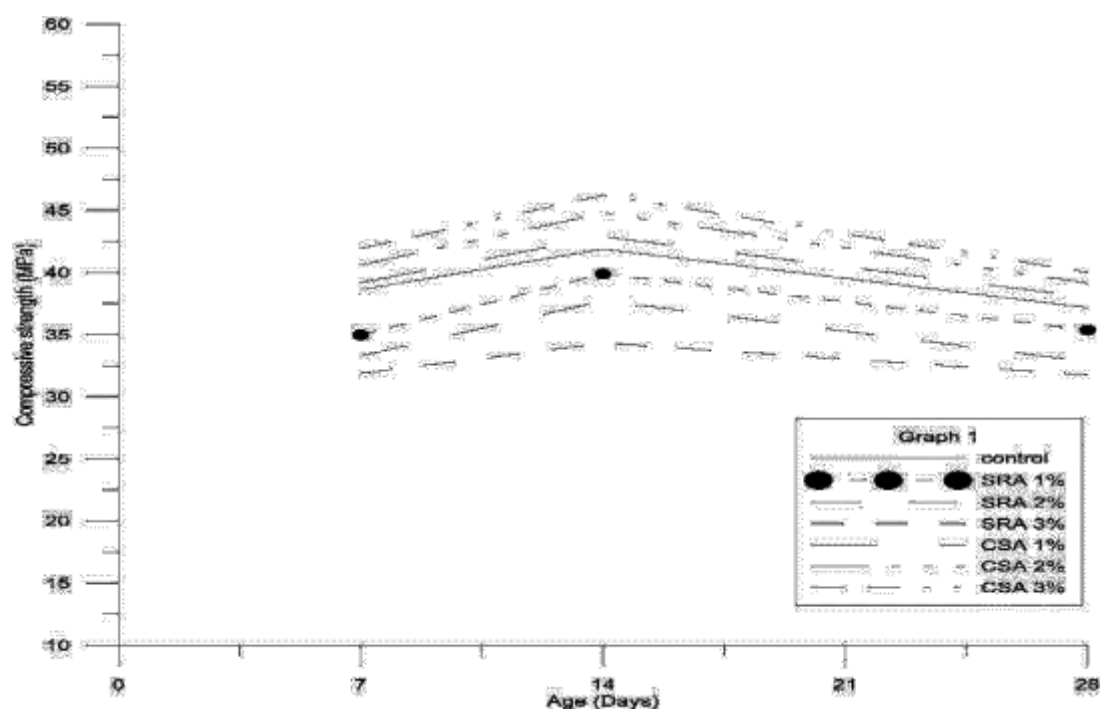


圖 4-11 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

圖 4-12 至圖 4-14 為化學摻料對於飛灰以 10%、20%及 25%百分比取代水泥所拌制水泥砂漿試體之抗壓強度的影響，以水膠比 0.45 在飛灰 10%、20%及 25% 取代水泥情況下無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組。相較於控制組，水泥砂漿之強度會隨著 SRA 添加量越高，抗壓強度降低；隨著膨脹劑添加量越高，抗壓強度增加。飛灰取代率 10%之抗壓強度相對於取代率 25%皆較高，抗壓強度隨飛灰取代率越高，抗壓強度越低。

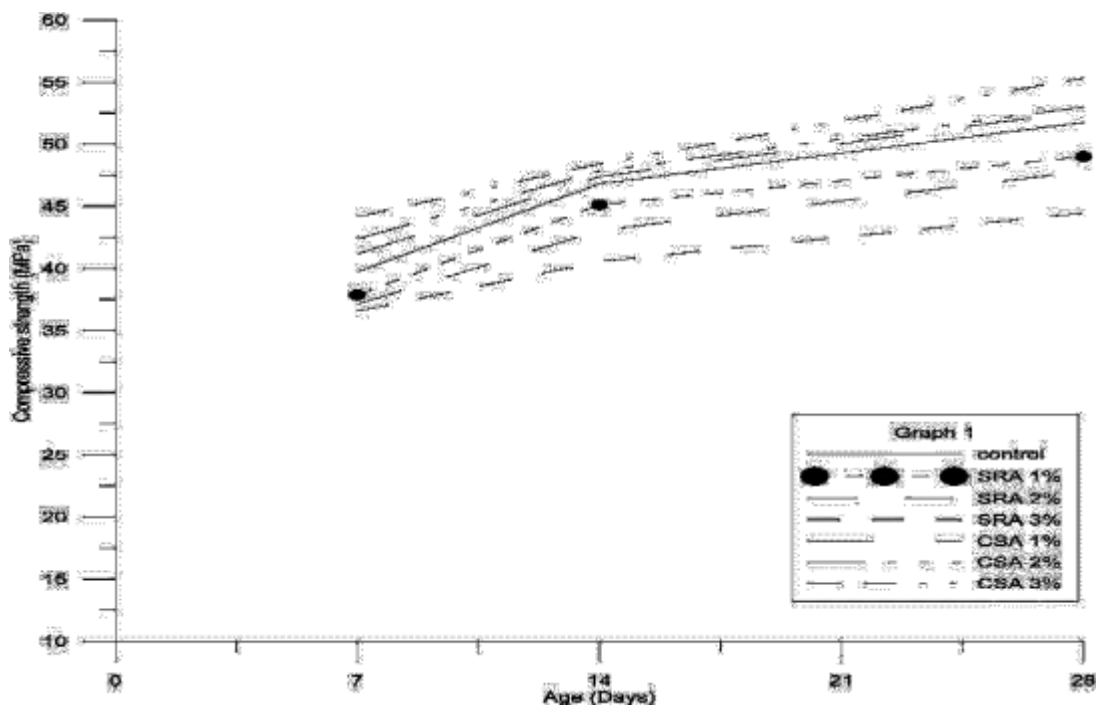


圖 4-12 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

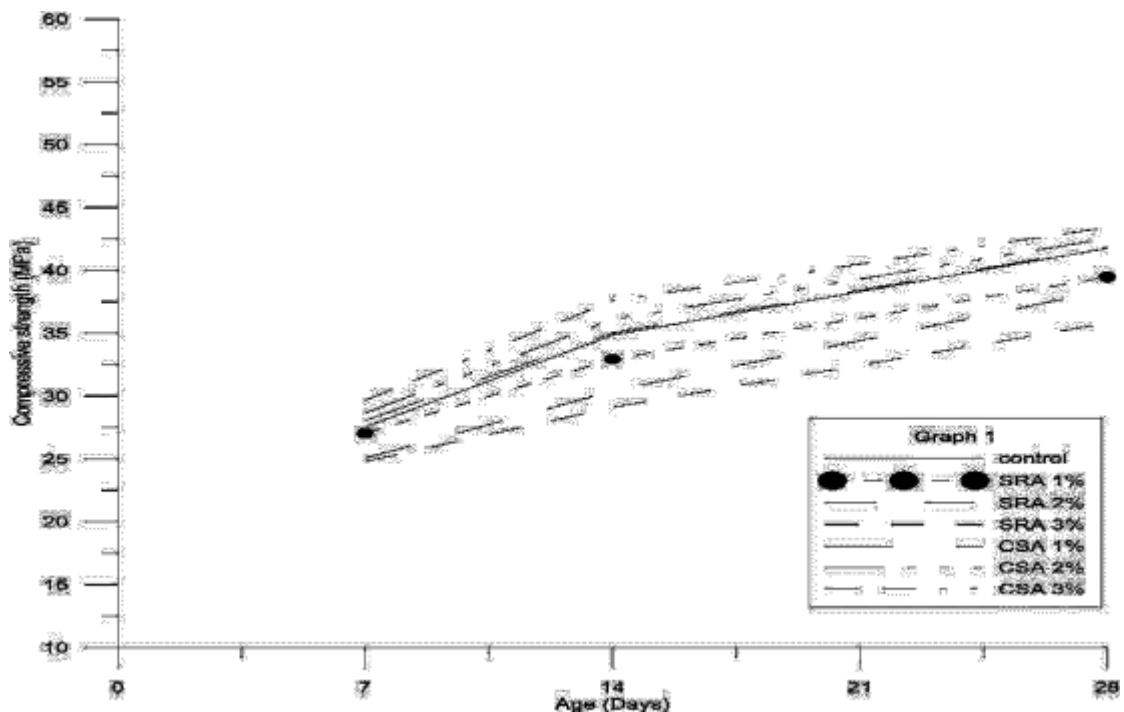


圖 4-13 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

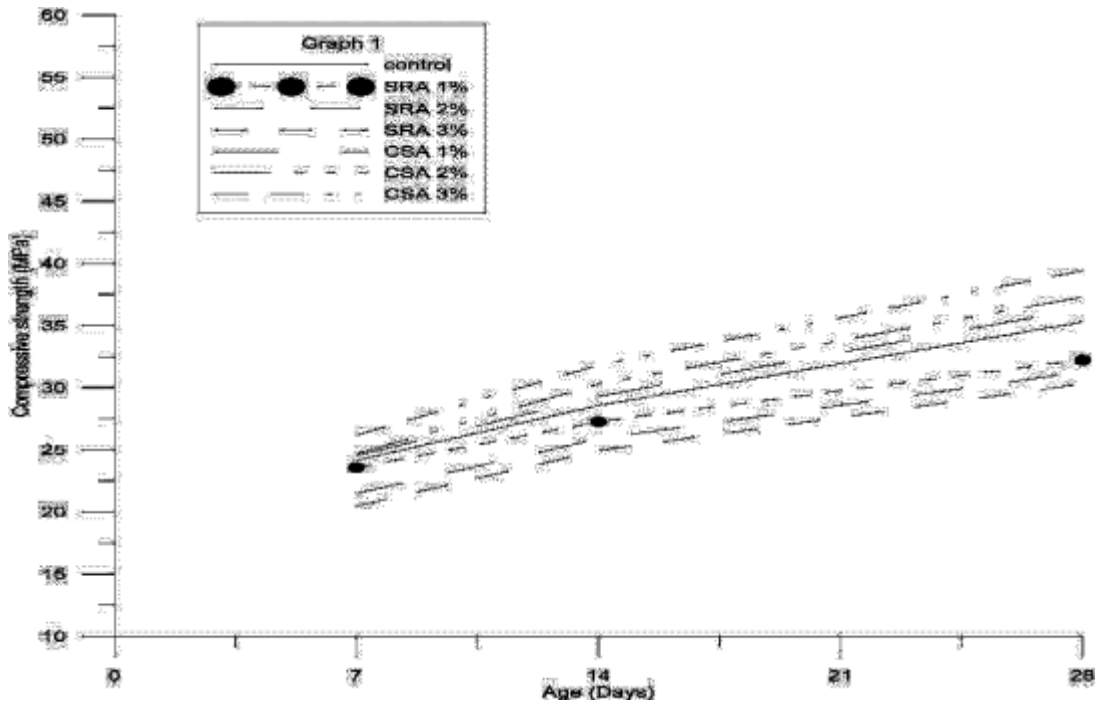


圖 4-14 化學摻料對抗壓強度的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之飛灰以 10%、20% 及 25% 百分比取代水泥所拌制之水泥砂漿試體化學摻料添加對強度影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體抗壓強度皆大於水膠比 0.65。

### 第三節 化學摻料對收縮的影響

圖 4-15 至圖 4-16 為化學摻料對於純水泥無礦物摻料取代所拌製水泥砂漿試體之收縮的影響，以水膠比 0.45 與 0.65 純水泥無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組，對照添加 SRA 與膨脹劑之水泥砂漿抗壓強度的影響。相較於對照組，水泥砂漿之收縮應變會隨著 SRA 添加量越高而降低；隨著膨脹劑添加量越高而增加。整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 水泥砂漿試體化學摻料添加對強度影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體收縮應變皆小於水膠比 0.65。



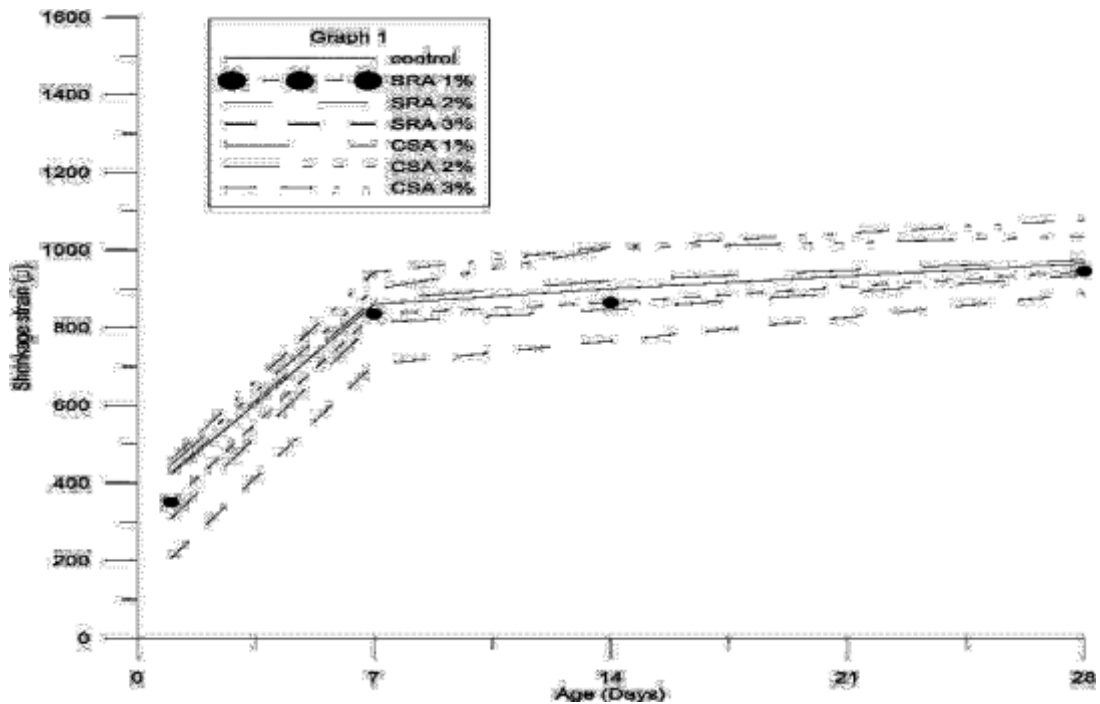


圖 4-15 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45)

(資料來源：本研究)

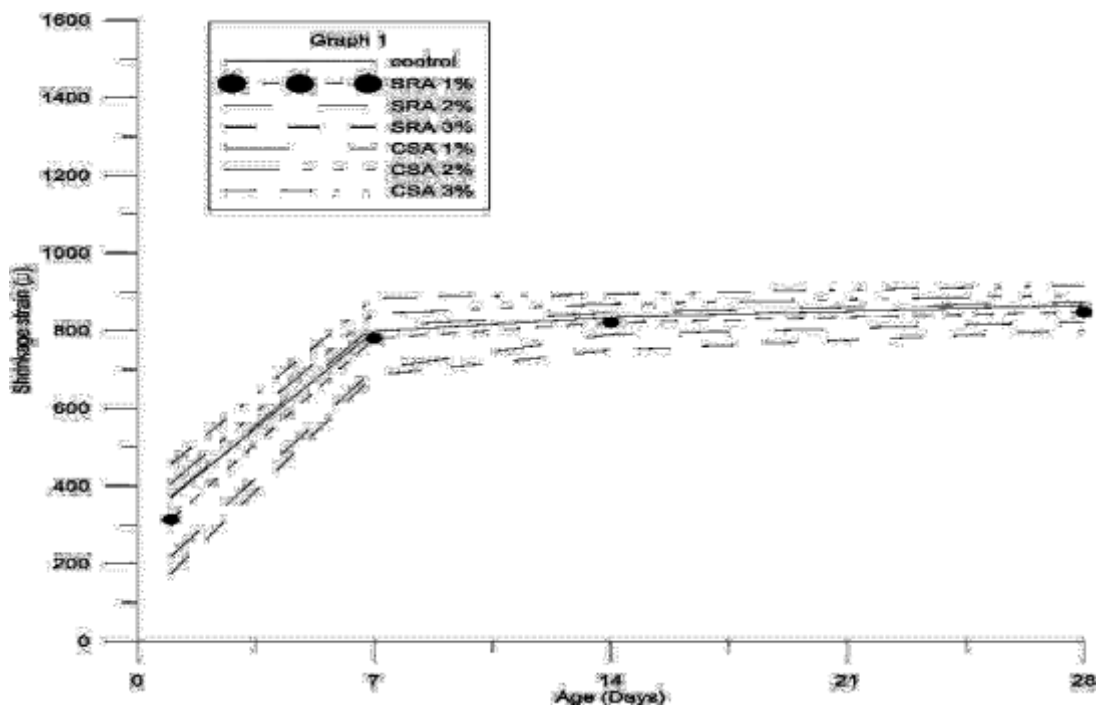


圖 4-16 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45)

(資料來源：本研究)

## 壹、高爐石部分

圖 4-17 至圖 4-19 為水膠比 0.65 下化學摻料對收縮的影響。隨著膨脹劑添加量增加其收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。隨著高爐石取代百分率上升，膨脹劑與 SRA 對於收縮應變差異性愈明顯。

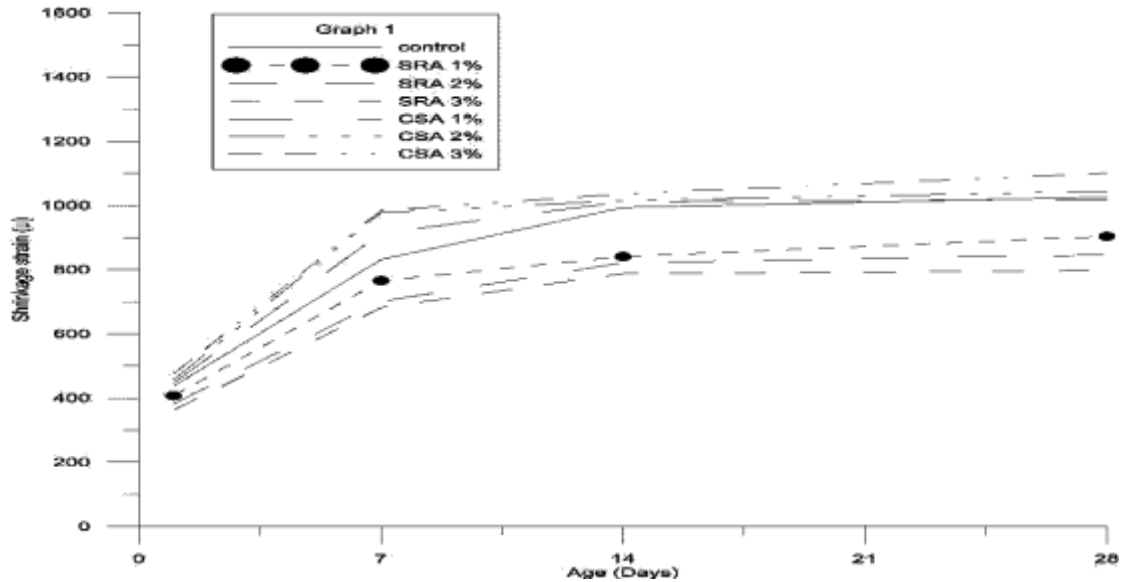


圖 4-17 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

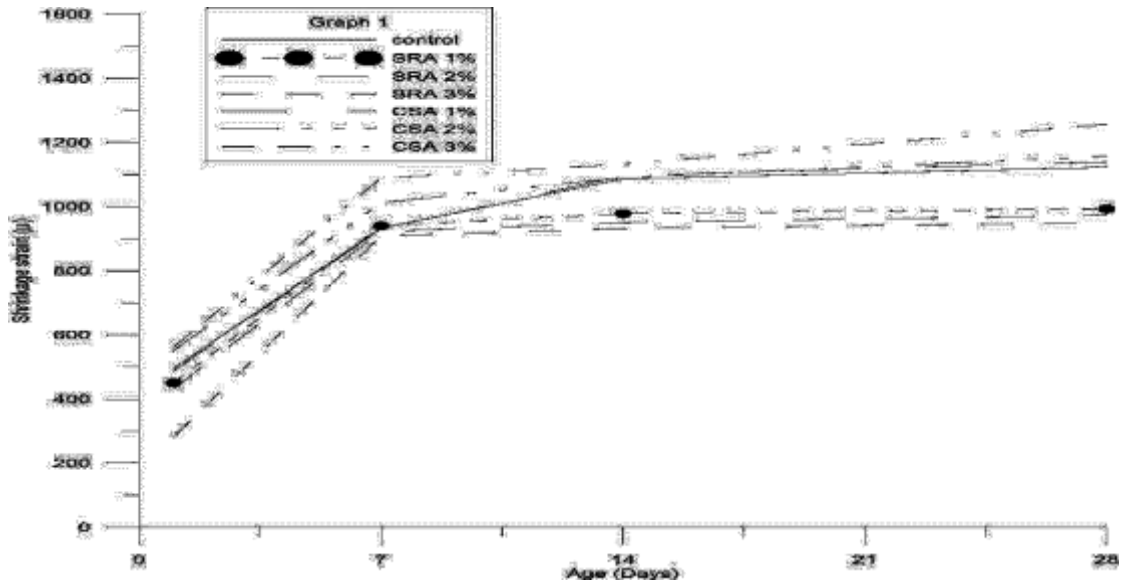


圖 4-18 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

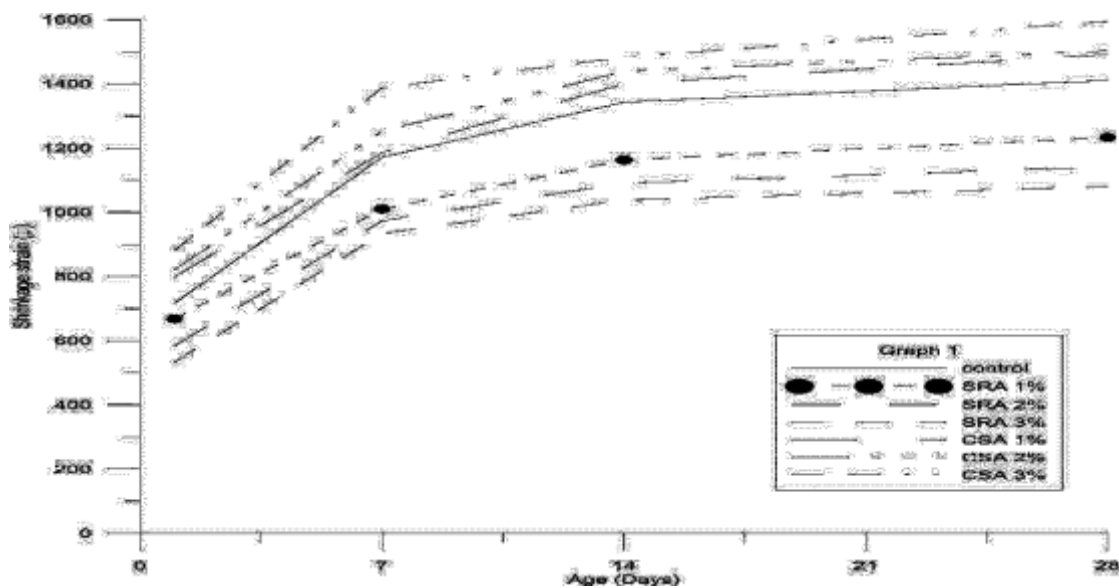


圖 4-19 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

圖 4-20 至圖 4-22 為水膠比 0.45 下化學摻料對收縮的影響。隨著膨脹劑添加量增加其收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。隨著高爐石粉取代百分率上升，差異性愈明顯。

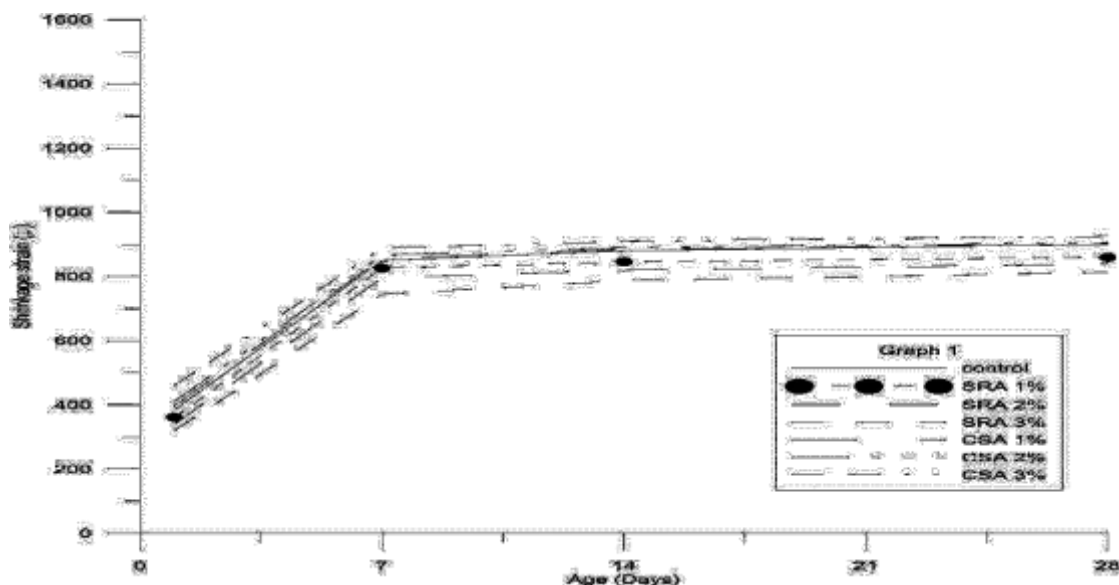


圖 4-20 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

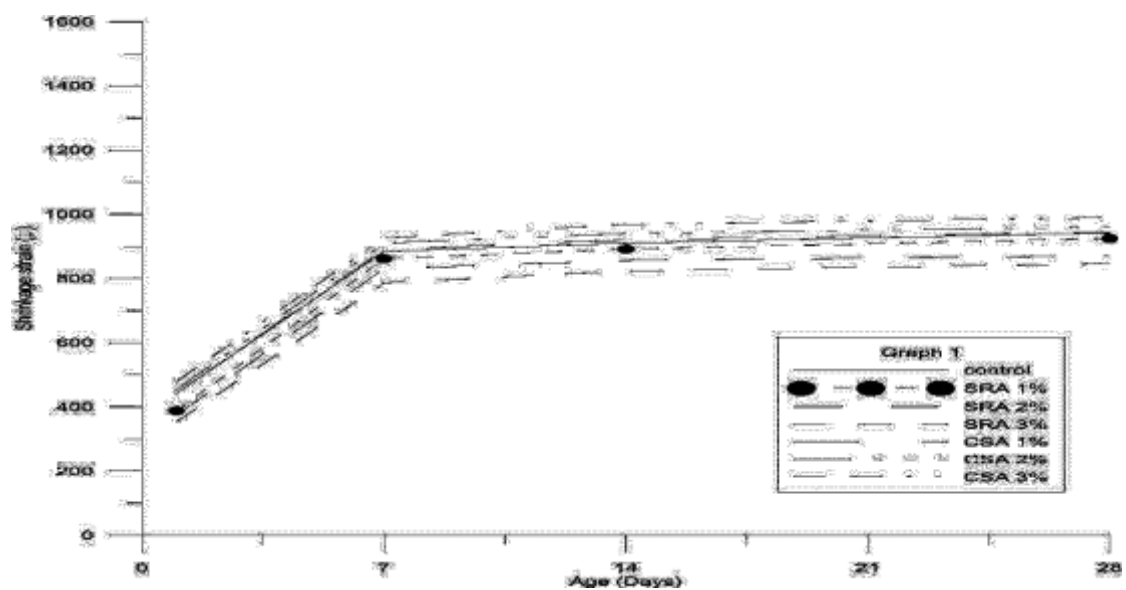


圖 4-21 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

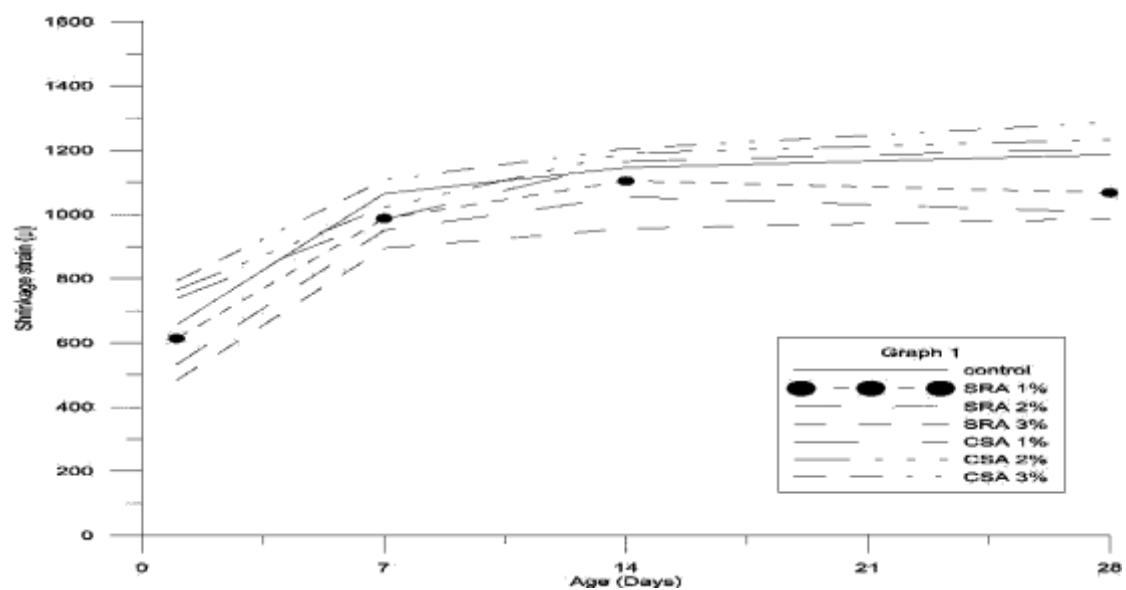


圖 4-22 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之高爐石粉以 15%、30% 及 45% 百分比取代水泥所拌制之水泥砂漿試體化學摻料添加對收縮應變影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體收縮應變皆小於水膠比 0.65。

## 貳、飛灰部分

由圖 4-23 至圖 4-25 為水膠比 0.65 下化學摻料對收縮的影響，隨著膨脹劑添加量增加其收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。隨著飛灰取代百分率上升，膨脹劑與 SRA 對於收縮應變差異性愈明顯。

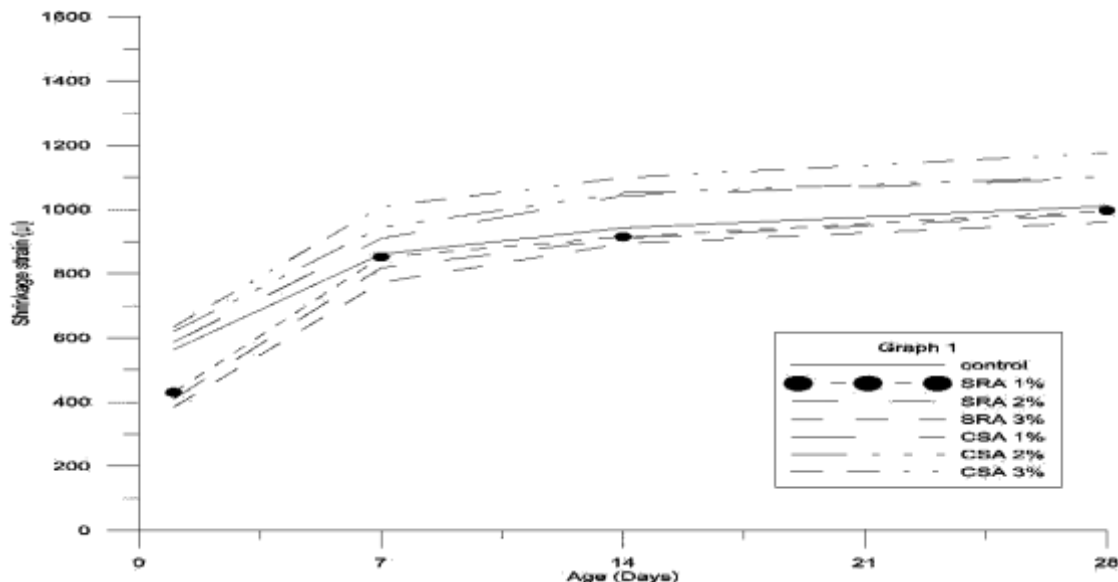


圖 4-23 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

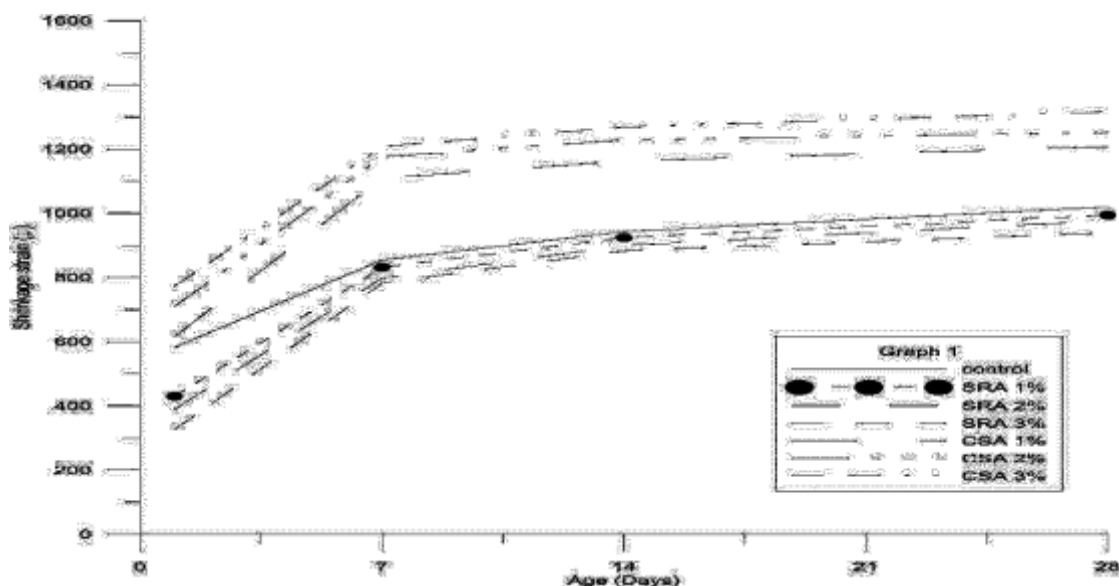


圖 4-24 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

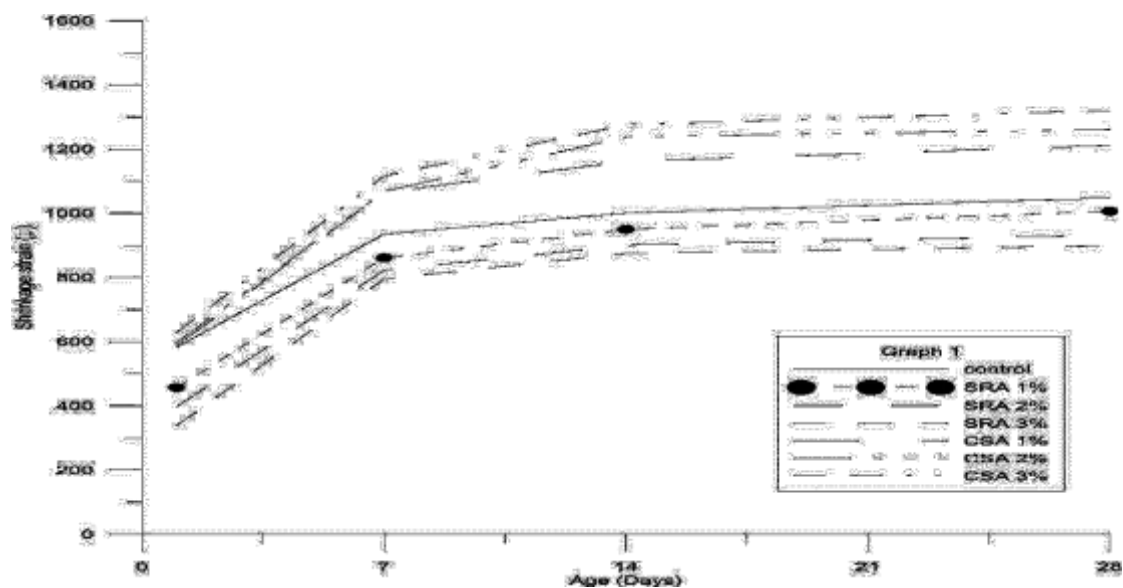


圖 4-25 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

由圖 4-26 至圖 4-28 為水膠比 0.45 下化學摻料對收縮的影響，隨著膨脹劑添加量增加其收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。隨著飛灰取代百分率上升，膨脹劑與 SRA 對於收縮應變差異性並不明顯。

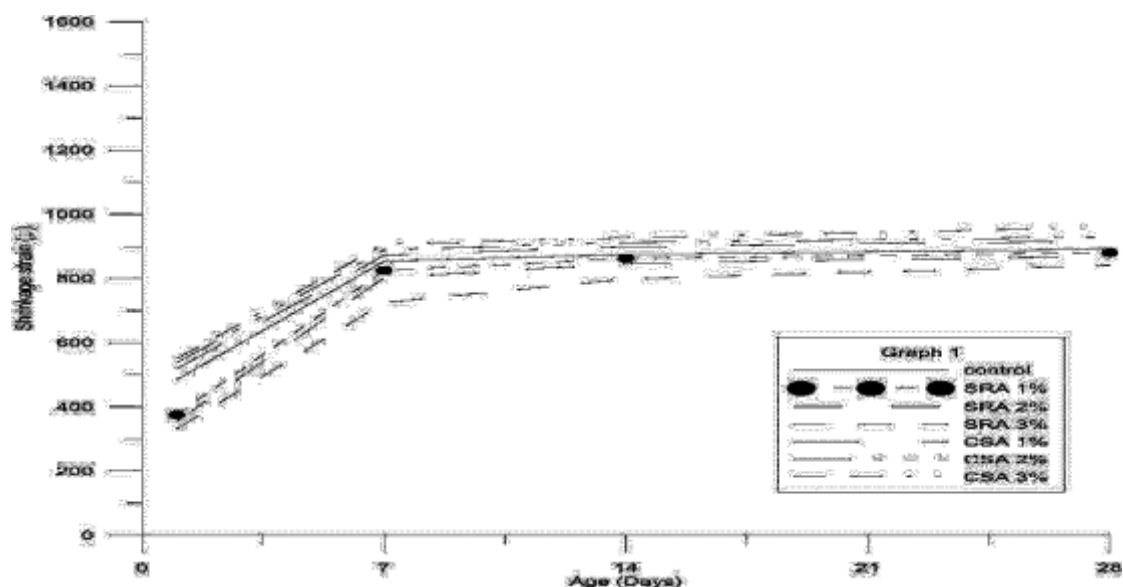


圖 4-26 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

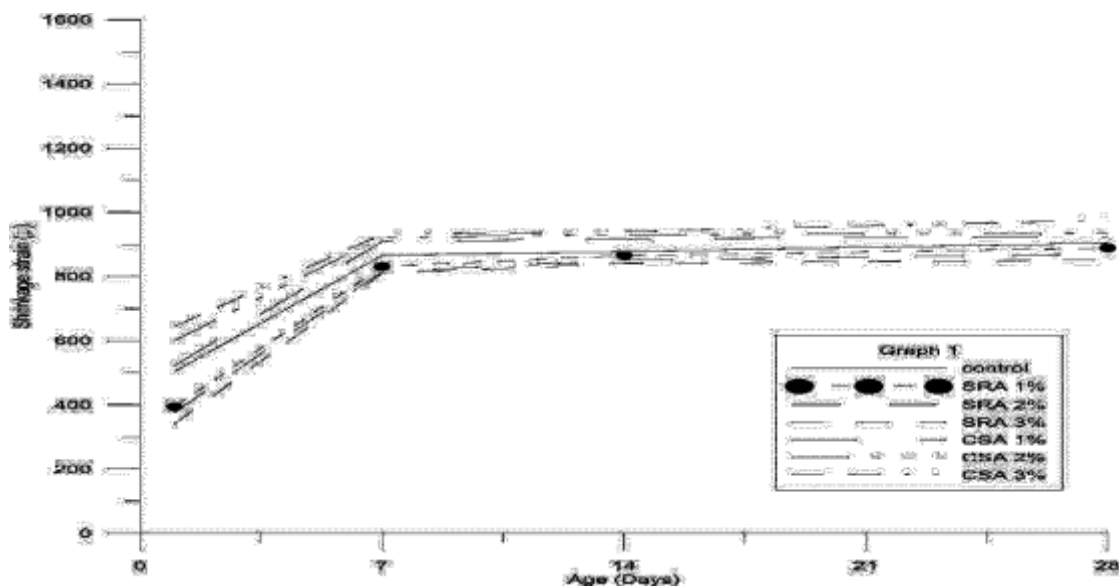


圖 4-27 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

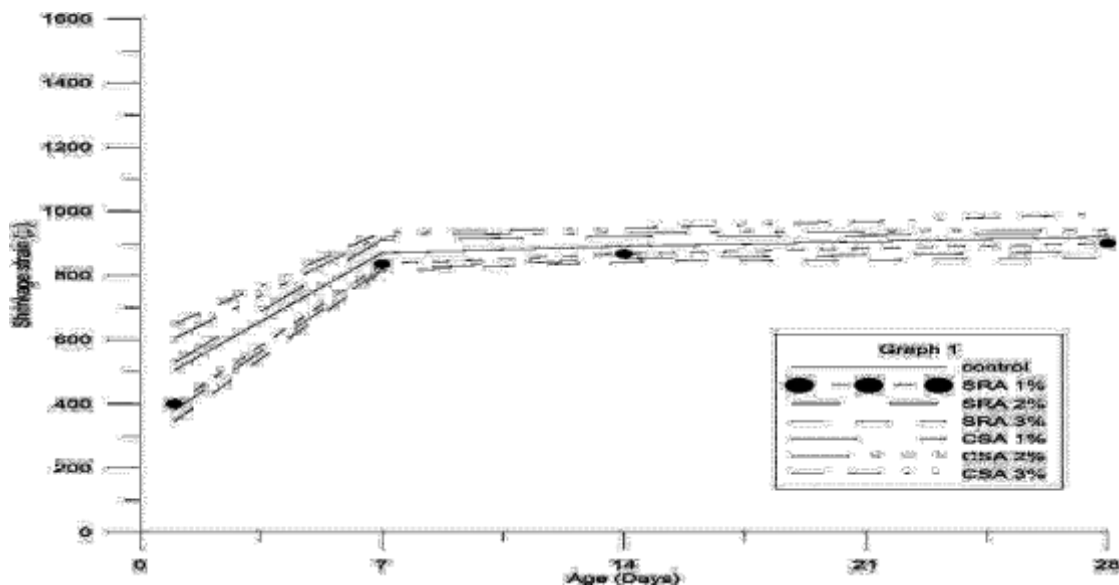


圖 4-28 化學摻料對收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之飛灰以 10%、20% 及 25% 百分比取代水泥所拌制之水泥砂漿試體化學摻料添加對收縮應變影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體收縮應變皆小於水膠比 0.65。

#### 第四節 化學摻料對碳化收縮的影響

圖 4-29 至圖 4-30 為化學摻料對於純水泥無礦物摻料取代所拌製水泥砂漿試體之碳化收縮的影響，以水膠比 0.45 與 0.65 純水泥無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組，對照添加 SRA 與膨脹劑之水泥砂漿碳化收縮的影響。相較於對照組，添加化學摻料對於碳化收縮影響並無明顯趨勢。

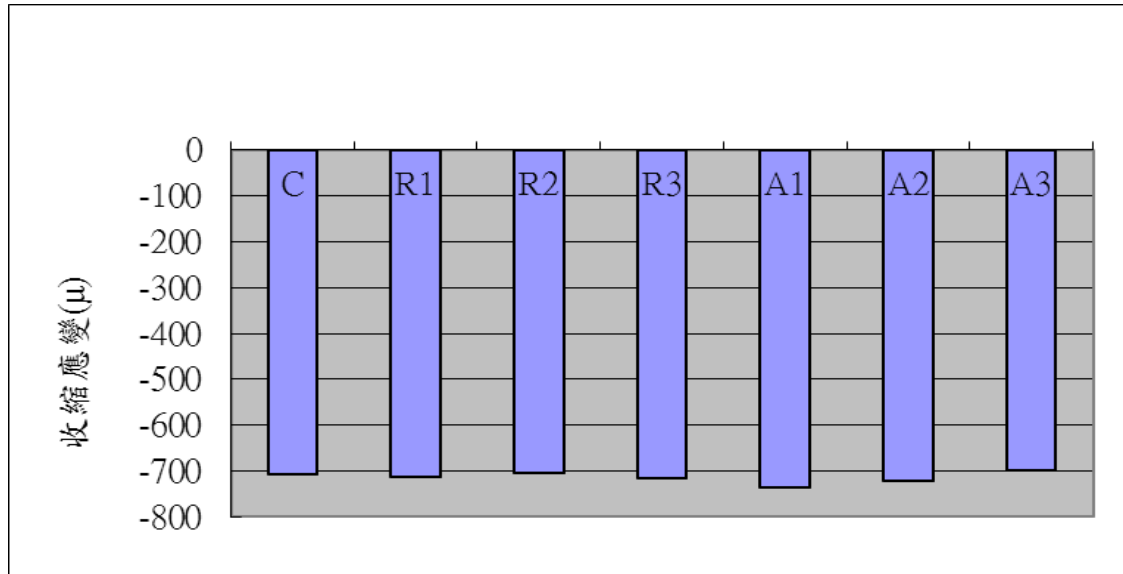


圖 4-29 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65)

(資料來源：本研究)

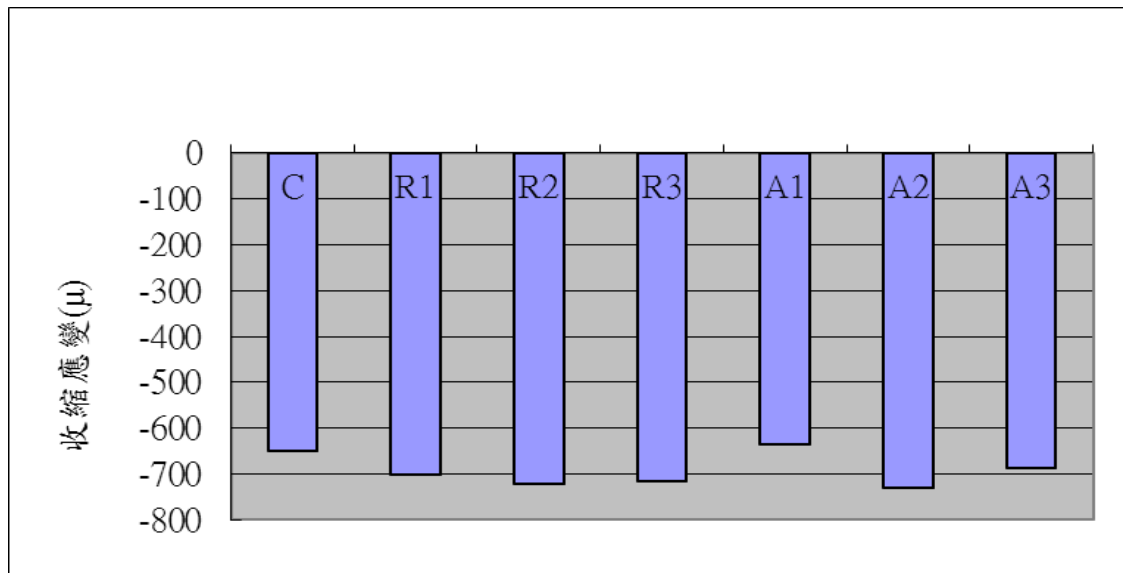


圖 4-30 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45)

(資料來源：本研究)



### 壹、高爐石部分

圖 4-31 至圖 4-33 為水膠比 0.65 下化學摻料對碳化收縮的影響，整體而言都因碳化後有少許膨脹的情形，但添加化學摻料對於碳化收縮影響並無明顯趨勢。

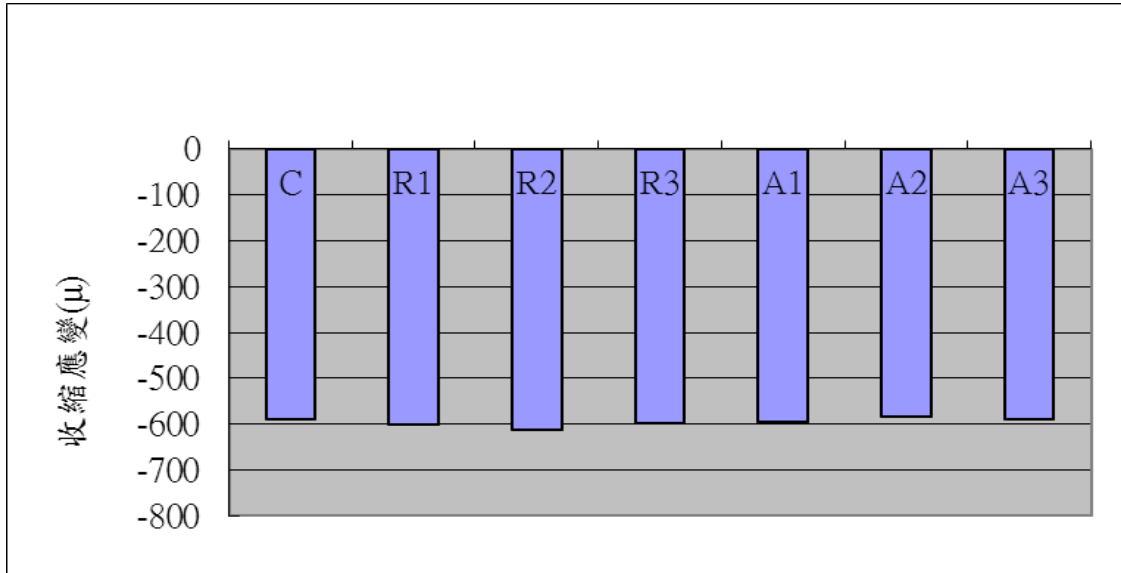


圖 4-31 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

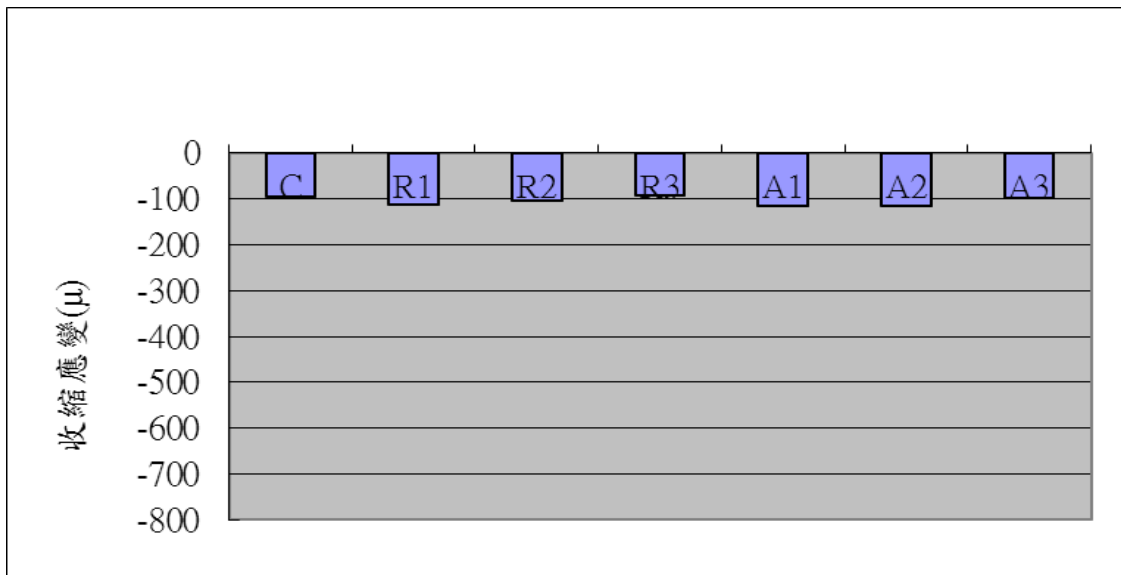


圖 4-32 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

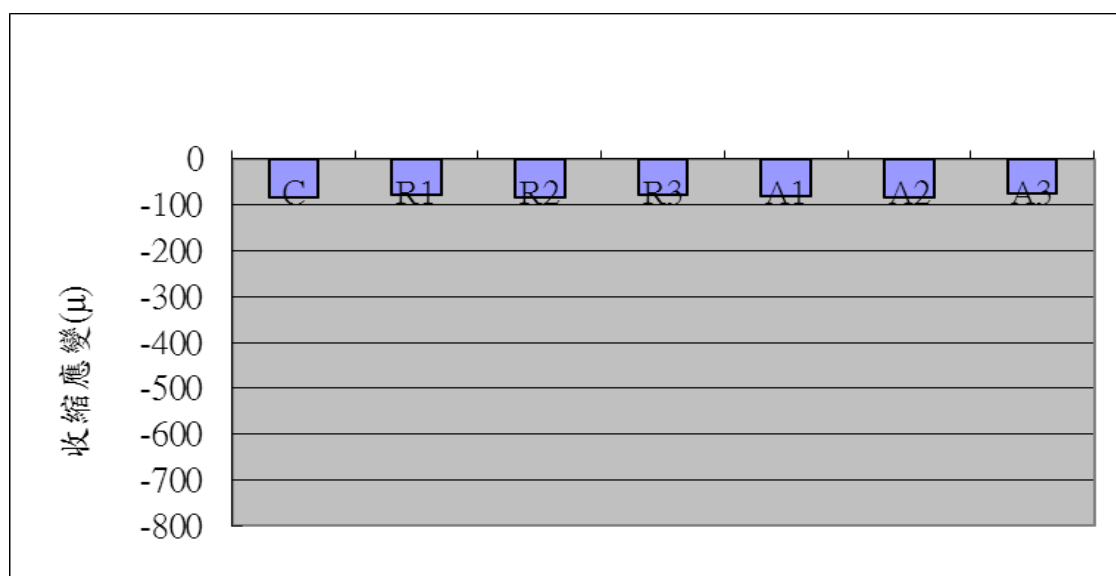


圖 4-33 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

圖 4-34 至圖 4-36 為水膠比 0.45 下化學摻料對碳化收縮的影響，整體而言都因碳化後有少許膨脹的情形，但添加化學摻料對於碳化收縮影響並無明顯趨勢。

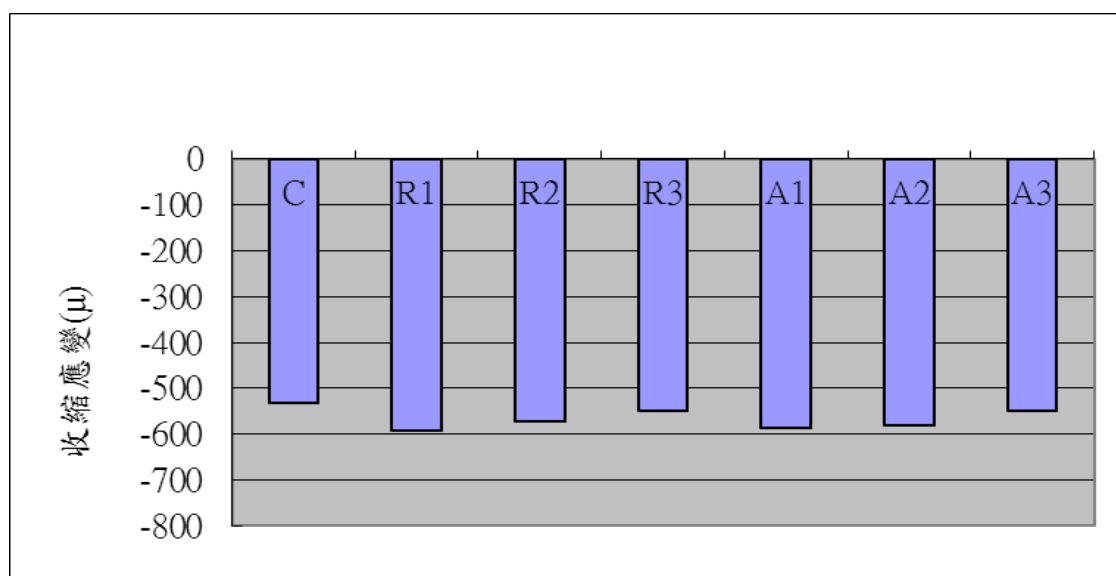


圖 4-34 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

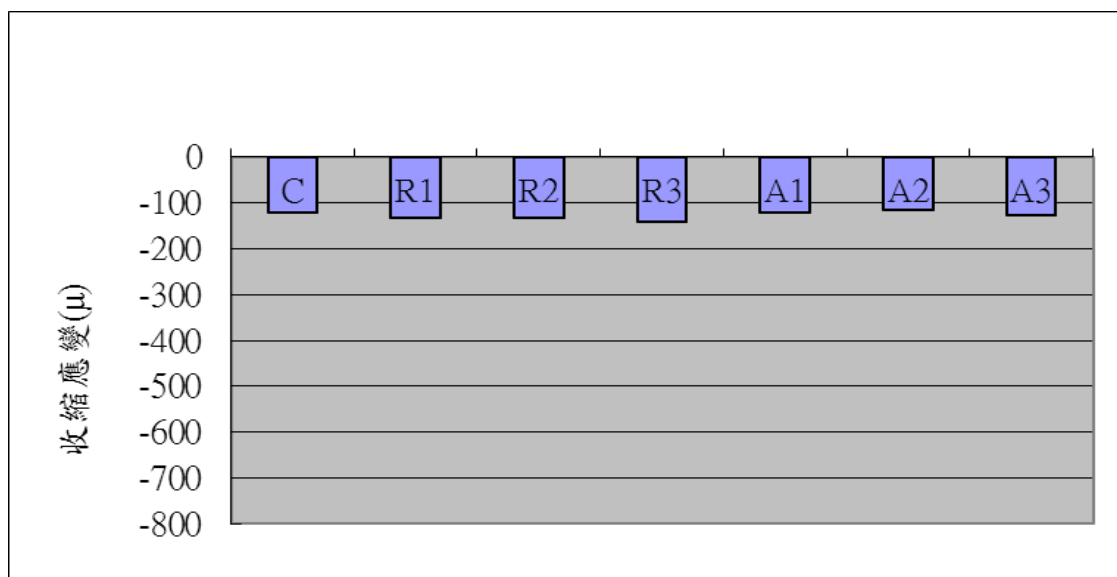


圖 4-35 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

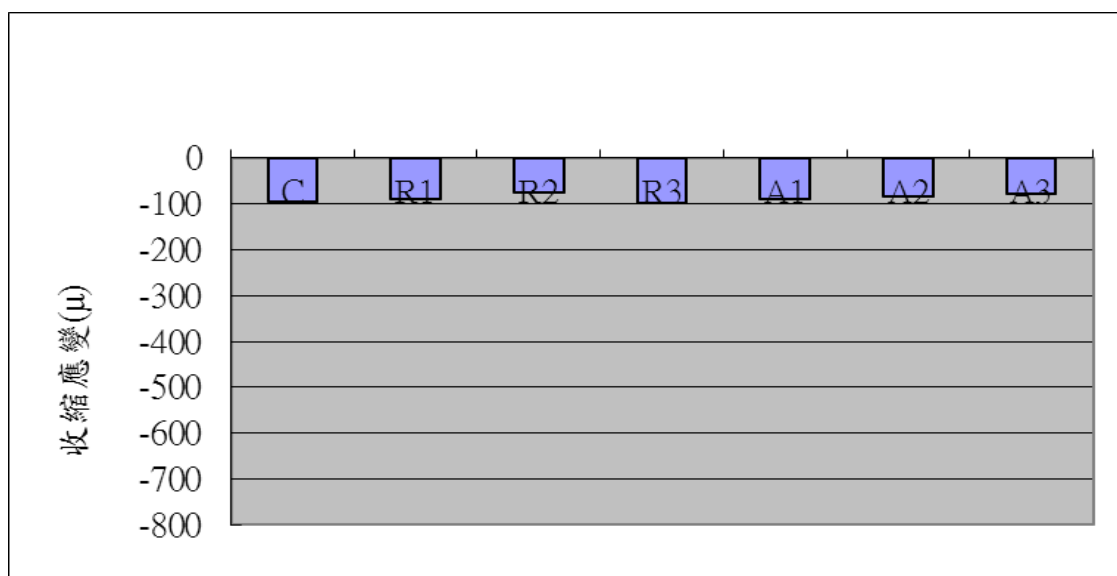


圖 4-36 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之高爐石粉以 15%、30% 及 45% 百分比取代水泥所拌製之水泥砂漿試體化學摻料添加對碳化收縮應變影響並無明顯趨勢。

## 貳、飛灰部分

圖 4-37 至圖 4-39 為水膠比 0.65 下化學摻料對碳化收縮的影響，整體而言都因碳化後有少許膨脹的情形，但添加化學摻料對於碳化收縮影響並無明顯趨勢。

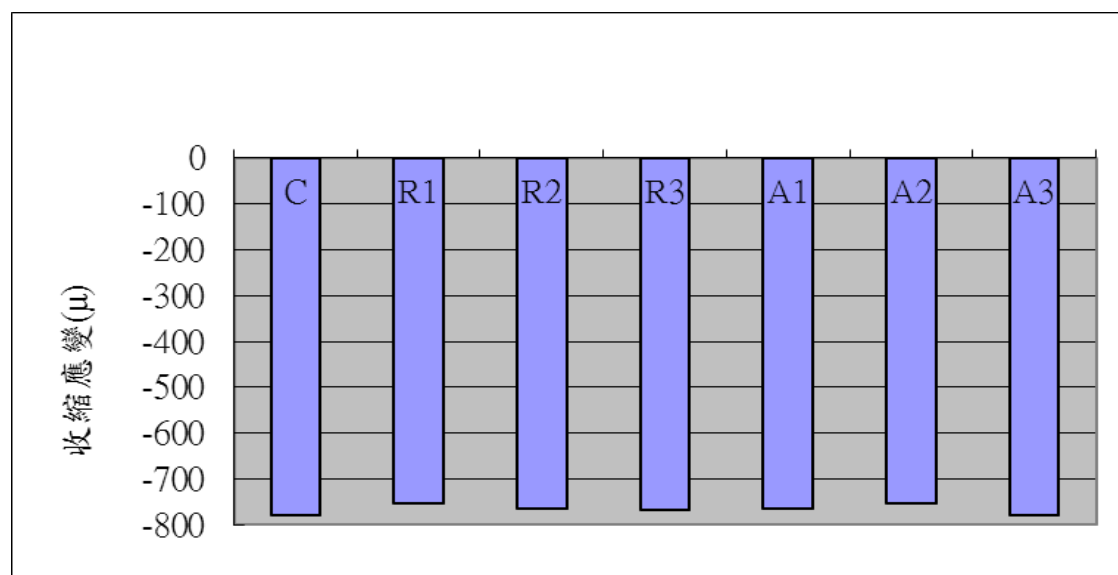


圖 4-37 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

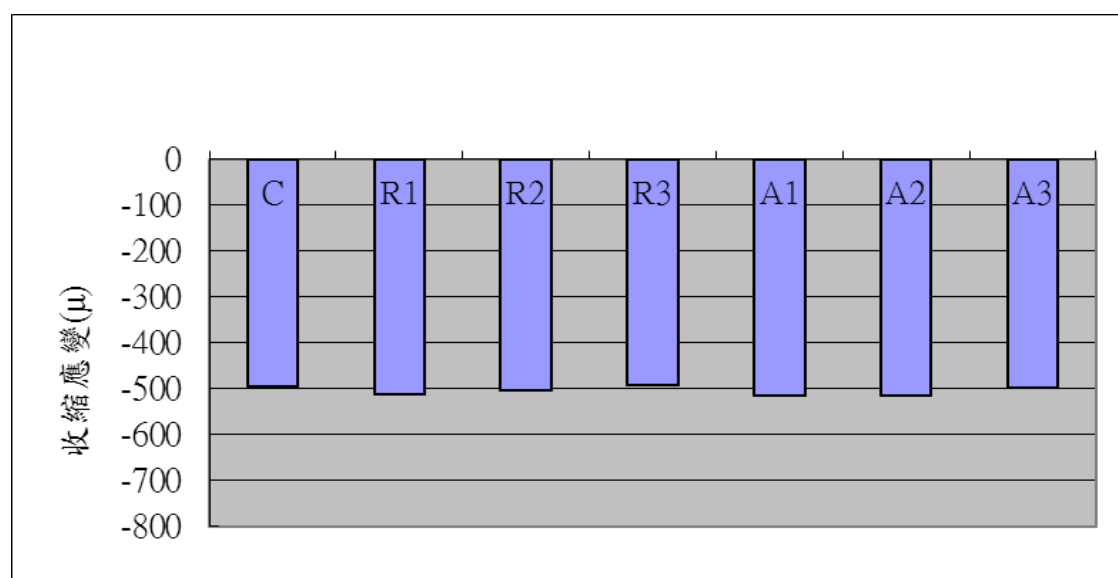


圖 4-38 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

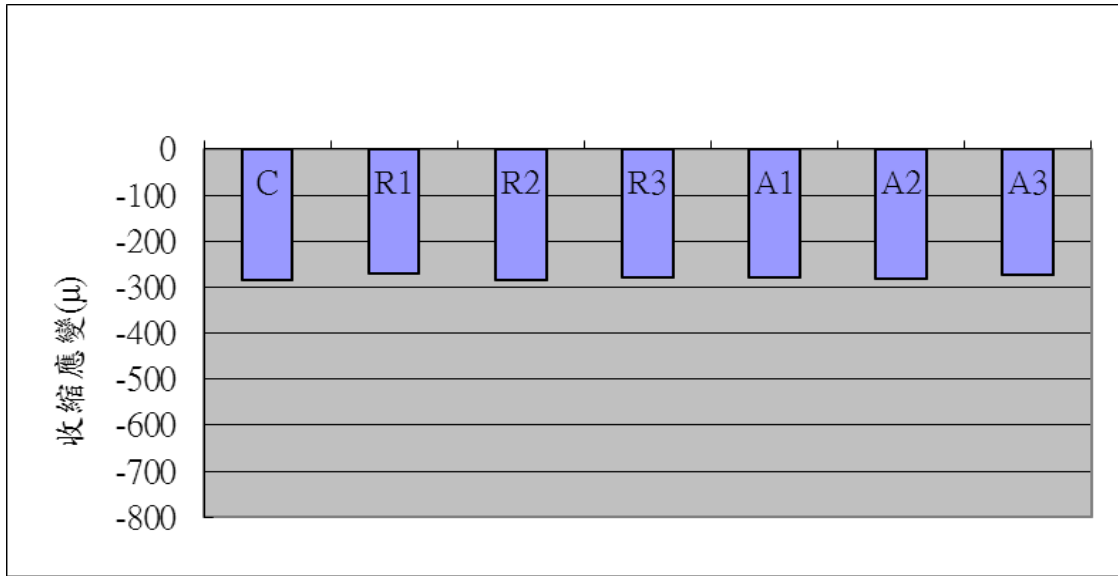


圖 4-39 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

圖 4-40 至圖 4-42 為水膠比 0.45 下化學摻料對碳化收縮的影響，整體而言都因碳化後有少許膨脹的情形，但添加化學摻料對於碳化收縮影響並無明顯趨勢。

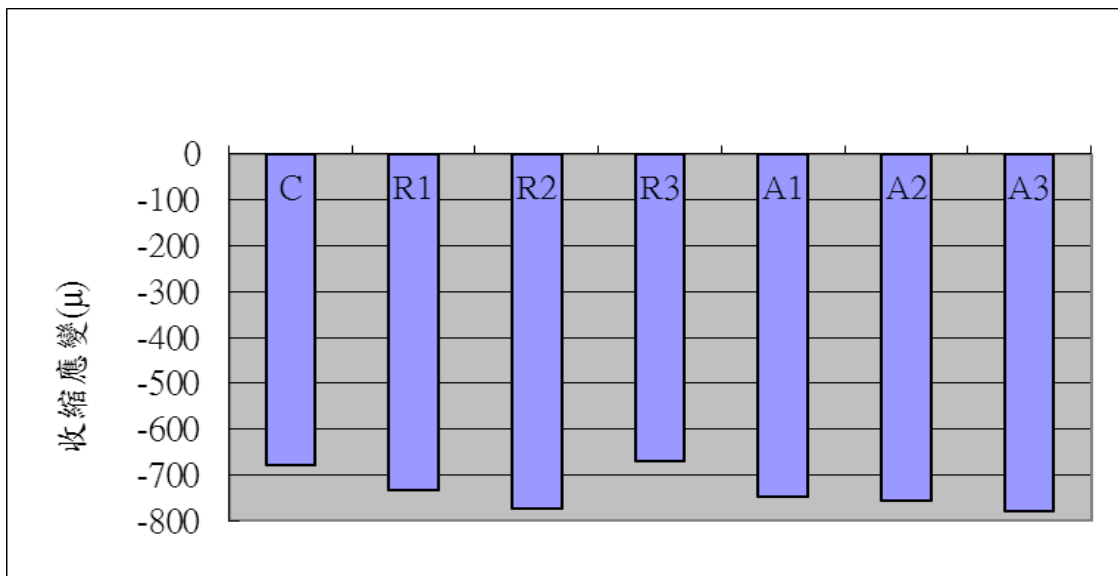


圖 4-40 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

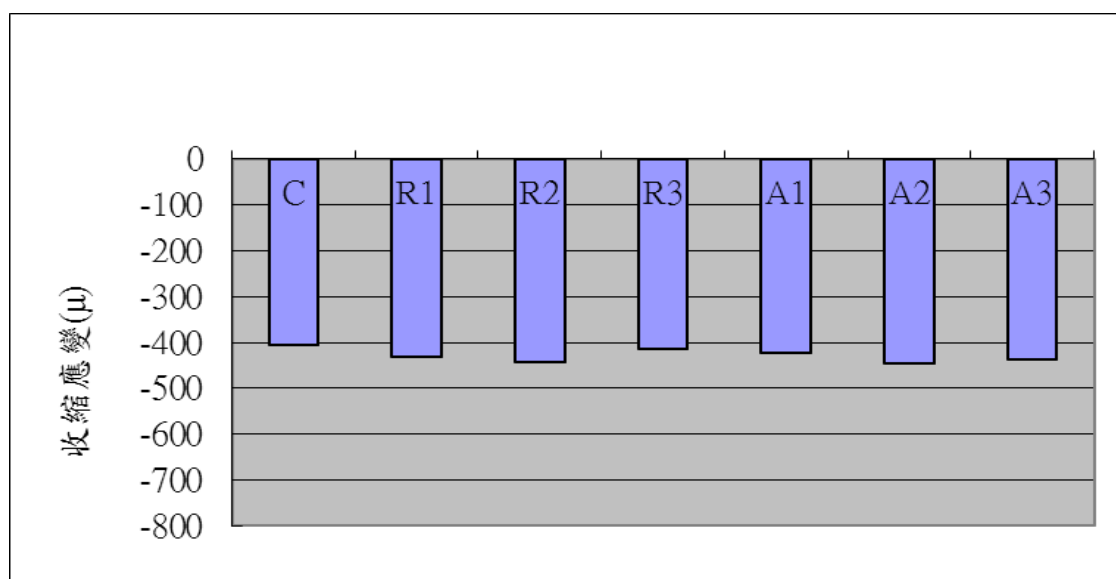


圖 4-41 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

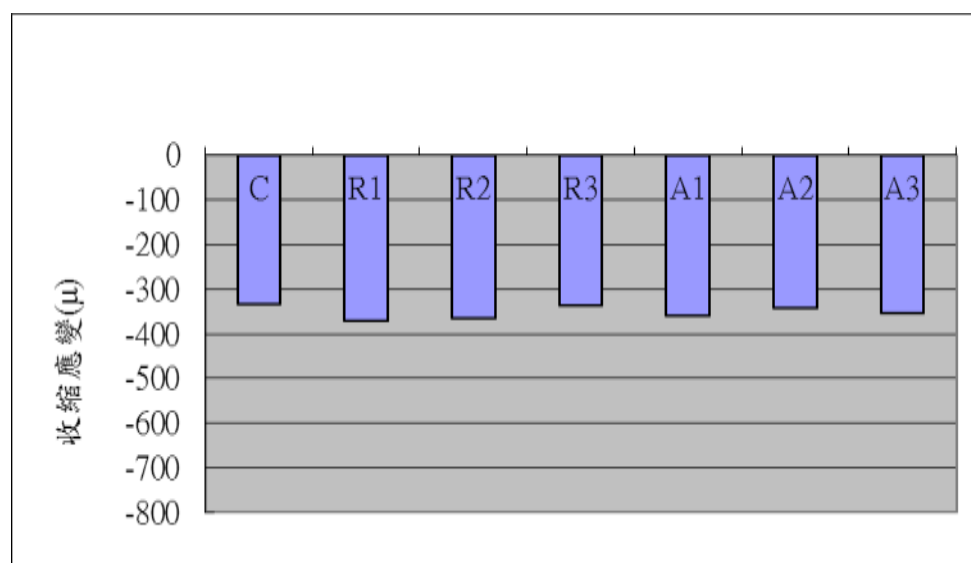


圖 4-42 化學摻料對碳化收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之飛灰以 10%、20% 及 25% 百分比取代水泥所拌製之水泥砂漿試體化學摻料添加對碳化收縮應變影響並無明顯趨勢。

### 第五節 化學摻料對自體收縮的影響

圖 4-43 至圖 4-44 為化學摻料對於純水泥無礦物摻料取代所拌製水泥砂漿試體之自體收縮的影響，以水膠比 0.45 與 0.65 純水泥無添加化學摻料之水泥砂漿做為控制組，對照添加 SRA 與膨脹劑之水泥砂漿抗壓強度的影響。相較於對照組，水泥砂漿之收縮應變會隨著 SRA 添加量越高而降低；隨著膨脹劑添加量越高而增加。整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 水泥砂漿試體化學摻料添加對強度影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體自體收縮應變皆大於水膠比 0.65。

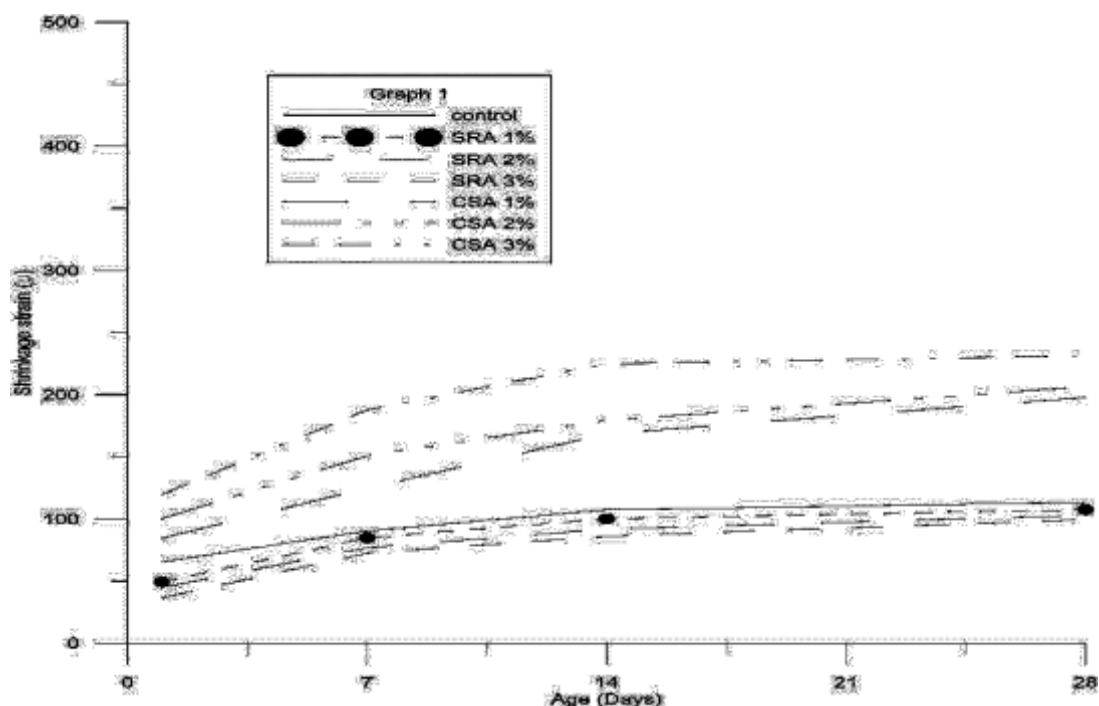


圖 4-43 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65)

(資料來源：本研究)

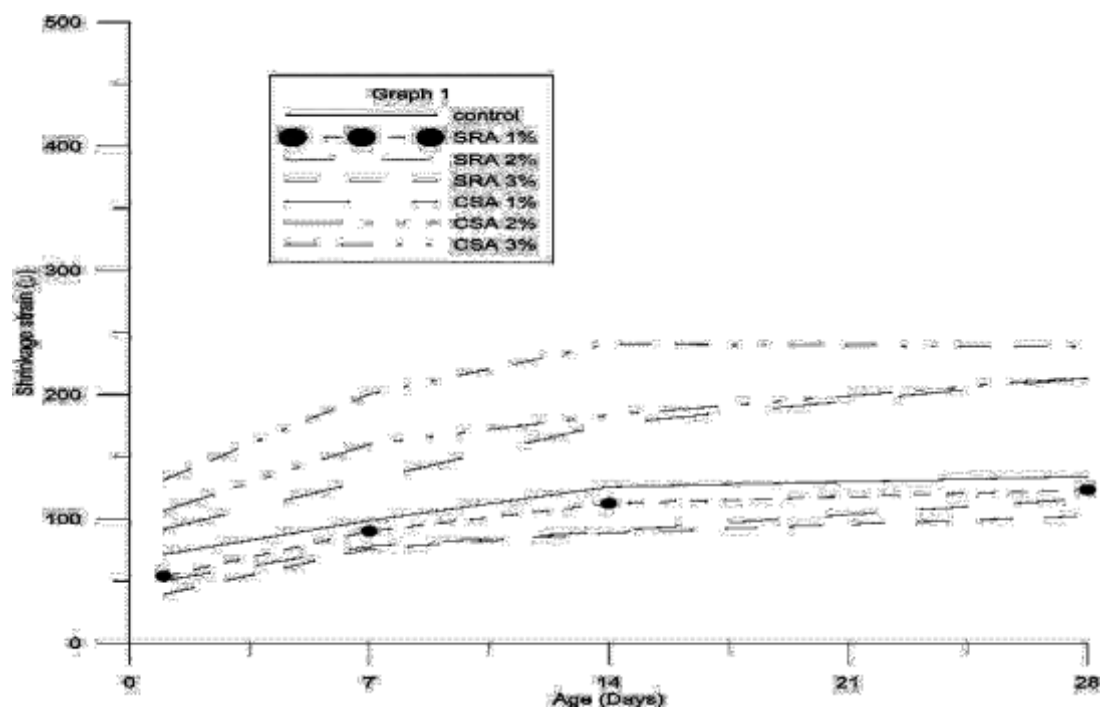


圖 4-44 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45)

(資料來源：本研究)

## 壹、高爐石部分

圖 4-45 至圖 4-47 為水膠比 0.65 下化學摻料對收縮的影響。隨著膨脹劑添加量增加其自體收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。隨著高爐石取代百分率上升，膨脹劑與 SRA 對於收縮應變差異性愈明顯。



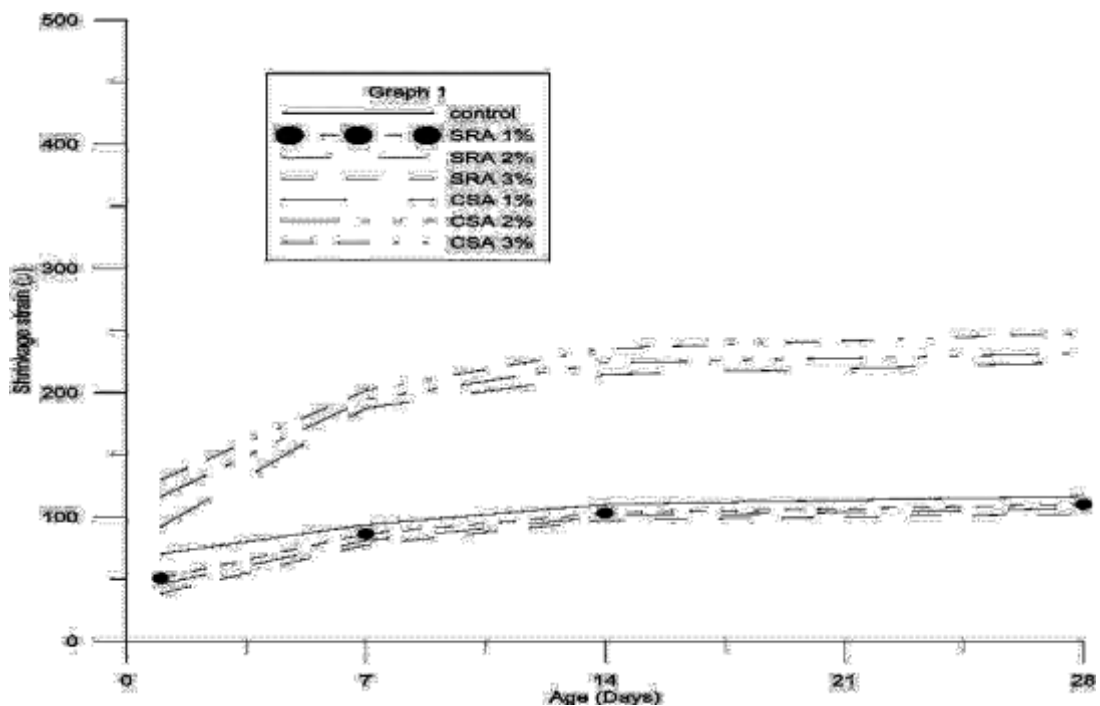


圖 4-45 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

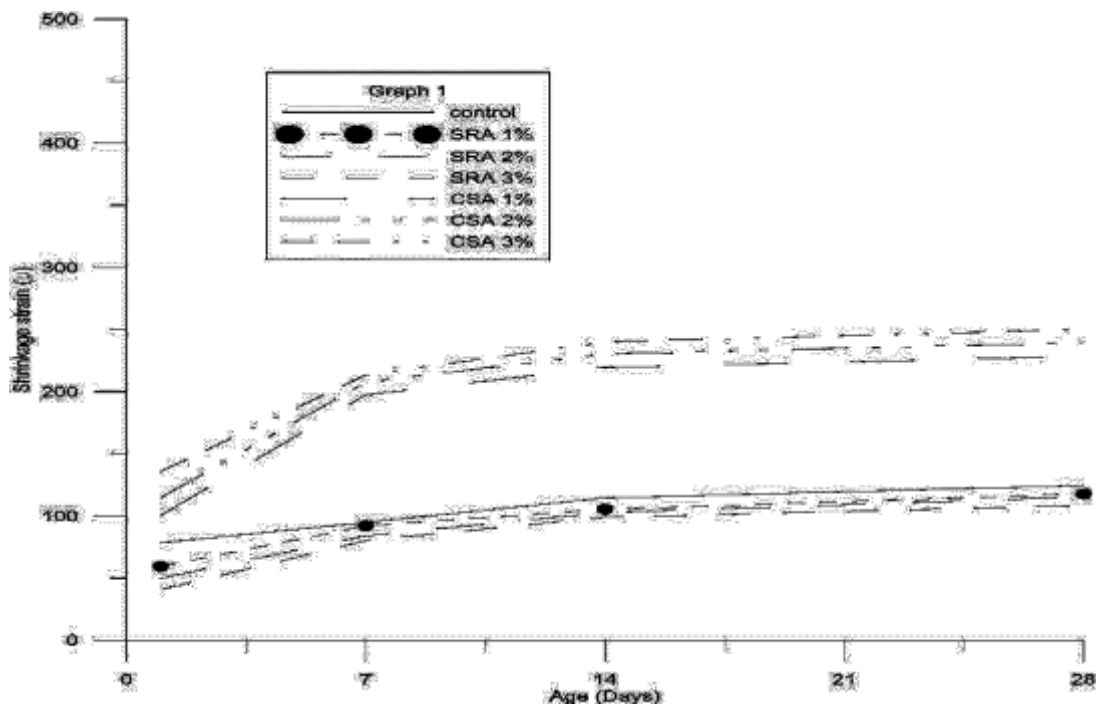


圖 4-46 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

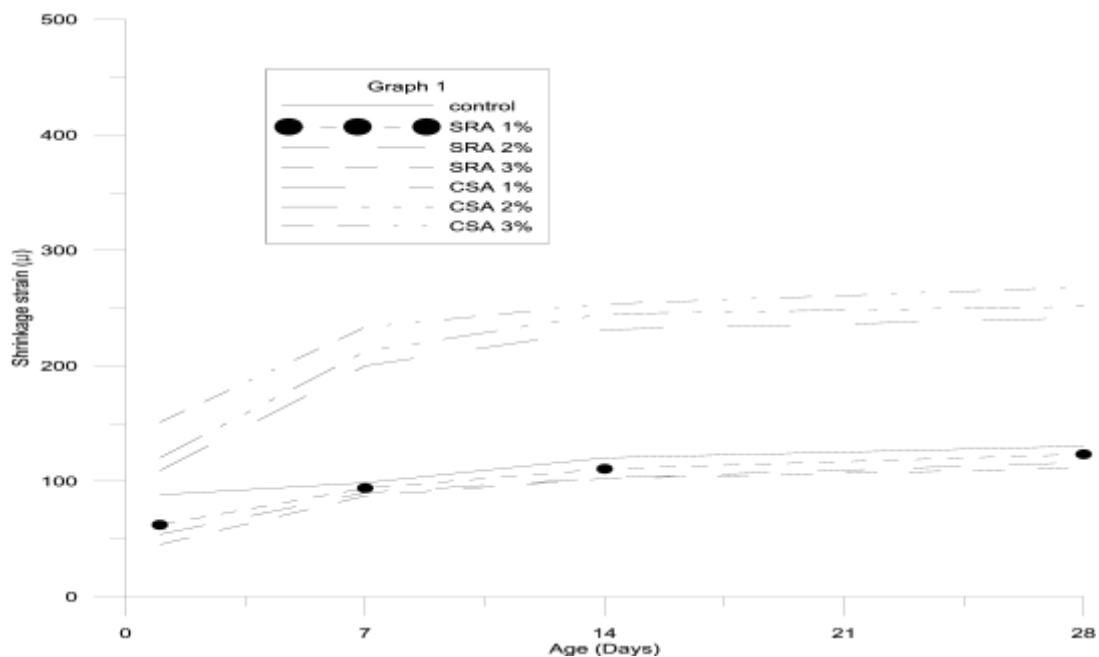


圖 4-47 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

圖 4-48 至圖 4-50 為水膠比 0.45 下化學摻料對自體收縮的影響。隨著膨脹劑添加量增加其自體收縮應變增加。

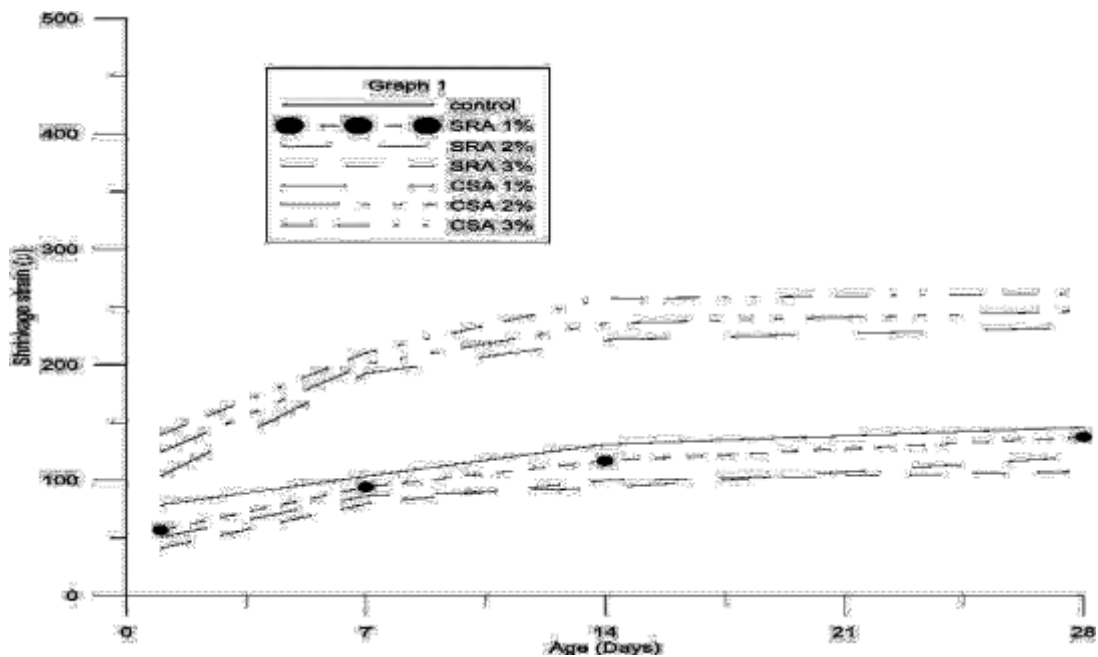


圖 4-48 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 15%)

(資料來源：本研究)

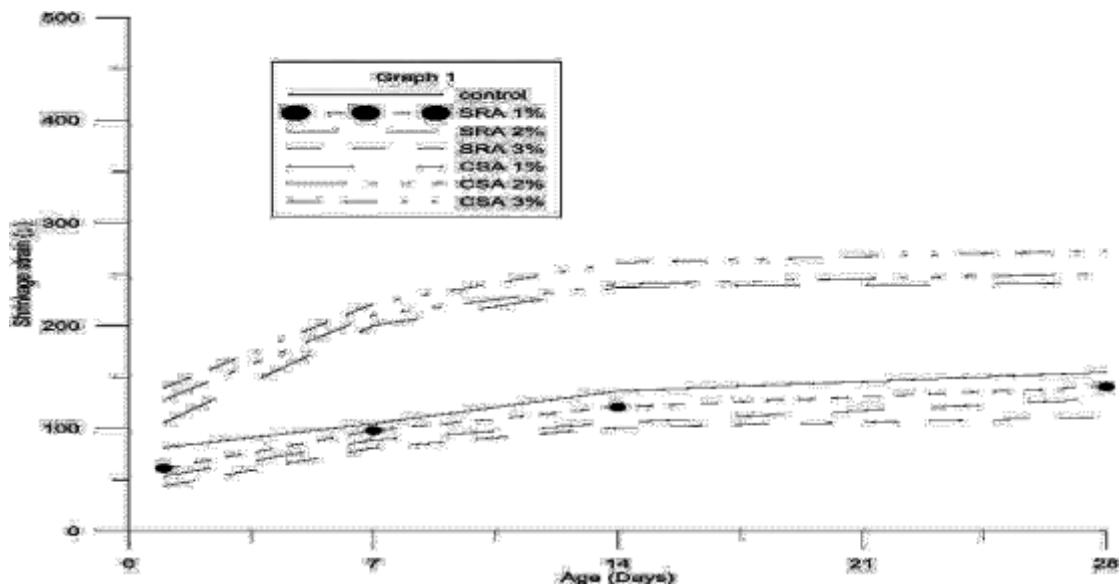


圖 4-49 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 30%)

(資料來源：本研究)

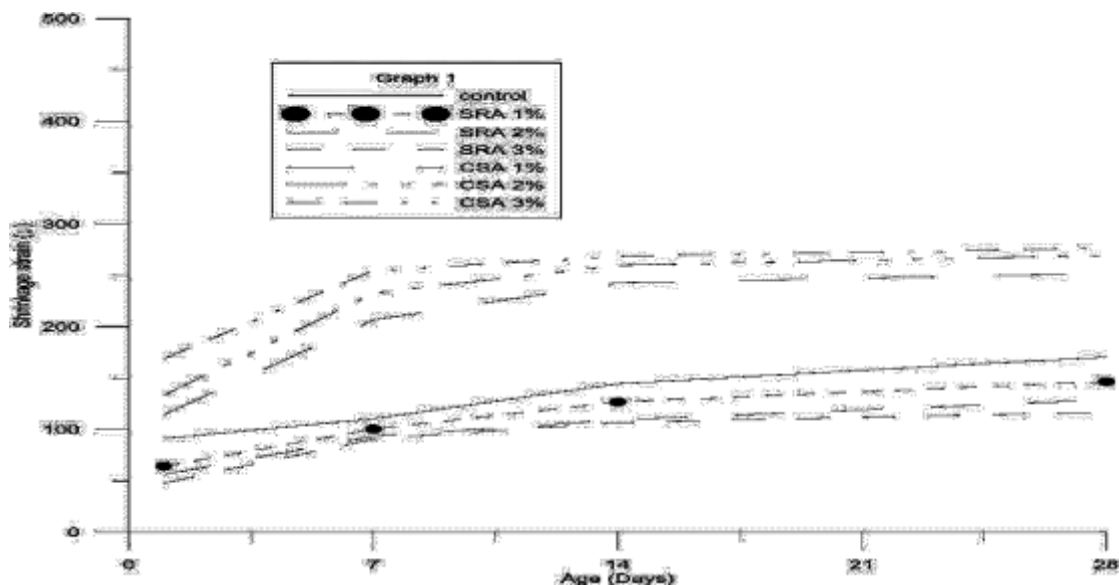


圖 4-50 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 爐石取代率 45%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之高爐石以 15%、30% 及 45% 百分比取代水泥所拌制之水泥砂漿試體化學摻料添加對收縮應變影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 自體收縮應變皆大於水膠比 0.65。

## 貳、飛灰部分

由圖 4-51 至圖 4-53 為水膠比 0.65 下化學摻料對自體收縮的影響，隨著膨脹劑添加量增加其自體收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。隨著飛灰取代百分率上升，膨脹劑與 SRA 對於收縮應變差異性愈明顯。

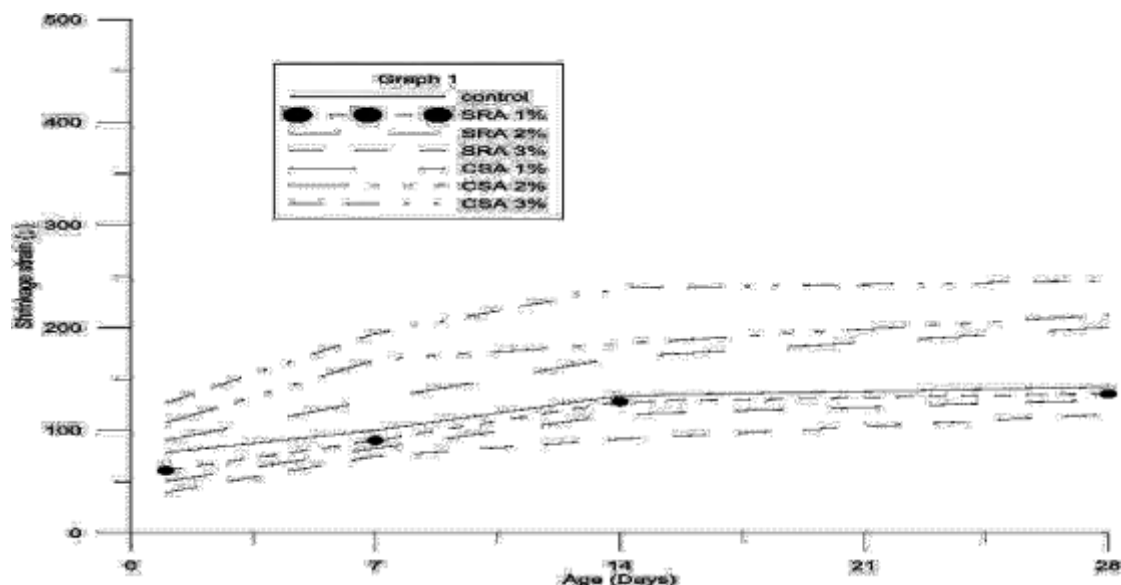


圖 4-51 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

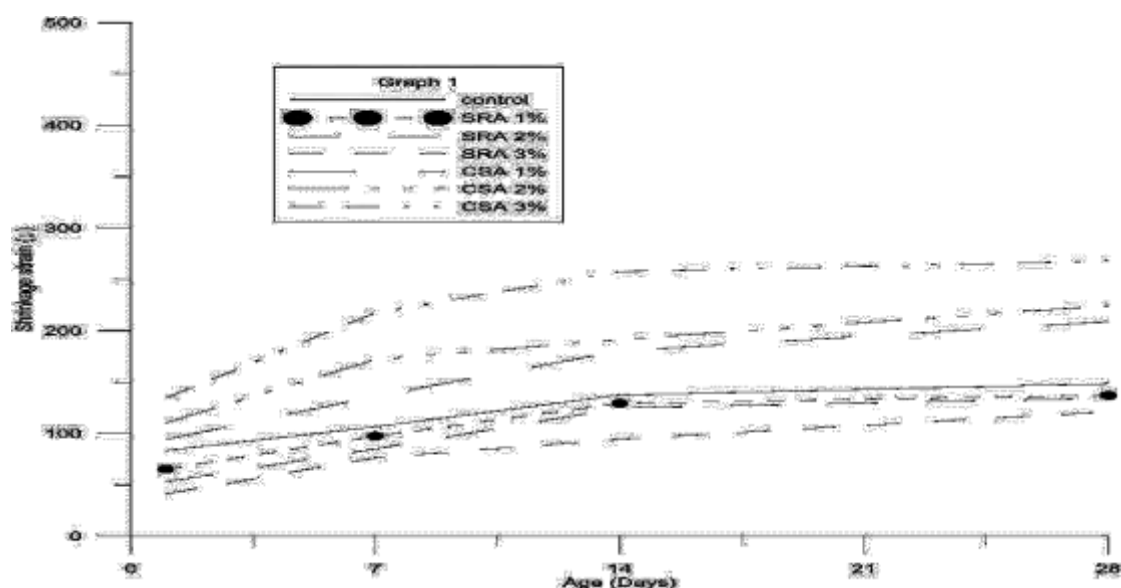


圖 4-52 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

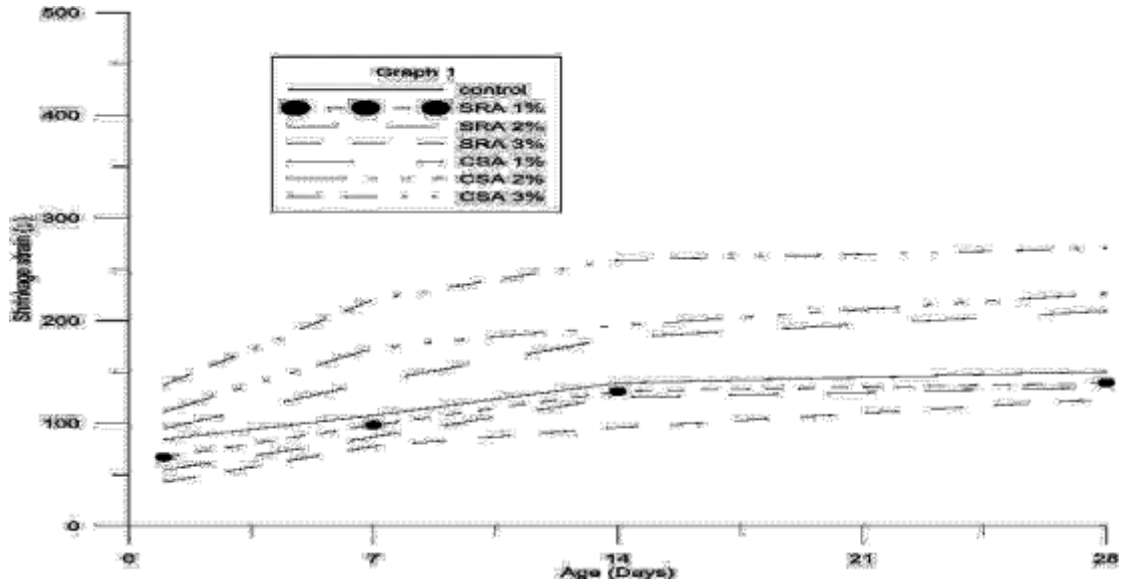


圖 4-53 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.65 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

由圖 4-54 至圖 4-56 為水膠比 0.45 下化學摻料對自體收縮的影響，隨著膨脹劑添加量增加其自體收縮應變增加；隨添加 SRA 添加量增加其收縮應變減少。

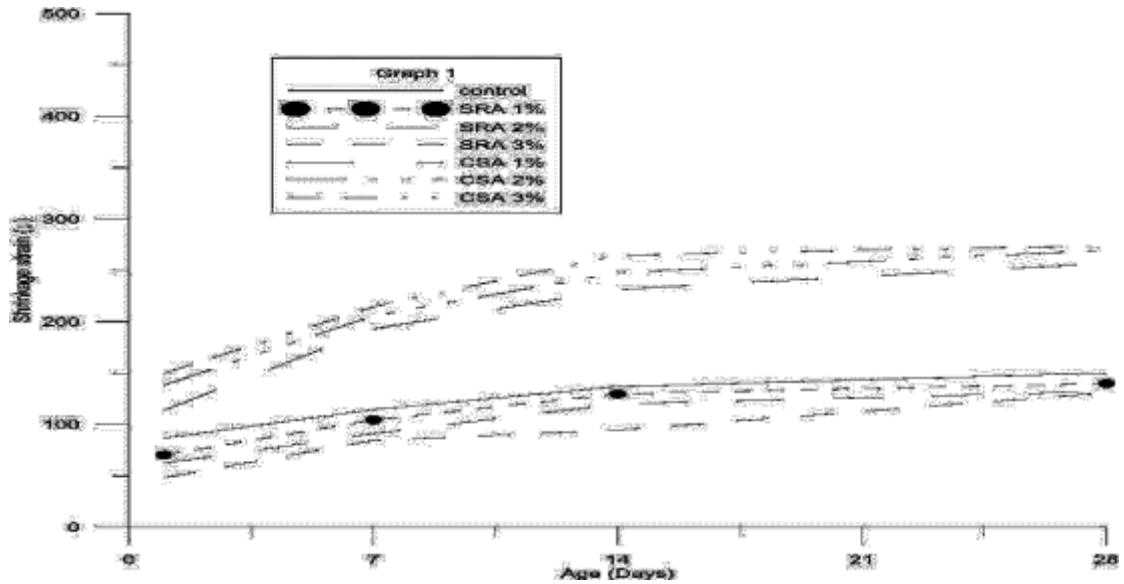


圖 4-54 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 10%)

(資料來源：本研究)

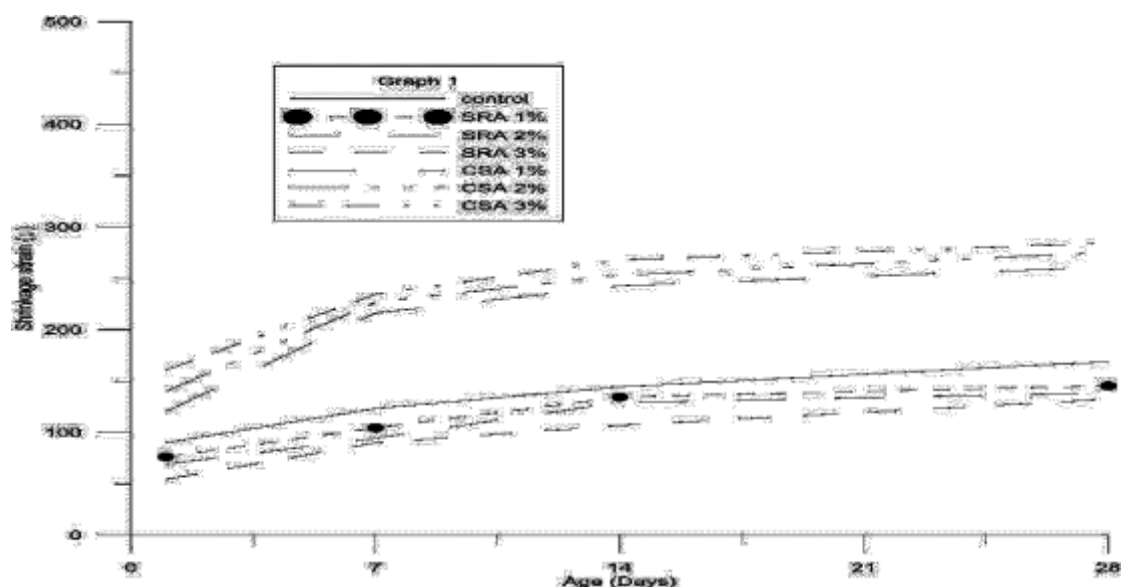


圖 4-55 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 20%)

(資料來源：本研究)

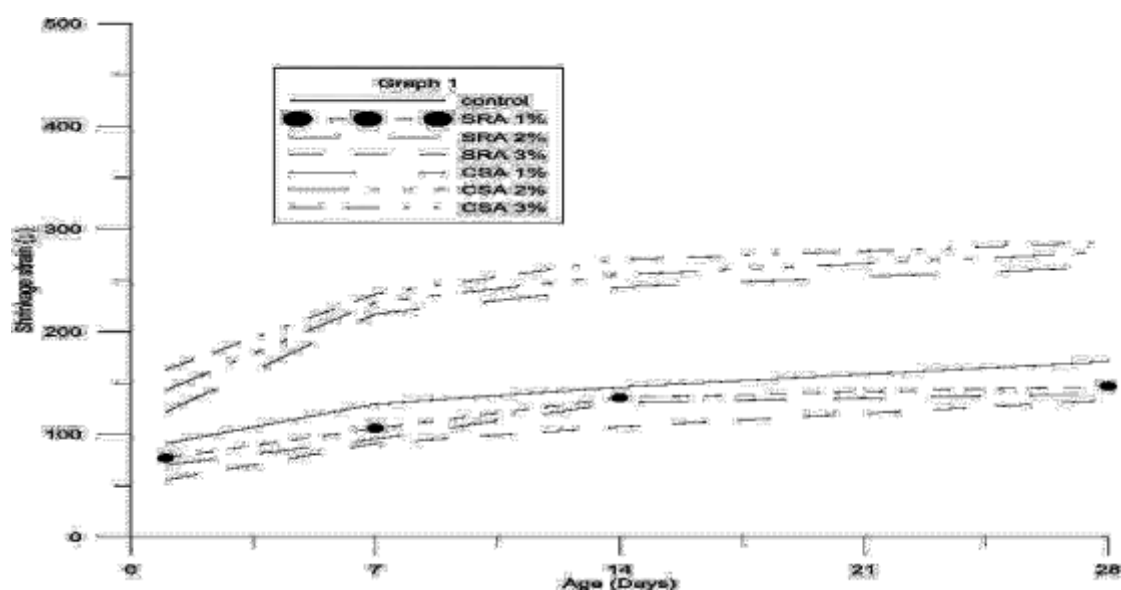


圖 4-56 化學摻料對自體收縮的影響(水膠比 0.45 飛灰取代率 25%)

(資料來源：本研究)

整體而言，水膠比 0.45 與 0.65 之飛灰以 10%、20% 及 25% 百分比取代水泥所拌制之水泥砂漿試體化學摻料添加對自體收縮應變影響的趨勢是相同的，惟水膠比 0.45 整體自體收縮應變皆大於水膠比 0.65。

## 第六節 砂率對塑性收縮的影響

圖 4-57~4-60 及表 4-1 為在水灰比 0.5 下不同砂率對塑性收縮的影響，顯示隨著砂率由 1/1 增至 1.75/1 時總裂縫面積、裂縫數量及大小有明顯的減少，當砂率由 1/1 增至 1.5/1 時，裂縫數量由 26 條降到僅剩 4 條，裂縫大小也都小於 0.5mm，且當砂率到達 1.75/1 時，已完全無裂縫產生。在相同試驗環境(溫度  $30\pm 2$  °C，風速 11.4 m/s)下，失水速率隨著含砂量增加而減少。圖 4-61 為砂率對失水速率的影響，由圖中可以明顯看出失水速率隨著砂率的增加，初時時失水速率下降較快，然後逐漸趨於緩和，失水總量也隨時間增加而減少。一般而言，含砂量愈高會吸收較多的水份，因此砂率增加會減少逸出試體表面的多的水分，加上砂率增加會減少水泥使用量，使得試體乾縮情況降低，因此在塑性收縮時砂率增加可減少裂縫的產生。

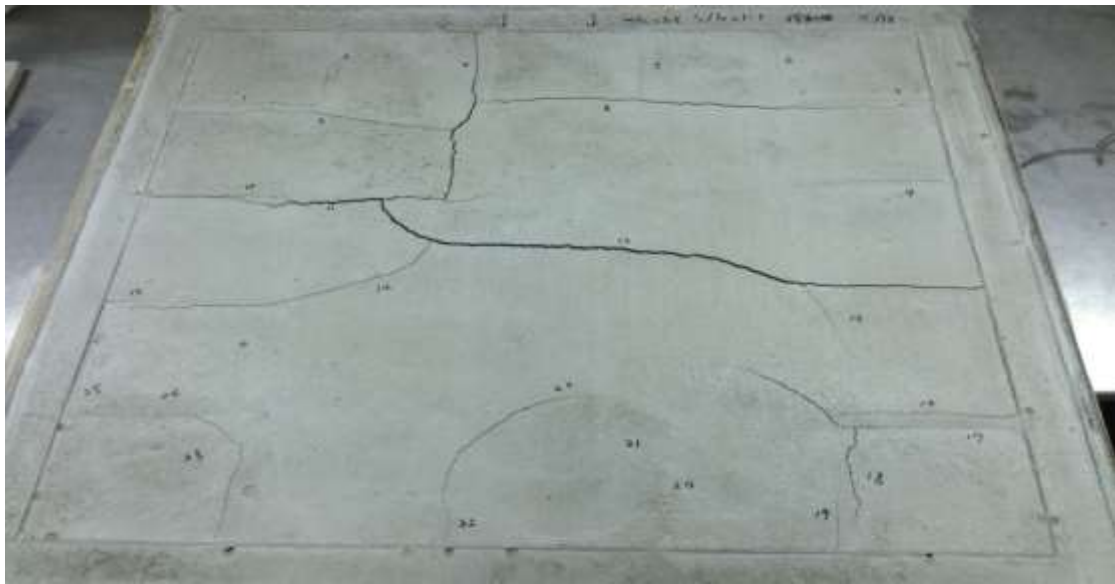


圖 4-57 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1/1)

(資料來源：本研究)



**圖 4-58** 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1.25/1)

(資料來源：本研究)



**圖 4-59** 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1.5/1)

(資料來源：本研究)





**圖 4-60** 砂率對塑性收縮的影響(S/D 1.75/1)

(資料來源：本研究)

**表 4-1** 不同砂率塑性收縮產生之裂縫分析表

砂率(S/D)		1/1	1.25/1	1.5/1	1.75/1
初始重量(g)		28934	29482	29875	30539
總裂縫面積(mm <sup>2</sup> )		2280	472	71	0
裂縫總數量		26	4	4	0
裂縫大小分布情形	>1.5 mm	1	0	0	0
	1.0~1.5 mm	2	0	0	0
	1.0~0.5 mm	4	1	0	0
	<0.5 mm	19	3	4	0

(資料來源：本研究)

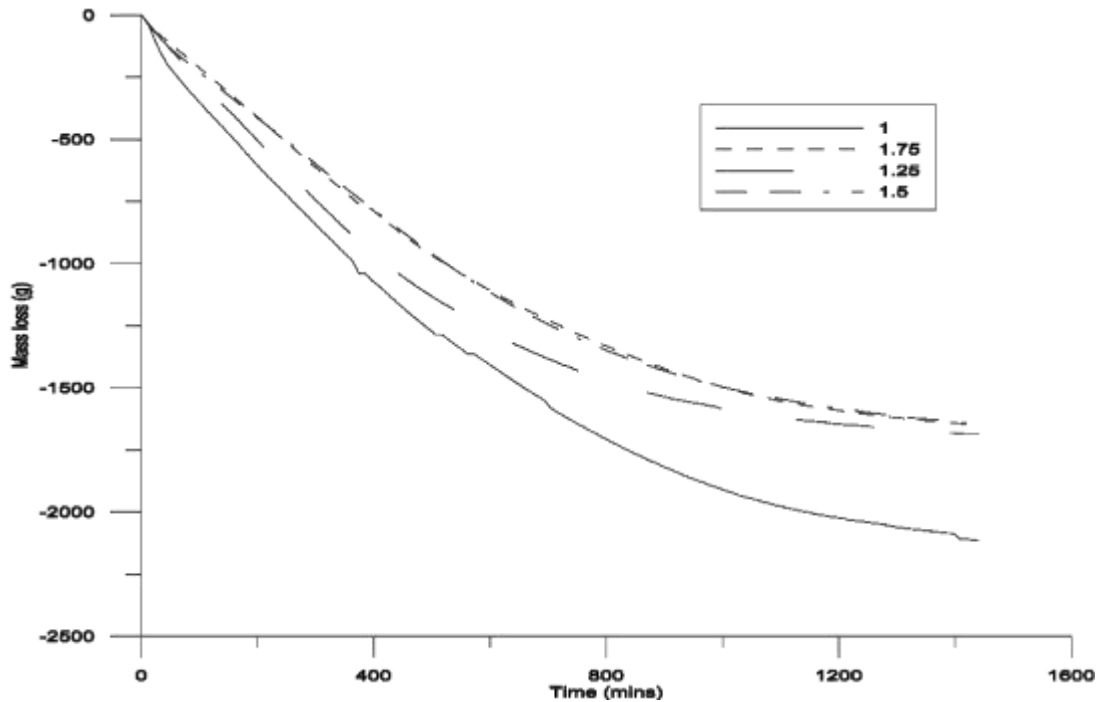


圖 4-61 砂率對失水速率的影響

(資料來源：本研究)

### 第七節 化學摻料對開裂時間與應變之影響

圖 4-62 及表 4-2 為試體在水灰比 0.65 下，不同化學摻料下應變與開裂時間之關係，由環型試驗結果顯示添加膨脹劑會使得開裂時間提前，而添加收縮抑制劑能有效延緩其開裂時間；此結果表示收縮抑制劑能有效的改善漿體的性質，進而減少最大應變及延緩開裂時間。當添加膨脹劑時，飛灰取代水泥 25% 的開裂時間為 4.82 天，相較於爐石取代水泥 45% 的開裂時間 8.55 天，縮短將近 1 倍的時間；但在添加收縮抑制劑時，飛灰取代水泥 25% 的開裂時間大於 14 天，反而比爐石取代水泥 45% 的開裂時間 10.76 天長，此外不論添加相同比例的膨脹劑或收縮抑制劑下，飛灰取代水泥 25% 開裂時的最大應變相較於爐石取代水泥 45% 的最大應變小。

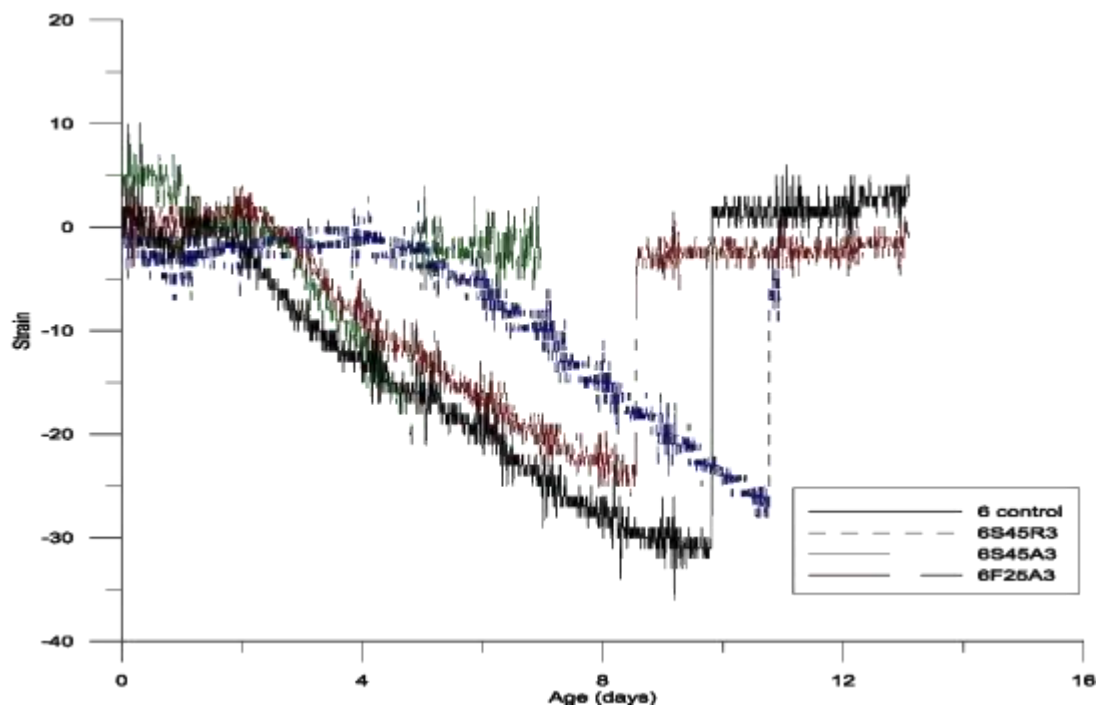


圖 4-62 不同化學摻料下應變與開裂時間關係圖

(資料來源：本研究)

表 4-2 不同化學摻料之開裂時間與最大應變

組別	開裂時間(Days)	最大應變( $\mu$ -strain)
6	9.81	-31
6S45A3	8.55	-21
6S45R3	10.76	-27
6F25A3	4.82	-11

(資料來源：本研究)

### 第八節 依據材料試驗結果建議裂縫防制對策

本研究材料試驗彙整結果如表 5-3，顯示添加收縮抑制劑能有效改善混凝土的收縮行為並延緩其開裂時間，但對強度會有略微影響；添加硫鋁酸鹽膨脹劑無法改善其收縮行為且會使開裂時間明顯提前，另外增加砂率能有效抑制塑性收縮的產生，根據上述成果可以得知若想要抑制裂縫發生可以在強度允許範圍內添加適量的收縮抑制劑則可減少收縮應變，另外使砂率在砂比水泥在 1.75 比 1 以上能有效抑制塑性收縮所導致的裂縫產生。

**表 4-3 本研究材料試驗彙整結果**

	28 天 強度	收縮 應變	碳化收 縮應變	自體收 縮應變	塑性收縮(裂 縫總面積)	環形試驗 (開裂時間)
水膠比增加	減少	增加	無明顯 影響	減少	--	--
高爐石取代率增加	增加	增加		增加	--	--
飛灰取代率增加	減少	增加		增加	--	--
收縮抑制劑添加率增加	減少	減少		減少	--	延緩
膨脹劑添加率增加	增加	增加		增加	--	減少
砂率	--	--	--	--	減少	--

(資料來源：本研究)

## 第五章 混凝土收縮開裂防制技術

### 第一節 混凝土結構劣化與開裂原因

混凝土是一種人造石材，本質上應具有類似天然石材的耐久性，但過去許多工程案例顯示混凝土組合材料中有害成分的物理與化學作用或環境中有害介質侵入作用時，混凝土會發生劣化。巨觀的現象包括開裂、剝落、膨脹、鬆軟及強度下降等，不僅嚴重影響混凝土結構物的使用性，甚且會發生結構性破壞，造成人員傷亡與經濟損失。混凝土初期的劣化開裂與破壞，會影響其耐久性，除造成資源與能源的浪費外，對於生態環境也會造成負面的影響。

造成混凝土結構劣化的原因很多，彙整文獻資料主要劣化的原因可概分為 8 項：開裂、漏水、強度損失、變形過大、中性化、凍融效應、表面劣化與鋼材腐蝕。除中性化與鋼材腐蝕有關外，混凝土的開裂與其他 7 項結構劣化因子有密切的關聯性；結構混凝土開裂是造成結構物的承載力、耐久性、防水性能下降的主要原因之一；是否採行適當的防制對策會直接影響到結構物的耐久性與可否達到設計使用的年限；混凝土開裂可以視為混凝土結構劣化病變的微觀與巨觀的徵兆；結構混凝土的裂縫會持續引起其他病害的發生與發展。因此，必須了解混凝土開裂的機理與原因及混凝土結構開裂與安全性、耐久性的關係，方足以採取適當措施抑制混凝土裂縫的發生與發展。

混凝土開裂的原因甚多，彙整過去研究的結果有超過 40 個以上的原因，這些原因對裂縫發生的綜合影響非常複雜，如不正確的結構設計無法保證結構物有足夠的強度、使用不適當的混凝土組成材料與配比設計、未針對暴露環境採用正確的施工與養護方法及不當的使用與維護混凝土結構等。當結構發生開裂，首先應要查明原因，診斷其危險性，採取適宜的修補材料與工法，方能獲致實效。日本研究者[40]依據混凝土結構構件位置、暴露環境、混凝土結構主要開裂型式、原因、發生時期與嚴重程度，彙整如表 5.1 所示。

**表 5-1 混凝土收縮開裂原因彙整表**

構件名稱及 所處部位	裂縫型態	開裂原因	發生期間	影響程度		
				小	中	大
柱(室內)	沿主筋開裂	鋼筋鏽蝕(氯化物含量 過多, 中性化)	長期		○	○
		鹼粒料反應(反應性粒 料, R <sub>2</sub> O 過多)	長期		○	○
	沿箍筋開裂	保護層不足(施工不良)	長期	○	○	
		鋼筋鏽蝕(Cl <sup>-</sup> 過多, 中 性化)	長期		○	○
	橫斷面的澆 築縫	施工操作不良, 長柱中 間澆鑄縫	初期	○		
網狀裂縫	乾燥收縮(養生不足, 早 期脫模)  鹼粒料反應  火害(危害程度根據火 災溫度及延續時間而 定)	初期、中 期	○	○		
		長期		○		
	斜向交叉裂 縫	地震力作用	地震時			○
梁(室內)	沿上部主筋 開裂	混凝土下沉(配合比和 施工不良)	初期	○	○	
		鋼筋鏽蝕(Cl <sup>-</sup> 過多, 中 性化)	長期		○	
		鹼粒料反應(反應性粒 料, R <sub>2</sub> O 過多)	長期		○	○
	沿著下部主 筋開裂	鋼筋鏽蝕(Cl <sup>-</sup> 過多, 中 性化)	長期		○	○
鹼粒料反應(反應性粒 料, R <sub>2</sub> O 過多)		長期		○		
沿著肋筋開 裂	保護層不足(施工不良) 鋼筋鏽蝕(Cl <sup>-</sup> 過多, 中 性化)	中期 長期	○	○		
網狀開裂	乾縮(養生不足, 早期 脫模)  鹼粒料反應(反應性粒 料, R <sub>2</sub> O 過多)	初期、中 期	○	○		
		長期		○		

續表 5-1 混凝土收縮開裂原因彙整表

構件名稱及 所處部位	裂縫型態	原因	發生時期	不適宜程度		
				小	中	大
梁(室內)	網狀開裂	火災(危害程度視溫度 及延續時間而定)	火災時	○	○	○
	沿跨度方向 澆築縫	施工操作不良	初期	○		
	沿跨度中央 彎曲裂縫	模板支撐拆除太早 長大樑(8-9m 跨以上) 設計問題	初期		○	○
			長期		○	○
斜向開裂	超載 不同沉降(柱基、基礎 施工不當) 地震作用	長期		○	○	
		長期			○	
		地震時			○	
內牆	沿縱筋、橫筋 開裂	混凝土下沉(橫筋：配 比及施工不良) 保護層不足(施工不 良) 鋼筋鏽蝕(Cl <sup>-</sup> 過多，中 性化)	初期	○		
			中期	○		
			長期		○	○
	網狀開裂	乾縮(養生不足，早期 脫模) 鹼粒料反應(反應性粒 料，R <sub>2</sub> O 過多) 火災(危害程度視溫度 及延續時間而定)	中期	○	○	
			長期	○	○	
			火災時	○	○	○
澆築縫	施工分段不良(高度太 大、太薄的牆)	初期	○			
斜向開裂	不同沉降(桩、基礎施 工不良) 震害	長期			○	
		地震時		○	○	
開口部角頭 開裂	乾縮(養生不足，早期 脫模)	長期	○	○		

續表 5-1 混凝土收縮開裂原因彙整表

構件名稱及所處部位	裂縫型態	原因	發生時期	不適宜程度		
				小	中	大
外牆(除了與內牆發生類似的裂縫以外)	網狀開裂	鹼粒料反應(反應性粒料, R <sub>2</sub> O 過多)	長期		○	○
	漏水	裂縫, 施工縫上的雨水向室內滲透	中期、長期			○
	鏽汁	由於鋼筋鏽蝕從裂縫處滲出修汁污染牆面	長期		○	
	AAR 汙染	AAR 發生開裂, 從縫中滲出白色凝膠	長期		○	○
室內樓板	沿上部主筋、受力筋開裂	混凝土沉降(配合比與施工不良)	初期	○	○	
	沿下部主筋、受力筋開裂	保護層不足(施工不良)	中期	○	○	
		鋼筋鏽蝕(Cl <sup>-</sup> 過多, 中性化)	長期		○	○
	沿著板與梁、固定上部開裂	樓板支撐撤去太早, 早期乾燥過快	初期		○	○
	沿者板下端腳像開裂	超載, 上部配筋下移, 鋼筋重疊	中期		○	○
	X 行開裂 網狀開裂	樓板太大, 混凝土強度不夠  乾縮(養生不足)  火災(危害程度視溫度及延續時間而定)	長期		○	○
初、中期			○	○		
火災時			○	○	○	
屋頂板(除了與室內樓板發生的裂縫以外)	網狀開裂	AAR(反應性粒料, R <sub>2</sub> O 過多)	長期			○
	漏水	從裂縫和施工縫向內部漏水	中期、長期			○
	AAR 汙染	黃土色的汁從裂縫滲出, 汙染室內頂棚	長期			○



續表 5-1 混凝土收縮開裂原因彙整表

構件名稱及所處部位	裂縫型態	原因	發生時期	不適宜程度		
				小	中	大
雨罩	沿著固定端上部的軀體開裂	上部配筋不足，配筋下移過早拆模	中期		○	○
	沿長度方向直角的開裂	早期收縮，配筋不足，拆模過早	中期		○	○
	沿著雨罩下部鋼筋開裂	鋼筋鏽蝕(保護層不夠，Cl <sup>-</sup> 過多，中性化)	中期		○	○
女兒牆	腳步水平方向開裂	屋頂上防水層混凝土夏季膨脹外伸	長期		○	
	斜向裂縫	溫度造成	長期		○	
	網狀裂縫	乾縮(養生不足)	初、中期		○	
	AAR 汙染	從裂縫中滲出黃土色凝膠汙染牆面雨罩等				

(資料來源：參考書目[40])

迄今對混凝土結構裂縫發生的防治與抑制，相關文獻顯示尚無獲致一種非常快速有效的方法，且目前由於高強度與高流動性混凝土的普遍使用，混凝土配比中膠結砂漿量較以往多，致使混凝土結構物的開裂情況仍呈現漸增的趨勢。

目前現場施工多採用泵送方式澆置混凝土；為利於泵送新拌混凝土，配比必須增加砂率與每立方混凝土的拌合水量，以提高混凝土的塑性與流動性，其結果導致混凝土裂縫增加；另外為提高混凝土強度與抑制粒料品質不良的影響，一般配比會提高水泥用量，亦可能導致混凝土裂縫增加；一般工程人員有時認為混凝土的開裂是一種不可避免的現象，因為混凝土開裂是其材料本身的特性之一；另外在一般的暴露條件下，普遍認知是「細微裂縫對混凝土結構性能不會造成損害而可被忽略的」，然而混凝土其他大尺度裂縫屬於嚴重的缺陷之一，可能會傷害混凝土結構的強度、性能與外觀，所以評估混凝土開裂的原因及提出適當的防制策略，一直是混凝土研究者重要的持續研究的課題。因為大部分裂縫不會明顯造

成結構破壞，通常工程師會將因混凝土本質的開裂視為一種徵兆(symptom)而非缺陷(fault)，然而本質的開裂亦可能會成長或發展造成結構性能加速劣化而使結構物喪失服務性，對於混凝土結構的耐久性有明顯的影響。

裂縫可依走向(如縱向、橫向、斜向、垂直及隨機等)、長度、寬度及深度加以分類；表面裂縫依其分布幾何型式可概分為兩類：(1)地圖形裂縫(map cracks)或格式裂縫(pattern cracks)，大致均勻分布於表面各方向(略成六邊形)的短裂縫，主要因為表層混凝土受到內層混凝土抑制作用的內應力所造成；(2)連續定距離平行裂縫，主要因垂直於裂縫走向的束制作用內應力所造成。許多的案例顯示隨著混凝土硬固產生且持續擴張的裂縫是主動的(active)裂縫，而如裂縫發生的因子不會重複發生，則為休眠的(dormant)裂縫如塑性裂縫與偶發超載產生的裂縫。裂縫依寬度可概分為3類：(1)細裂縫寬度,  $w < 1\text{mm}$ ；(2)中裂縫寬度,  $1\text{mm} \leq w \leq 2\text{mm}$ ；(3)寬裂縫寬度,  $w > 2\text{mm}$ 。裂縫寬度如小於0.3mm一般認為不會影響結構物美觀性；但可接受的裂縫寬度與混凝土構件暴露條件有關連，如暴露於惡劣環境(如工業區或海洋環境，混凝土的水密性需求高)的構件，裂縫寬度應小於0.1mm；一般戶外暴露或室內暴露環境潮濕，裂縫寬度應小於0.2mm；一般室內暴露，裂縫寬度應小於0.3mm。圖 5.1 為樹狀裂縫分類圖，依混凝土開裂時間發生於硬固前與硬固後分為兩大類；硬固前開裂的類別分為施工擾動開裂(如木模板膨脹或板模品質不良)、沉降收縮(析離沉降)開裂及凝結收縮(塑性收縮)開裂等；硬固後開裂概分為6類：物理開裂、化學開裂、熱學開裂、應力集中開裂、結構設計開裂與意外超載。硬固後開裂與乾縮及其他環境引發反映有密切關係如使用不良品質水泥造成混凝土膨脹、鹼質矽膨脹反應、硫酸鹽侵蝕反應、凍融反應、循環載重作用與鋼筋腐蝕膨脹反應等。圖 5.2 顯示為一般暴露環境下，混凝土結構可能發生的不同類型的裂縫，所有裂縫發生的原因均與環境引發水分移動有關，本質裂縫(intrinsic cracks)分類及說明列於表 5.2。

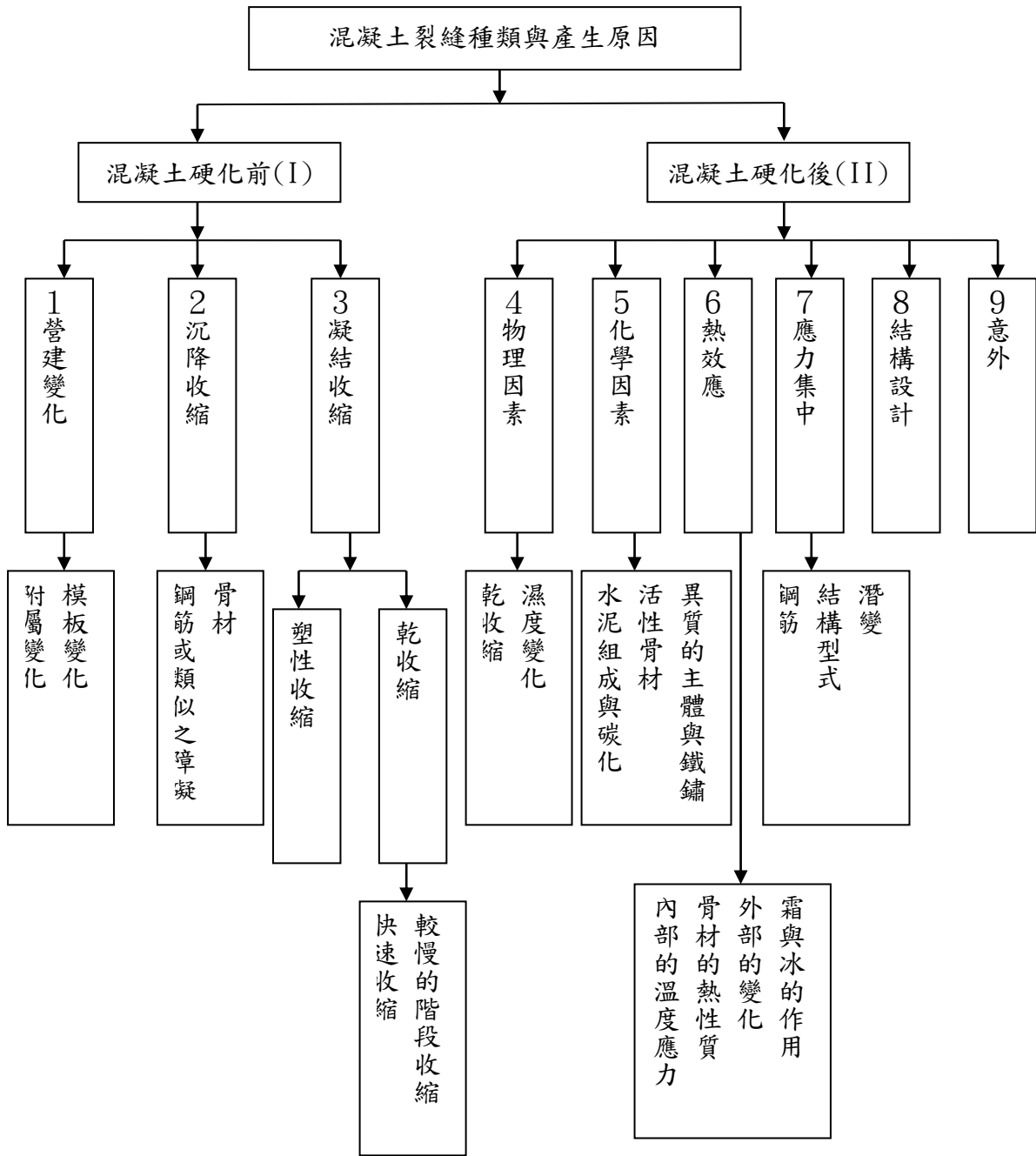


圖 5-1 樹狀裂縫分類圖

(資料來源：參考書目[41])

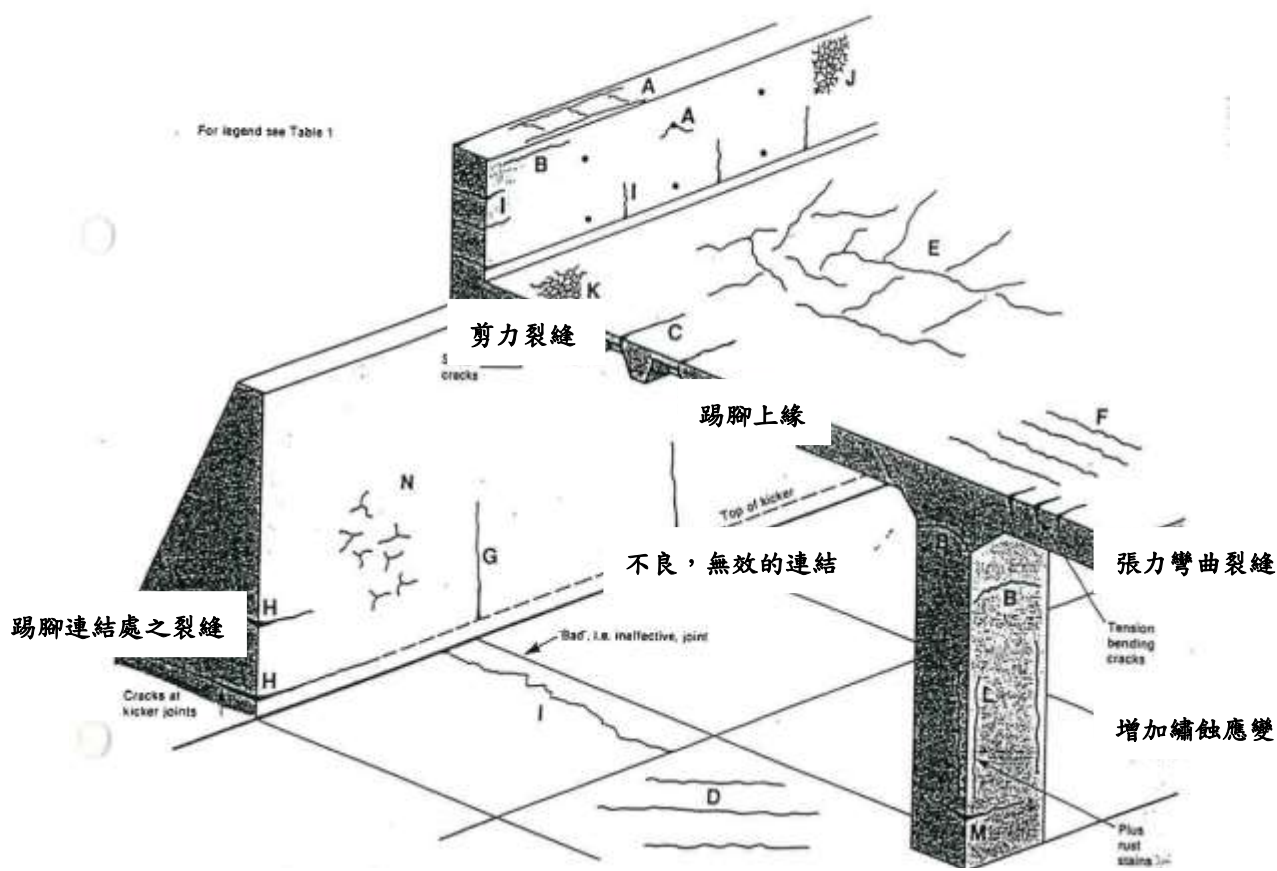


圖 5-2 混凝土裂縫產生原因

(資料來源：參考書目[42])

表 5-2 裂縫型式

裂縫型式	字母	細部位置	一般出現之位置	主要原因	次要原因	補救方式	裂縫出現時間
塑性沉降(AB)	A B C	鋼筋上方 拱起形狀 深度的變化	深的斷面 梁頂端 槽型及 格子樓板	過多泌水	快速早期乾涸	減少泌水	10 分至 3 小時
塑性收縮(D)	D E F	對角線 隨機 鋼筋上方	道路和樓板 鋼筋混凝土板 鋼筋混凝土板	快速早期乾涸  鋼筋接近表面	泌水率低	改善早期養護	30 分至 6 小時
早期熱收縮(G)	G H	外部束制 內部束制	厚的牆 厚樓板	產生過多的熱 過多的溫度梯度	快速冷卻	減少熱影響或絕緣	1 天至 2-3 星期
長期乾縮(I)	I	-----	薄的板和牆	無效的連接	過多的收縮	減少水含量	幾個星期或月
產生紋裂(K)	J K	緊靠模板 抹平的混凝土	清水混凝土樓板	不透水模板 過多的塗抹	富配比較 養護不佳	改善養護	有時候 1 至 7 天
鋼筋腐蝕	L M	自然情況 氯化鈣	柱和梁 預鑄混凝土	保護層不足 氯化鈣超量	惡劣環境	減少上述之因素	超過兩年
鹼骨材效應	N	-----	潮濕的位智	鹼骨材與高鹼水泥		減少上述之因素	超過五年

(資料來源：參考書目[42])

綜合研究成果與彙整相關文獻資料，引發混凝土結構開裂的原因如下：

- (1) 混凝土品質不良，每立方混凝土使用過多拌合水或水泥。
- (2) 混凝土結構設計不當。
- (3) 初期水化熱過高產生梯度熱應力(development of differential thermal stress)。
- (4) 溫度變化大且混凝土熱漲冷縮變形受束制，引發拉應力超過抗拉強度。
- (5) 乾溼循環導致混凝土體積發生膨脹與收縮循環。
- (6) 氯離子或中性化引發混凝土中的鋼筋腐蝕。
- (7) 混凝土澆置時，暴露環境乾燥、炎熱或大風，導致水分大量蒸發。
- (8) 基礎下現貨膨脹土壤作用，造成混凝土結構移動。
- (9) 混凝土受到內部化學反應(鹼質粒料)或外部化學反應(硫酸鹽侵蝕)的作用。
- (10) 不當或變更混凝土結構的用途。
- (11) 混凝土結構的老化或風化。
- (12) 塑性沉降(plastic settlement)或重載 (heavy loading)。

裂縫依受外力與否可分為結構裂縫與非結構裂縫。結構裂縫依受力類別又分為(1)彎曲開裂裂縫 (flexural cracking)、(2)剪力開裂裂縫(shear cracking)及(3)內部微開裂裂縫 (internal micro cracking)。彎曲開裂的寬度與間距與梁中性軸位置與鋼筋保護層厚度有關，一般彎曲裂縫數量多但寬度小多在允許範圍內；剪力開裂多形成斜裂縫(diagonal cracks)，主要由彎曲應力與剪應力組合的斜拉應力所致；內部微裂縫有兩種，一為預力梁端部複雜的三軸應力區內，主拉應力(principal tensile stress)會引發微細裂縫(micro cracks)；另一為混凝土受到壓應力作用如標準試體抗壓試驗時，伴隨著側向膨脹，會產生與壓應力方向平行的微細裂縫。非結構裂縫主要由混凝土或組合材料本質性質所產生，與環境溫濕度有關，但與外力或其他因素無關，比結構裂縫較不普遍，一般可以適當的控制 在允許的範圍內。

## 第二節 結構裂縫防制策略

結構裂縫可於混凝土結構設計時，依據載重條件與設計規範之規定而加以控制，結構裂縫控制設計，可參考美國或我國相關設計規範。裂縫一般發生在混凝土受拉應力集中的部位，混凝土拉力強度約為壓力強度的 1/10，建築物窗戶、出入口與換氣口開口處的四邊角，由於收縮作用易發生開裂。四邊受束制較大的牆面，長向受束制力雖小，但拉應力集中的部位，也會開裂。防制對策：可以增加補強鋼筋，以承受混凝土的收縮應力。混凝土澆置完成後初期，混凝土強度甚低，如施加载重必定開裂，除了外載重混凝土自重也是載重之一。防制對策：應避免過早拆除模板，更要確保立柱支點四圍穩定，避免支柱及模板下沉，導致早期硬固的樓版開裂。鋼筋混凝土結構長期載重引發的開裂，主要由於設計結構強度不足所造成，可提高載重係數而降低開裂機率。如設計不當，撓度過大的樓版會產生裂縫，表面砂漿開裂寬度會超過 1mm，版混凝土有許多 0.3mm 以下的裂縫，此因樓版上部配筋不足所致，另如樓版支承處開裂，力矩會重新分配，跨度中彎矩增加，變形也會進一步擴大。

施工初期引起的混凝土的開裂，主要因(1)混凝土澆置速度過快，(2)模板變形，(3)模板支撐下陷，(4)表面水蒸發過快。施工中期引起的混凝土的開裂，主要因拆模與解除支撐時機與方法不當，可使用早強混凝土或適當拆模工法加以防制。施工中期引起的混凝土的開裂，主要原因為冷縫詩作不當，配筋配管保護層不足或位置不當及鋼筋位置保持不準確。

## 第三節 非結構裂縫防制對策

### 壹、混凝土未硬固前的裂縫與防制對策

塑性裂縫發生於混凝土未完全硬固前，通常在混凝土澆置後 10 分鐘至 6 小時發生，依發生原因分為 (1)塑性收縮裂縫、(2)塑性沉降裂縫及(3)模板移動引

發裂縫。塑性裂縫主要因不當的施工條件與方式所產生，一般可經由採用良好的施工法加以防制。

#### 塑性收縮開裂與防制對策

塑性收縮開裂主要因為混凝土表面快速乾燥，混凝土澆置與搗實後，固體成分下沉，水分上升表面形成水膜或水層，一般稱為泌水。混凝土未硬固前，如果表面水快速蒸發，混凝土表面快速乾燥，以致持續將內部水分引至表面蒸發，混凝土近表面處會發生收縮開裂，此現象與黏土乾燥開裂相似。強風、高溫及低濕度會提高蒸發速率而加速收縮開裂。塑性收縮開裂型式概分為(1)無鋼筋或含少量鋼筋版，為中央斜向塑性收縮裂縫，長約 300 mm ~ 1000mm；(2)結構混凝土版，為大規模的地圖形式的塑性收縮裂縫及(3)與束制形式有關的裂縫如與上層鋼筋鄰近區域或深度變化區域的塑性收縮裂縫。

防制對策：材料部分應提高混凝土黏度，如添加沸石粉、矽灰等或摻入抗析離劑，使混凝土具有較好的保水性能，適當降低用水量並採用二次搗實工法。另外，當混凝土表面刮平後，立即採行任何降低混凝土表面水蒸發速率的方法，減少塑性收縮，防制對策如下所示，有時需併用數種方法才能有效降低塑性收縮。

- (1) 架設擋風設施降低混凝土表面風速。
- (2) 澆置混凝土前濕潤底層或模板避免水分損失，任何額外滲入的水必須先排除。
- (3) 新拌混凝土表面須噴水霧保護。
- (4) 新拌混凝土表面噴保護劑（非養護劑）。
- (5) 使用防水材料覆蓋新拌混凝土表面。
- (6) 塑性收縮開裂初期，可利用木質手鏟刀或鋼質動力鏟刀抹平或鏟平，將裂縫閉合。當暴露於快速乾燥環境，所有混凝土表面在未硬固前，必須定時檢視，如有發現裂縫，應立即使用木質手鏟刀或鋼質動力鏟刀將裂縫全深度閉合。

#### 塑性沉降開裂與防制對策

塑性沉降開裂主要因為混凝土澆置成型後，混凝土發生沉降，水平鋼筋阻止混凝土下沉，混凝土沉下部分產生拉應力，沿著鋼筋上表面發生開裂。



防制對策：控制混凝土的泌水量，提高混凝土黏度，如添加沸石粉、矽灰等或摻入抗析離劑，降低混凝土水灰比與用水量，控制高性能減水劑用量。日本對混凝土裂縫的對策中，控制混凝土的泌水量 $<0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ ，具體做法為控制混凝土的用水量、水泥用量與礦物摻合料。

#### 模板移動引發裂縫與防制對策

塑性裂縫主要因不當的施工條件與方式所產生，一般可經由採用良好的施工法加以防制。

防制對策：模板與支承必須確保有足夠的強度與剛度，可以承載模板內混凝土不致發生過大變形，並能持續穩定至混凝土硬固具有強度。

### **貳、混凝土硬固後的裂縫與防制對策**

硬固混凝土開裂的兩個主要原因：(1)混凝土體積發生變化，(2)混凝土本體發生膨脹性化學反應，引發開裂。因為獲得或喪失水分及溫度變化，導致混凝土體積發生變化是無法預防的，如果體積變化量過大或未能採行適當措施，控制體積變化的影響，硬固混凝土一定開裂。混凝土本體發生膨脹性化學反應包括鋼筋腐蝕、鹼質粒料反應及硫酸鹽反應等，如能審慎選擇組合材料與配比，採用正確的澆置、搗實與養護施工法，膨脹性化學反應可以有效的被控制。

#### 裂紋 (crazing) 與防制對策

當混凝土硬固後初期，抹平或鏟平的表面可能會出現淺細裂紋，主要因乾濕循環引發的膨脹收縮反應所造成，對於結構完整性基本上無影響，使用過多水泥或搗實過量會增加裂紋。

防制對策：(1)避免過濕拌合(wet mix)，(2)當有泌水時避免粉光表面，(3)避免過度搗實，(4)即時進行持續養護，(5)表面避免接觸乾濕循環之環境。

#### 溫度開裂與防制對策

溫度裂縫一般發生在水化熱溫度上升結束，溫度開始下降時，此時混凝土體積開始收縮，如有束制引發內應力，混凝土發生開裂。多於混凝土澆置後一周內，發生在巨積混凝土表面、鋼筋混凝土牆開口處四個角隅及高強度混凝土梁，由於束制作用垂直方向產生貫穿裂縫。

防制對策：(1)選用低熱水泥，C3A 含量 $<5.0\%$ ，(2)降低水泥用量或選用混合水泥，(3)降低混凝土澆制溫度，將砂石預冷或用冰水拌合，(4)混凝土中埋設冷卻水管，(5)控制降溫速率，使表面溫度與內部溫度差 $<25^{\circ}\text{C}$ ，因而降低內部束制應力，減少開裂。通過對混凝土表面覆蓋，可有效縮小內外溫差。

#### 自體收縮開裂與防制對策

自體收縮開裂是水泥水化產物收縮引起的開裂，於混凝土澆置後 1 天內發生，混凝土水灰比越低，自體收縮開裂越嚴重。

防制對策：(1)使用中熱或低熱水泥可減少自體收縮裂縫，(2)使用 10%飽和沸石粉取代水泥亦可減少自體收縮裂縫，(3)加強濕養護可減少自體收縮裂縫。

#### 乾燥收縮開裂與防制對策

混凝土的乾燥收縮主要係因毛細孔隙水向外部逸散，產生毛細管拉應力，由於負壓使混凝土體積收縮，如周圍存有束制，內部會產生拉應力，假使拉應力大於混凝土抗張強度，則會發生乾縮開裂。乾燥收縮開裂一般開始發生於齡期 3 個月後，很長時期會持續成長。粒料粒徑、性質與用量會影響混凝土體積收縮。

防制對策：(1)降低每方混凝土用水量，日本建築學會規定每立方混凝土用水量不得超過 185 kg；研究結果顯示每立方混凝土用水量超過 30 kg，6 個月混凝土的乾燥收縮量相差 10~15%，(2)優選粒料，抵抗收縮的粒料母岩依序為石灰岩、安山岩及砂岩，(3)選擇適當膠結料，使用不同混合水泥乾燥收縮量不同，使用水淬高爐石粉混合水泥較粉煤灰混合水泥佳，(4)使用降低混凝土收縮的外加劑，降低毛細管張力，使乾縮變形降低，(5)減少細粒料用量，使用允許最大粒料量與粒徑，(6)採行適當的養護方法。

## 第六章 結論與建議

### 第一節 結論

#### 壹、 確認影響混凝土開裂的現象與原因

混凝土開裂的原因甚多，彙整過去相關研究的結果有超過 40 個以上的原因，這些原因對裂縫發生的綜合影響非常複雜，如不正確的結構設計無法保證結構物有足夠的強度、使用不適當的混凝土組成材料與配比設計、未針對暴露環境採用正確的施工與養護方法及不當的使用與維護混凝土結構等。當結構發生開裂，首先應要查明原因，診斷其危險性，採取適宜的修補材料與工法，方能獲致實效。外在環境因素主要是溫度和濕度的變化，內在材料因素主要為混凝土的體積不穩定性。

#### 貳、 添加不同化學摻劑或輔助膠凝材料對於混凝土收縮的影響

由本研究結果顯示添加 SRA 對於混凝土自體收縮及整體收縮的減少有明顯的效益，且隨著添加量由 1% 增至 3% 其效果愈佳，但強度略為折減；添加膨脹劑時強度略為增加，但對於混凝土自體收縮量及整體收縮量相較於未添加得來的大。添加飛灰及爐石對於強度為正面性，但會略為增加其自體收縮量及整體收縮量，須配合同時添加 SRA 來使用，才能達到較佳的效果。另外化學摻劑或輔助膠凝材料對於碳化收縮影響趨勢並不明顯。

#### 參、 評估複合收縮作用及構件尺度對混凝土開裂的影響

混凝土產生開裂行為主要受到早期包括(自體收縮、塑性收縮)導致溫濕度的變化產生使得混凝土表面生成裂紋，進一步形成開裂的行為。因此針對自體收縮及塑性收縮的預防可達到抑制開裂的效益。在構件尺度上大面積的可能因為水化熱過高而生成較大的溫度梯度進而使混凝土開裂的行為產生，因此透過添加輔助膠凝材料及收縮抑制劑改善水分散失速率過快的問題是相當有效益的。

## 肆、 提出降低收縮及抑制開裂的對策

塑性收縮開裂的防制對策如材料部分應提高混凝土黏度如添加沸石粉、矽灰或摻入抗析離劑，使混凝土具有較好的保水性能，適當降低用水量並採用二次搗實工法。另外，混凝土表面刮平後，立即採行任何降低混凝土表面水蒸發速率的方法，減少塑性收縮，有時需併用數種方法才能有效降低塑性收縮。塑性沉降開裂防制對策如控制混凝土的泌水量，提高混凝土黏度如添加沸石粉、矽灰等或摻入抗析離劑，降低混凝土水灰比與用水量，控制高性能減水劑用量。日本對混凝土裂縫的對策中，控制混凝土的泌水量 $<0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ ，具體做法為控制混凝土的用水量、水泥用量與礦物摻料量。乾燥收縮開裂防制對策包括(1)降低每方混凝土用水量，日本建築學會規定每立方混凝土用水量不得超過 185 kg；(2)優選粒料，抵抗收縮的粒料母岩依序為石灰岩、安山岩及砂岩，(3)選擇適當膠結料，使用不同混合水泥乾燥收縮量不同，使用水淬高爐石粉混合水泥較粉煤灰混合水泥佳，(4)使用降低混凝土收縮的外加劑，降低毛細管張力，使乾縮變形降低，(5)減少細粒料用量，使用允許最大粒料量與粒徑，(6)採行適當的養護方法。

本研究依據材料試驗建議 (1)降低水灰比(水膠比)、(2)降低孔隙水的表面張力、(3)收縮補償及(4)改變孔隙大小 4 個方法，改善混凝土收縮與開裂的行為，試驗結果顯示降低水灰比(水膠比)雖然能夠達到降低乾燥收縮的效果，但其自體收縮應變反而增大，可能會導致前期產生開裂的情形，需配合添加收縮抑制劑來降低孔隙水的表面張力，對抵抗早期收縮應變有較好的效益。在收縮補償方面，本次所使用之膨脹劑對於抵抗收縮的效益並沒有如預期來的好，只達到其高早期強度的效果。藉由添加輔助膠凝材料(飛灰及爐石)改變孔隙大小，對於改善收縮行為有略微的幫助。整體歸納後可同時降低水膠比及添加少許的輔助膠凝材料取代水泥及收縮抑制劑對於降低收縮及抑制開裂是有效的對策。

## 第二節 建議

根據本案研究進行之後，提出立即可行建議及中長期建議。

### 建議一

**建立現地監測混凝土收縮行為，提供解決開裂行為之對策：立即可行建議**

**主辦機關：內政部建築研究所**

**協辦機關：中華民國全國建築師公會、中國土木水利工程學會**

早期混凝土收縮行為對於溫溼度的改變影響相當大，現地對於混凝土收縮行為的監測並沒有較完善的制度，導致各式裂縫時常發生，若能對於現地監測各項指標尋找出影響開裂的原因，能有效抑制裂縫的發生。

### 建議二

**針對目前國內混凝土收縮行為制訂標準規範：中長期建議**

**主辦機關：內政部建築研究所**

**協辦機關：經濟部標準檢驗局**

對於自體收縮及塑性收縮及環形試驗並未訂立出相關規範，若能參考國外規範並考量國內情形制訂標準規範，對於評估混凝土收縮行為有相當大的助益。



## 附錄一

## 專家座談會

專家座談會議紀錄表	
計劃名稱	混凝土收縮開裂機理及防治技術之研究
開會事由	混凝土收縮開裂機理及防治技術座談會
時間	103年07月28日(星期一)下午2點30分
地點	宏星技研股份有限公司會議室
邀請委員	徐輝明教授(宜蘭大學)、蘇錦江教授(大同大學)、翁在龍教授(大同大學)、陳明德經理(厚昇工程顧問有限公司)、張清雲技師(厚昇工程顧問有限公司)、李秉展博士(中國科技大學)、錢少陵主任(前工務局材料試驗所)、陳榮福技師(陳榮福土木技師事務所)、吳焰煌經理(泰興工程顧問公司)、林威廷博士(宜蘭大學)。
會議內容	開場由計畫主持人黃然教授引言說明本次座談會的目的並報告計畫內容及目前完成項目及後續預計進行工作,使在場專家對計畫目前執行的狀況有一定了解。專家分別提供降低混凝土塑性態及硬固態開裂目前業界解決得方法,並提供目前檢測混凝土是否產生塑性開裂的方法,利於後續計畫的進行。
會議結論	目前針對改善塑性態混凝土開裂方法主要是透過噴霧灑水的養護方式進行,但是處理不當容易導致表面強度不足,產生起砂的現象。專家表示可透過添加收縮抑制劑或是自調濕材料交互使用,更能解決塑性開裂的現象。而目前硬固態混凝土部分主要靠溫度鋼筋及點焊鋼絲網,若配合使用纖維能更有效的改善硬固態開裂。目前針對開裂是否合格有人提出透過(1m*1m)的方格尺中若有3條以上裂縫發生及判定為不合格,此種方式可做為檢測之方法。上述專家所提供之建議對於後續計畫的進行有相當大的幫助。

專家座談會議紀錄表

會議情形





專家座談會簽到單  
內政部建築研究所  
「混凝土收縮開裂機理及防制技術之研究」  
專家座談會  
簽到單

開會時間：103年07月28日(星期一)下午2點30分

開會地點：宏星技研股份有限公司會議室

徐輝明教授	徐輝明
翁在龍教授	翁在龍
蘇錦江教授	蘇錦江
陳明德經理	陳明德
張清雲技師	張清雲
李秉展博士	李秉展
錢少陵主任	錢少陵
陳榮福技師	陳榮福
吳焰煌經理	吳焰煌
林威廷博士	林威廷
黃然教授	黃然
林世堂教授	林世堂
謝紹恒	謝紹恒



## 附錄二

## 期初審查意見及回應

內政部建築研究所 103 年度

「混凝土收縮開裂機理及防制技術之研究」委託研究計畫案

審查意見及廠商回應一覽表

開會時間：2014/1/22

開會地點：內政部建築研究所

項次	審查委員意見	廠商回應
1	本題目文獻已相當多，宜找出特殊點重點探討，如 SRA 有許多種，該用哪種，使用後續影響，如 RCPT、滲透等亦須瞭解。	感謝委員意見，將評估後再做修正。
2	ASTM C1698 不容易做，不意均勻填滿。	感謝委員提醒，在操作上一定會更加注意，若有疑問則會請教曾經操作過之人員。
3	收縮分類之定義，宜依 ACI 或國際上常用之說法。	會根據 ACI 的方式再將收縮分類修正。
4	碳化收縮不容易做，尤其是低水膠比。	感謝委員提醒，目前在碳化作用下已採用加速碳化的方式進行試驗。
5	ASTM C876 是否目的為鋼筋腐蝕，請再確認。	感謝委員提醒，會再確認後進行修正。
6	ACI 報告中收縮有預測公式，可參考其包含變數作為試驗規劃及後續比對。	會再依 ACI 中收縮預測公式的變數作為試驗規劃的參考。
7	有關混凝土開裂之研究，國內外已有相當多數量，就本案的需求，不應只有針對材料面來進行，是否能對於施工面、設計面提出相關研究面向，方能有別於現行文獻研究之思維(創意性、權威性)。	影響混凝土收縮開裂的因素相當複雜，在材料面之相關參數就相當多，過去文獻也僅侷限在某些特定因子。因次本計畫主要針對材料面之機理進行探討，俟釐清材料相關參數對混凝土開裂的影響機

		理後，再利用本研究成果提出具創新或創意之觀點，後續研究即可一本研究成果，再從施工面與設計面等面向提出未來研究方向。
8	請說明本案設計擬用之水膠比為 0.45 及 0.65 之原因。	水膠比直接影響混凝土的收縮開裂程度，本案設計水膠比為 0.45 及 0.65 除了作為相互比較之外，也符合一般混凝土結構物設計之的水膠比範圍。
9	預期成果中若能具體提出「結構混凝土施工規範」或「混凝土結構設計規範」之修訂建議，應可更有應用價值。	本計畫僅限於混凝土中開裂機理的探討，但會參考 ACI 中收縮預測公式與實際情形進行比對，若有過於低估的情形，將建議規範中進行修正。
10	有無探討混凝土與鋼筋之間開裂機理。	本計畫僅限於混凝土中開裂機理的探討，後續可考量探討混凝土與鋼筋之間開裂機理。
11	研究經費毋須編列專家座談會費？材料費與其他費用之用途為何，應具體呈現（量化）另雜支費與行政管理費之總額應檢視有無超過規定。	將編列專家座談費，雜支費編列已依照最高依以上各項金額總和百分之五編列，行政管理費最高依以上各項金額總和百分之十進行編列。
12	降低收縮如何量化評估。	將針對試驗後的數據統整與分析，並嘗試進行量化處理。
13	進一步說明砂漿式體與混凝土試體開裂關係，尤其是束制作用。	束制作用是造成混凝土開裂主要原因之一，因此本計畫會對砂漿試體與混凝土試體開裂關係進行探討。
14	建議以實際施工環境來設計實驗環境較能符合實務之應用。	感謝委員意見，將在評估後納入考量。
15	應用研究成果來落實施工時，是否會改變現行的施工習慣。	視研究成果而定，原則上將以結構物的安全性與耐久性為考量重點。
16	本研究國外的文獻書籍很多，移編經費購置譯整成獨立參考文件。	感謝委員意見，將作為參考。

17	<p>混凝土收縮開裂是有危害到建築物安全與使用不便？能否等級畫或量化，併同相關研究成果作為建築技術規則相關規範及國家標準修正用。</p>	<p>本計畫僅限於混凝土中開裂機理的探討，但會參考 ACI 中收縮預測公式與實際情形進行比對，若有過於低估的情形，將建議規範中進行修正。</p>
18	<p>本研究試驗法傾向於小試體與材料面，如果是在建築物主要結構或其附屬結構體樓板、屋頂，因束制或無空間可供膨脹以致形成另一種破壞。</p>	<p>本計畫主要針對材料面支機裡進行探討，有關建築物因束制或無空間可供膨脹以致形成之破壞，可作為將來研究的方向。</p>
19	<p>預防性防治宜考量耐久性、健康面對老舊建築因而漏水等極修補防制技術維護維修可行性為何。</p>	<p>本計畫主要針對開裂機理即針對材料上所需注意的部分進行探討，其他相關維護維修部分將來可作為研究的方向</p>
20	<p>本案研究內容與工程實務存在的問題甚有助益。</p>	<p>感謝委員的肯定。</p>
21	<p>研究人員在此領域學經驗俱佳。</p>	<p>感謝委員的肯定。</p>
22	<p>建議一併探討及觀測所設定混凝土配比之開裂時（初始開裂的應變量即發生開裂的時間點，開裂可能會在不同變形階段產生以利於防制技術的量化改善有效性的判斷評估。</p>	<p>環形試驗中將針對初始開裂的應變量、開裂時間進行量測。</p>
23	<p>服務建議書中提出多種的變形機制(如塑性收縮、沉降收縮、化學收縮...)有些是相互平行發生，因此有主控影響混凝土開裂的變形，故雖有詳細探討各種變形，惟仍宜以在工程實務上對開裂有較決定性影響的變形，且較常發生者為主，作為量測對象及防制技術之標的，以降低改善開裂的情況。</p>	<p>針對委員提到主控影響混凝土開裂的變形，在塑態主要是塑性收縮；硬固態主要是乾燥收縮。其他部份對於混凝土收縮開裂亦有影響故會一併進行探討。</p>
24	<p>飛灰取代量至 30%，目前建築工程除巨積混凝土外尚不得使用至 30%，請考量是否調降。高爐石粉目前若與飛灰一併使用（爐石粉 35%，飛灰 10%，若不使用飛灰條</p>	<p>將針對委員所提之建議進行添加比例調整。</p>

	件下，高爐石粉用量可調高至 45%) 供參考。另收縮補償劑一注意使用 上限。	
--	--	--

## 附錄三

## 期中審查意見及回應

開會時間：2014/7/3

開會地點：內政部建築研究所

項次	審查委員意見	廠商回應
1	研究主題頗值得探討。	感謝對本計畫執行之肯定。
2	報告之目錄順序及表示(數字方式)需再確認。	感謝委員寶貴意見於期末報告中會將資料補足。
3	表或圖之名稱部份缺少主詞。 Ex 表 4-1~4-4。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
4	圖 1-1~1-6 不清楚待修正。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
5	表 2-3~表 2-5 外框不宜加重。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
6	部份公式模糊 (p.38,39,40,51,52)。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
7	圖線條標示建議調整，以利判讀(第四章)。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
8	(p.69)圖 4-12 至圖 4-14 現象，請詳加說明實驗成果趨勢。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
9	抗壓強度縱座標取整數更佳。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
10	部份參考文獻重複[6]、[15]、[27]、[19]、[20]、[14]、[18]。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
11	開裂因素很多，建議儘量排除其它影響因素後，進行研究準確性較高。1. 開裂因素很多，建議儘量排除其它影響因素後，進行研究準確性較高。	感謝委員寶貴意見在實驗過程中將特別注意避免其他因素導致結果的錯誤。
12	可考慮建立水膠比規範。	本研究中僅討論 0.45 及 0.65 兩種水膠比，後續可增加其他不同比例以便建立水膠比規範。

13	研究結果可與現行抗壓強度比較以增加可信度。	感謝委員意見，將針對實驗結果與現行強度間做比較。
14	可提供防制之技術。	感謝委員意見，將增設專章詳述。
15	混凝土收縮開裂到達何種程度，才使建築結構構件或防風、雨性能不足?影響開裂產生的原因，再結合防制技術，以避免已有許多良好的試驗結果，能達到有效的運用。	感謝委員意見，將在結論中詳細補足。
16	碳化收縮是否有標準規範?	目前沒有故僅參考相關無限的方式進行。
17	各種原因(收縮抑制劑及膨脹劑)使得強度降低或改變，是否再增加改變之比率，以了解其影響之程度。	感謝委員意見，本次實驗中僅探討添加 0%~3% 間的影響，可在後續研究中增加不同比率，以利探討。
19	各別不同條件及成果建議可歸納成總圖並做說明討論，以利探討整體趨勢。	改謝委員細心提醒，會於結論中列出總表探討趨勢。
20	建議增列各種裂縫說明圖表以利閱讀。	感謝委員意見，將於成果報告中詳列。
21	研究成果建議有簡易參數資料，可供業界使用。	感謝委員意見，將於成果報告中詳列。。
22	p.4 圖 1-1~1-4 建議放大，便容易判讀。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
23	p.17 第 5 行”應力以不存在”應修正為”應力已不存在”；第 12 行”體積違法回復”應修正為”體積無法回復”；第 15 行”水揮筆”應改為”水灰比”。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
24	p.18 第 9 行”有叫家”應修正為”有較佳”。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
25	p.21 ”抑減劑”是否改為”抑制劑?	改謝委員細心提醒，會予以修正。
26	p.25 第 4 行重覆文字請刪除。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
27	p.51~52 公式之式中符號說明應	改謝委員細心提醒，會予以



	注意格式和其單位。	修正。
28	p.22(3)反應式未列。	改謝委員細心提醒，會予以修正。
29	ASTM C1698-09 試驗不易正確進行須格外小心。	感謝委員提醒，在操作上一定會更加注意，若有疑問則會請教曾經操作過之人員。
30	使用 SRA 除降低強度外，亦會降低耐久性，RCPT 電流值上升宜再討論。	感謝委員意見，本次研究中並未討論對於，RCPT 電流值得影響，後續可針對此議題作探討。
31	使用膨脹劑可使強度增加 (p.93~94)請與文獻比對，或說明其範圍之限制。	感謝委員意見，將於報告中補足。
32	本項研究牽涉變數甚多，不易進行，研究團隊值得嘉許。	感謝對本計畫執行之肯定。
33	期中報告內容符合計畫要求。	感謝對本計畫執行之肯定。
34	表 3-6 水泥砂漿試體配比顯示不同水膠比的試體中砂的用量不同，相同水膠比試體中砂的用量亦有微調。此配比會造成各水泥砂漿棒中的砂量不同，膠結物的含量也不同，即會產生收縮的材料量各自不同，在比較各配比的收縮行為時應謹慎為之。	改謝委員細心提醒，成果報告中會針對砂率對於塑性收縮的影響作探討。



## 附錄四

## 期末審查意見及回應

開會時間：2014/10/15

開會地點：內政部建築研究所

項次	審查委員意見	廠商回應
1	碳化收縮試驗因無參考標準，請說明參數使用的依據。	碳化收縮試驗因無參考標準，本研究採用之參數為壓力在 15atm，CO <sub>2</sub> 濃度 100%，溫度 20℃ 相對溼度 90% 的碳化箱一周後，測量其長度變化的情形。
2	添加 SRA 會降低抗壓強度及收縮應變而添加膨脹劑會使得抗壓強度及收縮應變增加，請說明抗壓強度與收縮應變間的關係性。	抗壓強度與收縮應變間的關係性將在修正之報告中增加說明。
3	第三~五節化學摻料對收縮的影響，其中圖 4-14~圖 4-55 之試驗結果，建議標示試驗當時之溫度及濕度。	圖 4-14~圖 4-55 之試驗結果，將在修正之報告中增列試驗時溫度與濕度的情形。
4	圖 4-14 有重複請檢核。	謝謝委員指正，將在修正之報告中訂正。
5	P.57~73，圖 4-1~圖 4-27 可否用黑白影印亦能辨識之符號。可否建立抗壓強度隨 SRA、膨脹劑、爐石、飛灰用量增加而變化之彙整表。	將在修正之報告中依委員建議重新繪製試驗結果圖以利辨識，並建立抗壓強度隨 SRA、膨脹劑、爐石、飛灰用量增加而變化之彙整表。
6	P.66~73，圖 4-14~圖 4-27 之收縮量測值是何種收縮？可否做較明確之定義，收縮應變隨 SRA、膨脹劑、爐石、飛灰用量而變化，是否可建立一彙整表。其中膨脹劑隨著添加量增加收縮應變反而增加原因如何？	圖 4-14~圖 4-27 之收縮量測值是整體收縮，將在修正之報告中補充說明，並建立收縮應變隨 SRA、膨脹劑、爐石、飛灰用量而變化之彙整表。

7	P.74~80 圖 4-28~圖 4-41 之碳化收縮皆為負值，亦即碳化會造成試體膨脹原因為何?	碳化造成試體膨脹原因，將在修正之報告中補充說明。
8	漿體開裂應變值大約是多少? 骨材若加入會否加大這應變值敏感值，減少裂縫發生?	本試驗漿體開裂應變值大約 200~1400 $\mu$ 之間，試體中骨材的比例對應變值敏感值與裂縫均會產生影響，將增列試驗配比中粒料所佔的體積。
9	加入 SRA 或膨脹劑後，收縮量由約 1000 $\mu$ 降低至 100-200 $\mu$ ，何以可否確認走避免裂縫之效益?	加入 SRA 或膨脹劑後，因降低比表面積，故收縮量由約 1000 $\mu$ 降低至 100-200 $\mu$ ，具避免裂縫之效益。
10	膨脹劑或 SRA 的性質為何?應交代清楚。	膨脹劑或 SRA 的性質，將在修正之報告中補充說明。
11	膨脹劑或 SRA 加入次化學變化，化學變化的局部熱效應，是否產生局部的微裂縫，這又該如何處理?	將在修正之報告中補充說明。
12	請提列降低收縮及抑制開裂方法之參考表，以供業界參考。	將增設專章對防制技術部分包括降低收縮及抑制開裂方法等多做說明，並將試驗結果彙整成總表。
13	P.90 第 10 行文字有誤請更正。	謝謝委員指正，已訂正。
14	研究成果符合預期成果需求。	謝謝委員肯定。
15	第四章第四節針對碳化收縮應變表示方式與其他章節略微不同建議能一致，方便閱讀。	謝謝委員指正，將在修正之報告中補充說明。
16	P.90 文字有誤請更正。	謝謝委員指正，已訂正。
17	本研究利用不同試驗方法探討混凝土開裂行為並提供抑制開裂的對策，研究成果有助於國內產業研發新材料及技術，並對國內訂定相關規範有重要之參考價值。	謝謝委員肯定。
18	本研究對混凝土收縮機理做一	謝謝委員肯定。

	<p>詳細之試驗探討，結果具學術參考價值。</p>	
19	<p>收縮抑制劑主要是破壞水之表面張力，其一定有時效性問題，本藥劑藥效可達多久，請補充說明，因混凝土收縮期可達一年以上。</p>	<p>收縮抑制劑藥效並未特別了解時效性問題，將再蒐集資料，若有相關資訊將在修正之報告中補充說明。</p>
20	<p>水泥砂漿中水泥漿體積百分比影響收縮大，請補充本研究案配比中粒料體積百分比。</p>	<p>將增列試驗配比中粒料所佔的體積。</p>
21	<p>本研究同時做強度試驗與收縮試驗似乎嘗試著建立相同材料系統試體之強度/收縮隨時間之發展關係圖，並作為判定開裂時間之用。</p>	<p>謝謝委員肯定。</p>
22	<p>本研究採水灰比 0.45~0.65 此一範圍之砂漿似無「自體收縮」之行為？請在確認。</p>	<p>謝謝委員指正，有關砂漿是否有「自體收縮」之行為，將在修正之報告中確認。</p>
23	<p>建議將環形收縮所導致開裂時間延遲之結果與先前收縮量大小關係做一比對印證分析。</p>	<p>謝謝委員指正，將在修正之報告中補充說明。</p>
24	<p>本研究案開裂機理外防制技術並重，因此防制技術部分宜集中說明，列於專屬章節中。</p>	<p>將增設針對於收縮開裂防制技術的專章詳細討論。</p>
25	<p>實驗依各變數因子有 <math>4*4*2*4*4*5</math>，則有 3 千多次，請再確認。每次試驗數值請做成 Excel 電子檔收存本所，做為後續分析參考。</p>	<p>材料特性及試驗方法及組數將更明確的於試驗計劃章節中詳述。</p>
26	<p>能否做成注意事項或手冊，作為科普材料。</p>	<p>有關本計畫之注意事項，將在修正之報告中補充增列。</p>

27	建議將增設專章對防制技術部分多做說明，並將試驗結果彙整成總表。	將增設專章對防制技術部分進行說明，並將試驗結果彙整成總表。
----	---------------------------------	-------------------------------

## 參考書目

- [1] 王鐵夢，「建築物的裂縫控制」，博遠出版有限公司，台北，1993。
- [2] Mehta, P. K., Concrete Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A(1986).
- [3] Yilmaz Akkaya, Chengsheng Ouyang, Surendra P. Shah”Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete”, Cement and Concrete Composites, No.29, pp. 117-123, 2007
- [4] 黃然，「鋼筋與混凝土表面處理效能之實驗研究」，建築研究計畫聯合研討會論文集，2004。
- [5] D.P. Bentza\*, M.R. Geikerb, K.K. Hansenb, “Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars”, Cement and Concrete Research No.31, pp.1075–1085, 2001
- [6] J. Francis Young, “Concrete” Second Edition, Pearson Education, Inc.2003.
- [7] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivatnanon, “Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar”, Cement and Concrete Research, No.34,pp.1087-1092, 2004.
- [8] Chidiac S. E., Civil Engineering Course CE732: Concrete Structures-Materials,Maintenance and Repair, Department of Civil Engineering, McMaster University,Canada, 2009.
- [9] Newman I., and Seng Choo B., Advanced Concrete Technology, 1st Edition, Oxford, ElsevierLtd., 2003.
- [10] Lee K.M., Lee H.K., Lee S.H., and Kim G.Y, Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag, Cement and Concrete Research, 36(7), 1279-1285,2006.
- [11] Houst Y.F., Carbonation Shrinkage of Hydrate Cements Paste, CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Ottawa, Canada, July 1, 1997.
- [12] Bissonnette B., P. Pierre, M. Pigeon, “Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials”, Cement and Concrete Research,pp. 1655-1662,1999
- [13] Lim, Y. M., and Wu, H., and Li, V. C., “Development of Flexural Composite Properties and Dry Shrinkage Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites at Early Ages”, ACI Materials Journal, Vol.96,NO.1,pp.20-26,1999.
- [14] Ma Bao-GUo, Wang Xin-gang \*, Liang Wen-quan , Li Xiang-guo , He Zhen , “Study on early-age cracking of cement-based materials with superplasticizers”, Construction and Building Materials, No.21, pp.2017-2022, 2007

- [15] J.Francis Young, “Concrete”, Second Edition, Pearson Education, Inc. 2003.
- [16] Jennings, H. M, “A model for microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste”, Cement and Concrete Research 30(1),pp.101-116, 2000.
- [17] Maria C. Garci Juengera,1, Hamlin M. Jenningsa,b,\* , “Examining the relationship between the microstructure of calcium silicate hydrate and drying shrinkage of cement pastes”, Cement and Concrete Research ,NO.32,pp. 289-296,2002.
- [18] Ma Bao-guo, Wang Xin-gang, Liang Wen-quan, Li Xiang-guo, He Zhen, “Study on early-age cracking of cement-based materials with superplasticizers”, Construction and Building Materials, No. 21, pp.2017-2022, 2007.
- [19] I. Papayianni, G. Tsohos, N. Oikonomou, P. Mavria, “Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures”, Cement and Concrete Composites, Vol 27, pp.217-222,2005.
- [20] Mario Collepardi ,Antonio Borsoi, “Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions”, Cement & Concrete Composites NO.27,pp. 704–708,2005
- [21] C. Maltese, C. Pistolesi, A. Lolli, A. Bravo, T. Cerulli, D. Salvioni, “Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars”, Cement and Concrete Research, NO 35, pp. 2244-2251,2005.
- [22] Zongjin. Lim Meng. Qi, Baoguo. Ma “Influence of chemical admixtures on concrete shrinkage and cracking”, Department of Civil Engineering, The Hong kong University of Science and Technology.
- [23] 汪書瑜, 「摻料對水泥質複合材料收縮行為與裂縫發展之研究」, 國立台灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文, 2008。
- [24] 林維明, 黃兆龍, 王和源, 洪賢信, “土木技術, 混凝土技術專輯, 飛灰混凝土應用規範之探討”, 1998, pp.119。
- [25] 行政院公共工程委員會, 「公共工程飛灰混凝土使用手冊」, 1999, pp.5-20。
- [26] Mindess, S. and Young, J.F., “concrete”, Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1981.
- [27] Malhotra, V.M., and P.K. “Mehta, Pozzolanic and Cementitious Material”, Advances in Concrete Technology, Vol.1, Gordon and Breach Publishers, 1996.
- [28] Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T. “Alkali-Activated Fly Ash a Cement for the Future”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.249-254, 1999.
- [29] 陳振川、詹穎雯, “填加飛灰與水淬高爐石粉混凝土之體積穩定探討”, 水淬高爐石粉與飛灰資源在混凝土工程上應用研討會論文集, 1986。
- [30] 陳一飛, 郡朝勇 “粉煤灰對鋼筋混凝土耐久性能的影響及其應用研究”, 北京中化科城技術研究所, 2005。
- [31] 林炳炎, “飛灰用在混凝土中”, 現代營建雜誌社, 1991, pp319-330。



- [32] 黃兆龍，“混凝土性質與行為”，1999。
- [33] 蒲心誠，甘昌成，何桂，白光，吳禮賢，陳明珠，“鹼高爐石混凝土耐久性研究”，混凝土 pp.13-20。
- [34] 沈進發等撰，“公共工程高爐石混凝土使用手冊”，行政院公共工程委員會，2001，pp.7，15-21，55。
- [35] American Society for Testing and Materials C109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- [36] American Society for Testing and Materials C1698 “Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar”
- [37] American Society for Testing and Materials C596 “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement”
- [38] American Society for Testing and Materials C1579 “Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert) ”
- [39] American Society for Testing and Materials C1581 “Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage”
- [40] 笠井芳夫，“コンクリートのひび割れ-原因与防止対策”
- [41] The University of Sydney school of Civil Engineering notes, “ The Reduction of Cracking in Concrete”,1999.
- [42] NRMCA Technical Bulletin, “ Cracks in Concrete Due to Plastic Shrinkage and Plastic Settlement”,1990.



混凝土收縮開裂機理及防制技術之研究/黃然研究主持

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：黃然、紀茂傑、林世堂、謝紹恒

出版年月：103年12月

版(刷)次：初版

ISBN：978-986-04-2788-2 (平裝)