

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

內政部建築研究所委託研究報告

107  
年度

# 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 107 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)

PG10702-0007

# 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

受委託單位：建國科技大學

研究主持人：吳崇豪

共同主持人：林喻峰

研究員：黃中和

研究助理：丑倫彰

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 107 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
圖次	III
表次	VII
摘要	IX
第一章 緒論	1
第二章 文獻回顧	5
第一節 飛灰混凝土的應用	5
第二節 混凝土與鋼筋的握裹行為	13
第三節 飛灰混凝土的耐久性	19
第四節 國內外有關本案之研究情況	22
第三章 試驗規劃	25
第一節 試驗材料	25
第二節 混凝土配比	27
第三節 試體模具製作	29
第四節 混凝土拌製及澆置	32
第五節 試驗設備及試驗方法	36
第四章 試驗結果與討論	49
第一節 混凝土新拌性質	49
第二節 混凝土抗壓強度	53
第三節 抗彎強度試驗結果	59
第四節 鋼筋拉拔握裹試驗結果分析	62
第五節 滲透試驗結果	83
第六節 快速氯離子滲透試驗結果	85

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

第八節 飛灰摻量檢測技術可行性評估 .....	88
第九節 相關規範/規定研修建議 .....	90
第五章 結論與建議 .....	91
第一節 結論 .....	91
第二節 建議 .....	94
參考文獻 .....	95
附錄一 期初審查會議與回應 .....	99
附錄二 期中審查會議與回應 .....	102
附錄三 第 1 次工作會議 .....	106
附錄四 第 2 次工作會議 .....	107
附錄五 第 1 次專家學者座談會議紀錄 .....	108
附錄六 第 2 次專家學者座談會議紀錄 .....	110
附錄六 飛灰混凝土施工注意事項 .....	114
附錄七 結構混凝土施工規範-高飛灰摻量混凝土(建議條文案) .....	123
附錄八 施工綱要規範-高飛灰摻量混凝土(建議條文案) .....	125

## 圖次

圖1-1 研究流程圖	3
圖2-1 飛灰的微觀結構	5
圖2-2 握裹力的組成	14
圖2-3 鋼筋與混凝土間的支承力	17
圖2-4 中興工程研究大樓	22
圖2-5 猶他州議會會堂	23
圖2-6 加州柏克萊大學社會發展前瞻科技研發中心	23
圖2-7 北京中央電視台總部大樓	24
圖2-8 Purdy's Warf大樓	24
圖3-1 飛灰	26
圖3-2 抗壓試驗試體模具(左)及抗彎試驗試體模具(右)	30
圖3-3 氯離子滲透試驗模具(左)及滲透試驗模具(右)	30
圖3-4 鋼筋握裹試驗模具	31
圖3-5 圍束(左邊)與無圍束(右邊)握裹試驗模具	31
圖3-6 圍束用之鋼筋籠	31
圖3-7 混凝土坍度試驗	33
圖3-8 抗壓試驗試體	33
圖3-9 抗彎試驗試體	34
圖3-10 滲透試驗試體(左)及氯離子滲透試驗試體(右)	34
圖3-11 篩除粗骨材	35
圖3-12 試體養護	35
圖3-13 強制式水平雙軸拌和機	37
圖3-14 萬能材料試驗機	37
圖3-15 抗壓試驗機	38
圖3-16 快速氯離子穿透試驗儀	38

圖3-17 透水試驗儀	39
圖3-18 混凝土初終凝試驗儀	39
圖3-19 掃描式電子顯微鏡	40
圖3-20 混凝土抗壓強度試驗	41
圖3-21 混凝土抗彎強度試驗	42
圖3-22 鋼筋拉拔握裹試驗	43
圖3-23 資料擷取器	44
圖3-24 混凝土滲透試驗	45
圖3-25 RCPT試驗抽真空幫浦容器	47
圖3-26 壓克力材質的電位容器與銅網	47
圖4-1 試拌混凝土C210系列各式配比初終凝時間	51
圖4-2 試拌混凝土C280系列各式配比初終凝時間	52
圖4-3 驗證混凝土各式配比初終凝時間	52
圖4-4 試拌混凝土C210系列各式配比抗壓強度	56
圖4-5 試拌混凝土C280系列各式配比抗壓強度	56
圖4-6 驗證試驗混凝土C210系列各式配比抗壓強度	57
圖4-7 驗證試驗混凝土C280系列各式配比抗壓強度	57
圖4-8 驗證試驗混凝土C350系列各式配比抗壓強度	58
圖4-9 配比C210系列混凝土抗彎強度	60
圖4-10 配比C280系列混凝土抗彎強度	60
圖4-11 配比C350系列混凝土抗彎強度	61
圖4-12 無箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之載重—位移關係圖	70
圖4-13 有箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之載重—位移關係圖	70
圖4-14 不同飛灰含量對無箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之影響	71
圖4-15 不同飛灰含量對有箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之影響	71
圖4-16 C210F00握裹試驗結果	74

## 圖次

圖4-17 C210F25握裹試驗結果	75
圖4-18 C210F60握裹試驗結果	76
圖4-19 C280F00握裹試驗結果	77
圖4-20 C280F25握裹試驗結果	78
圖4-21 C280F60握裹試驗結果	79
圖4-22 C350F00握裹試驗結果	80
圖4-23 C350F25握裹試驗結果	81
圖4-24 C350F60握裹試驗結果	82
圖4-25 混凝土滲透率	84
圖4-26 飛灰摻量與混凝土總電荷量關係圖 (28天齡期)	87
圖4-27 飛灰摻量與混凝土總電荷量關係圖 (56天齡期)	87

# 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

## 表 次

表 2-1 各國國家標準規範要求飛灰之化學和物理性質	8
表 2-2 各國對飛灰混凝土的規範	9
表 2-3 CNS 3036 對飛灰的品質要求	10
表 2-4 典型不同煤礦來源所收集飛灰之化學成分	11
表 2-5 混凝土暴露於去冰鹽下對卜作嵐材料之限制量 (ACI 318-95)	12
表 3-1 飛灰化學成分與物理性質表	26
表 3-2 常重骨材基本性質	27
表 3-3 試拌試驗變數	27
表 3-4 試拌試驗混凝土配比 (1m <sup>3</sup> )	28
表 3-5 驗證試驗變數	29
表 3-6 驗證試驗混凝土配比 (1m <sup>3</sup> )	29
表 3-7 氯離子穿透性與 RCPT 總通過電量關係	48
表 4-1 試拌試驗混凝土新拌性質試驗結果	50
表 4-2 驗證試驗混凝土新拌性質試驗結果	51
表 4-3 試拌試驗混凝土抗壓強度	55
表 4-4 驗證試驗混凝土抗壓強度	55
表 4-5 混凝土抗彎強度	59
表 4-6 無箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (7 天齡期)	62
表 4-7 有箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (7 天齡期)	63
表 4-8 無箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (28 天齡期)	64
表 4-9 有箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (28 天齡期)	65
表 4-10 無箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (56 天齡期)	66
表 4-11 有箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (56 天齡期)	67
表 4-12 混凝土滲透試驗結果	84
表 4-13 飛灰混凝土 RCPT 總電荷試驗結果 (28 天齡期)	86

表 4-14 飛灰混凝土 RCPT 總電荷試驗結果 (56 天齡期)

## 摘要

關鍵詞：高飛灰摻量混凝土、握裹應力、耐久性

### 一、研究緣起

在鋼筋混凝土的設計中，鋼筋與混凝土間的握裹應力是設計上的重要考量因子，因為應力的傳遞是藉由握裹力來進行，良好的握裹應力為鋼筋混凝土安全設計的重要關鍵之一。為增進鋼筋與混凝土間的握裹品質，可於混凝土中加入飛灰，以改善鋼筋與混凝土間的界面強度，提升鋼筋與混凝土的握裹性能，惟現行規範對飛灰摻量的限制是否過於保守，若可增加飛灰摻量並仍保有鋼筋與混凝土間的握裹性能，將可減少水泥用量，達成綠色混凝土節能減碳的目標。

### 二、研究方法及過程

本研究於試拌試驗階段規劃2種抗壓強度高飛灰摻量混凝土( $210\text{kgf/cm}^2$ 及 $280\text{kgf/cm}^2$ )，5種飛灰取代水泥用量，分別為0%、25%、50%、60%及70%，抗壓試驗齡期有3天、7天、14天、28天、56天及90天，試驗項目有混凝土的坍度試驗、凝結時間試驗及抗壓強度試驗，之後依專家學者座談會建議增加混凝土強度等級，於後續鋼筋拉拔握裹及耐久性等驗證試驗規劃3種混凝土抗壓強度( $210\text{kgf/cm}^2$ 、 $280\text{kgf/cm}^2$ 及 $350\text{kgf/cm}^2$ )，3種飛灰取代水泥用量(0%、25%及60%)，2種鋼筋握拉拔裹試體(有圍束及無圍束)，試驗齡期有7天、28天及56天，探討高飛灰摻量的混凝土對鋼筋握裹應力的影響，並進行混凝土滲透試驗及快速氯離子滲透試驗，試驗齡期有28天及56天，解析高飛灰摻量混凝土的耐久性。

### 三、重要發現

高飛灰摻量混凝土由於飛灰摻量多，飛灰的性質及來源品質的穩定性影響化學藥劑(如高性能減水劑)效能發揮非常明顯，在配製此類混凝土須注意飛灰品質的管控及化學藥劑的選擇，並應進行試拌以確認混凝土各項性質符合設計需求。

由鋼筋拉拔握裹試驗結果可知，早齡期時(28 天以前)，無論有無圍束，握裹應力主要跟混凝土抗壓強度有較明確之關係，跟飛灰的摻量關係較不明顯；晚齡期時(28 天以後)，飛灰的卜作嵐反應提高了混凝土的緻密性及強度，使得握裹應力明顯增加，尤其在高含量飛灰(60%)的狀態下，不論箍筋有無圍束，此趨勢均相當明顯。

分析鋼筋拉拔握裹載重—位移關係發現，無圍束試體在載重達到極限握裹應力後的位移不大，但力量已大幅降低；有圍束試體在載重達到極限握裹應力時，鋼筋與混凝土產生明顯的相對位移，但試體未明顯開裂，極限強度後，雖有明顯位移，但力量下降幅度較為緩慢。含有較高飛灰摻量的混凝土，其極限狀態下的握裹應力也相對的提高，不論試體有無圍束，其結果均反應出此一現象。

混凝土滲透試驗方面，齡期 28 天時，混凝土試體滲透率有隨抗壓強度增加而減少的趨勢，受飛灰摻量影響的狀況則不明顯；齡期 56 天時，飛灰摻量的影響逐漸明顯，混凝土試體滲透率有隨抗壓強度及飛灰摻量增加而減少的趨勢，惟需注意飛灰摻量越多，混凝土抗滲透能力需於晚齡期才能有效發揮。

快速氯離子滲透試驗(RCPT)結果顯示，普通混凝土(未摻飛灰)隨設計強

度提高或齡期增長，對氯離子滲透通電量有降低的趨勢，不論 28 天或 56 天齡期，僅有配比 C350-F00 混凝土屬於中等滲透性，其餘配比組均有較高氯離子穿透性，顯示其耐久性較差。隨著飛灰摻量及齡期的增加，混凝土之抗氯離子滲透能力更為提升，惟飛灰摻量增加對抗氯離子滲透性之效果也隨之遞減。

#### 四、主要建議事項

根據高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究執行過程中的發現，本研究提出下列具體建議。以下分別從立即可行建議及長期建議加以列舉。

##### 建議一

研擬高飛灰摻量混凝土使用規範：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署

本研究及相關高飛灰摻量混凝土研究成果指出，經由合宜的配比設計可產製理想的高飛灰摻量混凝土，可證該類混凝土擁有實際應用的價值，惟國內尚未有相關使用規範可遵行，本研究已研擬該類混凝土使用規範建議草案，可供相關權責單位參考作為後續該類混凝土使用規範制定之參考。

##### 建議二

研發高飛灰摻量混凝土相關製品：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：臺灣電力股份有限公司綜合研究所

高飛灰摻量混凝土具有節能減碳、環保及再利用等眾多優點，可說是一

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

種綠色的混凝土，除可作為鋼筋混凝土的材料外，還可製作成各式混凝土製品，如屋瓦、地磚、透水混凝土等，若可進一步研究此類製品的配比設計、工程性質及耐久性，研發符合需求的產品，可有效減少水泥的用量並增加飛灰再利用的價值，亦可呼應政府推動綠建築、綠建材的政策，一舉數得。

## ABSTRACT

Keywords: high volume fly ash concrete, bond strength, durability

### 1. Purpose of Research

In the design of reinforcement concrete, the bond strength between reinforcing bar (BR) and concrete is an important design factor. Because the stress is transmitted by the bond between RB and concrete, the good quality of bond strength is important to design the reinforcement concrete successfully. In order to ensure the bonding quality between RB and concrete, adding fly ash to concrete could improve the interfacial strength between RB and concrete, improving the bond strength. However, whether the current regulations limit the amount of fly ash is too conservative. If the amount of fly ash can be increased and the bond performance between reinforcing bar and concrete is still maintained, the cement can be reduced. The goal of energy saving and carbon reduction of green concrete can be achieved.

### 2. Methodology and Process

In this study, two kinds of compressive strength of HVAC (210 kgf/cm<sup>2</sup> and 280 kgf/cm<sup>2</sup>) are designed to the trial mixing test, and five kinds of fly ash replaced cement dosage, which are 0%, 25%, 50%, 60% and 70%, the experimental ages of compression test are 3-day, 7-day, 14-day, 28-day, 56-day and 90-day. The experimental items have the tests for setting time, slump and compressive strength of concrete. Then, based on the test results and the

recommaditions of experts and scholars, it is increased one of concrete strength for test. Therefore, there are three kinds of compressive strengths (210 kgf/cm<sup>2</sup>, 280 kgf/cm<sup>2</sup> and 350 kgf/cm<sup>2</sup>) in the bond strength and durability tests, and three kinds of fly ash replaced cement dosage (0%, 25% and 60%), two types of bond specimens (with and without confinement), three test ages (7-day, 28-day and 56-day), to investigate the bond strength of RB and HVAC. The tests about the durability of concete include concrete permeability test and rapid chloride ion permeability test, and the ages are 28-day and 56-day.

### **3. Important Findings**

Due to the high amount of fly ash added in HVFAC, the properties of fly ash and chemical agent (such as High Range Water Reducer) affect obviously the performance of HVFAC. It is necessary to pay attention to control the qualities of fly ash and chemical agent for the designing of HVFAC. It should be tested to confirm that their properties meet the design requirements of HVFAC.

According to the results of pull-out test at the early age (before 28 days), regardless of bond specimens with confinement or not, the bond stress is mainly related to the compressive strength of concrete, however, it is not obvious related to the amount of fly ash. At the later age (after 28 days), the compressive strength and density of concrete increase by the increase of fly ash, resulting in a significant increase in the bond stress, especially in the case of high content of fly ash (60%), regardless of bond specimens with confinement or not.

The measured load versus slip relationship for pull-out test specimen shows that non-confined specimens have little related displacement after the load reaching the peak load, and the bond stress has been greatly reduced. The confined specimens have obvious related displacement between reinforcing bar and concrete when the load reaches to the peak load, and it does not appear obvious cracking yet. After peak load, the related displacement of specimen is still obvious, and the bond stress decreases slowly. The specimen containing larger amount of fly ash has higher ultimate bond stress at the peak load, no matter whether the specimen is confined or not.

In the water permeability test, the permeability of concrete specimen decreases with the increase of compressive strength at the age of 28-day. However, the phenomenon is affected by the amount of fly ash was not obvious. At the age of 56-day, the influence of fly ash is gradually obvious, and the permeability of concrete specimens decreases with the increase of compressive strength and fly ash. However, it should be noted that the concrete specimens with large amount of fly ash have the better impermeability in the later age.

The results of rapid chloride ion permeation test (RCPT) indicate that ordinary concrete (without fly ash) has a decrease amount of chloride ion permeation with the increase of compressive strength or age. Regardless of the ages of 28-day or 56-day, only the specimen C350-F00 has the better impermeability, and the other specimens have poor impermeability (low durability). As the amount of fly ash and the age increasing, the impermeability of concrete against chloride ion is further improved. However, the effect of increasing the amount of fly ash against chloride ion permeability

will also decrease.

#### **4. Major Recommendations**

1) Immediate implementation:

Sponsor Agency: Architecture and Building Research Institute,  
Ministry of the Interior

Co-sponsor Agency: Taiwan Power Company

The bond mechanism between HVFAC and RB involves many factors, such as the mechanic behavior of reinforced concrete, the diameter, the spacing and the number of reinforcing bar, and the quality of of fly ash must be also strictly controlled. In the further study, it can consider the production of reinforcement high volume fly ash concrete beams, and incorporate fly ash produced by different thermal power station to invesiate the bond behavior.

2) Long-term implementation:

Sponsor Agency: Architecture and Building Research Institute,  
Ministry of the Interior

Co-sponsor Agency: Architecture and Building Research  
Institute, Ministry of the Interior

HVFAC is a kind of green concrete. It has many advantages such as energy saving, carbon reduction, environmental protection and reuse. Besides being used as reinforcement concrete materials, it can also be made into various concrete products such as roof tiles, floor tiles and permeable concrete. If it can further study the mixing design, engineering properties and durability of these concrete products, which can effectively reduce the amount of cement and increase the reuse value of fly ash. It can also echo the government's promotion of green buildings and buinding materials.

## 第一章 緒論

### 1. 研究緣起

混凝土為現今最普遍的營建材料，人類的活動範圍內充滿著混凝土的產品，然而混凝土中的水泥在產製的過程非常耗能，每生產1噸的水泥，約產生0.9噸的CO<sub>2</sub>，對地球的環境造成嚴重的影響。近年已有許多研究針對高飛灰摻量混凝土進行探討，藉由大量添加飛灰取代水泥來拌製混凝土，降低水泥的使用量，使高飛灰摻量的混凝土成為一種節能環保的混凝土。由於相關研究目前尚止於開發高飛灰摻量混凝土的配比設計，並未探討該類混凝土與鋼筋間的握裹作用機理，為有效拓展高飛灰摻量混凝土的應用價值，使其可應用於鋼筋混凝土中，本計畫旨在進行高飛灰摻量混凝土之鋼筋拉拔試驗，探討飛灰取代水泥的用量對混凝土與鋼筋間握裹強度的影響。

### 2. 研究背景

鋼筋混凝土的設計中，混凝土與鋼筋間的握裹強度將決定鋼筋混凝土是否可安全使用的重要因素，現行鋼筋混凝土的設計是以混凝土的抗壓強度來推算混凝土與鋼筋間的握裹強度，不過自921大地震後，台灣有關鋼筋混凝土的設計都須考量耐震，是以各類鋼筋混凝土結構的鋼筋根數增加且排列更加密集，澆置混凝土的過程中，容易因施工品質不佳、震動搗實不足，造成混凝土與鋼筋間界面的水袋、氣孔過多，使混凝土與鋼筋間的握裹強度降低。

此外，隨著環保意識的抬頭，台灣在混凝土的節能、減碳及經濟性力求突破，產、官、學界推動相關研究多年，內政部建築研究所於民國98至101年分別辦理「綠混凝土性質與指標之研究」、「建築廢棄混凝土磚瓦再利用之

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

CO<sub>2</sub>減量效益評估之研究」、「永續混凝土材料之實驗開發與應用研究」及「使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究」等計畫，探討混凝土節能減碳後的各項力學性質及耐久性，研究成果豐碩。

近年來國內外有關混凝土節能、減碳的技術，逐漸朝高飛灰摻量混凝土的配比設計進行探討，對於飛灰取代水泥用量超過50%的高飛灰摻量混凝土已有不錯的研究成果產出，惟對於該類混凝土應用於鋼筋混凝土設計的研究尚未完整，本研究即針對高飛灰摻量混凝土與鋼筋混凝土間的握裹強度進行探討，以利拓展高飛灰摻量混凝土的應用範圍。

本研究流程規劃如圖 1-1 所示。

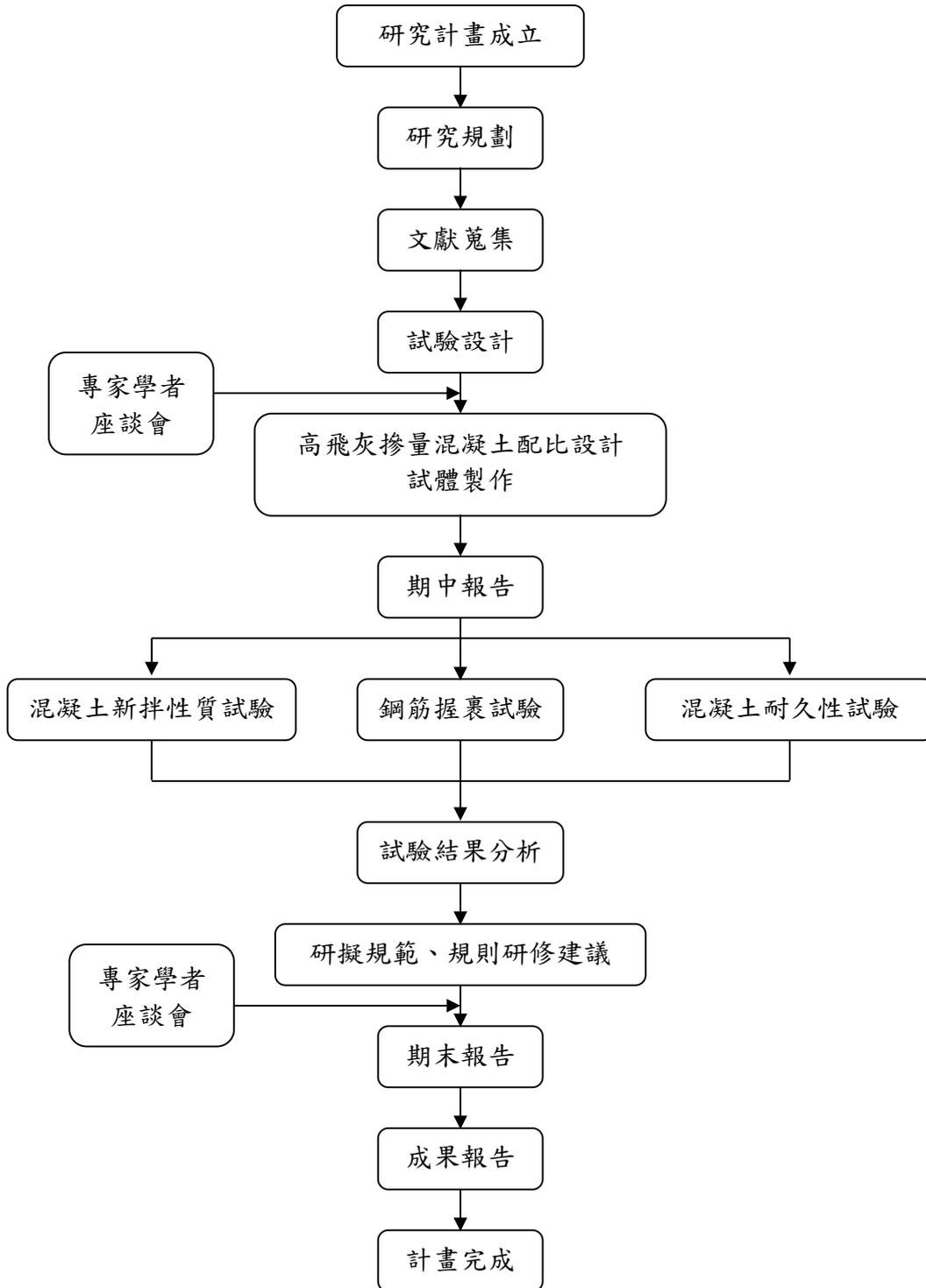


圖 1-1 研究流程圖  
(資料來源：本研究整理)

# 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

## 第二章 文獻回顧

### 第一節 飛灰混凝土的應用

#### 1. 飛灰的來源

臺灣目前於混凝土內摻用的飛灰，主要來自臺灣電力公司火力發電廠，其燃燒煤炭所剩下的灰燼視為「煤灰」。火力發電廠燃燒的煤炭會先經過磨成粉狀微粒在進行燃燒，稱為微飛燃燒方式，燃燒後約有 80%的灰燼會隨著燃氣上升，當煙氣循煙道流到靜電集塵器時，煙氣中的灰燼將被吸附下來，此部分的煤灰稱為「飛灰」；另一部分煤灰之粒徑較粗，重量較大，會直接掉到鍋爐底部則稱為「底灰」，底灰不適合使用於混凝土。飛灰從集塵器底部灰斗以壓縮空氣輸送到灰倉，以供外界利用。全世界每年由發電廠生產的飛灰量約 8000 萬噸，佔飛灰來源的總量的 90%以上[1]。

由於煤粉燃燒時，較細的顆粒會隨氣流流經燃燒區，立即熔融成水滴狀，經由空氣急速冷卻後就將熔融時因表面張力作用形成的圓珠形態保留下來，因此飛灰的顆粒形狀主要呈現玻璃球狀(圖 2-1a)，有些飛灰會形成非玻璃球體的多孔玻璃體(圖 2-1b)和燃燒未完整的碳粒(圖 2-1c)，兩者含量過多時會導致飛灰的需水量增大。

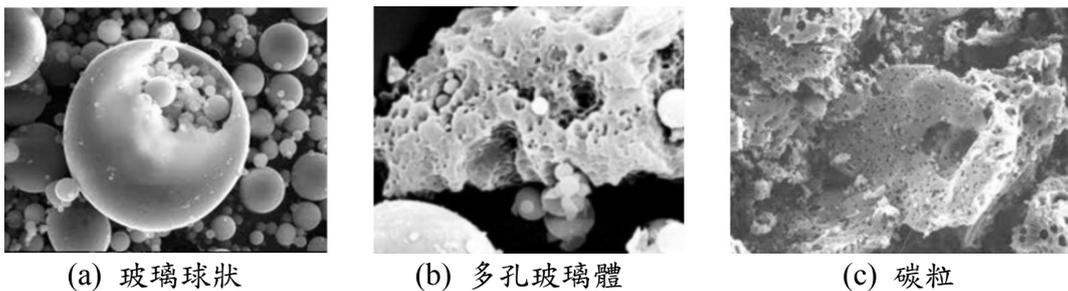


圖 2-1 飛灰的微觀結構

(資料來源：參考文獻[2])

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

飛灰的粒徑約為 0.4~100 $\mu\text{m}$ ，非常微小，比表面積約 2000~5000 $\text{cm}^2/\text{g}$ ，品質良好的飛灰呈玻璃球體，成分中約 85%以上是矽、鐵、鋁、鎂、鉀、鈉等的氧化物。自 1940 年末期起，飛灰就已經使用於混凝土工程及海中結構物。飛灰的比重比水泥輕，約為 2.0 至 2.5，細度也可能大於水泥，因此比表面積較大，拌合混凝土時的需水量會增多[1]。

由於大部分的飛灰屬於鹼性，摻入混凝土中會增加混凝土的鹼性。基於飛灰較細和球體外型，加入飛灰可改善新拌混凝土的工作性和泵送性；再者，以飛灰取代部分水泥有助於降低水泥水化反應產生的熱並增加其晚期強度，這種性質對水壩、大型基礎、橋墩和橋梁等巨積混凝土結構物相當重要[1]。

此外，由於飛灰本身的化學成分、微觀結構和顆粒型態等特徵，在取代部分水泥應用於混凝土結中可產生以下效應[2]：

### (1) 卜作嵐反應

水泥水化反應會生成弱相物質  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (氫氧化鈣)，飛灰在有水的狀態下可與氫氧化鈣反應，消耗氫氧化鈣並生成有強度的矽酸鈣 (C-S-H 膠體) 填充於氫氧化鈣原本占有的空間，減少混凝土與骨材及鋼筋界面的氫氧化鈣，使界面的水袋、孔隙變少，降低混凝土的孔隙率，提高混凝土的耐久性，改善混凝土中各項界面的品質，提升鋼筋混凝土整體的強度及耐久性。

### (2) 顆粒形態效應

飛灰顆粒大多為實心或空心玻璃球體，可在新拌混凝土中起「軸承效應」的作用，減少顆粒間的內磨擦阻力，使新拌混凝土的流動性比無添加飛灰的傳統混凝土來的好，具有減水作用。

### (3) 微集料效應

品質良好的飛灰其細度比水泥大，可均勻分布在水泥砂漿內，填充孔隙

和毛細孔，改善混凝土的孔隙結構，增加混凝土緻密性；同時，由於飛灰玻璃球體非常堅硬，在混凝土中可以減緩水泥漿體的收縮，降低混凝土的潛變。

綜合而言，加入飛灰於混凝土的優點可歸納成下列幾點：

- (1) 增加晚期強度
- (2) 降低混凝土溫度
- (3) 改善工作性及泵送性
- (4) 降低滲透性
- (5) 改善硫酸鹽抵抗性
- (6) 減少骨材鹼質反應

雖然飛灰取代部分水泥摻用於混凝土已行之多年，也從而發展出高強度混凝土、高流動化混凝土及高性能混凝土等，惟其取代水泥之比率較為保守，大致介於 15 ~ 25%之間[3-8]。臺灣目前已有關於高飛灰摻量混凝土的研究成果產生[9-13]，若能進一步探討高飛灰摻量混凝土應用於鋼筋混凝土的可行性，將有助於高飛灰摻量混凝土的推廣應用。

## 2 飛灰應用於混凝土之規範要求

目前行政院公共工程委員會施工綱要規範第 03050 章 V7.0 混凝土基本材料及施工一般要求之規定，有關飛灰之條文主要以 2.1.6 礦物摻料之品質要求為主，其內容(2)說明飛灰做為水泥摻料時，應符合 CNS 3036 之 F 類規定。使用時應經工程司事先核可，且飛灰量不得超過水泥重量之 25%。有關各國國家標準對飛灰規定的化學及物理性質要求如表 2-1 所列。

表 2-1 各國國家標準規範要求飛灰之化學和物理性質

	澳大利亞 A.S. 1129	加拿大 CAN3-A23.5-M82		印度 I.S. 3812 Pts. 1&2	日本 J.I.S. A6201	英國 B.S. 3892 Pts. 1&2	美國			蘇俄 GOST 6269-63	西德 DIN 1045	台灣		
		C 級	F 級				ASTM C618		聯邦政府 SS-C-1760/5			CNS 3036		CNS 11271
							C 級	F 級				C 級	F 級	
1. 化學性質														
SiO <sub>2</sub> , % (最大值)				35.0	45.0					40.0		50.0	70.0	45
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % (最大值)				70.0	70.0		50	70	70.0					
CaO, % (最大值)					6.0									
MgO <sub>2</sub> , % (最大值)				5.0	5.0	4.0	5.0*	5.0*	5.0			5.0	5.0	
SO <sub>3</sub> , % (最大值)	2.5			3.0	5.0	2.5	5.0	5.0	4.0			5.0	5.0	
有效鹼(以 Na <sub>2</sub> O 計), % (最大值)				1.5			1.5	1.5*	1.5*	3.0	4.0	1.5	1.5	
燒失量, % (最大值)	8.0			12.0	10.0	7.0	6.0	12.0	6.0	10.0	5.0	6.0	12.0	5
含水量, % (最大值)	1.5				3.0	0.5	3.0	3.0	3.0			3.0	3.0	1
2. 物理性質														
細度 停留 45μm 篩量, % (最大值)	50.0	34	34			12.5	34	34	34		**	34	34	34
比表面積 cm <sup>2</sup> /g, % (最大值)				3200	2700						***			2400
熱壓膨脹率, % (最大值)		0.8	0.8	0.8	0.8		0.8	0.8	0.8			0.8	0.8	
卜作嵐活性指數, 與卜特蘭水泥混合 28 天強度比, % 控制組 (最小值)		68(75*)	68(75*)			85*	75	75	75	85	70	75	75	75
與石灰混合 7 天強度 MPa (最小值)				4.0			5.5	5.5	6.2	5.5		5.5	5.5	
需水量, 控制組, % (最大值)					100	95	105	105	105	105		105	105	105
乾縮量, % (最大值)		0.03*	0.03*		0.15		0.03	0.03	0.03*					

\*任選需求；\*\* ≥ 50, ave ± 10 to 40μm；\*\* ≥ 2000, ave ± 500 (資料來源：參考文獻[1])

世界各國對混凝土用之飛灰品質有所要求，也均限制其使用範圍，惟仍有某些程度的差異性，如表 2-2 所示。美國 ASTM C618 及臺灣 CNS 3036 規範將飛灰分成兩類；即 C 類與 F 類飛灰，C 類飛灰之  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  至少要有 50% 以上，F 類飛灰則要有 70% 以上，如表 2-3 所示。經不同煤礦來源燃燒而成之飛灰若，其化學成分有明顯的差異，典型 C 類的褐煤灰、次煙煤灰及 F 類的煙煤灰， $\text{SiO}_2$  佔最多數量，如表 2-4 所示，其次  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  及  $\text{CaO}$  亦佔有不少的含量，只是此三種氧化物含量因燃煤的不同而有變動，其餘氧化物 ( $\text{MgO}$ ， $\text{SO}_3$ ) 含量的差距不大。臺灣進口的煤礦來源大都屬於煙煤，其  $\text{CaO}$  含量甚低，多在 10% 以下，屬於 F 類飛灰；飛灰之  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  總含量可超過 70%，晶相組織以矽鋁玻璃為主，同時由於融熔之飛灰球體無法快速且均勻地冷卻，導致部分矽鋁晶體，如石英、 $\text{SiO}_2$  (矽鎳石)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $2 \text{SiO}_2 \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3$  (莫來石) 等針狀形物質會混雜在飛灰球體內，嚴重影響低鈣質 F 類飛灰之活性。

表 2-2 各國對飛灰混凝土的規範

	Austria	Canada	India		Japan	Korea	Turkey	UK	U.S.
		classes F and C	1	2				BS 3892 Part 1	classes F and C
Pozzolanic index									
With cement (min. % of control, 28 d)	80	75	—	—	60	85	70	—	75
With cement (min. % of control, 7 d)	—	68	—	—	—	—	—	—	75
With lime (min. MPa)	—	—	4	3	—	5.6	—	—	5.5
Compressive strength (min. adjusted %, 7 and 28 d)	—	—	80 (28 d)		—	100	100	—	—
Water requirement (max. % of control)	—	—	—	—	102	105	105	95	105
Soundness									
Autoclave expansion (max. %)	—	0.08	—	—	—	0.5	—	—	0.8
Other tests	—	—	—	—	—	—	10 <sup>a</sup>	—	—
Drying shrinkage (max. %, 28 d)	—	0.03	0.15	0.1	—	—	—	—	—
Drying shrinkage (increase over control %)	—	—	—	—	—	0.03	—	—	0.03
Alkali reactivity (max. % expansion, 14 d)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02
Alkali reactivity (max. % redn. of expansion)	—	60	—	—	—	—	—	—	—

NOTE: From references 343, 344, and 345.

<sup>a</sup> Le Chatelier expansion test.

(資料來源：參考文獻[11])

表 2-3 CNS 3036 對飛灰的品質要求

	項目	限制標準	單位	C 類	F 類
化學成分	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	最小值	%	50.0	70.0
	三氧化硫 (SO <sub>3</sub> )	最大值		5.0	5.0
	燒失量 (L.O.I.)	最大值		6.0	6.0
	含水率	最大值		3.0	3.0
物理性質	細度 (停留在 No.325 篩量)	最大值		34.0	34.0
	卜作嵐活性指數	最小值		75.0	75.0
	高壓蒸鍋膨脹率或收縮率	最大值		0.8	0.8
	與控制組之需水量比率	最大值		105	105
	均質性規定：每個試樣比重及細度值與其 10 個試樣 (試樣不足 10 個時採全部試樣) 之試驗平均差異值： 1. 細度；檢驗篩 45μm 篩餘量 (CNS 386) 2. 比重	最大值		5	5
		最大值		5	5
任選規定	氧化鎂 (MgO)	最大值		5.0	5.0
	有效鹼量 (以 Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O 計算)	最大值		1.5	1.5
	複因數：燒失量與 45μm 篩篩餘量之乘積	最大值		—	255
	水泥砂漿柱體乾縮率 (齡期 28 天)	最大值		0.03	0.03
	與水泥含鹼成份之反應性：水泥砂漿柱體膨脹率 (齡期 14 天)	最大值	0.02	0.02	
	均質性規定：輸氣混凝土含氣量達水泥砂漿體積之 18% 時，輸氣劑量與前十次試驗結果 (不足十次時採全部試樣) 平均差異值	最大值	20	20	

(資料來源：參考文獻[11])

表 2-4 典型不同煤礦來源所收集飛灰之化學成分

化學成分	C 類飛灰		F 類飛灰
	褐煤灰	次煙煤灰	煙煤灰
二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> )	44.5	38.6	49.4
三氧化二鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18.3	19.2	23.5
三氧化二鐵 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.6	4.8	14.8
氧化鈣 (CaO)	18.1	24.2	1.2
三氧化硫 (SO <sub>3</sub> )	1.7	1.6	0.9
氧化鎂 (MgO)	4.4	4.1	1.0
燒失量	0.7	0.5	2.9
含水率 (%)	0	0.2	0.1

(資料來源：參考文獻[11])

由於飛灰之活性及水化反應速率皆不如卜特蘭水泥，若飛灰使用於混凝土中係以取代水泥為策略，則於配比設計時，在固定水膠比 (W/B) 條件下，勢必減少水泥的用量，這將會造成延長混凝土的凝結時間及降低早期強度。為了避免因摻用飛灰而影響混凝土品質及延誤施工進度，就需要設定飛灰的限制用量。目前混凝土工程常同時添加飛灰與水淬爐石粉二種卜作嵐材料，或採用混合不同比例之爐灰，該二者之合計用量對混凝土性質的影響須特別注意，例如混凝土暴露於去冰鹽環境時，其容許飛灰摻加量之規定如表 2-5 所示，其中飛灰添加仍須低於總膠結料量的 25%。

表 2-5 混凝土暴露於去冰鹽下對卜作嵐材料之限制量 (ACI 318-95)

膠結料名稱	佔總膠結料重量 (%膠結料重量)	標準規範
(1)飛灰或其他卜作嵐材料	25	CNS 3036
(2)爐石粉	50	CNS 12549
(3)矽灰	10	ASTM C1240
(4)=(1)+(2)飛灰或其他卜作嵐與爐石粉 總量 (飛灰需低於 25%總膠結料量)	50	CNS 3036 CNS 12549
(5)=(1)+(3) 飛灰或其他卜作嵐與矽灰 總量 (飛灰需低於 25%總膠結料量)	35	CNS 3036 ASTM C1240
註 1：總膠結材料重量包括水泥及各項膠結性礦物摻料之總重量。 註 2：表中之卜作嵐材料及爐石粉等重量是以總量計算，卜特蘭飛灰水泥或卜特蘭高爐水泥等混合水泥中所添加之膠結材料仍應受到總量之限制。若普通水泥中含飛灰或爐石粉時(一般含 5%)，其量亦受上述總量之限制。		

(資料來源：參考文獻[11])

## 第二節 混凝土與鋼筋的握裹行為

在複合材料的研究上以材料界面性質最為重要。就鋼筋混凝土而言，其強度與韌性已被證實與混凝土及鋼筋界面之握裹力有關[14]。因為混凝土承受張力強度的能力較差，混凝土構件所承受之張力主要由鋼筋混凝土界面之握裹力傳遞至鋼筋上，故沿著鋼筋和混凝土界面建立的轉換行為，為相關研究之重要基礎。

### 一、混凝土與鋼筋握裹力的原理

鋼筋混凝土結構物的應力傳遞是藉由的鋼筋與混凝土間的握裹力來進行，根據 ACI Committee 408[15]的定義，握裹力是鋼筋和混凝土間的黏結力(Adhesion)、摩擦力(Friction Resistance)、和鋼筋竹節的支承力(Rib Support)所共同組合的應力[16]。

上述各類應力所組成的握裹力作用方式如圖 2-2 所示，各應力作用的機理則說明如下：

#### (1) 鋼筋與混凝土間之化學黏結力 (Chemical Adhesion)

混凝土中水泥進行水化反應後，產生具有強度之水泥膠體反應物，並與鋼筋在界面上形成黏結效果，此即為握裹力之一部分構件承受低應力時，握裹抵抗主要由化學黏結力所提供，此種握裹抵抗力，大約在 200~300psi[28]之間。當鋼筋滑動時，此種有限的握裹抵抗力隨即消失，因此化學黏結力並非握裹力的主要來源[17-18]。

#### (2) 鋼筋與混凝土間之摩擦力 (Friction)

發生軸向相對運動時之抵抗力稱為摩擦力，一般鋼筋混凝土用鋼筋多為竹節鋼筋，表面粗糙且具有凹凸不平的紋路，當化學黏結力喪失，且鋼筋與混凝土間有輕微滑動發生時，握裹強度將轉由摩擦力及混凝土作用於鋼筋

凸緣所造成之卡榫力所共同提供。

### (3) 鋼筋與混凝土間之卡榫力

為鋼筋與混凝土之間的一種互鎖作用，此種抗力是由鋼筋上突出之環節與混凝土間之機械互制作用。此作用是構成握裹應力的最大來源，而摩擦力及化學黏結力則為次要因素[19]。

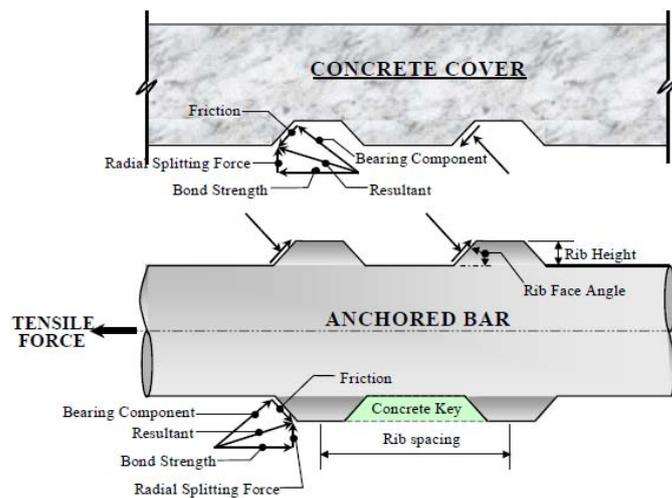


圖 2-2 握裹力的組成

(資料來源：參考文獻[20])

無竹節之光面鋼筋的握裹力，一般認為是由混凝土的水泥漿和鋼筋表面的黏結力所造成的。然而，鋼筋即使僅受到很低的張應力，也會發生明顯的滑動現象，造成鋼筋和混凝土間的黏結破壞，引起鄰近混凝土的碎裂，而僅整個滑動長度之摩擦力來抵抗鋼筋相對於周圍混凝土之移動。

竹節鋼筋的握裹強度較大，因為竹節與周圍混凝土增加支承力作用，此為握裹力的主要來源，而黏結力和摩擦力次之。鋼筋承受較低應力時，由黏結力提供主要的握裹力，隨著應力增加，可能在鋼筋與混凝土表面間

發生相對位移，造成黏結破壞，時候握裹力主要由摩擦力和支承力來提供 [21]。若繼續增加鋼筋的應力，使得鋼筋與混凝土面逐漸鬆脫，造成摩擦力消失，最後幾乎由支承力來傳遞握裹應力，直到竹節處之混凝土被局部壓碎或破裂，使其支承力消失而導致整體破壞。Edwards and Yannopoulos 的研究顯示 [22]，光面鋼筋的握裹強度約為竹節鋼筋的 35%~50%。

## 二、握裹力分析

Kemp [23] 曾在 LOK-TEST 試驗系統中得到壓力強度和拉拔荷重之間的線性關係。因此進行握裹強度試驗時必須先將壓力強度的條件控制成一致，以消除壓力強度變化對拉拔荷重之影響。

鋼筋的握裹分為兩種，即錨定握裹與撓曲握裹。錨定握裹力是以拉拔試驗求得之握裹力，僅考慮單一鋼筋與混凝土間的握裹行為，試驗上比撓曲握裹方便，故一般作鋼筋握裹力研究時，大多以錨定握裹的拉拔試驗進行研究與討論。考慮單一鋼筋的握裹力機制時，鋼筋在兩斷面間的內力變化量就是握裹力，其計算式如下 [24]：

$$u = \frac{q}{\Sigma_0} = \frac{\Delta f_s A_b}{\Sigma_0} = \frac{d_b}{4} \Delta f_s \quad (2-1)$$

其中：

$u$  = 握裹應力

$q$  = 鋼筋單位長度內的力量改變量

$\Sigma_0$  = 鋼筋單位長度的標稱表面積

$\Delta f_s$  = 鋼筋單位長度內應力的改變量

$A_b$  = 鋼筋斷面積

$d_b$  = 鋼筋標稱直徑

另外，鋼筋混凝土梁構件承受撓曲載重時，就會產生撓曲握裹行為，撓曲握裹的相較於錨定握裹，撓曲握裹的影響的因子較多，其握裹力分析也較為複雜。Orangun 等人於 1977 年根據水壓理論[25]，探討鋼筋混凝土梁之握裹應力分佈，從而發展出由鋼筋間距及保護層來判斷握裹力的破壞模式，並考慮鋼筋埋設長度、保護層、鋼筋間距、鋼筋尺寸、箍筋效應以及混凝土強度等參數，以非線性的迴歸方式，求出握裹力的計算公式：

$$u = \left( 1.2 + 3 \frac{C}{d_b} + 50 \frac{d_b}{l_s} + \frac{A_{tr} f_{yt}}{500 S d_b} \right) \sqrt{f'_c} \quad (2-2)$$

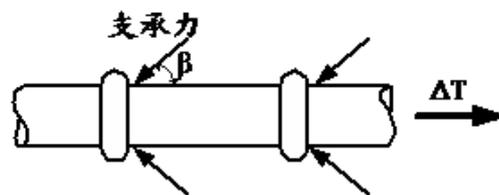
其中

$C$ = 保護層厚度	$d_b$ = 鋼筋直徑
$l_s$ = 鋼筋埋設長度	$A_{tr}$ = 箍筋面積
$f_{yt}$ = 箍筋降伏應力	$S$ = 鋼筋間距
$f'_c$ = 混凝土強度	

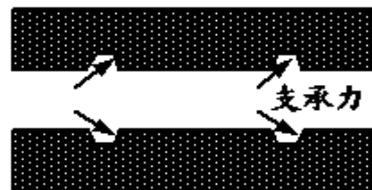
### 三、握裹的破壞模式

鋼筋混凝土的握裹破壞大致上可以分為兩類：側向劈裂破壞（Side-split failure）和剪力拉拔破壞（Shear pullout failure）[26]。鋼筋傳遞其應力至混凝土中的機構，主要源自於其竹節斜面上的支承力。鋼筋竹節的斜面與其主軸方向有一斜角，其支承力並分成兩個分力，如圖 2-3 所示。垂直鋼筋軸向的分力稱為徑向分力（Radial component），會造成鋼筋竹節凸緣推擠周圍緣混凝土，而使混凝土沿垂直鋼筋之方向產生劈裂的現象，稱為側向劈裂破壞。此破壞模式屬於脆性，其破壞所產生的裂縫除了發生在試體的受力量面上外，還會在側面出現裂縫。另一個沿鋼筋軸向的分力（Tangential

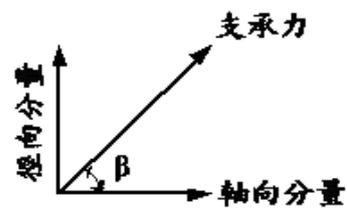
component)，是握裹力的主要來源，此軸向分力使得鋼筋竹節凸緣的混凝土被壓碎剪斷，鋼筋被抽出，而造成剪力拉拔破壞；破壞時產生的裂縫大部分在試體的受力面上。破壞一般發生在構件斷面較厚，保護層厚度大於2.5倍鋼筋直徑，及箍筋束制效應充分的情況。



(a) 支承力作用在鋼筋



(b) 支承力作用在混凝土



(c) 支承力在混凝土上的分量

圖 2-3 鋼筋與混凝土間的支承力  
(資料來源：參考文獻[27])

## 二、飛灰摻量對混凝土與鋼筋間握裹強度的影響

剛澆置完成的鋼筋混凝土結構，易於因搗實不確實及混凝土的泌水，於鋼筋下方形成水袋，不利於混凝土與鋼筋間的界面強度，適當摻入飛灰於混凝土中，則可減緩混凝土的泌水現象，改善混凝土與鋼筋間的界面強度。

文獻[28]設計高飛灰摻量混凝土進行鋼筋握裹強度試驗，研究結果顯示，高飛灰摻量混凝土與鋼筋的握裹強度可達自充填混凝土等級，且頂筋效應較一般常重混凝土不明顯。文獻[29]添加飛灰、爐石粉等卜作嵐材料於混凝土，探討卜作嵐材料用量對握裹強度的影響，研究成果指出，因晚齡期的卜作嵐反應，添加補作嵐材料有助於提高鍍鋅鋼筋的握裹強度。

文獻[30-31]設計飛灰取代量 70%水泥用量的兩種混凝土配比，膠結料分別為  $502 \text{ kg/m}^3$  及  $337 \text{ kg/m}^3$ ，製作 18 組鋼筋拉拔試體及 9 組實尺寸梁試體，進行鋼筋握裹強度試驗，結果顯示高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度優於一般常重混凝土者。文獻[32]採用 70%飛灰摻量的混凝土進行鋼筋拉拔試驗(pull-out test)，研究結果指出，高飛灰摻量混凝土的鋼筋握裹強度與一般混凝土者差異不大，高飛灰摻量混凝土則出現較多的鋼筋拉拔劈裂破壞。

文獻[33]設計飛灰取代水泥用量的 0%、20%、30%、40%、50%及 60% 共 6 種混凝土配比，製作 54 支握裹拔出立方試體和 36 支抗壓立方試體進行試驗，評估飛灰摻量對混凝土與鋼筋間黏結強度的影響。研究成果指出，高飛灰摻量混凝土與鋼筋的握裹-滑移曲線圖與一般鋼筋混凝土者相似，在不考慮飛灰取代率及相同鋼筋直徑狀況下，將實驗所得數據進行回歸分析，經由分析結果提出修正的握裹強度模型和握裹-滑移關係模型，可用以推估高摻量粉煤灰混凝土和鋼筋間的握裹行為。

### 第三節 飛灰混凝土的耐久性

一般混凝土內部會有氫氧化鈣存在，氫氧化鈣無強度，遇水會溶解析出，形成白華現象，影響混凝土的美觀及使用性，氫氧化鈣析出後所留下的孔隙也會降低混凝土的強度及耐久性。若添加適量的卜作嵐材料，如飛灰，取代部分的水泥製作混凝土，飛灰與氫氧化鈣在有水的狀況下可進行反應，生成具有強度膠體，填充氫氧化鈣原本的孔隙，增加混凝土的緻密性，提高混凝土的強度。

國內有關飛灰對混凝土耐久性的影響有不少研究成果產出，惟有關高飛灰摻量混凝土耐久性研究的成果仍不多，文獻[34]規劃三種耐久性試驗，評估不同飛灰取代率混凝土之耐久性質，飛灰取代率最高達 60%，耐久性試驗包含快速氯離子滲透試驗、加速中性化試驗與混凝土透水試驗，研究結果指出，隨飛灰取代率的提高，逐步降低水膠比之配比設計方法有助於降低混凝土的滲透性質，在飛灰取代率為 20~50%之範圍可有效降低混凝土之滲透性，當飛灰取代率過高反而有增加混凝土滲透性之現象。而在抗中性化能力方面，隨著飛灰取代率提高其中性化反應越明顯，水泥含量低、飛灰含量高之混凝土抗中性化能力不佳，而降低水膠比與提高膠體量之配比設計能提高飛灰混凝土抵抗中性化之能力。

文獻[35]針對不同水膠比(0.3、0.4、0.5、0.6、0.7)，及不同飛灰含量(0%、20%、40%、50%、60%、80%)，製作混凝土試體並進行抗壓強度、超音波速度、孔隙比、比重及吸水率、表面電阻率、及快速氯離子滲透試驗，以探討飛灰含量對混凝土強度與耐久性的影響，並找出抗壓強度及耐久性較佳之飛灰含量。抗壓強度試驗結果顯示，早期(齡期 7 天及 28 天)飛灰混凝土抗壓強度皆比純水泥混凝土低。晚期強度(齡期 1 年及 1.5 年)各配比最大混凝土抗壓強度之飛灰含量隨水膠比增加而增加之趨勢，介於 17.24%~25.17%之間。各水膠比快速氯離子滲透試驗顯示，氯離子累積電荷量皆與飛灰含量呈現出

二次拋物線之趨勢，在限定累積電荷量於 1000 庫倫~4000 庫倫以下時可找出各配比之飛灰含量範圍，並與各配比抗壓強度最大時之飛灰最佳含量，以交集方式取得同一配比下符合需求抗壓強度及耐久性較佳之飛灰含量。

文獻[36]探討飛灰混凝土於快速氯離子滲透試驗(RCPT)時之電量評估標準，提出評估飛灰混凝土調整電量之辦法。試驗方式有四種，有快速氯離子滲透試驗(Rapid chloride penetration test: RCPT)、氯離子非穩態傳輸係數試驗(Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments: RCM)、加速氯離子滲透試驗(Accelerated chloride migration test: ACMT)及貯鹽試驗(Ponding test)。試驗結果顯示混凝土試體養護齡期 91 天後，飛灰混凝土於飛灰取代量 40%以下，對表面氯離子含量、總氯離子含量、滲透深度、傳輸係數、擴散係數和電量均比無添加飛灰混凝土佳，抵抗氯離子侵入有良好的效益。

另有研究成果同時摻入爐石及飛灰兩種卜作嵐材料取代部分水泥拌製混凝土，探討混凝土的耐久性。文獻[37]配製含有飛灰和爐石兩種卜作嵐材料的混凝土進行試驗，結果指出摻有卜作嵐材料的混凝土具有較佳的力學性質及較低的，在相同取代量下，飛灰與爐石粉混合取代水泥之混凝土不管是抗壓強度、電荷通過量、擴散係數、電阻率及吸水率等均優於單以飛灰取代水泥之混凝土。水灰比相同而水泥用量不同時，混凝土之孔隙隨水泥用量降低而增加；當粗骨材粒徑較大時，混凝土之氣體滲透係數與氯離子擴散係數也相對增加。

文獻[38]鑽研不同卜作嵐材料添加方式對於混凝土力學性質、物理性質及耐久性質之影響，試驗項目包括抗壓試驗、電阻量測試驗、吸水率試驗、氣體滲透試驗、氯離子擴散試驗及腐蝕試驗等。研究結果顯示，添加卜作嵐材料之混凝土圓柱試體的抗壓強度皆提高，其中以爐灰組(20%飛灰+20%爐石)為最佳，高出控制組約 30~40%，且電阻係數提高、吸水率降低、氣體滲透係數降低。氯離子擴散係數，添加卜作嵐材料之混凝土圓柱試體皆低於控

制組，以爐灰組(10%飛灰及 40%爐石)為最佳。腐蝕速率，在高水膠比 0.60 時，添加卜作嵐材料之混凝土圓柱試體皆低於控制組且以飛灰組(10%)為最佳，但在水膠比 0.45 及 0.35 時，只有飛灰組低於控制組。

文獻[39]利用加速氯離子穿透試驗，探討礦物摻料取代水泥重量之混凝土耐久性研究，藉此相關性找出適當之取代重量百分比，並以抗壓強度試驗為佐證，試驗變數包含水膠比(0.35、0.45、0.55、0.65)與礦物摻料用量為替代水泥重量百分比 0~55%之間。試驗結果顯示，混凝土中添加礦物摻料可以降低氯離子穿透速率。飛灰取代量為 25%時，氯離子穿透係數最小，水淬爐石粉添加 45%替代水泥重量之混凝土穿透係數最小，並將飛灰混凝土與爐石混凝土配比之穿透係數進行回歸分析，於各水膠比下得到最高之飛灰與爐石取代量且穿透係數值為最低。飛灰混凝土中水膠比與穿透係數之線性關係斜率值，得知飛灰用量 25%在水膠比變化影響最小；而爐石混凝土中水膠比與穿透係數之線性關係斜率值，得知爐石用量 55%在水膠比變化影響最小。最後以兩者礦物摻料取代水泥重量之混凝土穿透係數與抗壓強度進行比較，得知爐石取代量 35%水泥重量之後抵抗氯離子能力比飛灰混凝土好，而抗壓強度與穿透係數並無一定關係，故不適宜用抗壓強度評估混凝土之耐久性。

文獻[40]以飛灰混凝土進行快速氯離子滲透試驗、氯離子濃度量測及抗壓強度試驗，研究成果指出，飛灰顆粒較水泥小，因此會改變原有的孔隙細結構，同時也會消耗內部的氫氧根離子，在快速氯離子滲透試驗過程中，總電量會大幅的下降，並利用對照組與飛灰組在綜合試驗結果的差異，設計出調整電量的方法，由調整係數的結果來看，影響調整係數大小的因子有三點：養護齡期、水膠比、以及飛灰取代量，且在取代量上有一定的範圍限制，當飛灰取代量 50%、水膠比為 0.55~0.65 時，在總電量、總氯離子含量以及穿透深度都有偏高的趨勢，表示飛灰取代水泥過多會導致結構的不穩定，最後由各項實驗結果來看，當飛灰取代水泥在 30%~40%時，由各項試驗數值所反應的結果最為良好。

#### 第四節 國內外有關本案之研究情況

國內對於高飛灰摻量混凝土的研究甚多，但多為高摻量飛灰混凝土材料的工程性質報告[9-13]，對其握裹性質的研究也未採用高摻量飛灰混凝土[20, 28-29]。至於高摻量飛灰混凝土的實際應用案例不多，其中，中興工程顧問社為推動國內混凝土技術之提昇，並配合全球節能減碳之趨勢，將高飛灰摻量混凝土應用於2011年新建中興工程研究大樓(如圖2-4所示)的連續壁單元及基礎版，連續壁混凝土的設計強度為 $310\text{kgf/cm}^2$ ，基礎版部分則為 $280\text{kgf/cm}^2$ ，水泥與飛灰的使用量均是1:1，是臺灣目前第一個高飛灰摻量混凝土應用的案例[41-42]，該大樓同時取得綠建築與智慧建築標章，可說是從建築材料到使用設計均融入環境保護的概念。



圖 2-4 中興工程研究大樓

(資料來源：臺灣室內設計雜誌，<https://taiwaninterior.blogspot.com/>)

國外對於高飛灰摻量混凝土的應用案例甚多，應用於公共工程者，如美國佛羅里達州陽光高架跨海大橋、日本明石大橋橋墩、英國蓋威克機場跑道等，不甚枚舉，以下僅針對高飛灰摻量混凝土應用於建築建構的案例進行說明：

### 1. 美國猶他州議會會堂

美國猶他州議會會堂(圖 2-5)新建時，使用  $4,500\text{m}^3$  的高飛灰摻量混凝土於地基，梁和剪力牆，減少約 900 噸  $\text{CO}_2$  的排放，其水泥與飛灰的使用量為 4：5，水膠比為 0.36，設計強度為 27 MPa。



圖 2-5 猶他州議會會堂  
(資料來源：維基百科，<https://zh.wikipedia.org>)

### 2 美國加州柏克萊大學社會發展前瞻科技研發中心

社會發展前瞻科技研發中心(CITRIS Building，圖 2-6)新建時，使用  $7000\text{ m}^3$  高飛灰摻量混凝土於地基、剪力牆和柱，減少  $\text{CO}_2$  約 1400 噸的排放，其水泥與飛灰的使用量為 1：1，水膠比為 0.35 ~ 0.37，坍度為 150 ~ 200 mm，7 天設計強度為 20MPa、28 天為 30MPa、56 天為 40MPa、90 天為 50MPa。



圖 2-6 加州柏克萊大學社會發展前瞻科技研發中心  
(資料來源：柏克萊大學網站，<http://www.berkeley.edu/map>)

### 3 大陸北京中央電視台總部大樓

北京中央電視台總部大樓(圖 2-7)新建時，使用水泥與飛灰用量 1：1 的高飛灰摻量混凝土於巨積混凝土的配比，水膠比取 0.36，搭配強塑劑控制坍度在 20~22cm。



圖 2-7 北京中央電視台總部大樓  
(資料來源：維基百科，<https://zh.wikipedia.org>)

### 4 加拿大哈利法克斯 Purdy's Wharf 大樓

Purdy's Wharf 大樓(圖 2-8)使用飛灰取代水泥用量 55%的高飛灰摻量混凝土，應用於 62 座大型混凝土沉箱，支撐 22 層高的辦公大樓。



圖 2-8 Purdy's Wharf 大樓  
(資料來源：維基百科，[https://en.wikipedia.org/wiki/Purdy%27s\\_Wharf](https://en.wikipedia.org/wiki/Purdy%27s_Wharf))

### 第三章 試驗規劃

#### 第一節 試驗材料

本研究所使用之各種試驗材料及其性質如下所列：

1. 水：一般自來水，符合 CNS 拌合水的要求。
2. 水泥：使用台灣水泥公司所生產的 Type I 普通水泥，其性質符合 CNS 61 的要求。
3. 飛灰：使用台中火力發電廠所生產的 F 級飛灰(圖 3-1)所示，其基本性質試驗結果如表 3-1 所示。
4. 粗細骨材：採用天然砂石，粗、細骨材之各項基本性質試驗結果列於表 3-2 中。
5. 強塑劑 A：混凝土試拌試驗採用漢鴻實業股份有限公司提供之高性能混凝土減水緩凝劑 CSC-700F，由羧酸聚合物與多種表面活性物質所組成，比重為  $1.05\pm 0.03\text{g/cm}^3$ ，固成分為  $18\pm 3\%$ ， $\text{pH}=7\pm 3$ ，符合 ASTM C494 及 CNS 12283 中 F 型規範。
6. 強塑劑 B：驗證試驗，如抗彎試驗、鋼筋握裹試驗、滲透試驗及快速氯離子滲透試驗等，所拌製的混凝土採用啟欣公司生產的 HICON HPC 1000 作為強塑劑，符合美國 ASTM C494 TYPE-D 之規範，顏色為深褐色，PH 值為  $7\pm 1$ ，比重 1.1，固體成份  $42\pm 2\%$ 。

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究



圖 3-1 台中火力發電廠所生產的 F 級飛灰  
(資料來源：本研究整理)

表 3-1 台中火力發電廠 F 級飛灰化學成分與物理性質

試驗項目	CNS3036 規範 (%)	試驗結果 (%)	
1. SiO <sub>2</sub>	Min. 70.0	50.00	85.39
2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		28.41	
3. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6.98	
4. SO <sub>3</sub>	Max. 5.0	0.47	
5. 含水量	Max. 3.0	0.13	
6. 燒失量	Max. 6.0	4.62	
7. 有效鹼 (as Na <sub>2</sub> O)	Max. 1.5	0.18	
8. Na <sub>2</sub> O	---	0.09	
9. K <sub>2</sub> O	---	0.13	
10. CaO (容量法)	---	5.99	
11. MgO (容量法)	---	1.39	
1. 密度 g/cm <sup>3</sup>	---	2.31	
2. 細度 (No.325 濕篩法) %	Max. 34	13.24	
3. 卜特嵐活性指數 (7 天) %	Min. 75	86.78	
卜特嵐活性指數 (28 天) %	Min. 75	97.84	
4. 需水量控制 %	Max. 105	96.69	
5. 健度 (熱壓膨脹試驗) %	Max. 0.80	0.056	

表 3-2 常重骨材基本性質

骨材種類 基本性質	六分石	三分石	砂
比重 (SSD.)	2.61	2.60	2.60
吸水率 (24h)	1.05%	1.31%	1.9%
F.M.	-	-	2.20
乾搗單位重 (六分、三分各半)	1470 kg/m <sup>3</sup>		-

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 混凝土配比

本研參照 ACI 211.1-91 規範建議，採用絕對體積法來計算各項材料的單位體積(1m<sup>3</sup>)用量，為了解高飛灰摻量對混凝土抗壓強度的影響，本研究參考文獻[11]規劃 5 種飛灰取代水泥量(重量取代)，分別為 0%、25%、50%、60%及 70%，混凝土設計抗壓強度為 210kgf/cm<sup>2</sup>及 280kgf/cm<sup>2</sup>，試驗齡期為 3 天、7 天、14 天、28 天及 56 天，試體製作完成後放置於養護池中養護至試驗齡期時取出進行抗壓強度試驗。混凝土試體的試驗變數如表 3-3 所示，試拌混凝土配比則如表 3-4 所示。

表 3-3 試拌試驗變數

設計強度	飛灰取代水泥量	齡期(天)
210 kgf/cm <sup>2</sup>	0%	3 天
	30%	7 天
	50%	14 天
280 kgf/cm <sup>2</sup>	60%	28 天
	70%	56 天
		90 天

(資料來源：本研究整理)

表 3-4 試拌試驗混凝土配比 (1m<sup>3</sup>)

試體標號	W/B	水	水泥	飛灰	細骨材	粗骨材	強塑劑 A
		kg					
C210-F00	0.72	202	280	0	780	1000	0
C210-F25	0.64	179	210	70	790	1020	0.5
C210-F50	0.45	126	140	140	810	1110	3
C210-F60	0.44	124	112	168	820	1100	3.9
C210-F70	0.38	106	84	196	830	1130	4.2
C280-F00	0.60	204	340	0	740	980	0
C280-F25	0.53	180	255	85	750	1000	0.8
C280-F50	0.40	136	170	170	770	1070	2.8
C280-F60	0.37	124	136	204	780	1080	3.3
C280-F70	0.28	95	102	238	800	1120	4.9

編號說明：以 C280-F50 為例，C280 代表混凝土抗壓強度為 280kgf/cm<sup>2</sup>，F50 代表飛灰取代水泥用量的 50%。

強塑劑的含水量不計入配比用水量。

(資料來源：本研究整理)

此外，參考本計畫第一次專家學者座談會與會學者意見，因水泥用量較多時，高飛灰摻量對於混凝土強度的貢獻較為明顯，可增加一組較高強度的混凝土作為實驗變數，故本研究參考試拌試驗結果於握裹驗證試驗規劃 3 種飛灰取代水泥量(重量取代)，分別為 0%、25%及 60%，混凝土設計抗壓強度為 210kgf/cm<sup>2</sup>、280kgf/cm<sup>2</sup> 及 350kgf/cm<sup>2</sup>，試驗齡期為 7 天、28 天及 56 天，混凝土滲透及快速氯離子滲透等耐久性試驗亦製作三種強度試體進行試驗，試驗齡期有 28 天及 56 天。混凝土試體的試驗變數如表 3-5 所示，驗證試驗混凝土配比如表 3-6 所示。

表 3-5 驗證試驗變數

設計強度	飛灰取代 水泥量	抗壓、握裹及抗彎 試驗齡期	滲透及氯離子滲透 試驗齡期
210 kgf/cm <sup>2</sup> 280 kgf/cm <sup>2</sup> 350 kgf/cm <sup>2</sup>	0%	7 天 28 天 56 天	28 天 56 天
	50%		
	60%		

(資料來源：本研究整理)

表 3-6 驗證試驗混凝土配比 (1m<sup>3</sup>)

試體編號	W/B	水泥	飛灰	細骨材	粗骨材	水	強塑劑 B
		kg					
C210-F00	0.72	280	0	780	1000	202	0.0
C210-F25	0.64	210	70	790	1020	179	0.5
C210-F60	0.44	112	168	820	1100	124	3.9
C280-F00	0.60	340	0	740	980	204	0.4
C280-F25	0.53	255	85	750	1000	180	0.8
C280-F60	0.36	136	204	780	1080	124	3.3
C350-F00	0.42	450	0	850	850	189	4.5
C350-F25	0.38	338	113	850	850	171	4.5
C350-F60	0.28	180	270	875	875	126	7.4

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 試體模具製作

為解析高飛灰摻量對混凝土與鋼筋間握裹強度的影響，本研究利用試拌完成的各組配比拌製高飛灰摻量混凝土，以鋼製模具製作 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 圓柱抗壓試體及方形抗彎試體(圖 3-2)、PVC 塑膠圓環製作 $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ 和 $\phi 150\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的滲透試驗及快速氯離子檢測試體，如圖 3-3 所示。

握裹試體模具以鋼模製作，為邊長 150mm 的立方體，模具前後側中央開一孔洞，可穿入一根長 1000mm 之#7 竹節鋼筋做為拉拔試驗用鋼筋(圖

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

3-4)，以配合萬能試驗機之運作，試體依照握裹破壞之類型，將規畫之試體分為無箍筋圍束跟有箍筋圍束兩種，如圖 3-5 所示。

無箍筋圍束之鋼筋拉拔試體，其握裹強度純粹由混凝土保護層的厚度所提供，試體斷面積為 150mm×150mm，扣除掉#7 鋼筋直徑，其淨保護層厚度約為 3 倍鋼筋直徑。有箍筋圍束之鋼筋拉拔試體，在其#7 鋼筋周圍，距混凝土表層約 25mm 處，以#3 鋼筋綁成鋼筋籠(圖 3-6)加以圍束，其握裹強度由混凝土保護層厚度及箍筋圍束所共同提供，試體模具。



圖 3-1 抗壓試驗試體模具(左)及抗彎試驗試體模具(右)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-3 氯離子滲透試驗模具(左)及滲透試驗模具(右)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-4 鋼筋握裹試體模具  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-5 圍束(左邊)與無圍束(右邊)握裹試體模具  
(資料來源：本研究整理)

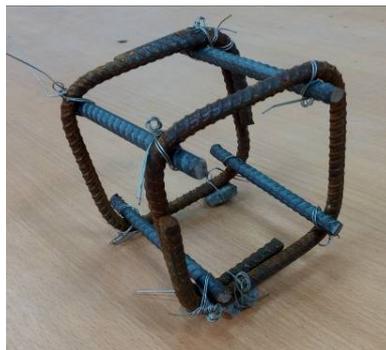


圖 3-6 圍束用之鋼筋籠  
(資料來源：本研究整理)

#### 第四節 混凝土拌製及澆置

試驗式體模具備齊後，依前述計算所得混凝土配比，利用強制式水平雙軸拌和機拌製混凝土，其拌和之方法及程序如下：

1. 將水泥及砂置入拌合容器內，充分乾拌以達均勻。
2. 將水(強塑劑先行與水充分攪拌均勻)倒入拌和容器內，啟動拌和機，拌和三十秒鐘。
3. 停止拌和機十五秒鐘，於此時間將容器側壁可能附著之水泥漿刮入拌合容器。
4. 開動拌和機，拌合一分鐘。
5. 停止拌和機十五秒鐘，於此時間將粗骨材倒入拌和容器內。
6. 開動拌和機，拌和一分鐘。

混凝土拌合完成後，取出一部分試料做坍度試驗(圖 3-7)，其餘澆置圓柱試體，混凝土分兩層澆置並以振動棒夯實之，製作抗壓試體(圖 3-8)、握裹試體(圖 3-9)、抗彎試體(圖 3-10)、氯離子滲透試驗及透水試驗試體(圖 3-11)，所剩混凝土利用#4 篩網將粗骨材篩除後，進行混凝土初終凝試驗。各式試驗試體拆模後浸泡於飽和石灰水內(圖 3-12)，待達試驗齡期時進行試驗。



圖 3-7 混凝土坍度試驗  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-8 抗壓試驗試體  
(資料來源：本研究整理)

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究



圖 3-9 抗彎試驗試體

(資料來源：本研究整理)



圖 3-10 滲透試驗試體(左)及氯離子滲透試驗試體(右)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-11 篩除粗骨材

(資料來源：本研究整理)

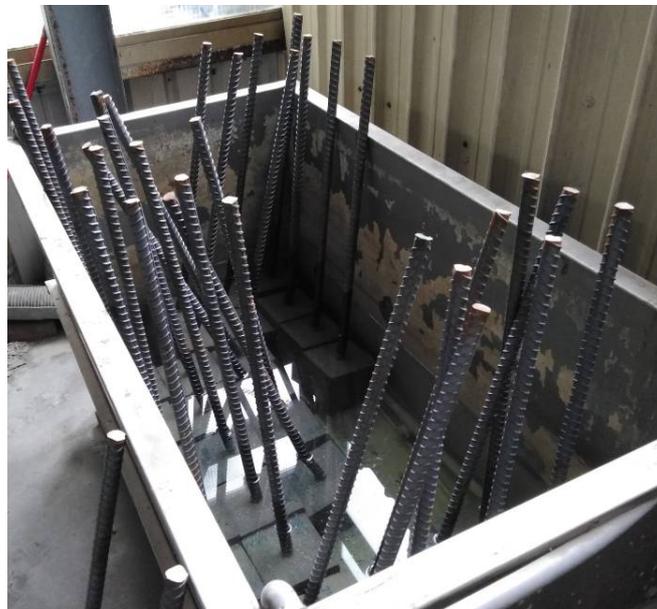


圖 3-12 試體養護

(資料來源：本研究整理)

## 第五節 試驗設備及試驗方法

### 1. 試驗設備

本研究在混凝土配比試拌試驗，以及後續需進行的握裹試驗、快速氯離子穿透試驗和滲透試驗，主要使用的試驗儀器設備說明如下：

- (1) 強制式水平雙軸拌和機：採用水平雙軸交叉拌合式，每軸具四支攪拌翼，最大拌合量約  $0.1\text{m}^3$ ，如圖 3-13 所示。
- (2) 萬能試驗機：最大載重為 180 噸，可以位移控制或力量控制加載，如圖 3-14 所示。上下夾具共有四種不同尺寸，可以依照實驗需求進行更換。本設備主要用以進行鋼筋握裹及抗彎試驗。
- (3) 抗壓試驗機：最大載重為 200 噸，以力量控制加載，用來試驗混凝土的抗壓強度，如圖 3-15 所示。
- (4) 快速氯離子穿透試驗儀器：試驗儀器如圖 3-16 所示，搭載 60V 直流電壓，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量，以混凝土導性的做為評估抗氯離子入侵能力的快速指標。
- (5) 加壓透水試驗儀：試驗儀器如圖 3-17 所示，可施加水壓力為  $0\sim 50\text{ kgf/cm}^2$ 。
- (6) 混凝土初終凝試驗儀：試驗儀器如圖 3-18 所示。
- (7) 掃描式電子顯微鏡(SEM)：試驗儀器如圖 3-19 所示。



圖 3-13 強制式水平雙軸拌和機

(資料來源：本研究整理)



圖 3-14 萬能試驗機

(資料來源：本研究整理)



圖 3-15 抗壓試驗機  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-16 快速氣離子穿透試驗儀  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-17 透水試驗儀  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-18 混凝土初終凝試驗儀  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-19 掃描式電子顯微鏡

(資料來源：本研究整理)

## 2. 試驗方法

### (1) 圓柱抗壓強度試驗

試拌配比混凝土試體於 3、7、14、28、56 及 90 天齡期時，依 CNS 1232 「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」之規定進行抗壓試驗，驗證試驗之抗壓強度則於齡期 7、14、28 及 56 天時進行，如圖 3-20 所示。試驗步驟說明如下：

- (a) 將混凝土試體從養護室取出放置陰涼處風乾後在進行試驗。
- (b) 先把試體底部清理乾淨，放到蓋平桌上。
- (c) 將石膏加水拌勻，倒到試體的頂部，蓋上玻璃片並放置水準氣泡，使試體頂面維持水平。
- (d) 等大約 15 分鐘石膏乾後，將玻璃片拆除。

- (e) 將圓柱試體的軸心置於萬能試驗機上承壓軸的正中心處，加壓速率保持 150 kg/sec，試驗至試體破壞為止，記錄所受之最大載重，該載重除以受壓面積即為該混凝土之抗壓強度。



圖 3-20 混凝土抗壓強度試驗

(資料來源：本研究整理)

## (2) 抗彎試驗

試驗前將試體取出晾乾，於試體上畫線標示支承的間距(30cm)，再將作為載重點之鋼棒(間距 10cm)以樹脂黏貼於試體上方，以三分點載重方式加載 (ASTM C78，混凝土撓曲強度之標準試驗法)，如圖 3-21 所示。梁試體將於最大彎矩斷面處產生撓曲裂縫而破壞，得到破壞載重後再利用撓曲公式計算出抗彎強度。



圖 3-21 混凝土抗彎強度試驗

(資料來源：本研究整理)

### (3) 握裹強度試驗

試驗齡期為 7、28 及 56 天，依 CNS 11152「根據鋼筋混凝土握裹力比較混凝土性能試驗法」之規定進行鋼筋拉拔試驗，握裹試體安裝如圖 3-22 所示。將兩個 LVDT (100 mm) 放置在萬能試驗機左右兩側柱子上，之後再將 LVDT 測針頂住於固定在竹節鋼筋上的鐵片，測針及鐵片應保持垂直及水平，另一支 LVDT 安裝後將其測針頂住於握裹試體上部鋼筋凸起部分，以量測鋼筋的位移，該支 LVDT 亦需保持垂直，準備好上述工作後，將載重和 LVDT 的傳輸線接到資料接收器(圖 3-23)，歸零後即可進行試驗。握裹試驗以每秒 20 公斤之拉拔速率施加载重於鋼筋上，並記錄載重及鋼筋與混凝土間的滑移量之讀數，記錄至試體破壞為止。



圖 3-22 鋼筋拉拔握裹試驗  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-23 資料擷取器

(資料來源：本研究整理)

#### (4) 混凝土滲透試驗

試驗前將試體取出擦乾後秤重，將試體安裝於透水試驗儀(圖 3-24)，透水試驗儀主要由上下兩鋼盤組成，鋼盤內有橡膠環墊片，用以緊密接觸混凝土試體使加壓的水不外洩，上下鋼盤配置有螺絲孔，可以螺絲鎖緊上下兩鋼片。正式試驗前，先以  $6\sim 7\text{ kgf/cm}^2$  水壓測試試體與上下鋼盤接觸是否密實，水有無溢出現象，再以氮氣加壓  $3\text{ kgf/cm}^2$  水壓注入試體頂端，持續加壓 3 小時，取出試體量測經滲水試驗後之重量，再將試體放入烘箱烘乾 24 小時後秤重，將滲水試驗後重量減去乾燥重之後除以乾燥重，可得混凝土滲透率。



圖 3-24 混凝土滲透試驗

(資料來源：本研究整理)

#### (5) 快速氯離子滲透試驗 (RCPT test)

本計畫快速氯離子滲透試驗主要參照 CNS 14795 規範進行測定與計算。依 CNS 規範，試驗進行包含試體前處理、通電量測電荷、及計算與結果判讀等三步驟，詳細說明如後。

##### A. 試體前處理

本研究採用直徑 100mm、厚度 50mm 之試體進行快速氯離子滲透試驗，試驗前將試體置於抽真空幫浦容器中(如圖 3-25 所示)，使真空乾燥器內壓力降低至 120Pa，且維持真空狀態三小時。當真空狀態維持三小時後，將預先準備的去氣水抽入真空乾燥器內，使試體被水淹沒，並讓真空泵浦維持運轉 1 小時後關閉。真空泵浦關閉後，將試體浸漬於燒杯的水中 18 小時後始進行後續試驗。

##### B. 試體安裝與量測

將浸水的試體取出，擦乾後將試片安裝於試驗系統上。試驗系統包含兩個施加壓克力材質的電位容器，分別安裝於試體的兩側，容器內並含有 1 個銅網電極 (20 號篩徑)，如圖 3-26 所示。試體一側容器以 0.3N 氫氧化鈉 (NaOH) 溶液填充，是為陽極；另一側則以 3% 氯化鈉 (NaCl)

溶液填充，是為陰極。兩極之間施加 60 伏特直流電壓，以數據擷取器每隔 30 分鐘記錄 1 次電流值，一直到記錄 6 小時為止。

C. 計算與結果判讀

試驗記錄每 30 分鐘電流量，可將數據代入下式 (2-1) 即可獲得累積總電量。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + 2I_t + \dots + 2I_{300} + I_{360}) \quad (3-1)$$

式中：Q 為總通過電量(coulombs)

$I_0$  為初始電流(amperes)

$t_i$  為在時間 t 時的電流(amperes)。

若試體直徑不等於 95mm 時，由式 (2-1) 所獲致的總通過電量需加以修正。修正式如公式 (3-2)，將計算的總通過電荷量乘上標準試體面積與實際試體斷面積的比值，亦即：

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (3-2)$$

式中： $Q_s$  = 通過直徑為 95 mm 試體的總通過電量 (庫倫)，

$Q_x$  = 通過直徑為 x mm 試體的總通過電量 (庫倫)，

x = 非標準試體直徑 (mm)。

每個配比測試三個試體，計算平均總通過電荷量後，依 CNS 14795 規範建議，通過試片的總電荷可以評估混凝土抗氯離子穿透能力定性，如表 3-7 所示。



圖 3-25 RCPT 試驗抽真空幫浦容器

(資料來源：本研究整理)



圖 3-26 壓克力材質的電位容器與銅網

(資料來源：本研究整理)

表 3-7 氯離子穿透性與 RCPT 總通過電量關係

總通過電量	氯離子穿透性
<100	可忽略
100~1000	甚低
1001~2000	低
2000~4000	中
>4000	高

參考 CNS 14795

(資料來源：本研究整理)

## 第四章 試驗結果與討論

### 第一節 混凝土新拌性質

品質良好的飛灰呈玻璃質圓珠球狀，有助於混凝土的工作度，增加混凝土的流動性，使混凝土具有良好的黏滯性，減少混凝土的泌水問題。不過，添加高飛灰摻量於混凝土時，由於飛灰比重比水泥小，取代水泥後會使膠結料的比表面積增加，降低混凝土的流動性，為維持一定的工作度，需添加適量的強塑劑以改善混凝土的工作度。現行的高性能減水緩凝劑具有分散、輸氣、緩凝等多種功能，會大幅度影響混凝土的新拌性質、力學性質及耐久性，而性能越好的強塑劑對於混凝土組成材料的性質越敏感，尤其是摻有大量飛灰的混凝土，在強塑劑性能及添加比例的掌握相對重要。

#### 1. 試拌試驗混凝土

本研究進行試拌混凝土配比試驗的過程中，發現飛灰摻量為 60% 及 70% 者，需添加較多的強塑劑並拌和較長的時間，強塑劑的效能才能發揮，使混凝土具有流動性，而剛拌製完成的混凝土非常黏稠，在澆置試體及墁平的作業上需特別注意。此外，由表 4-1 可知在飛灰摻量 60% 及 70% 的配比，凝結時間有延後的現象，緩凝的現象在低強度、高摻量的配比組 C210-F60 及 C210-F70 較為明顯，如圖 4-1 所示，應是低強度系列的混凝土配比(C210 系列)所需膠結料用量較少，為使混凝土具有一定的流動性需添加較多的強塑劑，而強塑劑除有減水的功能外，還具有緩凝的作用，用量較多時就會使混凝土出現緩凝現象。

在中等強度的混凝土配比(C280 系列)方面，飛灰摻量較多的 C280-F60 及 C280-F70 配比組，緩凝現象相較於 C210-F60 及 C210-F70 者不明顯，如圖 4-2 所示。可見水泥用量較多的配比在採用高飛灰摻量的配比設計時，有較好的凝結時間表現，此現象與文獻[11]的研究成果相似。針對此一觀點，在本研究辦理專家學者座談會時，有多位學者提出高飛灰摻量混凝土應朝較

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

高強度，即較多水泥用量的混凝土作設計，才能有效發揮高飛灰摻量對混凝土的效益。準此，本研究於鋼筋握裹試驗及耐久性等驗證試驗增加抗壓強度  $350\text{kgf/cm}^2$  的高飛灰摻量混凝土作為試驗變數。

### 2. 驗證試驗混凝土

表 4-2 及圖 4-3 所示為鋼筋握裹、耐久性等試驗採用之驗證混凝土新拌試驗結果，可看出飛灰摻量 60% 之各式配比組終凝時間比試拌混凝土同配比組終凝時間提早，其終凝時間 C210-F60 為 377 分鐘、C280-F60 為 339 分鐘、C280-F60 為 370 分鐘，符合一般混凝土終凝時間 8 至 10 小時的要求，且其強塑劑添加量少於試拌混凝土者。試拌混凝土與驗證混凝土配比主要的差別在於強塑劑的不同，試拌配比採用強塑劑 A，並非文獻[11]所用之強塑劑 B，故試拌混凝土的終凝時間較長，惟飛灰摻量 0% 及 25% 的配比組，試拌及驗證混凝土的初終凝時間相近，使用不同強塑劑對於混凝土初終凝時間的影響不明顯，可知飛灰摻量越多，混凝土對於強塑劑越敏感，即在配製高飛灰摻量混凝土時，應注意強塑劑的適用性。

表 4-1 試拌試驗混凝土新拌性質試驗結果

試體編號	坍度(cm)	初凝(mins)	終凝(mins)	強塑劑 A(%)
C210-F00	10	315	440	0.0%
C210-F25	13	345	485	0.2%
C210-F50	14	425	680	1.1%
C210-F60	15	860	1055	1.5%
C210-F70	13	920	1320	2.0%
C280-F00	11	195	430	0.4%
C280-F25	15	340	475	1.0%
C280-F50	13	405	570	3.0%
C280-F60	15	525	690	3.0%
C280-F70	10	605	810	3.6%

(資料來源：本研究整理)

表 4-2 驗證試驗混凝土新拌性質試驗結果

試體編號	坍度(cm)	初凝(mins)	終凝(mins)	強塑劑 B(%)
C210-F00	14	300	434	0.00%
C210-F25	16	329	472	0.18%
C210-F60	18	211	377	1.39%
C280-F00	15	257	355	0.12%
C280-F25	19	263	387	0.24%
C280-F60	20	202	339	0.97%
C350-F00	15	245	334	1.00%
C350-F25	18	216	304	0.99%
C350-F60	21	209	370	1.64%

(資料來源：本研究整理)

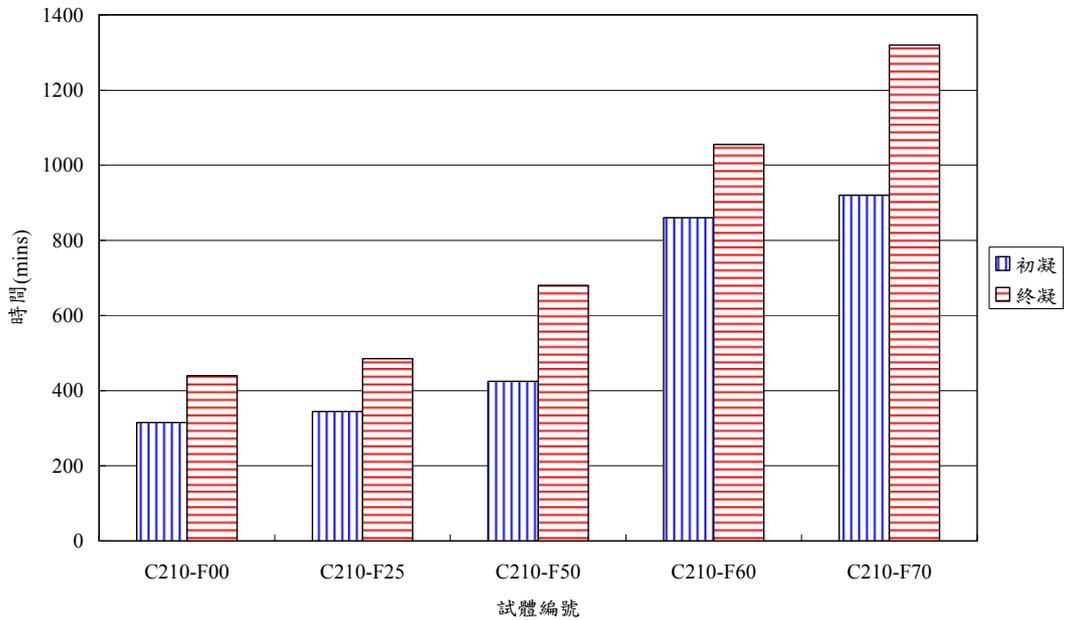


圖 4-1 試拌混凝土 C210 系列各式配比初終凝時間

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

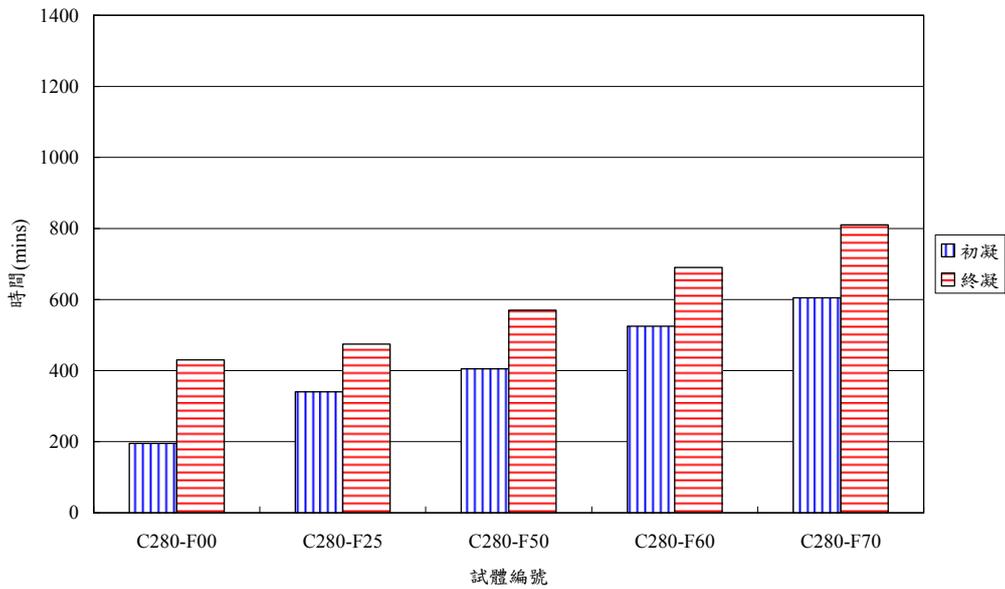


圖 4-2 試拌混凝土 C280 系列各式配比初終凝時間

(資料來源：本研究整理)

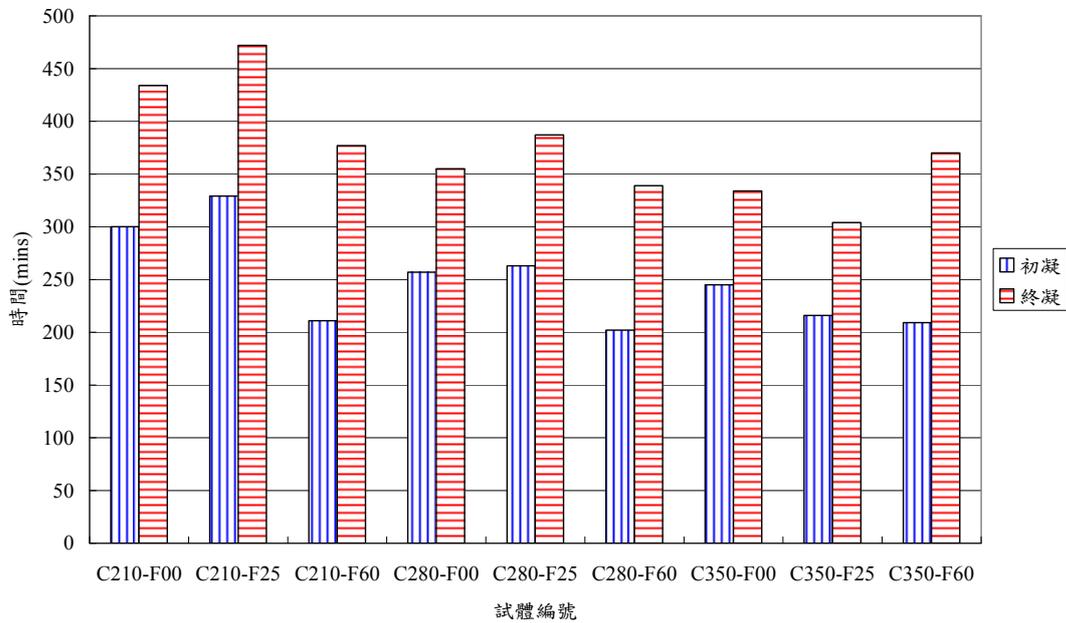


圖 4-3 驗證混凝土各式配比初終凝時間

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 混凝土抗壓強度

飛灰屬於卜作嵐材料的一種，由於卜作嵐反應速率低於水泥的膠結性水化反應，使用飛灰製造的混凝土，其早期抗壓強度會低於純混凝土者；但晚期強度可等於或超過未摻加飛灰的混凝土。此外，由於飛灰進行卜作嵐反應時，會消耗水泥水化產物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (氫氧化鈣)，生成具有強度的 C-S-H 膠體 (矽酸鈣膠體)，有效增加混凝土的緻密性及晚期強度。

## 1. 試拌試驗混凝土

表 4-3 及圖 4-4 和圖 4-5 為試拌高飛灰摻量混凝土配比的抗壓強度試驗結果，由試驗結果可知，未摻有飛灰的配比組 C210-F00 及 C280-F00 早齡期強度(3 及 14 天)的抗壓強度高於摻有飛灰的配比組；齡期 28 天時，配比組 C280-F25 的抗壓強度可接近無摻飛灰的配比組 C280-F00；齡期 58 天時，配比組 C210-F25 的強度已超過未摻飛灰的配比組 C210-F00，C210-F50 的抗壓強度則接近 C210-F00，而較高飛灰摻量的配比組，C210-F60 及 C210-F70 的抗壓強度仍低於 C210-F00 者，不過其抗壓強度已符合設計的需求；齡期 90 天時，C210-F25 的抗壓強度為同系列配比中最高、C210-F50 次之，C280-F70 的抗壓強度為同系列配比中最高、C280-F60 次之。

此外，比較 C210 及 C280 兩組配比的抗壓強度發展可知，中等強度 C280 系列配比，在早齡期階段(3 及 14 天)，高飛灰摻量配比組 C280-F50、C280-F60 及 C280-F70 的強度發展較 C210 系列同飛灰摻量者來的理想；28 天齡期時，配比 C280-F50 及 C280-F60 之強度則接近設計強度，C280-F70 配比組於 28 天齡期時強度成長仍有限，為所有配比組中最低者，但齡期 56 天及 90 天時，其抗壓強度仍有大幅成長，90 天齡期之抗壓強度已超過其他配比組，如圖 4-5 所示。這個結果可解釋高飛灰摻量適應用於水泥用量較多的混凝土配比，由於較多的水泥用量在水化反應後可產生足夠的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，供給飛灰進行卜作嵐反應，有效提升混凝土的強度。

## 2. 驗證試驗混凝土

在鋼筋握裹、耐久性等試驗所採用之驗證混凝土配比方面，表 4-4 及圖 4-7 至圖 4-7 所示為混凝土抗壓強度試驗結果。參考試拌試驗結果，調整混凝土水膠比並更換與文獻[11]相同的強塑劑 B 進行配比設計，抗壓試驗結果顯示各配比混凝土的強度發展趨於理想，配比 C210 系列 28 天齡期抗壓強度為 245 ~ 274 kgf/cm<sup>2</sup>、C280 系列抗壓強度為 309 ~ 358 kgf/cm<sup>2</sup>、C350 系列抗壓強度為 495 ~ 571 kgf/cm<sup>2</sup>，均符合 28 天抗壓強度設計目標。

比較三種抗壓強度系列配比 28 天及 56 天齡期抗壓強度發現，中低強度混凝土無添加飛灰配比 C210-F00 及 C280-F00，28 天齡期之抗壓強度為同系列配比中最高，高強度配比系列則以 C350-F25 為同系列配比中最高；56 天齡期時，中低強度混凝土以配比 C210-F60 及 C280-F60 之抗壓強度為同系列配比中最高，顯示高飛灰摻量(60%)確實有助於增加混凝土晚期強度，高強度配比系列則仍以 C350-F25 為同系列配比中最高，惟隨其齡期的繼續增加，高飛灰摻量配比組 C350-F60 有機會繼續成長並超越同系列配比其他兩組的強度。

由上述試驗結果可知，在中高強度 C280 及 C350 配比系列，摻有飛灰的配比抗壓強度 56 天齡期比 28 天齡期增加之幅度較低強度 C210 配比系列明顯，C210-F25 增加 34kgf/cm<sup>2</sup>、C210-F60 增加 46kgf/cm<sup>2</sup>、C280-F25 增加 64kgf/cm<sup>2</sup>、C280-F60 增加 75kgf/cm<sup>2</sup>、C350-F25 增加 60kgf/cm<sup>2</sup>、C350-F60 增加 67kgf/cm<sup>2</sup>，可知隨水泥用量的增加，飛灰對於增加混凝土晚期強度的成長影響越明顯，且由於水泥用量多，飛灰可以取代水泥的量就會比多，相形之下減少的水泥用量就比較多。

表 4-3 試拌試驗混凝土抗壓強度

試體	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )					
	3	7	14	28	56	90
C210-F00	171	202	259	274	284	305
C210- F25	125	186	232	256	294	322
C210- F50	102	164	212	245	280	318
C210- F60	64	114	145	177	230	267
C210- F70	52	71	112	155	213	224
C280-F00	222	269	310	336	358	366
C280- F25	167	208	243	302	310	353
C280- F50	129	167	215	276	293	367
C280- F60	104	156	206	257	284	382
C280- F70	70	140	193	210	293	393

(資料來源：本研究整理)

表 4-4 驗證試驗混凝土抗壓強度

試體	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	7	14	28	56
C210-F00	220	249	261	279
C210- F25	172	205	247	281
C210- F60	135	171	245	291
C280-F00	293	322	358	366
C280- F25	236	272	309	373
C280- F60	209	269	339	414
C350-F00	421	468	527	563
C350- F25	430	465	571	631
C350- F60	297	414	495	562

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

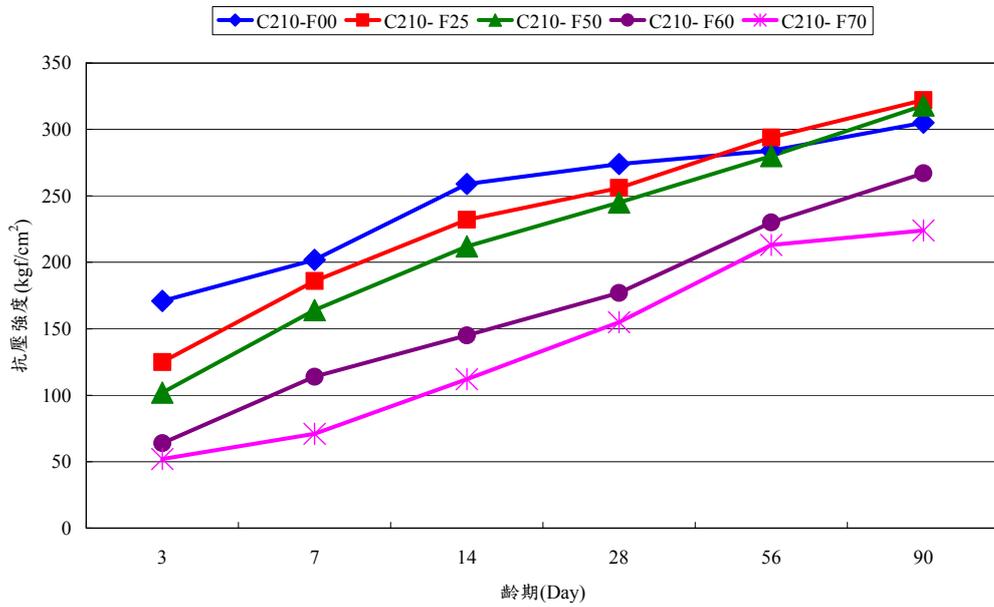


圖 4-4 試拌混凝土 C210 系列各式配比抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

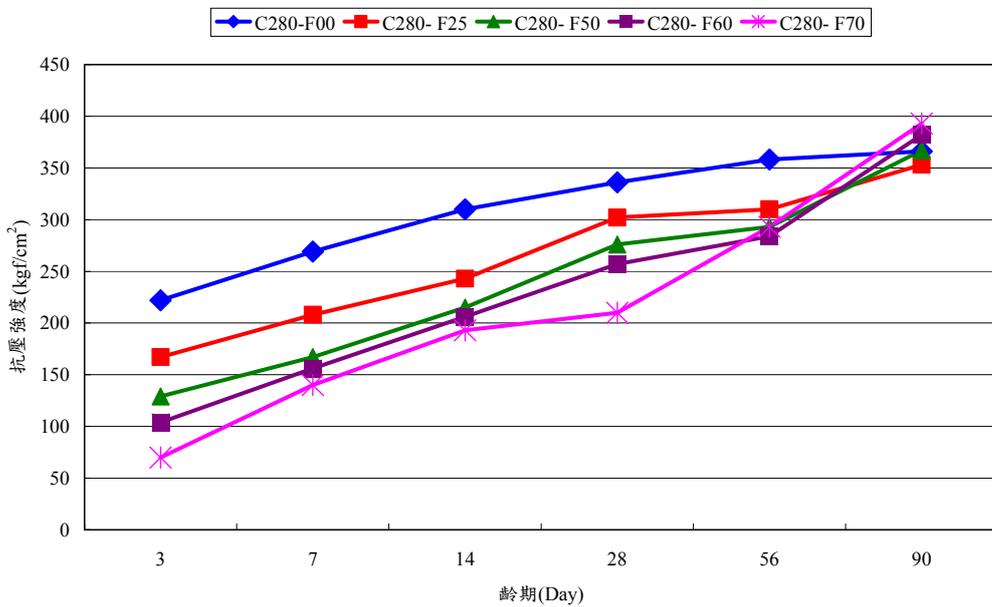


圖 4-5 試拌混凝土 C280 系列各式配比抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

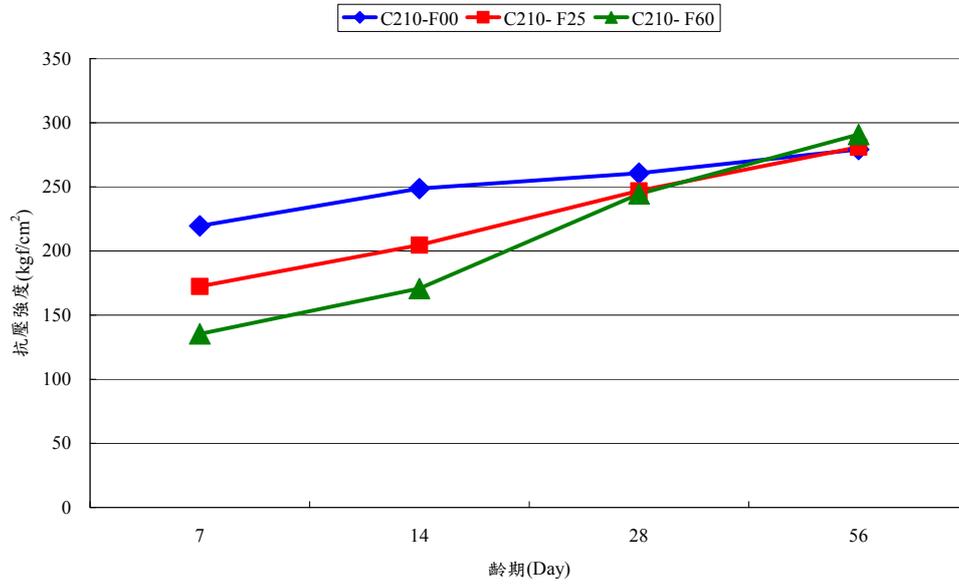


圖 4-6 驗證試驗混凝土 C210 系列各式配比抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

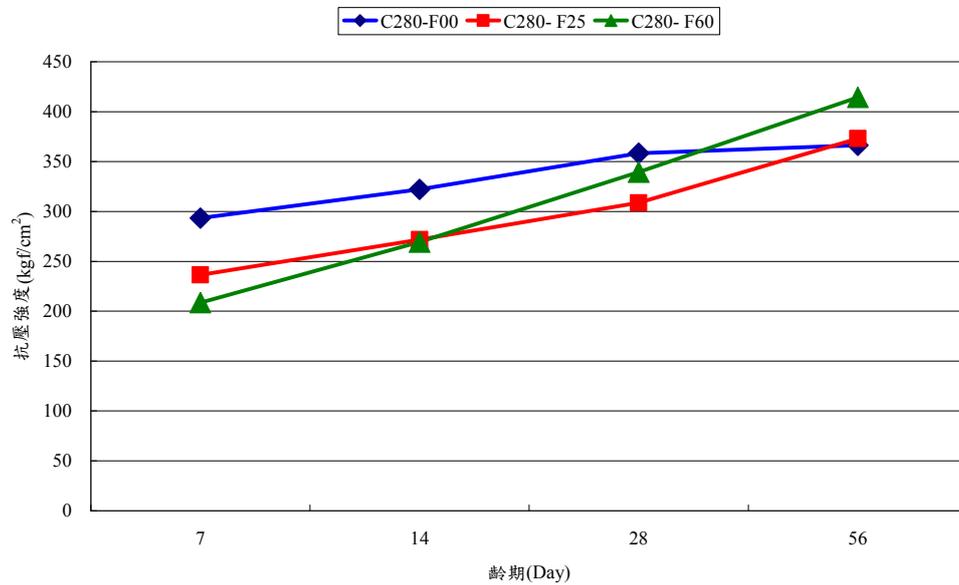


圖 4-7 驗證試驗混凝土 C280 系列各式配比抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

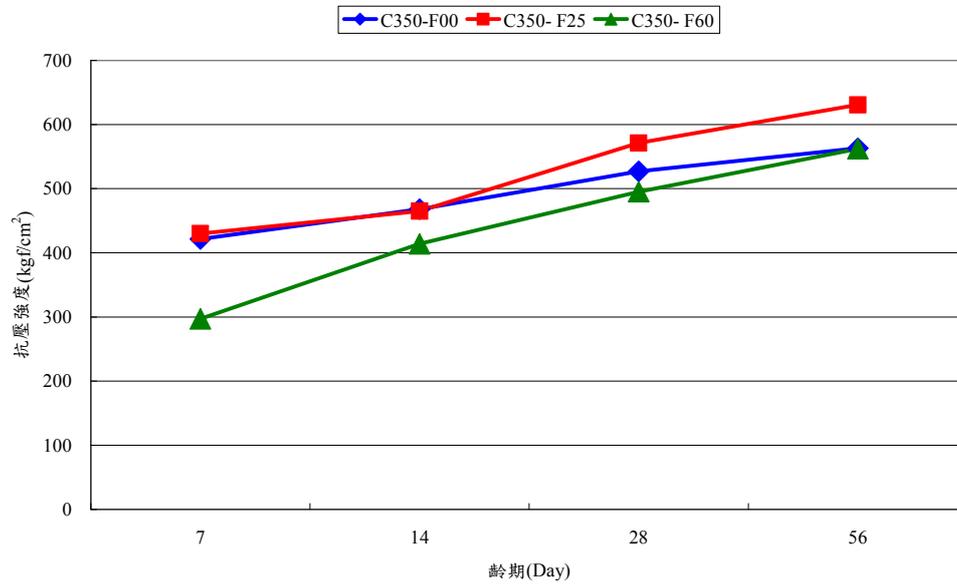


圖 4-8 驗證試驗混凝土 C350 系列各式配比抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

## 第三節 抗彎強度試驗結果

本計畫依評選會議委員意見，規劃高飛灰摻量混凝土抗彎強度試驗，探討高飛灰摻量對混凝土抗彎強度的影響，試驗結果如表 4-5 及圖 4-9 至圖 4-11 所示。根據抗彎強度試驗結果可知，各混凝土配比組之飛灰摻量與抗彎強度的關係與抗壓強度試驗結果相似，即隨著齡期的增加，摻有飛灰之混凝土的抗彎強度高於無摻飛灰者。

齡期 7 天時，三種強度之各配比混凝土抗彎強度隨飛灰摻量增加降低，顯示摻有飛灰無助於混凝土早齡期的抗彎強度發展；28 天齡期時，飛灰摻量的影響仍無規律，在中低強度混凝土方面，配比 C210-F25 及 C280-F25 為同系列配比中抗彎強度最低，高強度混凝土則以配比 C350-F60 的抗彎強度最低；56 天齡期時，中低強度混凝土以配比 C210-F60 的 60 kgf/cm<sup>2</sup> 及 C280-F60 的 59 kgf/cm<sup>2</sup> 為同系列配比中最高，高強度混凝土以配比 C350-F60 的 77 kgf/cm<sup>2</sup> 為同系列配比中最低，惟與同系列其他兩組配比 C350-F25 及 C350-F60 的抗彎強度接近，隨著齡期的持續增加，其抗彎強度的發展應仍可繼續提升。

表 4-5 混凝土抗彎強度

試體	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	7 天	28 天	56 天
C210-F00	48	49	51
C210- F25	33	39	52
C210- F60	30	48	60
C280-F00	50	58	59
C280- F25	38	53	57
C280- F60	36	58	59
C350-F00	67	74	80
C350- F25	65	76	83
C350- F60	47	60	77

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

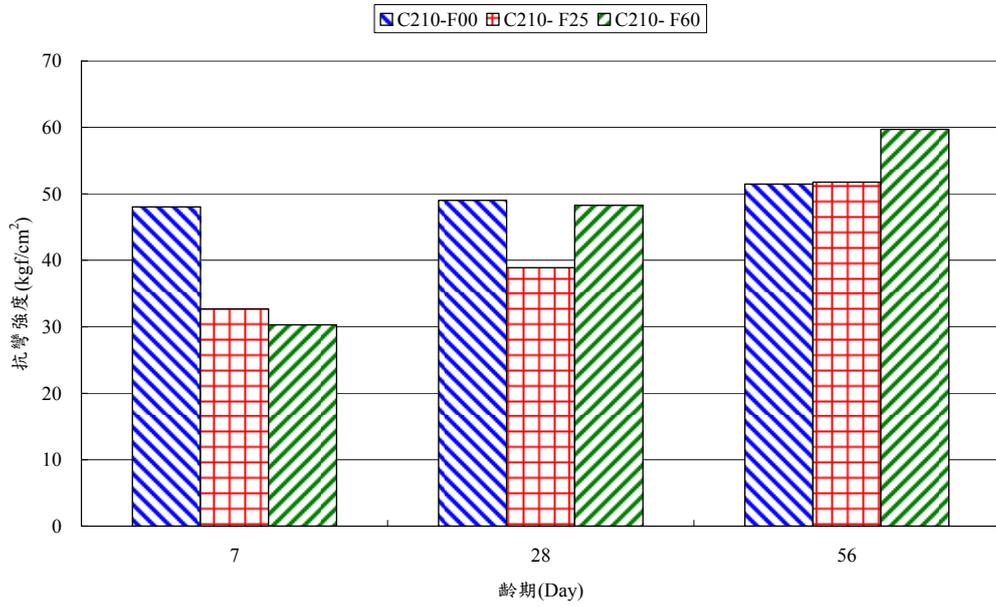


圖 4-9 配比 C210 系列混凝土抗彎強度

(資料來源：本研究整理)

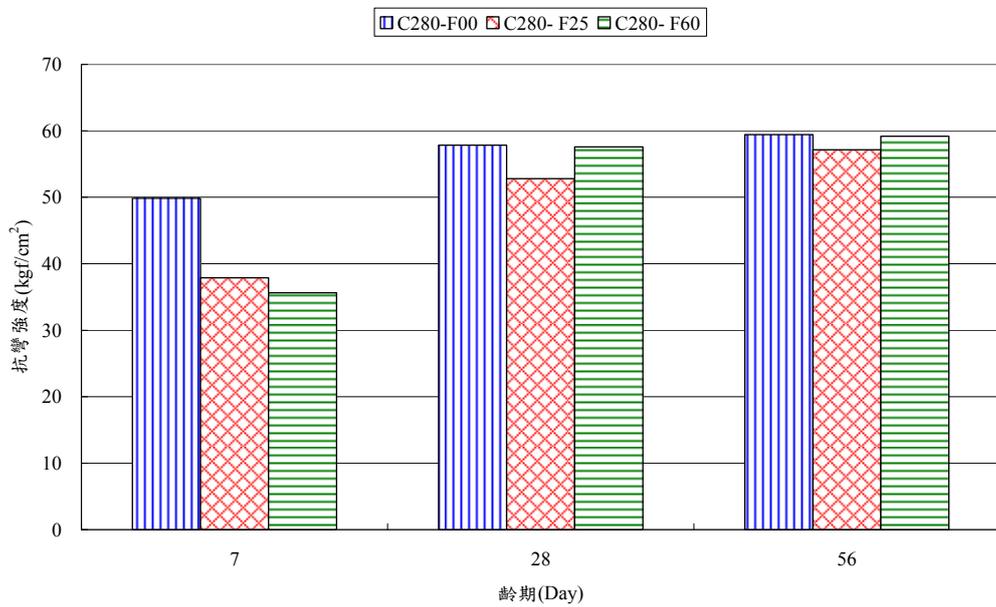


圖 4-10 配比 C280 系列混凝土抗彎強度

(資料來源：本研究整理)

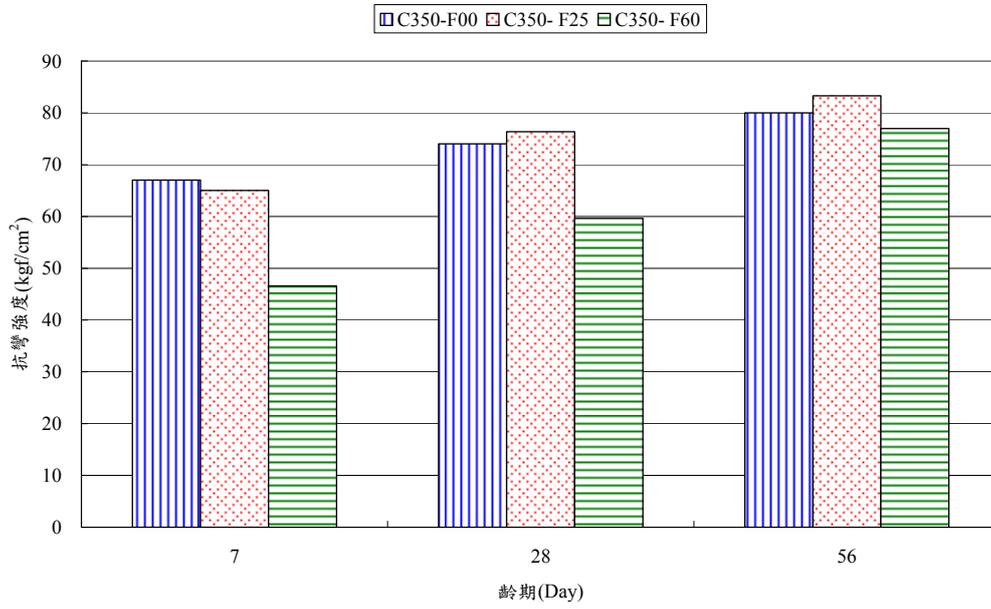


圖 4-11 配比 C350 系列混凝土抗彎強度

(資料來源：本研究整理)

第四節 鋼筋拉拔握裹試驗結果分析

本試驗依據美國 ASTM C 234 及中國國家標準 CNS A 3129 中之說明，主要是藉由直接將鋼筋自混凝土塊體拔出之握裹應力量試驗過程來評估混凝土的性能，而非真正模擬構件之實際握裹行為。但其試驗模式與理論上之鋼筋混凝土握裹受力量行為近似，故以此可簡易做為探討高飛灰摻量下混凝土與鋼筋間握裹受力量基本行為之研究。試驗結果整理如表 4-6~表 4-11 所示，並分別對其極限載重下之握裹應力量、破壞模式及載重—位移關係逐一分析探討如下：

表 4-6 無箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力量試驗結果 (7 天齡期)

試體編號	抗壓強度 ( $kgf/cm^2$ )	極限荷重 ( $kgf$ )	握裹應力量 ( $kgf/cm^2$ )	平均值 ( $kgf/cm^2$ )	自由端 滑移量 ( $mm$ )	載重端 滑移量 ( $mm$ )	破壞 類型
C210-F00-F1	220	7787	74	74	2.82	3.74	Splitting
C210-F25-F1	172	5191	50	50	2.27	2.63	Splitting
C210-F60-F1	135	5416	52	52	1.19	1.59	Splitting
C280-F00-F1	293	8277	79	79	3.27	3.55	Splitting
C280-F25-F1	236	8130	78	78	2.26	2.80	Splitting
C280-F60-F1	209	7069	66	66	1.81	2.14	Splitting
C350-F00-F1	421	11431	109	109	2.35	2.59	Splitting
C350-F25-F1	430	9925	95	95	3.14	2.80	Splitting
C350-F60-F1	297	9725	93	93	2.39	3.09	Splitting

(資料來源：本研究整理)

表 4-7 有箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (7 天齡期)

試體編號	抗壓強度 ( $kgf/cm^2$ )	極限荷重 ( $kgf$ )	握裹應力 ( $kgf/cm^2$ )	平均值 ( $kgf/cm^2$ )	自由端 滑移量 ( $mm$ )	載重端 滑移量 ( $mm$ )	破壞 類型
C210-F00-C1	220	8872	85	85	3.34	3.69	Pullout
C210-F25-C1	172	7464	71	71	3.66	4.01	Pullout
C210-F60-C1	136	7745	74	74	1.61	2.63	Pullout
C280-F00-C1	293	10546	101	101	2.96	3.32	Pullout
C280-F25-C1	236	11921	114	114	2.00	3.01	Pullout
C280-F60-C1	209	10844	104	104	4.84	5.15	Pullout
C350-F00-C1	421	15035	144	144	2.19	2.60	Pullout
C350-F25-C1	430	13390	128	128	2.53	3.31	Pullout
C350-F60-C1	297	11007	105	105	3.13	1.83	Pullout

(資料來源：本研究整理)

表 4-8 無箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (28 天齡期)

試體編號	抗壓強度 ( $kgf/cm^2$ )	極限荷重 ( $kgf$ )	握裹應力 ( $kgf/cm^2$ )	平均值 ( $kgf/cm^2$ )	自由端 滑移量 ( $mm$ )	載重端 滑移量 ( $mm$ )	破壞 類型
C210-F00-F1	261	7232	69	70	1.76	2.21	Splitting
C210-F00-F2		7432	71		2.16	2.86	Splitting
C210-F25-F1	247	8726	83	75	2.62	3.10	Splitting
C210-F25-F2		6922	66		2.12	2.57	Splitting
C210-F60-F1	245	7836	75	78	2.29	2.57	Splitting
C210-F60-F2		8407	80		2.65	3.03	Splitting
C280-F00-F1	358	9550	91	88	2.27	2.68	Splitting
C280-F00-F2		8791	84		1.92	2.40	Splitting
C280-F25-F1	309	9338	89	89	1.73	2.36	Splitting
C280-F25-F2		6795	65		1.72	1.99	Splitting
C280-F60-F1	339	10827	103	102	1.98	2.19	Splitting
C280-F60-F2		10546	101		1.92	2.18	Splitting
C350-F00-F1	527	9534	91	98	2.07	2.22	Splitting
C350-F00-F2		11047	106		2.99	3.24	Splitting
C350-F25-F1	571	10023	96	99	1.67	2.17	Splitting
C350-F25-F2		10786	103		2.03	2.32	Splitting
C350-F60-F1	527	14149	135	123	1.81	2.54	Splitting
C350-F60-F2		11578	111		1.65	2.14	Splitting

(資料來源：本研究整理)

表 4-9 有箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (28 天齡期)

試體編號	抗壓強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	極限荷重 ( $\text{kgf}$ )	握裹應力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	平均值 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	自由端 滑移量 ( $\text{mm}$ )	載重端 滑移量 ( $\text{mm}$ )	破壞 類型
C210-F00-C1	261	10227	98	107	1.46	2.12	Pullout
C210-F00-C2		12243	117		2.81	3.17	Pullout
C210-F25-C1	247	9342	89	89	2.59	2.82	Pullout
C210-F25-C2		9191	88		2.04	2.54	Pullout
C210-F60-C1	245	11098	106	104	2.21	2.49	Pullout
C210-F60-C2		10632	102		2.58	2.98	Pullout
C280-F00-C1	358	12794	122	115	1.93	3.00	Pullout
C280-F00-C2		11256	108		2.13	2.86	Pullout
C280-F25-C1	309	12484	119	118	1.53	2.01	Pullout
C280-F25-C2		12170	116		2.7	3.23	Pullout
C280-F60-C1	339	15018	144	139	2.79	3.19	Pullout
C280-F60-C2		14125	135		3.28	3.51	Pullout
C350-F00-C1	527	16296	156	156	2.32	2.74	Pullout
C350-F00-C2		16279	156		2.47	2.65	Pullout
C350-F25-C1	571	16043	153	155	2.41	2.69	Pullout
C350-F25-C2		16288	156		2.9	3.61	Pullout
C350-F60-C1	527	18610	178	184	3.7	4.86	Pullout
C350-F60-C2		19805	189		1.89	3.31	Pullout

(資料來源：本研究整理)

表 4-10 無箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (56 天齡期)

試體編號	抗壓強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	極限荷重 ( $\text{kgf}$ )	握裹應力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	平均值 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	自由端 滑移量 ( $\text{mm}$ )	載重端 滑移量 ( $\text{mm}$ )	破壞 類型
C210-F00-F1	279	7522	72	71	1.66	2.36	Splitting
C210-F00-F2		7244	69		1.12	1.96	Splitting
C210-F25-F1	281	7289	70	80	1.07	1.17	Splitting
C210-F25-F2		9521	91		0.89	1.13	Splitting
C210-F60-F1	291	10040	96	91	1.85	2.18	Splitting
C210-F60-F2		9032	86		1.17	1.61	Splitting
C280-F00-F1	366	7779	74	74	2.39	3.03	Splitting
C280-F00-F2		7775	74		1.25	2.01	Splitting
C280-F25-F1	373	8791	84	94	2.39	2.56	Splitting
C280-F25-F2		10799	103		1.89	2.34	Splitting
C280-F60-F1	414	11794	113	113	0.95	1.16	Splitting
C280-F60-F2		11790	113		1.31	1.64	Splitting
C350-F00-F1	563	10284	98	98	0.78	2.15	Splitting
C350-F25-F1	631	11044	106	114	0.93	1.35	Splitting
C350-F25-F2		12774	122		1.95	2.45	Splitting
C350-F60-F1	562	13043	125	130	0.6	1.32	Splitting
C350-F60-F2		14055	134		0.88	1.13	Splitting

(資料來源：本研究整理)

表 4-11 有箍筋圍束鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗結果 (56 天齡期)

試體編號	抗壓強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	極限荷重 ( $\text{kgf}$ )	握裹應力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	平均值 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	自由端 滑移量 ( $\text{mm}$ )	載重端 滑移量 ( $\text{mm}$ )	破壞 類型
C210-F00-C1	279	10546	101	91	1.36	2.09	Pullout
C210-F00-C2		8546	82		1.56	2.21	Pullout
C210-F25-C1	281	10999	105	109	1.51	2.27	Pullout
C210-F25-C2		11770	113		1.11	1.61	Pullout
C210-F60-C1	291	13272	127	121	1.95	3.06	Pullout
C210-F60-C2		12035	115		2.55	2.71	Pullout
C280-F00-C1	366	11263	108	107	0.58	1.14	Pullout
C280-F00-C2		11027	105		2.25	2.8	Pullout
C280-F25-C1	373	14529	139	140	2.53	2.9	Pullout
C280-F25-C2		14786	141		2.27	2.79	Pullout
C280-F60-C1	414	17055	163	159	2.44	2.84	Pullout
C280-F60-C2		16271	156		1.25	1.74	Pullout
C350-F00-C1	563	15039	144	144	1.28	1.99	Pullout
C350-F25-C1	631	18010	172	183	2.13	2.53	Pullout
C350-F25-C2		20271	194		1.55	2.88	Pullout
C350-F60-C1	563	21548	206	201	1.28	2.86	Pullout
C350-F60-C2		20548	196		2.88	4.18	Pullout

(資料來源：本研究整理)

### 1. 握裹應力

由試驗過程中，分時紀錄下來之載重量測值，可依照下述公式，將其轉換成平均握裹應力。

$$u_{AV} = \frac{P}{\pi \cdot d_b \cdot L_d} \quad (4-1)$$

式中

$u_{AV}$  : 平均握裹應力 ( $kgf/cm^2$ )

$P$  : 載重 ( $kgf$ )

$d_b$  : 鋼筋標稱直徑 ( $2.22\text{ cm}$ )

$L_d$  : 鋼筋埋置長度 ( $15\text{ cm}$ )

根據鋼筋拉拔試驗結果，在較早齡期時(28天以前)，無論有無箍筋圍束的試體部份，握裹應力主要還是跟混凝土抗壓強度有較明確之關係，跟飛灰的含量則較無明顯關係，主要原因為經由公式(4-1)所計算出之握裹應力所代表的意義，為混凝土在此載重狀態下，鋼筋圓周與混凝土之介面達到分離狀態之強度。而由文獻探討已知，握裹應力的主要來源為竹節的支承力，此部分跟混凝土抗壓強度有明確的正比關係，至於飛灰含量之影響，在早齡期並無明顯提高強度之趨勢，因此無法反應在鋼筋拉拔試驗之握裹破壞的行為上。而在較晚齡期時，由於飛灰提高了混凝土的強度與密度，使得握裹應力明顯增加，尤其在高含量飛灰(60%)的狀態下，不論箍筋有無圍束，此趨勢均極為明顯。

另外值得注意的是，在抗壓強度接近的情況下，含有較高含量飛灰的混凝土，也會有較高的握裹應力，分析其原因，高含量的飛灰混凝土，其微觀結構較為緻密，因此反應在較高的握裹應力上，這緻密結構在抗壓強度的試驗上則相對較不明顯。

## 2. 載重-位移關係

鋼筋混凝土拉拔握裹應力試驗的典型載重-位移關係，依照不同之圍束情況，分類表示如圖 4-12 及圖 4-13。圖示中表示之位移量，包含自由端之滑移量(free-end slip)及受力端之滑移量(loaded-end slip)。自由端滑移量是指在混凝土塊體非受力側直接由位移量測計(dial gauge)量測到之鋼筋與混凝土的相對位移；但受力端滑移量則為由架設在受力端之距鋼筋兩側等距的位移量測讀數，取其平均值計算得來。

在無箍筋圍束的試體部份，當載重達到極限握裹應力時，鋼筋即因混凝土產生劈裂破壞而迅速脫離試體，因此從載重-位移圖上(圖 4-12)，可明顯的觀察到在極限強度後的位移不大，但力量已大幅降低。此種情況，不論混凝土之飛灰含量多寡與齡期之長短，均為相同情形。

而有箍筋圍束的試體，當載重達到極限握裹應力時，鋼筋雖開始與混凝土產生明顯的相對位移，但由於試體未明顯開裂，仍能提供部份的握裹應力，因此從載重-位移圖上(圖 4-13)，可觀察到在極限強度後，雖有明顯位移，但力量下降幅度較為緩慢，同樣地，不論混凝土之飛灰含量多寡與齡期之長短，此種情況均有反應出來。

針對不同飛灰含量分別加以探討，其載重-位移關係曲線均極為類似，如圖 4-14 及圖 4-15 所示。含有較高飛灰摻量的混凝土，其極限狀態下的握裹應力也相對的提高，不論試體有無箍筋圍束，其結果均反應出此一現象。因此再度驗證，高含量的飛灰混凝土，其達到極限破壞時，不僅與無添加飛灰混凝土的破壞行為相近，而且飛灰含量高的混凝土，其極限握裹應力也較高。

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

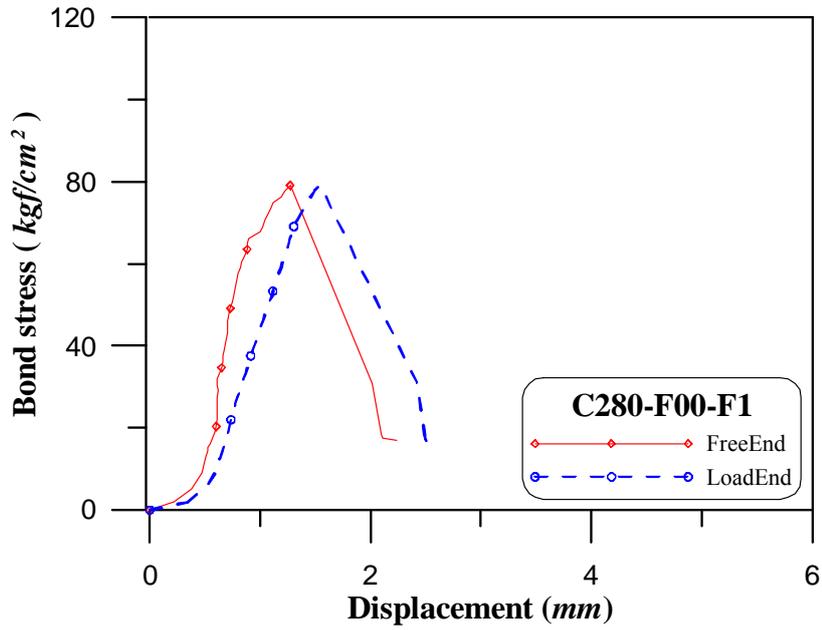


圖 4-12 無箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之載重—位移關係圖

(資料來源：本研究整理)

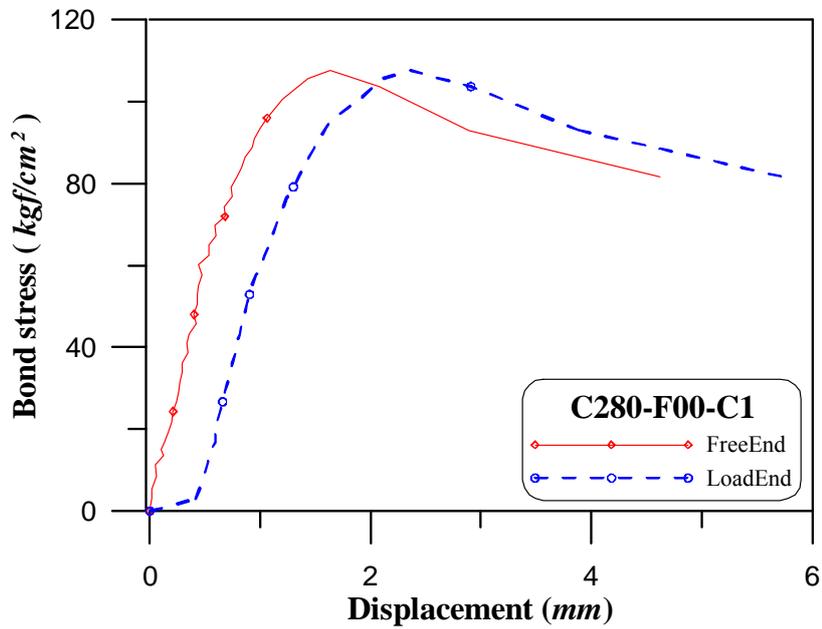


圖 4-13 有箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之載重—位移關係圖

(資料來源：本研究整理)

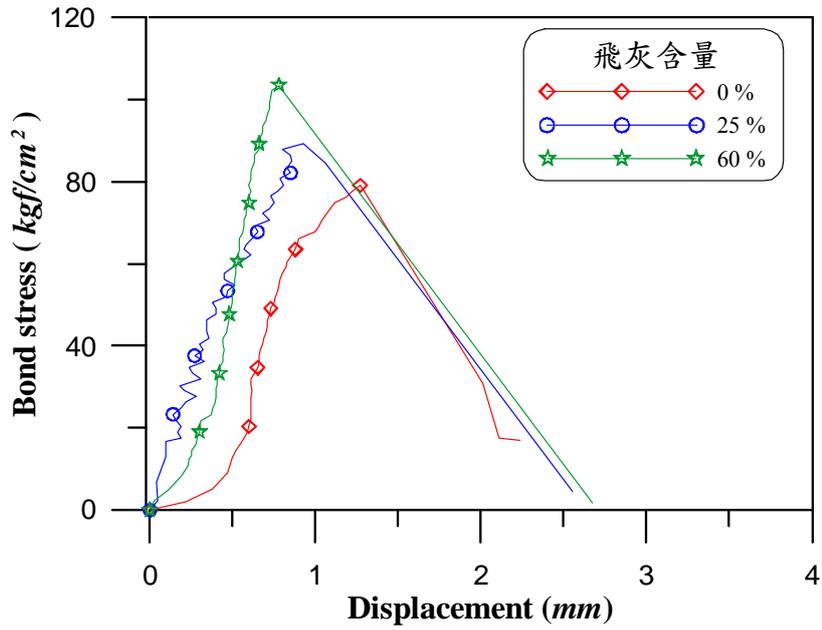


圖 4-14 不同飛灰含量對無箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之影響  
(資料來源：本研究整理)

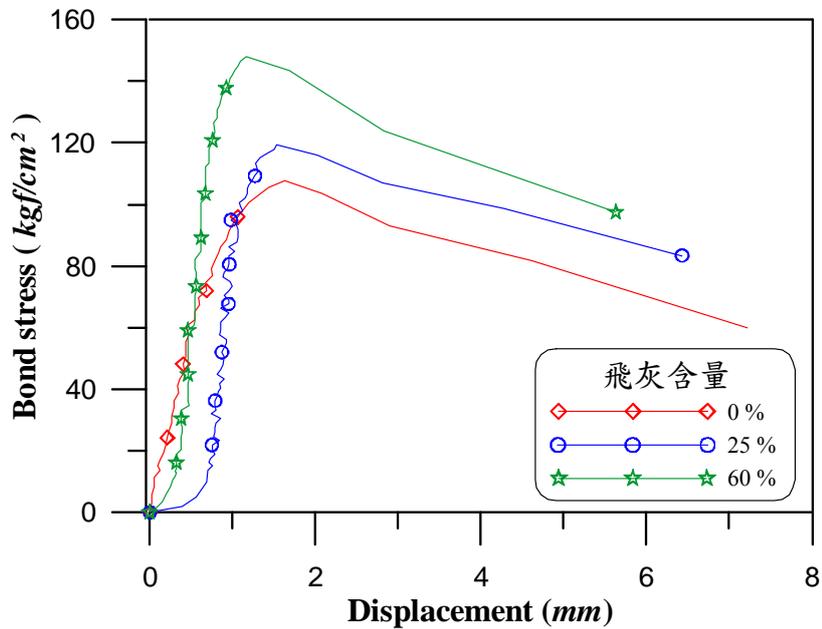


圖 4-15 不同飛灰含量對有箍筋圍束混凝土拉拔握裹試驗之影響  
(資料來源：本研究整理)

### 3. 試體破壞模式

各式握裹試體破壞情形如圖 4-16 至圖 4-24 所示。從圖中可發現，無圍束握裹試體大多出現劈裂破壞，即鋼筋被拉拔的過程中，於鋼筋周圍出現裂縫，造成鋼筋失去與混凝土的握裹應力而破壞，齡期 7 天的試驗結果顯示劈裂裂縫較細小、數目較多、分部較密集，隨著齡期增加，混凝土強度跟著提升，齡期 58 天時，劈裂裂縫的寬度和長度均增加，有些試體在握裹試驗結束後即碎裂成數塊；有圍束試體之破壞模式大致呈現鋼筋拔出破壞，且因圍束鋼筋的作用，使得混凝土方塊試體能保持完整，沒有出現碎裂的狀況。

以抗壓強度  $210 \text{ kgf/cm}^2$  各配比組破壞情形而言(圖 4-16 至圖 4-18)，無圍束配比試體出現劈裂破壞，飛灰取代水泥量的多寡不影響劈裂破壞形式，惟隨著混凝土抗壓強度增加，劈裂裂縫的大小亦隨之增加；有圍束試體破壞模式則呈現鋼筋拔出破壞，且不隨飛灰取代量及抗壓強度的不同而有明顯的差異，大致都以鋼筋周圍環繞一圈混凝土錐體情形被拔出而破壞，混凝土錐體的大小以配比 C210-F60-C 最小、C210-F25-C 次之、C210-F00-C 最大。

抗壓強度  $280 \text{ kgf/cm}^2$  各配比組破壞情形如圖 4-19 至圖 4-21 所示，無圍束配比試體大致仍劈裂破壞為主，不過配比 C280-F60-N 各齡期破壞形式有同時出現劈裂和鋼筋拔出的現象，由於混凝土抗壓強度提高，高飛灰摻量 (60%) 對於鋼筋握裹應力似有增加的趨勢；有圍束試體破壞模式方面，仍呈現鋼筋拔出破壞，且圍繞在鋼筋周圍的混凝土錐體體積有增加的現象，混凝土錐體的大小仍以配比 C280-F60-C 最小、C280-F25-C 次之、C280-F00-C 最大。

圖 4-22 至圖 4-24 所示為抗壓強度  $350 \text{ kgf/cm}^2$  各配比組破壞情形，無圍束配比試體多以劈裂破壞和鋼筋拔出破壞同時出現，顯示隨著混凝土抗壓強度的增加，鋼筋與混凝土的握裹效果也隨之提升，且強度增加，使混凝土變得較為脆性，破壞後大多直接碎裂成數塊，不像強度較低的  $210 \text{ kgf/cm}^2$  配

比，試體破壞後還可保持完整；有圍束試體破壞模式方面，依然呈現鋼筋拔出破壞，該系列試體圍繞在鋼筋周圍的混凝土錐體體積變的更多，且三種飛灰取代量及不同齡期的混凝土錐體大小有相同的趨勢，由於該系列配比已屬較高混凝土抗壓強度等級，加上圍束鋼筋的作用，使得鋼筋與混凝土間的握裹應力直接受混凝土抗壓強度的影響為主，飛灰取代量多寡的影響變的不明顯。

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

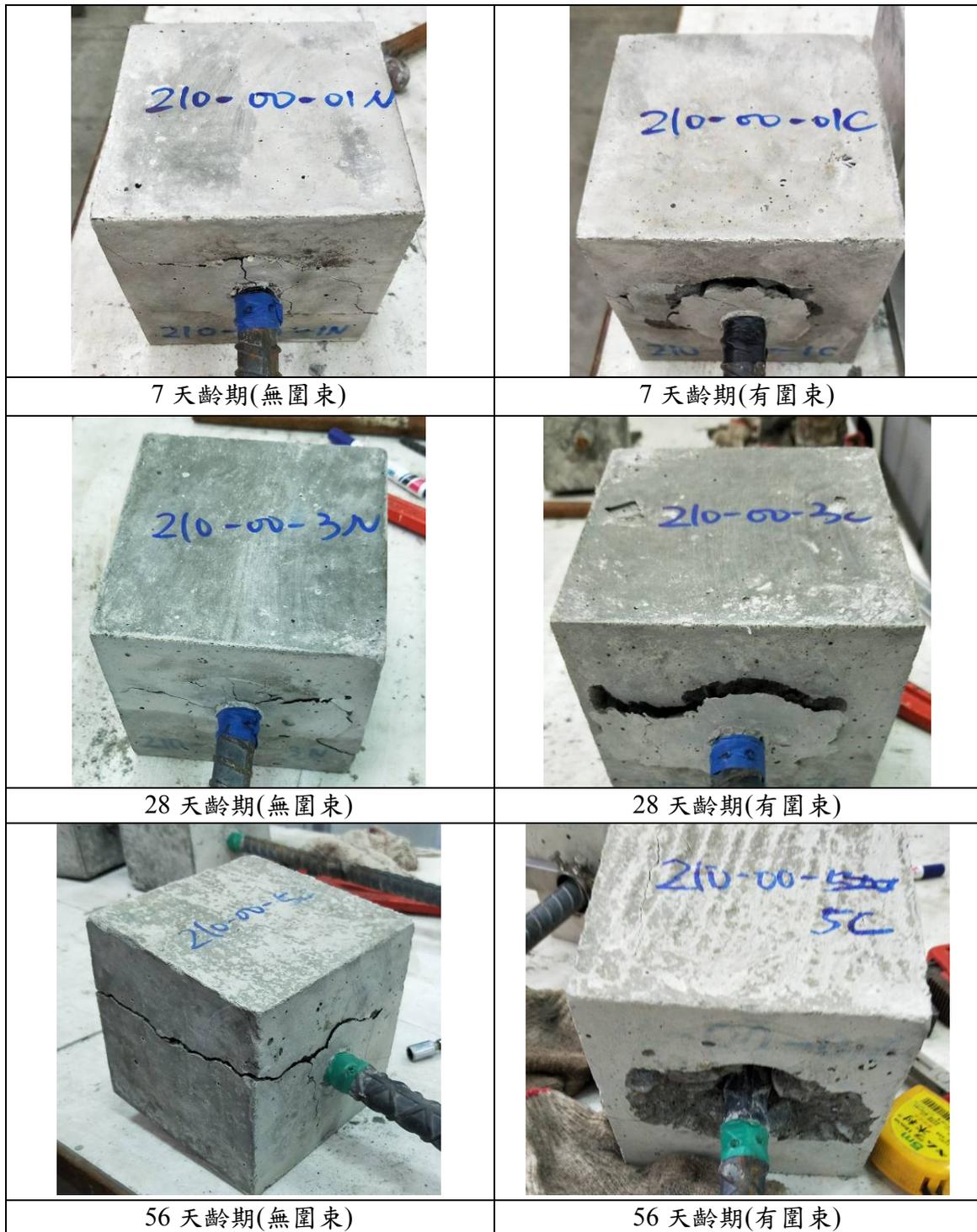


圖 4-16 C210F00 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

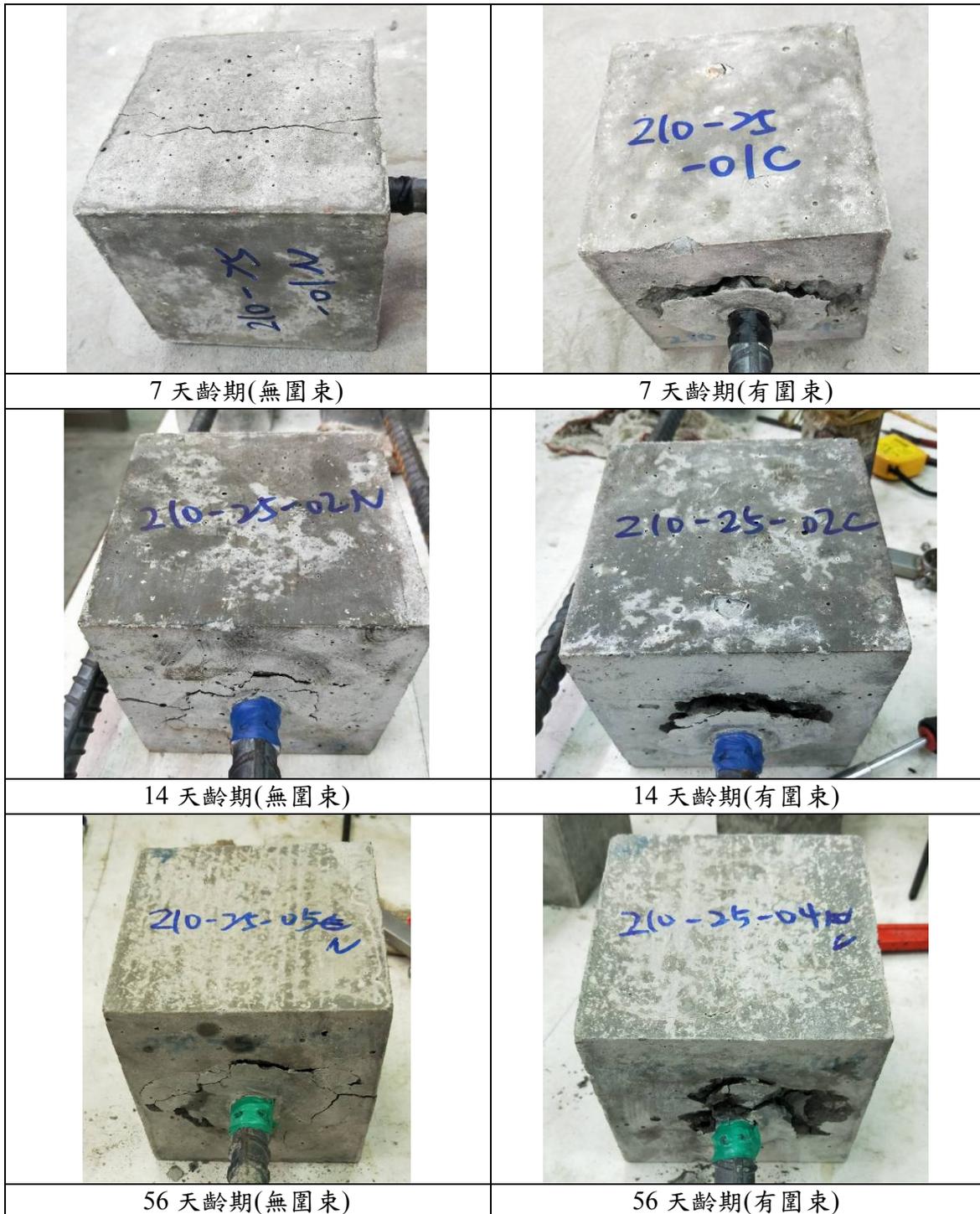


圖 4-17 C210F25 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

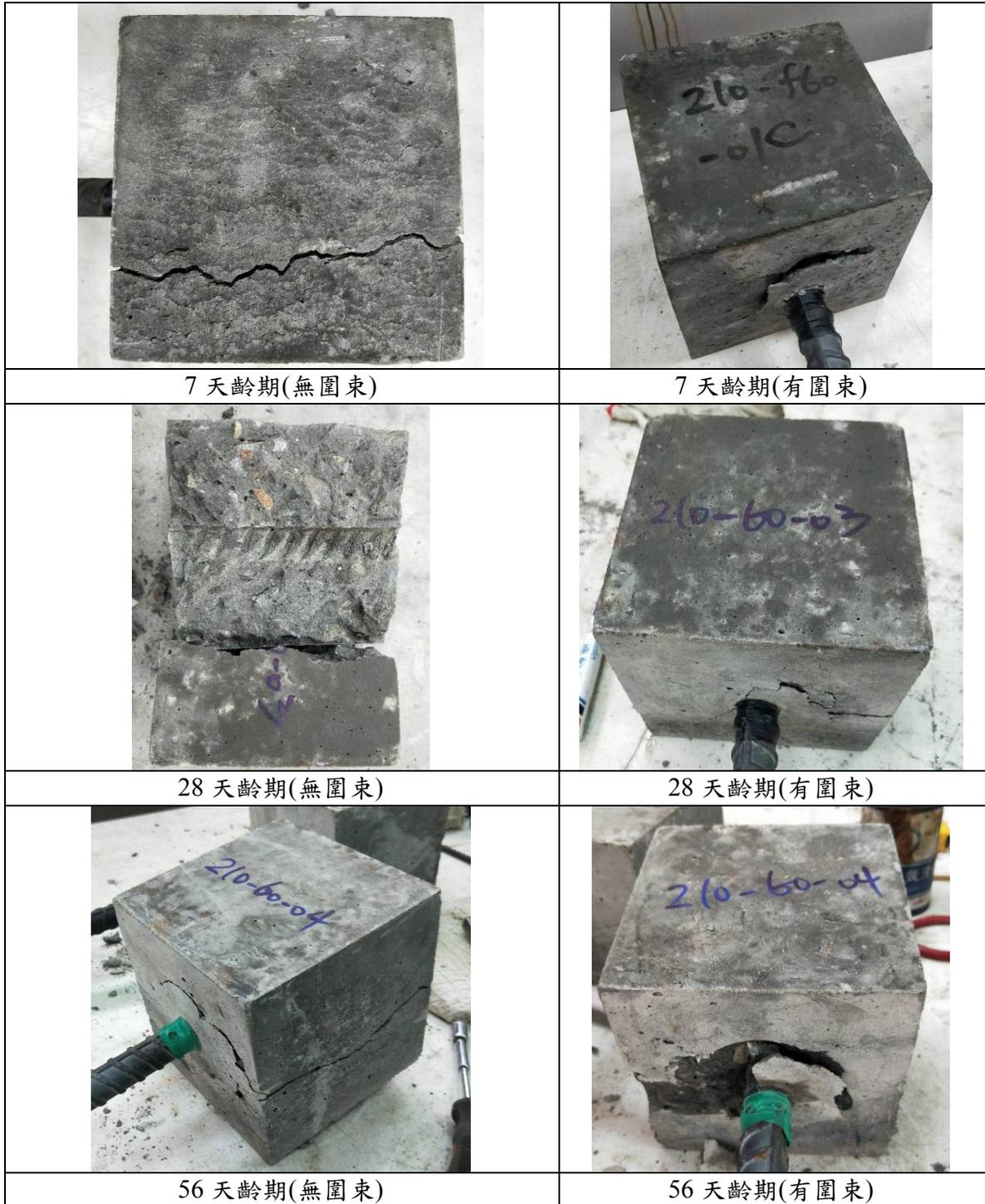


圖 4-18 C210F60 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

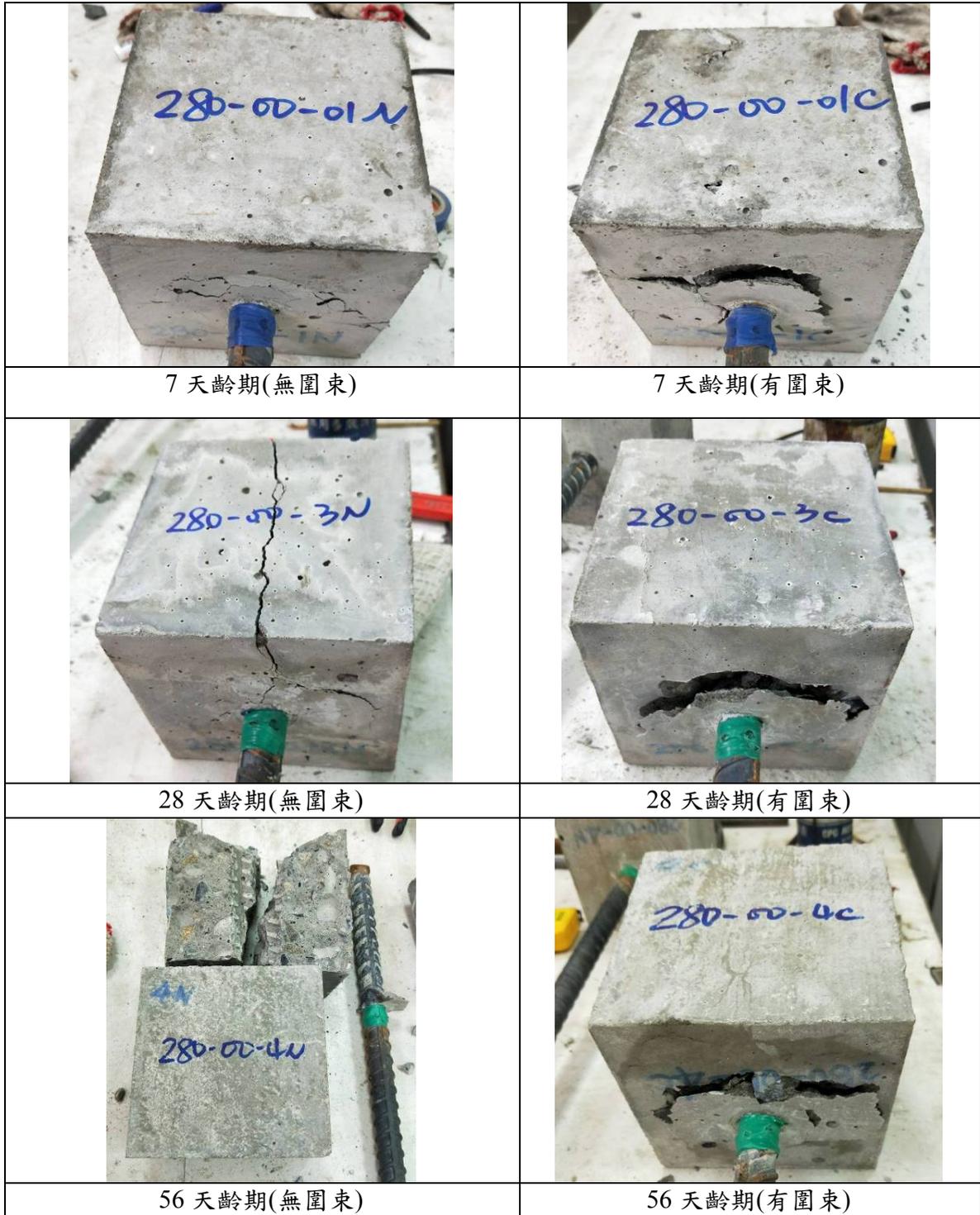


圖 4-19 C280F00 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

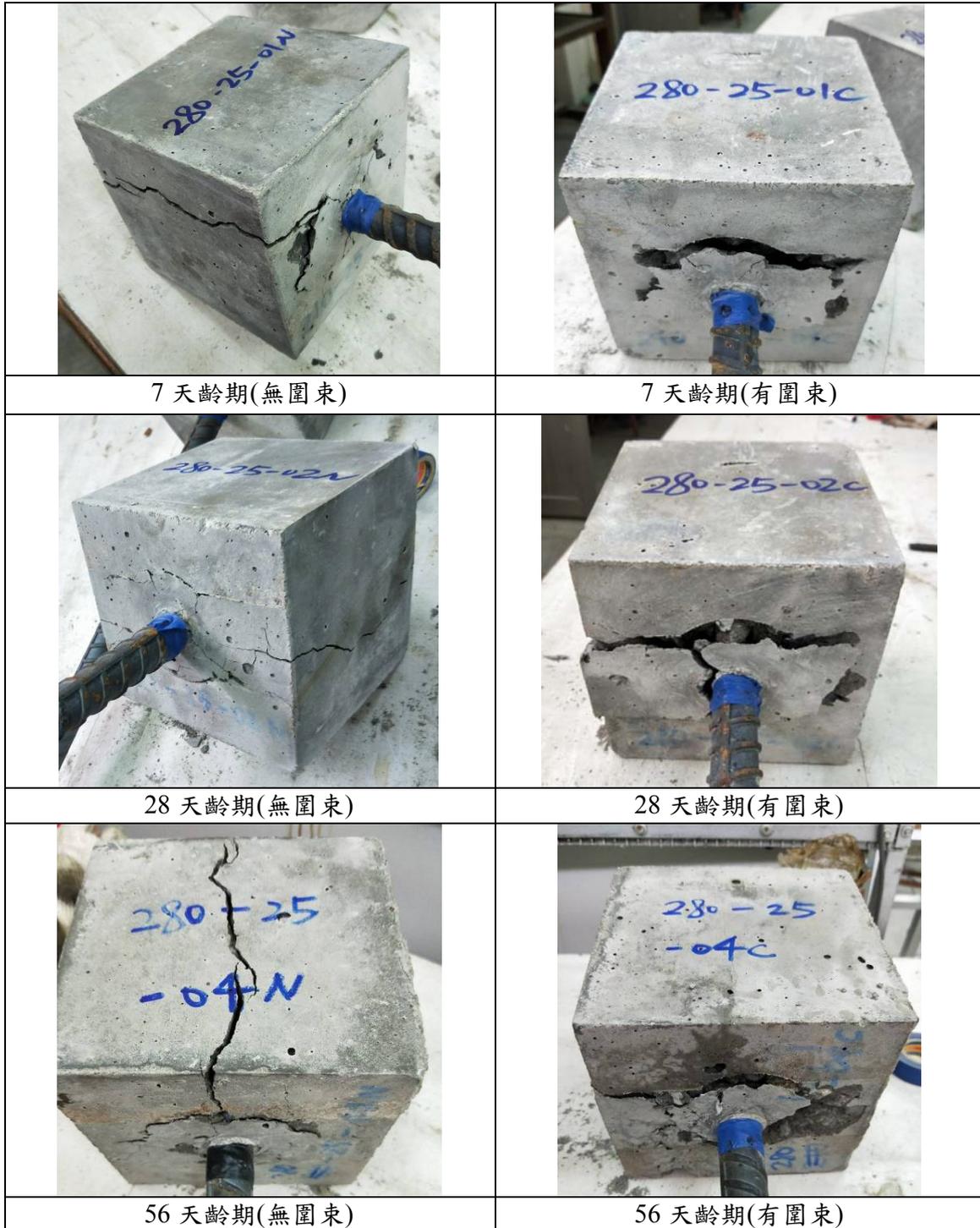


圖 4-20 C280F25 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

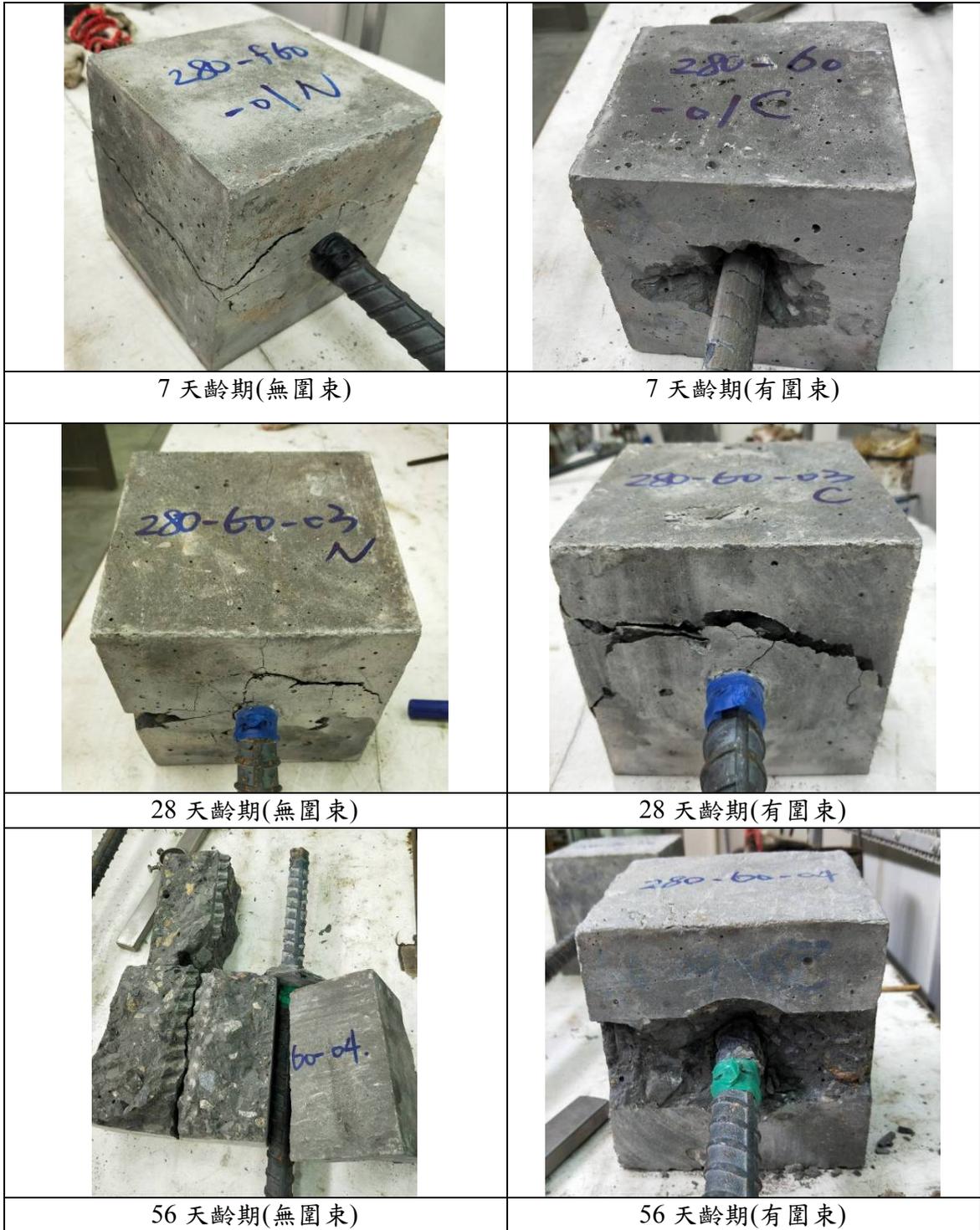


圖 4-21 C280F60 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

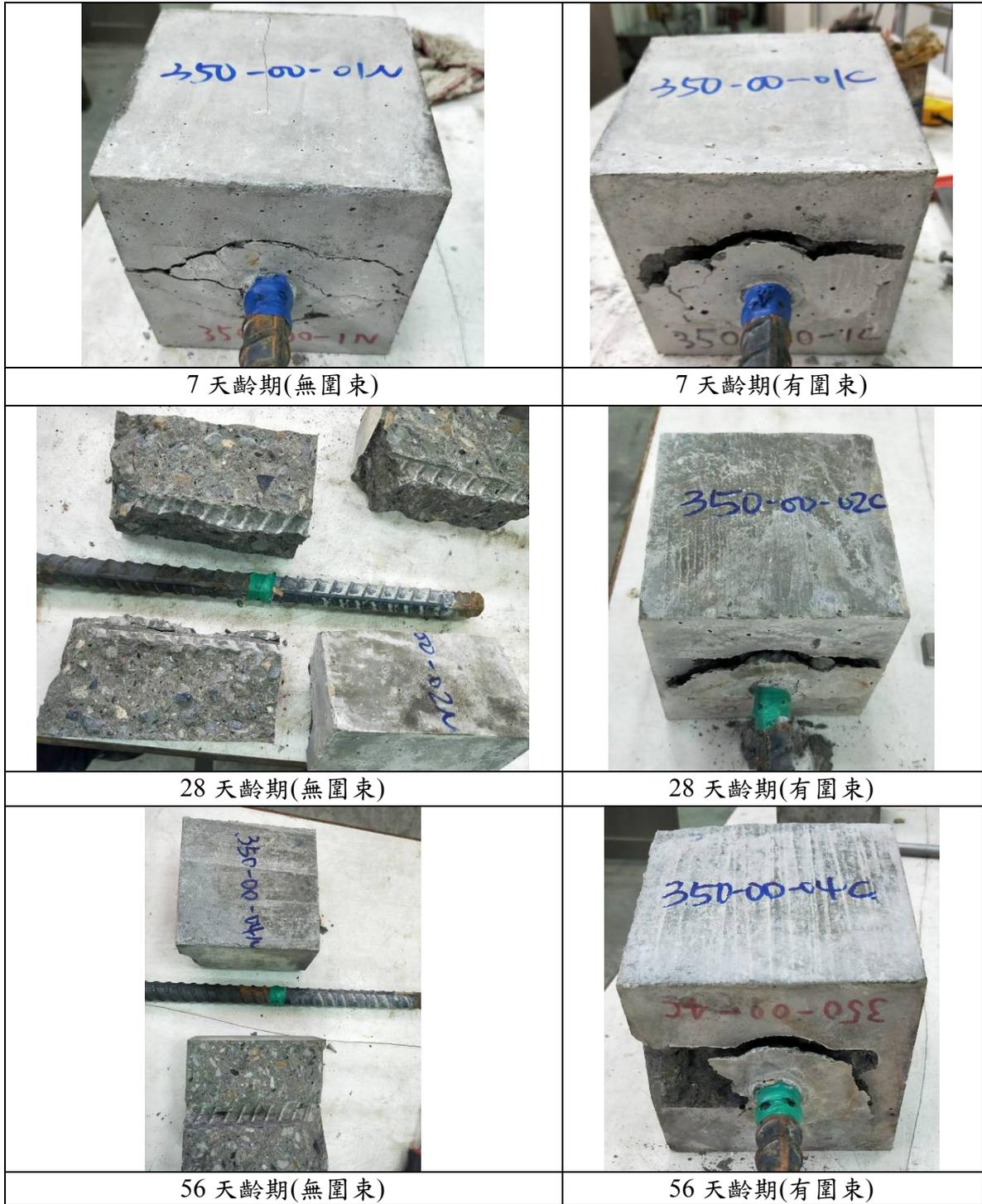


圖 4-22 C350F00 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

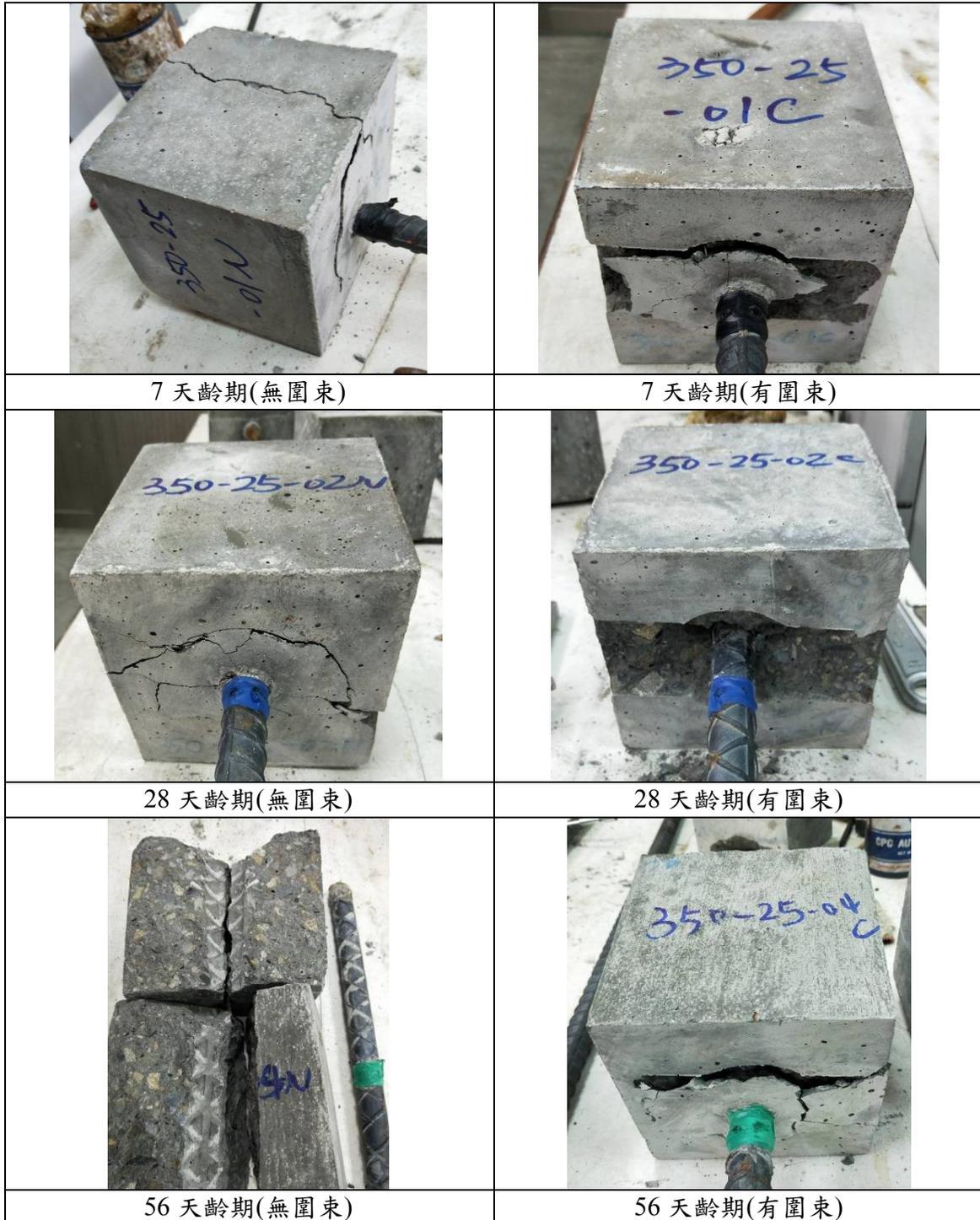


圖 4-23 C350F25 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究



圖 4-24 C350F60 握裹試驗結果

(資料來源：本研究整理)

第五節 滲透試驗結果

混凝土滲透途徑有經由骨材與砂漿間之黏結界面、砂漿土體及穿越骨材等三種，其中以經由黏結界面進行滲透為主要途徑，由於飛灰具有改善黏結界面的效果，提高骨材與砂漿間的緻密性，減少滲透，可增加混凝土的耐久性。為解析高飛灰摻量混凝土的滲透性，本研究製作  $\phi 150\text{mm} \times 50\text{mm}$  混凝土滲透試驗試體，以  $3\text{kgf/cm}^2$  的壓力作用於試體表面 3 小時，秤重得試體經滲透試驗後的重量，再將試體烘乾 24 小時秤重得試體的乾燥重量，將試體的滲透重量減去烘乾重量後，除以試體的烘乾重量即為試體的滲透率。

滲透試驗結果如表 4-12 及圖 4-25 所示，齡期 28 天時，各式配比之混凝土試體滲透率有隨抗壓強度增加而減少的趨勢，即 C210 系列滲透率最大、C280 次之、C350 最小，不過混凝土受飛灰摻量影響的狀況較無規律，C210 系列之滲透率隨飛灰摻量增加而提高，C280 及 C350 系列無此現象，此結果應是飛灰尚未完全反應，在混凝土內部只具有填充孔隙的作用，無法進行水化反應產生有強度的膠體填充孔隙，使得飛灰摻量較多的混凝土試體強度發展較緩慢，抵抗滲透的能力較差。

齡期 56 天時，飛灰摻量的影響逐漸明顯，各式配比之混凝土試體滲透率呈現隨抗壓強度及飛灰摻量增加而減少的趨勢，只有 C350-F60 試體之滲透率高於 C350-F25 試體，不過兩者滲透率接近，待齡期持續增加，C350-F60 試體之滲透率應可低於 C350-F25 試體。根據上述滲透試驗結果可知，適當添加飛灰取代部分水泥確實有助於混凝土的緻密性及耐久性的改善，惟進行高飛灰摻量混凝土配比設計時，須注意飛灰摻量越多，混凝土強度發展較緩慢，抗滲透能力需於晚齡期時才能有效發揮。

表 4-12 混凝土滲透試驗結果

試體編號	滲透重量		乾燥重量		滲透量		滲透率	
	28 天	56 天						
	g						%	
C210-F00	1815	1760	1693	1649	122	111	7.2	6.7
C210-F25	1842	1831	1712	1733	130	98	7.6	5.6
C210-F60	1792	1888	1658	1812	134	76	8.1	4.2
C280-F00	1779	1736	1671	1643	108	94	6.5	5.7
C280-F25	1788	1683	1662	1595	126	88	7.6	5.5
C280-F60	1869	1873	1743	1811	126	62	7.2	3.4
C350-F00	1793	1818	1716	1743	77	75	4.5	4.3
C350-F25	1821	1857	1756	1797	65	60	3.7	3.3
C350-F60	1801	1765	1712	1706	89	59	5.2	3.5

(資料來源：本研究整理)

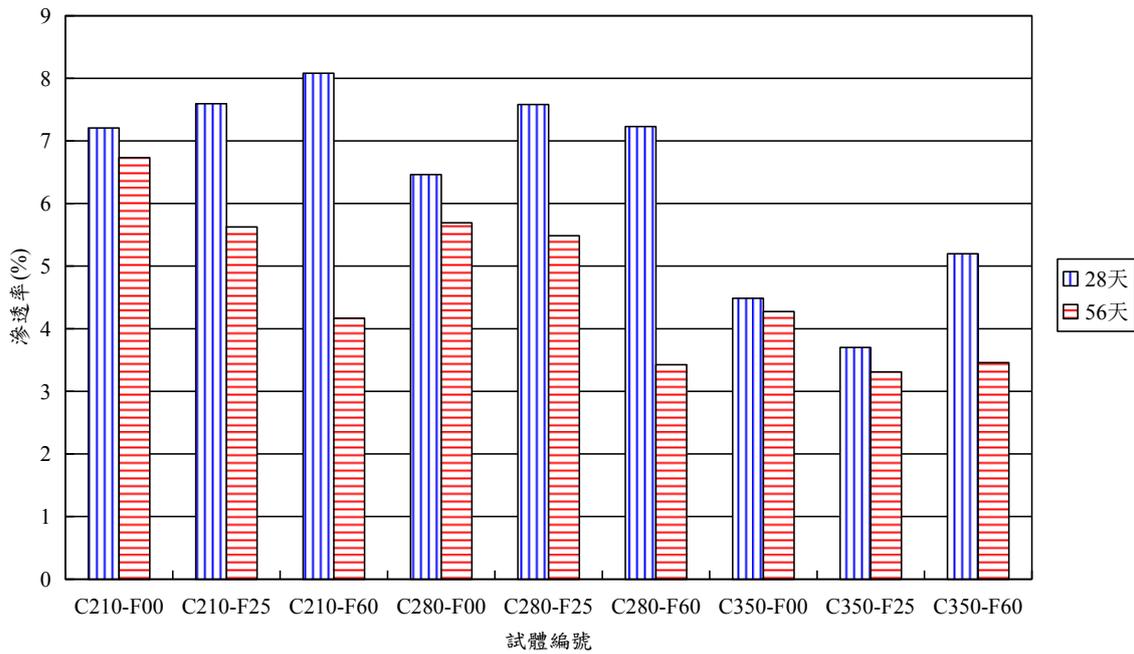


圖 4-25 混凝土滲透率

(資料來源：本研究整理)

## 第六節 快速氯離子滲透試驗結果

快速氯離子滲透試片分別於 28 天與 56 天齡期，量測 6 小時內通過電流量，依照 CNS 14795 規範計算通過總電荷量，其計算結果與判定分別如表 4-13 與表 4-14 所示，並繪製比較圖如圖 4-26 及圖 4-27 所示。

28 天齡期時，不同強度混凝土控制組(未加飛灰)試體所得總電荷量約介於 3800~7000 庫倫，配比 C210-F00 之 28 天齡期電荷通過量為最高，平均有 6981 庫倫，配比 C350-F00 的 3849 庫倫則最低；56 天齡期時，配比 C210-F00 的電荷通過量為最高平均 6039 庫倫，配比 C350-F00 的 3455 庫倫最低。試驗結果顯示，普通混凝土隨著設計強度提高或齡期增長，對氯離子滲透通電量有降低的趨勢。就氯離子穿透性判定而言，不論 28 天或 56 天齡期，僅有設計強度 350 kgf/cm<sup>2</sup> 混凝土屬於中等滲透性，其餘組均有較高氯離子穿透性，表示其耐久性較差。當加入了飛灰後，由表 4-13 與表 4-14 可以發現，飛灰混凝土許多屬低於 1000 庫倫之極低氯離子穿透特性。

圖 4-26 為 28 天齡期，飛灰取代水泥量與混凝土氯離子電荷通過量之關係圖。圖中顯示，28 天齡期之飛灰混凝土電荷總通過量變化於 620~2365 庫倫之間。當飛灰摻量為 25%時，三種混凝土強度等級(C210-F25、C280-F25 及 C350-F25)試體之總通過電荷分別降低 67%、78%，及 66%；當飛灰摻量為 60%時，三種混凝土強度等級則分別降低 71%、81%，及 84%。不同強度等級，以飛灰取代水泥均可降低混凝土通過之總電荷，隨著飛灰取代水泥量增加，混凝土抗氯離子滲透性也會增加。

56 天齡期時，飛灰摻量與混凝土氯離子電荷通過量之關係如圖 4-27 所示。由實驗分析可知，飛灰混凝土之電荷總通過量變化界於 230~1030 庫倫之間，顯示長齡期(56 天)時，飛灰混凝土有更佳的抗氯離子滲透之能力，惟隨飛灰摻量的增加，混凝土對抗氯離子滲透性之效果也將遞減，即飛灰摻量 25%和 60%對於改善混凝土抗氯離子滲透的能力效果相當。

表 4-13 飛灰混凝土 RCPT 總電荷試驗結果 (28 天齡期)

試體編號	通過總電荷(庫倫 Coulombs)				氯離子穿透性
	試體 1	試體 2	試體 3	平均	
210-F00	6936	6951	7055	6981	高
280-F00	6373	6300	6286	6320	高
350-F00	3874	3812	3860	3849	中
210-F25	2321	2370	2401	2364	中
280-F25	1735	1666	1779	1727	低
350-F25	1249	1248	1150	1216	低
210-F60	2034	2039	2099	2057	中
280-F60	792	819	800	804	甚低
350-F60	619	639	600	619	甚低

(資料來源：本研究整理)

表 4-14 飛灰混凝土 RCPT 總電荷試驗結果 (56 天齡期)

試體編號	通過總電荷(庫倫 Coulomb)				氯離子穿透性
	試體 1	試體 2	試體 3	平均	
210-F00	6015	6001	6100	6039	高
280-F00	4865	4877	4900	4881	高
350-F00	3455	3410	3500	3455	中
210-F25	1015	1048	1017	1027	低
280-F25	806	852	875	844	甚低
350-F25	520	495	493	503	甚低
210-F60	752	730	708	730	甚低
280-F60	305	370	359	345	甚低
350-F60	222	272	193	229	甚低

(資料來源：本研究整理)

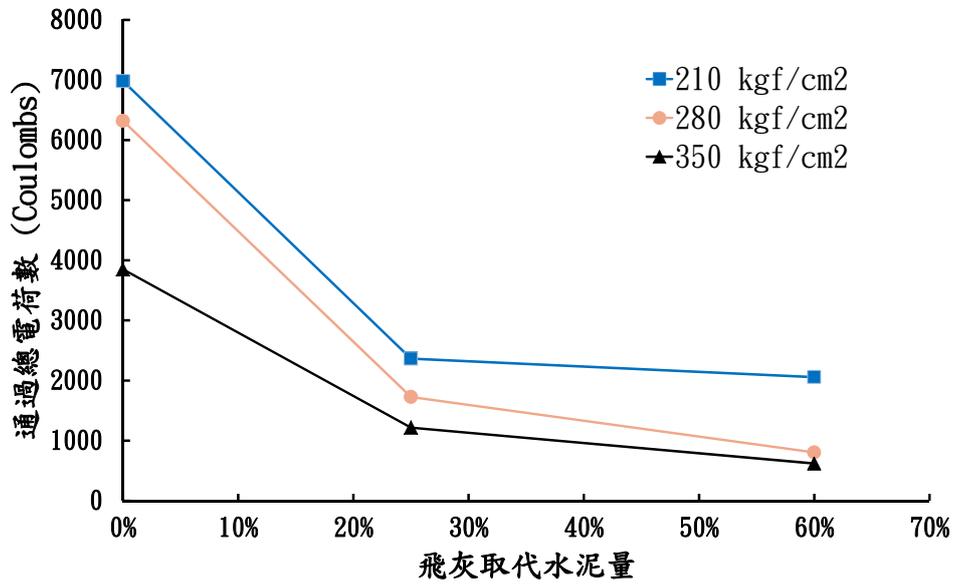


圖 4-26 飛灰摻量與混凝土總電荷量關係圖 (28 天齡期)

(資料來源：本研究整理)

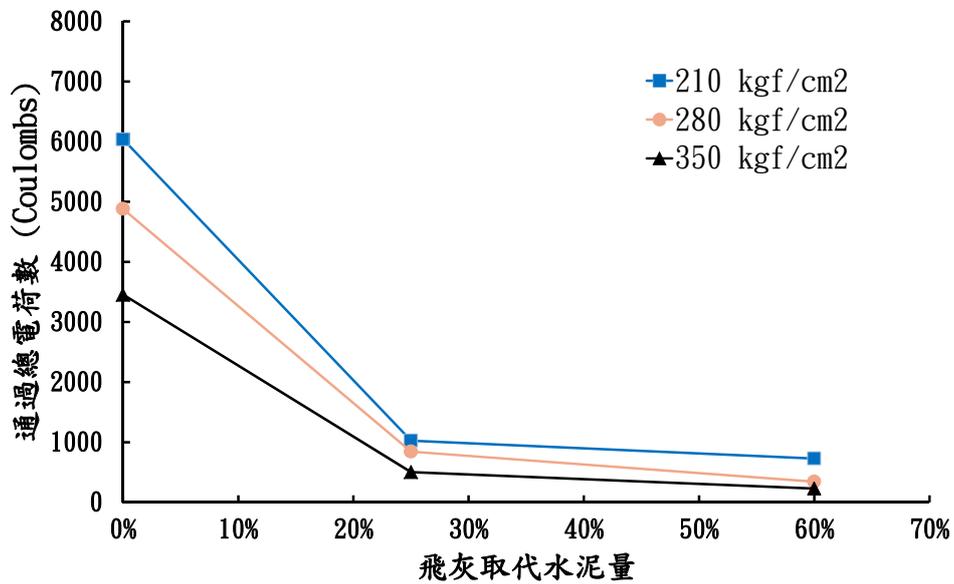


圖 4-27 飛灰摻量與混凝土總電荷量關係圖 (56 天齡期)

(資料來源：本研究整理)

#### 第八節 飛灰摻量檢測技術可行性評估

由於飛灰的單價較水泥便宜許多，有些預拌混凝土廠商為降低成本而減少水泥用量，改以添加過量的飛灰來取代之，若沒有經過適當的配比設計做調整，這種作法可能會使混凝土的強度發長出現問題，嚴重者可能會導致混凝土的失敗。因此，如何檢測混凝土中的飛灰摻量，特別是新拌混凝土的飛灰摻量，長久以來都是科學家及工程師積極想克服之問題。然而，水泥及飛灰在加入水後，即開始一連串複雜且漫長的水化反應及卜作嵐反應，反應的過程中會生成多種水化產物及熱，由於這些化學反應是不可逆，因此無法利用還原反應生成物來推估飛灰的摻量。目前有關飛灰摻量的檢測方式，規範 CNS 12459 的檢測方式仍侷限於水泥及飛灰均為乾料時才能檢測[43]。

水泥與水接觸後即進行水化反應並釋放熱，故水泥量越多，釋放的熱量越多，混凝土的溫度越高；反之，混凝土的溫度越低。基於此概念，本研究曾經利用量測新拌混凝土的溫度，即混凝土剛拌製完成，尚未澆置於模具內的溫度，藉以比較出摻有飛灰及無摻飛灰混凝土的溫度變化，惟所量測到的溫度幾乎沒有差別，無法據以判斷飛灰摻量與混凝土溫度的關係。推估此結果，可能是試驗用的混凝土量體太少，無法獲得明顯差異的水化反應溫度差值；再者，一開始的水泥水化反應放熱過程會在 5 至 10 分鐘內結束，隨即進入放熱的潛伏期，約 40 分鐘至 1 小時，這時水泥不會產生熱，因此在混凝土澆置完成時，混凝土的溫度變化不大，因此以量測混凝土溫度變化來推估飛灰摻量的方式並不適用。

飛灰摻量的檢測應在混凝土處在新拌階段時進行，因此時混凝土尚未澆置，若檢測出飛灰的摻量過多，可立即要求廠商退貨，避免混凝土澆置硬固後強度發展不符合設計需求而須敲除。不過，由上述說明可知，尚無方式可直接量測新拌階段混凝土的飛灰摻量，因此本研究亦嘗試迴歸分析硬固混凝土抗壓強度與飛灰摻量的關係，希望能以混凝土抗壓強度推估飛灰的摻量。不過，由於混凝土設計強度以 28 天齡期抗壓強度為基準，因此高飛灰摻量

混凝土在設計時即會考慮其 28 天齡期的抗壓強度，故高飛灰摻量混凝土 28 天齡期的抗壓強度均符合設計目標值，無法用以推估飛灰的摻量，因此以抗壓強度評估混凝土中飛灰摻量的方式亦無法適用。

綜上所述，如何即測即知新拌混凝土中的飛灰摻量，為飛灰摻量檢測方式是否可被廣泛應用的重要因素，雖然目前尚無檢測方式可做到，不過仍值得相關單位及從業人員持續努力鑽研，有朝一日必能成功研發合宜的檢測方式。

### 第九節 相關規範/規定研修建議

高飛灰摻量混凝土屬於新型混凝土，目前臺灣尚無相關法規/規定有納入該類混凝土，為有效推廣高飛灰摻量混凝土的應用，本研究參考相關法規/規定研擬「結構混凝土施工規範-高飛灰摻量混凝土(建議條文草案)」(附錄七)及「施工綱要規範-高飛灰摻量混凝土(建議條文草案)」(附錄八)，可供行政院公共工程委員會及內政部營建署在推廣高飛灰摻量混凝土時參考。

此外，鋼筋混凝土設計時，混凝土與鋼筋間的握裹強度為一重要的設計因子，係因其牽涉到鋼筋得搭接長度及錨定等重要設計參數，本研究擬以鋼筋握裹試驗結果研擬「混凝土結構設計規範-第五章、鋼筋之伸展與續接」研修建議草案，不過本研究試驗量仍嫌不足，且辦理專家學者座談會時，與會專家亦不建議提出研修建議，仍需更多試驗結果才可據以研擬研修建議，惟可建議相關權責機關於該章節內加註「使用高飛灰摻量混凝土時，不可提早拆模，若有必要應延後拆模時間，以確保混凝土強度發展已符合設計需求」等文字。

國內有關飛灰混凝土的施工大都參考行政院公共工程委員會編製之「公共工程飛灰混凝土使用手冊」的相關規定，該手冊依混凝土結構種類之不同，建議最高飛灰摻量的值，最高者為水泥取代量的30%。為提升飛灰混凝土的應用層面，本研究擬以高飛灰摻量混凝土配比設計試驗結果研擬該手冊第四章配比設計之研修建議，經徵詢專家學者座談會出席專家之意見，認為本研究之試驗數據仍不夠充分，不宜研提相關研修建議，惟可以於該手冊加註「若飛灰摻量超過本手冊建議之最高值，需事先徵得主辦機關同意，並進行試拌試驗，確認飛灰混凝土各項性質符合設計要求，並於施工過程注意模板拆模時間不可提早，方可採用之」等文字。

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

本研究製作高飛灰摻量混凝土與鋼筋握裹的試體，利用不同的飛灰摻量及圍束條件，探討高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度的關係，並進行混凝土抗彎、滲透及快速氯離子滲透等試驗，解析高飛灰摻量混凝土的耐久性，藉以研究高飛灰摻量混凝土與鋼筋間的握裹機理。研究結論概述如下：

1. 由混凝土新拌試驗結果可知，隨著飛灰摻量的增加(如 60%、70%)，需添加較多的強塑劑並拌和較長的時間，混凝土才具有流動性，且拌製完成的混凝土非常黏稠，在澆置試體及墁平的作業上需特別注意。此外，化學藥劑影響高飛灰摻量混凝土新拌性質非常明顯，本研究試拌試驗採用之強塑劑 A 需添加較多的量才能使混凝土有工作性，但會造成混凝土延後凝結；驗證試驗混凝土採用強塑劑 B，可使混凝土獲得較理想的工作度並且不會有延後凝結的現象，以飛灰摻量 60%之各配比為例，C210-F60 終凝時間為 377 分鐘、C280-F60 為 339 分鐘、C280-F60 為 370，符合一般混凝土終凝時間 8 至 10 小時的要求。
2. 解析抗壓強度試驗結果可發現，飛灰有助於增加混凝土的晚期強度，惟隨飛灰摻量的增加，強度成長趨於緩慢，需待更後面的齡期方能表現出理想的強度。此外，中高強度 C280 及 C350 配比系列，摻有飛灰的配比抗壓強度 56 天齡期比 28 天齡期增加之幅度較低強度 C210 配比系列明顯，由於高強度配比之水泥用量較多，飛灰對於增加混凝土晚期強度的成長影響越明顯；且水泥量越多，飛灰可取代水泥的量較多，相形之下減少較多的水泥用量。
3. 分析抗彎強度試驗結果得知，齡期 7 天時，三種強度之各系列配比混凝土抗彎強度隨飛灰摻量增加而降低；28 天齡期時，飛灰摻量的影響較無規律，配比 C210-F25 及 C280-F25 為同系列配比中抗彎強度最低，高強度混凝土配

比則以配比 C350-F60 的抗彎強度最低；56 天齡期時，中低強度混凝土配比以 C210-F60 的 60 kgf/cm<sup>2</sup> 及 C280-F60 的 59 kgf/cm<sup>2</sup> 為同系列配比中最高，高強度混凝土配比以 C350-F60 的 77 kgf/cm<sup>2</sup> 為同系列配比中最低，惟與同系列其他兩組配比的抗彎強度接近，隨著齡期持續增加，其抗彎強度的發展應仍可繼續提升。

4. 由鋼筋握裹試驗結果可知，早齡期時(28 天以前)，無論有無箍筋圍束，握裹應力主要跟混凝土抗壓強度有較明確之關係，跟飛灰的摻量關係較不明顯；較晚齡期時(28 天以後)，飛灰提高了混凝土的強度與密度，使得握裹應力明顯增加，尤其在高含量飛灰(60%)的狀態下，不論箍筋有無圍束，此趨勢均相當明顯。
5. 分析鋼筋拉拔握裹載重—位移關係發現，無箍筋的試體在載重達到極限握裹應力時，鋼筋即因混凝土產生劈裂破壞而迅速脫離試體，在極限強度後的位移不大，但力量已大幅降低；有箍筋的試體在載重達到極限握裹應力時，鋼筋與混凝土產生明顯的相對位移，但試體未明顯開裂，極限強度後，雖有明顯位移，但力量下降幅度較為緩慢，且不論混凝土之飛灰含量多寡與齡期之長短，此種情況均有反應出來。含有較高飛灰摻量的混凝土，其極限狀態下的握裹應力也相對的提高，不論試體有無箍筋圍束，其結果均反應出此一現象。
6. 觀察拉拔握裹試體破壞情形可知，無圍束握裹試體大多出現劈裂破壞，即鋼筋被拉拔的過程中，於鋼筋周圍出現裂縫，造成鋼筋失去與混凝土的握裹應力而破壞；有圍束試體之破壞模式大致呈現鋼筋拔出破壞，且因圍束鋼筋的作用，使得混凝土方塊試體能保持完整，沒有出現碎解的狀況。
7. 滲透試驗結果方面，齡期 28 天時，各式配比之混凝土試體滲透率有隨抗壓強度增加而減少的趨勢，即 C210 系列滲透率最大、C280 次之、C350 最小，

不過受飛灰摻量影響的狀況較無規律，此結果應是飛灰尚未完全反應所致；齡期 56 天時，飛灰摻量的影響逐漸明顯，各式配比之混凝土試體滲透率隨抗壓強度及飛灰摻量增加而減少的趨勢，可知適當添加飛灰取代部分水泥確實有助於混凝土的緻密性及耐久性的改善，惟需注意飛灰摻量越多，混凝土抗滲透能力需於晚齡期才能有效發揮。

8. 快速氯離子滲透試驗結果顯示，普通混凝土(未摻飛灰)隨設計強度提高或齡期增長，對氯離子滲透通電量有降低的趨勢，不論 28 天或 56 天齡期，僅有 C350-F00 混凝土屬於中等滲透性，其餘組均有較高氯離子穿透性，耐久性較差。飛灰摻量 25%時，三種混凝土強度等級 C210-F25、C280-F25 及 C350-F25 混凝土之總通過電荷分別降低 67%、78%，及 66%；飛灰摻量 60%時，則分別降低 71%、81%，及 84%，隨著飛灰摻量的增加，混凝土抗氯離子滲透能力也增加。56 天齡期時，摻有飛灰的混凝土之抗氯離子滲透能力更為提升，惟飛灰摻量增加對提升抗氯離子滲透性之效果也將遞減。

## 第二節 建議

根據高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究執行過程中的發現，本研究提出下列具體建議。以下分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉。

### 建議一

增訂高飛灰摻量混凝土使用規範草案：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署

本研究及相關高飛灰摻量混凝土研究成果指出，經由合宜的配比設計可產製理想的高飛灰摻量混凝土，可證該類混凝土擁有實際應用的價值，惟國內尚未有相關使用規範可遵行，本研究已研擬該類混凝土使用規範建議草案，可供相關權責單位參考作為後續該類混凝土使用規範制定之參考。

### 建議二

研發高飛灰摻量混凝土相關製品：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：臺灣電力股份有限公司綜合研究所

高飛灰摻量混凝土具有節能減碳、環保及再利用等眾多優點，可說是一種綠色的混凝土，除可作為鋼筋混凝土的材料外，還可製作成各式混凝土製品，如屋瓦、地磚、透水混凝土等，若可進一步研究此類製品的配比設計、工程性質及耐久性，研發符合需求的產品，可有效減少水泥的用量並增加飛灰再利用的價值，亦可呼應政府推動綠建築、綠建材的政策，一舉數得。

參考文獻

- 【1】 顏聰，「土木材料」，自行出版，第4版，2014年。
- 【2】 楊楊、錢曉倩，「土木工程材料」，武漢大學出版社，第1版，2014年。
- 【3】 Malhotra, V. M., “High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete,” Concrete International, Vol. 24, No. 7, pp. 30-34, 2002.
- 【4】 Bilodeau, A., and Malhorta, V. M., “High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development,” ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 1, pp. 41-48, 2000.
- 【5】 Bouzoubaa, N., Fournier, B., Malhotra, V. M., and Golden, D. M., “Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cements Produced in Cement Plant,” ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 6, pp. 560-567, 2002.
- 【6】 Reiner, M., and Rens, K., “High-Volume Fly Ash Concrete: Analysis and Application,” Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 11, No. 1, pp. 58-64 (2006).
- 【7】 Wu, J. H., Pu, X. C.; Liu, F., and Wang, C., “High Performance Concrete with High Volume Fly Ash,” Key Engineering Materials, Vol. 302-303, pp 470 -478, 2006.
- 【8】 Burak, U., Turanli, L., and Mehta, P. K., “High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications,” ACI Materials Journal, Vol. 104, No. 5, pp. 535-538, 2007.
- 【9】 湯兆緯，「高飛灰含量水泥漿體之水化特性與微結構」，興大工程學刊，第20卷，第1期，2009年。
- 【10】 陳駿，「高摻量飛灰混凝土配比設計與力學行為探討」，臺灣大學碩士學位論文，2009年。
- 【11】 顏聰等，「高飛灰摻量混凝土產製技術與應用研究」，臺灣電力公司研究報告，2011年。
- 【12】 吳鎮吉，「高摻量飛灰混凝土應用於連續壁及基礎版之工程性質探討」，臺灣大學碩士學位論文，2011年。
- 【13】 黃玉珍，「高摻量飛灰混凝土之力學性能探討」，中興大學碩士學位論文，

2011 年。

- 【14】 Ykimasa Goto, 1986, "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars," ACI Journal, Proceedings, Vol.68, No.4, pp.244-251.
- 【15】 ACI Committee 408, "State-of-the-Art Report : Bond under cyclic load," ACI Materials Journal, Vol. 88, No.6, pp.408, 1991.
- 【16】 Lutz, L. A., P. Gergely, "Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete," ACI Journal, Proceeding, V.64, No.11, Nov. 1976, pp.711-721.
- 【17】 Chinn, J., Feruson, P.M., Thompson, J.N., "Lapped Splices in R.C. Beam," ACI Journal, V. 52, No. 2, pp 201-214, October 1955.
- 【18】 D. H. Jiang, S. P. Shak, A. T. Andonian, "Study of the Tranfer of Tensile Forces by Bond", ACI Journal, pp. 251-259, 1984.
- 【19】 黃兆龍、董榮進、李清俊、郭昭宏、釋俊仁，「混凝土中鋼筋腐蝕行為研究」，第四屆技術及職業教育研討會，pp. 1313-1318，1989。
- 【20】 許耿蒼，「以敲擊回音法評估受震後新澆置混凝土構件之鋼筋握裹損失」，朝陽科技大學碩士學位論文，2002 年。
- 【21】 Kenneth Leet, "REINFORCED CONCRETE DESIGN," Second Edition, McGraw-Hill Inc., PP.231~242, 1991.
- 【22】 Edward, A.D.; and Yannopoulos, P.J, "Local Bond-Stress to Slip Relationships for Hot Rolled Deformed Bar and Mild Steel Plain Bars," ACI Journal, Proceeding, V.76, No.3, PP.405~420, Mar. 1979.
- 【23】 Kemp, E.L., January-February, "Bond in Reinforced Concrete : Behavior and Design Criteria," ACI Materials Journal, No.83-7, pp.50-57, 1986.
- 【24】 ACICommittee408, "State-of-the-Art-Report : Bond under cyclic Loads," ACI Materials Journal, November-December 1991.
- 【25】 Orangun, C.O; Jirsa, J.O; and Breen J.E, "A reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," ACI Journal, Proceeding, V.74, NO.3, PP. 114~122, Mar. 1977.
- 【26】 Kenneth Leet, "REINFORCED CONCRETE DESIGN," Second Edition, McGraw-Hill Inc., PP.231~242, 1991.
- 【27】 林保展，「鋼筋自然鏽蝕與混凝土握裹強度之關係」，碩士論文，國立成功大學，2006 年。

- 【28】 賴睿璿，「飛灰混凝土之施工性與介面力學性質探討」，臺灣大學碩士學位論文，2010年。
- 【29】 林冠婷，「卜作嵐混凝土採用熱浸鍍鋅鋼筋工程性質之研究」，高雄應用科技大學碩士學位論文，2015年。
- 【30】 Trevor J. Looney, Mahdi Arezoumandi, Jeffery S. Volz and John Joseph Myers, “Bond Behavior of High-Volume Fly Ash Concrete,” First International Conference on Concrete Sustainability, Tokyo, Japan, May 2013.
- 【31】 Trevor J. Looney, Mahdi Arezoumandi, Jeffery S. Volz and John Joseph Myers, “An Experimental Study on Bond Strength of Reinforcing Steel in High-Volume Fly-Ash Concrete,” *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 1, No. 1, December 2012.
- 【32】 Michael Hayse Wolfe, “Bond strength of high-volume fly ash concrete,” Missouri University of Science and Technology, Masters Theses, 2011.
- 【33】 Jiong-Feng Liang, Ming-Hua Hu, Lian-Sheng Gu and Kai-Xi Xue, “Bond behavior between high volume fly ash concrete and steel rebars,” *Computers and Concrete*, Volume 19, pp. 625-630, June 2017.
- 【34】 胡顧曦，「高飛灰含量混凝土之耐久性研究」，臺灣大學碩士學位論文，2010年。
- 【35】 許俊傑，「探討高飛灰含量混凝土之物理性與耐久性」，正修科技大學碩士學位論文，2012年。
- 【36】 林思明，「飛灰混凝土傳輸行為之研究」，海洋大學碩士學位論文，2015年。
- 【37】 紀茂傑，「混凝土耐久性影響因素及評估方法之研究」，海洋大學博士學位論文，2002年。
- 【38】 劉裕意，「添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討」，海洋大學碩士學位論文，2004年。
- 【39】 廖展章，「以加速氯離子穿透試驗評估礦物摻料及用量之混凝土耐久性影響」，海洋大學碩士學位論文，2001年。
- 【40】 詹穎雯，「高飛灰摻量混凝土於基礎版國內應用首例」，營建資訊，第370期，2013年。

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

- 【41】 廖同柏等，「高飛灰摻量混凝土於中興工程研究大樓新建工程之應用」，中興工程，第 128 期，2015 年。
- 【42】 林平全，「飛灰混凝土」，科技圖書股份有限公司，民國 78 年。
- 【43】 中華民國國家標準 CNS 12459:卜特蘭與水硬性混合水泥中水淬高爐爐渣、矽質材料、飛灰及石灰石含量之測定法，2017 年。

## 附錄一 期初審查會議與回應

項次	審查委員意見	廠商回應
1	本案研究方法，有關握裏拉拔試驗部分，該試驗方法係使用何種鋼筋？鋼筋號數為哪幾種？實驗室是否經過 TAF 認證？	本案旨在討論飛灰填加量對握裏強度的影響，故規劃採用 6 號 SD420 竹節鋼筋，以進行實驗研究。另握裏試驗一般僅作為學術研究，因業界需求較少，故 TAF 認證實驗室鮮少申請握裏試驗項目認證。
2	本案設定飛灰取代水泥用量試驗變數為 0%、30%、50%、70%與採購說明 50%、60%、70%不一致，其理由為何？	有關飛灰摻量試驗變數的設計，將依據委員意見修正為 0%、25%、50%、60%、70%，以符合現行規範摻量的規定和需求項目的要求。
3	採購說明有「創意或自由回饋項目」配分權重為 5%，但服務建議書並無特別提出說明？	考量相關研究甚少針對混凝土抗拉強度進行探討，本案擬增作抗拉強度實驗，作為自由回饋項目，進一步研究高飛灰摻量對混凝土握裏行為的影響。
4	受評廠商對本案的內容及目的，已有充分的瞭解，並已列出研究的方法及過程提出構想及安排，原則可行。	感謝委員支持。
5	本案採用方法之試驗變數規劃，飛灰取代水泥用量尚缺邀標書中規定的 60%，另國內現行使用規範值為 25%，建議納入試驗以利作為比較基準值。	有關飛灰摻量試驗變數的設計，將依據委員意見修正為 0%、25%、50%、60%、70%，以符合現行規範摻量的規定和需求項目的要求。
6	新拌性質試驗，建議針對高飛灰摻量與混凝土初凝時間變化的影響進行討論，倘初凝時間延遲及初期強度較低，恐影響工作性(如須施作整體粉光等)及拆模時間。	遵照委員意見辦理，將於後續研究工作進行探討。
7	高飛灰摻量混凝土搭配強塑劑減少用水量，但其可能降低工作性	有關高飛灰摻量混凝土的工作性研究，將考量強塑劑的影響於

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

	而影響泵送，另其流動性不佳易形成蜂窩現象，建議納入研討。	配比設計時探討之。
8	本案主題在於探討以飛灰材料取代部分水泥，水泥特點係高鹼性以保護鋼筋，故其前提應先確認飛灰材料不含任何酸性成分。	本案採用之飛灰會確認是否含酸性物質。
9	飛灰取代部分水泥後，其鋼筋間之握裹強度，亦請考慮當鋼筋密集排列如梁柱接頭位置，其握裹強度是否受影響。	依據現行土木 401-100 規範之說明，鋼筋密集排列程度會對握裹行為產生影響(劈裂或拔出)，但主要的握裹力貢獻，來自於竹節間的混凝土支承力，故本案在握裹行為探討時，會一併考慮破壞模式的呈現，來反映鋼筋密集程度對其產生的效應是否不同。
10	若有水中混凝土澆置狀況時，建議考慮飛灰混凝土所受之影響，並注意應如何克服。	感謝委員寶貴意見，後續若有進行相關研究，將再予以探討。
11	本案研究有價值，修改規範要審慎，因為相關後續課題尚多。	感謝委員給予肯定意見，本案服務建議書主要針對研究成果提出說明，若有與現行規範出入較多部分，將提供較詳細的實驗數據給相關單位參考，以供制訂規範委員作更深入之評估。
12	資料蒐集請改列本所先前經費審查額度以上，前 3 個月經費動支達 80%以上。	遵照委員意見辦理。
13	書籍、文獻收集分析、翻譯等電子檔分期集結交存本所，並於第 1 個月提供目錄及執行計畫，與本所人員洽商實施。	遵照委員意見辦理。
14	請說明飛灰混凝土於國內推動之困難，並於本案成果提出解決建議。	過去數十年，摻入飛灰有助於混凝土改善各種性質，已獲許多研究成果及工程實例之驗證，然高摻量飛灰混凝土之使用顧慮，為國內推動之困難之一，本案後續將遵照委員意見辦理。

15	建議蒐集國外先進國家最新相關規範之規定提供，本案參考應用。	遵照委員意見辦理。
16	高飛灰摻量混凝土過去研究很多，惟因使用顧慮未能大量使用，其缺失有哪些？是否已經解決，又是否使用部位的建議。	大量使用飛灰容易導致混凝土早期強度不足，影響拆模時間或工期等，因此通常用於非承重構件或巨積混凝土等強度要求不高之構件，本案主要重點於高用量飛灰混凝土與鋼筋的握裹行為。期能為高飛灰混凝土之應用範圍作進一步探究。
17	台電各火力發電廠產出飛灰之品質是否一致？	飛灰品質變化大，但本案所採飛灰品質依 CNS 3036 之規定辦理。
18	亦同時探討不同強塑劑配比下抗拉強度的效果。	不同用量飛灰之混凝土其強塑劑用量，依工作性要求作變化，其對抗拉強度之影響，將納入抗拉試驗考慮之。
19	混凝土氯離子滲透問題，建研所過去已有很多研究，建議延續本所過去研究的方法例如 RCPT。	後續 RCPT 試驗法除參考 ASTM C1202 外，並參考貴所過去研究的方法。

附錄二 期中審查會議與回應

項次	審查委員意見	廠商回應
1	高飛灰摻量混凝土適用於抗壓強度 280kgf/cm <sup>2</sup> 以上的配比，是依何種學理及需要的要求？	氫氧化鈣是水泥和水進行反應的生成物之一，飛灰在有水和氫氧化鈣的狀態下會進行卜作嵐反應，產生有強度的膠體提高混凝土的強度，因此需有足夠的氫氧化鈣才能供高摻量的飛灰使用，而抗壓強度較高的混凝土通常會使用較多的水泥，故設計高飛灰摻量混凝土宜採強度較高之混凝土配比。
2	飛灰上浮現象，在 921 地震損害建築的種類中有出現，需予正視。	感謝組長寶貴的意見。 由於飛灰的比重比水泥輕，且不會在混凝土新拌階段就立即完全反應，若飛灰的摻量較多，澆置混凝土時又因偷加水而使混凝土失去應有的黏滯性，飛灰便會在混凝土震動夯實的過程中往上浮起。此問題，將於後續報告中的高飛灰摻量混凝土施工性一節中補充說明。
3	請增加高飛灰摻量混凝土施工性的說明。	遵示辦理，將於期末報告中補充說明。
4	握裹強度與抗壓強度有關，是否直接研究與抗壓強度的關係即可？	感謝委員寶貴的意見。 添加飛灰可增加新拌混凝土的黏滯性，減緩混凝土泌水的現象，有助於改善混凝土與鋼筋間的握裹性質，是以，飛灰摻量對混凝土與鋼筋間握裹強度的影響是一值得探討的課題。
5	飛灰摻量過多會導致混凝土的鹼性降低，是否會影響耐久性？	氫氧化鈣為混凝土鹼性的來源，本身沒有強度，是混凝土中的弱相物質，飛灰可與之反應產生有強度的膠體填充氫氧化鈣原占有的空間，增加混凝土的緻密性與強度，提昇混凝土的耐久性，惟高摻量的飛灰是否可達上述效果值得進一步的研究探討，本研究將待耐久性

		試驗完成後，補充說明於期末報告。
6	實務上常出現混凝土灌注完成之結構發生飛灰上浮現象。	感謝委員寶貴的意見。 由於飛灰的比重比水泥輕，且不會在混凝土新拌階段就立即完全反應，若飛灰的摻量較多，澆置混凝土時又因偷加水而使混凝土失去應有的黏滯性，飛灰便會在混凝土震動夯實的過程中往上升起。此問題，將於後續報告中的高飛灰摻量混凝土施工性一節中補充說明。
7	期中報告有多處「試拌」誤植為「試拌」。	感謝委員的提醒，將於期末報告修正。
8	以研究成果來修訂相關規範，似不夠嚴謹。	感謝委員的提醒，本研究將謹針對試驗結果與現行相關規範作比較，研提規範研修時可參考之建議，惟仍需更多的研究及試驗成果，方能據以修訂之。
9	研究著重高飛灰摻量混凝土的強度提升，未提及施工及後續使用之問題，例如高飛灰摻量是否造會成混凝土析離，飛灰上浮、輸送困難及混凝土無法正常水化反應等。	感謝委員寶貴的意見。 委員所提各項問題，將於後續報告中的高飛灰摻量混凝土施工性一節中補充說明。
10	飛灰摻量 25%或 50%以上之配比，對 SCC 強度(如 280kgf/cm <sup>2</sup> )之外的性能，如通過障礙、骨料析離、抗黏稠性之影響如何？長期的影響如何？	感謝委員寶貴的意見。 本研究採用的混凝土不包含自充填混凝土(SCC)，有關高飛灰摻量 SCC 的配比研發，台灣電力公司已有不錯的研究成果產出，其發展的高飛灰摻量 SCC 可符一般 SCC 基本性質的要求。
11	本研究預期成果 3，有關鋼筋握裹強度/伸展長度之建議，應係供「混凝土結構設計規範」參考，而非「結構混凝土施工規範」，建請修正。	遵示辦理。
12	期中報告第 14 頁，誤植為圖 2-1，應為圖 2-2，請修正。	遵示辦理。
13	請於後續報告說明試體用鋼筋降伏強度。	遵示辦理，將於期末報告補充修正。

14	<p>建築工程實務上引用大於 <math>f_c'=280\text{kgf/cm}^2</math> 強度之混凝土已相當普遍，確有必要納入抗壓強度 350 或 <math>420\text{kgf/cm}^2</math> 之試驗資料，且現行規範鋼筋伸展長度之計算與 <math>f_c'</math> 有關，有必要建立不同 <math>f_c'</math> 參數之影響。</p>	<p>感謝委員寶貴的意見。 本研究擬增加 <math>f_c'=350\text{kgf/cm}^2</math> 之配比，探討低、中、高 3 種不同抗壓強度等級 (<math>210\text{kgf/cm}^2</math>、<math>280\text{kgf/cm}^2</math>、<math>350\text{kgf/cm}^2</math>) 混凝土的握裹強度。</p>
15	<p>預期成果有關「飛灰摻量檢測之可行性評估」未於期中報告說明。</p>	<p>感謝委員寶貴的意見。將於期末報告補充說明。</p>
16	<p>圖 1-1 中敘述欲進行耐久性試驗，惟報告中尚未提及相關文獻及試驗的方法為何？通常耐久性試驗較為耗時且不易於短時間內或少量試體獲得明確的結論。因此，於本研究是否可得具體的結論？</p>	<p>感謝委員寶貴的意見。 耐久性方面的文獻整理及試驗方式將於期末報告補充說明。 為能獲得耐久性相關試驗的結果，並因應增加抗壓強度 <math>350\text{kgf/cm}^2</math> 的試驗變數，本研究規劃進行快速評估混凝土抵抗氯離子滲透能力試驗及混凝土抗滲透能力兩種耐久性試驗，齡期以 28 天及 56 天為主，應可在研究期程內獲得相關試驗成果。</p>
17	<p>影響鋼筋與混凝土間握裹應力的因素甚多，一般主要與鋼筋表面 <math>R_f</math> 值 (節高與節徑比)、混凝土強度、粗細骨材量、圍束鋼材條件及混凝土保護層等因素有關，其中現行設計規範中主要影響伸展長度之因素為混凝土強度 <math>f_c'</math>、劈裂指數 <math>(C_b+k_{tr})/d_b</math>，飛灰的添加量只可能影響混凝土的強度，請問如何獲得預期成果中的第 3 項？</p>	<p>感謝委員提供的寶貴意見。 本研究為國內首例高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度的研究案例，故初步的研究目標係設計出合宜的高飛灰摻量混凝土並探討其與鋼筋握裹的機理，再將試驗的結果與規範作比較，研提規範研修時可參考之建議，惟仍需更多的研究及試驗成果，方能據以修訂之。</p>
18	<p>現行設計規範所採用之伸展長度公式是屬於撓曲握裹，而本研究欲使用錨定拉拔試驗求得握裹應力，可能無法應用於規範之伸展長度公式。同時，ACI 408 也提及採用錨定拉拔試驗欲求得鋼筋於混凝土構件</p>	<p>感謝委員寶貴的意見。 誠如委員所述，要能完整反應混凝土與鋼筋的握裹行為，宜以梁的撓曲握裹試驗較為合適，惟考量本研究的資源及高飛灰摻量混凝土尚屬較新穎的材料，仍需在配比設計的工作上多下功夫，故先</p>

	中之伸展長度是不合理的試驗方式。	行規劃錨定拉拔試驗，解析高飛灰摻量對鋼筋握裹的影響機理，後續若有機會進行相關的研究，將進一步探討梁的撓曲握裹行為。
19	由於混凝土使用材料的複雜，鋼筋與混凝土的握裹應力一般應用時，簡化僅與混凝土 $f_c'$ 有關，本研究使用數個配比，所得之混凝土強度很難控制在一定範圍，如表 4-2 其比較的基礎為何？且握裹強度與 $f_c'$ 、 $f_c'^{1/2}$ 或 $f_c'^{1/4}$ 成比例仍有不同的看法，此為不容易於短時間及有限的數據獲得結論。提供研究團隊參考。	感謝委員寶貴的意見。 目前試拌試驗的配比將作為後續各項試驗的參考配比，為因應多增加抗壓強度 $350\text{kgf/cm}^2$ 的配比，擬以 3 種強度 ( $210\text{kgf/cm}^2$ 、 $280\text{kgf/cm}^2$ 、 $350\text{kgf/cm}^2$ ) 三種飛灰摻量 (0%、25%、60%) 及兩種齡期 (28 天、56 天) 進行握裹及耐久性等試驗，以避免試驗變數過多，試驗條件控制不易。 高飛灰摻量混凝土的應用尚屬起步階段，如何有效應用於鋼筋混凝土仍需更多的研究探討，後續若能持續鑽研此類主題，擬將納入委員所提研究課題，規劃相應的試驗方法探討之。
20	公式(2-2)比較舊，應增加 ACI 408 較新的文獻公式，以符合現行規範。	遵示辦理。
21	鋼筋混凝土握裹應力為一極為複雜的研究議題，因此在進行飛灰含量的試驗研究時，必須特別注意其他變因的控制方能獲得有效的成果。	感謝委員的提醒，將於試驗規劃及試驗過程中密切留意。

# 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

## 附錄三 第1次工作會議

本會議已於民國 107 年 4 月 19 日假建築研究所大坪林聯合辦公大樓 13 樓討論室(一)辦理完成，出席人員有建築研究所陳建忠組長、李育帆研發替代役，建國科技大學吳崇豪助理教授、林喻峰副教授，共計 4 位。

### 工作會議簽到單

會議主題：高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

會議次數：第 1 次

日期：107 年 4 月 19 日星期四上午 10:00

地點：大坪林開發大樓 13 樓 討論室(一)

出席人員：

建築研究所出席人員		建國科技大學出席人員	
陳建忠 組長	陳建忠	吳崇豪 助理教授	吳崇豪
李育帆 研發替代役研究員	李育帆	林喻峰 副教授	林喻峰

附錄四 第2次工作會議

本會議已於民國 107 年 8 月 16 日假建築研究所大坪林聯合辦公大樓 13 樓簡報室辦理完成，出席人員有建築研究所陳建忠組長、李育帆研發替代役，建國科技大學吳崇豪助理教授、林喻峰副教授，共計 4 位。

工作會議簽到單

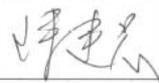
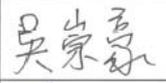
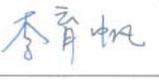
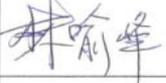
會議主題：高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

會議次數：第 2 次工作會議

日期：107 年 8 月 16 日星期四上午 10：00

地點：大坪林開發大樓 13 樓 簡報室

出席人員：

建築研究所出席人員		建國科技大學出席人員	
陳建忠 組長		吳崇豪 助理教授	
李育帆 研發替代役研究員		林喻峰 副教授	

附錄五 第1次專家學者座談會議紀錄

本會議已於民國 107 年 6 月 26 日假建築研究所大坪林聯合辦公大樓 13 樓討論室(一)辦理完成，出席專家學者有顏聰名譽教授、張大鵬特聘教授、蘇人輝副教授、紀人豪教授，建築研究所成員有陳建忠組長、李育帆研發替代役，建國科技大學研究團隊則有吳崇豪助理教授、林喻峰副教授，共計 8 位。出席專家之建議詳如下表所示。

審查委員	專家意見內容
張大鵬	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 國內飛灰因燃煤來源不同而品質有所差異，宜妥善建立長期性飛灰物、化性質之統計品管數據分析，作為飛灰穩定品質之參考依據。(除了燒失量外，尚需掌握 CaO 的含量。)</li> <li>2. 若飛灰摻量超過 30%以上(如 50%以上)，混凝土設計強度宜在 280kgf/cm<sup>2</sup>，甚至 350kgf/cm<sup>2</sup> 以上，早期強度及晚期強度才可適度提升，符合實務施工需求。</li> <li>3. 混凝土配比方式可再詳細查核。</li> </ol>
紀人豪	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 燃煤所餘飛灰的再利用關乎環境保護之重要議題。</li> <li>2. 根據文獻研究，燃煤飛灰僅有 30%能被再生利用，其餘多數被當作廢棄物處理，提高混凝土中飛灰的摻量有助於改善此問題。</li> <li>3. 依照多數工程經驗顯示，飛灰摻量較多有增加裂縫之虞，如何藉由工程養護以減少混凝土開裂，此為重要的課題。</li> <li>4. 目前建築法有引入第三方監造制度，建議可將其納入，以確保高飛灰摻量混凝土的施工品質。</li> </ol>
蘇人輝	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 要注意飛灰的品質，如燒失量、細度、比重及凝結時間等。</li> <li>2. 混凝土配比需列出。</li> </ol>
顏聰	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 試驗規劃合宜，研究內容對工程應用甚具意義。</li> <li>2. 計畫進度符合需求。</li> <li>3. 注意飛灰的細度及燒失量性質。</li> <li>4. 重視高飛灰摻量者(大於 50%)之工程性質，如凝結時間、工作性(坍度)、水膠比(W/B)、早晚期混凝土強度、單位重及 28 天抗壓強度之符合度。</li> <li>5. 進行界面過度區觀察時，需注意樣品的選取點及數量。</li> <li>6. 握裹試驗可同時測取變形(拉伸)與拉力(握裹力)，繪製變形-應力圖，以定其握裹強度。</li> <li>7. 所得握裹強度試驗結果應用於建築規範上時，可討論其與上筋及下筋配置之發展長度(<math>l_d</math>)的需求值。</li> </ol>



附錄六 第2次專家學者座談會議紀錄

本會議已於民國 107 年 10 月 25 日假建築研究所大坪林聯合辦公大樓 13 樓討論室(一)辦理完成，出席專家學者有黃兆龍特聘教授、方一匡名譽教授、王和源教授、紀茂傑教授，建築研究所成員有陳建忠組長、李育帆研發替代役，建國科技大學研究團隊則有吳崇豪助理教授、林喻峰副教授，共計 8 位。出席專家之建議詳如下表所示。

審查委員	專家意見內容
黃兆龍	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 高飛灰摻量宜著重最緻密狀態下之飛灰量，足以使飛灰填充砂達最重狀態才是，所以探討規範應以物理化學性質角度加以分析。</li> <li>2. 高飛灰摻量混凝土之論文有很多，可在 SCI 檢索中蒐尋相關文獻。</li> <li>3. 配比設計宜重視水量不宜超過 160 kg/m<sup>3</sup>，以保障耐久性品質。水量過高之試體體積穩定性不佳，且易龜裂。配比表中亦應分析飛灰/(飛灰+細粒料)比率。</li> <li>4. 飛灰對混凝土性質影響的論文，宜參考洪賢信老師 83 年的論文，內容上有飛灰取代水泥及細粒料之成果。</li> <li>5. 高飛灰摻量之資訊宜以大數據的方式分析，找出最佳化的結果，才適合訂定規範。</li> <li>6. 握裹力分析宜注意試體鑄造方向，可能引響泌水及鋼筋混凝土界面之特性。</li> </ol>
方一匡	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究成果對設計規範的應用而言，主要影響的參數是什麼？根據試驗結果，影響的百分比是多少？請註明。</li> <li>2. 除握裹強度的影響研究外，因為添加高百分比的飛灰量後對混凝土早期，28 天及 56 天性質的影響百分比，請量化註記。</li> <li>3. 根據現行的官方規定，本研究是否有所修改的建議，也請註記。</li> <li>4. 建議就目前的研究配比所得結果，如何定位研究成果的代表性，也請再檢討。</li> </ol>
王和源	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究對相關規範修正可以提供驗證之實際數據，具有相當之參考依據。</li> <li>2. 建議高飛灰摻量混凝土與鋼筋的握裹強度，可以 28 天齡期為基礎，其他齡期強度占的百分比。</li> <li>3. 驗證使用材料之物、化性如何？與台電配比之材料性質做一比較。</li> <li>4. 快速氯離子滲透試驗(RCPT)不同齡期之縱座標一致，更易做比較。</li> <li>5. 高飛灰摻量之飛灰性質，如 C 級及 F 級等條件須註明。</li> <li>6. 初步之建議是可以參考，惟驗證試驗數據如充分更佳。如可參考已</li> </ol>

審查委員	專家意見內容
	有之數據作佐證更為完整。
紀茂傑	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 飛灰取代水泥用量可提升其工作性(球形承軸效應)，減少水泥混凝土的乾縮，唯取代量偏高可能影響其早期強度。一般飛灰取代量介於 15-25%，若欲提高取代量可增加其細度，提升其卜作嵐效應與填充效應，增加飛灰混凝土的工程性質及耐久性。</li> <li>2. 混凝土工作性會影響鋼筋的握裹力，良好工作性可減少施工上的蜂巢現象，提升鋼筋與混凝土的握裹，可試著增加不同種類或含量之強塑劑，探討其工作性如流度、坍度與凝結時間。</li> <li>3. 建議可增加微觀觀察及分析，如 SEM、XRD 等，對飛灰混凝土的水化機理及水化程度，進一步的了解。</li> <li>4. 建議增加材料的物理性質及或化學成分供參考，尤其是 LOI(Loss of ignition 燒失量)</li> </ol>



高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究



## 專家學者座談會議簽到單

會議主題：高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

會議次數：第 2 次

日期：107 年 10 月 25 日 星期四 上午 10：00

地點：大坪林開發大樓 13 樓 討論室(一)

出席人員：

建築研究所出席人員		專家學者	
陳建忠 組長	陳建忠	黃兆龍 特聘教授	黃兆龍
李育帆 研發替代役研究員	李育帆	方一匡 名譽教授	方一匡
		王和源 教授	王和源
		紀茂傑 教授	紀茂傑
建國科技大學出席人員			
吳崇豪 助理教授	吳崇豪		
林喻峰 副教授	林喻峰		

## 附錄六 飛灰混凝土施工注意事項

本附錄節錄參考文獻[42]有關飛灰混凝土施工應注意事項，可作為後續應用高飛灰摻量混凝土之參考。施工注意事項概述如下：

高飛灰摻量混凝土從材料選擇、配比設計、拌合、輸送、澆置、搗實、修飾、養護等過程中，如果有任何一項發生錯誤時，混凝土品質就無法滿足設計條件及施工規範之要求。

### 1 材料進貨管理

高飛灰摻量混凝土材料主要包括水泥、粗粒料、細粒料、飛灰及其他化學附加劑等，在進貨時除了抽樣檢驗其品質是否能符合規範要求外，應注意下面幾點：

#### 1-1 粗細粒料進貨管理

放置粗細料之場所，必須事先整地及做好表面處理工作，使在雨天或在沖水時避免有積水現象。堆料時保持材料清潔不能有泥土摻雜其中。在粗細粒料相鄰近區域不能堆料太高，以免粗細粒料混合，改變粒料配比，降低混凝土工作度及其強度。細粒進料時之含水量應嚴格規定最大值與最小值不要超過 3%以上，以減少拌合廠出料時坍度變化太大不容易控制之困難。通常粗料分成兩種以上不同尺寸堆放，比只用一種綜合級配料為佳，可隨時調整粒料配比，適合不同結構物施工，且減少粒料分離偏粗偏細之異常現象。

#### 1-2 水泥進貨管理

散裝水泥進貨時，溫度相當高，大於 60 度以上，如果水泥廠冷卻系統有問題缺貨時，水泥運到現場溫度可能高至 100 度以上，當水泥溫度太高時將會影響混凝土品質很大，例如坍度減少含水量，用水量增加、水灰比提高、

水化作用加速等，降低混凝土工作度及強度，改善辦法應增設儲存倉，最好能使新鮮水泥進貨 7 天後才使用，為減少儲存倉鐵皮吸熱得以降低水泥溫度，在外表漆上白色油漆較好。每批水泥進貨時應測量溫度並抽樣，以備混凝土有異樣發生時可追查原因之用。如為袋裝水泥必須注意防潮措施，否則因受潮硬化後之水泥應棄置不能使用。

### 1-3 飛灰進貨管理

散裝飛灰進貨時溫度大約 40 度以下，比水泥溫度低很多，但因飛灰的燒失量極不穩定，雖然同一發電廠，不同機組的飛灰燒失量、細度會相差很多，有時候雖是同一機組料源在同一天運送的飛灰，其燒失量、細度亦可能會相差很多的，因此在進貨時必須要抽樣檢查，以供調整拌合用水量及輸氣劑用量之依據。如為袋裝飛灰，萬一受潮濕，可將飛灰再加水拌成泥漿使用，將不會影響混凝土工作度及強度。因為 F 級飛灰 CaO 含量極少且  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  要有 CH 存在時才能發生波索蘭反應，產生強度。由該表獲知：拌合混凝土時採用事先浸水之飛灰漿比用乾燥飛灰之 91 天強度提高約 4%~6%，可能因為飛灰事先浸水後，細顆粒比較容易分散減少凝聚現象，使卜作嵐反應之 C-S-H、C-A-H 膠體分佈更均勻，減少應力部分集中而增加整體強度。

### 1-4 其他化學添加劑進貨管理

化學添加劑之進貨數量視施工期間長短而定，如果施工期間短於 3 個月，可一次整批進貨，施工期間超過 3 個月以上時就需分批進貨，以免材料放太久有變質之慮，且每批貨需抽樣檢查才可使用。進貨方式無論是散裝、桶裝或袋裝，必須放在陰涼地方以免受太陽直射太久，溫度高而變質，降低效用。附加劑有液體也有粉末狀，如果是液體用量極少時應加以適當稀釋才能拌合均勻。如果是粉末狀，必須事先加水徹底溶解稀釋濃度至 20% 左右才能使用以增加其效果。

## 2 混凝土拌合與輸送

混凝土在未出料前，品管工程師應該依原來配比設計資料及參考各拌合材料之條件，施工狀況，天候條件等加以修正配合比才能正式出料，以符合設計條件與施工規範之要求。

### 2-1 配合比調整

- (1) 細粒料率調整：運至拌合場之細粒料如果粗細程度與設計值(FM)相差很大時，必須加以校正細粒料率及用水量，以免影響混凝土工作度及強度。
- (2) 用冰量調整：巨積混凝土需採用碎冰或薄冰才能滿足要求，但因大氣溫度不同或材料溫度不同時，必須隨時加以調整避免混凝土溫度過高或太低之缺點。通常在開始拌合之第一、第二盤料，用冰量必須酌量增加 10 公斤，混凝土溫度才能符合設計要求。
- (3) 化學添加劑的用量調整：如為緩凝劑或減水緩凝劑時，須視混凝土溫度及大氣溫度而調整用量，以免超量使用或不夠時凝結時間不是太久就是太短之慮。
- (4) 用水量調整：用水量直接影響混凝土坍度，須視用冰量、粗細骨材含水量、含泥量與溫度、水泥溫度、化學添加劑用量及大氣溫度而調整。調整方式可查閱表 5-12 所示。

### 2-2 拌合運轉

無論是預拌混凝土或即拌混凝土，拌合廠在正式運轉前須先校正所有計量設備、使其誤差在允許範圍內(水泥 $\pm 1\%$ ，水 $\pm 1\%$ ，骨材 $\pm 2\%$ ，附加劑 $\pm 3\%$ )然後進一步做混凝土均勻性試驗以測定拌合機之效率，決定混凝土最佳拌合時間。

#### (1) 計量設備之檢查

檢查方法普通是用已知標準重量砝碼放置於受檢查之設備上，檢查磅秤

上所指示之重量是否與標準重量相符合，逐漸增加標準重量，以迄該秤所能量測之最大容許量，或配比設計所稱最大重量為止。然後再依相反次序解重，視其是否能歸零。目前有很多預拌廠已設有電腦自動記錄，把每盤拌合料之秤重詳細列表出來，以增加拌合廠之公信力，因此在校正磅秤時，務必要使磅秤之指示重量與電腦之螢幕機顯示及列表機之紀錄相符合，否則需要再加以調整至同步才可以。以上之磅秤校正只是在靜止狀態做檢驗而已，如果是連續出料其結果可能又有差異，通常規定 3 個月或 6 個月就要檢查一次，在出料時間若有發生以下任何一種狀況時必須再檢查磅秤是否有出問題。

## (2) 混凝土均勻性試驗與最佳拌合時間之決定

混凝土所需之適宜拌合時間與拌合機之型式容量，以及混凝土坍度均有關係。在未測定混凝土均勻試驗前，先要檢查拌合機葉子板之磨損情形及運轉速率是否符合規範要求，然後用調整過之配比做試拌，取三組以上不同拌合時間作均勻性試驗。若未能做拌合機性能試驗者，拌合機容量小於或等於 0.76 立方公尺時，其拌合時間不得少於 60 秒，拌合機容量較上述每增加 0.76 立方公尺最少拌合時間也隨之增加 15 秒。

依美國墾務局有關拌合機之效率規定如下：

- (a) 無空隙之水泥沙漿單位重量與平均值之偏差不得超過 0.8%。
- (b) 停留#4 篩上粗骨材重量偏差不得超過 5%。如果砂漿之單位重量變化超過 0.8%，表示拌合時間需增加，粗骨材含量變化超過 5%，可能為拌合機設計不當，或葉子板磨損過度，應檢查其原因加以校正或修理。混凝土拌合太久時需增加用水量才能保持正常坍度，若為輸氣混凝土則含氣量將會減低，若為低溫混凝土則混凝土溫度將會增高。為免除受上述超拌之不良影響，拌合時間不能超過正常拌合時間的三倍。飛灰混凝土均勻性試驗與一般混凝土一樣，如果要證明水泥—飛灰漿體是否均勻，可將通

過#4 砂漿再用#100 篩析，則通過#100 篩之材料為水泥與飛灰之成分，經過試驗結果，添加飛灰之混凝土其拌合效果比一般純水泥均勻性好，最佳拌合時間可選擇 60 秒。(註：巨積混凝土最大粒徑採用 6”，因此在做均勻性試驗時必須先用 1 又 2 分之 1”篩析，

- (c) 取通過的料做試驗，另外停留於 1 又 2 分之 1”以上之粗料需再做單位重檢驗與原配比比較，誤差不能超過±8%。)

### 2-3 輸送過程

輸送混凝土最適宜方法，依工作性質及工地情況而定。無論採用何種輸送方式，應保持其工作度，均勻品質，不發生分離、硬化、浮水等現象。常用的輸送方式有下列數種：(1)滑槽、(2)手推車、(3)動力推車、(4)拌合車、(5)卡車、(6)吊桶、(7)吊塔、(8)輸送帶、(9)泵送機等。各種可單獨使用亦可數種配合使用。其中泵送機輸送混凝土是目前發展最快之施工方法，其輸送能量每小時約 40~60 立方公尺，水平最大輸送距離可達 400 公尺，垂直方向最高可達 60 公尺，泵送距離之調整彈性甚大，可完全免除二次搬運之手續為其他設備所不及，但有下列缺點：

- (1) 凡是坍度較低(小於 10 公分)或屬高水灰比(大於 60 公分)之混凝土，泵送性差，不適用此法施工。
- (2) 為適合泵送機泵送之混凝土因增加坍度及細砂，降低骨材最大粒徑，得需增加水泥用量(水灰比一定時)，並使混凝土容易發生塑性收縮與乾燥收縮之裂紋。
- (3) 壓送能力仍有限制，對超高建築無法使用。
- (4) 澆置時，易發生荷重集中不平衡現象或因澆注速度較快，對模板產生較大的側壓力。

預拌混凝土因運送距離遠，輸送最長時間務需使混凝土初凝前完成澆置

搗實等工作為限。一般需視混凝土坍度、溫度和大氣溫度而變，通常在夏天為延長澆置時間，可添加適量緩凝劑以改善之。如果混凝土是用卡車運載(通常指混凝土坍度 5 公分左右用於壩之巨積混凝土或剛性路面方面較多)在運送過程中最容易發生假凝結現象，因為水泥製造過程中添加石膏於熟料時溫度太高，而使石膏之結晶水被破壞剩下半個結晶水所致，應避免使用該種水泥，以減少施工困難。

### 3 澆置與養護

拌合好的混凝土即使品質優量符合標準，但因澆置作業不適當，搗實不確實，修飾時機不對或養護時機與方法不正確的話，亦不能獲致滿意結果，茲將可能犯錯的一些問題敘述於後，以提高混凝土品質。

#### 3-1 澆置作業一般要求

- (1) 不得將大量混凝土澆置於某一點任其流動，避免造成材料分離、蜂窩、澆置面不平及搗實不良之缺點，若材料分離時應將骨材移到泥漿處，不宜將泥漿移到骨材處。
- (2) 澆置應分層及分級，每一層能充分搗實且不發生冷縫之現象。巨積混凝土每層厚約 15~30 公分。
- (3) 澆置速度應與搗實工作配合適當，且薄牆及柱之澆注速度不宜過快，在熱天每小時不宜超過 1.5 公尺，在冷天每小時不宜超過 1 公尺，以免側壓力太大而損壞模板及發生浮水現象，若混凝土澆注速度太慢，會使澆置之混凝土凝結硬化無法與新鮮混凝土黏結，發生冷縫現象。其防止方法有：
  - (a) 加速施工，可改變澆置計畫或增加人力設備或改用高效率之澆置方法。
  - (b) 延緩混凝土凝結;其方法有(i)降低混凝土溫度。(ii)熱天改在

夜間施工。(iii)遮蔭。(iv)以噴霧保持混凝土之溫度。(v)使用緩凝劑。(vi)改用飛灰混凝土可增加工作度，加速施工及降低水化熱延緩混凝土凝結。

(c) 如冷縫已發生時，其補救方法可在澆置新混凝土之前，先澆置一層與混凝土相同水灰比之水泥漿。

### 3-2 搗實作業

除水中混凝土外其他混凝土在澆置後，均須用適當方法予以搗實，可用手工夯實或震動器振實之。其要目的為：減少混凝土中之空隙使混凝土與鋼筋、模板等密接。目前最常用振動器為棒狀振動棒，其正確使用方法應注意如下：

- (1) 每層混凝土須做有系統振動，方不致有遺漏或振動過度之處。插入混凝土時間約 5~15 秒，插入混凝土之間距不得超過 50 公分且先後振動範圍需互相重疊，抽出動作需緩慢保持振動。
- (2) 不宜用振動器在模內移動混凝土，以免材料分離。
- (3) 不宜觸及模板，約離模板 8 公分為宜，以免模板受損。
- (4) 不宜觸及鋼筋，否則將鋼筋振傳至半凝固之混凝土，影響混凝土品質。
- (5) 混凝土在初凝前可再搗實，更可排除因浮水留下之空隙，增加混凝土強度及水密性。

### 3-3 混凝土澆置面之修飾

暴露之混凝土澆置面應於整平修飾，否則會使其表面品質惡化。剛澆置好之混凝土表面其水泥砂漿含量應適當，否則水泥砂漿過少時墁平困難，砂漿太多或浮水太多時，其表面形成一層高水灰比之低劣水泥砂漿，當表面乾燥後會有鬆砂，龜裂及與底下分離之現象。混凝土添加適量飛灰後，可增加

工作度，減少浮水量，能提早及延長表面修飾時間，更可增加水泥砂漿抗張力強度，減少表面龜裂機會。無論如何已積水之混凝土表面，在水分未被吸收、蒸發或以任何方法排除之前，不得以何器具加以修飾。

### 3-4 養護作業

混凝土澆置後之初期強度在 7 天內發展最快，養護工作最重要。若初期不能妥為養治，不但會降低混凝土強度，更會增加混凝土表面塑性收縮機會造成更多龜裂處，故其養治時機是非常重要的。飛灰混凝土早期強度較低，後其強度成長，速度較一般水泥混凝土大，因此需要較長時間養護，才能提高卜作嵐作用。

混凝土養治方法有：濕治、防水物養治、護膜養治及蒸氣養治等四種方法，茲將其養治時應注意事項分述如下：

- (1) 濕治：主要包括滯水法、噴水法、溼物覆蓋法，其目的在防止表面水分散失且有降低混凝土溫度的好處，是防止表面龜裂最好方法，唯須注意不能讓其表面有乾溼交替現象，否則會加速表面發生裂縫機會，此法用在炎熱地方最恰當。
- (2) 防水物養治：其目的在防止水分蒸發不必再補充水分，且可防止太陽直射，此法都用在水平面及形狀簡單之結構物，在風速較大地方更具有效果。可用之防水物有防水紙、塑膠布等。使用此法須注意其覆蓋防水物應互相重疊。邊緣及轉角處應遮蓋周密，接頭及邊緣應用適當物予以壓住定位，並注意覆蓋時機，太早覆蓋會破壞混凝土表面之美觀，太慢覆蓋其表面已乾，將降低其效果。
- (3) 護膜養治：本方法是將液狀養護劑噴於新鮮混凝土或剛拆模或經初步養護之混凝土表面，能迅速形成一層薄膜，可降低或防止混凝土水分之蒸發，此法大部分用在缺水地區或濕治法水分存在有妨害其他工作者而且必須注意下一次澆注時沒有新鮮混凝土黏結地方才

可使用。使用此法時機，混凝土須充分潮濕，及新澆置之新鮮混凝土表面水澤將消失時，或模鑄面應於剛拆模時立即噴灑護膜劑才能收到效果。任何表面已呈乾燥之混凝土，在護膜前應先將混凝土潤濕至不吸水，並俟其表面水分漸漸消失時立即噴灑護膜才有效。

- (4) 蒸氣養治：通常用在需要早期強度之預鑄或預力混凝土構件，其養治 1 天可達 28 天強度，又可減少乾燥收縮量及增加早期抗硫作用，但會降低混凝土與鋼筋間之黏結作用，對飛灰混凝土而言更適合用此法養治，可得正面作用，使用蒸氣養護時應注意：混凝土澆注 2 小時才能開始蒸氣養護，且蒸氣溫度之升降勿大於 22 度/hr，以免混凝土體積變化率太大而受損。

### 附錄七 結構混凝土施工規範-高飛灰摻量混凝土(建議條文草案)

本研究彙整相關高飛灰摻量混凝土研究成果，研擬高飛灰摻量混凝土配比設計條文草案，可供相關單位參考，於內政部營建署 2002 頒布之「結構混凝土施工規範」第十五章「特殊混凝土」，增列 15.9 節「高飛灰摻量混凝土」。建議條文草案如下所示：

#### 15.9 高飛灰摻量混凝土

15.9.1 高飛灰摻量混凝土係飛灰取代水泥用量超過現行規範限定值以上之混凝土，惟考量飛灰來源的穩定性及現場施工的品质，飛灰摻量以不超過水泥用量的 60% 為原則。

#### 15.8.2 材料

高飛灰摻量混凝土組成材料包含水泥、飛灰、粗細骨材、拌和水及化學藥劑，其材料性質均應符合本規範各章之有關規定。

#### 15.9.3 配比

- (1) 高飛灰摻量混凝土之配比設計可按本規範第三章規定處理，惟隨飛灰摻量的增加，混凝土 28 天齡期抗壓強度成展趨緩，可適當調降水膠比，以確保混凝土的強度發展符合需求。
- (2) 高飛灰摻量混凝土之配比仍須按第 3.9.1 節之規定試拌，測試其新拌性質及硬固性質是否符合需求。
- (3) 高飛灰摻量混凝土採用之飛灰燒失量不可過高，且搭配的化學藥劑須經試拌後決定其用量及合適性，避免藥劑添加量過多造成混凝土緩凝。

#### 15.9.4 試拌

高飛灰摻量混凝土需要嚴格控制其品質，尤其飛灰摻量及其燒失量的多寡，影響化學藥劑效能的發揮非常明顯，除實驗室試拌外，監造者應視需要，要

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

求於工地試拌或模擬試作，藉以評估高飛灰摻量混凝土之工作性、坍度損失、凝結時間及強度發展狀況。

### 15.9.5 品質保證

高飛灰摻量混凝土除須依據第十六章品質管制之規定進行製程品管外，在產製前六個月內，承包商須擬訂品質保證計畫，針對料源、材料品質控制、配比設計、施工控制、施工技術、機械、品管設備、組織及執行方式、補救措施等，提出詳盡規畫並經核可後執行，以確保施工品質。

## 附錄八 施工綱要規範-高飛灰摻量混凝土(建議條文草案)

本研究彙整相關高飛灰摻量混凝土研究成果，研擬施工綱要規範-高飛灰摻量混凝土，可供公共工程委會參考。建議條文草案如下所示：

### 第 xxx 章 V1.0

#### 高飛灰摻量混凝土

#### 1. 通則

##### 1.1 概要

說明使用高飛灰摻量混凝土 (High Volume Fly Ash Concrete) 之材料、配比設計、產製、輸送、施工及檢驗等相關規定。本章之規定適用於設計圖說指定為高飛灰摻量混凝土之構造物部位。

##### 1.2 工作範圍

###### 1.2.1 組成材料

###### 1.2.2 配比設計

###### 1.2.3 產製與輸送

###### 1.2.4 澆置與養護

###### 1.2.5 檢驗

##### 1.3 相關章節

###### 1.3.1 第 03050 章--混凝土基本材料及施工一般要求

###### 1.3.2 第 03310 章--結構用混凝土

##### 1.4 相關準則

###### 1.4.1 中華民國國家標準(CNS)

(1) CNS 61 卜特蘭水泥

(2) CNS 3036 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物

(3) CNS 12891 混凝土配比設計準則

(4) CNS 15286 水硬性混合水泥

###### 1.4.2 美國混凝土協會 (ACI)

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

### ACI-301-16 結構混凝土規範

#### 1.5 定義

「高飛灰摻量混凝土」係指飛灰取代水泥用量超過現行規範限定值以上之混凝土。

#### 1.6 資料送審

依第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」資料送審之規定辦理。

### 2. 產品

#### 2.1 材料

2.1.1 高飛灰摻量混凝土所使用的材料除本章之特別規定外，其餘均依第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」之規定辦理。

2.1.2 使用之飛灰須符合 CNS 3036 之 F 類規定，飛灰用量不得超過總膠結材料重量之[60][ ]%。

#### 2.2 配比設計

##### 2.2.1 材料性能需求

###### (1) 工作性

高飛灰摻量混凝土之工作性應符合工程規範或設計圖說之規定，若無則坍度以小於 20cm 為原則。

###### (2) 抗壓強度

高飛灰摻量混凝土設計強度  $f_c'$  之決定應依[CNS 12891][ ]之規定，並以[56][91][ ]天作為設計強度試驗齡期。

2.2.2 高飛灰摻量混凝土之配比設計所需考慮項目如下：

- (1) 組成材料之基本性質
- (2) 粗粒料容積或重量百分比
- (3) 細粒料容積或重量百分比
- (4) 水與水泥及礦物摻料比例
- (5) 水膠比
- (6) 化學摻料用量
- (7) 含氣量
- (8) 工作性
- (9) 凝結時間與坍損現象

## 2.3 產製與輸送

### 2.3.1 配比廠拌

配比選定後，須於拌和廠內進行廠拌試驗及必要之調整。

### 2.3.2 實作試驗(Mock-up Test)

工程司如認定有需要，可要求承包商於選定高飛灰摻量混凝土配比並完成廠拌驗證後，進行高飛灰摻量混凝土澆置實作試驗，以確認其所產製之高飛灰摻量混凝土性能符合設計要求。進行實作試驗所需之相關費用，工程司應於工程款項中編列，並依實作數量計價。

### 2.3.3 拌和與輸送

#### (1) 拌和

高飛灰摻量混凝土須於拌和廠產製，並輸送至指定之地點。

#### (2) 輸送

A.輸送方式、設備及澆置時機之選定，應考慮不引起高飛灰摻量混凝土發生析離為原則。

B.混凝土輸送過程中，不得添加水及其他摻料，但如考量運輸距離且於廠拌時經驗證不影響強度發展，可於工程司監督下添加化學摻料，工地添加化學摻料之品管程序應於品質計畫書中述明。

## 3. 施工

### 3.1 施工方法

#### 3.1.1 一般規定

除以下規定事項外，其餘事項應依第 03310 章「結構用混凝土」規定辦理。

#### 3.1.2 澆置

(1) 高飛灰摻量混凝土運抵工地時，應先核對送貨單上資料，包括運輸車號、工程名稱、送達地點、設計坍度、化學摻料、設計強度、出廠時間等，並確認為本工程所需混凝土，以免誤用。

(2) 澆置作業時，高飛灰摻量混凝土自拌和出廠後至泵送前之待料時間應不超過[90][ ]分鐘，如超過[90][ ]分鐘或工程司認為有必要時，則經由工作性確認符合要求後方可使用。

(3) 澆置過程中，承包商應指派有經驗之工程人員隨時檢視模板狀況。如發現不當沉陷、變形、變位、扭轉或嚴重漏漿等情形時，應立即停止澆置，經檢查並加強穩固後，方得繼續澆置。

#### 3.1.3 養護及保護

## 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究

- (1) 高飛灰摻量混凝土完成澆置並經表面修飾後，立即以浸濕不織布覆蓋表面，並以噴霧方式養護至施作保溫材為止，包覆作業應採逐區施作，以減少混凝土完成面直接曝露於大氣中之時間，養護持續時間不宜少於[7][14][ ]天。如無須保溫材時，應在噴霧養護後以一層以上帆布覆蓋至規定之養護齡期。
- (2) 高飛灰摻量混凝土表面保溫材鋪設後，應加以固定，以避免風吹或大雨造成保溫失效。
- (3) 高飛灰摻量混凝土拆模時間或表面接續施工作業，均須視高飛灰摻量混凝土保溫養護齡期及早期實際強度發展而定。

### 3.2 品質管制與檢驗

#### 3.2.1 品質管制

高飛灰摻量混凝土之品質管制應依第 03310 章「結構用混凝土」3.3 項之規定辦理。

#### 3.2.2 品質檢驗

高飛灰摻量混凝土之檢驗應依第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」3.3 項之規定辦理。

## 4. 計量與計價

### 4.1 計量

- 4.1.1 依不同抗壓強度之高飛灰摻量混凝土項目，以[立方公尺][ ]計量。詳細數量以[詳細價目表][ ]為準。
- 4.1.2 高飛灰摻量混凝土之實作試驗以[立方公尺][ ]計量。
- 4.1.3 高飛灰摻量混凝土之養護及保護作業，按契約圖說所示之範圍以[式][ ]計量。

### 4.2 計價

- 4.2.1 依不同抗壓強度之高飛灰摻量混凝土項目單價計價，該項單價已包括完成該構造物澆置及溫度監測作業所需之一切人工、材料、機具、設備、動力、運輸、檢驗等費用在內。
- 4.2.2 高飛灰摻量混凝土之實作試驗以[立方公尺][ ]丈量計付，該單價包括人工、材料、機具、設備、動力、溫度量測等費用在內。
- 4.2.3 高飛灰摻量混凝土之養護及保護作業，按契約詳細價目表內所列材質及方法之單價計價。該項單價已包括完成本項工作所需之一切人工、材料、機具、設備、動力及其他為完成本工作所需費用在內。

〈本章結束〉

出版單位：內政部建築研究所

高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究/吳崇豪等編

ISBN 978-986-05-7738-9 (平裝)

# 高飛灰摻量混凝土與鋼筋間握裹強度之研究