

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究

內政部建築研究所協同研究報告（  
110 年度）

# 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 110 年 12 月

# 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造 性能影響之研究

研究主持人：王安強  
協同主持人：吳崇豪  
研究員：林樹根、周楷峻、李台光、黃國倫  
研究助理：黃中和、郭義浩  
研究期程：中華民國 110 年 3 月至 110 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 110 年 12 月



## 目次

表次	III
圖次	V
摘要	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起	1
第二節 研究背景	1
第二章 文獻回顧	3
第一節 卜特蘭水泥	3
第二節 蒸氣養護	11
第三節 國內外相關研究案例	16
第三章 試驗規劃	23
第一節 試驗材料	23
第二節 混凝土配比	26
第三節 試體模具製作	27
第四節 混凝土配比	30
第五節 試驗設備及試驗方法	37
第四章 試驗結果與討論	49
第一節 混凝土之坍度	49
第二節 混凝土之抗壓強度	50
第三節 混凝土之滲透	60
第四節 混凝土之長度變化	63

第五節 梁之撓曲行為	66
第五章 結論與建議	73
第一節 結論	73
第二節 建議	75
附錄一 期初審查會議紀錄	77
附錄二 期中審查會議紀錄	81
附錄三 期末審查會議紀錄	85
附錄四 第1次工作會議	89
附錄五 第2次工作會議	91
附錄六 第1次專家學者座談會議紀錄	93
附錄七 第2次專家學者座談會議紀錄	97
參考書目	101

## 表次

表 3-1 水泥、爐石粉之物理性質	23
表 3-2 水泥、爐石粉之化學成分	24
表 3-3 常重粗細骨材基本性質	24
表 3-4 Sikament G 減水劑之性質與用法	25
表 3-5 試驗變數	26
表 3-6 混凝土配比	26
表 4-1 混凝土抗壓強度	53
表 4-2 混凝土滲透率	61
表 4-3 混凝土長度變化率	64
表 4-4 梁試體混凝土抗壓強度	68
表 4-5 梁之撓曲試驗結果	68

# 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研



## 圖次

圖 1-1 本研究流程圖	2
圖 2-1 水泥水化產物	7
圖 2-2 凝結時間與收縮的關係	9
圖 2-3 養護溫度對飛灰混凝土體積收縮的影響	10
圖 2-4 養護溫度對混凝土早期及晚期抗壓強度的影響	13
圖 3-1 爐石粉	25
圖 3-2 抗壓試體模具( $\phi 100\text{mm}\times 200\text{mm}$ )	26
圖 3-3 長度變化試體模具( $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 285\text{mm}$ )	28
圖 3-4 圓柱試體模具( $\phi 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ )	28
圖 3-5 製作完成的梁試體木模	29
圖 3-6 梁試體斷面、尺寸圖(單位: mm)	29
圖 3-7 新拌混凝土坍度試驗	31
圖 3-8 抗壓強度試體澆置	31
圖 3-9 梁試體澆置	32
圖 3-10 製作完成之圓柱抗壓試體	32
圖 3-11 製作完成之梁試體	33
圖 3-12 梁試體及圓柱抗壓試體蒸氣養護	33
圖 3-13 蒸氣養護箱養護之圓柱抗壓試體	34
圖 3-14 室內常溫養護之圓柱抗壓試體	34
圖 3-15 室內常溫養護之梁試體	35
圖 3-16 組立好的梁試體模及鋼筋籠	35

圖 3-17 製作完成的鋼筋籠	36
圖 3-18 黏貼完成的應變計	36
圖 3-19 混凝土單軸拌和機	38
圖 3-20 強制式水平雙軸拌和機	39
圖 3-21 萬能材料試驗機	39
圖 3-22 LVDT 變位計及曲率框架	40
圖 3-23 資料蒐集器及個人電腦	40
圖 3-24 混凝土透水試驗儀	41
圖 3-25 600kN 萬能材料試驗機	41
圖 3-26 混凝土長度變化量測試驗儀	42
圖 3-27 蒸氣養護箱	42
圖 3-28 蒸氣養護室及加熱設備	43
圖 3-29 混凝土抗壓強度試驗	44
圖 3-30 混凝土長度變化量測試驗	45
圖 3-31 混凝土滲透試驗	46
圖 3-25 600kN 萬能材料試驗機	41
圖 3-26 混凝土長度變化量測試驗儀	42
圖 3-27 蒸氣養護箱	42
圖 3-28 蒸氣養護室及加熱設備	43
圖 3-29 混凝土抗壓強度試驗	44
圖 3-30 混凝土長度變化量測試驗	45
圖 3-31 混凝土滲透試驗	46
圖 3-32 架設完成的梁試體	48

圖 4-1 混凝土坍度	49
圖 4-2 混凝土抗壓強度(純水泥、3 天齡期)	54
圖 4-3 混凝土抗壓強度(純水泥、7 天齡期)	54
圖 4-4 混凝土抗壓強度(純水泥、28 天齡期)	55
圖 4-5 混凝土抗壓強度(純水泥、56 天齡期)	55
圖 4-6 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、3 天齡期)	56
圖 4-7 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、7 天齡期)	56
圖 4-8 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、28 天齡期)	57
圖 4-9 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、56 天齡期)	57
圖 4-10 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、3 天齡期)	58
圖 4-11 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、7 天齡期)	58
圖 4-12 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、28 天齡期)	59
圖 4-13 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、56 天齡期)	59
圖 4-14 常溫養護混凝土透水率	61
圖 4-15 蒸氣養護混凝土透水率(預置 3 小時、50°C)	62
圖 4-16 常溫養護混凝土長度變化率	64
圖 4-17 蒸氣養護混凝土長度變化率(預置 3 小時、50°C)	65
圖 4-18 常溫養護梁試體破壞情形(28 天)	69
圖 4-19 蒸氣養護梁試體破壞情形(28 天)	69
圖 4-20 常溫養護梁試體破壞情形(56 天)	70
圖 4-21 蒸氣養護梁試體破壞情形(56 天)	70
圖 4-22 梁試體之載重位移圖(28 天)	71
圖 4-23 梁試體之載重位移圖(56 天)	71

圖 4-24 梁試體之載重位移圖(91 天) . . . . . 72

## 摘要

關鍵詞：預鑄混凝土、蒸氣養護、梁、抗壓強度、撓曲強度

### 一、研究緣起

在民國 109 年辦理的第 11 次全國科學技術會議中，「推動建築構件預製生產以減少碳排、縮短工期，並提升工作環境品質」被列為重要的討論議題。以往的研究已認知，在建築上將混凝土構件預鑄化有其優點與必要性，主要是預鑄廠製作的構件，品質容易掌握、產製速度快，且能避免工地現場澆置混凝土可能衍生的諸多缺點；尤其是預鑄工廠可利用完善的養護措施，來確保經減少水泥用量所製作的混凝土強度，得以符合需求，而有效達成節能減碳的目標。為縮短預鑄混凝土產製的時間，現行做法會以高溫蒸氣養護方式對預鑄混凝土進行養護，本研究主題即在探討養護方式對預鑄混凝土及其梁構件撓曲強度之影響。

### 二、研究方法及過程

本研究規劃兩種混凝土 28 天設計抗壓強度(280kgf/cm<sup>2</sup>、420kgf/cm<sup>2</sup>)、三種爐石粉取代水泥量(0%、30%、60%)及 5 種養護方式(常溫養護及預置 1.5 小時、3 小時後 50°C、70°C 蒸氣養護 6 小時)等試驗變數進行抗壓強度試驗，之後從混凝土抗壓強度試驗結果中選出設計強度 420kgf/cm<sup>2</sup>，爐石粉取代 30%水泥量之混凝土製作梁試體，觀察常溫養護、預置 3 小時後 50°C 蒸氣養護梁試體的撓曲行為，並進行混凝土抗壓強度、滲透性及長度變化試驗，比較常溫養護與蒸氣養護對混凝土耐久性及體積穩定性的影響。

### 三、重要發現

抗壓強度試驗結果顯示，混凝土經蒸養後之抗壓強度隨爐石取代量增加而降低、隨齡期增長而提升，28 天齡期前，常溫養護者之強度成展幅度大於蒸氣養護者，28 天齡期後，經蒸養之含爐石粉混凝土強度仍有明顯成長。由滲透試驗結果可知，不論常溫養護或蒸氣養護，含 30%爐石粉混凝土的滲透率較低，耐久性較佳。蒸氣養護混

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研

凝土早齡期的長度收縮量小於常溫養護者，56 天齡期的長度收縮量則大於常溫養護者，體積穩定性較差。兩種養護方式梁試體於 28 天齡期的降伏或極限載重不相上下，56 天及 91 天齡期時，常溫養護梁試體之降伏及極限載重高於蒸氣養護者，惟差距不大。

### 四、主要建議事項

根據養護方式對混凝土的抗壓強度、體積穩定性和耐久性，以及梁試體撓曲強度等性質影響的研究結果，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。

#### 立即可行之建議—蒸氣養護時間對混凝土力學性質影響研究

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本研究以預置時間及蒸氣養護溫度為實驗變數進探討，蒸養時間則依成本及相關文獻建議固定為 6 小時，然而隨混凝土使用的卜作嵐材料種類及用量逐漸增加，有必要針對蒸養時效加以討論，找出可搭配不同卜作嵐材料添加量混凝土的蒸氣養護工法，將有助於提升預鑄混凝土技術及應用層面。

#### 長期性建議—預鑄混凝土晚齡期工程性質研究

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本研究主要探討蒸氣養護對混凝土工程性質及梁試體撓曲強度的影響，56 天及 91 齡期的試驗結果顯示，兩種養護混凝土的工程性質及梁試體撓曲強度接近，蒸氣養護者略差於常溫養護者，其中含爐石粉混凝土經蒸養後隨齡期增加其工程性質有逐漸改善的趨勢，若可進行更晚齡期的研究，如半年或 1 年，以瞭解卜作嵐材料於晚齡期時對預鑄混凝土及其構件各項性質之影響，研究成果對預鑄混凝土設計及應用具有重要的參考價值。

## ABSTRACT

Keywords: precast concrete, steam curing, beam, compressive strength, flexural strength

### 1. Purpose of Research

In the 11th National Science and Technology Conference held in 1991, “promoting the prefabrication of building components to reduce carbon emissions, shorten the construction period, and improve the quality of the working environment” was listed as an important topic for discussion. Previous studies have recognized that there are advantages and necessity to make concrete components in architecture, mainly components made by the factory, the quality is easy to grasp, the production speed is fast, and it can avoid the possibility of pouring concrete on the construction site. Many shortcomings; in particular, the precast concrete factory can use comprehensive maintenance measures to ensure that the strength of the concrete made by reducing the amount of cement can meet the demand, and effectively achieve the goal of energy saving and carbon reduction. In order to shorten the time required for the production and production of precast concrete, the current practice will cure the precast concrete by means of high-temperature steam curing. The subject of this research is to explore the influence of the curing method on the flexural strength of the precast concrete and its beam members.

### 2. Methodology and Process

This study plans two kinds of concrete 28-day design compressive strength ( $280\text{kgf/cm}^2$ ,  $420\text{kgf/cm}^2$ ), three kinds of furnace stone powder to replace cement amount (0%, 30%, 60%), and five curing methods (normal temperature curing and preset 1.5 Hour, 3 hours,  $50^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  steam curing for 6 hours) and other test

variables for compressive strength test, and then select the design strength  $420\text{kgf/cm}^2$  from the concrete compressive strength test results, and the furnace stone powder replaces 30% of the cement content of the concrete. Observe the deflection behavior of the beam specimen after curing at room temperature and pre-positioning at  $50^\circ\text{C}$  for 3 hours, and conduct the concrete compressive strength, permeability and length change tests to compare the effects of room temperature curing and steam curing on concrete durability and The influence of volume stability.

### **3. Important Findings**

The compressive strength test results show that the compressive strength of concrete after steam curing decreases with the increase of furnace stone replacement amount and increases with age. Before 28 days of age, the strength of normal temperature curing is greater than that of steam curing. After 28 days of age, the strength of steam-cured concrete containing furnace stone powder still has significant growth. It can be seen from the results of the permeability test that, regardless of normal temperature curing or steam curing, the permeability of 30% furnace stone powder concrete is lower and the durability is better. The length shrinkage of steam-cured concrete at early age is less than that of normal temperature curing, and the length shrinkage of 56-day age is greater than that of normal temperature curing, and its volume stability is poor. The two curing methods have similar yield or ultimate load at 28 days of age. At 56 days and 91 days, the yield and ultimate load of beam specimens cured at room temperature are higher than those of steam curing, but the difference is not significant.



#### 4. Major Recommendations

Immediate implementation:

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

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

This study uses the preset time and steam curing temperature as experimental variables to discuss. The steam curing time is fixed at 6 hours according to the cost and related literature recommendations. However, as the type and amount of Pozzolanic materials used in concrete increase gradually, it is necessary to focus on the steam curing time. Discussing and finding out a steam curing method that can be used with concrete with different dosages of Pozzolanic materials will help to improve the technology and application of concrete.

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

This study mainly discusses the effect of steam curing on the engineering properties of concrete and the flexural strength of beam specimens. The test results of 56 days and 91 days show that the engineering properties and flexural strength of beam specimens of the two cured concretes are similar, while the steam curing is slightly worse. In the case of room temperature curing, the engineering properties of concrete containing furnace stone powder after steam curing have a tendency to gradually improve with the increase of age. If it is possible to conduct a study at a later age, such as six months or one year,

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研

to understand the Pozzolanic reaction at late age. The research results have important reference value for the design and application of the concrete.

## 第一章 緒論

### 第一節 研究緣起

依據內政營建署頒布之「混凝土結構設計規範」第九章預鑄混凝土構材 9.3.4 之解說：「預鑄構材混凝土之養護，一般採用加熱養護（如蒸氣養護或熱模養護）方式提高早期強度以提早脫模；通常，經過加熱養護之混凝土，其 28 天齡期之抗壓強度，都比經標準養護者為低。因此，進行預鑄構材混凝土之配比設計時，宜考量此因素對 28 天齡期抗壓強度之影響，使混凝土之抗壓強度平均值不低於規定強度」。前述強度衰減現象主要是蒸氣養護時水泥的水化速率會加快，容易導致水化產物，很快地在水泥顆粒周圍形成高密度的擴散屏障，使得水化產物分佈不均勻，導致後期水化程度降低。另一方面，養護溫度較高也會導致水泥產生較粗糙的水化結構，使得混凝土內部孔隙體積增加、總孔隙量變高。

上述問題雖可藉由提高混凝土設計強度以符合預鑄混凝土 28 天齡期強度的需求，不過相關研究指出在更晚的齡期，如 56 天或之後的齡期，混凝土強度仍有衰減的趨勢，且現今混凝土的組成材料及其比例已有別於傳統混凝土，過往蒸氣養護的方式是否適用於不同成分的預鑄混凝土，值得進一步研究探討。

### 第二節 研究背景

隨著營建、建築及土木工程的发展需求，人們希望在更短的時間內、更艱難的施工現場建造安全、經濟及品質良好的混凝土結構物。克服此課題的方式不是單獨依靠施工方式和品質管控等技術的精進，善用混凝土材料之特性亦極為重要。採用高溫蒸氣養護方式可加快水泥水化反應的速度，短時間內提升混凝土的強度，惟蒸氣養護對混凝土晚期強度及耐久性有所影響，如何克服高溫養護的影響成為預鑄混凝土重要的研究課題。

本研究流程規劃如圖 1-1 所示。

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研

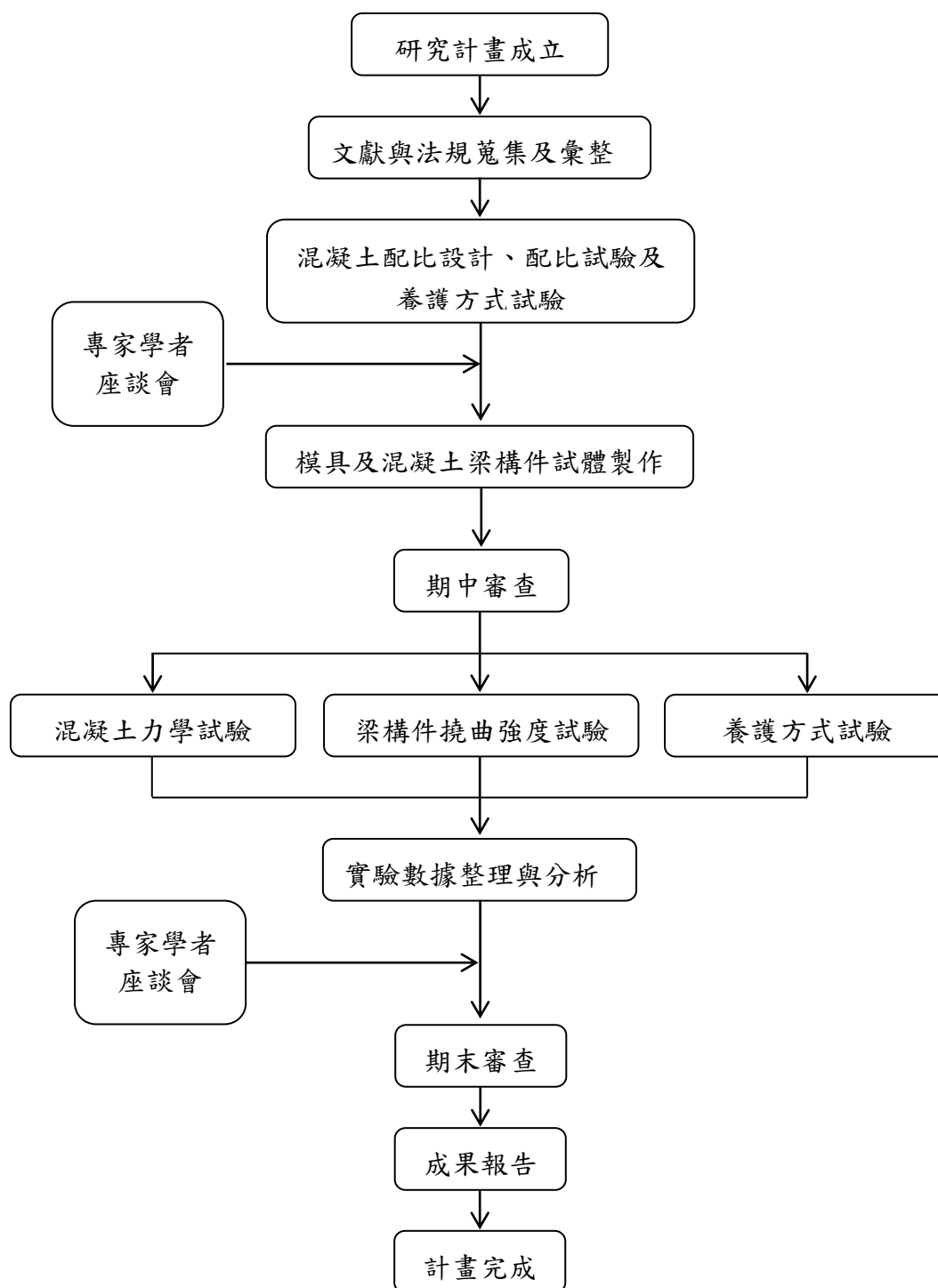


圖 1-1 本研究流程圖  
(資料來源：本研究整理)

## 第二章 文獻回顧

### 第一節 卜特蘭水泥

#### 一、卜特蘭水泥之製造與組成

普通卜特蘭水泥的主要原料為石灰岩 (Limestone) 及黏土 (Clay)，其主要成分為氧化鈣 (CaO)、二氧化矽 (SiO<sub>2</sub>) 和三氧化二鋁 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，其它次要成分則包括 MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、SO<sub>3</sub> 及游離石灰等，如表 2-1 所示<sup>1</sup>。在高溫旋窯(1400~1600°C)中，原料礦物會隨著溫度與時間變化而生成四種主要的礦物熟料 (Clinker)，分別為矽酸二鈣 (2CaO·SiO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>S)、矽酸三鈣(3CaO·SiO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>S)、鋁酸三鈣 (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>A) 及鐵鋁酸四鈣 (4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>AF)。水泥熟料礦物還須添加適量的石膏(Gypsum)經過研磨作業後，才可形成一般常見的卜特蘭水泥<sup>1</sup>。

依據 ASTM 規範，卜特蘭水泥可分為下列五種類型：

I 型：普通卜特蘭水泥，適用於無特殊性質要求的構造物。

II 型：中度抗硫水泥，適用於需要早齡期強度的構造物。

III 型：早強水泥，適用於需要早齡期強度的構造物。

IV 型：低熱水泥，適用於巨積混凝土的構造物。

V 型：高度抗硫水泥，適用於接觸高硫鹽侵蝕的構造物。

各類型卜特蘭水泥之化學複合物典型組成百分比，以及其細度、抗壓強度、水化熱等性質之參考數據，如表 2-2 所示<sup>1</sup>。

---

<sup>1</sup>S. MINDESS, J. F. YOUNG AND D. DARWIN, "CONCRETE," 2ND EDITION, UPPER SADDLE RIVER, NJ: PRENTICE HALL, 2003.

表 2-1 水泥化學成分

名稱	縮寫	重量百分比	氧化物	名稱	縮寫	重量百分比	氧化物
氧化鈣	C	64.67	CaO	鹼	K	0.361	K <sub>2</sub> O
二氧化矽	S	21.03	SiO <sub>2</sub>		N	0.34	Na <sub>2</sub> O
氧化鋁	A	6.16	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	三氧化硫	$\bar{S}$	2.03	SO <sub>3</sub>
氧化鐵	F	2.58	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	二氧化碳	$\bar{C}$		CO <sub>2</sub>
氧化鎂	M	2.62	MgO	水	H		H <sub>2</sub> O

(資料來源：參考文獻<sup>1</sup>)

表 2-2 ASTM I 至 V 型卜特蘭水泥之化學複合物典型組成及性質

水泥種類	I	II	III	IV	V
C <sub>3</sub> S (%)	55	55	55	42	55
C <sub>2</sub> S (%)	18	19	17	32	22
C <sub>3</sub> A (%)	10	6	10	4	4
C <sub>4</sub> AF (%)	8	11	8	15	12
CSH <sub>2</sub> (%)	6	5	6	4	4
細度 (Blaine, m <sup>2</sup> /kg)	365	375	550	340	380
抗壓強度 (1天, MPa)	15	14	24	4	12
水化熱 (7天, J/g)	350	265	370	235	310

(資料來源：參考文獻<sup>1</sup>)

## 二、卜特蘭水泥之水化反應與產物

卜特蘭水泥水化過程由水泥顆粒接觸水分開始，表面先產生水化反應，形成一層外殼。之後水分藉由膠體孔隙擴散滲入，或由外殼裂縫讓水分再次進入水泥顆粒內部產生水化，週而復始直到完全水化。早齡期的水泥水化反應甚快，但因其顆粒中心較難以獲得水分，所以整體水泥的水化作用要延續很長的時間，如二、三十年以上，也難以達到 100%。

水化反應形成的新固相物質即稱為水化產物 (Hydration product)，其主要生成的水化產物包括 C-S-H 膠體、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、單硫型鋁酸鈣及鈣釩石等，如圖 2-1 所示。至於各種水化產物的性質如表 2-3 所示<sup>2</sup>。

主要介紹如下：

- (1) C-S-H 膠體：為非定性化合物，有多種表現方式（如  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_8$ ），比重介於 2.3 ~ 2.6，大小為  $1 \times 0.1 \mu\text{m}$ （厚度小於  $0.01 \mu\text{m}$ ）。外觀呈針刺狀球體且多孔隙，會與相鄰球體聯結成連續母體，如圖 2-1 (a)，約占漿體體積 50~70%，是生產強度與緻密性的主要成分。
- (2) 氫氧化鈣  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ：比重為 2.24，大小  $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ ，為一結晶良好的六角片狀無孔條紋晶體，如圖 2-1 (b)，約占漿體體積 20 ~ 25%。由於能夠填充孔隙，使得  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  對強度有正面的效應；但是氫氧化鈣  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  較不穩定，易與酸鹼反應，也容易被水溶解析出。
- (3) 鈣釩石 (Aft)：為結晶良好的細長六角針狀晶體或對稱三角柱狀如圖 2-1 (c)，比重為 1.75，大小  $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ ，約占漿體體積的 10~15%。
- (4) 單硫型鋁酸鈣 (AFm)：呈現六角薄板狀或是不規則玫瑰狀晶體，圖 2-1 (d)，比重 1.95，大小  $1 \times 1 \times 0.1 \mu\text{m}$ ，約占漿體體積 7%，其與鈣釩石皆具有填充孔隙的效果。

---

<sup>2</sup>塗耕業，「水泥漿體添加卜作嵐材料之水化特性研究」，國立中興大學土木工程系碩士論文，2007。

表 2-3 水泥漿體之主要成分及其性質[2]

性質 成分	基本特性					對工程性質之影響			溫度 效應
	體積 (重量)	比重	結晶 狀況	晶相 外觀	尺寸	強度	體積變形	耐久性	
C-S-H	約 50~70%	2.3~ 2.6	甚差，為 多孔隙不 定形膠體	刺球狀之 連續母體	$1 \times 0.1 \mu\text{m}$ $t <$ $0.01 \mu\text{m}$	＋，為 漿體強 度主要 提供者	－，膠體孔 易造成毛細 壓力，導致 變形	＋	105~ 440°C 分解
CH	約 20~25%	2.24	很好，晶 態顆粒大 可用OM解 析	六角形片 狀無孔條 紋式材料	0.01~1 $\mu\text{m}$	＋，填 充孔隙	＋	－ 易析出	440~ 580°C 分解
鈣釩石 AFt	約 10~15%	1.75	好，結晶 顆粒小OM 尚可見	細長六角 針狀，或 對稱三角 柱狀	0.5~10 $\mu\text{m}$	＋	－	－	
單硫鋁酸 鈣水化物 AFm	(7%)	1.95	尚好	六角薄板 狀，不規 則玫瑰狀	$1 \times 1 \times 0.1$ $\mu\text{m}$	＋	－	－	
孔隙	約15%		毛細孔多寡依水灰 比而定，形狀不定		$>100\text{\AA}$	－	－	－	
			膠孔：存在於C-S-H 膠體間		$>100\text{\AA}$				

＋：正面影響；－：負面影響；OM (Optical Microscope)：光學顯微鏡

(資料來源：參考文獻<sup>2)</sup>)



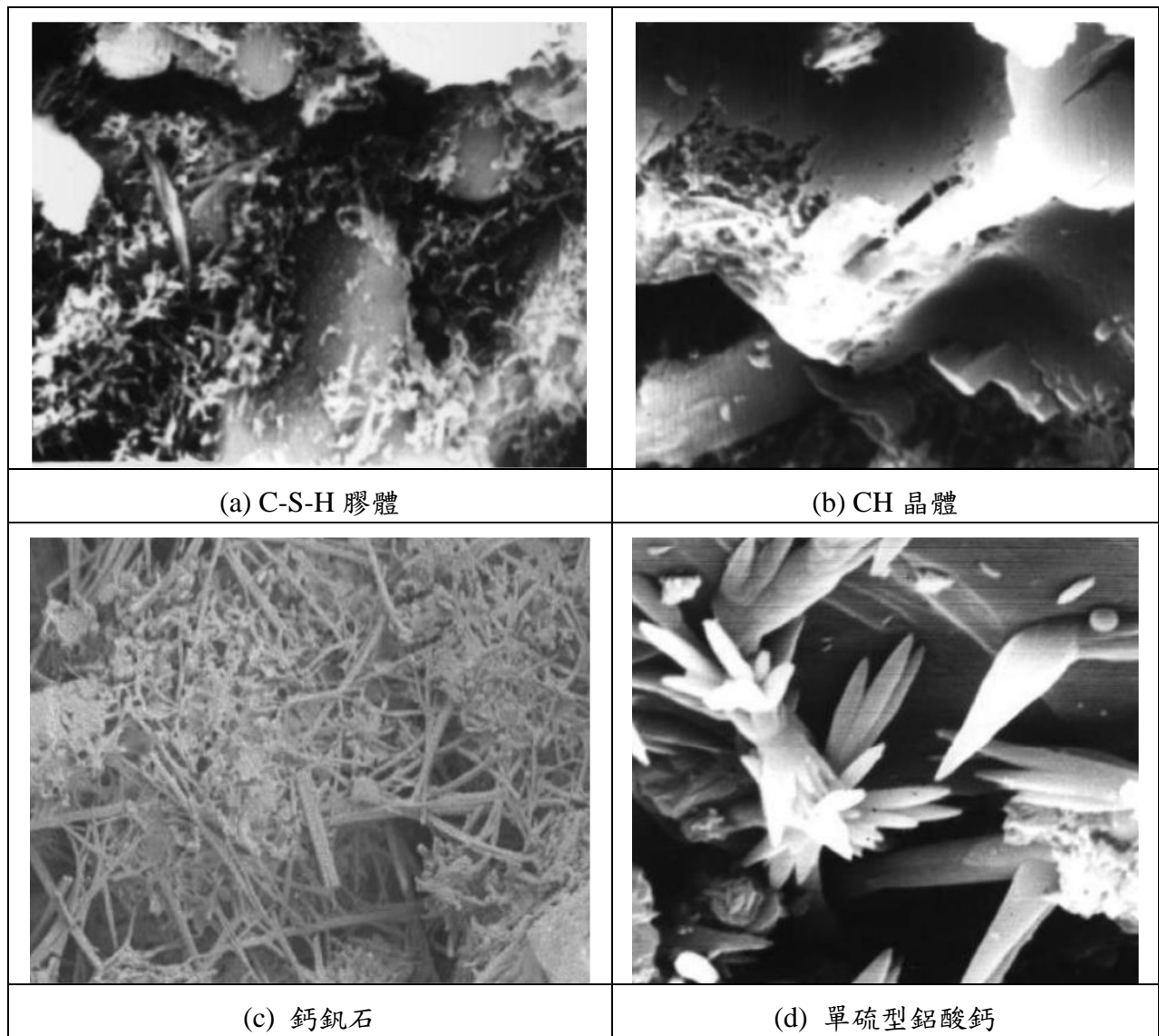


圖 2-1 水泥水化產物  
(資料來源：參考文獻<sup>1</sup>)

### 三、水泥複合材料體積穩定性

水泥質複合材料的體積穩定性在無外力、無侵蝕作用下且材料本身凝結硬化及硬固後，不因體積變化而對其性能產生不良之影響。體積穩定性對水泥質複合材料的耐久性有很大的影響，而耐久性係指水泥複合材料之抗滲透性及抗硫酸鹽侵蝕能力等，其中最為重要的是抗滲透性<sup>3</sup>。水泥質複合材料的體積穩定性不佳，會使其澆置完成後，因體積變化而生成內應力，故當內應力超過水泥質複合材料之抗拉強度時，裂縫即會於其最薄弱部位產生；裂縫產生的位置，將使其力學性能降低，除影響本身結構安全性外，更會降低其抗滲透性的能力，而該裂縫將成為環境中有害介質侵入的管道，對材料之耐久性影響更為深遠。

水泥質複合材料體積變化依所需時間長短可分為隨時間成長所造成的體積變化及立即變化二大類，其中最為重要的為隨時間成長的體積變化，對於構造物之安全性及耐久性影響甚大，主要可分為乾縮變化與潛變（Creep）兩大類。

#### (1) 乾縮變化

當水泥質複合材料澆置於完成後，因養護時的水化反應及外在環境溼度的變化，使其材料所含水分被消耗或散失，故材料之體積隨著時間而持續收縮。為有效解決水泥質複合材料乾縮所造成的體積變化，須對其產生機理充分了解，根據其作用機制及原理與發生時間之先後順序，主要可分為以下五種<sup>4567</sup>，沉降收縮、塑性收縮、自體收縮、乾燥收縮、化學收縮，如圖 2-2 所示。另外尚有碳化收縮現象<sup>89</sup>。

---

<sup>3</sup>D. P. Bentz, M. R. Geiker, K. K. Hansen, "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars," *Cement and Concrete Research*, 31(7): 1075-1085, 2001.

<sup>4</sup>P. Chindaprasirt, 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.

<sup>5</sup>Bissonnette B., P. Pierre, M. Pigeon, "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials," *Cement and Concrete Research*, pp. 1655-1662, 1999.

<sup>6</sup>Chidiac S. E., *Civil Engineering Course CE732: Concrete Structures-Materials, Maintenance and Repair*, Department of Civil Engineering, McMaster University, Canada, 2009.

<sup>7</sup>Newman and Seng Choo, "Advanced Concrete Technology," 1st Edition, Oxford, Elsevier Ltd., 2003.

<sup>8</sup>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.

<sup>9</sup>Houst Y. F., "Carbonation Shrinkage of Hydrate Cements Paste," *CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Ottawa, Canada, July 1, 1997.

## (2) 潛變

潛變係指當水泥質複合材料澆置完成並施加一持續荷重，將立即產生體積變化，而隨時間逐漸拉長而產生的體積變化。潛變屬於一種擴散行為，只要涉及溫度、時間、載重等相關因素，都將會產生潛變。

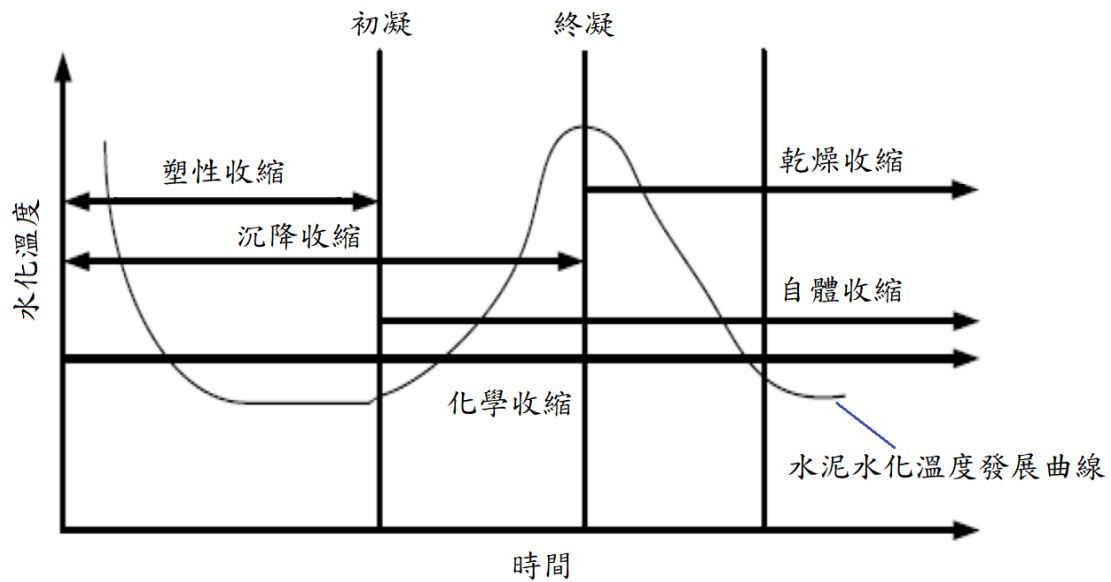
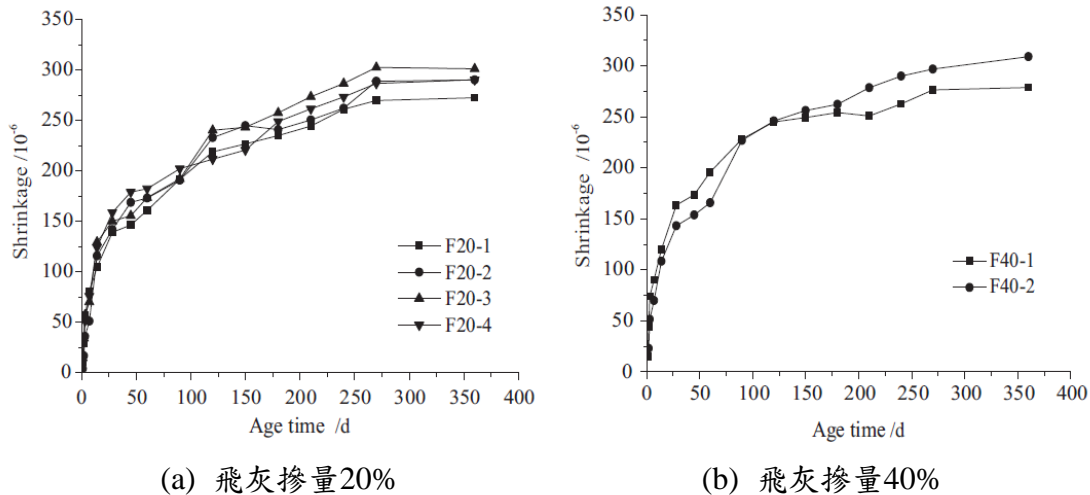


圖2-2 凝結時間與收縮的關係  
(資料來源：參考文獻<sup>1</sup>)

#### 四、添加礦物摻料對混凝土體積收縮的影響

由圖 2-3 可知，膠結料以添加不同量之飛灰（20%及 40%）取代量，隨飛灰取代量的增加，混凝土的收縮變形有減少之趨勢，文獻 3 的研究成果也指出，因飛灰中含有少量 MgO 及 SO<sub>3</sub>，與拌和水接觸後反應速度加快，故添加飛灰有減少乾燥收縮的趨勢，且產生膨脹現象進而抑制收縮。文獻 4 的研究指出，爐石粉取代部分水泥時，自體收縮及乾燥收縮會增加，且當高爐石粉含量增加，乾燥收縮亦有增加的趨勢，但如果經由充分的養護，乾縮相對可減少。因此可得知高爐石粉造成乾燥收縮增加的原因與養護條件有密切關聯，若藉由充分濕潤養護，可產生較多之膠體，尤以卜作嵐反應產生之膠體，有助於孔隙之填塞，相對乾燥收縮可減少。



(a) 飛灰摻量20%

(b) 飛灰摻量40%

圖2-3 養護溫度對飛灰混凝土體積收縮的影響

(1：常溫養護；2：50°C蒸氣養護4-16小時；3：50°C蒸氣養護4-16小時、28-40小時、52-64小時；4：90°C蒸氣養護4-20小時)

(資料來源：參考文獻<sup>10</sup>)

<sup>10</sup>Qingxin Zhao, Xiaochen Liu, Jinyang Jiang, "Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete," Construction and Building Materials 96 (2015) 326-333.

## 第二節 蒸氣養護

### 一、蒸氣養護對混凝土的影響

#### (一)、常壓蒸氣養護

ACI 517 研究報告<sup>11</sup>對常壓蒸氣養護的建議中，提出蒸氣養護的要點如下列：

1. 預置期

為混凝土從澆置後至開始蒸氣養護之期間，當氣溫在 16°C~30°C時，預置其最少需要 2 小時，讓混凝土有一定程度的水化，增加其穩定性。

2. 升溫期

預置期後將養護溫度由常溫升到恆溫溫度的期間，溫度的升高速率不可超過每小時 22°C~33°C，若預置期較 2 小時長，則可使用較高的升溫速率。

3. 恆溫溫度

為蒸氣養護所需之最高溫度，常壓時之最佳蒸氣養護溫度在 66°C~74°C 範圍內。

4. 恆溫期

為最高蒸氣養護溫度的維持時間，一般混凝土約養護 12 小時即可達搬運的使用強度。

5. 降溫期

係使養護溫度依照控制速率下降至室溫之期間，約需 2 小時。文獻<sup>12</sup>指出，在 65°C、80°C、100°C之蒸氣催化養護之養護溫度中，於 28 天的齡期後，以 65°C養護之強度最高，100°C次之，80°C最差，這一點與德國規範<sup>13</sup>要求養護溫度不可大於 65°C相符。

---

<sup>11</sup>ACI Committee 517, "Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," Revised Version, American Concrete Institute, Detroit, MI, U.S.A., 1992.

<sup>12</sup>吳國進，「本土化中強度高性能混凝土(TAICON)低溫蒸氣養護效能研究。」，國立交通大學，碩士論文，民國 87 年 6 月。

<sup>13</sup> Seeberger, J. Kropp, J. and Hilsdorf, H. K., "Festigkeitsverhalten und Strukturveraenderungen Von Beton bei Temperaturbeanspruchung bis 250°C," Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton, Nr360, 1985.

根據文獻<sup>14</sup>中早期及後期強度與溫度之關係如圖 2-4 顯示，較高之蒸氣養護溫度將使得混凝土中之早期強度較大，但是其 28 天強度有較低的趨勢，因此混凝土之養護溫度應適當不適宜太高，否則將對後期強度造成不良影響。文獻<sup>15</sup>中也提到蒸氣養護之初始強度過高，最終強度反而越低，55°C 養護有較佳的效果。

根據文獻<sup>16</sup>蒸氣養護要點如下：

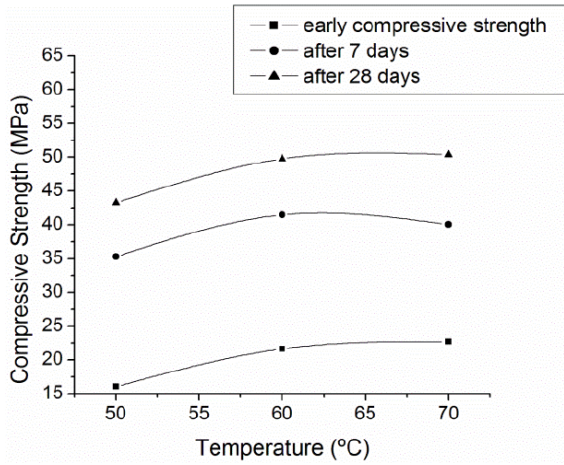
1. 蒸氣養護前混凝土至少預置 2 小時。
2. 預置期 3-5 小時可得最高強度。
3. 最高蒸氣溫度由 65°C 提高至 79°C 混凝土之強度增加不多。
4. 蒸氣之最高溫勿大於 80°C，不但不經濟而且會對極限強度有不良影響。
5. 蒸氣溫度之升降率勿超過 33°C/小時，以免混凝土體積之變化率過大而造成損傷。
6. 蒸氣最高溫應保持至混凝土所需強度達成後，其所需之時間隨混凝土配比與蒸氣溫度而定。

---

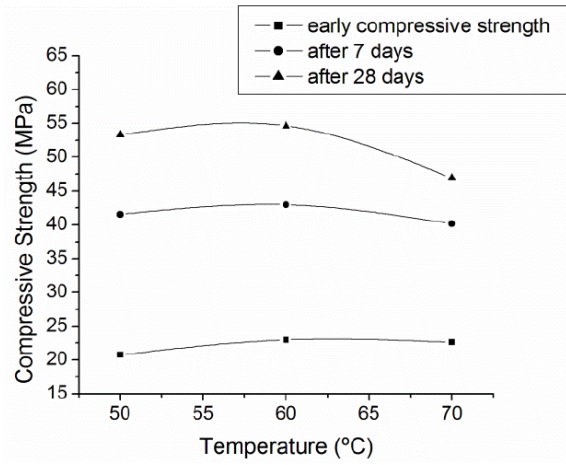
<sup>14</sup>Kosmatka, S. H. and Panarese, W. C., "Design and Control of Concrete Mixtures," 13th Edition, Portland Cement Association, Skokie, U.S.A., 1990.

<sup>15</sup>Pratik Deogekar, Ashwini Jain, Sudhanshu Mishra, Prakash Nanthagopalan, "Influence of Steam Curing Cycle on Compressive strength of Concrete," International Journal of construction materials and structures 1 (2), 18-28, 2013.

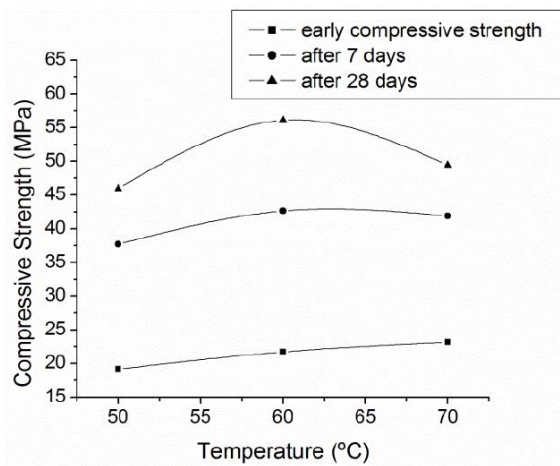
<sup>16</sup>莫詒隆、鄭勝仁、正一，「蒸氣養護最佳化分析」，結構工程，第 10 卷，第 2 期，第 3~8 頁，民國 84 年 6 月。



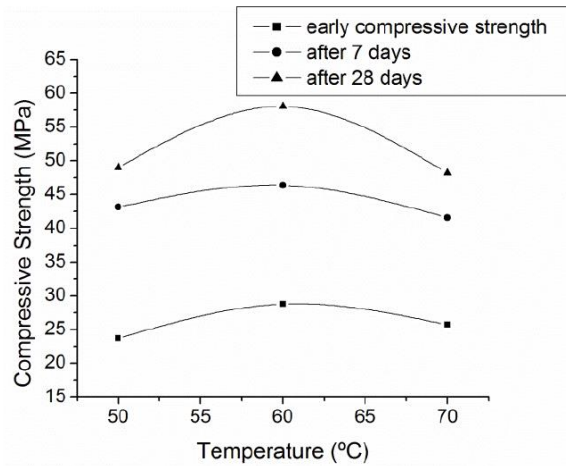
(a) 澆置2小時後蒸氣養護6小時



(b) 澆置4小時後蒸氣養護6小時



(c) 澆置2小時後蒸氣養護8小時



(d) 澆置4小時後蒸氣養護8小時

圖2-4 養護溫度對混凝土早期及晚期抗壓強度的影響

(資料來源：參考文獻<sup>14</sup>)

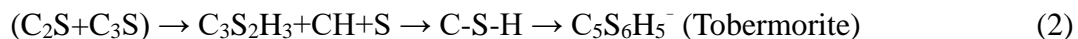
## (二)、高壓蒸氣養護對混凝土的影響

高溫高壓之蒸氣養護，除了溫度造成水化反應的加速進行外，伴隨著較大的飽和蒸氣壓(120°C、150°C、180°C、210°C之飽和蒸氣壓約分別為 2kg/cm<sup>2</sup>、5kg/cm<sup>2</sup>、10kg/cm<sup>2</sup>、20kg/cm<sup>2</sup>)，使得混凝土在 1 天內強度就可達到混凝土 28 天標準養護強度。文獻<sup>17</sup>亦提到，飛灰的取代量以 15%~25%會使得高溫高壓催化強度有較佳的表現，而且水灰比會影響高溫高壓養護試體的效率，當水灰比越低時，養護效率就越明顯。但是文獻<sup>18</sup>提到，高溫高壓蒸氣養護雖可使混凝土強度迅速發揮，但是高溫的作用也會伴隨著骨材表面成分釋出參與反應，使得骨材內其他有害物質被溶解出，如鹼類、不定型矽、硫化物等，造成混凝土之晚期強度降低。這種現象可透過再催或添加飛灰來改善。

水泥在高壓蒸氣情況下所生成之水化產物和常壓情況下不同，常壓蒸氣養護之水化生成物以 Tobermorite(雪矽鈣石礦物相)膠體為主，高壓蒸氣情況下以結晶型之 Tobermorite (11Å)、水和矽酸三鈣(C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>)、水和 α-C<sub>2</sub>S(C<sub>2</sub>SH)及 Ca(OH)<sub>2</sub> 等結晶體為主<sup>19</sup>。如果混凝土內之黏結料僅限波特蘭水泥時則在高溫環境下將依循下式反應而減弱強度<sup>1</sup>：



最後產物(α-C<sub>2</sub>SH)密度較大，體積較小，在原有膠體空間下將使孔隙增加，導致強度降低。若添加活性氧化矽，則將依循下式產生聚矽作用而改善。



<sup>17</sup>魏坤雄，「飛灰高強度混凝土高溫高壓蒸氣養護及其基本力學性質研究」，國立交通大學，碩士論文，民國 79 年 6 月。

<sup>18</sup>黃奇元，「高溫高壓蒸氣養生混凝土強度衰退原因探討與改善對策」，國立中興大學，碩士論文，民國 84 年 6 月。

<sup>19</sup>B. I-Jazairi and J.M. Illston, "The Hydration of Cement Paste Using the Semi-Isothermal Method of Derivative Thermogravimetry," Cement and Concrete Research Vol.10, pp.361-366, 1980.



Tobermorite (雪矽鈣石礦物相)的密度變化不大，不致增加孔隙而減損強度。而且在此高溫下鈣硫鋁水化物不會單獨形成(化合在 C-S-H Gel 與 Tobermorite 結構內而增加耐久性。Tobermorite 結晶穩定，亦可減少乾縮與潛變；抗風化能力則因游離石灰(Free lime)的減產而提高。以強度而言並不是 Tobermorite 產量越高越好，其中存在最佳條件亦即 C-S-H<sub>gel</sub>/Tobermorite 有一最佳比例。文獻<sup>20</sup>的研究顯示，活性矽的含量在 30% 左右，混凝土的強度最佳。

---

<sup>20</sup>黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，台北，民國 86 年。

### 第三節 國內外相關研究案例

混凝土的養護方式影響混凝土各項硬固性質甚深，就目前養護技術而言，預鑄混凝土採用之高溫蒸氣養護方式相對較為複雜，蒸氣養護前的預留時間，蒸氣養護的增溫速率、養護最高溫及養護時間，以及混凝土採用的礦物摻料等，均會影響預鑄混凝土的硬固性質，因此有關高溫蒸氣養護的研究課題，多年來一直被重視，國內外也有許多研究成國陸續被發表出來。以下彙整國內外相關研究成果，進行概略的說明：

#### 一、國內研究現況

文獻<sup>21</sup>探討不同養護條件下及不同爐石取代量之自充填混凝土，本研究針對三種不同的爐石取代量(0%、20%、40%)，以三種不同養護條件(常溫養護、50°C養護、70°C養護)下，探討不同爐石添加量對混凝土熱傳導係數的影響；最後再探討不同養護條件及不同配比之自充填混凝土工程性質及凝結期間之熱傳導行為。研究結果顯示：

1) 28 天齡期以後，所有不同爐石取代組，蒸氣養護均降低熱傳導係數。

2) 常溫養護下對於所有齡期，20%爐石取代量均具有最高之熱傳導係數；在養護 50°C下對於所有齡期，40%爐石取代量均具有最高之熱傳導係數；在養護 70°C下對於 28 天以後齡期，20%爐石與 40%爐石之熱傳導係數非常接近

3) 56 天齡期時，20%爐石取代量比未添加爐石組，在常溫養護下增加約 59%，在養護 50°C下減少約 7%，在養護 70°C下減少約 40%之熱傳導係數；而 40%爐石取代量比未添加爐石組，在常溫養護下增加約 33%，在養護 50°C下增加約 56%，在養護 70°C下減少約 42%之熱傳導係數

4) 常溫養護下，40%爐石取代量能獲得最高之強度，在蒸氣養護下以 20%爐石取代量能獲得最高之強度，顯示常溫養護下，爐石量愈多對晚期強度有很大貢獻，對於蒸氣養護下，以 20%爐石取代量能獲得最佳之自癒效果。

文獻<sup>22</sup>探討蒸氣養護對添加無收縮劑之混凝土的影響，試驗項目有坍流度、抗壓

---

<sup>21</sup>莊昆斌，「蒸氣養護對不同爐石添加量自充填混凝土熱學性質及工程性質之研究」，國立臺灣科技大學碩士論文，民國 92 年。

<sup>22</sup>王佑文，「蒸氣養護下早強無收縮混凝土之研究」，國立中興大學碩士論文，民國 108 年。

強度及長度變化等混凝土工程性質。實驗結果顯示，當添加的無收縮劑量較多時(0.2%)，可以增加混凝土的工作性並且改善混凝土收縮的現象，其工作性雖然有提高的傾向，但其強度卻是成反比的，推測可能是因為無收縮劑所產生之膨脹效果不均勻導致混凝土強度差異。

文獻<sup>23</sup>使用爐石、飛灰或矽灰之水泥砂漿與混凝土來探討加速養生及其試驗法。加速養生的方式是試體經由遠紅外線蒸氣養護後，再藉由微波加熱技術，能夠迅速加熱且均勻之優點，於不同水化階段快速養生試體。依照不同養生時間對試體進行各項抗壓強度、吸附水能力、超音波試驗與氯離子電滲量試驗；其中，氯離子電滲量試驗為混凝土耐久性的指標之一。部分試體使用微觀實驗(X光繞射分析)來觀察水化產物與加速養生之關係。研究結果發現：無論是一般或添加礦物摻料之試樣，藉由加速養生法可在24小時之試驗程序內，高效率地提升強度，使其達到控制組水中7天養護強度，部分試樣甚至達到28天強度；混凝土的水化程度亦提高甚多，部分試體甚至超過室內無養護28天之水化程度。部分混凝土試體經過加速養護後，再放入水中28天，其電滲量值大幅下降且較控制組為低。此外，亦發現添加爐石能夠增加微觀結構的緻密性，有助於降低電滲量。

文獻<sup>24</sup>探討高溫高壓蒸氣養護的方式，對於鋼筋混凝土握裹強度的影響，以期能夠對蒸氣養護有更通盤的了解，這將使鋼筋混凝土預鑄構件的養護方式，有了更具效率且多元化的選擇。研究結果顯示，高溫高壓蒸氣養護的方式，對於鋼筋混凝土的握裹強度、混凝土的抗壓強度與劈裂強度都有顯著的提昇，且本試驗結果與握裹力預測式之趨勢相當，但試驗值卻高出預測值許多，更在經高溫高壓蒸氣養護過後，觀察鋼筋與混凝土的接觸面情形發現，鋼筋與混凝土之間的粘結強度亦有提高的現象。經由對握裹介面混凝土的微觀，並沒有發現因鋼筋受熱膨脹所引起的裂縫，而且經高溫高壓蒸氣養護後，接觸面的混凝土結構亦明顯比一般養護組緻密。經高溫高壓蒸氣催化過後，握裹強度平均提昇了27%，抗壓強度提昇了40%，劈裂強度提昇了37.5%，粘結力亦提昇了4.2%。

---

<sup>23</sup> 徐尉凱，「應用蒸氣養護與微波加熱技術於新拌混凝土之可行性研究」，朝陽科技大學碩士論文，民國90年。

<sup>24</sup> 陳良博，「高溫高壓蒸氣養護 TAICON 對鋼筋握裹力影響之研究」，國立交通大學碩士論文，民國88年。

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研

文獻<sup>25</sup>採用飛灰取代部份水泥，並添加適量強塑劑，研究在高溫蒸氣養護下之混凝土行為，以找出高溫蒸氣養護之最佳模式，希望藉由試驗結果，產製適合國內工程界使用之本土化中強度高性能混凝土(Taiwan Concrete, TAICON)。研究結果顯示：高溫蒸氣養護會造成晚期強度成長緩慢或不成長，尤其是 180°C 催化時間 16 小時，其初期強度和 91 天強度幾乎一樣。高溫蒸氣養護會減少乾縮量及重量變化，並且彈性模數偏低。在溫度方面，養護溫度以 180°C 強度最好，其次是 150°C，而 120°C 最差，養護時間對強度的影響以催化 16 小時強度最佳，依次是 16hr > 8hr > 4hr > 2hr。最佳養護模式為養護溫度 180°C，預置期 8 小時，催化時間 16 小時，其初期強度約為標準養護 28 天強度之 180% 左右(約 9500psi)，初期強度至 91 天強度幾乎是維持不變。

文獻<sup>26</sup>以相同之水膠比(W/B = 0.6)，利用飛灰及爐石粉取代水泥，探討飛灰及爐石粉在蒸氣養護環境下，對混凝土性質之影響。並製作 7 × 7 × 55 cm 之單方向溫度加熱試體，探討飛灰及爐石粉對混凝土熱傳行為的影響，及比較混凝土受熱後距離加熱面不同距離處之硬固性質。研究結果顯示：

1. 高溫養護加速水化作用與卜作嵐反應之進行，因此，經過蒸氣養護之混凝土，其三天抗壓強度均高於相同配比水養護之混凝土，隨著卜作嵐材料取代量的增加，此情形更為明顯，其中又以飛灰取代水泥之效果較為顯著。
2. 添加飛灰之混凝土，在高溫養護後其表面電阻係數明顯高於水養護混凝土，且隨飛灰取代量的增加有大幅提升的趨勢。
3. 混凝土在新拌階段之升溫速率明顯高於硬固後之混凝土，顯示飽和度與混凝土的熱傳導率成正比。
4. 在 28 天之後，可以明顯看出爐石粉取代水泥 30% 之混凝土 (S30)，其熱傳速率明顯低於其他組別的混凝土，飛灰取代 30% 及爐石粉取代 15% 次高，飛灰取代 15%、常重混凝土及水泥砂漿熱傳導率則最高。
5. 沿軸向單向加熱試體各區段之間，混凝土硬固性質並沒有明顯的差異，此乃在實驗過程的後期，混凝土試體亦承受周遭側向熱傳的影響。

---

<sup>25</sup>洪國祥，「本土化中強度高性能混凝土(TAICON)高溫蒸氣養護效能研究」，國立交通大學碩士論文，民國 87 年。

<sup>26</sup>溫凱翎，「混凝土添加飛灰及爐石在高溫環境下之硬固性質及熱傳行為」，國立臺灣科技大學碩士論文，民國 94 年。

文獻<sup>27</sup>以超音波配合抗壓強度之發展，並輔以電子顯微鏡之觀測，以了解蒸氣養護對不同配比之高性能混凝土(HPC)與傳統混凝土早期強度成長之趨勢及早晚期性質之影響，以及不同蒸氣養護條件對 W/B=0.32 之 HPC 早晚期性質之影響。研究結果顯示，HPC 由於強塑劑與飛灰造成之水化延遲效應，導致早期水化速率較傳統混凝土慢，由超音波曲線可看到起波點較傳統混凝土晚出現，且水膠比越高，起波點越早出現。養護時間越長 28 天強度折減越多。低水膠比之混凝土早期強度及超音波速率成長較快且晚期之強度折減越少。因此建議使用低水膠比之高性能混凝土，以減少晚期強度折減。對於 W/B=0.32 之 HPC，前置時間越短，晚期強度及超音波越低，滲透指數越大。前置時間以大於初凝時間較佳。升溫速率對早期強度發展並無很大助益。升溫速率越快，晚期強度與超音波速率越低，滲透指數越大。升溫速率以 10°C 為最好。養護溫度越高，早期強度因蒸氣養護之效用顯著而強度越高，但超音波速率越低；但長期強度與超音波速率越低；滲透指數越大，對耐久性會有不良影響，養護溫度以不超過 60°C 較佳。

## 二、國外研究現況

混凝土加速養護的效率會影響其熱傳導係數，文獻<sup>28</sup>研究一般養護混凝土的 28 天強度和加速養護者間的強度關係，使用普通卜作嵐水泥和火山水泥在兩種養護狀態(溫水養護和沸水養護)下之變化，以線性回歸分析試驗結果，並使用效率原理進行評估，例如使加速強度和 28 天一般養護強度之比率為效率因子，普通水泥的效率高過添加火山灰之水泥，在沸水法中，水泥型別不同所造成的影響小於溫水法中的影響。

添加礦物摻料的蒸氣養護混凝土研究中，文獻<sup>29</sup>探討蒸氣養護混凝土的潛在效益，尤其在添加礦物摻料的混合物上。研究 20 種具有卜作嵐水泥、飛灰、爐石和矽灰的不同組成。每一種混合物，試體不是在 27°C 的水槽中標準養護就是在最大溫度 55°C 下蒸氣養護超過 8 小時。發現到蒸氣養護混凝土具有更多孔隙，與標準養護試體

---

<sup>27</sup>王奕琛，「高性能混凝土蒸氣養生材料行為探討」，國立台灣工業技術學院碩士論文，民國 85 年。

<sup>28</sup>M. Hulusi Ozkul, "Efficiency of accelerated curing in concrete," *Cement and Concrete Research*, 31(9): 1351-1357, 2001.

<sup>29</sup>D. W. S. Ho, C. W. Chua, C. T. Tam, "Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures," *Cement and Concrete Research*, 33(4): 595-601, 2003.

比較，具有更高的吸收性的量。添加矽灰具有最佳的性能，因為其具有高早期強度和低吸收性的量。文獻<sup>30</sup>研究養護溫度對飛灰混凝土潛變的影響，以水膠比 0.33、飛灰取代水泥量之 20%及 40%、養護溫度為 20°C、50°C 及 90°C 等變數進行試驗。研究結果指出，在相同載重下，影響飛粉混凝土潛變的主要因素是 C-S-H 膠體的數量和微觀結構。與 20°C 養護溫度、飛灰用量 20%之混凝土相比，50°C 養護溫度之混凝土產生更多的 C-S-H 膠體，產生的 Ca(OH)<sub>2</sub> 則略為降低，且其潛變量接近控制組混凝土，90°C 養護溫度之混凝土則產生更多的 C-S-H 膠體，Ca(OH)<sub>2</sub> 的數量則大為降低，其 1 年期之潛變量為控制組混凝土的 87.1%。另在 50°C 養護溫度下，飛灰用量 40%的混凝土有產生較多的 C-S-H 膠體，但其潛變量顯著增加，為控制組混凝土之 119.5%。

對於定義蒸氣養護混凝土前延遲期間的長度的重要機制研究，文獻<sup>31</sup>認為：一些預鑄混凝土廠，在進行澆置預鑄構件後，立即對構件施以蒸氣養護，這樣的作法對於構件是有害的。基本上，蒸氣養護之前應有 2 到 5 個小時的延遲，再以每小時 22 到 44°C 的速度加熱到最高 50°C~85°C，在此溫度下保持約 10 個小時的時間，然後整個冷卻週期不超過 18 小時的冷卻時間<sup>32</sup>。混凝土成分的熱膨脹係數的差異會導致微裂紋並增加孔隙率。但是，將蒸氣固化週期延遲等於其初始凝固時間的時間大大降低了這種有害作用。它也促進了石膏與鋁酸三鈣的反應，在高溫下石膏的溶解度降低了<sup>33</sup>。文獻<sup>34</sup>的研究說明應確定延遲時間，以使蒸氣固化操作不會引起膨脹。另文獻<sup>29</sup>的研究則指出，由於較短的延遲時間而導致的混凝土質量較低是孔隙率增加和孔隙的增加的結果，孔隙率和裂縫是由孔隙中的內部壓力形成的拉伸應力引起的，因此在開始蒸

---

<sup>30</sup>Qingxin Zhao, Xiaochen Liu, Jinyang Jiang, "Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, 96(15): 326-333, 2015.

<sup>31</sup>T. K. Erdem, L. Turanlı, T. Y. Erdogan, "Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete," *Cement and Concrete Research*, 33(5): 741-745, 2003.

<sup>32</sup>ACI 517.2 R-87 (1992), "Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure- State of the Art", ACI Manual of Concrete, Revised.

<sup>33</sup>Dodson V. (1990), *Concrete Admixtures*, Van Nostrand Reinhold, New York.

<sup>34</sup>Mironov S. A. (1964), "Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening," *Rilem International Conference on the Problems of Accelerated Hardening of Concrete in Manufacturing Precast Reinforced Concrete Units*, Moscow.

氣固化操作之前，混凝土應具有臨界拉伸強度。文獻<sup>35</sup>研究在混凝土的初始凝固時間之前開始施加蒸氣，發現混凝土試樣的外部位置會較早硬化，而內部混凝土仍呈現塑性狀態，因為在此溫度下混凝土溫度會低於固化室的溫度上升，內部的塑料混凝土會膨脹並在外部的剛性殼體中引起拉伸應力，提出了初始凝固時間作為在進行蒸氣固化之前的延遲時間的可量化標準。

---

<sup>35</sup>Erdem T. K., Turanlı L., Erdogan T. Y., “Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete,” *Cement and Concrete Research*, 33(5): 741-745, 2004.

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研



## 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：使用普通 Type I 卜特蘭水泥，其基本性質如表 3-1 及表 3-2 所示。
3. 爐石粉：採用 100 級水淬高爐爐渣粉(圖 3-1)，其基本性質列於表 3-1 及表 3-2。
4. 常重粗細骨材：採用天然砂石，粗、細骨材之各項基本性質試驗結果列於表 3-3 中。
5. 強塑劑：採用台灣 Sika Type G 高性能減水緩凝劑，符合 CNS 或 ASTM 之規定，其性質與用法如表 3-4 所示。

表 3-1 水泥、爐石粉之物理性質

項目			試驗結果		規範		
			水泥 I 型	爐石	水泥 I 型 CNS 61、1078	爐石 CNS 12549	
1	比重		--	2.90	--	min.2.8	
2	細度(透氣儀試驗)	m <sup>2</sup> /kg	386	439	min.280	min.330	
3	初凝	min	123	--	min.45	--	
	終凝	min	240	--	max.375	--	
4	健度(熱壓膨脹試驗)	%	0	--	max.0.80	--	
5	空氣含量(體積比)	%	7.5	5.3	max.12	max.12	
6	細度 (No.325 濕篩法停留量)	%	--	0.4	--	max.20	
7	活性指數	7 天	%	--	77.8	--	min.75(100 級)
		28 天		--		100.3	--
8	抗壓強度	3 天	kgf/cm <sup>2</sup>	250	--	min.123	--
		7 天		335		min.194	--
		28 天		446		min.286	--

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 水泥、爐石粉之化學成分

項目		試驗結果		規範	
		水泥 I 型	爐石	水泥 I 型	爐石
				CNS 61、1078	CNS 12549
1	二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> )	21.04	35.16	--	--
2	氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.24	14.08	--	--
3	氧化鐵 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.06	0.29	--	--
4	氧化鈣 (CaO)	63.86	39.68	--	--
5	氧化鎂 (MgO)	2.3	7.27	Max.6.0	--
6	三氧化硫 (SO <sub>3</sub> )	C <sub>3</sub> A ≤ 8%	2.48	0.05	Max.4.0
		C <sub>3</sub> A > 8%			
7	燒失量 (L.O.I)	1.1	0.26	Max.3.0	--
8	不溶殘渣	0.13	--	Max.4.30	--
9	矽酸三鈣 (C <sub>3</sub> S)	48	--	--	--
10	矽酸二鈣 (C <sub>2</sub> S)	23.3	--	--	--
11	鋁酸三鈣 (C <sub>3</sub> A)	11.4	--	--	--
12	鋁鐵酸四鈣 (C <sub>4</sub> AF)	9.3	--	--	--
13	硫化物硫 (S) %	--	0.66	--	Max. 2.5
14	硫酸鹽硫(SO <sub>3</sub> )%	--	0.43	--	Max. 4.0

(資料來源：本研究整理)

表 3-3 常重粗細骨材基本性質

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)

表 3-4 Sikament G 減水劑之性質與用法

型式	Naphthalene base
顏色	棕色
比重	$1.2 \pm 0.02 \text{ kg/l}$
pH 值	$7.0 \pm 1.0$
貯存與保存期限	貯存溫度宜在 $0^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 下，並應避免霜害。原狀包裝下可保存 18
用量	添加量為水泥重量之 0.8~2.5%，實際之用量與水泥型式、水泥品質、骨材之選用、水灰比、溫度等有關。因此使用前應先做配比試驗。
摻入方式	Sikament G 可加入拌合水中或可直接與新鮮混凝土拌合，當直接加入混凝土中時，需額外攪拌均勻。

(資料來源：台灣 Sika 公司提供)

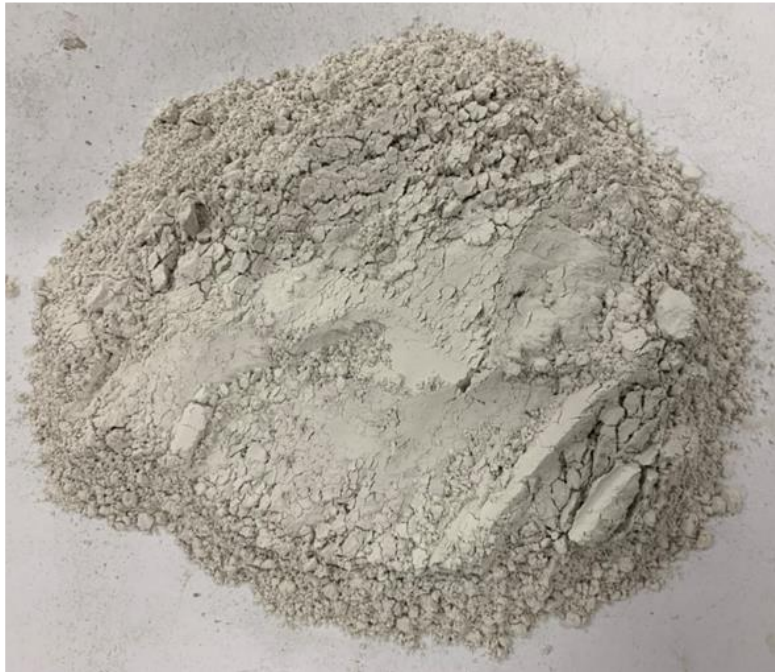


圖 3-1 爐石粉

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 混凝土配比

本研究參照 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( $1\text{m}^3$ )用量，規劃爐石粉取代部分水泥，取代量(重量取代)分別為 0%、30%及 60%，混凝土設計抗壓強度為  $280\text{kgf/cm}^2$  及  $420\text{kgf/cm}^2$ ，試驗齡期為 3 天、7 天、28 天及 56 天，混凝土抗滲透、長度變化及梁試體撓曲強度試驗齡期為 28 天及 56 天。試體製作完成後預置 1.5 小時及 3 小時，之後放入蒸氣養護箱及蒸氣養護室養護 6 小時。蒸養完後之試體放置於室內進行空氣中養護，待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 3-5 所示，混凝土配比則如表 3-6 所示。

表 3-5 試驗變數

混凝土設計強度	預置時間	養護方式	齡期
$280\text{kgf/cm}^2$	1.5 小時	常溫	3 天、7 天
$420\text{kgf/cm}^2$	3 小時	$50^\circ\text{C}$ $70^\circ\text{C}$	(28 天)

(資料來源：本研究整理)

表 3-6 混凝土配比 ( $1\text{m}^3$ )

試體編號	W/B	水	水泥	爐石	細骨材	粗骨材	強塑劑
		kg					
C28S00	0.60	205	340	0	835	900	0
C28S30	0.60	205	238	102	830	895	1
C28S60	0.60	205	136	204	825	890	1.5
C42S00	0.42	176	420	0	845	900	1
C42S30	0.42	176	294	126	840	895	1.5
C42S60	0.42	176	168	252	835	890	2

1. 編號說明：C28 代表混凝土抗壓強度為  $280\text{kgf/cm}^2$ 、C42 代表抗壓強度為  $420\text{kgf/cm}^2$ 、S00 代表爐石取代 0% 水泥量、S30 代表取代 30% 水泥量、S60 代表取代 60% 水泥量。
2. 強塑劑用量取膠結材料重量的百分之一，不計入配比計算。

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 試體模具製作

為解析蒸氣養護及爐石粉取代量對混凝土抗壓強度及耐久性之影響，本研究將利用配比試驗完成的配比製作各式混凝土試體，以作為後續驗證試驗之用。抗壓強度及長度變化模試體模具係以鋼材製作，尺寸分別為直徑 100mm×高 200mm 及寬 100mm×高 100mm×長 285mm，如圖 3-2 及圖 3-3 所示；混凝土滲透試驗之試體則以直徑 150mm×高 300mm 模具(圖 3-4)製作圓柱試體後進行裁切，其試體尺寸為直徑 150mm×高 50mm。

梁試體模以木材製作，其試體段面尺寸為寬 240mm×高 360mm×長 3500mm (圖 3-5)，有效深度為 300mm，配置的拉力筋之鋼筋比( $\rho$ )為 0.5%，梁上配置有剪力筋，試體配置如表 3-10 所示，梁試體撓曲試驗之淨跨為 3000mm，試驗時以上方雙點載重進行加載載，梁上二個加載點間距為 1200m，如圖 3-6 所示。此部分共製作 8 支梁試體。

表 3-7 撓曲試驗之梁試體規劃

試體編號	斷面尺寸(底×高)(mm)	鋼筋比 %	壓力筋/拉力筋	剪力筋
FN42	240×360	0.5	2#6 / 2#6、1#7	16#4

(資料來源：本研究整理)



圖 3-2 抗壓試體模具( $\phi$ 100mm×200mm)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-3 長度變化試體模具(100mm×100mm×285mm)  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-4 圓柱試體模具( $\phi$ 150mm×300mm)  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-5 製作完成的梁試體木模 (資料來源：本研究整理)

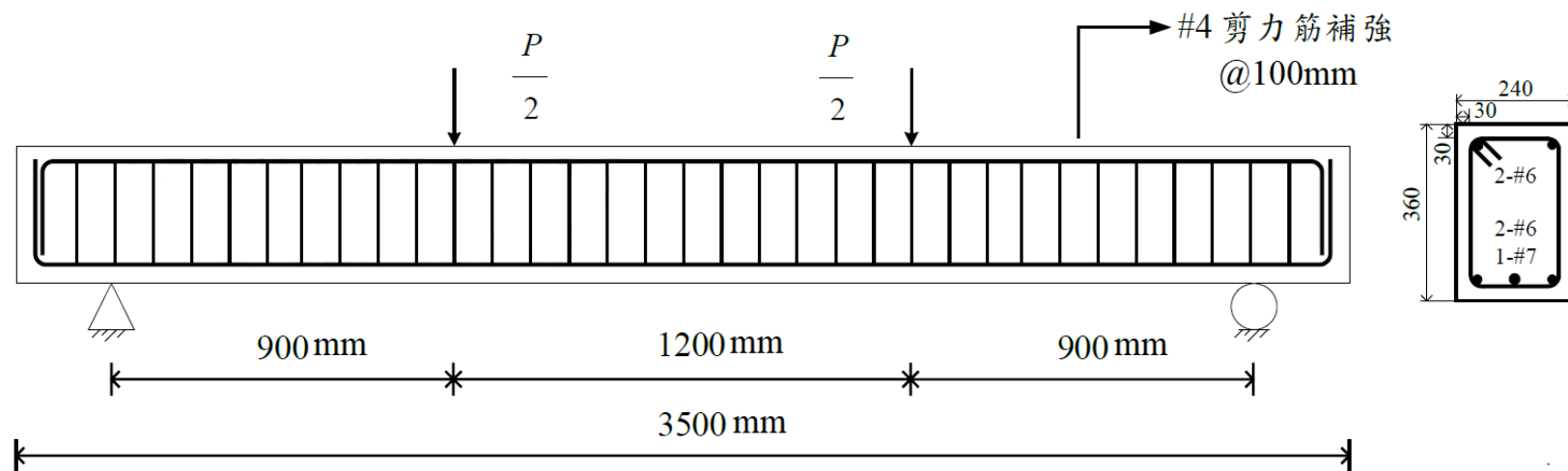


圖 3-6 梁試體斷面、尺寸圖 (單位：mm) (資料來源：本研究整理)



#### 第四節 混凝土拌製及澆置

試驗試體模具備齊後，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. 啟動拌和機，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. 啟動拌和機，拌和一分鐘。

混凝土拌和完成後，取出一部分試料進行坍度試驗(圖 3-7)，其餘澆置圓柱試體及梁試體，圓柱試體分兩層澆置並以搗棒夯實後抹平(圖 3-8)，梁試體則由預拌混凝土廠協助拌製混凝土，再利用預拌混凝土進行澆置，澆置過程中利用震動棒進行震動夯實(圖 3-9)，澆置完成後將梁試體的表面抹平，製作完成的試體如圖 3-10 及圖 3-11 所示。試體分別靜置 1.5 小時及 3 小時後，送入蒸氣養護室及蒸氣養護箱蒸養，梁試體及部分抗壓試體於溫度 50 度的蒸養室養護 6 小時(圖 3-12)，其餘抗壓試體則於溫度 70 度的蒸養箱養護 6 小時(圖 3-13)。所有試體於隔日拆模後放置於室內進行空氣中養護(圖 3-14 及圖 3-15)，待試驗齡期時進行抗壓強度試驗及梁試體的撓曲強度試驗。

此外，梁試體之模具以木材製作，製作好的木模先於鋼模內側塗上一層模油並放入混凝土墊塊(Block)，再將鋼筋籠置入模內，組立模板後以螺栓固定即完成，如圖 3-16 所示。梁試體用的鋼筋籠施作流程是將縱向鋼筋與橫箍筋先放置於適當位置，並以細鐵絲逐次網綁每一箍筋，最後再將箍筋交角部分彎成 135 度彎鉤即告完成，完成後的鋼筋籠如圖 3-17 所示。為量測梁試體縱向鋼筋於加載過程中之受力情形，故於每根縱向筋之中點皆貼黏應變計；另為得知各箍筋之應力變化，在試體中央處三組箍筋之側面亦貼黏應變計，其位置如圖 3-18 所示。





(a) 分三次填料



(b) 量測坍度

圖 3-7 新拌混凝土坍度試驗 (資料來源：本研究整理)



(a) 分兩層搗實



(b) 表面抹平

圖 3-8 抗壓強度試體澆置 (資料來源：本研究整理)





圖 3-9 梁試體澆置 (資料來源：本研究整理)



圖 3-10 製作完成之圓柱抗壓試體 (資料來源：本研究整理)



圖 3-11 製作完成之梁試體（資料來源：本研究整理）



圖 3-12 梁試體及圓柱抗壓試體蒸氣養護（資料來源：本研究整理）





圖 3-13 蒸氣養護箱養護之圓柱抗壓試體 (資料來源：本研究整理)



圖 3-14 室內常溫養護之圓柱抗壓試體 (資料來源：本研究整理)



圖 3-15 室內常溫養護之梁試體（資料來源：本研究整理）



圖 3-16 組立好的梁試體模及鋼筋籠（資料來源：本研究整理）





圖 3-17 製作完成的鋼筋籠（資料來源：本研究整理）



圖 3-18 黏貼完成的應變計（資料來源：本研究整理）

## 第五節 試驗設備及試驗方法

## 一、試驗設備

本研究在混凝土配比比試驗試驗，以及後續需進行的混凝土抗壓強度試驗、長度變化試驗、滲透試驗，以及實尺寸梁試體撓取強度試驗等，主要使用的試驗儀器設備說明如下：

1. 混凝土單軸拌合機：採用垂直單軸拌合方式，最大拌合量約  $0.02\text{m}^3$ ，如圖 3-19 所示。
2. 強制式水平雙軸拌和機：採用水平雙軸交叉拌合方式，每軸具四支攪拌翼，最大拌合量約  $0.1\text{m}^3$ ，如圖 3-20 所示。
3. 萬能材料試驗機：最大載重為 180 噸，可以位移控制或力量控制加載，如圖 3-21 所示。本設備主要用以進行混凝土抗壓試驗及鋼筋抗拉試驗。
4. 曲率框架：固定變位計以量測斷面之曲率，如圖 3-22 所示。
5. 100 及 300mm LVDT 變位計：量測試體中間跨之曲率變化與中央點位之撓度，如圖 3-22 所示。
6. 資料蒐集器 (Data Logging System Ucam-10A)：蒐集萬能試驗機、變位計、及應變計之讀數，如圖 3-23 所示。
7. 個人電腦：儲存資料蒐集器擷取之資料，如圖 3-23 所示。
8. 附刻度之放大鏡：觀測裂縫用，最小刻劃為 0.05 mm。
9. 支承：固定梁試體。
10. 傳遞鋼梁：傳遞力量至施載點上。
11. 加壓透水試驗儀：其水壓可控制在  $0\sim 50\text{ kg/cm}^2$ ，儀器如圖 3-24 所示。
12. 混凝土長度變化試驗儀：本試驗於恆溫恆濕室進行，儀器如圖 3-25 所示。
13. 600kN 萬能試驗機 MTS (Material Testing System)：包含油壓裝置及控制系統，可設定程式控制力量之加載方式，試驗儀器如圖 3-26 所示。本設備主要用以進行實尺寸混凝土梁之撓曲試驗。
14. 蒸氣養護箱：採用組裝之蒸氣養護箱，如圖 3-27 所示，其內部尺寸為

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研

1500mm×470mm×610mm (長×寬×深)，可同時對 24 顆  $\phi 100\text{mm}\times 200\text{m}$  圓柱試體進行蒸氣養護，提供均勻且穩定之溫度及溼度，溫度範圍為室溫 ~ 80°C，相對溼度為 20%~98%。

15. 蒸氣養護室：採用信義建材自行設計之蒸氣養護室，如圖 3-28 所示，其室內空間約為 40 坪，其溫度範圍為室溫~60°C，相對溼度為 20%~98%，該養護室為本研究實尺寸混凝土梁試體進行蒸氣養護之場所。



圖 3-19 混凝土單軸拌和機 (資料來源：本研究整理)





圖 3-20 強制式水平雙軸拌和機 (資料來源：本研究整理)



圖 3-21 萬能材料試驗機 (資料來源：本研究整理)



圖 3-22 LVDT 變位計及曲率框架 (資料來源：本研究整理)



圖 3-23 資料蒐集器及個人電腦 (資料來源：本研究整理)





圖 3-24 混凝土透水試驗儀  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-25 600kN 萬能材料試驗機  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-26 混凝土長度變化量測試驗儀  
(資料來源：本研究整理)



圖 3-27 蒸氣養護箱  
(資料來源：本研究整理)



(a) 養護室



(b) 加熱設備

圖 3-28 蒸氣養護室及加熱設備 (資料來源：本研究整理)



## 二、試驗方法

### (一)、混凝土抗壓強度試驗

混凝土試體於3天、7天、28天及56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(圖3-29)：

1. 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。
2. 先把試體底部清理乾淨，放到蓋平桌上。
3. 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。
4. 等大約15分鐘石膏乾後，將玻璃片拆除。
5. 將圓柱試體的軸心置於萬能試驗機上承壓軸的正中心處，加壓速率保持在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 3-29 混凝土抗壓強度試驗 (資料來源：本研究整理)

## (二)、混凝土長度變化試驗

混凝土試體依 CNS 14603-2001「硬固水泥砂漿及混凝土長度變化試驗法」之規定進行抗壓試驗(圖 3-30)：

1. 利用標準長度鐵件進行校準。
2. 將試體置於測量裝置中，試體上下的端子對準量測儀的量測桿後即可進行量測。
3. 本試驗將於恆溫恆濕環境下進行。



圖 3-30 混凝土長度變化量測試驗 (資料來源：本研究整理)

### (三)、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 3-31)，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 6~7 kgf/cm<sup>2</sup> 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 kgf/cm<sup>2</sup> 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 3-31 混凝土滲透試驗  
(資料來源：本研究整理)

### (四)、梁試體安裝及撓曲強度試驗流程

本試驗採上方雙點集中載重加載，試體架設如圖 3-32 所示。試體安裝過程如下：

1. 在兩加載點試驗區內，將五組角鋼外框固定於梁試體上，再於角鋼之上、下各裝上四支 100 mm 之 LVDT 變位計，以便量測四個斷面之各別曲率。由於本試驗之中間跨測試區中皆有可能發生撓曲破壞，為量得破壞時斷面之曲率，



- 故架設較多組角鋼外框及 LVDT 變位計。
2. 於試體兩處加載點之上方，放置鉸支承。
  3. 將 MTS 萬能試驗機力量歸零後，降低其高度使傳遞鋼梁與試體上方之鉸支承接觸。
  4. 於試體中央點之左右側各放置一 300mm LVDT 變位計，以量取梁中央之撓度。
  5. 將 MTS 萬能試驗機、LVDT 變位計、應變計之接線連接上資料蒐集器，於測試完畢後，即完成安裝。

試驗過程如下：

1. 決定梁試體之實際混凝土強度：  
梁試體澆置完成後，於試驗當天將多數個與試體一同澆置、養護之圓柱試體以石膏蓋平，進行抗壓試驗，並取其平均抗壓強度作為梁試體之混凝土實際強度。
2. 試體加載：  
本試驗之加載方式以單向靜態加載：先採力量控制，以 1kN/sec 速率加載，快達設計載重時改以位移控制，以位移速率 0.02mm/sec 加載至保護層剝落並於載重達次高峰後採位移速率為 0.06mm/sec 加載至梁破壞。於力量控制期間荷重每增加 20kN 即停止加載，並持附有刻劃之放大鏡觀測試體拉力側之裂縫寬度，再予以記錄 MTS 載重讀數與最大裂縫寬度。
3. 記錄試驗數據：  
試驗全程均以資料蒐集器擷取萬能試驗機、位移計及應變計之讀數並儲存於電腦內。



圖 3-32 架設完成的梁試體  
(資料來源：本研究整理)

## 第四章 試驗結果與討論

### 第一節 混凝土之坍度

一般而言，混凝土的流動性(工作度)決定工地現場混凝土施工的難易度及品質，而預鑄混凝土因在工廠內製作，可較為精準使用水量並搭配機器震動夯實，因此對其工作度的要求較低，不需要多添加水使混凝土具有一定的工作度。本研究之混凝土有中、高兩種抗壓強度，高強度混凝土的水膠比(w/b)較低，用水量較少，且試驗用試體均以人力製作，為使混凝土具有一定的工作度以利施作，於混凝土配比設計時有添加高性能減水劑，以控制混凝土的工作度。各式配比試驗混凝土之坍度試驗結果如圖4-1所示。

由坍度試驗結果大致可看出，各混凝土配比之坍度介於18~21cm，具有一定的工作度。此外，隨爐石粉取代量的增加及水膠比的降低，高性能減水劑須適時地增加，方可使混凝土具有一定的工作度，惟隨減水劑用量的增加，混凝土對用水量的多寡變得敏感，混凝土用水量的拿捏需較為精確，以防混凝土產生析離，致使混凝土拌和失敗。

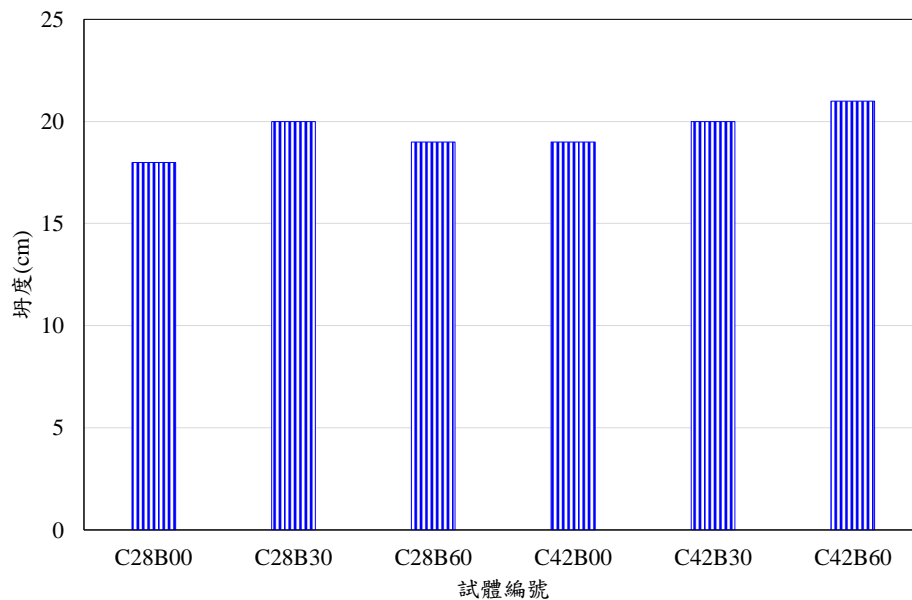


圖 4-1 混凝土坍度  
(資料來源：本研究整理)

## 第二節 混凝土之抗壓強度

爐石粉等卜作嵐材料之反應速度低於水泥的水化反應速度，採用爐石粉部分取代水泥產製混凝土，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爐石粉之混凝土。此外，由於爐石粉進行卜作嵐反應時，會消耗水泥水化產物氫氧化鈣 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )，生成具有強度的 C-A-H、C-S-H 等膠體，可增加混凝土的緻密性及晚期強度。然而，以上所述之機理適用一般養護之混凝土，經蒸氣養護之混凝土，尤其是不同的預置時間、不同蒸氣養護溫度者，對有爐石粉取代水泥之混凝土是否具有養護的效果，特別是爐石粉取代量較高之混凝土，仍待進一步研究探討。為瞭解蒸氣養護對含爐石粉混凝土抗壓強度的影響，本研究規劃兩種混凝土抗壓強度 ( $280\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $420\text{kgf}/\text{cm}^2$ )、三種爐石粉取代水泥量 (0%、30%、60%)，以及常溫養護、預置 1.5 小時、3 小時後  $50^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$  蒸氣養護等五種養護條件進行試驗，相關混凝土抗壓強度試驗結果如表 4-1 及圖 4-2 至圖 4-13 所示。

### 一、純水泥混凝土抗壓強度

從表 4-1 及圖 4-2 可發現 3 天齡期時，不論預置時間為 1.5 小時或 3 小時，經  $50^\circ\text{C}$  或  $70^\circ\text{C}$  蒸氣養護 6 小時後之各式純水泥混凝土強度均高於常溫養護者，顯見蒸氣養護確實有助於混凝土於短時間內提升抗壓強度。就圖 4-2 所示而言，配比 C28B00 及 C42B00 之常溫養護 3 天抗壓強度分別為  $136\text{kgf}/\text{cm}^2$  及  $206\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，經預置 1.5 小時、 $50^\circ\text{C}$  蒸養，其強度分別提升至  $208\text{kgf}/\text{cm}^2$  及  $338\text{kgf}/\text{cm}^2$ ， $70^\circ\text{C}$  蒸氣養護者則提升至  $188\text{kgf}/\text{cm}^2$  及  $325\text{kgf}/\text{cm}^2$ ；預置 3 小時、 $50^\circ\text{C}$  蒸氣養護 6 小時，其強度分別提升至  $231\text{kgf}/\text{cm}^2$  及  $357\text{kgf}/\text{cm}^2$ ， $70^\circ\text{C}$  蒸氣養護者則提升至  $210\text{kgf}/\text{cm}^2$  及  $341\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。由此結果可看出， $70^\circ\text{C}$  蒸氣養護雖可提升混凝土的抗壓強度，不過提升的幅度不如  $50^\circ\text{C}$  者，特別是預置時間 1.5 小時者，其強度相對較低，應是預置 1.5 小時的新拌混凝土尚未進入終凝，混凝土尚未有足夠強度可抵抗  $70^\circ\text{C}$  蒸氣養護。

從表 4-1 及圖 4-2 至圖 4-5 可觀察出純水泥混凝土經蒸氣養護之強度發展，3 天齡期時呈現蒸氣養護混凝土抗壓強度高於常溫養護者(如圖 4-2 所示)；兩種強度混凝土配比 C28B00 及 C42B00 於 7 天齡期的抗壓強度均有所成長，其中常溫養護混凝土之

強度成長幅度較蒸氣養護者大(如圖 4-3 所示);28 天齡期時,常溫養護混凝土的抗壓強度已可高於蒸氣養護者(如圖 4-4 所示),不過蒸氣養護之兩種強度混凝土抗壓強度略低於設計強度,其中預置 1.5 小時後蒸養混凝土之抗壓強度相對於其他三種養護方式者低;另針對常溫養護及 50°C 蒸養混凝土之 56 天齡期抗壓強度進行比較,發現兩種強度混凝土配比 C28B00 及 C42B00 的抗壓強度可於該齡期超過設計強度的需求。此結果反映出經蒸氣養護之混凝土抗壓強度雖可在短時間內大幅提升,惟其蒸養後之強度無法隨齡期增加而有較大幅度的提升,須達 56 天齡期時其抗壓強度才可符合設計強度的需求。

## 二、含 30% 爐石粉混凝土抗壓強度

從表 4-1 及圖 4-6 可發現,兩種混凝土之 3 天齡期抗壓強度試驗結果與純水泥者相似,不論預置時間為 1.5 小時或 3 小時,經 50°C 及 70°C 蒸氣養護 6 小時後之各式混凝土強度均高於常溫養護者,不過整體兩種強度混凝土之抗壓強度低於純水泥者,應是含 30% 爐石粉使得混凝土早齡期的強度較低。另從圖 4-2 中還可觀察出,預置 3 小時後 50°C 蒸養混凝土 C28B30 及 C42B30 之抗壓強度高於同強度等級其他養護方式之混凝土,此結果與純水泥混凝土的試驗結果相似,可見預置 3 小時及 50°C 蒸養 6 小時可使混凝土於 3 天齡期時具有較佳的抗壓強度發展表現。

圖 4-6 至圖 4-9 所示為含 30% 爐石粉混凝土各試驗齡期之抗壓強度,從圖 4-7 中可看出常溫養護之兩種強度混凝土 C28B30 及 C42B30 於 7 天齡期的抗壓強度分別為 228kgf/cm<sup>2</sup> 及 343kgf/cm<sup>2</sup>,已高於同齡期未添加爐石粉之混凝土 28B00 的 206kgf/cm<sup>2</sup> 及 C42B00 的 332kgf/cm<sup>2</sup>,此結果應是爐石粉進行卜作嵐反應所致。觀察各試驗齡期經蒸氣養護後混凝土之抗壓強度可發現,其強度成長與純水泥者的試驗結果相似,即經 50°C 蒸氣養護者之強度成長幅度大於 70°C 蒸養者,預置 3 小時再蒸氣養護者之強度成長也比預置 1.5 小時者高。此外,兩種強度混凝土經蒸養後之 28 天齡期強度均高於設計強度(圖 4-8),此現象與純水泥者需於 56 天齡期才可高於設計強度的結果不同,且常溫養護者的強度已高於其他蒸氣養護者;觀察常溫養護及 50°C 蒸養混凝土於 56 天齡期的抗壓強度發展(圖 4-9),仍是常溫養護者之強度高於其他兩種養護者。由此可知,含 30% 爐石粉混凝土經蒸養後的強度成長可符合設計強度的需求,不過其 28

天齡期後之抗壓強度低於常溫養護者。

### 三、含 60%爐石粉混凝土抗壓強度

表 4-1 及圖 4-10 所示為含 60%爐石粉混凝土之 3 天齡期抗壓強度試驗結果，從表及圖中可發現經蒸養之各式混凝土強度均高於常溫養護者，不過其整體抗壓強度低於純水泥者及含 30%爐石粉者，由於此兩種強度混凝土之爐石粉取代水泥量達 60%，水泥用量相對較少，使得混凝土早齡期的強度發更為緩慢。另從圖 4-2 中也可觀察到預置 3 小時後 50°C 蒸養混凝土 C28B60 及 C42B60 之抗壓強度高於同強度等級其他養護方式之混凝土，此結果也與純水泥者及含 30%爐石粉者的試驗結果相似。

從圖 4-10 至圖 4-13 中觀察蒸養後混凝土強度的發展可發現，兩種強度混凝土之 7 天齡期抗壓強度雖比其 3 天齡期強度高，不過其整體強度仍低於同齡期之純水泥者及含 30%爐石粉者；28 天齡期時，預置 3 小時後 50°C 蒸養混凝土 C28B60 之強度高於同強度之常溫養護者，相同養護條件之混凝土 C42B60 的強度則低於同強度之常溫養護者，此現象與純水泥及含 30%爐石粉同齡期之常溫養護者具有相對較高強度的試驗結果不同；從圖 4-13 所示 56 天齡期的抗壓強度可發現，雖然整體強度混凝土的強度低於同齡期之純水泥者及含 30%爐石者，不過預置 3 小時後蒸養的混凝土強度可略高於常溫養護者，可知隨爐石取代量的增加，經 50°C 蒸養之混凝土於晚齡期的抗壓強度可與常溫養護者相當。

表 4-1 混凝土抗壓強度

試體編號	常溫				預置 1.5 小時						預置 3 小時							
					50°C				70°C		50°C				70°C			
	3 天	7 天	28 天	56 天	3 天	7 天	28 天	56 天	3 天	7 天	28 天	3 天	7 天	28 天	56 天	3 天	7 天	28 天
C28B00	136	206	293	322	208	227	273	291	188	218	256	231	237	283	306	210	221	270
C28B30	121	228	305	334	193	241	295	312	171	225	284	218	268	302	327	197	236	293
C28B60	88	153	248	291	172	202	241	276	157	194	232	193	218	263	303	181	203	248
C42B00	206	332	427	462	338	340	411	431	325	334	395	357	354	423	446	341	342	422
C42B30	192	343	438	475	313	372	423	446	302	355	416	341	396	434	469	318	383	436
C42B60	156	256	396	437	261	317	364	395	247	305	353	282	332	381	443	263	318	373

編號說明：以 C42B30 為例，C42 代表抗壓強度 420kgf/cm<sup>2</sup>、B30 代表爐石粉取代 60% 的水泥，其餘類推。

(資料來源：本研究整理)





### 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

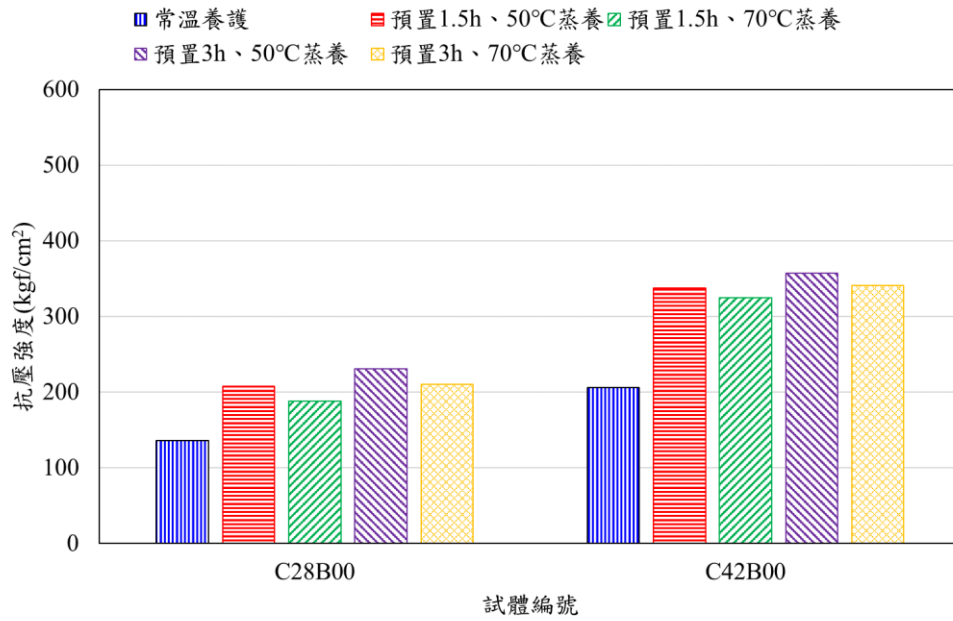


圖 4-2 混凝土抗壓強度(純水泥、3 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

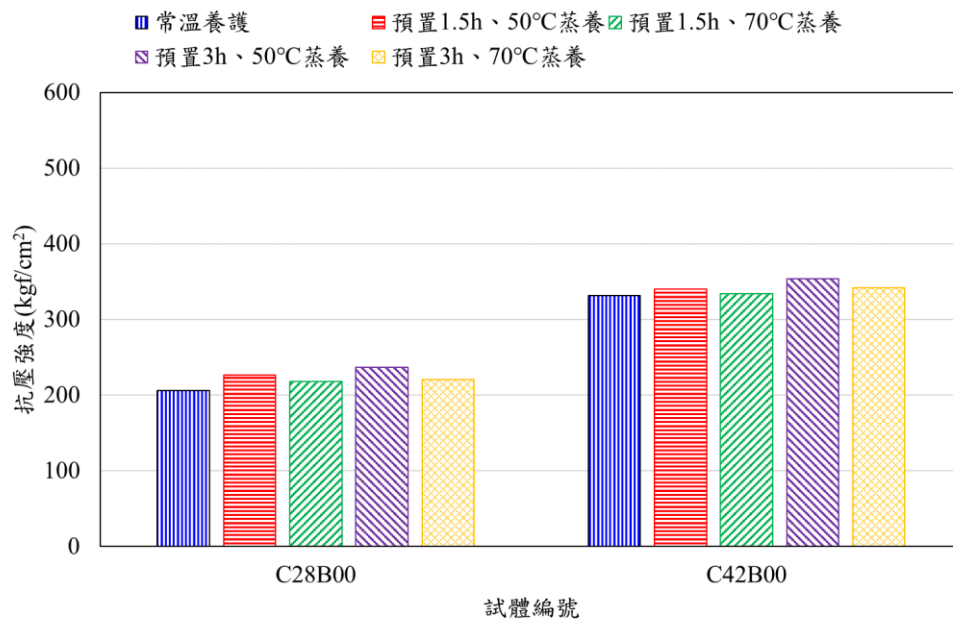


圖 4-3 混凝土抗壓強度(純水泥、7 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

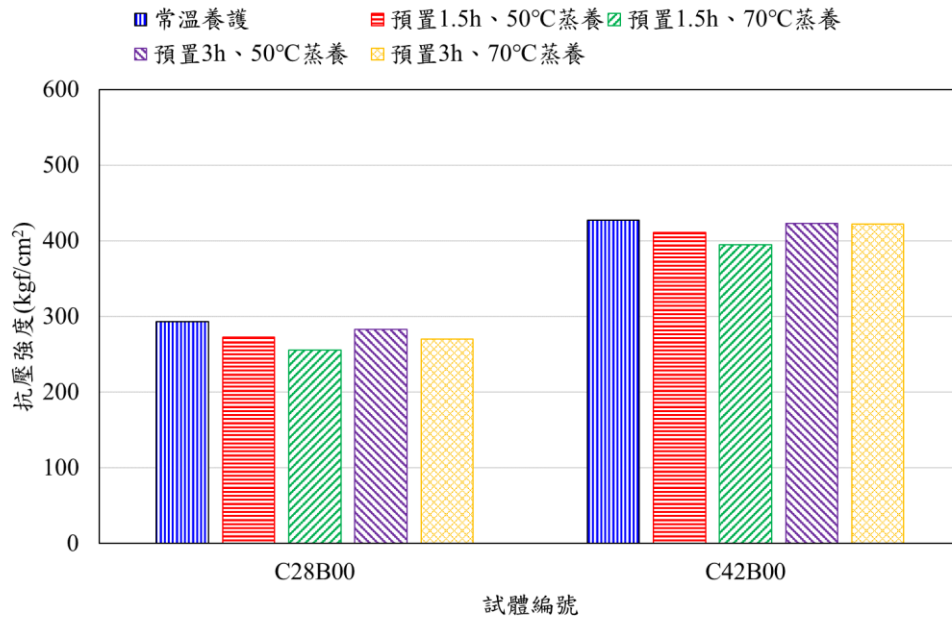


圖 4-4 混凝土抗壓強度(純水泥、28 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

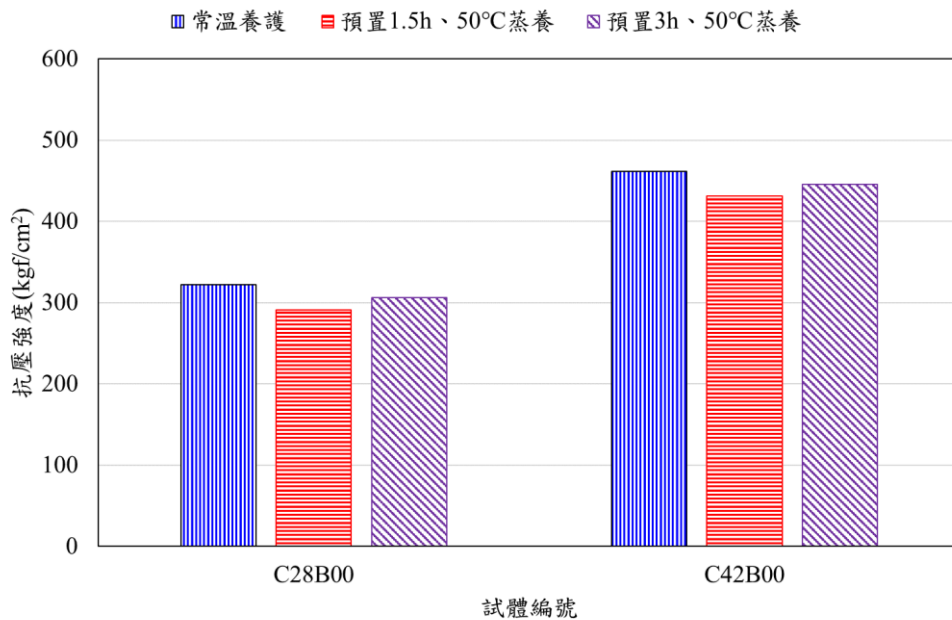


圖 4-5 混凝土抗壓強度(純水泥、56 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

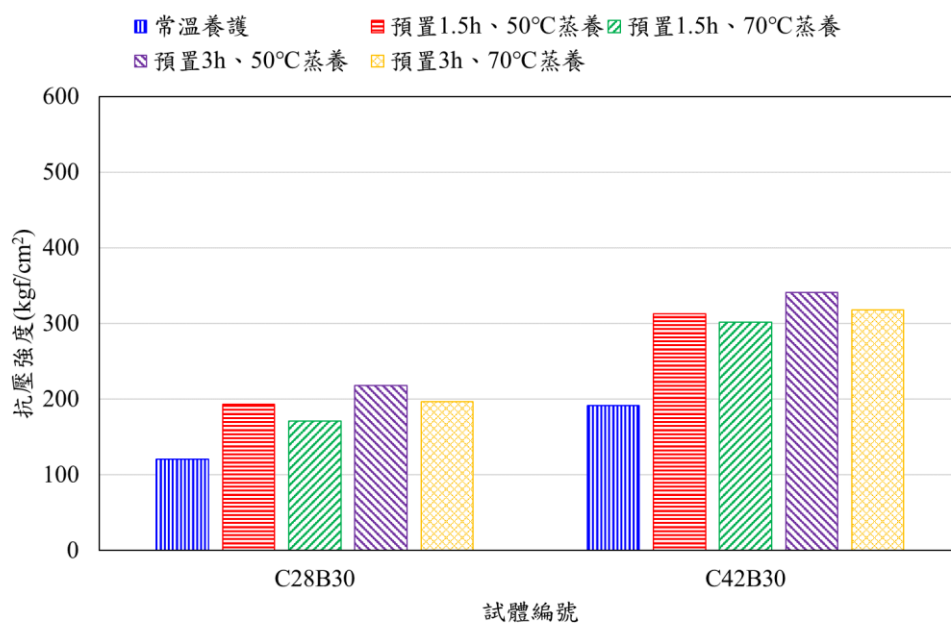


圖 4-6 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、3 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

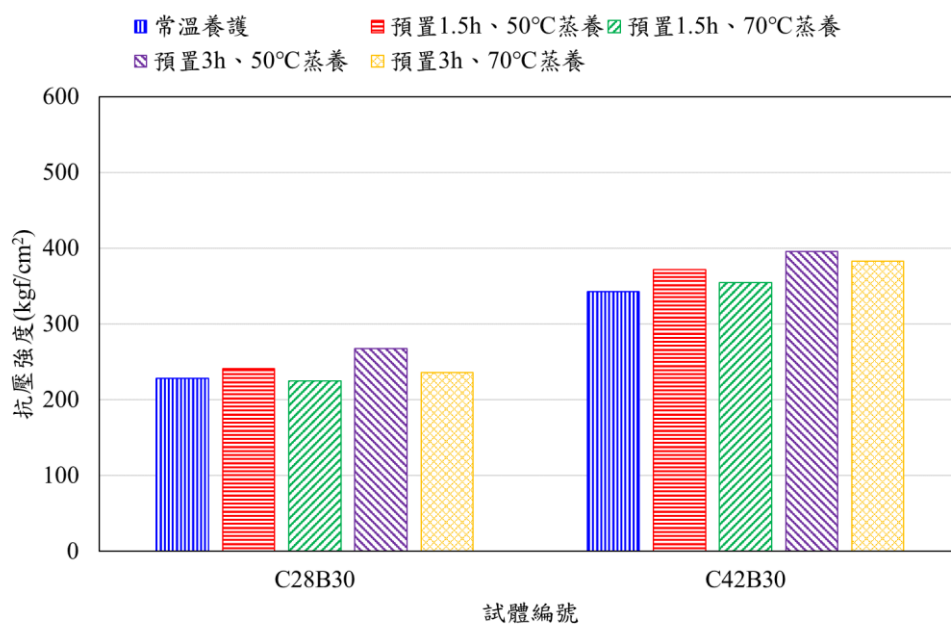


圖 4-7 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、7 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

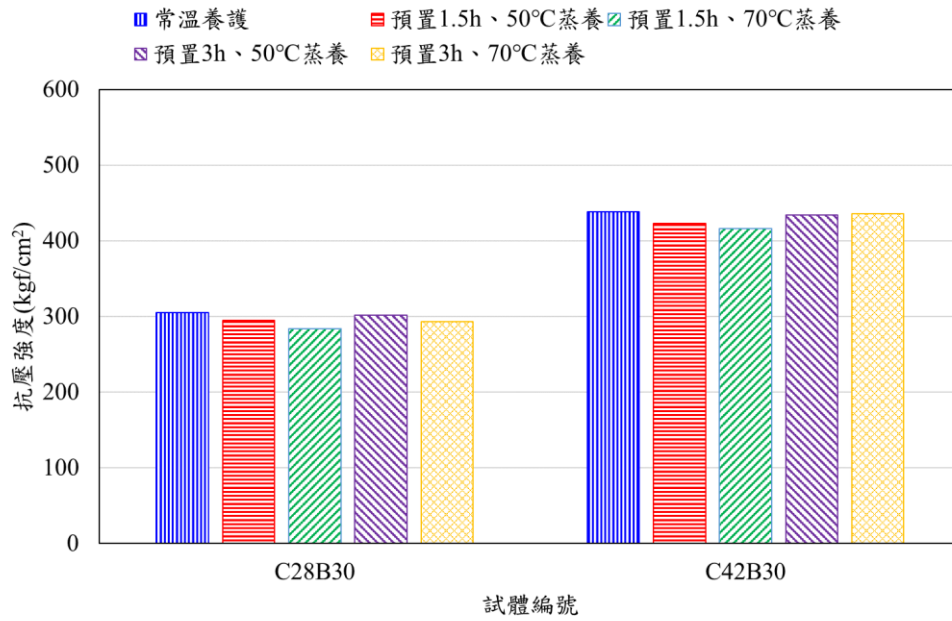


圖 4-8 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、28 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

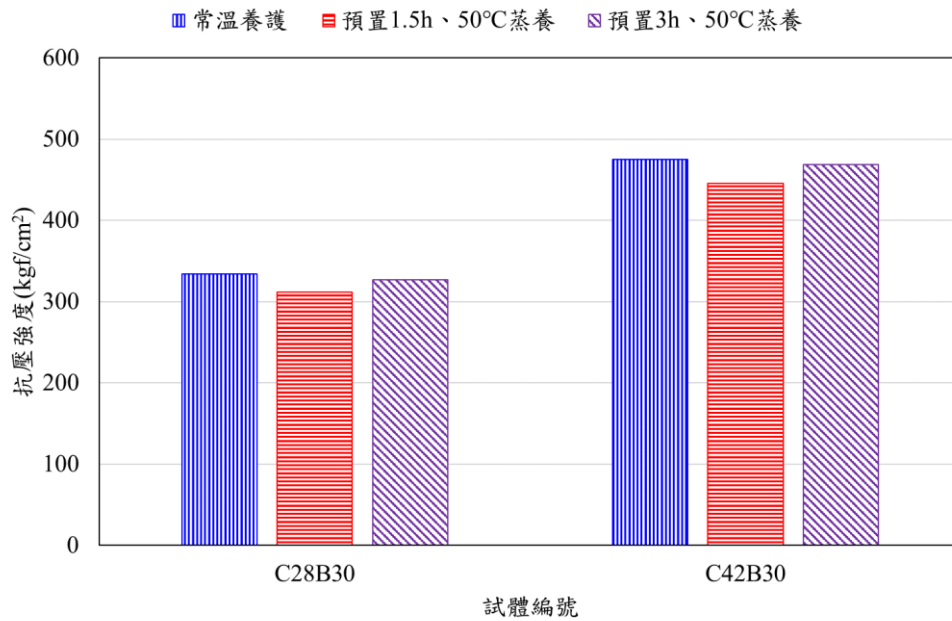


圖 4-9 混凝土抗壓強度(爐石取代量 30%、56 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

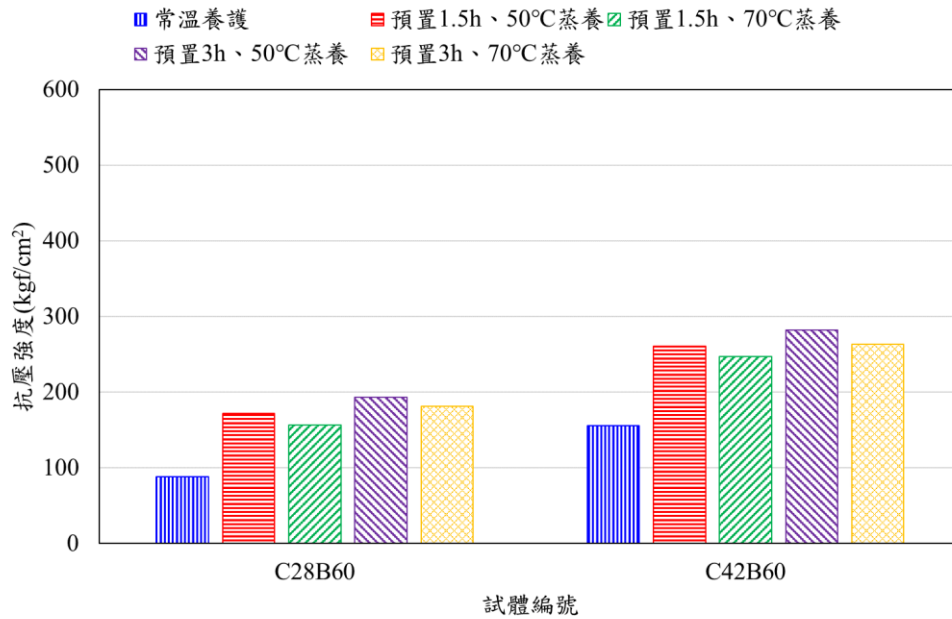


圖 4-10 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、3 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

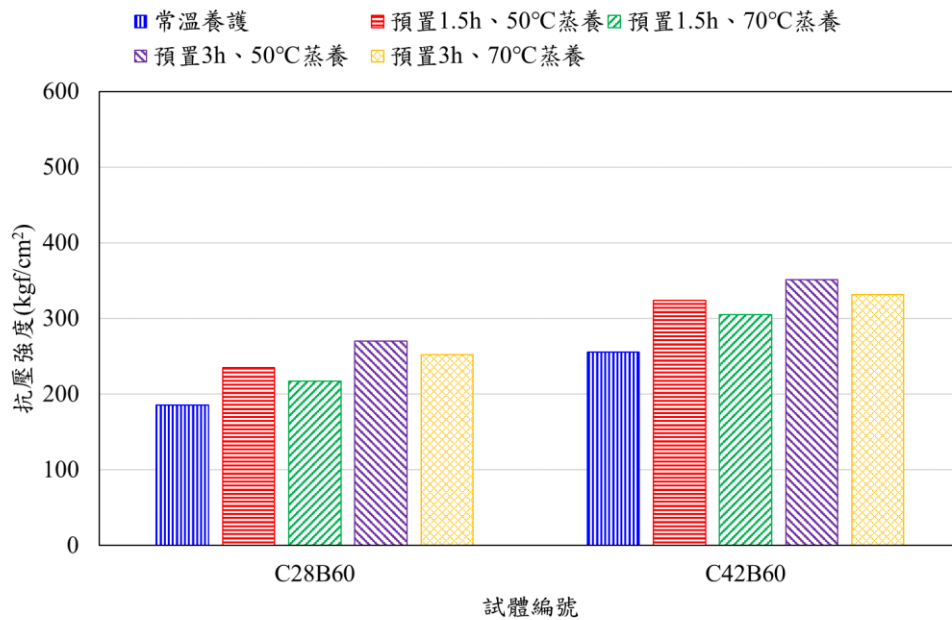


圖 4-11 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、7 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

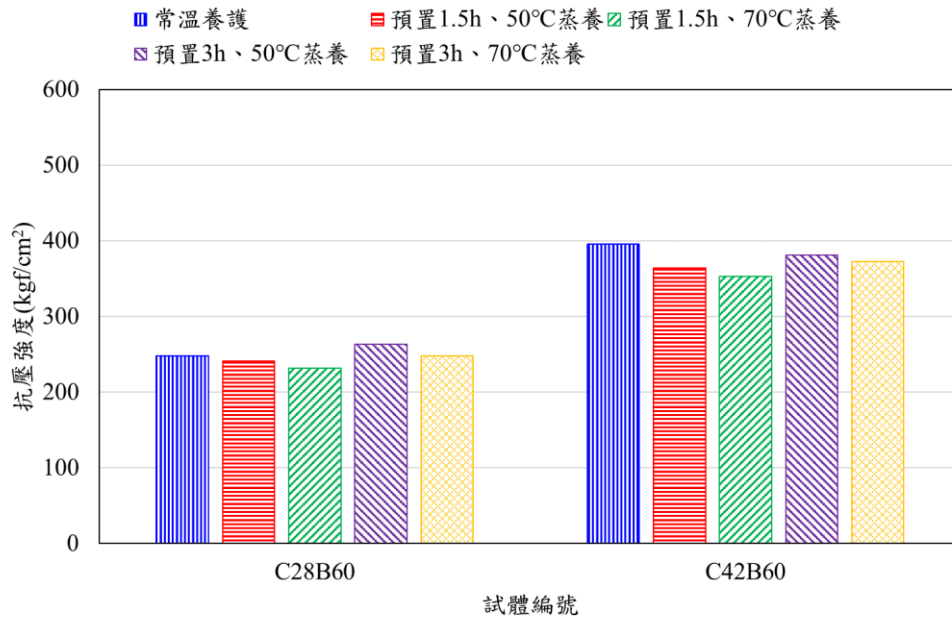


圖 4-12 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、28 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

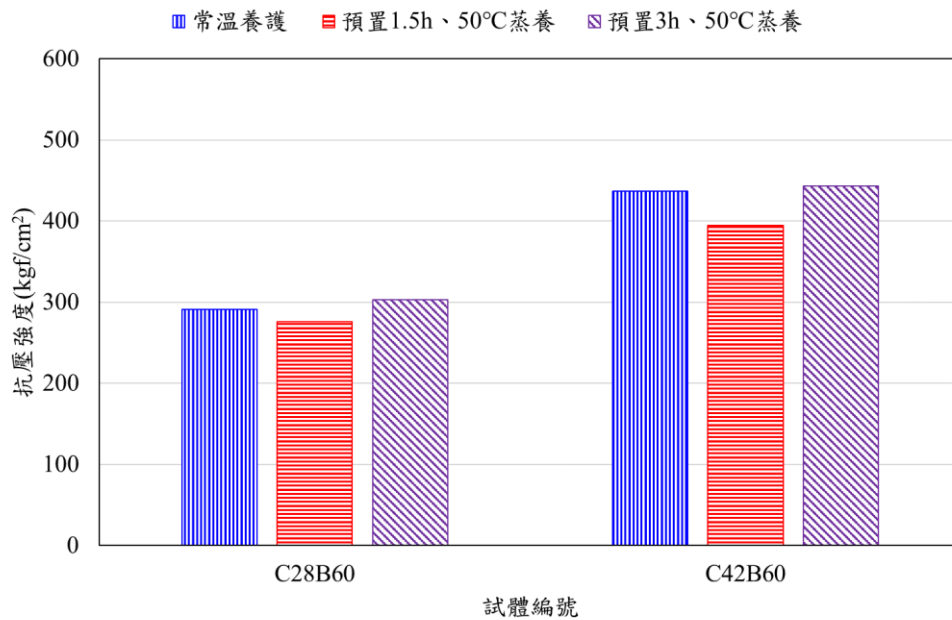


圖 4-13 混凝土抗壓強度(爐石取代量 60%、56 天齡期)  
(資料來源：本研究整理)

### 第三節 混凝土之滲透

混凝土之滲透途徑有經由骨材與砂漿間之界面過渡區、砂漿土體及穿越骨材等三種，其中以經由界面過渡區進行滲透為主要途徑，由於爐石粉具有改善黏結界面的效果，提高骨材與砂漿間界面過渡區的緻密性，減少滲透，可增加混凝土的耐久性。表 4-2 及圖 4-14 至圖 4-15 所示為常溫養護及預置 3h、50°C 蒸養混凝土之滲透試驗結果，從表 4-2 及圖 4-14 可看出，常溫養護之 28 天齡期混凝土 C42B00 的透水率為 1.97%、C42B30 為 1.69%、C42B60 為 2.15%，以爐石粉取代量 30% 之混凝土 C42B30 的透水率最小，爐石粉取代量 60% 混凝土 C42B60 的滲透率最大；56 天齡期時，混凝土 C42B30 的透水率仍是三者中最小的 1.22%，不過混凝土 C42B60 的透水率 1.31% 已低於純水泥混凝土的 1.38%。由於混凝土 C42B60 含有的爐石粉較多，在 28 天齡期時尚無法有效進行卜作嵐反應，因此抗透水能力比純水泥混凝土 C42B00 及含 30% 爐石粉混凝土差，到晚齡期的 56 天時，混凝土 C42B60 的卜作嵐反應已較為完整，混凝土的緻密性增加，因此透水率可低於純水泥者。

從表 4-2 及圖 4-15 可發現蒸氣養護混凝土之透水率於 28 天及 56 天齡期時均大於常溫養護者，表示蒸氣養護混凝土的抗滲透能力較常溫混凝土差。此外，蒸氣養護混凝土的滲透試驗結果與常溫養護混凝土相似，28 天齡期之混凝土 C42B30 的透水率最小、C42B60 的透水率最大；56 天齡期時之混凝土 C42B30 的透水率仍維持最小、C42B60 的透水率已可小於純水者，可知在 50°C 蒸氣養護 6 小時的狀況下，隨爐石粉取代量的增加，卜作嵐反應須於更晚的齡期才能有效進行，此現象與常溫養護相同。



表 4-2 混凝土滲透率

試體編號	養護條件	滲透率(%)	
		28 天	56 天
C42B00	常溫養護	1.97	1.38
C42B30		1.69	1.22
C42B60		2.15	1.31
C42B00	預置 3 小時 50°C 蒸養	1.84	1.47
C42B30		1.55	1.24
C42B60		1.96	1.42

(資料來源：本研究整理)

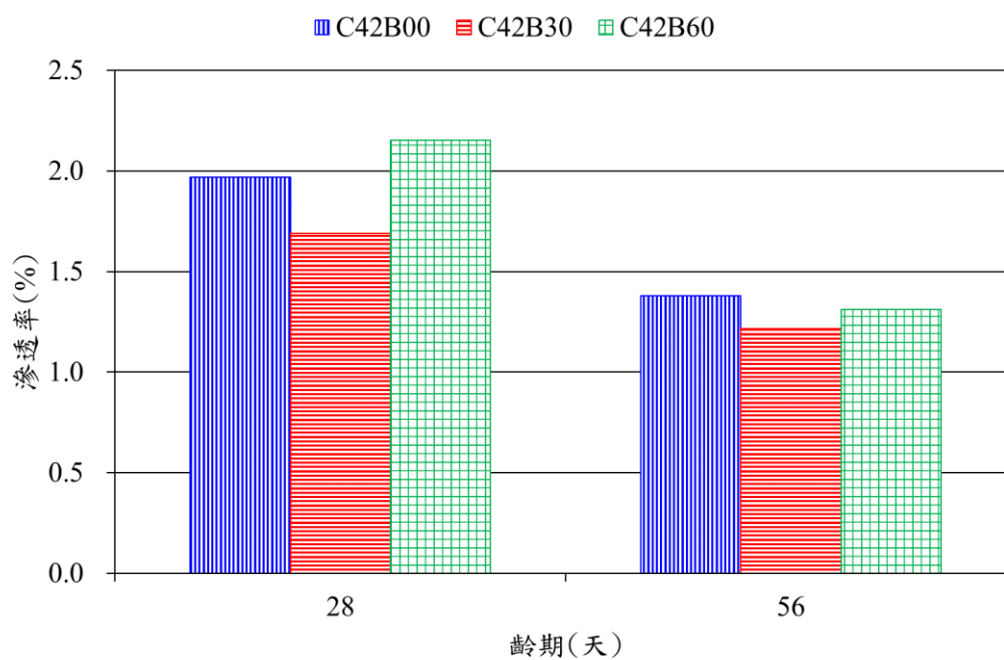


圖 4-14 常溫養護混凝土透水率

(資料來源：本研究整理)



養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

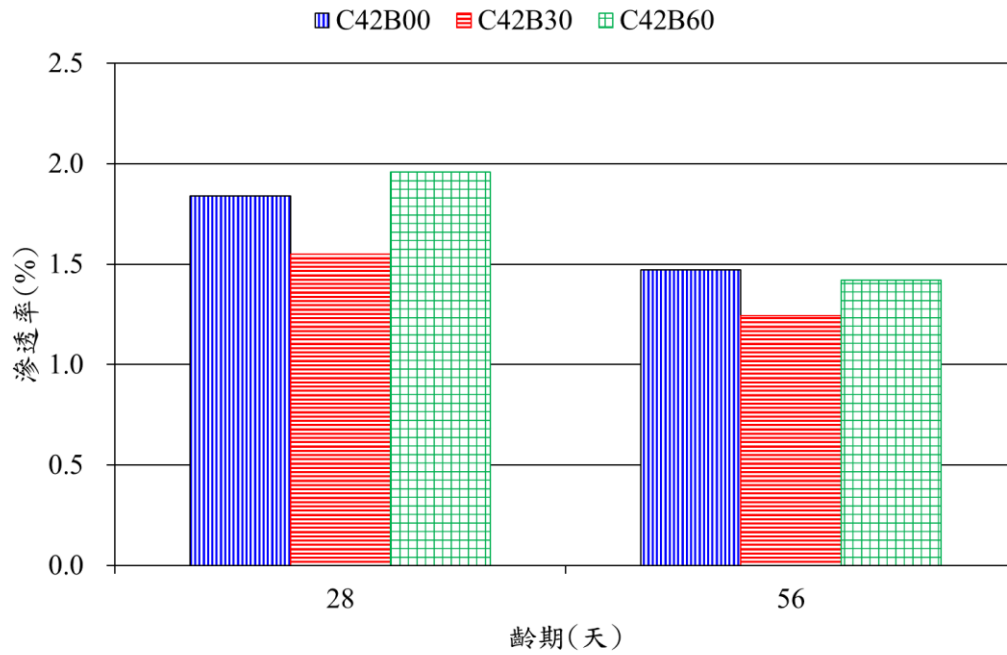


圖 4-15 蒸氣養護混凝土透水率(預置 3 小時、50°C)  
(資料來源：本研究整理)

#### 第四節 混凝土之長度變化

表 4-3 及圖 4-16 至和圖 4-17 所示為設計強度  $420\text{kgf}/\text{cm}^2$  之混凝土，養護條件為常溫養護及預置 3 小時、 $50^\circ\text{C}$  蒸氣養護 6 小時之長度變化率。從圖 4-16 可看出 21 天齡期時，常溫養護的三種混凝土 C42B00、C42B30、C42B60 之長度變化有明顯的落差，長度變化曲線彼此的距離較大，表示三種混凝土配比的長度收縮量大且彼此間收縮量有明顯不同；21 天至 56 天齡期間，三種混凝土之長度變化曲線彼此的距離較接近，表示三種混凝土配比的長度收縮量趨一致，就 56 天齡期而言，混凝土 C42B00 的長度變化率為 0.0610% 及、C42B30 為 0.0600%，兩者的長度變化率幾乎相同，混凝土 C42B60 的長度變化率為 0.0645%，稍大於 C42B00、C42B30。爐石粉取代量 60% 混凝土 C42B60 之長度收縮量到 56 天齡期時仍持續增加，應是其爐石粉含量較高，於晚齡期仍可進行卜作嵐反應，消耗混凝土中的氫氧化鈣，使得混凝土的收縮量持續增加，惟其長度變化率已很接近混凝土 C42B00 及 C42B30，之後可再增加的收縮量有限。

從圖 4-17 可看出， $50^\circ\text{C}$  蒸氣養護的三種混凝土 C42B00、C42B30、C42B60 之長度變化發展，其 1 天齡期的長度變化率 C42B00 為 0.0040%、C42B30 為 0.0050%、C42B60 為 0.0085%，均小於常溫養護之同配比 1 天齡期的長度變化率，由於蒸氣養護後之混凝土抗壓強度可有所提升，因此其 1 天齡期時具有較高的強度可抵抗混凝土的收縮，使得長度變化率相對較小；不過於 56 天齡期時，蒸養之混凝土之長度變化率 C42B00 為 0.0635%、C42B30 為 0.0705%、C42B60 為 0.0750%，均大於常溫養護之同配比 56 天齡期的長度變化率，此結果應是高溫蒸氣養護雖在短時間內提升混凝土的抗壓強度，然而其水泥水化產物排列凌亂、不緻密，孔隙量多，因此蒸養後水泥水化反應的收縮現象會壓縮此些孔隙，造成混凝土體積收縮明顯，其長度收縮量大於常溫養護的混凝土。

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

表 4-3 混凝土長度變化率

試體編號	養護條件	長度變化率(%)										
		1天	2天	3天	4天	5天	6天	7天	14天	21天	28天	56天
C42B00	常溫養護	0.0095	0.0135	0.0240	0.0285	0.0300	0.0310	0.0315	0.0320	0.0490	0.0515	0.0610
C42B30		0.0060	0.0090	0.0175	0.0220	0.0260	0.0250	0.0320	0.0365	0.0490	0.0540	0.0600
C42B60		0.0075	0.0205	0.0240	0.0280	0.0315	0.0285	0.0385	0.0415	0.0455	0.0505	0.0645
C42B00	預置 3h	0.0040	0.0070	0.0110	0.0180	0.0200	0.0250	0.0265	0.0300	0.0460	0.0515	0.0635
C42B30	50°C 蒸養	0.0050	0.0065	0.0095	0.0165	0.0210	0.0295	0.0360	0.0400	0.0475	0.0485	0.0705
C42B60		0.0065	0.0130	0.0180	0.0215	0.0265	0.0340	0.0430	0.0430	0.0495	0.0575	0.0750

(資料來源：本研究整理)

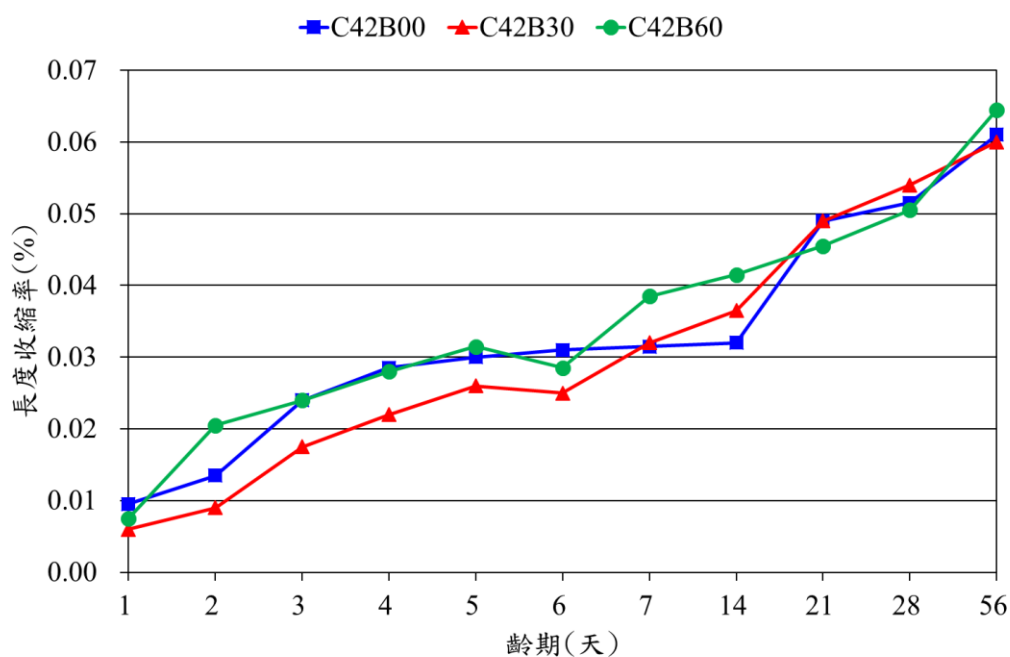


圖 4-16 常溫養護混凝土長度變化率

(資料來源：本研究整理)

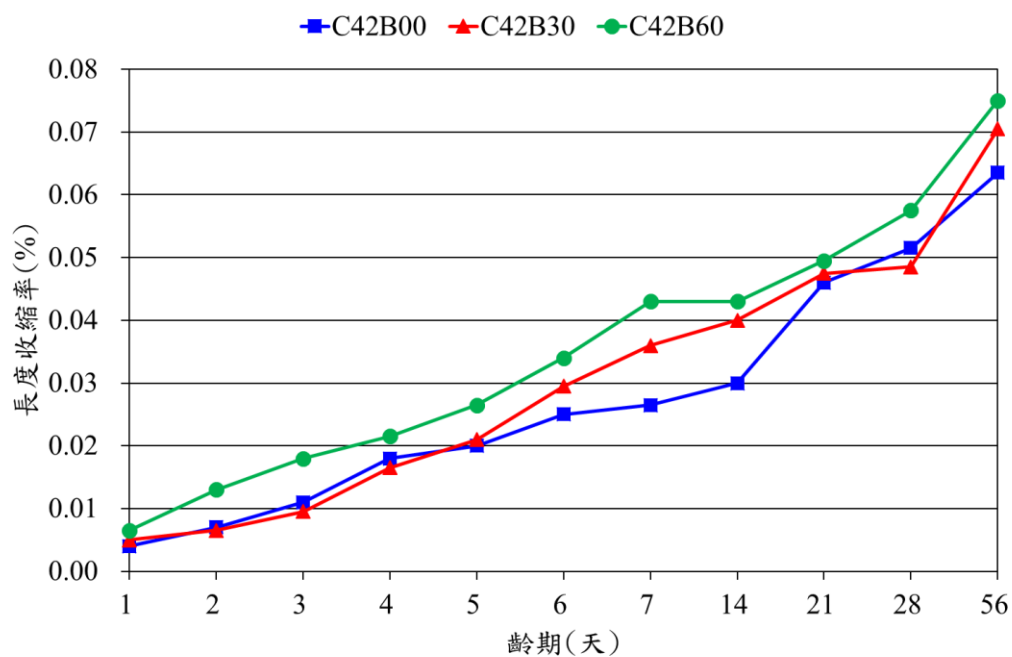


圖 4-17 蒸氣養護混凝土長度變化率(預置 3 小時、50°C)

(資料來源：本研究整理)

## 第五節 梁之撓曲行為

為瞭解蒸氣養護對預鑄鋼筋混凝土構件性能之影響，本研究從前述蒸氣養護混凝土抗壓強度試驗結果中，選出蒸養後強度發展相對較佳之含 30% 爐石粉混凝土配比 C42B30 製做實尺寸鋼筋混凝土梁試體，分別進行常溫養護及預置 3 小時、50°C 蒸養後於 28 天、56 天及 91 天齡期進行撓曲強度試驗，觀察其撓曲強度及破壞模式是否受蒸氣養護而與常溫養護者有所不同。本研究之梁試體係利用三分點載重方式進行試驗，探求其撓曲承載能力及變形行為。試驗儀器為 600 噸結構試驗系統 (MTS)，以位移變化來控制載重的大小，並於梁試體中央之頂底部裝設電子位移計 (LVDT)，藉以量測梁試體中央點之垂直變位。各項撓曲試驗結果則於下列各小節進行分析討論。

### 一、梁之破壞模式

從表 4-4 可看出 28 天齡期之常溫養護梁試體混凝土強度為 C42B30BR 的 397kgf/cm<sup>2</sup>、蒸氣養護為 C42B30BS 的 420kgf/cm<sup>2</sup>；56 天齡期時 C42B30BR 為 454kgf/cm<sup>2</sup>、C42B30BS 為 424kgf/cm<sup>2</sup>；91 天齡期時 C42B30BR 為 465kgf/cm<sup>2</sup>、C42B30BS 為 450kgf/cm<sup>2</sup>，其整體混凝土強度低於實驗室製作的混凝土強度，由於梁試體混凝土是採用預拌混凝土廠拌製，且梁試體澆置時間較長，使其強度發展與實驗室之混凝土有所不同，不過仍是呈現蒸氣養護混凝土於 56 天齡期的強度低於常溫養護者，此現象與實驗室的試驗結果一致。91 天齡期時，仍以常溫養護混凝土的強度高於蒸氣養護者，惟兩種養護方式之混凝土抗壓強度差距為 15kgf/cm<sup>2</sup>，兩種養護方式之混凝土強度逐漸接近，此現象應是爐石粉於晚齡期進行卜作嵐反應，使蒸氣養護混凝土的強度於 91 天齡期時可接近常溫養護的混凝土。

由上述混凝土抗壓強度試驗結果可知，梁試體進行撓曲強度試驗

時之混凝土強度為  $397\text{kgf/cm}^2 \sim 454\text{kgf/cm}^2$ ，低於一般天然骨材的強度 ( $>500\text{kgf/cm}^2$ )，從梁試體之撓曲強度試驗過程中的裂縫發展和破壞行為可看出，梁試體受載重作用後先於中央處產生垂直試體長軸方向之初始裂縫，此裂縫是由彎矩作用形成。隨載重的增加，該垂直裂縫由近中央位置向兩側擴增，之後裂縫開始向上延伸並擴大造成破壞，過程中遇到粗骨材時因裂縫無法貫穿骨材，因此裂縫會繞過骨材形成分岔裂縫繼續發展直至梁試體破壞，在常溫養護及蒸氣養護之梁試體均呈現此破壞模式，如圖 4-18 至圖 4-21 所示。

### 二、梁之撓曲行為

兩種養護方式梁試體之撓曲試驗結果如表 4-5 所示，其載重-位移曲線則如圖 4-22 及圖 4-24 所示。圖上顯示，曲線的特徵可區分成四個代表性區段，即混凝土初裂段、拉力筋降伏段、混凝土保護層壓碎段及最終的混凝土破壞段，如圖 4-23 之梁試體 C42B30BS 之曲線所示。其中，前兩段可看到曲線斜率的轉折，由陡轉緩(曲率由大轉小)，而後兩段的區分約略可從載重產生明顯的落差做判斷。從圖 4-22 及圖 4-24 上可發現降伏點，即為降伏載重，而極限載重則代表試體之最大載重，另從圖中也可看出兩種養護方式的梁在加載過程中的降伏現象，其降伏載重皆隨混凝土抗壓強度的增加而增大；同樣的，其極限載重也隨混凝土抗壓強度的增加而增大。另外，比較兩種養護方式梁試體的降伏或極限載重，可從表 4-5 上看出，兩者的承載力於 28 天齡期時不相上下，56 天齡期時常溫養護梁試體之降伏及極限載重大於蒸氣養護者，顯示蒸氣養護梁試體於 56 天齡期的撓曲強度低於常溫養護者，不過其差距不大。91 天齡期時，仍是常溫養護梁試體之降伏及極限載重大於蒸氣養護者，不過常溫養護及蒸氣養護之梁試體之載重-位移曲線更為接近，由於 91 天齡期時兩種養護方式的混凝土抗壓強度已逐漸接近，混凝土抗壓強度對梁試體之載重-位移關係的影響變的不

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

明顯，因此造成兩種養護方式梁試體之載重-位移曲線比 56 天齡期時接近。由此試驗結果可知，採用含 30% 爐石粉混凝土之梁試體，於晚齡期(91 天)時可降低蒸氣養護混凝土強度折減對梁試體撓曲強度的影響。

表 4-4 梁試體混凝土抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

配比編號	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天	28 天	56 天	91 天
C42B30BR	128	216	253	311	314	397	454	465
C42B30BS	126	224	269	269	313	420	424	450

\*BR 表示常溫養護梁試體混凝土、BS 表示 50°C 蒸氣養護梁試體混凝土。

(資料來源：本研究整理)

表 4-5 梁之撓曲試驗結果

試體 編號	齡期 (天)	初裂		降伏		極限	
		載重	撓度	載重	撓度	載重	撓度
		P <sub>ic</sub> (kN)	Δ <sub>ic</sub> (mm)	P <sub>y</sub> (kN)	Δ <sub>y</sub> (mm)	P <sub>u</sub> (kN)	Δ <sub>u</sub> (mm)
C42B30BR-1	28	43	1.32	244	12.09	300	53.99
C42B30BR-2		43	1.24	265	12.00	308	39.75
C42B30BS-1		43	1.34	269	12.51	309	58.61
C42B30BS-2		42	1.58	259	13.03	310	41.09
C42B30BR	56	45	1.28	288	12.77	337	34.44
C42B30BS		42	1.30	263	11.37	311	36.57
C42B30BR	91	45	1.72	268	14.24	314	34.96
C42B30BS		43	1.90	261	12.81	297	36.11

(資料來源：本研究整理)



圖 4-18 常溫養護梁試體破壞情形(28 天)  
(資料來源：本研究整理)



圖 4-19 蒸氣養護梁試體破壞情形(28 天)  
(資料來源：本研究整理)





圖 4-20 常溫養護梁試體破壞情形(56 天)  
(資料來源：本研究整理)



圖 4-21 蒸氣養護梁試體破壞情形(56 天)  
(資料來源：本研究整理)

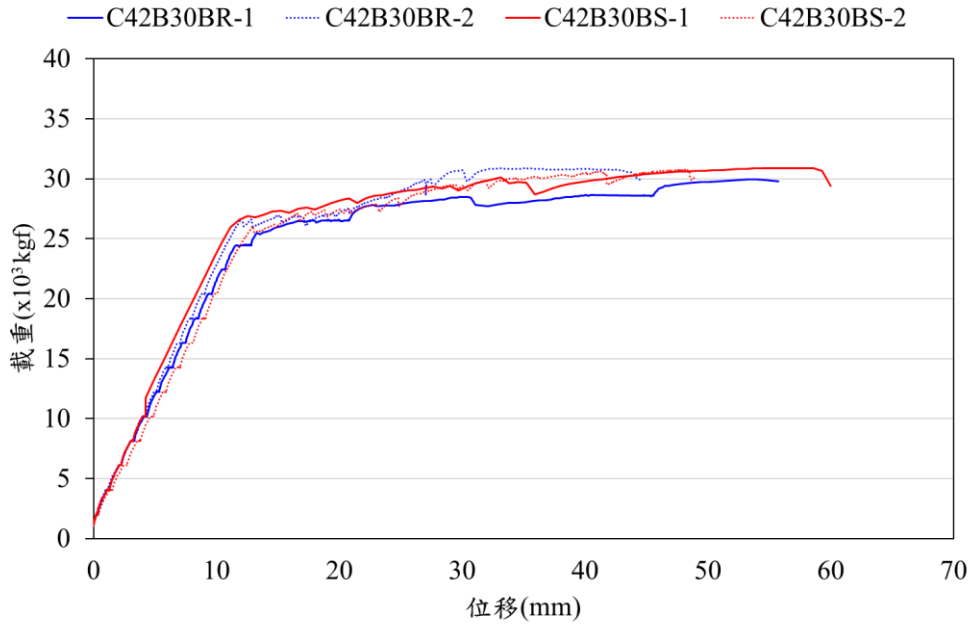


圖 4-22 梁試體之載重位移圖(28 天)  
(資料來源：本研究整理)

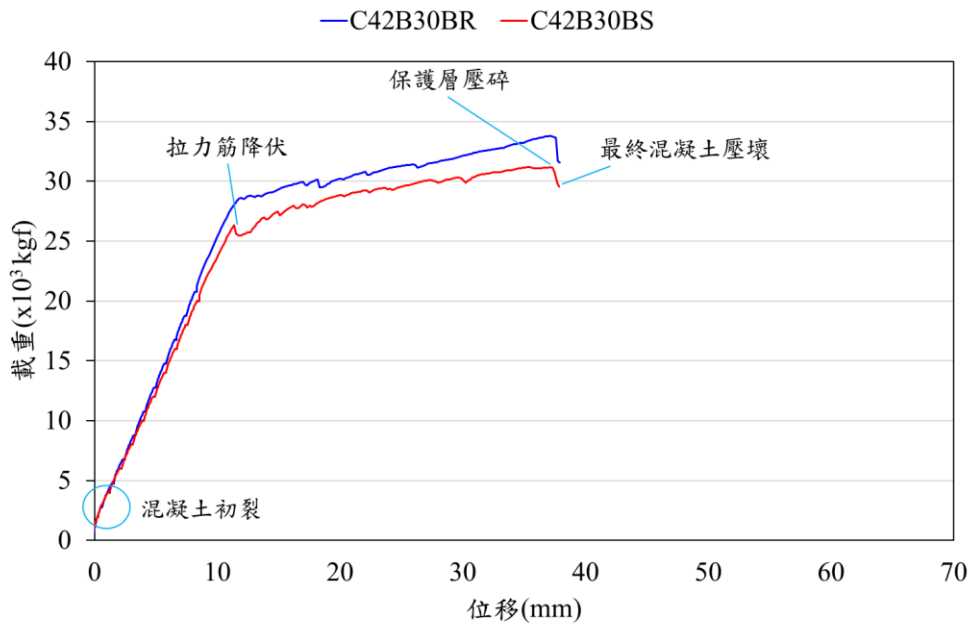


圖 4-23 梁試體之載重位移圖(56 天)  
(資料來源：本研究整理)

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

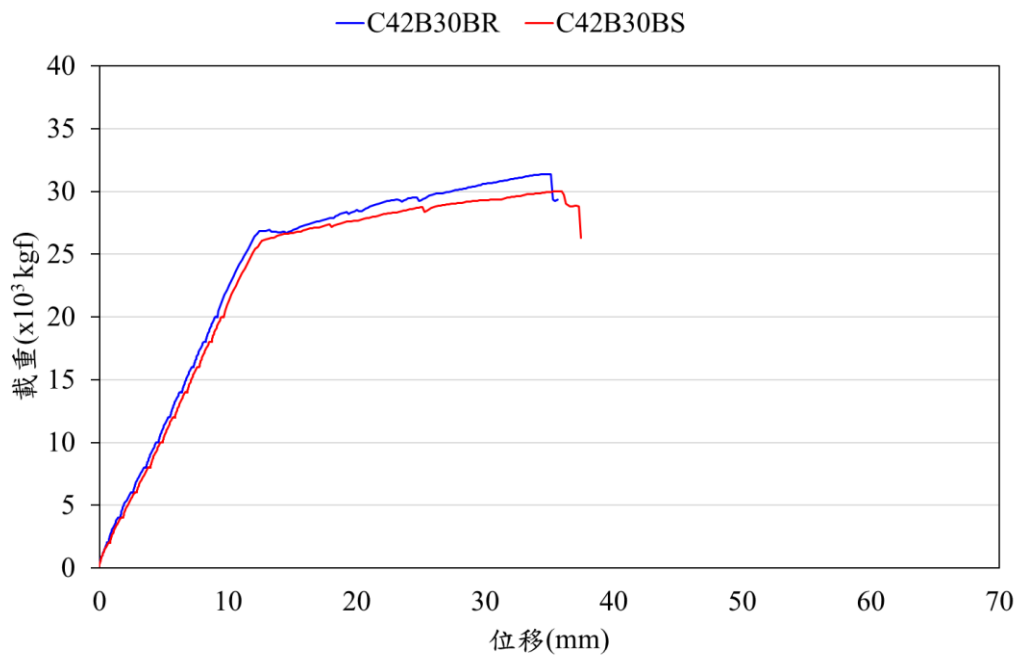


圖 4-24 梁試體之載重位移圖(91 天)  
(資料來源：本研究整理)

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結 論

本研究旨在探討蒸氣養護對含爐石粉預鑄混凝土性能的影響，規劃兩種混凝土 28 天設計抗壓強度(280kgf/cm<sup>2</sup>、420kgf/cm<sup>2</sup>)、三種爐石粉取代水泥量(0%、30%、60%)及 5 種養護方式(常溫養護及預置 1.5 小時、3 小時後 50°C、70°C 蒸氣養護 6 小時)等試驗變數進行抗壓強度試驗，之後從混凝土抗壓強度試驗結果中選出混凝土設計抗壓強度 420kgf/cm<sup>2</sup>，爐石取代 30%水泥量之混凝土製作梁試體，觀察常溫養護、預置 3 小時後 50°C 蒸氣養護梁試體的撓曲行為，並進行混凝土抗壓強度、滲透性及長度變化試驗，比較常溫養護與蒸氣養護對混凝土耐久性及體積穩定性的影響。研究結論概述如下：

1. 三種爐石取代量混凝土經蒸氣養護後之 3 天齡期抗壓強度均比常溫養護者高，其中預置 3 小時、50°C 蒸氣養護之混凝土抗壓強度提升幅度較大；預置 1.5 小時、70°C 蒸氣養護之混凝土抗壓強度提升幅度較小。
2. 混凝土經蒸養後之抗壓強度隨爐石取代量增加而降低、隨齡期增長而提升，28 天齡期前，常溫養護者之強度成展幅度大於蒸氣養護者，28 天至 56 天齡期，經蒸養後之含爐石粉混凝土強度仍有明顯成長。
3. 經常溫養護及預置 3 小時、50°C 蒸養之混凝土於 28 天齡期時，只有含 60% 爐石粉者未達設計強度，56 天齡期時三種爐石取代量混凝土的強度均可高於設計值。
4. 28 天齡期時，常溫養護及預置 3 小時、50°C 蒸養之混凝土，以爐石粉取代率 30% 者的透水率最小，取代率 60% 者的滲透率

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

最大；56 天齡期時，取代率 30% 者的透水率仍最小，取代率 60% 者的透水率低於純水泥者，顯示含 30% 爐石粉混凝土的耐久性表現較佳。

5. 常溫養護混凝土早齡期的長度收縮量較大，21 天齡期後收縮量逐漸減少，三種爐石取代量混凝土的長度變化率趨一致；蒸養混凝土早齡期的長度收縮量小於常溫養護者，不過於 56 天齡期時的長度收縮量大於常溫養護者，體積穩定性較差。
6. 28 天齡期時，常溫養護及預置 3 小時、50°C 蒸養梁試體的降伏或極限載重不相上下；56 天齡期時，常溫養護梁試體之降伏及極限載重大於蒸氣養護者，顯示蒸氣養護梁試體於 56 天齡期的撓曲強度低於常溫養護者，不過其差距不大。

## 第二節 建議

根據養護方式對混凝土的抗壓強度、體積穩定性和耐久性，以及梁試體撓曲強度等性質影響的研究結果，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

蒸氣養護時間對混凝土力學性質影響研究：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本研究以預置時間及蒸氣養護溫度為實驗變數進探討，蒸養時間則依成本及相關文獻建議固定為 6 小時，然而隨混凝土使用的卜作嵐材料種類及用量逐漸增加，有必要針對蒸養時效加以討論，找出可搭配不同卜作嵐材料添加量混凝土的蒸氣養護工法，將有助於提升預鑄混凝土技術及應用層面。

### 建議二

預鑄混凝土晚齡期工程性質研究：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本研究主要探討蒸氣養護對混凝土工程性質及梁試體撓曲強度的影響，56 天齡期的試驗結果顯示，兩種養護混凝土的工程性質及梁試體撓曲強度接近，蒸氣養護者略差於常溫養護者，其中含爐石粉混凝土經蒸養後隨齡期增加其工程性質有逐漸改善的趨勢，若可進行更晚齡期的研究，如半年或 1 年，以瞭解卜作嵐材料於晚齡期時對預鑄混凝土及其構件各項性質之影響，研究成果對預鑄混凝土設計及應用具有重要的參考價值。

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響



附錄一、期初審查會議紀錄

項次	評選委員意見	廠商回應
1	協同主持人、研究員及研究助理之現職及學經歷等有助評選的資料宜附於服務建議書。	將依建築研究所規定辦理。
2	勞務人員似為執行試驗工作的研究生(2碩士生),宜編有足量的人事費及保險。	將於計畫經費編列範圍內做合理的調配,並為參與研究工作之學生辦理保險。
3	協同主持人及研究人員的互助模式。	本研究團隊成員均為混凝土工學專長,並有執行大型結構試驗之經驗,在混凝土試驗、梁構件試驗等研究工作上均可勝任。
4	建議與國內兩大預鑄企業取得交流模式。	將於後續研究工作規劃辦理,以汲取業界現行相關技術及知識。
5	大型實體梁之試驗內容宜再詳細精緻規劃,並留意試體運送的可能問題。	將於期中報告補充說明。
6	建議留意前置養護與初凝行為的關係。	將納入後續試驗工作規劃辦理。
7	人事費用不要超過總經費之半(有無規定?)	將依建築研究所規定辦理。
8	部審主題為養護方式對預鑄混凝土主要建築構造型質影響之研究,研究團隊吳崇豪、林樹根、黃中和及郭義浩工作團隊學經歷完整,應具有執行本部審之能力。	無意見。
9	服務建議書能對研究目標、工作項目及文獻回顧等詳細說明值得肯定,但卻對研究內容、預期成果及創意回饋項目則著墨較少,請補充說明。	將於期中報告補充說明,並增加混凝土滲透等耐久性試驗工作為回饋項目。

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

10	<p>服務建議書提及本研究主題在探討養護方式對預鑄混凝土梁構件力學性質之影響，僅著重於梁構件為何未涉及柱構件與版構件，而且只將對力學性質來探討體積穩定性及耐久性。研究內容是否與研究主題養護方式對預鑄混凝土建築構件性質之影響不一致，請補充說明。</p>	<p>本研究旨在探討養護方式對預鑄混凝土及其梁構件之影響，考量研究期程及經費，其餘柱、版構件，擬參考本研究成果做後續研究之規劃。</p>
11	<p>本計畫係推動建築構件預鑄生產縮短工期，並提升工程品質、預鑄混凝土品質，朝向養護方式改善是策略之一，但應朝向建築構件改善較為可行之方案。</p>	<p>將納入後續研究工作之參考。</p>
12	<p>本計畫對國內混凝土品質提昇有所貢獻。</p>	<p>無意見。</p>
13	<p>研究進行中如何控制成果的品質？包括試驗採行品保策略為何？及實驗室本身認證條件等？</p>	<p>本研究試驗工作擬於大學之實驗室及業界之蒸氣養護室進行，其試驗設備均符合相關試驗項目之需求，試驗方式也將依規範相關規定進行。</p>
14	<p>本研究預期可對現行規範的修訂有所建議，請補充說明將可提供改進建議的部分為何？</p>	<p>本研究旨在探討養護方式對預鑄混凝土及其梁構件之影響，研究成果將與現行規範建議之養護方式進行比較，以研擬合宜之養護方式供規範研修時之參考。</p>
15	<p>國內外有關養護方式對預鑄混凝土構件工程性質影響成效之研究文獻很多，在規劃本研究計畫前，宜廣泛蒐集歸納，再針對國內預鑄構件養護方式效率仍待加強之處著手研究。</p>	<p>將再廣泛蒐集並彙整相關文獻研究成果，以作為後續試驗工作之參考，並於期中報告強化說明。</p>
16	<p>本研究計畫規劃製作7~9支鋼筋混凝土梁進行實驗，目前是否有規劃出混凝土配比、鋼筋配比、柱尺寸大小之初步規劃構想。</p>	<p>有關混凝土配比、養護條件及梁構件試體設計等詳細的規劃，將於期中報告補充說明。</p>

17	文獻較為老舊(均在 2015 年前)，可再考慮更新。	將於期中報告更新近年國內外相關研究文獻。
18	輔導中小企業廠商精進預鑄混凝土技術請列入工作重點。對相關廠商之產製規模、設備人力等資訊進行調查並彙整。	將納入後續研究工作規劃辦理。
19	應提出中小型預鑄公司、建廠設備以及養護作業 SOP。	將於後續研究工作規劃辦理。
20	高溫蒸氣養護之混凝土晚期強度較低，是推論還是試驗的結果、約低多少、對其構件之影響為何、如何改進等課題，應於後續書面報告中整理說明。	將於期中報告補充及強化說明。
21	著作專利技術如何進行，請妥為規劃，以便明年具體執行。	將參考後續研究成果進行規劃。
22	預期成果提及，將提供相關規範之修訂建議，故請問目前規範對預鑄混凝土有何規定對業界使用是不足或不適當，未來規劃將對何項部分提出規範層級之規定。	本研究旨在探討養護方式對預鑄混凝土及其梁構件之影響，研究成果將與現行規範建議之養護方式進行比較，以研擬合宜之養護方式供規範研修時之參考。
23	本次報告已對高溫蒸氣養護場地及試驗設備需求，提出回應對策，惟仍請敘明試體之設計細部及其製作規劃。	有關混凝土配比、養護條件及梁構件試體設計等詳細規劃，將於期中報告補充說明。

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

## 附錄二、期中審查會議紀錄

項次	評選委員意見	廠商回應
1	依據日本 JASS 8 內有提出之相關資料，混凝土強度以及水密性與水泥水化作用所產生的矽酸鈣水合物的數量，有相互依存的關係。本研究成果是否考慮這一方面的影響。	蒸氣養護對水泥水化反應的影響具有相當的學術研究價值，惟須進行相關水合產物的微觀結構試驗，由於此課題非本研究的工作項目之一，礙於研究期程所餘時間不多，本團隊擬將其納入後續研究規劃的參考，感謝委員的意見。
2	圖 1-1 所示研究流程中僅針對梁構材撓曲強度進行試驗，是否有軸力與剪力行為的試驗規劃。	本研究的試驗變數眾多且經費有限，規劃梁試體的數量及試驗項目時有所侷限，僅能就梁的撓曲強度進行試驗，感謝委員的意見。
3	第五章針對 5 種不同養護方法所得 3 天與 7 天齡期的混凝土抗壓強度進行比較，報告宜說明採用這 5 種不同養護方法以及比較 3 天與 7 天齡期的原因。一般混凝土結構設計是採用 28 天齡期的強度為基準，報告中為何缺乏此結果之比較？(無法與第一章研究緣起所述重點互相輝映)。	蒸氣養護條件的設定須同時考量混凝土的強度成長及製作成本(如養護時間長短和溫度高低等)，經彙整相關文獻的試驗條件以及業界專家提供的意見後，規劃出本研究的五種養護方式。另 28 天及 56 天齡期試驗結果將於期末報告補充說明。
4	本研究與莊昆斌，「蒸氣養護對不同爐石添加量自充填混凝土熱學性質及工程性質之研究」，略為相似。請補充說明主要差異性。	莊的研究採用預埋加熱棒於混凝土中進行加熱，與本研究的蒸氣養護方式不同。此外，本研究用混凝土的爐石粉取代量有用到 60%，與該篇文獻的 40% 有所不同。
5	梁試體之底層拉力筋為 2-D19 及 1-D21，是否須統一號數？另外，保護層依照規範應至少 4 cm。	感謝委員的指正，拉力筋的號數將統一改為 6 號筋(D19)，另保護層部分也會一併修正。

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

6	期末報告中，請補充 RC 梁實驗量測與紀錄方式。	感謝委員建議，將於期末報告補充說明。
7	(P.12)試驗規劃之試驗變數，是否應增列水膠比一項變數；且膠結材料的種類與數量也應列入變數中。	感謝委員建議，將於期末報告增修及說明。
8	本研究案卜作嵐材料爐石之水泥取代量分為 0%、30%、60%，養護條件為常溫、50 度、及 70 度，與莊昆斌之碩士論文的參數規劃類似，惟爐石取代量有所不同，請說明本研究案與該碩士論文之內容差異處及主要貢獻點。	莊的研究採用預埋加熱棒於混凝土中進行加熱，與本研究的蒸氣養護方式不同。此外，本研究除進行蒸氣養護對混凝土工程性質影響的研究外，也會探討蒸氣養護對實尺寸鋼筋混凝土梁撓曲強度的影響。
9	飛灰(TYPE F 型)在台灣也是常用的卜作嵐材料之一，為何本研究案未將其列入試驗參數中，作為探討養護條件下對混凝土行為，請補充說明。	考量研究期程及經費有限，研究上除混凝土配比試驗外，尚須進行實尺寸梁試體撓曲強度的試驗，因此未增列摻有飛灰的試驗組別，惟可納入後續研究規劃的參考。
10	請補充說明，專家學者座談會中的建議事項，有那些被本計畫列入修正意見，以及對本研究案的影響為何？	專家學者提供蒸氣養護對水泥組成成分的影響、水化產物的微觀結構觀測、蒸氣養護對混凝土耐久性的影響，以及蒸氣養護應以製作成本及產品品質兼顧為考量等課題供研究團隊參考。由於蒸氣養護混凝土的探討兼具實務應用與學理研究的價值，考量本研究經費及工作量，將先以實務應用為導向進行研究，相關學理研究課題將納入後續研究進行規劃。
11	預置時間 3-5 小時最好，升溫溫度也越小越好，一般在 20-30°C，不超過 33°C/小時為原則，蒸養 60-70°C，恆溫 6-8 小時後，降溫 2 小時，這些資訊非常有用。	感謝委員提供寶貴的蒸氣養護流程設定條件，將納入後續研究規劃參考。

12	<p>常溫養護下，40%爐石取代量能獲得最高的強度，在蒸氣養護下，以 20%爐石取代能獲得最高的強度；另外飛灰的取代量以 15-25%為原則，用太多會有很多問題。</p>	<p>感謝委員的建議，將納入後續研究試驗變數規劃參考。</p>
13	<p>民國 60-70 年代，混凝土蒸氣養護用最多的是預力基樁，當時預置時間較短，蒸氣養護時間及升降溫度等條件沒有仔細考慮，只求強度(800kgf/cm<sup>2</sup>)及快速生產。2017 年修正版 CNS 2602 A2037 「離心法先拉式預力混凝土基樁」可能有比較嚴謹的規定，研究團隊可納入參考。</p>	<p>感謝委員的建議，將彙整相關資訊後於期末報告補充說明。</p>
14	<p>總結：本研究案可望提升國內業界技術。</p>	<p>感謝委員的支持。</p>
15	<p>首先感謝主持人、研究團隊、各位專家學者對我們營造業的用心。相關議題研究，團隊都有深入了解市場轉變與未來需求，簡報內容明確，加上各位專案委員對內容有所提醒及注意建議相關事項，本人代表本會予以高度肯定與期待。綜合今天三個議題，本會有幾項小提醒，如希望研究資料，能多加注意材料使用、採購相關法規(範)、成本效益…等，在政策規範下，執行效應數據調查分析。再者相關執行應由公共工程先行規格化推行。同時超前擴大相關工班人員技術訓練儲備。</p>	<p>感謝簡常務理事的建議，將納入後續研究規劃參考。</p>
16	<p>現行預鑄混凝土的坍度均偏低，研究上採用的混凝土坍度較大，是否合宜？</p>	<p>業界產製預鑄混凝土時可採用機器有效振動夯實，因此混凝土的用水量可較為精準，不需要多</p>



養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

		加水來增加混凝土的流動性。本研究的混凝土試體均採人工方式製作，為方便混凝土的拌和及澆置，在用水量不變的條件下，使用強塑劑增加混凝土的流動性，不影響混凝土的強度成長。
17	可提供日本有關預鑄混凝土產製技術的資料供研究團隊參考。	感謝委員，團隊將彙整資料內容，於期末報告強化說明。
18	請蒐集國內外在預鑄混凝土蒸氣養護的優缺點，國內也有知名廠商取得相關數據，可進行比較分析，納入研究報告。	感謝組長的建議，將向業界的專家學者請益，蒐集相關資料後於期末報告加強說明。
19	過去也有一些工法，如新材料新工法核准過的電熱模板工法，可找出這些改良的工法，應有類似的經驗可參考。	遵示辦理，將彙整相關文獻後於期末報告補充說明。

附錄三、期末審查會議紀錄

項次	評選委員意見	廠商回應
1	研究包含卜作嵐材料(爐石粉)的添加量養護方式、養護時間、強度發展變化等參數的考量，有一定的完整性。	感謝委員的肯定。
2	台灣目前常用的飛灰(F 型)，可以作下一階段的研究。	感謝委員的建議，將納入後續研究進行探討。
3	如經費許多可以增加掃描式電子顯微鏡 SEM 對 C-S-H 膠體的成長觀察來說明混凝土強度，緻密性(水密性)構件受力後的變形等會更形完整。(微觀機理研究)	感謝委員的建議。蒸氣養護對混凝土微觀結構的影響值得探討，將納入後續研究進行探討。
4	預鑄混凝土建議修正預鑄混凝土構材(件)。	感謝委員的建議，將於成果報告統一修正。
5	請補充說明預鑄構件用混凝土與場鑄混凝土可能的差異。	預鑄混凝土需經蒸氣養護快速提升強度以便短時間內吊裝運送，場鑄混凝土則注重工作性以利現場泵送及施工。
6	請說明養護方式與預鑄混凝土構件製造成本的關連性。	預鑄混凝土構件主要採用鋼模製作且需蒸氣養護，造價比傳統場鑄混凝土高，不過可大量減少現場施工人員數目、縮短工期，品質也比場鑄混凝土佳。
7	簡報 P.23 材料強度在 28 天、56 天差異有限但 P.24 梁載重位移圖中，最大載重的抬昇較為顯著，請說明。	本研究擬於 91 天齡期的撓曲試驗後，綜合比較各齡期的試驗結果，以釐清梁構件最大載重提升是因混凝土強度提高所致，還是梁構件製作或試驗誤差所造成。 感謝委員的建議，該數據係以 3kgf/cm <sup>2</sup> 的水壓加壓 3 小時後所得的結果，在相同條件下具有一定的參考性。

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

8	<p>簡報 P.19、20 滲透試驗顯示，無論常溫或蒸養、透水率平均值(56天)約為 1.25%，是否可直接選用該數字為代表？</p> <p>簡報 P.21、22 長度變化顯示，無論常溫或蒸養，長度變化平均值(56天)約為 0.07% 似乎差異很有限。</p>	<p>混凝土的長度變化(體積變形)在 28 天齡期前的變化會比較大，之後會隨齡期增加而遞減，也就是隨混凝土強度成長趨於穩定，混凝土的體積變形量也會逐漸減小。</p>
9	<p>簡報 P.16-18 對比報告 P.51 似乎 C28B30、C42B30，f'c 有符合 28MPa、42MPa，其他配比則有不足現象，尤其爐石粉 60% f'c 均偏低，請問可能的原因？</p>	<p>試驗之控制組為純水泥混凝土，含 30% 爐石粉混凝土的強度發展可與控制組接近並符合設計需求，主要是該爐石粉取代量可有效進行卜作嵐反應消耗氫氧化鈣，提升混凝土強度。含 60% 爐石粉須經長時間的卜作嵐反應才能有效提升混凝土強度，因此強度在 56 天時仍低於設計值。</p>
10	<p>實務上都會同時使用飛灰含爐石粉，本研究只有爐石粉未來如何推廣？</p>	<p>現行混凝土的摻料使用以爐石粉為大宗，摻用量也多於飛灰，考量本研究資源有限，先以爐石粉為研究對象，待後續若有進行相關研究會再將飛灰納入討論。</p>
11	<p>所有 RC 預鑄單元都需要在工廠養護，常溫(省錢)與蒸養(早強)各有優點，應該依據工地需求取捨。</p>	<p>感謝委員的建議。</p>
12	<p>本研究對混凝土配比有詳細論述與實驗成果(24 頁)，建議將 RC 帷幕牆單元輕量化，對減輕建築物的總重有利。</p>	<p>感謝委員的建議，將納入後續研究規劃。</p>
13	<p>日本的預鑄單元分兩大類： (1) Precast Concrete 一般預鑄 (2) Prestressed Concrete 預力。建議收集優秀 PC 建築案例，鼓勵建築師提高創意(提供獎勵)與應用領域。</p>	<p>感謝委員的建議，將彙整相關文獻於成果報告補充說明。</p>

14	建議將 RC 預鑄單元的耐久性納入後續研究，50 年後或者百年後，RC 預鑄單元是否有為危及建築物的瑕疵。	感謝委員的建議，將納入後續研究規劃。
15	研究結果宜接軌預期成果。	感謝主席的提醒，將於成果報告補充說明未竟事項。
16	國外如美國波特蘭水泥協會 (PCA) 已有大量混凝土研究，請參考降低研究負擔。	感謝主席的建議，將彙整相關文獻於期末報告補充說明。
17	何以置入爐石？是否常態？請比對現有預鑄資料補充說明。	現行混凝土摻料以爐石粉為大宗，因此以爐石粉用量對蒸氣養護混凝土強度的影響進行探討，相關文獻與本研究結果的比對將於成果報告補充說明。
18	扶植中小規模意圖參與預鑄建築目前成效如何？請納入報告。	遵示辦理，將於成果報告補充說明。
19	成果提及混凝土耐久性，有關蒸氣養護與耐久年限的關聯性請補充論述。	混凝土滲透試驗結果顯示，經蒸氣養護的混凝土其滲透率較未蒸養者大，表示其內部孔隙多、耐久性差，添加適量爐石粉有助於降低蒸養混凝土的滲透率，提高耐久性。相關研究成果將在成果報告補充強化說明。

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

## 附錄四、第 1 次工作會議

本會議已於民國 110 年 6 月 10 日採用 Google Meet 視訊會議方式辦理完成，出席人員有建築研究所陳建忠組長、周楷峻研究助理，研究團隊吳崇豪助理教授及林樹根講師，共計 4 位。

### 工作會議簽到紀錄

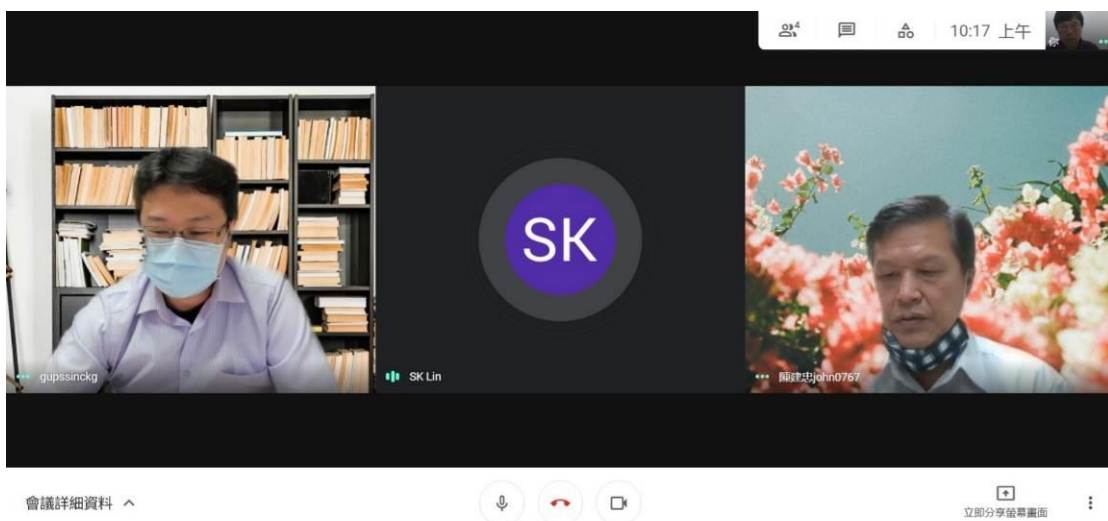
會議主題：養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究

會議次數：第 1 次工作會議

日期：110 年 6 月 10 日(星期四) 上午 10:00

地點：視訊會議

出席人員：陳建忠組長、周楷峻研究員、吳崇豪老師、林樹根老師



## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響



## 附錄五、第 2 次工作會議

本會議已於民國 110 年 9 月 17 日採用 Google Meet 視訊會議方式辦理完成，出席人員有建築研究所周楷峻研究助理，研究團隊吳崇豪助理教授及林樹根講師，共計 3 位。

### 工作會議簽到紀錄

會議主題：養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究

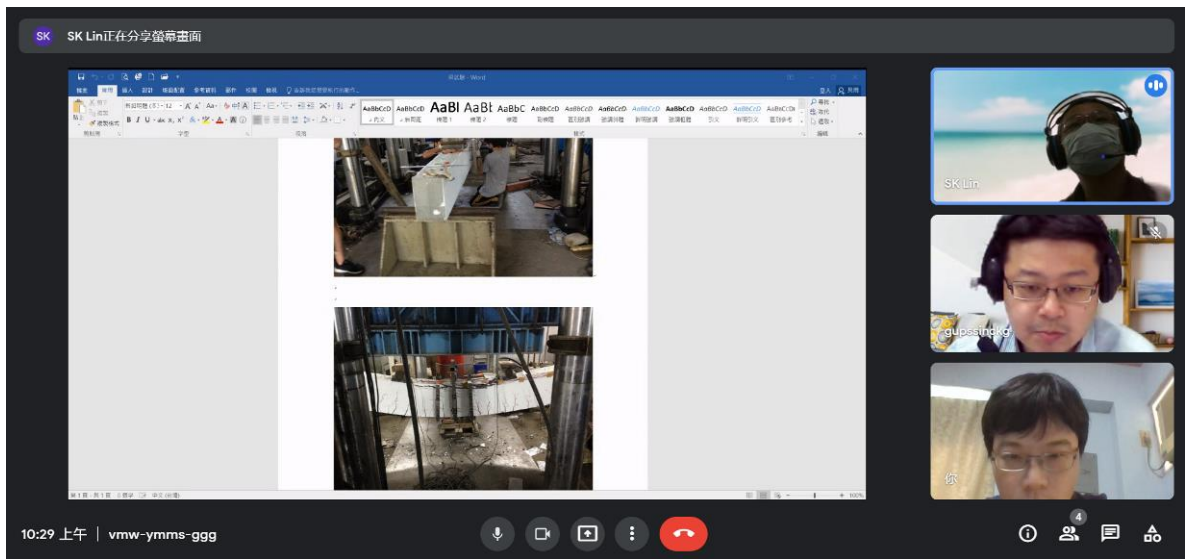
會議次數：第 2 次工作會議

日期：110 年 9 月 17 日(星期五) 上午 10：00

地點：視訊會議

出席人員：陳建忠組長(另有要公、不克出席)、周楷峻研究員、吳崇豪老師、林樹根老師

## 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響



## 附錄六、第 1 次專家學者座談會議紀錄

本會議於民國 110 年 7 月 9 日採用 Google Meet 視訊會議方式辦理完成，出席之專家學者有湯兆緯教授、紀人豪教授、郭鴻澤副總經理、劉制軍總經理，建築研究所團隊有陳建忠組長、周楷峻研究員，研究團隊則有吳崇豪助理教授、林樹根講師、黃中和副教授等，共計 9 位。出席專家之建議詳如下表所示。

審查委員	專家意見內容
湯兆緯	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建議彙整文獻資料，將混凝土種類、養護條件、混凝土性質（抗壓強度、抗拉強度、熱傳導係數、表面電阻、孔隙率等）整理出一對照表。</li> <li>2. 試驗變數眾多，試體數量龐大。建議爾後可採田口實驗設計法，以減少繁重的試驗負荷。</li> <li>3. 可加強深入探討各試驗變數對試驗結果之影響機制。</li> <li>4. 建議進行微觀試驗，以深入了解試驗變數對各組混凝土微觀結構之影響。</li> <li>5. 可以使用成熟度概念來描述在不同預設時間段、不同加熱速率以及在最高溫度和冷卻速率下保持的不同時間長度相關的總固化熱輸入（能量），以評估養護方式對混凝土構件性能之影響。</li> <li>6. 建議可探討養護溫度高於 60°C 對混凝土耐久性方面的影響。</li> </ol>
紀人豪	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究主題明確且符合業界需求。</li> <li>2. 目前研究成果(簡報 P.17~20)與相關文獻結果，建議可以對應討論。</li> <li>3. 簡報 P.18 預置時間與混凝土凝結時間的關係為何呢?建議宜有對應說明。</li> <li>4. 混凝土抗壓強度僅取齡期 3 天、7 天與 28 天等 3 種，對於其齡期強度為何並不討論呢?建議可適度說明。</li> <li>5. 建議未來在進行大型結構的梁構件試驗時，可以針對破壞模式方面予以討論。</li> </ol>

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

審查委員	專家意見內容
郭鴻澤	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 依試驗結果預置時間似乎也是影響強度的重要因素，預置 3 小時的 3、7 天強度都比 1.5 小時的高，似乎在水泥初凝後才開始逐步提高養護溫度對強度較有利。</li> <li>2. 水泥、爐石粉、飛灰三種材料的水合活性差異大，水泥水合活性最高，提高養護溫度在本次試驗兩種設計強度 3-7 天幾乎無成長，可能未水合的水泥顆粒外層有緻密水合物包覆，導致無法繼續水合產生膠結，且如其他文獻所述高溫養護水合物的均質分布受影響，且孔隙較多。</li> <li>3. 添加水合活性較低的輔助性膠結材似乎是一個正確的方向，可以避免所有膠結材料在早期過度快速水合。</li> <li>4. 70°C 的養護請注意是否會有延遲鈣礬石反應(DEF)，導致結構物耐久性的問題。</li> <li>5. 建議</li> <li>6. 水泥、爐石粉均須有水才能繼續水合，建議測試高溫養護後試體內部游離水的多寡，以思考後續養護是否在加濕常溫下進行。</li> <li>7. 從試驗結果觀察，60% 爐石粉 3 小時預置的試驗組，7 天已接近 280 設計強度，而設計強度 420 的也達 84%，就經濟效益與環保問題，添加爐石粉似乎是一個好的方向。</li> <li>8. 在節能減碳的潮流下，使用高細度早強水泥摻配 120 級高活性爐石粉並做適當之保溫是否可作為未來研究的方向。</li> </ol>
劉制軍	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 簡報中提到混凝土澆置後立即蒸氣養護，不利於混凝土強度的發展，另有文獻建議預置時間應為 2~5 小時，預置時間不足會增加混凝土的孔隙率。 <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 建議試驗時應留意預置時間對混凝土孔隙率、比重及密度等性質的影響。</li> <li>2) 本研究設定 1.5 小時及 3 小時的預置時間，不採用簡報中所述預置時間需 2 小時的原因為何？</li> </ol> </li> </ol>

審查委員	專家意見內容
	<p>2. 由初步試驗結果可知，蒸氣養護可迅速提高混凝土早期強度，建議後續研究可討論不同混凝土配比造成晚期強度發展的差異等課題，以利評估產製預鑄混凝土在品質、成本及節能上的平衡點。</p>

### 專家學者會議簽到紀錄

會議主題：養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究

會議次數：第 1 次專家學者會議

日期：110 年 7 月 9 日(星期五) 上午 10：00 ~ 12:00

地點：視訊會議

出席人員：湯兆緯教授、紀人豪教授、郭鴻澤副總經理、劉制軍總經理、周楷峻研究員，吳崇豪助理教授、林樹根講師、黃中和副教授

# 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響



## 附錄七、第 2 次專家學者座談會議紀錄

本會議於民國 110 年 11 月 26 日於國立中興大學混凝土科技中心 302 會議室辦理完成，出席之專家學者有干裕成教授、蔡奇峰董事、陳冠宏技正、陳君璽主任技師，研究團隊有吳崇豪助理教授、林 15 師、黃中和副教授等，共計 7 位。出席專家之建議詳如下表所示。

審查委員	專家意見內容
干裕成	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫可針對台灣近海結構常用之第 II 型水泥混凝土經蒸氣養護後的工程性質作進一步的探討。</li> <li>2. 後續研究可進行蒸氣養護對混凝土劈裂強度的影響，因預鑄混凝土製品在製作完成後短時間內即需吊裝、運送，此時的混凝土可能承受張力作用，雖然蒸氣養護混凝土的強度在早齡期可明顯提升，惟仍需針對混凝土的張力(劈裂)強度進行瞭解。</li> </ol>
蔡奇峰	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可考慮後續增加蒸氣養護對不同型式水泥強度發展影響之研究課題，並將混凝土力學行為與不同類型水泥經蒸養後的強度進行比較，找出適用不同類型水泥混凝土之蒸氣養護工法。</li> <li>2. 現行業界於港灣結構、海中結構多用 II 型水泥以增加混凝土的耐久性，而 II 型水泥在台灣不常見，需特別訂做，本研究後續可針對含飛灰、爐石粉等混凝土與 II 型水泥混凝土經蒸養後的性質進行比較，研擬採用添加卜做嵐材料方式取代 II 型水泥進行蒸氣養護的可行性。</li> </ol>
陳冠宏	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 目前營造業現場面臨缺工問題，導致許多營造工程進度受到很大的影響。中科園區已有部分高科技廠房採用預鑄混凝土構件施工方式，於預鑄廠內澆置混凝土並完成養護後，再運至施工現場進行組裝，可大幅降低現場施作人力、加快施工進度以縮短工期。本案研究養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能之影響，研究成果可作為預鑄混凝土養護方式的參考。</li> <li>2. 本案研究規劃包含混凝土設計強度、預置時間、養護方式、齡期等變數，並進行抗壓強度試驗、體積穩定性試驗、滲透</li> </ol>



養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

審查委員	專家意見內容
	<p>試驗及梁構件撓曲試驗，研究規劃完整且用心，研究團隊值得嘉許。</p> <p>3. 本案研究方法中的試體編號，與結果與討論中的試體編號不一致，建議統一。(減水劑或強塑劑?)</p> <p>4. 依據 ACI 517 對常壓蒸氣養護提出的要點，恆溫期溫度為 66°C~74°C，惟依據本案之研究成果，50°C 蒸氣養護方式的混凝土試體，其抗壓強度、透水率、長度變化率等的性能表現，均較 70°C 蒸氣養護方式為佳。此研究成果可提供內政部建築研究所作為訂定(修改)蒸氣養護規範之參考。</p> <p>5. 本案研究成果僅針對添加爐石粉後之各項性能表現，未來建議可研究添加爐石及飛灰後之各項性能。</p>
陳君璽	<p>1. 一般預鑄混凝土常搭配先拉式預力構件，建議後續能探討蒸養對劈裂強度的影響。</p> <p>2. 建議後續可研究 II 型水泥混凝土的蒸養影響，以利港灣構造或有需抗硫環境的應用。</p>





# 養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

## 專家學者座談會議簽到單

會議主題：養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究

會議次數：第 2 次

日期：110 年 11 月 26 日 星期五 下午 1:00

地點：國立中興大學混凝土科技大樓 3 樓 302 會議室

出席人員：

研究團隊出席人員		專家學者	
吳崇豪	吳崇豪	干裕成 教授	干裕成
林樹根	林樹根	蔡奇峰 技師	蔡奇峰
黃中和	黃中和	陳冠宏 技正	陳冠宏
郭義浩		陳君璽 技師	陳君璽

參考書目

1. S. Mindess, J. F. Young and D. Darwin, "Concrete," 2nd Edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
2. 塗耕業, 「水泥漿體添加卜作嵐材料之水化特性研究」, 國立中興大學土木工程系碩士論文, 2007。
3. D. P. Bentz, M. R. Geiker, K. K. Hansen, "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars," *Cement and Concrete Research*, 31(7): 1075-1085, 2001.
4. P. Chindaprasirt, 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.
5. Bissonnette B., P. Pierre, M. Pigeon, "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials," *Cement and Concrete Research*, pp. 1655-1662, 1999.
6. Chidiac S. E., *Civil Engineering Course CE732: Concrete Structures-Materials, Maintenance and Repair*, Department of Civil Engineering, McMaster University, Canada, 2009.
7. Newman and Seng Choo, "Advanced Concrete Technology," 1st Edition, Oxford, Elsevier Ltd., 2003.
8. 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.
9. Houst Y. F., "Carbonation Shrinkage of Hydrate Cements Paste," *CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Ottawa, Canada, July 1, 1997.
10. Qingxin Zhao, Xiaochen Liu, Jinyang Jiang, "Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete,"

- Construction and Building Materials 96 (2015) 326-333.
11. ACI Committee 517, "Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," Revised Version, American Concrete Institute, Detroit, MI, U.S.A., 1992.
  12. 吳國進, 「本土化中強度高性能混凝土(TAICON)低溫蒸氣養護效能研究。」, 國立交通大學, 碩士論文, 民國 87 年 6 月。
  13. Seeberger, J. Kropp, J. and Hilsdorf, H. K., "Festigkeitsverhalten und Strukturveraenderungen Von Beton bei Temperaturbeanspruchung bis 250°C," Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton, Nr360, 1985.
  14. Kosmatka, S. H. and Panarese, W. C., "Design and Control of Concrete Mixtures," 13th Edition, Portland Cement Association, Skokie, U.S.A., 1990.
  15. Pratik Deogekar, Ashwini Jain, Sudhanshu Mishra, Prakash Nanthagopalan, "Influence of Steam Curing Cycle on Compressive strength of Concrete," International Journal of construction materials and structures 1 (2), 18-28, 2013.
  16. 莫詒隆、鄭勝仁、正一, 「蒸氣養護最佳化分析」, 結構工程, 第 10 卷, 第 2 期, 第 3~8 頁, 民國 84 年 6 月。
  17. 魏坤雄, 「飛灰高強度混凝土高溫高壓蒸氣養護及其基本力學性質研究」, 國立交通大學, 碩士論文, 民國 79 年 6 月。
  18. 黃奇元, 「高溫高壓蒸氣養生混凝土強度衰退原因探討與改善對策」, 國立中興大學, 碩士論文, 民國 84 年 6 月。
  19. B. I-Jazairi and J.M. Illston, "The Hydration of Cement Paste Using the Semi-Isothermal Method of Derivative Thermogravimetry," Cement and Concrete Research Vol.10, pp. 361-366, 1980.
  20. 黃兆龍, 「混凝土性質與行為」, 詹氏書局, 台北, 民國 86 年。
  21. 莊昆斌, 「蒸氣養護對不同爐石添加量自充填混凝土熱學性質及工程性質之研究」, 國立臺灣科技大學碩士論文, 民國 92 年。
  22. 王佑文, 「蒸氣養護下早強無收縮混凝土之研究」, 國立中興大學

- 碩士論文，民國 108 年。
23. 徐尉凱，「應用蒸氣養護與微波加熱技術於新拌混凝土之可行性研究」，朝陽科技大學碩士論文，民國 90 年。
  24. 陳良博，「高溫高壓蒸氣養護 TAICON 對鋼筋握裹力影響之研究」，國立交通大學碩士論文，民國 88 年。
  25. 洪國祥，「本土化中強度高性能混凝土(TAICON)高溫蒸氣養護效能研究」，國立交通大學碩士論文，民國 87 年。
  26. 溫凱翎，「混凝土添加飛灰及爐石在高溫環境下之硬固性質及熱傳行為」，國立臺灣科技大學碩士論文，民國 94 年。
  27. 王奕琛，「高性能混凝土蒸氣養生材料行為探討」，國立台灣工業技術學院碩士論文，民國 85 年。
  28. M. Hulusi Ozkul, “Efficiency of accelerated curing in concrete,” *Cement and Concrete Research*, 31(9): 1351-1357, 2001.
  29. D. W. S. Ho, C. W. Chua, C. T. Tam, “Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures,” *Cement and Concrete Research*, 33(4): 595-601, 2003.
  30. Qingxin Zhao, Xiaochen Liu, Jinyang Jiang, “Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete,” *Construction and Building Materials*, 96(15): 326-333, 2015.
  31. T. K. Erdem, L. Turanli, T. Y. Erdogan, “Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete,” *Cement and Concrete Research*, 33(5): 741-745, 2003.
  32. ACI 517.2 R-87 (1992), “Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure- State of the Art” , ACI Manual of Concrete, Revised.
  33. Dodson V., *Concrete Admixtures*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
  34. Mironov S. A., “Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening,” *Rilem*

養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響

International Conference on the Problems of Accelerated Hardening of Concrete in Manufacturing Precast Reinforced Concrete Units, Moscow, 1964.

35. Erdem T. K., Turanli L., Erdogan T. Y., "Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete," Cement and Concrete Research, 33(5): 741-745, 2004.

**養護方式對預鑄混凝土主要建築構造性能影響之研究**

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：王安強、吳崇豪、林樹根、黃中和、郭義浩、  
周楷峻、李台光、黃國倫

出版年月：110年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-5456-40-5（平裝）