

水庫淤泥輕質骨材產製  
及輕質骨材混凝土應用與推廣  
分項計畫三：水庫淤泥輕質骨材混凝土應用研究

內政部建築研究所補助研究報告

「水庫淤泥輕質骨材產製  
及輕質骨材混凝土應用與推廣」  
分項計畫三：水庫淤泥輕質骨材混凝土應用研究

執行單位：中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會

研究主持人：顏聰、黃兆龍

協同主持人：彭耀南、方一匡、黃玉麟、陳宗鵠、  
陳豪吉、潘誠平、王和源、張明添、  
張朝順、林維明、李隆盛、湯兆緯、  
葉春爐

內政部建築研究所補助研究報告

中華民國九十二年十二月

# 分項計畫三 目 錄

第一章 輕質混凝土最佳配比設計研究.....	01
第一節 前言.....	01
第二節 淤泥輕質骨材混凝土配比.....	02
第三節 結構用淤泥輕質骨材混凝土製作.....	15
第四節 結構用淤泥輕質骨材混凝土新拌性質.....	19
第五節 結構用淤泥輕質骨材混凝土硬固性質.....	23
第六節 隔熱用淤泥輕質骨材混凝土製作及性質.....	30
第七節 結論.....	34
參考文獻.....	35
第二章 輕質骨材混凝土之輸送、灌製及夯實技術研究.....	37
第一節 前言.....	37
第二節 輕質混凝土品質保證.....	38
第三節 輕質混凝土配比的要件及試拌規劃.....	47
第四節 預拌混凝土廠自主評核表(本資料參考引用：內政部建築研究所八十一年六月預拌混凝土廠品質認證制度專題研究計畫).....	52
第五節 結論.....	69

<b>第三章 非結構用途輕質骨材混凝土產品之產製技術開發.....</b>	<b>71</b>
第一節 緒論.....	73
第二節 文獻回顧.....	75
第三節 試驗方法.....	85
第四節 試驗結果與討論.....	111
第五節 結論與建議.....	176
參考文獻.....	180
<b>第四章 建築用途輕質骨材混凝土預鑄產品(如版、樑、柱預鑄構件、     隔間牆等)之產製技術開發.....</b>	<b>183</b>
第一節 緒論.....	184
第二節 輕質骨材混凝土預鑄構件之實際量產化研究.....	187
第三節 輕質骨材混凝土預鑄樑構件之性質研究.....	207
第四節 輕質骨材混凝土預鑄版構件之性質研究.....	255
第五節 輕質骨材混凝土預鑄柱構件之性質研究.....	299
第六節 輕質骨材混凝土預鑄牆構件之性質研究.....	324
參考文獻.....	366



# 第一章 輕質骨材混凝土最佳配比設計研究

## 第一節 前言

台灣地處版塊活動頻繁之區，又地處亞熱帶，海島能資源貧乏，所以結構物耐震及能資源節約的雙重事情上必須加以審慎考量，輕質骨材混凝土的應用因此漸受重視，譬如台北國際金融中心的裙樓即使用密度  $1000\text{kg/m}^3$  的輕質骨材混凝土作為隔熱節能用途，而埔里鎮公所使用輕質骨材混凝土其目的亦類似。以往，輕質骨材製造原料大多以膨脹黏土、頁岩、及板岩為主[1]，但本研究採用以水庫淤泥經旋窯高溫燒結製造輕質骨材，此途徑預期可降低輕質骨材製造成本，解決以往因進口輕質骨材昂貴，無法實際使用於建築物及公共工程的問題。當然亦由於台灣地區四面環海，終年潮濕，冬季東北季風強力吹襲，挾帶大量含鹽分之海霧，所經之處，鋼筋為之生鏽，完全落在混凝土施工規範土木 402-88 所謂之「有鹽霧侵蝕環境」。加上台灣且長年多雨，工廠林立，垃圾焚化爐處處可見，此等組合導致雨水含酸，深具侵蝕性；都市過度集中下，汽車排放高量的  $\text{CO}_2$  及二氧化硫之氣體等，更對結構物造成甚嚴重的侵蝕。所以輕質骨材混凝土配比考量上，應同時兼顧耐久性、強度、及工作性。配比設計研究內容包如下：

- (1)配製結構用輕質骨材混凝土配比，採用 ACI 配比及緻密配比兩種方法，調配 31 組結構輕質骨材混凝土配比。
- (2)進行非結構用途淤泥輕質骨材混凝土配比，以隔熱用途為主要目的，設定配比目標為密度  $1000\sim 1400\text{ kg/m}^3$ ，隔熱之熱傳導係數介於  $0.2\sim 0.5\text{ w/m}^\circ\text{K}$  之間，共調配 10 種非結構用隔熱用輕質骨材混凝土配比。
- (3)拌製高性能輕質骨材混凝土，設定工作性達到高流動性設計要求（坍度為  $230\pm 20\text{ mm}$ 、坍流度為  $500\pm 100\text{ mm}$ ），亦即達到自填充混凝土(SCC)範圍。
- (4)比較分析所有配比性質，提出較佳的混凝土配比方法及計算流

程，以作為混凝土產業者生產輕質骨材混凝土的參考。

## 第二節 淤泥輕質骨材混凝土配比

本研究淤泥輕質骨材混凝土配比設計採用 ACI 211.2 配比設計法及緻密配比設計法等兩種方法，配比架構如圖 1-2.1 及圖 1-2.2。其中 ACI 211.2 配比設計法係以半經驗法則，查圖表方式，依循 ACI 211.2 輕質骨材混凝土配比設計的流程，由材料性質及配合結構物性能需求，分別考量輕質骨材混凝土的工作性、強度及耐久性，以決定輕質骨材混凝土各材料用量。緻密緻密配比設計理論以骨材（輕質粗骨材、常重砂、飛灰）為最主要架構，顆粒堆積在物理上可獲得最小孔隙，如此可以減少水泥漿量，減少水泥及水量，預期減低乾縮、膨脹問題，而具有優良的耐久性能，若再加上使用減水摻料（強塑劑）及卜作嵐材料（飛灰、爐石），在工作性可達到高流動性設計需求（坍度為  $230 \pm 20$  mm、坍流度為  $500 \pm 100$  mm），以期能同時兼顧耐久性、強度、及工作性的性能。

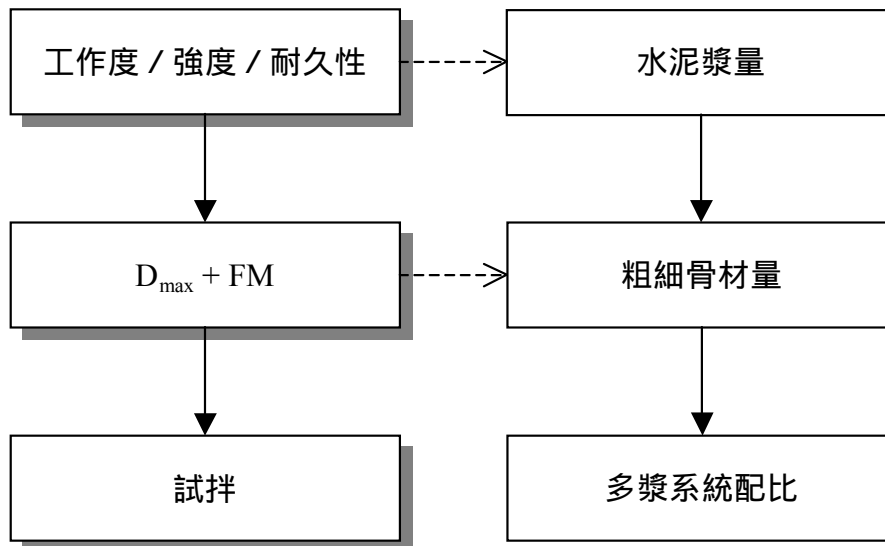


圖 1-2.1 ACI 混凝土配比設計架構

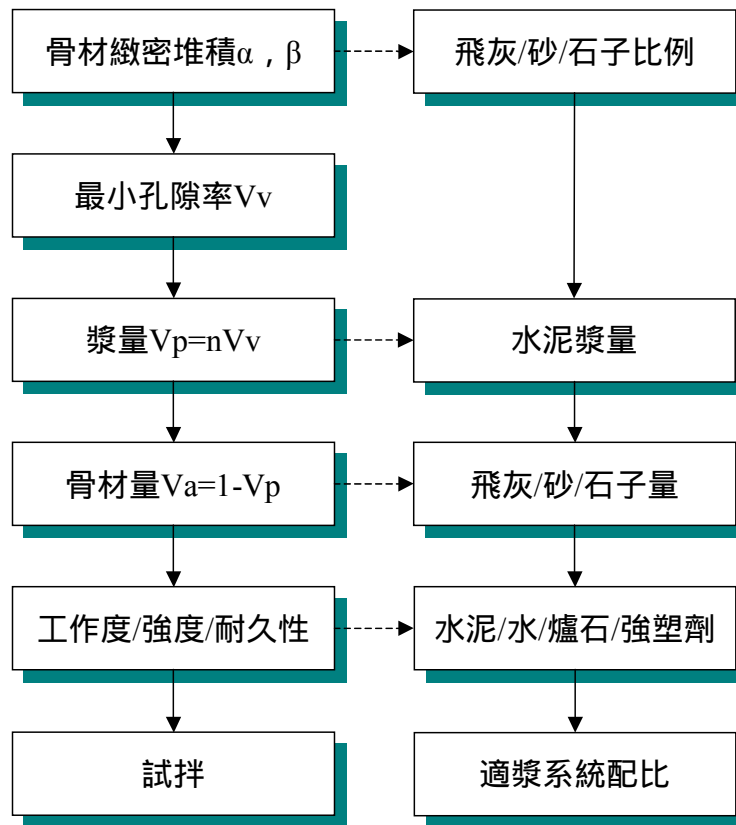


圖 1-2.2 緻密混凝土配比設計架構

## 2.1 ACI 211.2 配比設計法

### 1. ACI 重量法

此法之設計步驟如下：

#### (1) 選擇坍度

坍度與構造物的種類有關，其建議值如下表 1-2.1 所示：

表 1-2.1 構造物種類及建議坍度值

構造物的種類	坍度值(mm)	
	最大值	最小值
R C 樑 或 牆	100	25
建築物的柱子	100	25
樓 板	75	25



## (2) 選擇輕質骨材最大粒徑

選擇粗骨材粒徑較大者，其骨材總表面積較小可用較少填充漿量，因此有較佳經濟性，最大值受施工模板、鋼筋間距及樓板厚度限制。若有高強度之需求時，在相同水灰比(水膠比)下，減少粗骨材最大粒徑，會有較佳之強度。ACI 211.2 通常使用 19mm(3/4")、12.5mm(1/2")與 9.5mm(3/8")三種標稱最大粒徑。

## (3) 估計拌合水量及空氣含量

拌合水量係由粗骨材最大粒徑及坍度值決定，空氣含量係由粗骨材最大粒徑來決定，如下表 1-2.2 所示：

表 1-2.2 單位用水量與含氣建議表

項目			標稱最大粒徑(mm)		
			9.5	12.5	19
非 輸 氣 混 凝 土	坍度 (mm)	25~50	208	199	187
		75~100	228	217	202
		100~150	237	223	208
	含氣量 (%)		3	2.5	2
輸 氣 混 凝 土	坍度 (mm)	25~50	181	175	166
		75~100	202	193	181
		100~150	211	199	187
	輸氣量 (%)	輕度暴露	4.5	4.0	4.0
		中度暴露	6.0	5.5	5.0
		惡劣暴露	7.5	7.0	6.0

## (4) 決定水灰比 (水膠比)

水灰比 (水膠比) 係由強度與耐久性決定。在強度方面

如下表 1-2.3 為輕質骨材混凝土水膠比與 28 天抗壓強度。在耐久性方面係由各種曝露條件之下，限制輕質骨材混凝土最大水灰比(水膠比)值如下表 1-2.4 所示。

表 1-2.3 混凝土抗壓強度與水灰比(水膠比)關係

28 天抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	近似水灰比(水膠比)	
	非輸氣混凝土	輸氣混凝土
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

註:本表適用條件為含氣量小(等)於 6%，標稱最大粒徑 19~25mm，使用 Type I 卜特蘭水泥。

表 1-2.4 各種曝露條件混凝土允許最大水灰比(水膠比)

結構物類型	結構物經常潮濕或 曝露凍融交替環境	結構物曝露在海水或 硫酸鹽環境
薄斷面和保護層小 於 2.5 公分之結構物	0.45	0.40
其他結構物	0.50	0.45

註：1.薄斷面結構物包括欄杆、緣石、窗台、壁架裝飾物等。  
2.使用 Type II 或 Type V 水泥，表列水灰比或水膠比可增加 0.05。

(5)計算水泥用量：由單位用水量與水灰比(水膠比)計算。

(6)計算粗粒料用量：由最大骨材粒徑與細粒料之細度模數來決定。如下表 1-2.5 所示。

表 1-2.5 單位體積混凝土中，乾燥搗實粗粒料佔體積

$b/b_o$ $D_{max}(mm)$	FM				
		2.40	2.60	2.80	3.00
9.5		0.58	0.56	0.54	0.52
12.5		0.67	0.65	0.63	0.61
19		0.74	0.72	0.70	0.68

(7)計算細粒料用量：利用粗粒料之比重係數以及含氣量來初估混凝土密度，詳表 1-2.6 所示，並求算細粒料用量。

表 1-2.6 常重砂—輕質骨材混凝土新拌密度初估表

粗粒料之 比重係數	初估密度(kg/m <sup>3</sup> )			
	含氣量			
	2% (※)	4%	6%	8%
1.00	1640	1600	1560	1520
1.20	1720	1680	1640	1610
1.40	1810	1770	1730	1690
1.60	1890	1850	1810	1770
1.80	1970	1930	1900	1860
2.00	2060	2020	1980	1940

## 2.2 緻密配比設計法

緻密混凝土配比設計法，此種方法適用於一般高性能混凝土(HPC)、自密性混凝土(SCC)、高流動化混凝土(HFC)及優生高性能混凝土(EC)之配比設計，並且可簡化各種密度(輕質、常重及重質)混凝土之設計流程。

### 1. 基本理論

#### (1) 配比的考量

傳統 ACI 配比方法係以「工作性、強度、耐久性及經濟性」之順序來考量混凝土的配比，所調配出之混凝土在大工作度範圍內，會採用比較多的「拌和水量」，相對的提高「水泥量」。而依據 ACI 363「高強度混凝土」的觀念，或 ACI 211.4R「高強度飛灰混凝土配比設計」的準則而言，高工作性通常伴隨著「高拌和水量」及「高水泥用量」的結果，此種配比依據「潛變乾縮模型」來看，將面臨潛在大量變形的危機。尤其在水灰比小於 0.42 時，更會產生因水泥化學反應收縮之較大量「自體收縮變形」，故考慮採用「低漿配比」及「水泥有充分水化的水」是有其必要性。透過「最緻密堆積、最低漿量( $V_p$ )、及最大密度」的配比觀念，達成 HPC、SCC、HFC、EC 品質要求。換言之，欲減少水泥漿量應考慮骨材之「較佳級配」或最「緻密之堆積方式」。

另外，必須減少骨材比表面積( $S$ )，也就是增大最大骨材粒徑( $D_{max}$ )，但如此將會犧牲骨材與水泥漿界面鍵結力，依據 ACI 363「高強度混凝土」規範所述，為了提高混凝土的強度效率，有必要採用  $D_{max}$  較小的粗骨材，選定適當骨材用量及粒徑以平衡工作度與混凝土強度。一般考慮方式，增大細骨材粒徑為最有效的方式，依經驗採用粗砂( $FM=2.8\sim 3.1$ )可得甚佳的效益，因為砂的顆粒數較粗骨材之顆粒數多，控制砂較為方便。減少潤滑漿厚度( $t$ )亦是可行的，惟此時要利用「界面潤滑」的方式，使漿量雖少仍有足夠的潤滑，如此方可使骨材顆粒間能輕易相互滑移，而填塞入最佳位置（即最低能階處），並獲得設計所需之工作性。這些填塞物質以圓形的飛灰或矽灰最為有益，因為有「軸承」或「滑輪」的功能，讓骨材容易相對滑移。

## 2. 顆粒材料之最佳堆積

骨材約佔混凝土的體積 60~75%，所以直接控制骨材級配將可有效獲得最小空隙( $V_v$ )值。以混凝土中固態材料之最大混合密度，尋找「最小空隙」獲得「最佳級配」以調製混凝土，可得到較高強度及較佳之工作性。因顆粒堆積方式對巨觀力學行為有很大的影響，此

觀念如同原子組構或土壤顆粒材料般，顆粒組構堆積越緻密，空隙越小，接觸點愈多則密度愈大，理論上應可得較高之勁度或強度。此外，以相同漿體及水膠比(W/B)而言，骨材最密堆積下之總漿量會減少，相對的總「拌和水量」亦會減少，如此可減少混凝土中弱界面（骨材與水泥漿之界面）形成的機率，亦可減少水泥漿與骨材不等量變形而產生界面裂縫及漿體裂縫之影響，對混凝土整體強度有正面之貢獻。緻密堆積雖可提高混凝土之工作性，然而使用多量骨材狀況下，工作性相對因摩擦力增大而降低，如果造成蜂窩時，此亦將造成混凝土實際強度降低之反效果，因此如何獲得緻密度與強度的線性關係，及工作性與強度之最佳互利狀況是非常重要的。

### 3. 界面潤滑劑

傳統又古典的 ACI 混凝土配比方法，純以「拌和水量」的增減來調整工作性，對高流動性混凝土而言，ACI 方法可能「拌和水」過量而有不利體積穩定性及耐久性之影響，如何使用強塑劑等化學摻料，以改善低水膠比(W/B)又低拌和用水量之混凝土具流動性，使緻密堆積顆粒間之滑移阻力減少，以達成設計所需之工作性，是非常重要的。通常加入「強塑劑」，即高性能減水摻料，將使新拌混凝土中的顆粒，容易沿剪力切面滑移變形，減少流動阻力而提高工作性質。此類強塑劑等界面潤滑劑，基本上應符合 ASTM C494F 及 G 型之「高性能減水劑」，當然也有併合應用「一般減水劑」達到高工作性的實例，不過並不建議。此類界面潤滑劑具界面靜電互斥效應，可減少新拌水泥漿材料吸附水層及擴散水層之水膜厚度，使之具有減水效果。惟採用強塑劑，若配比不當，仍有可能造成混凝土材料泌水或析離問題，當然也可能有較大坍度損失及藥效大量折減現象，此必須透過混凝土配比設計的手段來加以克服。

### 4. 卜作嵐材料

混凝土中卜作嵐材料的應用，係以卜作嵐填塞骨材空隙，使骨材系統緻密度提高，如此混凝土在物理學上即呈穩定結構，透過減水而降低漿量，則混凝土總水量降低，但是又控制 W/C 大於 0.42，

使水泥的水化能非常充分發揮，則多餘的水可供應卜作嵐反應，達到強度長期增長的功效。

過去傳統卜作嵐材料的應用，係以取代部份水泥用量來減少水化熱，減少高水泥用量對日後潛變乾縮的威脅。卜作嵐材料可增加細粉料部份，以提高混凝土的塑性粘度，再透過卜作嵐反應及填塞微孔之作用，直接可提高混凝土之緻密性，改善材料之弱界面帶，而間接可提昇混凝土之強度。惟對此種材料之使用，必須謹慎以避免其對混凝土早期強度的不良影響。同時傳統 ACI 配比使用卜作嵐的量無法知道最佳量多少，而黃氏緻密配比法很清楚獲得最佳點。

## 5. 漿體與骨材界面

粘結料在理論上只要能將惰性骨材膠合，並填塞骨材間之空隙，減少應力集中，即可提高強度及其他性能，故在「相同水膠比下，漿體應俱有相同強度」的大前提下，避免使用高量的水泥粘結料，以減低漿體產生微裂縫的機率，但是過少的漿量又將形成空隙或蜂窩，而不利於強度。故製作高性能混凝土應如何找出避免過量空隙，與採用「最小潤滑漿量」及「粘結漿量」之平衡點非常重要。

## 2.3 緻密配比流程

依據上面的基本理論，其配比流程如圖 1-2.3 所示。

### 步驟一：選擇材料

蒐集水泥、骨材與摻料之物化性資料，以供配比計算參考之需。基本上長期材料資料必須由可以供應商提供，而非由購買者執行，購買者只進行驗收檢驗而已。2001 年新版交通部規範即有此所謂之「零頭管制」之料源管制工作。

### 步驟二：量測最大密度

求出最小空隙率（最大密度），依最小空隙的原理，其基本方法是探討顆粒材料最大堆積密度即最佳級配條件下的空隙，其推演方法如下：

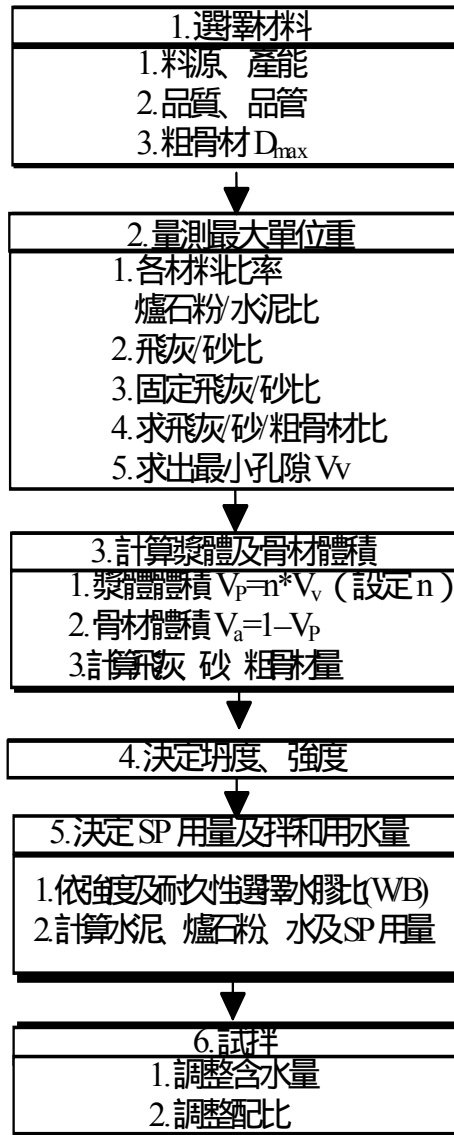


圖 1-2.3 緻密配比設計流程

利用四分法取樣將砂和飛灰混合，以飛灰取代砂之方式，求出混合料之最大密度，此即是飛灰取代砂之最佳比例，如圖 1-2.4 所示，顯示飛灰取代砂 15%之密度最大。圖 1-2.4 在  $\alpha < 15\%$  之曲線飛灰量 0%開始，由於飛灰填塞入砂之空隙，而產生置入的效應，密度逐漸依飛灰之填入而增加。

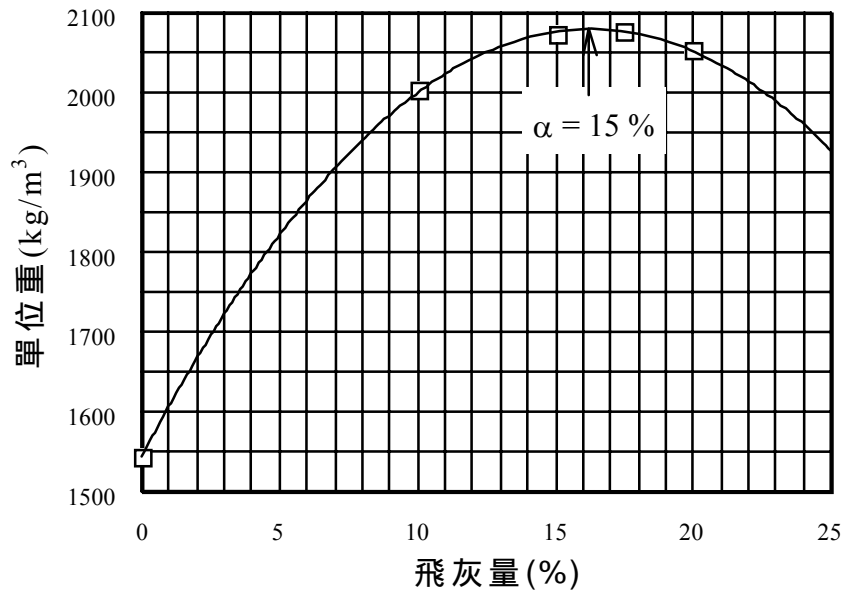


圖 1-2.4 飛灰填塞砂空隙之密度曲線

直到  $\alpha=15\%$ 時，飛灰之填入已無砂之空隙可填，勢必推擠砂原有的空間，而產生取代的效應，所以飛灰的填入必須擠掉砂，如同「阿基米德浮力原理」，又飛灰比重較砂輕，所以密度下降，其下降比率即如同浮力，為飛灰比重(2.2)減掉取代砂之比重(2.65)，則其斜率幾乎為  $2.2-2.65=-0.45$ 。故填塞及取代絕對會有一轉摺點出現，見圖 1-2.4。

同理，以固定砂和飛灰之最佳比例（本例如圖 1-2.4 為 15%），重覆上述之步驟，找出砂與飛灰及混合粗骨材之最大密度比例為  $\beta=50\%$ ，此點即是 HPC 骨材組成之最佳化，如圖 1-2.5 所示。當在進行上述之步驟時，若感覺只要給予少許之振動能量，即能使混合物達密實狀況，即已接近 HPC 之最佳化點（緻密點）之比例。

根據求出之骨材最大密度求出最小空隙  $V_v$ 。

1. 假設飛灰取代砂之最大單位重比例為  $\alpha$ ，如圖 1-2.4 所示。

$$\alpha = \frac{W_{fy}}{W_{fy} + W_{CS}} \quad \text{-----} \quad (2-1)$$

2. (砂+飛灰) 在混合骨材之最大單位重比例為  $\beta$ ，如圖 1-2.5 所示。



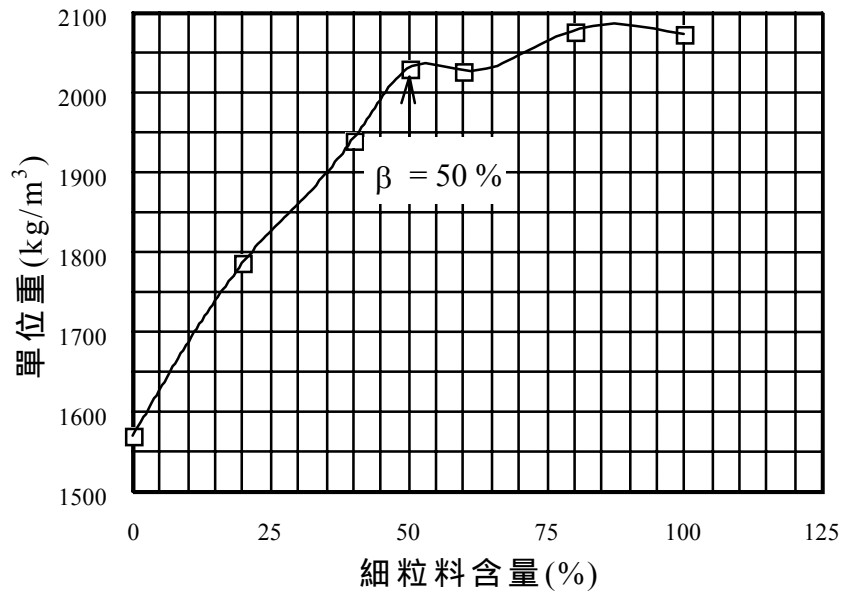


圖 1-2.5 砂/飛灰細粒料含量之單位重曲線

$$\beta = \frac{W_{CS} + W_{fly}}{(W_{CS} + W_{fly}) + W_{ca}} \quad \text{-----} \quad (2-2)$$

$$3. V_v = 1 - \left( \frac{W_{fly}}{\gamma_{fly}} + \frac{W_{CS}}{\gamma_{CS}} + \frac{W_{ca}}{\gamma_{ca}} \right) \quad \text{-----} \quad (2-3)$$

式中  $W_{fly}$  ,  $\gamma_{fly}$  : 分別表飛灰重(kg/m<sup>3</sup>)及飛灰比重 ;

$W_{ca}$  ,  $\gamma_{ca}$  : 分別表粗骨材重(kg/m<sup>3</sup>)及粗骨材比重 ; 和

$W_{CS}$  ,  $\gamma_{CS}$  : 分別表細骨材重(kg/m<sup>3</sup>)及細骨材比重。

步驟三：計算用漿量及骨材體積

### 1. 各骨材之用量

水泥漿體  $V_p$  假設  $nV_v$  , 以涵蓋空隙  $V_v$  及潤滑漿量  $S \cdot t = (n-1)V_v$  ,  
 $n$  依經驗為 1.1 , 1.2 , 1.3 , 1.4 或 1.5 , 以 1.3 最佳。可以下式求之 :

$$V_p = nV_v \quad \text{-----} \quad (2-4)$$

則骨材量可以依下式求出 ,

$$V_{agg} = 1 - V_p = \left( \frac{W_{ca}}{\gamma_{ca}} + \frac{W_{CS}}{\gamma_{CS}} + \frac{W_{fly}}{\gamma_{fly}} \right) \text{-----} (2-5)$$

由於飛灰、砂、粗骨材之混合比率為最緻密點，屬於固定體積比率，故將公式(2-1)及公式(2-2)重新代入公式(2-4)及公式(2-5)中，則可求出下式飛灰、砂、粗骨材用量。

$$W_{CS} = \frac{V_{agg}}{\left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \frac{1}{\gamma_{fly}} + \frac{1}{\gamma_{CS}} + \left( \frac{1-\beta}{\beta-\alpha\beta} \right) \frac{1}{\gamma_{ca}}} \text{-----} (2-6)$$

$$W_{ca} = W_{CS} \times \frac{1-\beta}{(\beta-\alpha\beta)} \text{-----} (2-7)$$

$$W_{fly} = W_{CS} \times \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \text{-----} (2-8)$$

## 2. 水泥、爐石及拌和水量

$$V_p = \frac{W}{\gamma_w} + \frac{C}{\gamma_c} + \frac{W_{sl}}{\gamma_{sl}} \text{-----} (2-9)$$

當爐石粉取代水泥重量比為  $\xi$  時，可將公式(2-9)式改為

$$V_p = \frac{(W/C)*C}{\gamma_w} + \frac{C}{\gamma_c} + \frac{[\xi/(1-\xi)]*C}{\gamma_{sl}} \text{-----} (2-10)$$

假設設計強度所需之水膠比為  $\lambda$ ，查依所用水泥混凝土之經驗圖及表，則

$$W/B = W/(C+P) = \lambda \text{-----} (2-11)$$

式中  $P = W_{sl} + W_{fly}$

$$\therefore W = \lambda C + \lambda W_{sl} + \lambda W_{fly} \text{-----} (2-12)$$

由公式(2-8)已求出飛灰量  $W_{fly}$ ，所以公式(2-12)只剩下水(W)，水泥(C)及爐石粉( $W_s$ )三個變數，需要三個方程式。又因為爐石粉取代水泥之比率為主

$$= \frac{W_{s\lambda}}{C + W_{s\lambda}} \text{-----(2-13)}$$

$$\therefore W_{s\lambda} = \xi / (1 - \xi) \times C \text{-----(2-14)}$$

最後將公式(2-12)代入公式(2-10)可得

$$C = \frac{V_p - \frac{\lambda W_{fy}}{\gamma_w}}{\left[ \frac{\lambda}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_c} + \frac{\xi}{(1-\xi)} \left( \frac{\lambda}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_{s\lambda}} \right) \right]} \text{-----(2-15)}$$

$$W = (C + P) \cdot \lambda \text{-----(2-16)}$$

上式中

- |                |                                |                     |         |
|----------------|--------------------------------|---------------------|---------|
| W              | : 水重                           | $\gamma_w$          | : 水之比重  |
| $W_{s\lambda}$ | : 爐石密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{s\lambda}$ | : 爐石比重  |
| C              | : 水泥重                          | $\gamma_c$          | : 水泥比重  |
| $\lambda$      | : 水膠比                          | P                   | : 卜作嵐材料 |

#### 步驟四：決定強度與坍度

依據設計圖說、施工規範及施工條件之要求，選定混凝土強度及坍度。當混凝土要求強度  $f'c = 560 \text{ kgf/cm}^2$  時，且無工地經驗資料可循，或試驗室資料可資應用時，則配比之需求強度  $f'cr$  可由方程式(2-17)求得：

$$f'cr = \frac{f'c + 98}{0.9} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ 或}$$

$$f'cr = \frac{f'c + 9.6}{0.9} \text{ (MPa)} \text{-----(2-17)}$$

#### 步驟五：決定 SP 用量及拌和用水量

強塑劑(SP)的使用在「黃氏緻密混凝土配比法」中，係用來調整工作性的，因此與傳統 ACI 的理念完全不同。然而為保持水膠比不變，故需將 SP 之用量從最初所用水量扣回，即最後之用水量加上 SP 之用量需

和最初配比計算之用水量相等。

#### 步驟六：試拌

依配比設計之結果，試拌 HPC 時之下料程序應注意，將飛灰延至最後加入，若骨材為乾燥時須先加入一小部份水先將骨材濕潤，再將所有之 SP 與所有剩餘之水混合加入混凝土中攪拌，以獲得 SP 之最大效用。

最後測試 HPC 之各種新拌性質，當坍度未符合要求時，可添加 SP 予以修正，經現場之試拌顯示添加 0.1% 之 SP 可增加 20mm 之坍度，因此 SP 之添加需非常小心，不可過量，否則將導致泌水，致產生黏稠結果，而影響工作性。

#### 步驟七：結果之處理

由配比計算所得之結果明顯看出  $V_p$  值與各組成材料間之關係，對於  $V_p$  值越小則拌和水量及水泥量減少，因此可減少對混凝土之乾縮潛變。以經濟性之考量，水泥用量之減少，無疑地使混凝土之成本降低，並且降低水化熱所產生之負面影響及產生乾燥龜裂之機率。

### 第三節 結構用淤泥輕質骨材混凝土製作

本研究配製結構用輕質骨材混凝土配比，採用 ACI 配比及緻密配比兩種方法，共調配 31 組結構輕質骨材混凝土配比。探討變數包括四種不同顆粒密度淤泥輕質骨材 (0.7、1.1、1.25、1.5 g/cm<sup>3</sup>)，兩種不同細骨材 (機製砂及河川砂) 及二種不同配比 (緻密配比及 ACI 配比設計法)，有關水庫淤泥係採用石門水庫淤泥經商業化旋窯所製造之輕質骨材，如表 1-3.1 所示。31 組配比如表 1-3.2。

表 1-3.1 輕質粗骨材及常重砂基本性質

物理性質	水庫淤泥輕質粗骨材			機製砂 (大安溪)	河川砂 (木瓜溪)
	0.7	1.1	1.5	2.64	2.74
顆粒密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.7	1.1	1.5	2.64	2.74
吸水率(%)	6.4	7.2	8.0	2.6	3.0
D <sub>max</sub> (mm)	20	13	13	....	....
細度模數(FM)	6.95	6.48	6.40	2.96	2.88
30 顆輕質骨材平均抗壓強度 (MPa)	2.66	3.33	6.74	....	....
桶壓強度(MPa)	2.75	3.51	6.85	.....	....
鬆單位重(kg/m <sup>3</sup> )	498	658	836	....	....

表 1-3.2 31 組結構用輕質骨材混凝土配比

輕質骨材 骨材種類	輕質骨材 顆粒密度	組別	LWA 比重	常重砂 種類	w/cm	W <sub>total</sub>	N	w/c	材料配比 (kg/m <sup>3</sup> )						
									Sand	L.WA*	Cement	Fly Ash	Slag	Water	SP
Type 1	1.5	M15-32-140	1.5	機製砂	0.32	140	1.173	0.4915	781	612	285	138	15	114	24
		M15-32-150	1.5	機製砂	0.32	150	1.278	0.4716	759	595	318	134	17	138	12
		M15-32-160	1.5	機製砂	0.32	160	1.383	0.4554	737	578	351	130	19	151	9
		M15-28-150	1.5	機製砂	0.28	150	1.391	0.3890	736	577	386	130	20	136	21
		M15-40-150	1.5	機製砂	0.40	150	1.120	0.6709	791	621	224	140	12	140	10
Type 2	0.7	M07-32-140	0.7	機製砂	0.32	140	1.173	0.4915	781	294	285	138	15	112	28
		M07-32-150	0.7	機製砂	0.32	150	1.278	0.4716	759	286	318	134	17	126	24
		M07-32-160	0.7	機製砂	0.32	160	1.383	0.4554	737	278	351	130	19	147	13
		M07-28-150	0.7	機製砂	0.28	150	1.391	0.3890	736	277	386	130	20	122	28
		M07-40-150	0.7	機製砂	0.40	150	1.120	0.6709	791	298	224	140	12	137	13
Type 3	1.1	M11-32-140	1.1	機製砂	0.32	140	1.173	0.4915	781	443	285	138	15	119	21
		M11-32-150	1.1	機製砂	0.32	150	1.278	0.4716	759	431	318	134	17	138	12
		M11-32-160	1.1	機製砂	0.32	160	1.383	0.4554	737	419	351	130	19	149	11
		M11-28-150	1.1	機製砂	0.28	150	1.391	0.3890	736	418	386	130	20	129	21
		M11-40-150	1.1	機製砂	0.40	150	1.120	0.6709	791	449	224	140	12	140	10
Type 4	1.25	M12-32-140	1.25	機製砂	0.32	140	1.173	0.4915	781	503	285	138	15	114	26
		M12-32-150	1.25	機製砂	0.32	150	1.278	0.4716	759	490	318	134	17	132	18
		M12-32-160	1.25	機製砂	0.32	160	1.383	0.4554	737	476	351	130	19	151	9
		M12-28-150	1.25	機製砂	0.28	150	1.391	0.3890	736	475	386	130	20	127	23
		M12-40-150	1.25	機製砂	0.40	150	1.120	0.6709	791	510	224	140	12	140	10
Type 1	1.5	R15-28-150	1.5	河川砂	0.28	150	1.417	0.3916	751	570	383	133	20	126	24
		R15-32-150	1.5	河川砂	0.32	150	1.301	0.4756	774	588	315	137	17	138	12
		R15-40-150	1.5	河川砂	0.40	150	1.140	0.6791	807	613	221	143	12	144	6

Type 3	1.1	R11-28-150	1.1	河川砂	0.28	150	1.417	0.3916	751	426	383	133	20	125	25
		R11-32-140	1.1	河川砂	0.32	140	1.193	0.4965	796	452	282	141	15	119	11
		R11-32-150	1.1	河川砂	0.32	150	1.301	0.4756	774	440	315	137	17	138	12
		R11-32-160	1.1	河川砂	0.32	160	1.409	0.4587	752	427	349	133	18	153	7
		R11-40-150	1.1	河川砂	0.40	150	1.140	0.6791	807	459	221	143	12	144	6
		R-ACI-28-223	1.1	河川砂	0.28	223	.....	0.28	417	409	796	0	0	200	23
		R-ACI-32-223	1.1	河川砂	0.32	223	.....	0.32	504	409	697	0	0	223	0
		R-ACI-40-223	1.1	河川砂	0.40	223	.....	0.40	625	409	558	0	0	223	0

## 第四節 結構用淤泥輕質骨材混凝土新拌性質

### 4.1 坍度及坍流度

混凝土新拌性質工作度的指標不外乎是坍度及坍流度，此仍為一般人所樂於使用，其原因乃其操作方便，又能涵概工作性能之真諦。良好的工作性能可避免不必要的震動及不當的施工產生混凝土的劣化基因，影響混凝土的耐久性，進而縮短混凝土的壽命。新拌混凝土除了一般傳統的量測坍度試驗外，流變性質亦是一重要之參考指標。流變性的理念對高流動化混凝土而言是相當重要，它可以反應出混凝土現場泵送的難易度，尤其是在高層泵送或長距離泵送時，更需要以流變性質數據來判斷泵送壓力及泵送距離。

本研究採用的水庫淤泥輕質粗骨材，因表面瓷化降低吸水率具有理想輕質骨材的標準。再加上高性能混凝土的發展，輕質骨材混凝土可調配成高流動性的 SCC 特性。因此，本研究之新拌輕質骨材混凝土工作性以坍度、坍流度，流動時間為指標，除初始坍度、坍流度達設計要求外，並要求在 60 分鐘後亦能達到要求的性能，以確保混凝土的工作性能。輕質骨材顆粒密度較常重骨材顆粒密度為低，顆粒堆積之靜載重較低，下壓力較小，水平的側向推力也較小，坍流時間變長。在固定水膠比時，低水泥和低用水量，為達到足夠的工作性，強塑劑的用量相對的增加，見表 1-2.2 所示。使得漿體的稠度變得更大，流動時間也變得更長。在固定用水量時，水膠比愈低者其漿體濃度愈濃，其相對的稠度也增加，流動時間當然亦拉長。水膠比如果過高，一方面由於強塑劑的用量減少，且漿體濃度較低，粗骨材較多，導致潤滑漿量較少，所以流動性較差，反而所呈現的坍度、坍流度值均較低。但無論任何狀況，本研究各組混凝土均能符合坍度為  $230\pm 20\text{mm}$ 、坍流度為  $500\pm 100\text{mm}$  的高流動性設計要求。

### 4.2 流變性質

新拌混凝土初期的粘滯性與潤滑之水泥漿量有關，經過一段時間後，持續的水化反應將會使得水泥漿量的粘稠性依時產生變化。在水



泥漿「質」的考量上，圖 1-4.1 及 1-4.2 為固定拌和水量  $150 \text{ kg/m}^3$ ，輕質骨材混凝土標稱單位重分別為  $1900 \text{ kg/m}^3$  (LWA 顆粒密度 =  $1.1 \text{ g/cm}^3$ ) 及  $2000 \text{ kg/m}^3$  (LWA 顆粒密度 =  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ) 扭矩值和轉速的關係。在用水量固定  $150 \text{ kg/m}^3$ ，其水膠比分別為 0.28、0.32、0.4，顯示水膠比愈低所伴隨的靜扭矩值也愈大。由於用水量固定，隨著水膠比降低其所須的水泥用量也增加，為了達到設計的工作性，相對地也增加了強塑劑的用量，也因此而增加漿體滯性，而使得靜扭矩值變大。水膠比較高，其水泥漿體也較稀，強塑劑用量相對減少，粘滯性較低，所反應出的靜扭矩值也較低。60 分鐘之後，各配比的靜扭矩值均有增大的趨勢，由於混凝土經過一段時間之後，水泥水化反應結果所致。因此，粘滯性愈高者，其初始靜扭矩值愈大，一但產生攪動之後，其動扭矩值立即下降。若混凝土的初始靜扭矩值愈大者，其所須的泵送能將愈大，這是現場施工作業所須注意的事項。

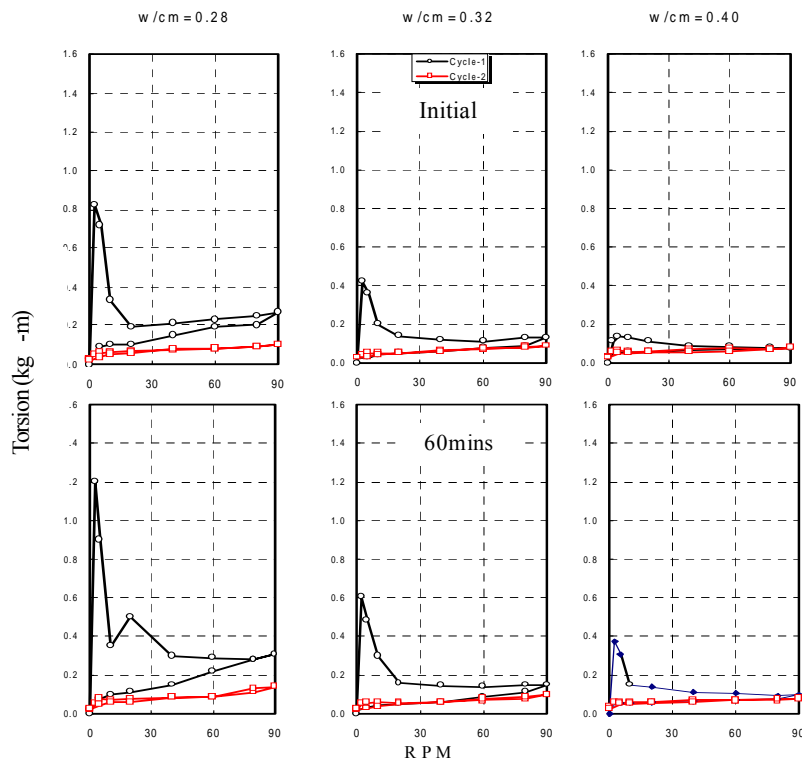


圖1-4.1 輕質骨材混凝土扭矩與轉速的關係圖  
(LWA 顆粒密度 =  $1.1 \text{ g/cm}^3$ ， $W_w = 150 \text{ kg/m}^3$ )

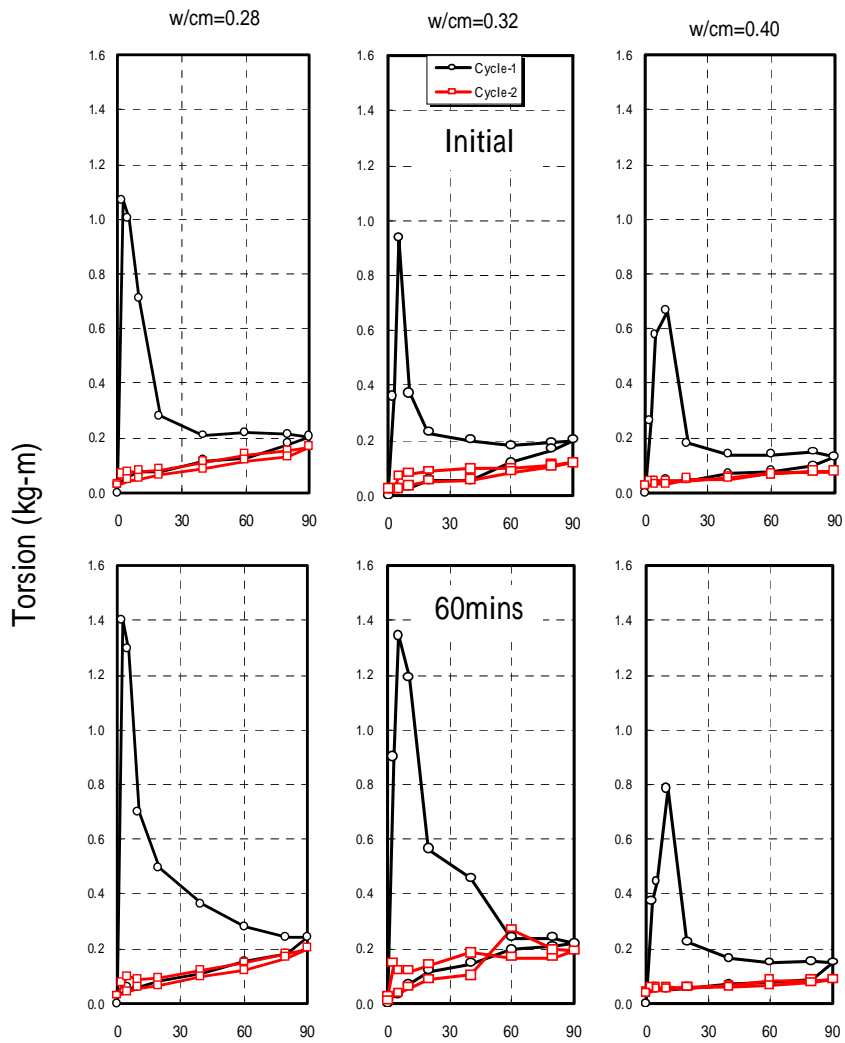


圖 1-4.2 輕質骨材混凝土扭矩與轉速的關係圖

(LWA 顆粒密度 = 1.5g/cm<sup>3</sup> , Ww = 150 kg/m<sup>3</sup>)

在水泥漿「量」的考量上，輕質骨材標稱單位重為  $1900 \text{ kg/m}^3$ 、之水膠比為 0.32，用水量為  $140$ 、 $150$ 、 $160 \text{ kg/m}^3$  之初始與 60 分鐘坍度、坍流度與流動時間之比較，輕質骨材顆粒密度較常重骨材顆粒密度為低，顆粒堆積之靜載重較低，下壓力較小，水平的側向推力也較小，使得坍流時間變長。在固定水膠比之下即使低拌和用水量也能達到初使設計的要求，由於低拌和用水量，水泥和用水量相對的減少，強塑劑的用量相對的增加，漿體的稠度變得更大，流動時間也變得更長，坍度、坍流度亦能符合要求。一般而言，在固定水膠比之下，拌和水量的增加，相對的水泥用量也增加，由於水泥的水化作用下，60 分鐘的坍度、坍流度應損失較大，但水泥量的增加，相對地輕質骨材用量也減少，由於輕質骨材吸水率較大的特性，會吸取部分的水量，因而影響 60 分鐘後的坍度、坍流度，不過其坍度、坍流度損失仍在設計標準之內。

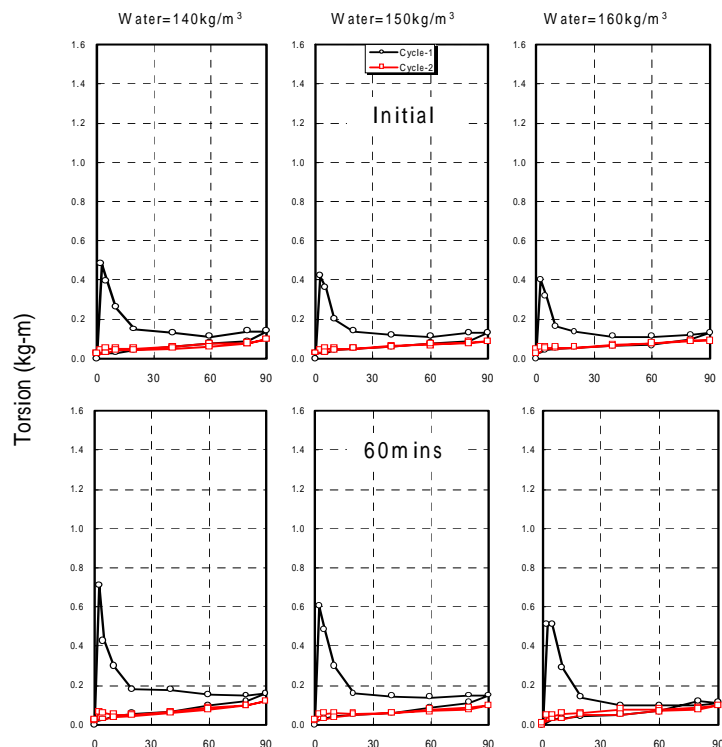


圖1-4.3 輕質骨材混凝土扭矩與轉速的關係圖  
(LWA 顆粒密度 =  $1.1 \text{ g/cm}^3$ ， $w/cm=0.32$ )

## 第五節 結構用淤泥輕質骨材混凝土硬固性質

### 5.1 抗壓強度發展

圖 1-5.1 所示為固定用水量  $150 \text{ kg/m}^3$ ，水膠比分別為 0.28、0.32、及 0.4 的抗壓強度比較，顆粒密度  $1.5\text{g/cm}^3$  相應之 98 天抗壓強度分別可達到 68.5MPa、63.3MPa、及 48.8MPa，此為水泥漿質的比較。水膠比愈低，水泥漿「質」愈佳，可發揮較高的強度發展。由不同型別骨材比較，在相同水膠比情況下，抗壓強度會隨輕質骨材顆粒密度增加而變大，此因顆粒密度小的輕質骨材內含有較多孔隙，以致降低強度。

圖 1-5.2 所示為固定水膠比為 0.32，用水量分別為 140、150、及  $160\text{kg/m}^3$  的抗壓強度比較，顆粒密度  $1.5\text{g/cm}^3$  相應之 98 天抗壓強度分別可達到 59.3MPa、63.3MPa、及 66.3MPa，此為水泥漿量的比較。水泥漿「量」愈多，可發揮較高的強度發展，此因輕質骨材內含有較多孔隙，以致降低強度，水泥漿量愈多，相對輕質骨材含量較少，可提供較高的強度。輕質骨材強度是控制高強度輕質骨材混凝土強度的主要因素之一，如圖 1-5.2 可知，由不同型別骨材比較，顆粒密度  $1.5\text{g/cm}^3$  的強度發展斜率較大，顯示密度大的輕質骨材可提供較大的強度發展，相對於顆粒密度  $0.7\text{g/cm}^3$ ，其顆粒強度甚低，在同樣水泥漿質與量的配比中，在強度上比其它顆粒骨材密度大的相差很多，這應歸咎於此類骨材強度甚低的緣故。當然顆粒密度  $0.7\text{g/cm}^3$  之骨材屬於隔熱混凝土用之骨材。

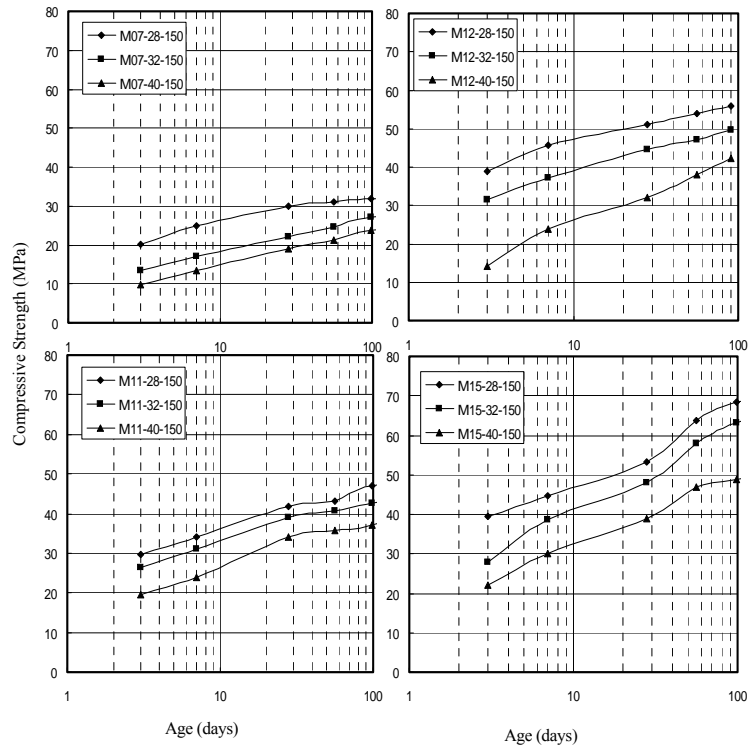


圖 1-5.1 輕質骨材混凝土不同水膠比與抗壓強度關係(機製砂，Water=150kg/m<sup>3</sup>)

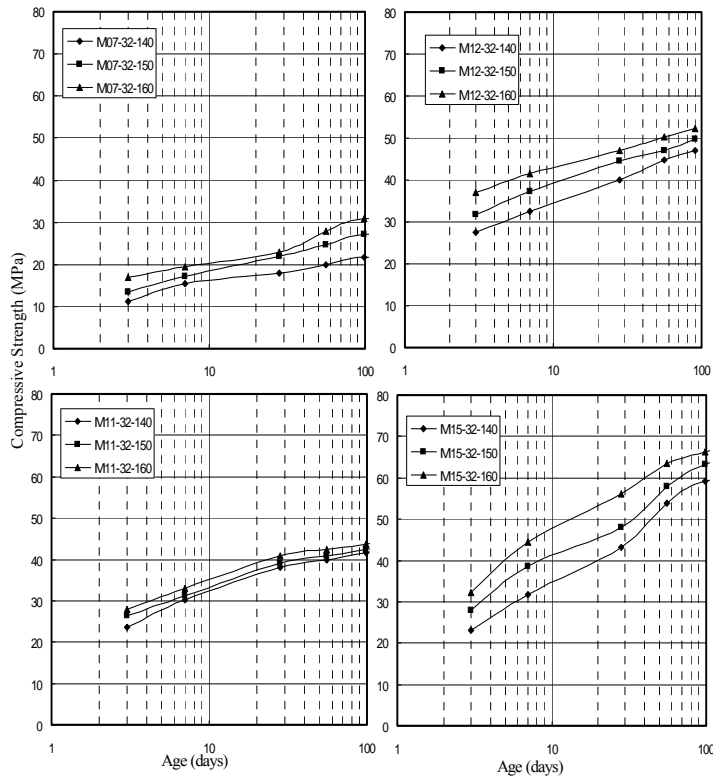


圖 1-5.2 輕質骨材混凝土不同用水量與抗壓強度關係(機製砂，w/cm=0.32)

圖 1-5.3 緻密配比及 ACI 配比在不同水膠比的比較，緻密配比用水量固定  $150 \text{ kg/m}^3$ ，ACI 配比為用水量固定  $223 \text{ kg/m}^3$ 。在緻密配比組別比較上，呈現水膠比越低，抗壓強度越高，此與傳統混凝土相同趨勢，在不同配比比較上，由於 ACI 配比使用較多的水泥漿量，因此，在相同水膠比時，ACI 配比的抗壓強度發展均高於緻密配比，惟根據相關文獻顯示，水泥及水用量過高，對晚期的體積穩定性及耐久性均有不利的影響[2~8]。

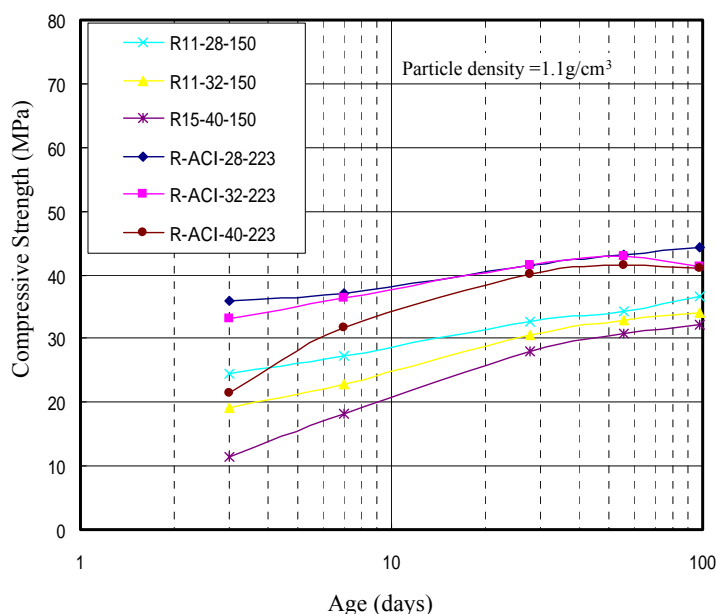


圖 1-5.3 輕質骨材混凝土不同水膠比與抗壓強度關係(河川砂， $W_w=150 \text{ kg/m}^3$ )

## 5.2 水泥強度效益

水泥的用量對於混凝土耐久性或生態性均有不利的影響，而且直接影響到經濟成本上，而水泥效益就是一重要的參考指標。圖 1-5.4 為骨材顆粒密度  $1.1 \text{ g/cm}^3$  在水泥漿體的量對水泥效益的關係，在固定水泥漿質(水膠比=0.32)，以緻密配比的水泥強度效益均在在  $0.1 \text{ MPa/kg/m}^3$  之上，但在 ACI 配比的用水量為  $223 \text{ kg/m}^3$ ，其混凝土整體結構不是緻密配比，在水泥強度效益為  $0.06 \text{ MPa/kg/m}^3$  左右，由此可知混凝土不只是由水泥水化來增加強度，亦可藉由細骨材與飛灰的緻密堆積來提高水泥的強度效益。相同地，在固定用水量比較不同水膠比情況，如圖 1-5.5 顯示，水膠比越高其水泥強度效益越高，並且緻

密配比的水泥強度效均高於 ACI 配比。由圖 1-5.4 及圖 1-5.5 可知，緻密配比設計法提高水泥強度效益約 90 以上。

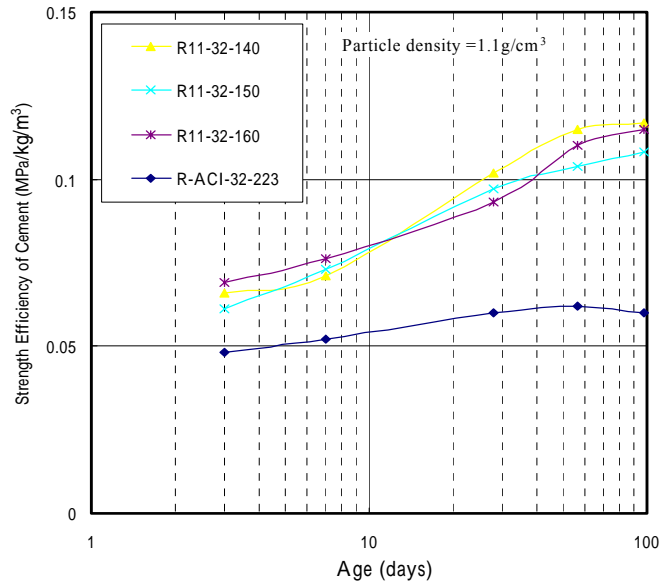


圖 1-5.4 輕質骨材混凝土不同用水量與水泥強度效益關係  
(河川砂， $W/cm=0.32$ )

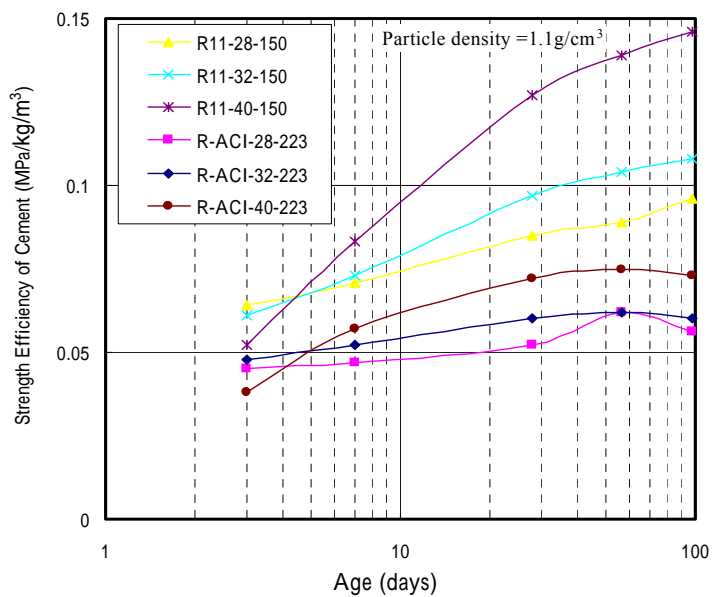


圖 1-5.5 輕質骨材混凝土不同水膠比與水泥強度效益關係(河川砂，兩種配比法)

### 5.3 表面電阻量測

鋼筋混凝土的鋼筋腐蝕造成結構物耐久性的問題一直是國人所關切的話題，這也是學者一直想要解決的問題。鋼筋在高鹼性的環境下為一非常耐久性的材料，因此混凝土的品質將決定鋼筋防蝕性的重要性質。混凝土表面的阻抗性，可供評估混凝土面的緻密性，而間接的評估防蝕性能，為一種既快速且簡便的量測方法。混凝土越緻密其孔隙愈少，電導通路變長，使得電阻值提高。混凝土愈越緻密，其有害物質越不易侵入，可有效的防止鋼筋腐蝕問題，因此混凝土緻密性越高，其電阻越大，電阻的量測必須在面乾飽和的情況下，其高阻抗性鋼筋混凝土耐久性愈佳。電阻性質在判斷鋼筋混凝土的鋼筋腐蝕上有相當的關聯性，由文獻指出在電阻係數高於  $20\text{K}\Omega\text{-cm}$  時，鋼筋較不致於發生腐蝕，因此在混凝土的表面電阻係數若大於  $20\text{K}\Omega\text{-cm}$  時，此鋼筋混凝土有較佳的耐久性。

圖 1-5.6 為輕質骨材顆粒密度皆為  $1.1\text{ g/cm}^3$  的輕質骨材混凝土在 98 天齡期電阻值比較，其中緻密配比共有 10 組，ACI 配比有 3 組。顯示緻密配比 10 組中，固定拌和水量  $150\text{ kg/m}^3$  情況下，水膠比愈低者，其電阻係數愈高，表示的混凝土的品質愈佳，這在混凝土的抗壓強度及超音波的數值上可相互印證。在不同配比的比較上，緻密配比的 10 組其電阻值均在  $40\sim 70\text{K}\Omega\text{-cm}$  之間，高於學者建議值  $20\text{K}\Omega\text{-cm}$  之上，表示緻密配比組別的混凝土鋼筋不易腐蝕。ACI 配比在拌和水量為  $223\text{ kg/m}^3$ ，水膠比同樣為 0.28、0.32、0.40 下，其電阻值在  $11\sim 12\text{K}\Omega\text{-cm}$  之間，電阻值明顯偏低，都遠在標準值  $20\text{K}\Omega\text{-cm}$  之下，表示其混凝土的品質較差，鋼筋較易腐蝕，對鋼筋混凝土耐久性極為不利。



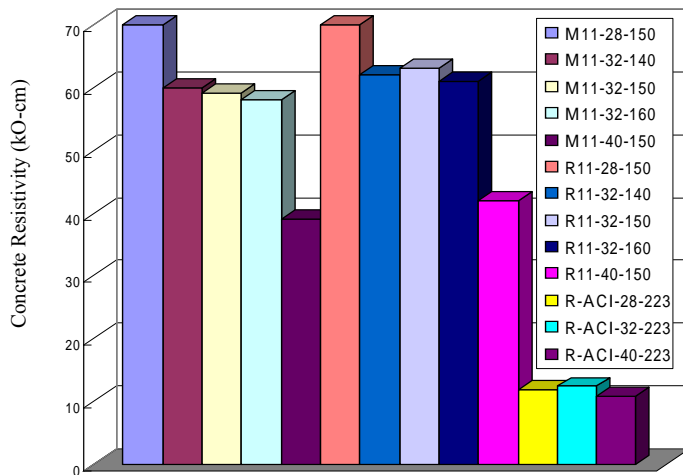


圖 1-5.6 不同輕質骨材混凝土電阻值比較(LWA 顆粒密度 = 1.1g/cm<sup>3</sup>)

#### 5.4 乾縮

混凝土體積穩定性為耐久性的重要指標之一。混凝土受到濕度的變化，發生乾濕的交替作用，再加上溫度的變化，使得混凝土內部和外部變形不一致，導致混凝土內應力產生，一旦這些應力超過混凝土的抗張強度，使得混凝土產生龜裂，則外界有害物質便長驅直入，侵害混凝土內部結構，造成混凝土劣化，而縮短混凝土的服務期限。

圖 1-5.7 為水膠比固定為 0.32，緻密配比用水量分別為 140、150、及 160 kg/m<sup>3</sup>，ACI 配比在拌和水量為 223 kg/m<sup>3</sup> 之輕質骨材混凝土，在經預養護 28 天後置於乾燥環境中，齡期與長度變化之關係。圖 11 顯示浸於水中的試體有持續膨脹現象，隨著拌和水量增加而增加。當試體置於乾燥環境下，由於失水現象會立刻產生收縮，且同樣地隨著拌和水量增加，則長度亦隨之增加。在固定水膠比下，隨著拌和水量的增加，相對的也提高了水泥漿量，水泥之鈣矽石反應及其它水化物吸水反應，是造成混凝土膨脹的主因，而乾燥收縮則應以毛細管孔水失散為主，因此隨著水泥漿量愈多，其乾燥收縮量也愈大。

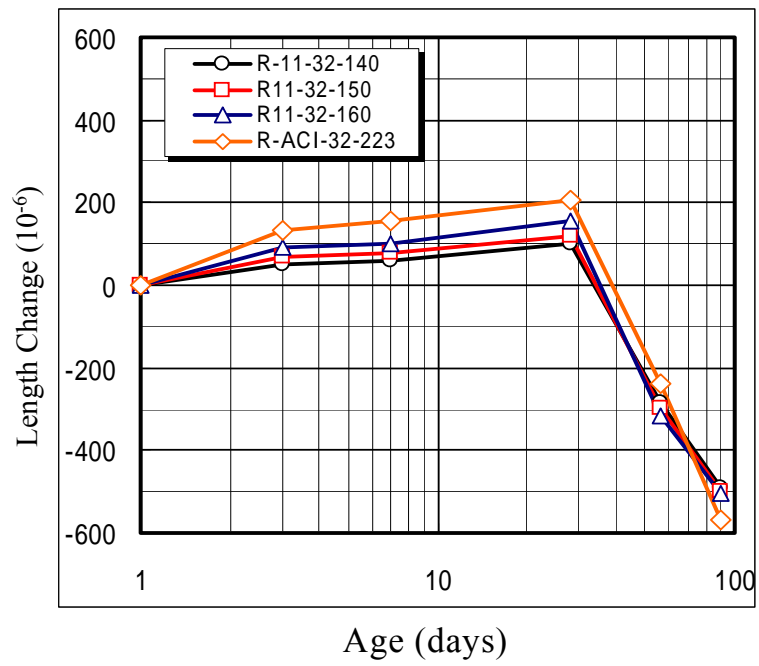


圖1-5.7 輕質骨材混凝土水養護28天後乾燥與長度變化之關係  
(LWA顆粒密度=1.1g/cm<sup>3</sup>)

## 第六節 隔熱用淤泥輕質骨材混凝土製作及性質

本研究進行非結構性用途淤泥輕質骨材混凝土配比，以隔熱用途為主要目的，設定配比目標密度為 1000~1400 kg/m<sup>3</sup>，隔熱之熱傳導係數介於 0.2~0.5 w/m °K 之間，共調配 10 組非結構性輕質骨材混凝土配比，包括二種不同淤泥輕質骨材（1.25、0.68）及輸氣劑劑量（0、1%、1.5% 或 2%），有關水庫淤泥係採用石門水庫淤泥經商業化旋窯所製造之輕質骨材，如表 1-3.1 所示。10 組隔熱用輕質骨材混凝土配比如表 1-6.1，其中輕質骨材材料包括輕質粗骨材（LWA）及輕質細骨材（LWA Sand）。並且，添加輸氣劑（AEA）以能有效降低輕質骨材混凝土密度。

表 1-6.1 隔熱用輕質骨材混凝土配比

Particle density (g/cm <sup>3</sup> )	Mix no.	w/cm	w/c	Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> )							
				LWA Sand	LWA	Cement	Fly Ash	Slag	Water	SP	AEA
1.25	L12-28	0.28	0.36	378	323	456	107	24	135	30	-
	L12-32	0.32	0.42	378	323	421	107	22	146	30	-
	L12-32-A01	0.32	0.42	378	323	421	107	22	140	30	6
	L12-32-A02	0.32	0.42	378	323	421	107	22	135	30	11
	L12-40	0.40	0.54	378	363	326	107	19	179	16	-
0.68	L68-28	0.28	0.36	378	176	456	107	24	135	30	-
	L68-32	0.32	0.42	378	176	421	107	22	146	30	-
	L68-32-A01	0.32	0.42	378	176	421	107	22	140	30	6
	L68-32-A015	0.32	0.42	378	176	421	107	22	137	30	8
	L68-40	0.40	0.54	378	176	326	107	19	179	16	-

### 6.1 抗壓強度發展

圖 1-6.1 所示為不同水膠比分別為 0.28、0.32、及 0.4 的抗壓強度比較。顆粒密度 1.25g/cm<sup>3</sup> 相應之 56 天抗壓強度分別可達到 33.8MPa、28.2MPa、及 25.3MPa，以及顆粒密度 0.68g/cm<sup>3</sup> 相應之 56 天抗壓強度分別可達到 23.5MPa、16.2MPa、及 9.4MPa。水膠比愈低，水泥漿「質」愈佳，可發揮較高的強度發展。在相同水膠比情況下，抗壓強度會隨輕質骨材顆粒密度增加而變大，此因顆粒密度小的輕質骨材內含有較多孔隙，以致降低強度。

圖 1-6.2 所示為固定水膠比為 0.32，添加不同輸氣劑含量為 0%、1%、2%（或 1.5%）的抗壓強度比較。顆粒密度  $1.25\text{g/cm}^3$  相應之 56 天抗壓強度分別可達到 28.2MPa、20.3MPa、及 1.8MPa，以及顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之 56 天抗壓強度分別可達到 16.2MPa、8.3MPa、及 9.4MPa。用水量分別為 140、150、及  $160\text{kg/m}^3$  的抗壓強度比較，輸氣劑「量」愈多，造成輕質骨材混凝土內部空隙增加，將導致降低強度。

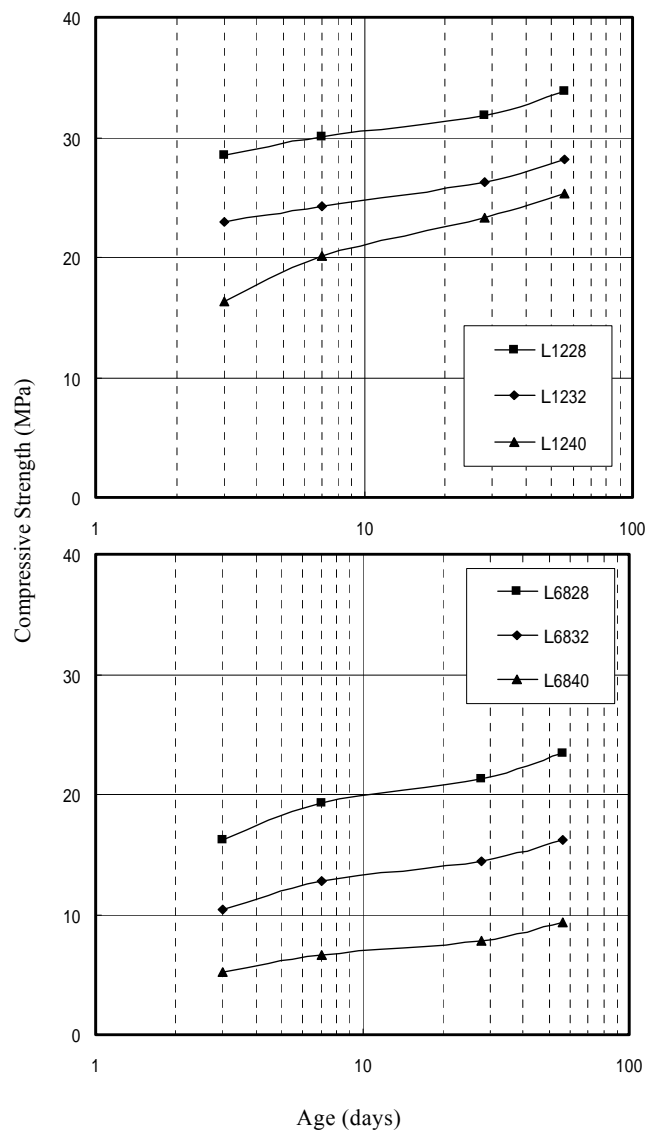


圖 1-6.1 隔熱輕質骨材混凝土不同水膠比與抗壓強度關係

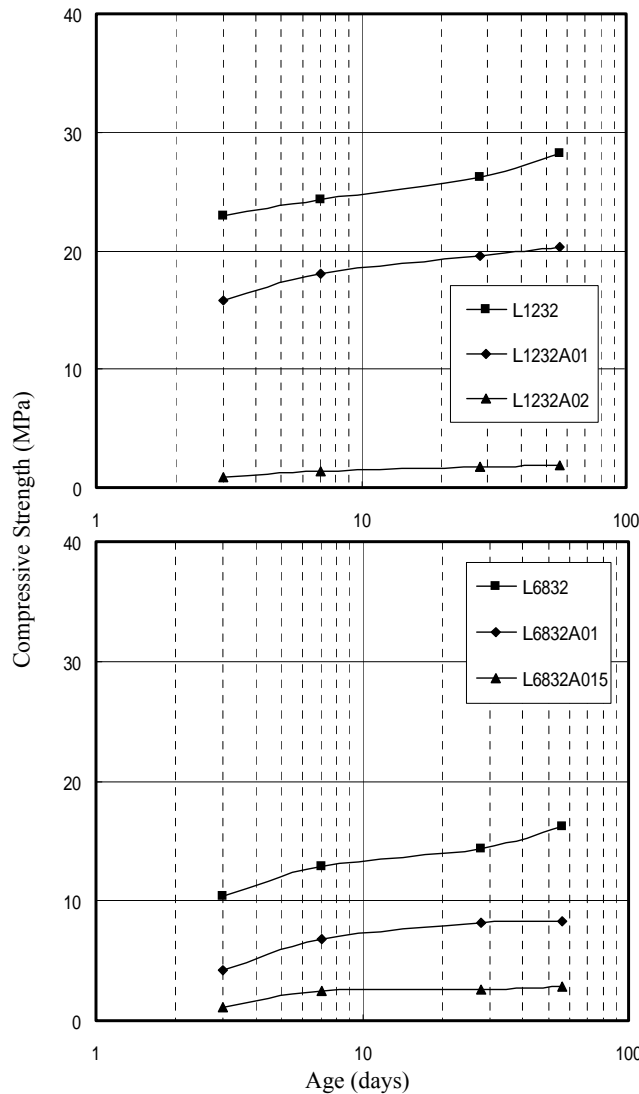


圖 1-6.2 隔熱輕質骨材混凝土不同輸氣量與抗壓強度關係

## 6.2 熱傳導

熱傳導係數為一輕質骨材混凝土熱傳導性的一項重要指標，而材料的熱傳導性又和材料的隔熱效能息息相關，熱傳導性愈差(熱傳導係數愈低)相對地隔熱效能愈佳。一般的常重混凝土其熱傳導係數為  $1.0\sim 1.5 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$ ，而一般之輕質骨材為  $0.4\sim 0.8 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$  之間。輕質骨材混凝土較一般常重混凝土熱傳導係數為低，係因輕質骨材本身具有大量的孔隙，阻隔了熱的傳遞，熱傳導性較差，相對地熱傳導係數也

較低，比一般的石材熱傳係數小，在其它材料用量差異不大之情況下，由輕質骨材所拌製的輕質骨材混凝土相對地熱傳導係數也較低。

隨著乾鬆密度愈低者，輕質骨材顆粒密度愈低，其內部的孔隙就愈多，熱傳導性就愈差，相對地熱傳導係數就愈低。在相同的水泥漿質與量時，顆粒密度  $1.5 \text{ g/cm}^3$  的骨材，由於骨材本身內部孔隙較少，混凝土熱傳導係數值在  $0.56\sim 0.65 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  之間；顆粒密度  $0.7 \text{ g/cm}^3$  的骨材，由於骨材本身內部孔隙較多，混凝土熱傳導係數值在  $0.43\sim 0.63 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  之間。本研究所有配比的混凝土熱傳導係數，其值均在  $0.45\sim 0.65 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  之間。Short and Kinniburgh 指出不同輕質骨材混凝土含水量的單位重與熱傳導係數之關係，如圖 1-5.8 所示。將本研究不同輕質骨材混凝土風乾密度的熱傳導係數標示圖 1-5.8 上，顯示，其本研究所有配比除 1 組的熱傳導係數較低外，其餘多落在此兩趨勢線的範圍內。

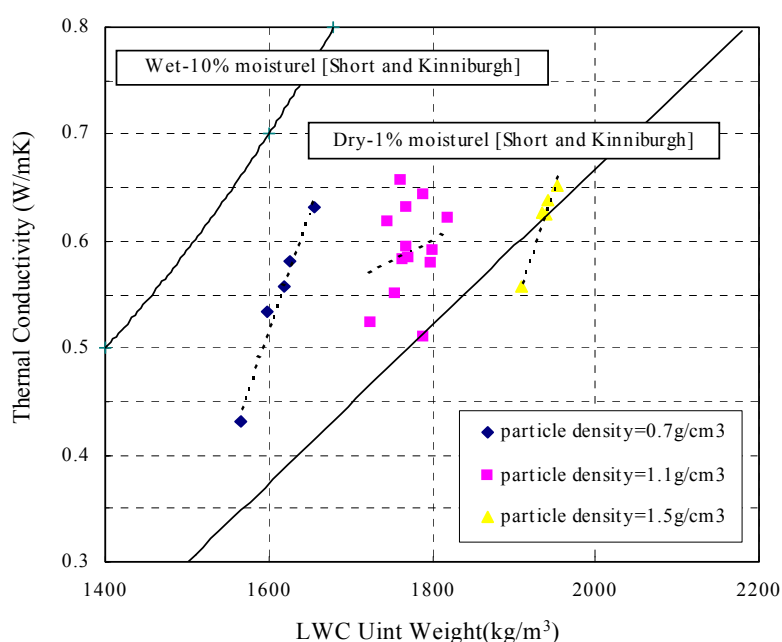


圖 1-5.8 輕質骨材混凝土氣乾單位重與熱傳導係數之關係

## 第七節 結論

- 1.以水庫淤泥製作輕質骨材，可解決台灣水庫淤泥淤積嚴重，且無處堆置處理淤泥的問題，並且可降低輕質骨材製造成本，符合資源再生利用及環保的目的。
- 2.本研究利用水庫淤泥透過燒結技術所製造之表面瓷化輕質粗骨材吸水率小，可以一般配比設計達到設計之工程性質。顯示各組混凝土均能符合坍度為  $230\pm 20\text{mm}$ 、坍流度為  $500\pm 100\text{mm}$  的高流動性設計要求，已達到 SCC 之水準。
- 3.固定水膠比為 0.32，用水量分別為 140、150、及  $160\text{kg/m}^3$  的抗壓強度比較，顆粒密度  $1.5\text{g/cm}^3$  相應之抗壓強度 (98day) 分別可達到 59.3MPa、63.3MPa、及 66.3MPa
- 4.在固定水泥漿質(水膠比=0.32)，以緻密配比的水泥強度效益均在在 0.1 MPa/kg/m<sup>3</sup> 之上，但在 ACI 配比的用水量為  $223\text{ kg/m}^3$ ，水泥強度效益為 0.06 MPa/kg/m<sup>3</sup> 左右，由此可知緻密配比設計法提高水泥強度效益約 90%左右。
- 5.本研究以緻密配比設計使骨材堆積緻密、控制用水量  $160\text{kg/m}^3$  及添加飛灰等卜作嵐材料強化介面，使混凝土內孔隙降低，顯示電阻係數值在 98 天天分別可達到在 40~70KΩ-cm，而 ACI 配比在拌和水量為  $223\text{ kg/m}^3$ ，水膠比同樣為 0.28、0.32、0.40，但電阻值在 11~12KΩ-cm 之間。
- 6.所有配比的混凝土熱傳導係數，其值均在 0.35~0.65 W/m 之間。

## 參考文獻

- 1.American Concrete Institute, 1987, “Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete,” Report by ACI Committee 213.
- 2.Mehta, P.K., and R.W. Burrows, “Building Durable Structures in the 21<sup>st</sup> Century,” Concrete International, ACI, ch 2001, pp.57~63.
- 3.Aitcin, P.C., A.M. and Neville, Acker, P., September 1997, “Integrated View of Shrinkage Deformation,” Concrete International, ACI, pp.35~47.
- 4.Neville, A., December 2000, “Water and Concrete: A Love-Heat Relationship,” Concrete International, ACI, pp.34~38.
- 5.Mather, B., November 2000, “Use Less Cement,” Concrete International, ACI, pp.55~56.
- 6.Shan, S. P., K. Wang and W.J. Weiss, September 2000, “Mixture Proportioning for Durable Concrete,” Challenges and Changes, Concrete International.
- 7.Hwang, C-L., and M-F. Hung, 2002, “Durability Consideration of Self-Consolidating Concrete,” The Proceedings of First North American Concrete on the Design and use Self-Consolidating Concrete, ACBM, pp.385~390.
- 8.Hwang, C-L., and M-F Hung, 2002, “Comparison of ACI Mixture Design Algorithm to HPC Designed Mixture Design Algorithm in the Anti-corrosion and Durability Design,” Journal of Chinese Corrosion Engineering, Vol.16, No.4, pp.281~296.





## 第二章 輕質骨材混凝土之輸送、灌製及夯實技術研究

### 第一節 前言

輕質骨材混凝土材料，性質相當複雜，影響品質的因素亦甚多。混凝土的品管，不能只仰賴口頭保證，而必須建立在 ISO 14000（國際標準化組織）的統計品管上，品管人員至少應有混凝土技術士證照，或經二個月教育訓練，以確保人力基因素質之提昇，再透過 HPC 認證、養成習慣，以保證成效。為確保品質均勻性，必須在規劃設計及施工計畫階段即重視「料源管制」、「製程管制」及「成品管制」，所以整體工作的推動，藉由「P-D-C-A」的管理流程，累積經驗，才足以滿足工程要求之品質，此工作亦須建立  $\bar{X}-R$  的品質資訊，供配比設計時之使用，以確保業主、設計者、施工者及消費者的權益。本研究內容包如下：

- (1) 提出預拌廠生產輕質混凝土品質保證方法，包括所需機具設備、材料規格、人員培訓計畫、輕質混凝土品質驗證計畫、輕質混凝土製作標準流程（SOP）等。
- (2) 進行預拌廠輕質混凝土試拌及解決拌和所遇問題。
- (3) 進行實體試驗（Mock-up Test），利用業者配合的混凝土預拌車、泵送車、泵送管等設備，澆鑄輕質骨材混凝土實體構件。
- (4) 對量測所得實體試驗資料進行分析比較。
- (5) 取得輕質混凝土施工性質資料，包括預拌廠拌和、泵送車泵送澆置、搗實、養護等，提供未來輕質混凝土量產參考。

## 第二節 輕質混凝土品質保證

輕質混凝土品質管制的方法，要求所有參與混凝土工程之人員，均有品質保證的觀念，所以基本上必須撰寫詳實可行的「品管計劃書」，計劃內容涵蓋材料、配比、產製施工、及結構品質等。而品管方法，類似 ISO 14000 之規定，所有品管人員，都須「知行合一，言行一致」。將 PDCA 觀念適當引入品質保證中，如圖 2-2.1，必須由「材料準備，配比設計及試拌、澆鑄、養護及脫模」之品質依據，試驗方法及頻率，見表 2-2.1，及檢測資料之處理分析等。圖 2-2.2 所示即為輕質骨材混凝土材料品質檢驗流程，這些在規範中必須加以敘明「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」的達成方式。

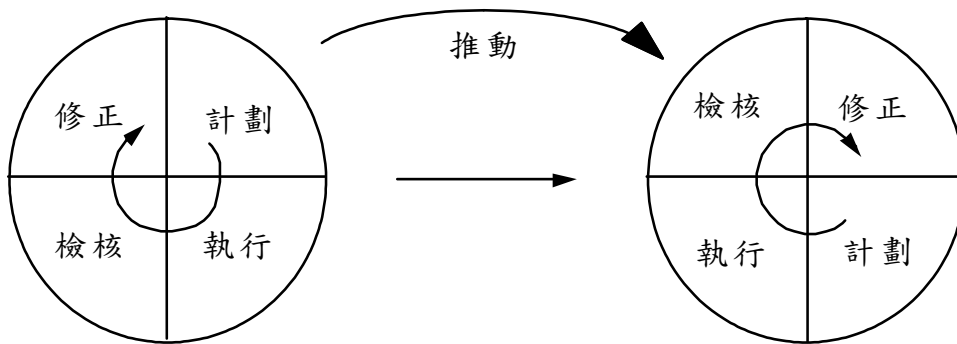


圖 2-2.1 應用 P-D-C-A 養成品質保證觀念

表 2-2.1 混凝土品質試驗頻率及規範

品質項目	試驗頻率	標準規範及失誤率
粒料料源及混凝土配比設計	級配	視需要
	比重及吸水率	每三個月及必要時
	健性試驗	每六個月及必要時
	小於試驗篩 #200 材料	視需要
		CNS 487,488, AASHTO T84,T85
		CNS 1167, AASHTO T104,5 循環不超過 12%(粗粒料)及 10%(細粒料)
		CNS 491, 粗粒料須小於 1.0%,細粒料須小於 5%

	粗粒料磨損率	每六個月及必要時	CNS 490, 3408, AASHTO T96, 500 轉不大於 40%
	粘土料含煤量	視需要	粗粒料須小於 0.25%；細粒料須小於 0.5%
	細粒料含煤量	視需要	CNS 1172, 須小於 1.0%
	粒料有機物	視需要	CNS 1164, AASHTO T21 不得較標準色深
	粗粒料扁長率	視需要	須小於 10%
	粗細骨材鹼性反應	料源變動	CNS 1240、(ASTM C239、C227)
	混凝土配合設計	料源變動	
拌 和 廠	粒料級配	每批次進料	
	粒料小於#200 材料	每批次進料	CNS 491, ASTM C33, 粗粒料須小於 10%；細粒料須小於 5.0%
	水泥品質	視需要	CNS 61
	水質品質	水源變動	CNS 1237, pH 值介於 4.5~8.5
	水泥溫度	視需要	不高於 50°C
	摻料濃度	每日一次	—
	混凝土含氣量	視需要	CNS 3090, 輸氣混凝土之含氣量不得超過定值之±1.5%
	混凝土坍度	隨時	CNS 3090, 1176, 坍度介於 50~100mm, 誤差值±25mm；坍度大於 100mm, 誤差值±38mm
	磅秤校正	每三個月及必要時	—
	計量精度	隨時	CNS 3090, 靜載重測試準確度為其最大容量之±0.4%
	拌和時間	隨時	CNS 3090, 小於 0.76m <sup>3</sup> 時間為 1 分鐘, 每增加 0.76m <sup>3</sup> , 則時間增加 1.5 秒
	拌和片磨耗	每一個月及必要時	不得大於 20mm
	混凝土坍度	隨時	CNS 3090, 1176

澆	混凝土溫度	每日至少 1 次 及必要時	CNS 3090, 10°C 至 32°C 間
	含氣量	視需要	CNS 9661 及 CNS 9662 ; AASHTO-152
鑄	試體製作及抗 壓強度試驗	依規範規定辦 理	CNS 1231, 1232, AASHTO T22 及 T126
	摻料品質	每批	CNS 12283, 3091, AASHTO T24
地	混凝土鑽心	視需要	CNS 1238, 1241, AASHTO T24
	混凝土養護劑	視需要	CNS 2178, AASHTO M148
	飛灰添加試驗	1000 公噸	CNS 3036 A2040
	爐石添加試驗		CNS 11826, 12223, 12549
	混凝土初終凝 試驗	視需要	AASHTO T187
	混凝土彈性模 數及包生比	視需要	CNS 1239, ASTM C-469
	註：粒料即為「骨材」		

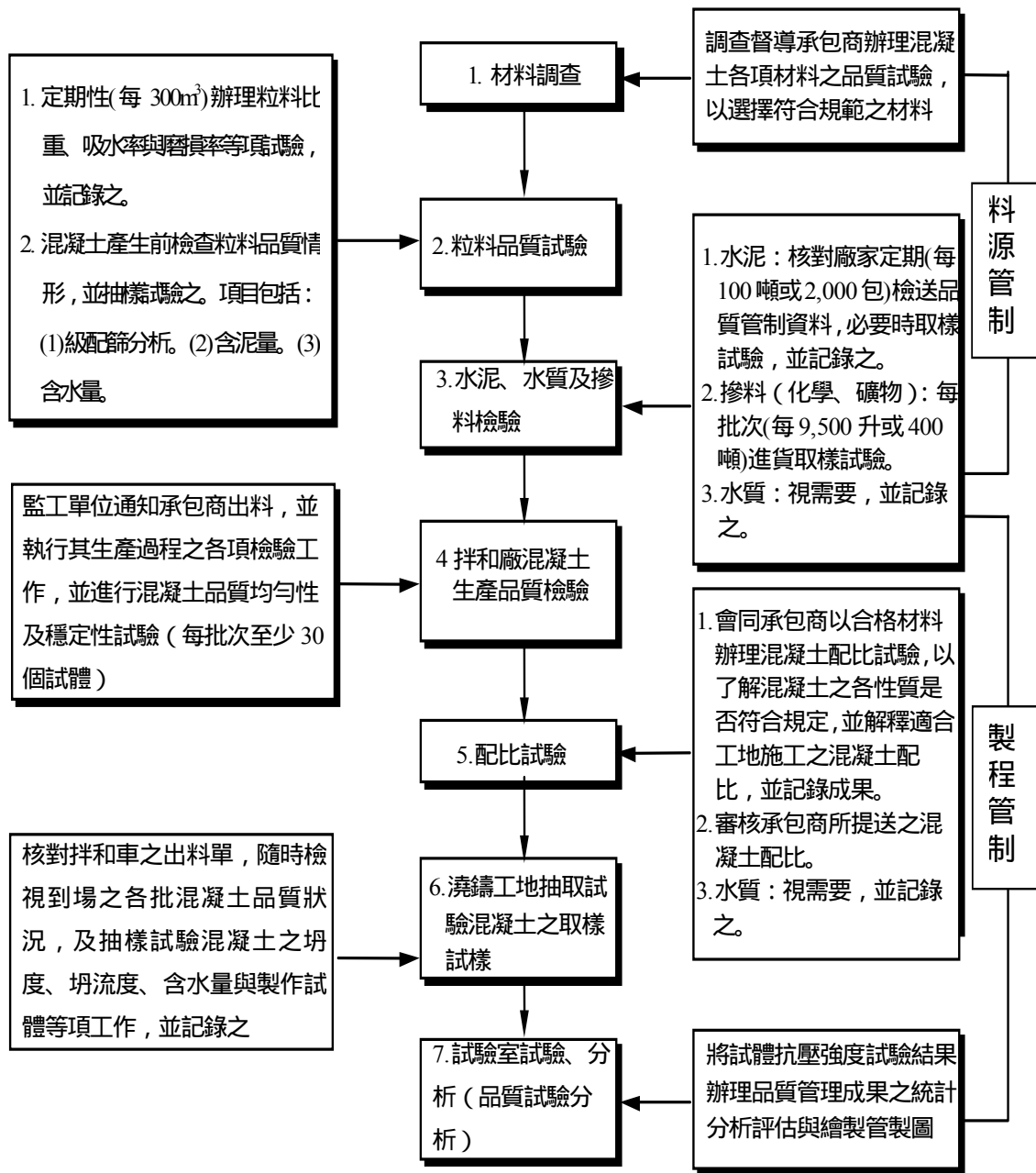


圖 2-2.2 輕質混凝土材料品質檢驗流程

### (一)輕質骨材混凝土材料要求

強調品質管制的重要性，並非消極應付檢驗，而係積極掌握品質狀態，所以指明品質管制應由廠商主動且自主地進行，定期檢測及繪製  $\bar{x}-R$  圖，以確保品質穩定性及正確處理材料。所有材料取得之憑證及料源證明也都是重要的品質資訊。

- 1.水泥：要求能充分發揮水泥水化膠結之功能，所以要求水泥細度愈細愈佳，早期強度要能充分，如此的混凝土所需水泥用量，會因品質提高而可以減少，所以水泥材料可以性能化來要求。
- 2.粒料：要求有良好混合骨材級配，但更重視粒料混合後的骨材最小孔隙率，以獲最大體積穩定性、經濟性及工作性為目的。品質佳輕質骨材具有低吸水性、顆粒密度低、及高硬度等性能，一般可採具有玻璃化外殼提升強度及內部發泡以降低密度的輕質骨材。
- 3.水：如同一般規範要求，品質應潔淨，且無有害物質。拌和水量應指明其用量限制，拌和水量愈低愈有利體積穩定性及耐久性。
- 4.摻料：添加卜作嵐及強塑劑為新版本 ACI 318「結構混凝土」最新的「耐久性設計」精神，強調混凝土強度品質由 W/B 來控制，應用此二種摻料可以改變水泥漿之「質」與「量」，為改善高性能輕質混凝土品質的重要材料。

## (二)耐久性準則

耐久性並非只強調水灰比 (W/C) 及早期滲透性，而係同時強調物理及化學之耐久性。耐久性問題之主要因子為「水量」、「水泥量」和「水泥漿量」，三者必須適當加以控制，以儘量減少為佳。

- a.用水量限制之目的在防止泌水及析離的產生，確保體積穩定性及防止耐久性劣化。

過去混凝土的觀念以控制 W/C 或 W/B 為主，認為水泥漿的品質對混凝土品質及體積穩定性關係密切，這是純粹由微觀角度來看水量與水泥的關係，水灰比 (W/C) 或水膠比 (W/B) 小，當然對水泥/膠結漿體來看是沒錯。然而對混凝土而言，並非完全正確，因為同樣的 W/B 品質，如果減少拌和水量，則對水量散失所造成的收縮壓力將減少，體積穩定性才會受到保證，簡單來說，對混凝土而言應該從巨觀孔隙著手才對。所以對含有大量骨材的混凝土而言，其中「水」的量，才是影響長期品質的重要

基因，限制最大用水量少於  $150\text{kg}/\text{m}^3$  的原因，即在於此。

- b. 降低水泥量，為要求水泥每公斤能至少發揮較高之強度。當然更重要的目的，在防止體積不穩定、混凝土物化性病變及混凝土中骨材與水泥漿體之變形不一致而致裂縫產生。此點不同於國內外現行規範，只限制水泥用量下限值，並採用改變水泥品質的方式，如採第 II 型、第 IV 型、第 V 型或低鹼水泥等，但由很多資料顯示水泥用量愈大問題愈嚴重，如帽樑裂縫及拱橋墩之龜裂，並非只限制水泥的「質」而已，「量」的控制更為重要。

減水泥另外主要原因為水泥中之  $\text{C}_3\text{S}$  水化產生之氫氧化鈣 (CH) 會結合外界之硫酸鹽產生石膏反應，再與  $\text{C}_3\text{A}$  進一步反應成膨脹性鈣鈣石而致體積膨脹。另外 CH 也易滲出，產生白華而致內部產生孔洞及空洞化，不利耐久性。所以高性能輕質混凝土係採用「水泥總量管制」方法，減少混凝土中總體之  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$ 、鹼含量或其他有害物質之量。

- c. 水灰比限制，要求  $W/C > 0.42$ ，此一限制在防止「自體乾縮」的發生。對水泥漿而言，水量愈多愈可使水泥之水化完全，而不致有太嚴重的「水泥化學反應收縮」(Chemical Contraction) 現象，這對  $\text{C}_3\text{S}$  而言至少  $W/C > 0.42$ ，但對第 I 型水泥而言，則  $W/C$  不止 0.42 而已，至少應  $> 0.5$ ，這種觀念必須重視，特別是高強度高性能輕質混凝土而言，否則數年後產生表面龜裂，其後果不堪設想。
- d.  $R_{56} \leq 20\text{K}\Omega\text{-cm}$ ，此一要求目的在確保結構體之水密性，因為混凝土電阻愈大，離子的移動阻力大，有害物離子滲入會很困難，那麼外界包括氯離子的動能降低，混凝土中鋼筋就愈不易腐蝕，見圖 2-2.3，且滲透性愈低。AASHTO 之規定則要求氯離子滲透之電流量在某些要求標準下，表 2-2.2 所示即為 AASHTO T259 或 ASTM C1202 中對防蝕可能氯離子電滲量高低範圍之要求。



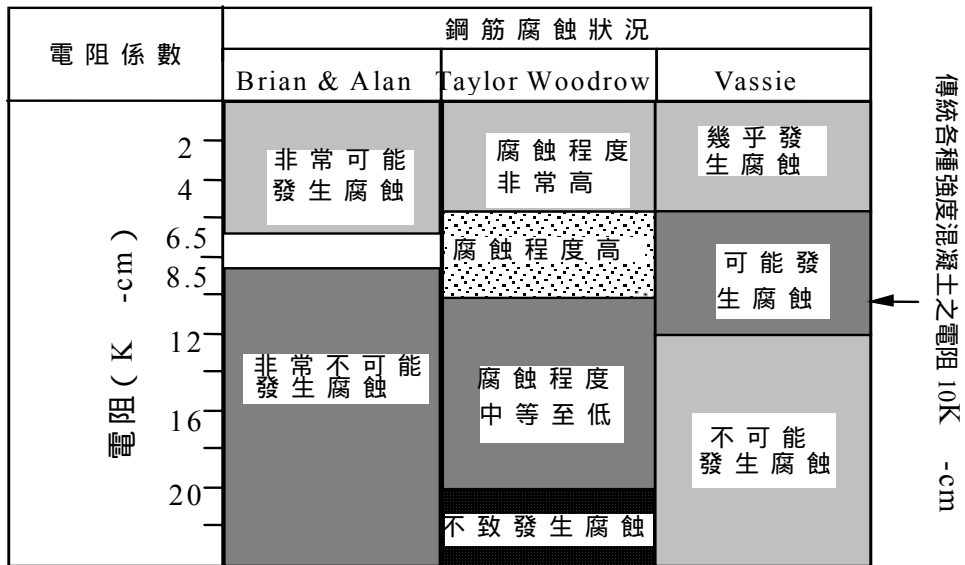


圖 2-2.3 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕

表 2-2.2 氯離子滲透性電流量之關係

電流通過 (庫倫)	氯離子滲透性
>4000	高
2000~4000	中度
1000~2000	低
100~1000	非常低
<100	忽略

e. 施工良好的規定，目的在防止施工作業所導致之耐久性問題，如泌水、析離、裂縫、蜂窩等不良症狀。

### (三) 安全性 (強度)

強度之資料在現有規範中，大都參考前人的資料，對高性能輕質混凝土而言，必須自行建立統計資訊，建立標準偏差值為  $S$ ，則混凝土強度設計可按公式(3-1)及(3-2)計算。

1. 當  $f_c \leq 350 \text{kgf/cm}^2$  時，

$$f'_{cr} = f_c + 2.33S - 35 \text{-----(3-1-1)}$$

$$f'_{cr} = f_c + 1.34S \text{-----(3-1-2)}$$

2. 而當  $f_c > 350 \text{kgf/cm}^2$  時，

$$f'_{cr} = 0.9f_c + 2.33S \text{-----(3-2-1)}$$

$$f_{cr}=f_c+1.34S\text{-----}(3-2-2)$$

式中  $f_{cr}$  : 混凝土配比目標強度；

$f_c$  : 結構混凝土規定強度。

原則上，各齡期混凝土強度係由下列三因素支配：

1. 早期 (<28 天) 強度由 W/C 控制。
2. 中期 (28~56 天) 強度由 W/B 控制。
3. 晚期 (>56 天) 強度由 W/S 控制。

所以高性能輕質混凝土要求建立 W/C、W/B、W/S 與強度之關係圖，作設計混凝土之參考。

#### (四) 工作性

工作性的要求在滿足施工現況，並非一味依據傳統經驗之要求。高性能輕質混凝土的工作性未必是流動的，但是在台灣採高流動化混凝土工作性之主要目的在能充分填滿模板，以免除柱頭或樑柱接頭鋼筋密佈，造成蜂窩、空心樑柱的問題。所以坍度由 0~270mm，坍流度則為 203~700mm 均可。但是 45 分鐘之坍度及坍流度應大於初拌之最低值。如果低坍度或「零」坍度，則適當強力振動施工技術應被強調，譬如使用鋪路機械鋪路等。

為了確保混凝土流動性，適時引入坍流度，這並非傳統振動 15 次之流度，而係在量測坍度時，在 50 秒鐘內，測定混凝土坍下擴散之直徑，見圖 2-2.4，此仍顯示混凝土可以流動之特質。當然未必高性能混凝土都必須是高流動性的 SCC，設計者可依需要而訂。但如果是平坦面如道路鋪面，則可能需要坍度很低，此時則必須引用 VB 稠度儀，以震動坍平時間，來規範工作性了。

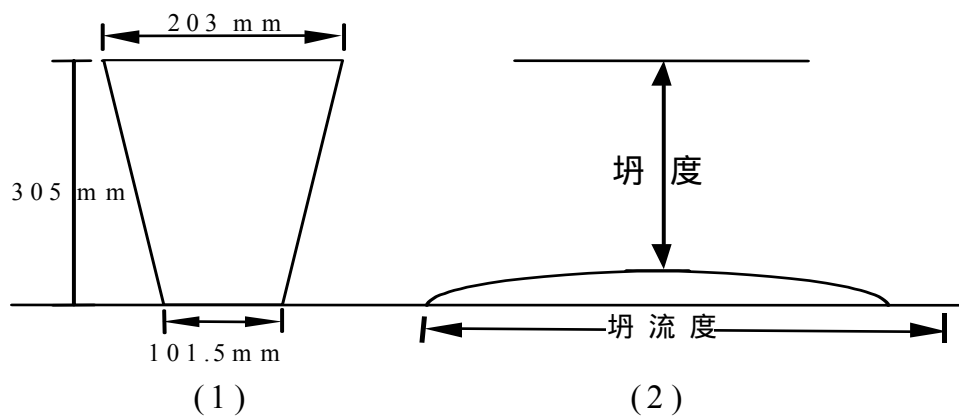


圖 2-2.4 坍度與坍流度之定義

#### (五)生態性及經濟性

生態性及經濟性之要求，在混凝土規範中被穩含於配比技術中，優良的混凝土本來應該是經濟性可行的。按 ACI 318「結構混凝土」規範，採用水膠比 (W/B)，使用卜作嵐材料，自然會降低水泥的需用量，減少能源耗損，足夠保障生態性及經濟性。

(六)其他性質：混凝土性質尚包括韌性、低透水性及低乾縮量等，規範可以「性能」規範之，決定配比之準則。

### 第三節 輕質混凝土配比的要件及試拌規劃

輕質混凝土係充分利用「摻料科學」及「粒料級配」的組合，同時達到優生配比之「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」準則。

(一)輕質混凝土配比的要件如下：

#### 1.摻料科學技術

減水劑及卜作嵐摻料為高性能輕質輕質混凝土製作的二大法寶，二者在高性能輕質輕質混凝土的角色，係扮演為達到減水及強化界面，和增強長期耐久性的目的所需。

#### 2.粒料級配組合

顆粒材料的堆積組合，目的在獲得最佳級配，減少空隙，也可以使高性能輕質輕質混凝土達到經濟性、工作性及耐久性之指標，而顆粒的大小，關係者水泥漿及骨材界面的鍵結力，同時影響工作性所需潤滑漿量。為了減少水泥漿量的需求，調整砂使顆粒較粗，減少砂之總表面積係有益的，亦即將細粒料 FM 提高在 2.8~3.2 範圍；而調整級配使混合料之空隙 ( $V_v$ ) 最小，則水泥總漿量可以減少。

(二)試拌規劃

#### 1.配比試拌

混凝土配比之確認，並不能只按拌和廠之口頭保證，而必須建立在 30 個以上統計數據上，也就是眼見為憑的確認邏輯，這種確認工作至少有二次。第一次稱之為「均勻性」，即驗證同一批次混凝土拌和效果，及拌和的均勻性。檢測項目包括坍度、坍流度、溫度、空氣含量、單位重及抗壓強度。第二次為不同時間，不同批次混凝土，尤其天候改變下之不同批次混凝土，再行測定均勻性。比較二次均勻性，如果結果變量係數不超過 5%，則表示混凝土「穩定性」佳。二次均勻性測試顯示穩定性佳，即表示

拌和廠管理的 5M（人力、材料、機械、資金、方法）均達品質水準，圖 2-3.1 簡示均勻性及穩定性之意義。

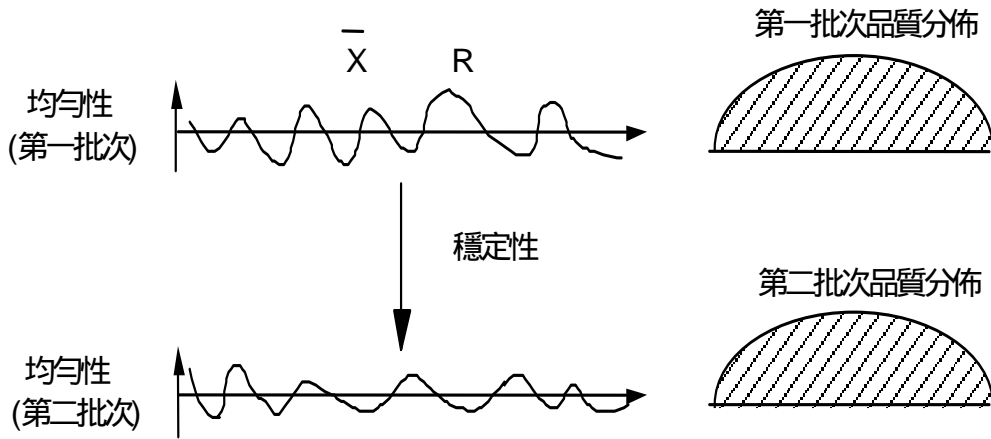


圖 2-3.1 混凝土均勻性及穩定性的定義

## 2. 量產模擬

對於大型工程，混凝土數量甚龐大，為了保障品質，進行量產模擬殊為重要。量產模擬試驗之目的在培養混凝土生產者及施工者的默契及團隊合作精神，透過模擬試驗工作，包括泵送機操作手及混凝土施工人員，均能充分瞭解正確品管的要義，使品管工作能落實。同樣也是透過「P-D-C-A」之群集訓練而產生，見圖 2-3.2 所示。

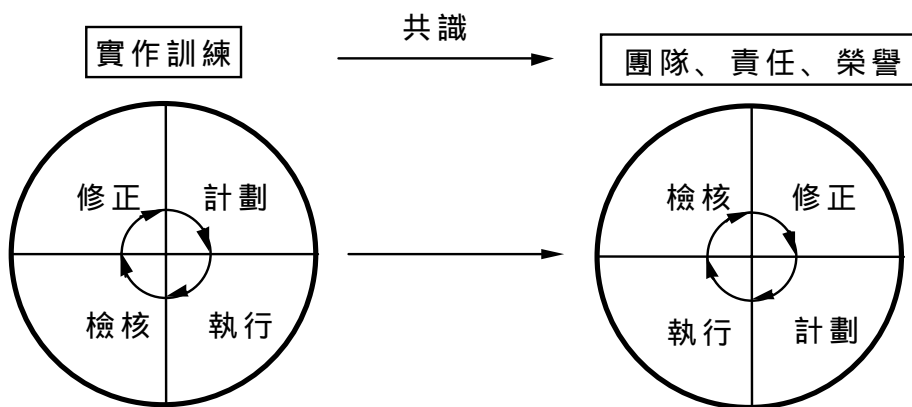


圖 2-3.2 應用 PDCA 的群集訓練出合作無間的精神

## 3. 配比核定

配比經過充分驗證，檢核配比設計達到性能準則之「安全

性、耐久性、工作性、經濟性、生態性」要求，最後核定適合規劃工程之施工配比，此時所有步驟均完全模擬及演練至少一次以上，混凝土品保觀念的共識方可以產生。

#### 4. 輕質混凝土的產製及品質驗證

混凝土的產製及品質檢驗之要點為計量準確、拌和均勻、大氣影響最低、施工品管佳、劣品處理適當的方法等。產製最重要的結果就是混凝土最終的性能，當然各種環境下混凝土會因為耐久性需求不同而有不同之配比。

#### 5. 輕質混凝土的澆鑄

高性能輕質混凝土澆鑄，由於混凝土觀念的改變與傳統混凝土稍有不同，所以澆鑄方法與技術亦有所不同，不過仍必須謹慎避免材料析離、泌水、蜂窩及冷縫的產生。澆置的方法因時因地制宜，不可一視同仁。

#### 6. 輕質混凝土的養護及脫模

高性能輕質混凝土的材料，如同一般混凝土，養護的工作是不能免除的，養護方法正確性是很重要，一經施工完成即應繼續水養護3天以上。脫模時亦應謹慎小心，以防損壞混凝土，造成裂縫。

#### 7. 輕質混凝土結構品質驗證

輕質混凝土係品質保證的混凝土，所以不只是混凝土試驗的檢測而已，其品質合格與否，決定於結構物混凝土品質。所以必須製作匹配試體，並以非破壞性技術評估及檢測結構物品質。而合理的品管工作所耗支之人力、物料及機械，基本上由業主擔提所需費用，而當品質被質疑時，才由施工者負擔檢測及評鑑費用，如此的規定等於保障業主，也對不合格之廠商處以罰則。

#### 8. 結構混凝土品質之驗收

高性能輕質混凝土最後的驗收，係建立在整體品質的合宜性

上，包括結構體外形、平面、外觀、結構物的電阻係數，及其他有關檢驗。目的在全面保障結構物設計品質。表 2-3.1 為公共工程委員會所訂施工品質評鑑之標準，可資參考。

表 2-3.1 公共工程委員會混凝土完成表面之評鑑標準

項目	標準	建築工程	廠房工程	隧道工程	橋樑工程	防洪及防潮工程
完成面尺寸	網要	1.柱、樑無明顯變形； 2.開口無明顯變形；3.樓皮中央無下陷變形；4.樓梯級高、級深均勻一致		1.無明顯變形；2.開口無明顯變形；3.頂拱無下陷變形；4.隧道壁面平直，無明顯歪斜	1.混凝土完成面尺寸與施工圖相符，無明顯變形	—
	細部	1.柱、樑無變形，尺寸容許誤差 $\pm 10\text{mm}$ ；2.開口位置容許誤差 $\pm 25\text{mm}$ ；3.樓皮中央無下陷變形；4.級高、級深容許誤差 $\pm 5\text{mm}$		1.無變形；2.開口位置容許誤差 $\pm 25\text{mm}$ ；3.頂拱無下陷變形；4.隧道壁面平直，10M內偏差小於2mm	1.混凝土完成面尺寸與施工圖相符，容許誤差在 $+13\text{mm}\sim-7\text{mm}$ 以內；2.橋面版厚度容許誤差在 $+7\text{mm}\sim-4\text{mm}$ 以內	—
垂直及水平度	網要	1.柱面垂直，無明顯歪斜；2.牆面垂直，無明顯偏斜；3.樑、版無凹凸不平現象		—	1.完成垂直面無明顯偏斜；2.完成水平面無明顯偏斜	1.垂直面無明顯歪斜；2.水平面及斜面無明顯凹凸
	細部	1.柱面應垂直，垂直容許誤差 $\pm 20\text{mm}/3\text{m}$ ；2.牆面應垂直，垂直容許誤差 $\pm 20\text{mm}/3\text{m}$ ；3.每層樓地板面高程容許誤差 $\pm 10\text{mm}$ ；4.水平容許誤差 $\pm 10\text{mm}/3\text{m}$		—	1.完成面之暴露部份垂直及水平容許誤差 $\pm 13\text{mm}/3\text{m}$ ；2.不暴露部份垂直及水平容許誤差 $\pm 25\text{mm}/3\text{m}$	1.柱牆墩面應垂直，垂直容許誤差 $\pm 20\text{mm}/3\text{M}$ ；2.水平及斜面容許誤差 $\pm 20\text{mm}/3\text{M}$
及	網	1.無蜂窩或空洞				1.無蜂窩或空

		2. 裂縫寬不超過2mm(約拾元硬幣厚度)；3.裂縫長不超過10cm；4.開口、角隅無明顯裂縫	2.開口、角隅無明顯裂縫；3.每模接縫無明顯突出	2.無破損或明顯之裂縫	洞及破損等；2.裂縫寬不得超過2mm；3.裂縫長不得超過500mm；4.開口、角隅無明顯裂縫；5.無冷接縫
	細部	1.無蜂窩或空洞			1.無蜂窩或空洞及破損等；2.裂縫寬不得超過2mm；3.裂縫長不得超過500mm；4.開口、角隅無明顯裂縫；5.無冷接縫
		2. 裂縫寬不超過2mm；3.裂縫長不超過10cm；4.開口、角隅無明顯裂縫	2.開口、角隅無明顯裂縫；3.每模接縫無明顯突出，突出高度不超過10mm	2.無破損或明顯之裂縫	
—		5.混凝土澆置後保持7天養護	—	—	
外觀	網要	1.表面平整無爆模突起現象；2.混凝土顏色無明顯差異(無冷接縫)；3.無鋼筋或管線外露；4.表面無大量修補痕跡(不超過檢查點面積10%)		1.表面平順無凹凸不平現象；2.混凝土顏色無明顯差異(無冷接縫)；3.表面無修補痕跡	—
	細部	1.表面平整無爆模突起現象；2.混凝土顏色無明顯差異(無冷接縫)；3.無鋼筋或管線外露；4.表面無大量修補痕跡(不超過檢查點面積10%)		1.表面平順無凹凸不平現象；2.混凝土顏色無明顯差異(無冷接縫)；3.表面無修補痕跡	—



#### 第四節 預拌混凝土廠自主評核表(本資料參考引用：內政部 建築研究所八十一年六月預拌混凝土廠品質認證制度 專題研究計畫)

符合：評核事項符合要求。                      需改善：評核事項必須改善。

缺項：評核事項未實施，須補辦。    不需要：該廠不需該事項。

評核事項	評核結果				評語
	符合	需改善	缺項	不需要	
1.組織與管理					
1.1 預拌混凝土廠應有明確之組織圖及執掌表。					
1.2 應分別設置生產部門與品質管制部門（以下簡稱品管部門），品管部門應向管理階層負責，不得隸屬於生產部門。					
1.3 預拌混凝土廠廠長等管理階層對於高性能輕質混凝土品管有正確之態度。					
1.4 管理階層人員應具備高性能混凝土之品管與生產技術。					
1.5 管理階層應與品管及生產等部門定期集會商討有關資料，以解決品質及其他問題。					
1.6 廠方應專設員工研究發展和改進技術之措施。					
2.人員訓練					
2.1 應有生產及品管等技術人員之任用制度。					

評 核 事 項	評核結果				
	符 合	需 改 善	缺 項	不 需 要	評 語
2.2 應有生產及品管等技術人員之年度訓練計劃。					
2.3 應按任用制度及訓練計劃執行。					
2.4 應具高性能輕質混凝土教育訓練課程證明。					
3. 配比設計及其變更之管制					
3.1 應建立預拌混凝土配比設計作業程序。					
3.2 應建立配比及製程變更之書面管制制度。					
3.3 配比設計等工程資料應經品管及生產等有關部門檢討其可行性。					
3.4 預拌廠廠長或其指定部門應隨時檢查各部門使用最新之工程資料。					
4. 標準、規格及檢驗文件					
4.1 應備有所生產預拌混凝土之各種中國國家標準(CNS)、產品規格、規章及檢驗說明等相關文件，並適當運用。					
4.2 品管部門應定期檢討配比設計之適用性。					
4.3 各執行部門應具備工作所需之有關文件。					
4.4 應訂定臨時發生事故時之緊急處理辦法，並適當應用。					
5. 合約之檢討					
5.1 應建立書面制度程序，以檢查或檢討出售混凝土合約要求。					
5.2 前項制度程序應包括合約中特殊條款之解決方法，以確保達成合約要求。					
5.3 每件合約應依 ISO 制度檢討，並保存檢討記					

評 核 事 項	評核結果				評 語
	符 合	需 改 善	缺 項	不 需 要	
錄。					
5.4 合約檢討應由品管及生產等有關部門參與。					
5.5 高性能輕質混凝土技術規範依高性能輕質混凝土特別條款規定。					
6.材料採購					
6.1 材料採購應有評價、核定及管制 ISO 制度。					
6.2 材料採購合約應包括應具備之品質要求。					
6.3 材料品質之要求如無指定適用範圍，應以下列規定為準。					
6.3.1 水泥：					
(1)應符合 CNS 61 [卜特蘭水泥]之規定。					
(2)不同種類水泥不得交替使用。					
(3)購方未指定使用水泥種類時，則應使用 CNS 61 規定之第 I 型水泥或 IS 型水泥。					
6.3.2 粒料：應符合 CNS 1240 [混凝土粒料] 及高性能輕質混凝土特別條款之規定。					
6.3.3 摻料：					
(1)摻料之使用須經購方書面同意。					
(2)須符合以下規範及高性能輕質混凝土特別條款規定：					
CNS 3091 [混凝土用輸氣附加劑]					
CNS 12283 [混凝土用化學摻料]					
CNS 3060 [卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煅燒卜作嵐撥和物]					
CNS 11890 [混凝土用高爐爐渣細粒料]					

評核事項	評核結果				
	符合	需改善	缺項	不需要	評語
CNS 12833 [流動化混凝土用化學摻料]					
6.3.4 水：					
(1)拌和用水應不含有害量之油、鹽類、鹼性物、有機物及他種有害物質。					
(2)含有不潔物或有異味之水不得作為拌和用水，除示該水有無損混凝土品質之使用記錄或資料，否則不予採用。					
(3)有疑問之水，其品質符合 CNS 3090 表 1 之規定者得採用。					
6.4 應有進料檢驗制度，並確實執行。					
6.5 需經試驗室檢驗之材料，應依規定辦理。					
6.6 進料檢驗站應有採購訂單、材料規格與驗收標準可資應用。					
6.7 應訂定不合格材料之處理程序，並確實執行。					
6.8 材料於放行使用前應加以管制。					
6.9 應要求水泥、摻料等材料供應商提供品質檢驗合格證書，並應適當抽樣檢驗（得委外檢驗）。					
6.10 應保持材料採購及檢驗紀錄。					
7.材料管制					
7.1 應建立材料存量管制制度，並予有效運用					
7.2 各項材料應有適當庫房、料槽或儲存場所，並分別規定如下。					
7.2.1 水泥：					
(1)水泥儲槽須密閉防潮。					

評核事項	評核結果				評語
	符合	需改善	缺項	不需要	
(2)不同種類及廠牌水泥應有分別儲槽，不得互混。					
(3)各水泥儲槽內容應有明顯標示，以防誤用和誤裝料。					
(4)使用如飛灰或爐渣粉等卜作嵐材料時，應有防止誤裝填入水泥儲槽之措施。					
7.2.2 粒料：					
(1)各種粗細粒料應分離儲存，不得互混。					
(2)粒料堆儲於地面時，應為水泥混凝土等堅實且排水良好之地面，避免受地面塵土污染。					
(3)應適當卸料、堆置及輸送，避免材料析離。					
7.2.3 水：					
(1)應具足量之水槽。					
(2)水槽應有防污、防晒遮蓋，避免污染及溫度過高。					
(3)必要時應具冰水機設備或液態氮冷卻設備。					
(4)沖洗拌和機後之洗出水欲作為拌和水，應經試驗符合 CNS 3090 之要求。					
7.2.4 摻料：					
(1)各種摻料應分隔儲存，不得互混。					
(2)各種摻料儲槽內容應有明顯標示。					
(3)各種摻料儲槽應有防污染遮蓋。					
(4)液體摻料之溶液為不穩定之液體時，應備妥攪拌設備隨時攪拌以防沈澱。					
7.2.5 卜作嵐材料（如飛灰或爐渣粉等）：					
(1)儲槽須密閉防潮。					
(2)內容應有明顯標示，以防誤用和誤裝。					

評 核 事 項	評核結果				
	符 合	需 改 善	缺 項	不 需 要	評 語
7.3 對水泥和摻料等有使用期限之材料，應作時效之儲存管制。					
8.製程及品質管制					
8.1 應建立品質管制制度。					
8.2 應設有生產管制單位或品質管制專職人員。					
8.3 生產單位及品質管制負責人員應經檢定合格並領有證書。					
8.4 應有適當之作業流程說明書（或圖）。					
8.5 現場作業應與作業流程說明書（或圖）相符。					
8.6 應有機器操作說明書及之各項作業說明單，並確實應用。					
8.7 作業說明單中應有安全衛生規定。					
8.8 應具備生產管理紀錄。					
9.拌和廠佈置與物料搬運					
9.1 拌和廠佈置與物料搬運應有週詳設計。					
9.2 現場物料與作業流程應適當配合，工作場所應有足夠照明。					
9.3 現場搬運物料之設備與容器應適當、安全與清潔。					
10.材料計量					
10.1 秤：					
(1)材料計量用秤應經度量衡檢定合格。					
(2)各秤之準確度至少為其最大容量之0.40%。					
(3)秤之靈敏度應高於標稱容量之0.1%，即計量器之指示器應對加入計量器中達其標稱容量之0.1%之重物有所反應。					
(4)針盤指示秤之指針活動範圍應大於計量器使用範圍，下限應至少低出最大容量之					

評核事項	評核結果				評語
	符合	需改善	缺項	不需要	
5%，上限應至少高出最大容量 4%。					
(5)數位指示秤之數值應夠大易讀，其最小數值增加量應小於穩量之 0.1%。					
(6)數值顯示器應位於適當位置，讓操作員在稱料時能全盤準確讀得且易於控制。					
(7)應備有校驗用標準法碼，供校驗準確度。校驗用標準砝碼總質量至少遠最大秤容量之 50%。標準砝碼應定期校正並有適當維護。					
(8)平常每六個月至少校驗一次，若有故障維修、遷移等情形，應隨時校驗。					
(9)度量衡檢定合格證書、定期及臨時校驗紀錄、故障維修紀錄等，應建檔保存隨時備查。					
10.2 稱量斗：					
(1)應具有適當的稱量斗用於稱水泥、粒料、水及附加劑，稱量斗應自計量器自由懸掛且備有良好的裝料及卸料設備。					
(2)於稱量斗稱重時，應保持裝料機械不接觸所稱量之材料。					
(3)裝料機械及水泥稱量斗間應備有防塵封罩，此封罩不得影響稱量準確度。					
(4)稱量斗之裝料機械具材料止漏之良好功能，使稱料達許可差範圍內。					
(5)震動機及其它附屬設備之安裝不得影響稱重之準確度。					
(6)有適當的防風設備，預防空氣流動而影響					

評核事項	評核結果				
	符合	需改善	缺項	不需要	評語
稱重之準確性。					
10.3 水泥與卜作嵐材料之計量：					
(1)水泥除經購方許可用袋數（每袋 50kg）計算外，概以質量計。					
(2)水泥以質量計量時，須備專用秤量槽，不可與其他材料混用，但飛灰或卜作嵐材料可與水泥累積計量，且水泥之秤量應先於卜作嵐材料。					
(3)若每盤混凝土使用水泥質量，					
(1)在計量器最大容量 30%以下時，其許可差為： $\pm 1\%$ 。					
(2)若為 30%以上時，其許可差為： $\pm 1\%$ 。					
(4)如水泥以袋數計量時，均以整袋計，不滿一袋時，概以質量計。					
10.4 粒料之計量：					
(1)粒料以質量計量，每盤可以乾粒料質量為基準，亦可以乾粒料質量加上實際含水量之所需質量計量。					
(2)粒料如係分別計量，其準確度應有 2%以內。					
(3)若係累積計量，					
(1)其質量超過計量器容量 30%時，每一次連續累重其誤差應在累重之 1%以內。					
(2)若累重在計量器容量 30%以內時，其誤差為累重之 $\pm 2\%$ ，或計量器容量之 $\pm 0.3\%$ 以內，以兩者中較小者為準。					
(4)應依粒料之實際含水量調整粒料每盤質量。					
10.5 水之計量：					
(1)水得用質量或體積計量，但加入冰時應以					



評 核 事 項	評核結果				
	符 合	需 改 善	缺 項	不 需 要	評 語
質量計。 (2)拌和水包拌和用之水、冰、粒料表面水及 摻料含水量。 (3)加入水之準確度須為全部拌和水總質量或 體積之1%之以。 (4)全部水量（包括沖洗水）之計量準確度為 指定全部用水量之±1%。 (5)水體積計量器至少每90天應校驗一次。 (6)除非採用其他方法能準確地測出水箱內水 量，否則水箱外應裝有龍頭及玻璃管以測 定箱內水量。					
10.6 摻料之計量： (1)粉狀摻料應以質量計量。 (2)糊狀或液狀摻料得以質量或體積計量。 (3)其計量之許可差應在需要量之±1%以內。 (4)摻料之體積計量器至少每90天應校驗一 次。 (5)除非有實驗證明可行，否則不同摻料應分 別計量並分別加入拌和機。					
11.拌和廠 11.1 拌和廠應備完整之配料系統，以確保各項 材料按規定數量和順序進拌和機，並按規 定時間完成拌和。 11.2 配料系統應備記錄器，提供每一盤混凝土 拌和中所採用之水泥、粒料侷水等質量之 記錄，其保存至少五年。					
12.拌和設備 12.1 拌和機應為固定拌定式拌和機。					

評核事項	評核結果				
	符合	需改善	缺項	不需要	評語
12.2 拌和機應裝置一金屬板標明轉速和最大拌和混凝土體積。					
12.3 每次拌和量不得大於拌和鼓總容量之 80%。					
12.4 拌和機應有可靠之計時裝置，未達規定拌和時間，無法運行卸料。					
12.5 拌和機應在規定時間內將混凝土拌和均勻，以符合高性能輕質混凝土特別條款。					
12.6 拌和機安裝完成或經整修後均應辦理均勻性測試，並每半年至少測試一次。					
12.7 拌和機應備有完整操作手冊、維設手冊等，並建檔隨時備查。在操作室中應明顯標示各項操作準則或程序。					
12.8 拌和機應定期檢查維護，以防硬化混凝土或砂漿之附著及葉片之磨損（小於 3mm 間隙），檢查維護資料應建檔隨時備查。					
13.拌和					
13.1 預拌混凝土應以中央拌和式生產。					
13.2 拌和機應在其製造廠商規定之容量及轉速下操作。					
13.3 在炎熱氣候中，應盡可能降低混凝土濕度，唯須徵求購方之同意。					
14.機器設備維護					
14.1 應建立廠房及機器設備之定期維護制度。					
14.2 機器設備應符合安全及產製需求。					
14.3 機器設備應設立資料卡，並指定專人負責管理。					

評核事項	評核結果				評語
	符合	需改善	缺項	不需要	
15.攪拌車 定義：攪拌車(Agitators)為附轉筒容器之卡車或其它車輛，用於裝載已在拌和廠拌妥之混凝土，運送期間維持充分攪動以預防材料分離。至少有 90%之攪拌車符合以下要求。					
15.1 轉筒容器內部狀況正常：無明顯之硬化混凝土堆積現象。					
15.2 裝料及卸料之啟口及滑槽狀況良好：無明顯之水泥或混凝土堆積，滑槽與漏斗表面皆光滑乾淨。					
15.3 攪拌車之轉筒裝載混凝土體積不超過全體積之 80%。					
15.4 車上備有一塊金屬板，其上記載攪拌車製造商建議之最大攪拌速率，該速率不得大於 6rpm，採用之速率能使攪拌車運作正常。					
15.5 車上備有一只記錄轉筒旋轉次數之計數器。					
16.裝運					
16.1 應以攪拌車運送混凝土。					
16.2 預拌混凝土交與購方時，以 m <sup>3</sup> 為單位。					
16.3 應檢查每輛攪拌車車號並予登錄。					
16.4 應核對每輛攪拌車之裝運預拌混凝土種類與數量等並予登錄。					
16.5 預拌混凝土出廠前應備妥交貨證明憑單，供交購方收執，其項目至少如下：					
(1)預拌混凝土廠名。					
(2)交貨證明憑單之次序號數。					
(3)生產日期。					

評核事項	評核結果				
	符合	需改善	缺項	不需要	評語
(4)運送車輛號碼。					
(5)承購人名稱。					
(6)交貨地點及工程名稱。					
(7)混凝土數量。					
(8)混凝土種類。					
(9)規定強度。					
(10)坍度。					
(11)水泥與粒料開始拌和時間及裝車時間。					
16.6 購方要求時，交貨證明憑單應增列項目，如：					
(1)水泥種類、廠牌和用量。					
(2)摻料種類、廠牌和用量。					
(3)計算總含水量所必須之資料，如：粒料表面含水量、預拌混凝土廠所加水和冰之數量等。					
(4)粒料最大粒徑。					
(5)粗細粒料之用量。					
(6)混凝土配比。					
(7)預拌混凝土廠負責人或其代表之簽認。					
16.7 攪拌車運送混凝土時，須在其設計攪拌速率下運轉。					
16.8 運送途中嚴格禁止加水。					
16.9 攪拌車裝入混凝土前，應快速反轉車斗，提出內部積水再進行裝料動作。					
17.製程品質管制					
17.1 應建立製程品質管制制度，並確實執行。					
17.2 品管部門應有專責負責人員，並配有足夠之品管人員。					
17.3 品管部門負責人員應經檢定合格並領有合					

評 核 事 項	評核結果				
	符 合	需 改 善	缺 項	不 需 要	評 語
格證書。					
17.4 混凝土試拌完成後，正式生產開始時，應對最初產品特別檢驗。					
17.5 製程品質檢驗站應按作業流程說明書（或圖）之規定設置。					
17.6 檢驗站應有檢驗說明書，並確實應用。					
17.7 各檢驗站應備有必須之取樣、量測或檢驗設備。					
17.8 檢驗站應按規定執行檢驗，並保持紀錄。					
17.9 品管部門應定期提出品質檢驗及分析報告，並發送生產等指定部門。					
17.10 各部門收到報告後，應即彙整，並作適常之分析、研判與處理。					
17.11 各項試驗結果與分析報告應分類依序建檔。					
18.新拌混凝土之取樣與檢驗					
18.1 取樣應依 CNS 1174 之規定。					
18.2 試驗者應經檢定合格並領有合格證書。					
18.3 坍度誤差應符合 CNS 3090 之坍度許可差要求。					
18.4 以強度定為混凝土接納基準時，標準試樣應以 CNS 1231 [工地混凝土試體之製作及養護法]之規定製作及養護。					
18.5 強度、坍度、溫度及含氣量（限用於輸氣混凝土）試驗，每種混凝土每 115m <sup>3</sup> 至少試驗一次。					
18.6 每天每種混凝土至少進行強度試驗一次。					
18.7 每種混凝土之全部強度試驗結果須滿足下列規定。					

評核事項	評核結果				評語
	符合	需改善	缺項	不需要	
(1)任何連續3次強度試驗結果之平均值不得小於設計強度 $f'c$ 。					
(2)任何一次強度試驗之結果不得低於 $f'c-35\text{kgf/cm}^2$ 。					
19.量測及檢驗設備					
19.1 應備有適當之檢驗場所及所需之儀器等設備。					
19.2 量測與檢驗設備應設有資料卡，並指定專人負責管理。					
19.3 應訂定各種量測與檢驗設備定期校驗制度，並確實執行。					
19.4 應有量測與檢驗設備之校驗紀錄，並分析所訂週期是否適當。量測與檢驗設備應有適當備份，供校驗及維修期間之需。					
19.5 品管主管應定期抽查量測檢驗設備之可用狀態及使用情形。					
19.6 預拌混凝土廠應在拌和廠所在地設置實驗室，而積在 $50\text{m}^2$ 以上，並應有足夠設備和人力，定期辦理以下試驗：					
1.水泥：					
(1)凝結時間(CNS 785)。					
2.粗骨材：					
(1)篩分析(CNS 486)。					
(2)含水量(CNS 11298)。					
(3)比重(CNS 488)。					
(4)吸水率(CNS 488)。					
(5)小於 $0.075\text{mm}$ (NO.200 篩)含量(CNS 491)。					
3.細骨材：					
(1)篩分析(CNS 486)。					

評核事項	評核結果				
	符合	需改善	缺項	不需要	評語
(2)細度模數(CNS 1240)。 (3)含水量(CNS 11298)。 (4)比重(CNS 487)。 (5)吸水率(CNS 487)。 (6)小於 0.075mm(NO.200 篩)含量(CNS 491)。 (7)有機物含量(CNS 1164)。 4.水： (1)pH 值(CNS 1237)。					
5.摻料： (1)比重(CNS 12283)。 (2)烘乾殘留物(CNS 12283)。 (3)混凝土試拌(CNS 12283)。 6.混凝土： (1)坍度(CNS 1176)。 (2)體製作(CNS 1230、1231)。 (3)試體養治(CNS 1230、1231)。 (4)試體抗壓強度試驗(CNS 1232)。 (5)配比設計(CNS 12891)。					
20.統計分析 20.1 應用適當品質管制圖或其他統計方法。 20.2 應有製作管制圖及統計方法之書面說明。 20.3 管制圖及統計方法應按書面說明製作辦理。 20.4 應在製造場所顯示最新之管制圖或統計資料。 20.5 應對品管及生產人員講解管制圖或統計資料之使用方法。 20.6 管制圖或統計資料應提供管理人員審核運					

評核事項	評核結果				
	符合	需改善	缺項	不需要	評語
用。 20.7 應定期按混凝土與材料種類等，分別計算標準差及變異係數，以供配比設計之用。					
21.售後服務					
21.1 應訂有顧客抱怨之處理辦法。					
21.2 受理顧客抱怨之單位，應將抱怨資料提供給生產與品管等部門處理。					
21.3 顧客抱怨資料應逐一紀錄、統計分析，並追查原因，便於改善。					
21.4 顧客抱怨統計圖表及記錄是否保持完整。					
22.回饋矯正措施					
22.1 應建立材料、生產及品管等資料之回饋矯正制度，並確實執行。					
22.2 對回饋矯正制度之執行情形應定期考核檢討，必要時應作修正。					
23.工廠環境與衛生					
23.1 應建立工廠衛生管理制度。					
23.2 辦公室與廠房設施之一般外觀情況應正常良好。					
23.3 拌和機作業室應設有效之除塵設備。					
23.4 控制室等必要場所應設隔音、除塵和通風空調等設備。					
23.5 機器設備及工作場所應保持清潔狀態。					
23.6 應建立廢材料與廢混凝土處理辦法，並確實執行。					
23.7 預拌廠內應設有完善員工餐飲和衛浴等設備，並管理良好。					
23.8 應將衛生管理結果作檢討、分析、評價及作必要改善。					



評 核 事 項	評核結果				評 語
	符 合	需 改 善	缺 項	不 需 要	
24 員工安全措施					
24.1 對危險之操作及地區應訂定員工安全措施。					
24.2 應遵照上述安全措施規定執行。					
24.3 應定期檢查安全措施。					
24.4 曾發生過之安全案件應有防止再發生措施。					

總評語：

---



---



---



---



---



---



---



---



---

本資料參考引用：

內政部建築研究所八十一年六月

預拌混凝土廠品質認證制度專題研究計畫

## 第五節、結論

1. 混凝土須經過嚴格的品質保證工作，自「料源管制」、「製程管制」及「成品管制」等過程都須要經過仔細控管，如此方足以保障混凝土品質的均勻性及穩定性，這種混凝土才是營建工程所需的混凝土品質。
2. 高性能輕質混凝土重要的進階目標在達到「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」的準則
3. 高性能輕質混凝土與傳統混凝土之差異最重要在「品質透明化上」、「全面品質保證工作上」(TQC)及ISO14000之精神。另外，優生高性能混凝土講求「混凝土中含水量及水泥量愈低，水泥所需水化水量愈高之耐久性準則」，即由巨觀至微觀，全方位防衛混凝土免受到外界的風化作用，免除傳統高性能混凝土及一般傳統混凝土之弊端。



### 第三章 非結構用途輕質骨材混凝土產品之 產製技術開發

#### 摘 要

本計畫在協力廠商提供設備下，進行輕質混凝土磚立即脫模成型之產製技術研究。本研究取輕質骨材粒徑 7 mm，配合以(1)波索蘭材料及(2)細砂取代不同水泥體積拌製之漿體，填充骨材粒間孔隙體積，探討可立即脫模成型輕質骨材混凝土磚之配比及產製技術，並量測各配比之輕質混凝土其單位重、抗壓強度、抗彎載重、熱傳導係數及耐火性。

在可立即脫模成型輕質骨材混凝土磚之配比中，以波索蘭材料取代部分水泥體積者，其水膠比介於 0.27 - 0.39 間。填充孔隙體積比須 0.3 以上方能成型。單位重介於 761 至 1143 kg/m<sup>3</sup>，混凝土磚 28 天抗壓強度介於 91 至 342kg/cm<sup>2</sup> 之間；抗彎載重介於 450 至 1477 kg 之間；熱傳導係數介於 0.215~0.332 kcal/m<sup>2</sup>·°C·hr 之間，約為普通混凝土之 1/5。無論單位重、抗壓強度、抗彎載重及熱傳導係數均隨波索蘭材料取代水泥體積的增加而減低，且隨填充孔隙體積比的增加而增加。輕質混凝土磚受 400 °C 高溫 5 小時後平均殘留強度介於 54% - 74%之間。填充孔隙比越小者，高溫後強度損失愈大。波索蘭材料取代水泥漿體量越多時，其強度損失愈多。熱傳導係數在高溫後有升高之趨勢。

以細砂取代部分水泥體積者，其水膠比介於 0.36 至 0.51 之間。填充孔隙體積比須 0.4 以上方能成型。單位重介於 792 至 11093 kg/m<sup>3</sup>；混凝土磚 28 天抗壓強度介於 82 至 306kg/cm<sup>2</sup> 之間；抗彎載重介於 554 至 1096kg 之間；熱傳導係數介於 0.219~0.345 kcal/m<sup>2</sup>·°C·hr 間。無論抗壓強度、抗彎載重及熱傳導係數均隨細砂取代水泥體積的增加而減低，且隨填充孔隙體積比的增加而增加。

本研究計畫另提出一個產製輕質混凝土磚的全新工法。首先以絕對乾燥之輕質骨材填滿密閉模具，其次將水泥漿或水泥砂漿以低壓灌

漿工法灌入模具內填充骨材粒間孔隙，約在一小時內可脫模成型，其材料效率（單位重量所能提供之強度）優於一般普通磚，並且擁有極為光滑平整之表面。

## 第一節 緒論

### 1-1 研究背景與動機

近年來台灣水庫由於淤泥的沉積，已經造成了水庫蓄水量的嚴重影響。其中主要的 69 座水庫均有淤積問題，水庫淤積量高達 4 億 7 千萬立方公尺，已超過於一座翡翠水庫蓄水量，且淤積量還在持續增加中。而新水庫的開發計畫受到當地民眾及環保團體的反對而受阻。在新的水資源無法取得的情形下，現有水庫淤泥的清除工作，則顯得更加的重要與急迫。有鑑於此，政府已訂定一套完整的水庫清淤計畫，惟清除淤泥之處置，又成為另一項重要的環保課題。另一方面，台灣因政府推動公共工程建設，導致骨材來源日益缺乏，又因重視水土保持而逐漸禁止河川砂石的開採。在天然骨材取得日益困難的情況下，人造輕質骨材的開發與利用實有其必要性與意義。

目前國內已有研究利用水庫淤泥來燒結輕質骨材，且已具成果。此項研究成果一來可以處理水庫淤泥，二來可以減少天然骨材的需求量，實是個兩全其美的辦法。由輕質骨材所製成之輕質混凝土，具有質輕、耐震、隔熱、吸音、耐火、且強度足夠等等之優點。在歐美及日本等先進國家早於二十世紀即開始生產輕質骨材，並使用於結構性工程與非結構性用途之上。

一般輕質骨材混凝土可分為結構性與非結構性兩種。結構性著重於本身的強度，而非結構性則強調孔隙的存在。本計畫主要是針對非結構用途輕質骨材混凝土產品之產製技術開發。在協力廠商提供設備下，進行以水庫淤泥燒製之輕質骨材應用於高壓立即脫模成型混凝土地磚之產製技術研究並探討產品之各項性質。期能達到輕質骨材之推廣應用，促使更多廠商投入水庫清淤以及輕質骨材之生產，進而使水庫淤泥與天然砂石不足之問題得以解決。

## 1-2 研究內容與目的

本研究主要是在利用國內燒製成功之輕質骨材，利用骨材比表面積理論來研擬輕質骨材混凝土配比，及利用一般高壓混凝土磚的生產方式並開發新工型法來製做輕質骨材混凝土磚，以探討其可行性及硬化後之性質。主要研究之內容與目的如下：

1. 以骨材比表面積理論之觀念，研擬適合高壓快速脫模成型之輕質骨材混凝土配比。
2. 研究以高壓快速脫模成型混凝土磚生產方式生產輕質骨材混凝土磚之拌製及脫模方式。
3. 以平均粒徑為7mm之單一粒徑輕質骨材，變化以（1）水泥與波索蘭材料或（2）水泥與細砂所拌製之漿體填充空隙體積，探討輕質骨材混凝土磚之單位重、抗壓強度、抗彎載重及熱傳導係數等之變化。
4. 在相同填充空隙體積下，變化（1）水泥與波索蘭材料或（2）水泥與細砂之比例，探討其單位重、抗壓強度、抗彎載重、單位重及熱傳導係數等之變化。
5. 探討輕質骨材混凝土磚耐火性與受高溫後強度及熱傳導係數變化。
6. 探討低壓灌漿工法之水泥（砂）漿配比，及其最適灌漿壓力及拆模時間，並對成品之單位重、抗壓強度及熱傳導係數等基本性質進行分析評估。
7. 將研發之產製技術提供業界參考。

## 第二節 文獻回顧

### 2.1 輕質骨材之種類與性質

#### 2.1.1 輕質骨材的種類

輕質骨材大致可分成天然和人造兩大類如表 2-1 所示；天然的輕質骨材多為含有孔隙組織的火山噴出岩，是由火山岩漿自不同的深度噴出火山口後，冷卻成形狀、性質各異的多孔隙材料。其中較為重要，也被人們實際應用過的天然輕質骨材有浮石（pumice）及泡沫火山岩等，其中又以浮石較為普遍。由於天然輕質骨材的產量有限，品質穩定性上也較差，經一段時間的採掘使用後，即趨於枯竭，對工程應用的實效就長期而言，並非理想且可資信賴的骨材來源。因此在人造輕質骨材成功生產後，此類骨材的實用性就逐漸被取代而趨於沒落【1、2、3】。

人造的輕質骨材種類相當多，重要的有如黏土、頁岩、火山玻璃石、生雲母等燒製而成的膨脹頁岩、真珠石、蛭石等，以及由工業廢料如爐石、飛灰等製作成的膨脹爐石、燒結飛灰等。人造輕質骨材中，其外形、顆粒結構及顏色等，各有所異，單以顆粒單位重而言其分佈範圍甚廣，由  $100\text{kg/m}^3$  到  $2000\text{kg/m}^3$  之間，故性質差異度甚大。

就以目前常使用的人造輕質骨材而可分為兩大類：冷結型人造輕質骨材及燒結型人造輕質骨材。冷結型人造輕質骨材大多是以工業副產品煤灰或飛灰等為主要原料，利用水泥及石膏等膠結材料將之與砂基本材料相結合，不需加熱燃燒，故為冷結型人造輕質骨材。其目的是取其煤灰等本身重量輕以及顆料間孔隙，可製成單位單位重較小的人造輕質骨材【4】。

燒結型人造輕質骨材主要原料為黏土、頁岩及板岩等燒結而成。原料之發泡機構為燒結型人造輕質骨材製造上最重要的機理。而原料會依其形成地質年代不同，以及本身所含礦物質和有機質含量相異，影響其燒製時的膨脹性質。



### 2.1.2 人造輕質骨材發展與沿革

1917 年美國 S.J.Hayde【5】使用某種膨脹性黏土及頁岩在高溫下燒成小球，由於原料含有之成份，在高溫下使內部產生氣體，表皮形成堅實的玻璃層，可視為輕質骨材研究之肇始。第一次世界大戰期間，美國使用輕質骨材混凝土造船。而在聖路易斯的 Park Plaza Hotel 是建造在 1920 年代之輕質骨材混凝土早期例子。爾後尚有許多以輕質骨材混凝土所建造的商用大樓及建築物上【6】。在歐洲方面，英國及俄國都曾使用高強度之人造輕質骨材，成功地運用在橋樑與建築物上【7】。在日本方面，在二次世界大戰以前就研究使用輕質骨材，但是一直沒有運用的機會；直到 1968 年，首次使用膨脹性頁岩燒製成輕質骨材。至今已不斷地使用在多種構造物上【8】。

目前全世界如俄國、美國、德國、日本和加拿大皆有生產以膨脹性頁岩，黏土甚至爐渣所燒製之輕質骨材。

### 2.1.3 輕質骨材之成形與特性

輕質骨材會因不同的種類及形成過程，而擁有互異的性質，為進一步瞭解輕質骨材與普通骨材的不同點，在此依其骨材之成形、組織及粒徑大小等三方面探討如下：

#### (1) 成形

天然輕質骨材以火山岩居多，主要依岩漿外噴過程的深度不同而形成性質互異的材料。這類多孔材料在形成過程中無法加以控制，致其表面和內部孔隙有等向性、不均勻，故性質的變異性甚大。

人造骨材最有利之處在於製造過程的人工化，而可對性質做某種程度的控制。不過除了膨脹黏土、頁岩及板岩可形成堅硬、渾圓且接近封閉的外表層外，其餘如膨脹爐石、燒結飛灰、真珠石等都具有外表孔隙成裂縫，不但外形較不規則，吸水率也較大，使其整體骨材品質較差。

## (2) 組織

不論是天然或人造輕質骨材，其最大特點在於骨材中含有相當高比例的孔隙，如真珠石類骨材的顆粒孔隙率可達 95 %，而目前最通用的膨脹黏土和頁岩也有達 50 % 以上的孔隙率。輕質骨材的孔隙含量是決定其工程性質的最重要因素，對同一類骨材更是如此。骨材組織中的孔隙可大分為表層孔隙和內部孔隙兩種；表層孔隙的存在，較不利於骨材的品質，最明顯的是對強度、吸水率及混凝土工作性的影響。至於品質已 8 被肯定為較理想的是膨脹黏土之類的輕質骨材，其含較少表層孔隙外，最重要的是它擁有一層燒結成形的堅硬表殼，強度又高，使它能因同時具有高含量的內部孔隙，而成為一種顆粒單位重小，卻擁有低吸水率，高強度的骨材。【9、10、11】

## (3) 粒徑與顆粒單位重

輕質骨材的粒徑除了人造骨材中的膨脹黏土，是可由事先的原料造粒完全控制其顆粒粒徑外，其餘如人造骨材的膨脹頁岩、真珠石等，其粒徑是依原料的碎粒大小而定；至於天然輕質骨材，則其顆粒粒徑為自然形成。

在拌製輕質混凝土時，輕質骨材類似於普通骨材，仍須做骨材級配的工作。因此輕質骨材也要按粒徑區分多數粒群，如 3/4"、1/2、3/8、#4 等；各骨材粒群的取得，可於製造過程中安排，將大小尺度骨材細碎後，以篩分法處理之。

目前在結構性混凝土方面使用最多的人造膨脹黏土、頁岩、板岩等，其特點須注意的是骨材的粒徑愈大，其單位重愈小，強度愈差，進行顆粒分佈的試驗分析時，各粒徑骨材含量的體積百分比與重量百分比不一致，這是與普通骨材不同的地方。【11、12、13】

### 2.1.4 輕質骨材在應用上與一般常重骨材之差異

一般而言無論是天然或人造輕質骨材，其皆具有質輕之效果。係因輕質骨材內外部含有大孔隙，此與一般常重骨材組織上之差異，致

使輕質骨材具有高吸水率、低單位密度、粗表面、低強度與低單位重等特性。且隨著骨材粒徑增大，彈性模數、強度、密度等也隨之降低。就普通常重骨材混凝土而言，骨材最大粒徑愈大，對混凝土品質愈有利，這種觀念在輕質骨材混凝土方面不全然適合，因為它只能減少拌和水量，從而減少材料析離、混凝土泌水現象及收縮等，雖有利於混凝土強度，但粒徑愈大的輕質骨材其強度愈低，反而會限制混凝土的強度發展。【14、15】

一般常重混凝土之配比設計，係以骨材為面乾內飽和，避免骨材吸收水泥之拌合水。但輕質骨材因具有高吸水率且孔隙較多及骨材之變異率甚大，故很難測出輕質骨材之面乾內飽和狀態與顆粒密度。又當輕質混凝土拌合時，骨材表面較大孔隙多為水泥漿或細砂所填滿，而其內部孔隙水將增加配比計算之困難。所以測定輕質骨材之吸水率及顆粒密度就顯得重要，而測定輕質骨材吸水率及顆粒密度時，又因孔隙而導致骨材內之水分滲出，而照成誤差之存在。

## 2.2 輕質混凝土之力學性質

### 2.2.1 輕質混凝土的定義

對於輕質混凝土的定義方法雖有多種，最為普通的是依其單位重界定。一般而言，單位重必須小於  $1840\text{kg/m}^3$  (ASTM、CNS) 或小於  $2000\text{kg/m}^3$  (DIN、JIS)。單位重低於  $1000\text{kg/m}^3$  之輕質混凝土，則被定義成超輕量輕質混凝土，這類輕質混凝土只適用於非結構性建築，對構造物的隔熱性特具意義。輕質混凝土依單位重、抗壓強度等分類如表 2-2 所示。【16、17】

### 2.2.2 輕質混凝土的受力結構與破壞型態

輕質骨材的彈性模數大多小於水泥石，而前者的顆粒強度可能大於或小於後者。彈性模數比水泥石小的輕質骨材，在受力下的輕質混凝土內，成為一個次要的承力系統，如圖 2-2(a) 所示，壓應力主要由水泥石承擔，而骨材分擔的應力則依其彈性模數而定。上述受力結構在普通混凝土內，卻有不同之應力分擔行為，主因是普通骨材的彈性

模數大於水泥石。所以受力結構之壓應力主要由骨材承擔，而水泥石反而成為骨材間之應力傳遞的介質。【11】

輕質骨材之彈性模數  $E$  小於骨材顆粒週界水泥石之彈性模數，當承受壓力時，於骨材上下方產生張應力，而兩側產生壓應力。普通混凝土剛好相反，於上下側產生壓應力而兩側產生張應力。【19】

當混凝土中張應力超過容許張應力時，將發生龜裂現象。普通混凝土之張應力發生於骨材與水泥砂漿間與負載方向垂直，係在骨材左右兩側。而輕質骨材則在骨材上下方。龜裂先在水泥砂漿形成，外力增加後龜裂將逐漸蔓延而貫穿骨材顆粒，造成混凝土破壞。

### 2.2.3 輕質混凝土之應力-應變關係

輕質混凝土之應力-應變關係曲線較一般普通混凝土更接近直線，因為輕質混凝土在降服破壞以前，其主要受力由水泥砂漿承受，而水泥砂漿為類似均質的材料，故應力-應變關係呈線性發展。當受力強度超過強度上限時，水泥砂漿體承受之應力迅速傳遞至輕質骨材，將應骨材強度無法承受而急速破壞，所以使輕質混凝土之破壞更具脆性。

### 2.2.4 早強特性

多數試驗證明，輕質混凝土確實有早強傾向，其 7 天強度一般為 28 天強度的 80 % - 90 %，此現象在骨材強度與彈性模數愈低於水泥石時，愈為明顯。在輕質混凝土的製作上，一般基於輕質骨材的細顆粒較少，為改善工作性與緻密度，通常會採用較高之水泥含量，而產生大量水化熱，加速水化反應。又因為輕質骨材的高吸水率，也可能造成水灰比降低、硬化快之現象，這些效應皆會配合前述強度成長特性，形成輕質混凝土的早強特性。【20】

## 2.3 輕質混凝土之配合設計

輕質混凝土配合設計標準在美國 ACI318、德國 DIN 及日本土木學會 JIS 中皆訂有範；除了考慮質輕的要求外，原則上與普通混凝土配合設計的標準相近似。在此計算時因採因材料體積觀念，須注意輕質骨材不同粒群間其單位重及吸水率不同之差異，以及拌合時輕質骨材吸水率所引起的新拌混凝土稠度變化。輕質骨材之吸水率變化大且不穩定，將直接影響混凝土拌合用水量，間接左右水灰比和混凝土稠度。

### 2.3.1 無細輕質混凝土之配合設計

無細輕質骨材混凝土之配比，以孔隙之存在為主要重點，因為非結構性輕質混凝土是以非承重及隔熱為考慮重點，所以使用單一骨材顆粒可以造成較大的粒間孔隙。此外，做為黏結用的水泥砂漿應儘可能少，在極端情形也可以只用水泥漿。以此拌製成的混凝土具有點黏結方式之骨材構架，其粒間孔隙體積相當大，由於係點黏結，故所能達到之強度較低。不過若於點黏結外之顆粒間孔隙之三角架充以水泥砂漿則強度及密度將可提高。【20】

進行無細輕質骨材混凝土配合設計時，取骨材之鬆單位重為基本資料，做為黏結用的水泥砂漿及細骨材不致於增加混凝土體積，而只會減少粒間孔隙，若是水泥砂漿含量太少則會減低黏結強度，並降低輕質骨材混凝土強度；反之若水泥砂漿太多，則輕質骨材混凝土之強度會提高，同時單位重也會增大。混凝土之密度常先近似的假設為夯實的粗骨材鬆單位重、水泥含量、水含量及細骨材量等之重量和。以此假設資料進行試拌後即可定出拌合用之配比，詳細的配比流程如下所示：

- 1、測定骨材物理性質
- 2、決定骨材級配或單一骨材粒徑
- 3、決定水泥用量
- 4、決定天然砂用量
- 5、決定輕質骨材用量

- 6、設計用水量
- 7、計算輕質骨材5分鐘吸水量
- 8、計算新拌混凝土單位重

而無細輕質骨材於紙上作業食只能得粗略值，混凝土中存在的立間孔隙很難做正確的估計，因夯實程度具有甚大且決定性之影響。強烈的夯實對緻密混凝土而言，通常會減低孔隙體積而提高密度，對無隙輕質骨材混凝土則會造成不均勻之點粘結。故最佳的夯實度必須正確控制之，唯一方法為經由試驗來判定。

### 2.3.2 比表面積

一般求骨材比表面積的方法，是以單位體積骨材之比表面積或是單位重量之比表面積表示之。假設理想之顆粒骨材接近球形或為球形（不考慮骨材外形之變化），若骨材之內徑為  $d$ ，則單位體積骨材之比表面積為：【21、22、23】

$$S(\text{m}^2/\text{m}^3) = \frac{S}{V} = \frac{4\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3} = 6/d \quad (2-1)$$

### 2.4 無細輕質骨材混凝土之隔熱性

影響材料之隔熱效能，最明顯的指標是材料的熱傳導性。材料的熱傳導性除了受材質影響之外，最重要的是依其孔隙率或單位重而定。例如材料中含有較多之二氧化矽時，其輕質骨材之隔熱性較差【25】。金屬材料的熱傳導係數遠大於非金屬材料，而無機材料又大有機材料，彼此熱傳導係數差異數甚大，如表 3-2.1 所示。對同一材料而言，內部孔隙含量愈大者，基於空氣的優良絕緣特性，將可擁有愈小的熱傳導係數。輕質混凝土中由於骨材內部含有大量孔隙，在其它組成材料相同之條件之下，必定能夠擁有比普通混凝土小的熱傳導係

數。

無細輕質混凝土的設計理念，乃是利用顆粒間孔隙的製造，以減輕混凝土自身單位重，製作上是採用單一粒群骨材與水泥漿混合拌製而成。其混凝土內部受力機構主要為顆粒間的點應力傳遞，而非一般緻密混凝土中水泥砂漿充分包裹骨材的面應力受力方式。此類混凝土，本身骨材採用具有大量孔隙輕骨材來取代傳統普通骨材製成粒間孔隙混凝土，因含有顆粒內部孔隙及顆粒間孔隙，可大幅降低混凝土單位重。由文獻中可查知，不同輕質骨材拌製而成之混凝土，其熱傳導細數與單位重之間存又相當穩定的關係【25、26】。若以顆粒密度 $1000\text{kg/m}^3$ 以下之骨材製作無細輕質骨材混凝土時，其熱傳導細數可降低至 $0.2\sim 0.3\text{kcal/m.hr.}$ ，幾乎只有普通混凝土的 $1/5\sim 1/6$ ，其隔熱性非常良好【27】。

表 3-2.1 各類輕質骨材之重要性質料

來源	種類	物理性質		
		顆粒單位重 ( kg/m <sup>3</sup> )	孔隙率 ( % )	吸水率 ( % )
天然材料	浮石	350~630	85	達 50
	溶岩 ( 泡沫火山岩 )	1800~2800	40	10
加工天然材料	珠岩	350~630	95	接近 0
	蛭石	100~350	95	接近 0
	膨脹粘土	600~1800	75	8~20
	膨脹頁岩	800~1800	85	達 50
加工之工業廢料	膨脹爐渣	1000~2000	46~60	20~35
人造有機材料	泡沫球	4	99	接近 0



## 2.5 飛灰對水泥漿體熱學性質之影響

由材料組成成分之各別熱傳導率來看，飛灰主要由石英及富鋁紅柱石所組成，而石英之熱傳導率為  $3.3 \text{ w/m}\cdot\text{k}$ ，富鋁紅柱石之熱傳導率為  $2.0 \text{ w/m}\cdot\text{k}$ ，水泥漿體之熱傳導率在  $1.2 \text{ w/m}\cdot\text{k}$  以下【32】。當水泥與飛灰組合後，可能因飛灰含量之增加，導致熱傳導率提高【33】，幸而飛灰本身為中空球體，當飛灰含量增加時孔隙量將增加，其熱傳導率將降低【34】，但此只限於較低溫時，在高溫時熱傳導方式將以輻射為主，孔隙在此將成為負面效果【33】。

文獻【33】指出，飛灰含量之增加可以減少水泥漿體之熱膨脹量。因飛灰在有水之狀況下會與水泥漿體內之 CH 起波索蘭反應，消耗 CH 而生成 C-S-H 膠體，填塞孔隙及原 CH 所占有之空間。又當在溫度超過  $300^\circ\text{C}$  時，圍繞在 CH 四周之微裂縫增加導致強度受損，因此添加飛灰可以使漿體內之 CH 降低，間接使耐熱性質提高。

### 第三節 試驗方法

#### 3.1 以振動夯實工法預鑄輕質骨材混凝土非結構件

##### 3.1.1 輕質骨材之物理性質試驗

輕質骨材本身品質的優劣直接影響輕質骨材混凝土的各項性質，故必須對輕質骨材做其基本物理性質之試驗，以了解骨材性質對輕質骨材混凝土的影響，本研究對骨材物理性質的試驗主要有顆粒密度、吸水率、鬆單位重、骨材顆粒筒壓強度等等。

由於本研究用之輕質骨材存放方式係採取工廠存放模式，故拌合時為氣乾狀態而非烘乾狀態，所以針對骨材性質的各項試驗皆是在氣乾狀態之下施作，而試驗期間之平均溫度約為 28 ~30 左右。茲分述其方法及過程如下：

1. 顆粒密度：參照 ASTM C127-80 規範測定之。

先量測氣乾狀態下輕質骨材重量，再將骨材表面做防水處理如噴汽油，以防止骨材大量吸水，然後放入裝水之有刻度量筒中，藉排水法量測骨材體積，求得其顆粒密度。顆粒密度可由下式求之：

$$\rho_g = \frac{M_{air}}{V}$$

其中：M<sub>air</sub>：骨材氣乾重

V：骨材顆粒總體積

2. 5 分鐘吸水率：

先量測氣乾狀態下輕質骨材重量，再將氣乾狀態之輕質骨材完全浸入水中經 5 分鐘後取出，以乾布擦拭表面使成面乾內飽和 (Saturated surface dry) 狀態，由其增加的重量利用下式計算其吸水率：

$$W_{air,5min}(\%) = \frac{W_{air,5min} - W_{air}}{W_{air}}$$

其中：W<sub>air,5min</sub>：骨材氣乾狀態下 5 分鐘吸水重

$W_{air}$ ：骨材氣乾重

3. 鬆單位重：參照 ASTM C29-78 規範測定之。

將輕質骨材置入已知體積之量筒中，放入時讓骨材自由落下不加  
以搗實，將裝滿骨材的量筒秤重，利用下式求其鬆單位重：

$$\rho_{air,g'} = \frac{M_{air}}{V'}$$

其中： $M_{air}$ ：骨材氣乾重  
 $V'$ ：量筒體積

4. 骨材顆粒筒壓強度

用承壓筒（帶筒底）裝試樣，分別測定 3 次鬆散料重，取其平均  
值。對天然輕質骨材，取測得的平均鬆散料重值乘以 1.15 的填充係數  
作為試樣量，對於其他種類的輕質骨材，則乘以 1.10 的填充係數作為  
試樣量，再按上述所計算得的試樣量取樣，裝入承壓筒，先用木樁沿  
筒壁四周輕敲數次，然後裝上導向筒和沖壓模，檢查沖壓模的下刻度  
是否與導向筒的上緣重合，如不重合再輕敲筒壁四周直至完全重合為  
止。

把承壓筒放在抗壓機的下壓板上，以每秒 30~50kgf 的速度均勻的  
施加荷重，當沖壓模壓入深度為 20mm 時，記下壓力值，再將此壓力  
值除以承壓面積（即沖壓模面積  $F=100\text{cm}^2$ ），即可得到骨材的筒壓強  
度。

本研究所用之輕質骨材其顆粒密度、吸水率、鬆單位重、骨材顆  
粒筒壓強度等等測試結果列於表 3-3.1 內。

### 3.1.2 配合設計

本研究主要是以（1）水泥與波索蘭材料或（2）水泥與細砂所拌  
製之漿體為填充材填充輕質骨材間之孔隙體積，來製作輕質骨材混  
凝土磚。製作時係採用工業自動生產線之模式，於填料震動夯實後立即  
脫模，因此漿體需有足夠之粘滯性方能使輕質骨材於脫模後不至於崩  
塌，而在不同的水泥與砂的比例以及不同的填充空隙體積比之下，其

所需之漿體粘滯性亦不相同。本研究於試體實際製作前乃有先行做一試拌脫模之試驗，以了解其粘滯性範圍，而所用之試拌配比如表 3-3.2、表 3-3.3、表 3-3.4。

配合設計流程如下所示：

Step1. 測定骨材物理性質：(1) 骨材之顆粒密度  
(2) 骨材之鬆單位重  
(3) 骨材之 5 分鐘吸水率

Step2. 決定漿體填充孔隙比

Step3. 計算骨材用量、空隙體積及漿體體積 ( $V_a$ 、 $V_o$ 、 $V_m$ )

Step4. 決定漿體配比，確定水、水泥、砂用量 ( $W_w$ 、 $W_c$ 、 $W_f$ )

Step5. 計算輕質骨材 5 分鐘吸水量 ( $W_{aw}$ )  
計算砂在面乾內飽和狀態 (S.S.D) 下吸水量 ( $W_{fw}$ )

**配合設計實例：**

利用上述流程，以  $V_s/V_c=1$ 、水灰比 0.45、漿體填充孔隙比 0.5 以及粒徑 7mm 之氣乾狀態下之輕質骨材為例，配製  $1\text{m}^3$  之輕質混凝土：

Step1. 測定骨材物理性質：(1) 骨材之氣乾顆粒密度： $1100\text{ kg/m}^3$   
(2) 骨材之氣乾鬆單位重： $600\text{ kg/m}^3$   
(3) 骨材之氣乾 5 分鐘吸水率：1.8 %

Step2. 決定漿體填充孔隙比：0.5

Step3. 計算骨材用量、空隙體積及水泥砂漿體積 ( $V_a$ 、 $V_o$ 、 $V_m$ )：

$$V_a = 600/1100 = 0.545\text{ m}^3$$

$$V_o' = 1 - V_a = 1 - 0.545 = 0.455\text{ m}^3$$

$$V_m = V_o' * 0.5 = 0.227\text{ m}^3$$

$$V_o = V_o' - V_m = 0.227\text{ m}^3$$

$$W_a = 0.545 * 1100 = 600 \text{ kg/m}^3$$

Step4. 決定漿體配比，確定水、水泥、砂用量 ( $W_w$ 、 $W_c$ 、 $W_f$ )：

以  $V_s/V_c=1$ 、水灰比 0.45 可配出單位體積 ( $1\text{m}^3$ ) 之水泥砂漿  
 配比：水=393.48  $\text{kg/m}^3$ 、水泥=881.19  $\text{kg/m}^3$ 、砂=406.43  $\text{kg/m}^3$ ，  
 考慮漿體體積  $V_m$ ，可得：

$$W_w = 393.48 * 0.227 = 89.33 \text{ kg/m}^3$$

$$W_c = 881.19 * 0.227 = 200.25 \text{ kg/m}^3$$

$$W_f = 406.43 * 0.227 = 92.37 \text{ kg/m}^3$$

Step5. 計算輕質骨材氣乾 5 分鐘吸水量 ( $W_{aw}$ )：

5 分鐘吸水率=1.8 %

$$W_{aw} = 0.545 * 1100 * 0.018 = 10.8 \text{ kg/m}^3$$

計算砂在面乾內飽和狀態 (S.S.D) 下吸水量 ( $W_{fw}$ )

砂吸水率=3.5 %

$$W_{fw} = W_f * 0.035 = 3.23 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{總拌合水量} = W_w + W_{aw} + W_{fw} = 103.36 \text{ kg/m}^3$$

### 3.1.3 試驗材料及設備

#### 1. 試驗材料：

- 1) 水泥：為亞洲水泥公司出品之 Type 型波特蘭水泥，比重為 3.15。
- 2) 爐石：採用中聯爐石處理資源化股份有限公司所產之 100 級爐石，其物性與化性詳細列於表 3-3.1 中。
- 3) 飛灰：採用台電台中火力發電廠 F 級細灰，其物性與化性詳細列於表 3-3.2 中。
- 4) 輕質骨材：本研究所採用 3-2 節試驗所得之輕質骨材，氣乾顆粒密度為  $1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  之石門水庫淤泥燒製而成之輕質骨材，其性質如表 3-3.1。
- 5) 細骨材：比重為 2.6，鬆單位重為  $1453 \text{ kg/m}^3$ ，吸水率為 3.5%

( S.S.D ) , 細度模數為 2.06。

## 2. 試驗儀器及設備如下：

- ( 1 ) 試拌脫模機具
- ( 2 ) 振動夯實壓模機  
上壓力：0.025kg/cm<sup>2</sup>~0.0288kg/cm<sup>2</sup>  
振動頻率：44.82 Hz
- ( 3 ) 120 TON 萬能試驗機
- ( 4 ) 手提式拌合機  
轉速：800 rpm
- ( 5 ) 熱傳導試驗儀 ( 如圖 3-3.1 )
- ( 6 ) 輕質骨材筒壓強度承壓筒
- ( 7 ) 箱型高溫爐

### 3.1.4 立即脫模之試拌脫模試驗

本研究之成功與否，在於輕質骨材混凝土脫模後是否可立即成型，而漿量的多寡以及水灰比的高低則是其決定因素，如漿量太少而無法黏結骨材，或水灰比太高而造成流動性太大等，都會使輕質骨材混凝土無法立即脫模。所以本實驗是以 15cm×6cm×4 cm之試拌脫模模具來做配比的測試，施作過程略述如下：

- ( 1 ) 參照表 3-3.2、表 3-3.3 及表 3-3.4 之配比拌合輕質骨材混凝土。
- ( 2 ) 將輕質骨材混凝土填入模具內，蓋上上壓塊，將鐵鎚以對角敲擊數次，再以 500kg 之上壓力施加於上壓塊。
- ( 3 ) 以手動方式脫模，視其成功與否判斷其水灰比範圍。
- ( 4 ) 若不成功重複步驟 ( 1 ) 改變水灰比，直至成功為止。

測試流程如圖 3-3.2。

### 3.1.5 輕質混凝土磚之拌合、夯實及脫模方式及試體尺寸

### 1.拌合方式：

由於本研究的試體要立即脫模且水泥砂漿體積較少，需要使用的水灰比較低，採用鼓式拌合機拌合，在拌合時會出現一些困難，本研究是採用轉速為 800rpm 的手提式拌合機，其拌合順序為先拌合水泥砂漿，然後再將骨材加入水泥砂漿拌合至均勻，而拌合用水量在考慮骨材吸水及拌合時間的情形下，則須先加入骨材之 5 分鐘吸水量。

### 2.夯實及脫模方式：

本研究輕質骨材混凝土磚試體之製作，乃是配合現有工業生產線上之填料、夯實及振動後立即脫模之方式進行。係利用相關工廠提供之振動夯實壓模機，以上壓力  $0.025\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 0.0288\text{kg}/\text{cm}^2$ 、振動頻率 44.82 Hz、振動時間 4 秒鐘來進行試驗，試體製作流程如圖 3-3.3 所示。

### 3.試體尺寸：

抗壓強度、吸水率、單位重及熱傳導係數方面是採用  $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 5\text{cm}$  之模具，而抗彎強度則是採用  $39\text{cm} \times 19\text{cm} \times 9\text{cm}$  之尺寸來製作試體。

#### 3.1.6 試驗方法及步驟

##### 3.1.6.1 試驗變數

本研究是採用 3-1 節試驗所得之輕質骨材，利用前述的配比流程、拌合方法及壓模方式製作輕質骨材混凝土試體。研究變數主要有：

- (1) 在固定波索蘭材料或細砂與水泥之體積比的情形下，改變漿體填充空隙體積比從 0.1~0.9，依表 3-3.2 至表 3-3.7 之配比去尋找可立即脫模之拌合水灰比。
- (2) 在固定漿體填充空隙體積比的情形下，改變波索蘭材料或細砂與水泥之體積比，依表 3-3.2 至表 3-3.7 之配比去尋找可立即脫模之拌合水灰比。

- (3) 以平均粒徑為7mm之輕質骨材為目標，變化水泥砂漿填充空隙體積比從0.3~0.9，依上述第(1)項所得之水灰比拌製混凝土，探討其對輕質骨材混凝土磚之抗壓強度、抗彎強度、單位重、吸水率及熱傳導係數性質之變化。
- (4) 在相同的水泥砂漿填充空隙體積下，變化波索蘭材料或細砂與水泥之體積比，依上述第(2)項所得之水灰比拌製混凝土，探討其抗壓強度、抗彎強度、單位重、吸水率及熱傳導係數性質之變化。除此之外，並探討其在高溫作用下，各種填充孔隙比不同下之抗壓強度折減及熱傳導係數之變化，並探討強度損失的因素。

#### 3.1.6.2 試驗方法及步驟

本文是以輕質骨材混凝土磚之抗壓強度、抗彎強度、熱傳導係數、單位重、吸水率及耐火性等為主要之探討重點，其試驗方法及步驟如下所述：

- (1) 抗壓強度試驗：參照 CNS13295 A2255 之規範測定之。  
主要分為 7 天及 28 天之抗壓強度，方法及步驟略述如下：
  - (a) 輕質骨材混凝土磚於試驗前，須置於  $24\pm 8$  ，相對濕度小於 80% 之空氣中至少 48 小時。
  - (b) 應以整塊輕質骨材混凝土磚測試，並藉助厚度至少 30 mm 之上承壓塊施壓，承壓塊之施壓面須淬硬達洛氏硬度 HRC55 以上，上承壓塊尺寸依抗壓試體厚度 50 mm 而選擇 120×60 mm。
  - (c) 磚之兩個施壓表面應為平行之光滑平面，須用蓋平材料予以蓋平，緩慢穩定的施加壓力直至試樣破壞，測其破壞載重 ( P )，加壓速率需維持在每秒約 0.5MPa(5kgf/cm<sup>2</sup>) 左右。抗壓強度 (  $\sigma$  ) 由破壞載重 ( P ) 及承壓塊與輕質骨材混凝土磚面接觸之面積 ( A ) 以下式求得：

$$\sigma = P/A$$



(2) 抗彎強度試驗：參照 CNS13295 A2255 之規範測定之。

依 CNS13295 A2255 之規範，若試樣長度或寬度超過 280mm 時，需做抗彎強度試驗。試樣需用蓋平材料予以蓋平，然後將試樣置於如圖 3-3.4 所示之位置，支承桿間之垮距為 240mm，並於垮距中央施加縱向均布載重直至破壞為止，加壓速率須維持在每分鐘 0.88~1.23MPa(8.8~12.3kgf/cm<sup>2</sup>)，讀出最大載重，作為破壞載重。

(3) 熱傳導係數試驗：參照 CNS7332 A3121 之規範測定之。

將欲測試之試體 (200×200×50 mm)，置於烘箱 24 小時使達完全烘乾狀態，待其回至室溫，量取熱傳導試體厚度，放入熱傳導試驗儀溫箱中進行熱傳導試驗，熱傳導試驗儀的各部位配置如圖 3-3.1。

試驗步驟：

- 1) 量取熱傳導試片厚度，放入熱傳導儀溫箱中。
- 2) 將高溫及低溫熱循環水箱開機。
- 3) 設定高溫及低溫熱循環水箱溫度分別為 80 及 50 。
- 4) 開啟訊號放大器。
- 5) 將訊號放大器之 range 設定為 10mv。
- 6) 靜待 20 分鐘後調整 channel 2 和 5 之值於 5 及 6 的位置。
- 7) 再經 5 分鐘開啟訊號放大器上之 INPUT 1, INPUT 2 開關，並將 AVE 切於 ON 位置。
- 8) 待整個系統溫度穩定達平衡溫度時，打開紀錄器，讀取測值。
- 9) 將所測資料，經由電腦分析處理，以求得熱傳導係數，單位為 Kcal/m-hr- 。

(4) 單位重試驗：

將試樣置於烘箱中烘乾至少 24 小時，乾燥後將試樣從烘箱中取出，置於室溫下待其冷卻，然後稱其重量 (W)，接著量測試樣體積 (V)，而輕質骨材混凝土單位重 ( $\rho$ ) 可由下式求得：

$$\rho = W/V$$

(5) 400 高溫試驗：將試體靜置達 28 天後，先放入烘箱(100 )烘 24 小時使試體達到完全乾燥，此一步驟為不讓試體在爐內爆裂，前人之研究指出，在氣乾狀況下放入高溫爐受高溫作用時，會因試體含水量與骨材種類而導致爆裂，故為不使試體爆裂而先行烘乾。試體放入高溫爐後設定目標溫度，當爐溫達到目標溫度後關閉電源，試體於爐內徐徐冷卻至室溫後取出。其試驗流程如圖 3-3.5 所示。

### 3.2 以低壓灌漿工法產製輕質骨材混凝土非結構件

#### 3.2.1 試驗項目、試驗變數及試驗材料

本研究首先設計若干配比，進行水泥 (砂) 漿流動性試驗測試其工作度，同時灌製 5 cm ×5 cm ×5 cm 之立方試體，用以進行水泥 (砂) 漿抗壓強度試驗，據以決定適用之水泥 (砂) 漿配比。其次以上述配比進行輕質混凝土磚之灌製，記錄各組之灌漿壓力與拆模時間，並量測水泥 (砂) 漿之凝結時間，試體尺寸為 20 cm ×20 cm ×20 cm，每組製作 6 個試體，用以量測輕質混凝土磚之單位重、抗壓強度及熱傳導係數。

試驗變數包括：水膠比 (W/B= 0.38、0.42、0.46、0.50、0.54、0.58、0.62、0.66)、膠結料比例 (水泥：飛灰：爐石= 100%：0%：0%、70%：15%：15%、40%：30%：30%) 及天然砂用量 (S/B= 0、0.5、1、2)。試驗材料包括：台泥之 TYPE I 卜特蘭水泥 (比重 3.13)、台電台中火力發電廠之 F 級飛灰 (比重 2.31)、中聯爐石公司之爐石粉 (比重 2.86)、天然砂 (比重 2.66，吸水率 1.35%) 及輕質骨材。其中為避免細骨材堵塞灌漿管，故篩除#16 篩以上之部份，其細度模數為 1.81；輕質骨材則以水庫淤泥燒結而得，採用單一粒徑，其標稱粒徑為 11 mm，各項物理及力學性質如表 3-3.8。所有水泥 (砂) 漿試驗配比則如表 3-3.9、表 3-3.10 及表 3-3.11 所示。

#### 3.2.2 試驗設備及試驗方法

主要試驗設備由鋼模、壓力筒、灌漿管及空壓機組成 (如照片 3-3.1), 試體之製作乃是利用輕質骨材之高吸水率特性, 先將完全乾燥之骨材填入模具內 (如照片 3-3.2), 再將高稠度之水泥 (砂) 漿灌入填塞孔隙, 骨材吸水後立即脫模, 以期能於自動化生產線上大量且快速的製作。為確保漿體能完全填充孔隙, 灌漿採由下往上方式進行, 並於模具頂面四個角落開設排漿孔, 當漿體由排漿孔溢出時, 即表示灌漿完成 (如照片 3-3.3)。灌漿管口徑 0.9 cm, 灌漿壓力由 2 kgf/cm<sup>2</sup> 開始, 最高以 10 kgf/cm<sup>2</sup> 為限, 依不同稠度找出適宜之灌漿壓力; 一組 6 顆試體灌製完成後, 每隔一小時拆除一個鋼模, 由此找出試體可直接站立而不變形之拆模時間。

水泥 (砂) 漿流動性試驗依 ASTM C1437 之規定, 流動性台在 15 秒內跌落 25 次, 跌落高度為 12.7 mm, 流度值係以壘料跌落後底部平均直徑增加量, 與原來底部直徑之百分數表示之 (如照片 3-3.4)。抗壓強度試驗依 ASTM C109 之規範進行, 試體以飽和石灰水養護至試驗齡期, 取出風乾後進行抗壓試驗。凝結時間試驗依 CNS 14220 A3372 規範規定, 以吉爾摩氏針進行之。

輕質骨材混凝土磚試體亦同, 在水中養護至試驗齡期取出風乾後量測其體積, 並進行抗壓強度試驗 (如照片 3-3.5), 隨後將試體烘乾 24 小時量測其單位重。熱傳導係數試驗 (如照片 3-3.6) 係依據 CNS 7332 A3121 規範之規定, 將試體切割成可測試之尺寸 (20 cm × 20 cm × 5 cm) 進行試驗。

表 3-3.1 輕質骨材之基本性質

平均粒徑 (mm)	7
顆粒平均密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1100
氣乾鬆單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	600
氣乾 5 分鐘吸水率 (%)	1.8
筒壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	72.55

表 3-3.2 試拌配比表 (1)

細砂/水泥 Vs/Vc=1

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	水 (Kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (Kg/m <sup>3</sup> )	天然砂 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材 (Kg/m <sup>3</sup> )	砂吸水 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材吸水 (Kg/m <sup>3</sup> )	總拌合水量 (Kg/m <sup>3</sup> )
1	0.4	0.29	53.81	184.60	85.15	600	2.98	10.80	67.59
1	0.4	0.34	59.47	175.68	81.04	600	2.83	10.80	73.11
1	0.4	0.39	64.61	167.59	77.30	600	2.70	10.80	78.12
1	0.4	0.43	69.30	160.20	73.90	600	2.58	10.80	82.69
1	0.4	0.48	73.59	153.44	70.78	600	2.48	10.80	86.87
1	0.4	0.53	77.54	147.23	67.91	600	2.37	10.80	90.71
1	0.5	0.30	69.96	230.75	106.44	600	3.72	10.80	84.49
1	0.5	0.35	77.04	219.60	101.30	600	3.54	10.80	91.38
1	0.5	0.40	83.47	209.48	96.63	600	3.38	10.80	97.65
1	0.5	0.45	89.33	200.25	92.37	600	3.23	10.80	103.36
1	0.5	0.49	94.69	191.80	88.47	600	3.09	10.80	108.59
1	0.5	0.54	99.62	184.04	84.89	600	2.97	10.80	113.39
1	0.6	0.31	86.12	276.90	127.73	600	4.47	10.80	101.38
1	0.6	0.36	94.61	263.52	121.56	600	4.25	10.80	109.66
1	0.6	0.41	102.32	251.38	115.95	600	4.05	10.80	117.18
1	0.6	0.46	109.35	240.31	110.85	600	3.88	10.80	124.03
1	0.6	0.50	115.79	230.17	106.17	600	3.71	10.80	130.30
1	0.6	0.55	121.71	220.85	101.87	600	3.56	10.80	136.07
1	0.7	0.32	102.27	323.05	149.01	600	5.21	10.80	118.28
1	0.7	0.36	112.18	307.45	141.82	600	4.96	10.80	127.94
1	0.7	0.41	121.17	293.28	135.28	600	4.73	10.80	136.71
1	0.7	0.46	129.38	280.36	129.32	600	4.52	10.80	144.70
1	0.7	0.51	136.89	268.53	123.86	600	4.33	10.80	152.02
1	0.7	0.56	143.79	257.65	118.85	600	4.16	10.80	158.75
1	0.8	0.32	118.42	369.20	170.30	600	5.96	10.80	135.18
1	0.8	0.37	129.75	351.37	162.07	600	5.67	10.80	146.21
1	0.8	0.42	140.03	335.17	154.61	600	5.41	10.80	156.23
1	0.8	0.47	149.40	320.41	147.79	600	5.17	10.80	165.37
1	0.8	0.51	157.99	306.89	141.56	600	4.95	10.80	173.74
1	0.8	0.56	165.88	294.46	135.83	600	4.75	10.80	181.43

表 3-3.3 試拌配比表 ( 2 )

細砂/水泥 Vs/Vc=2

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	水 (Kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (Kg/m <sup>3</sup> )	天然砂 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材 (Kg/m <sup>3</sup> )	砂吸水 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材吸水 (Kg/m <sup>3</sup> )	總拌合水量 (Kg/m <sup>3</sup> )
2	0.5	0.29	50.28	174.51	160.99	600	5.63	10.80	66.71
2	0.5	0.34	56.42	168.05	155.04	600	5.42	10.80	72.64
2	0.5	0.38	62.13	162.06	149.51	600	5.23	10.80	78.16
2	0.5	0.43	67.44	156.48	144.36	600	5.05	10.80	83.29
2	0.5	0.48	72.40	151.28	139.56	600	4.88	10.80	88.08
2	0.5	0.53	77.04	146.40	135.06	600	4.72	10.80	92.56
2	0.6	0.30	62.49	209.41	193.19	600	6.76	10.80	80.05
2	0.6	0.35	69.87	201.66	186.04	600	6.51	10.80	87.17
2	0.6	0.39	76.71	194.47	179.41	600	6.27	10.80	93.79
2	0.6	0.44	83.09	187.78	173.23	600	6.06	10.80	99.95
2	0.6	0.49	89.04	181.53	167.47	600	5.86	10.80	105.70
2	0.6	0.54	94.61	175.68	162.07	600	5.67	10.80	111.08
2	0.7	0.31	74.71	244.31	225.38	600	7.88	10.80	93.39
2	0.7	0.35	83.31	235.28	217.05	600	7.59	10.80	101.70
2	0.7	0.40	91.30	226.89	209.31	600	7.32	10.80	109.42
2	0.7	0.45	98.74	219.08	202.11	600	7.07	10.80	116.61
2	0.7	0.50	105.68	211.79	195.38	600	6.83	10.80	123.31
2	0.7	0.55	112.18	204.96	189.09	600	6.61	10.80	129.59
2	0.8	0.31	86.92	279.21	257.58	600	9.01	10.80	106.73
2	0.8	0.36	96.75	268.89	248.06	600	8.67	10.80	116.23
2	0.8	0.41	105.88	259.30	239.21	600	8.37	10.80	125.05
2	0.8	0.46	114.39	250.37	230.98	600	8.08	10.80	133.26
2	0.8	0.51	122.32	242.04	223.29	600	7.81	10.80	140.93
2	0.8	0.55	129.75	234.24	216.10	600	7.56	10.80	148.10
2	0.9	0.32	99.14	314.11	289.78	600	10.13	10.80	120.07
2	0.9	0.36	110.20	302.50	279.07	600	9.76	10.80	130.76
2	0.9	0.41	120.47	291.71	269.12	600	9.41	10.80	140.68
2	0.9	0.46	130.03	281.67	259.85	600	9.09	10.80	149.92
2	0.9	0.51	138.96	272.30	251.20	600	8.78	10.80	158.55
2	0.9	0.56	147.31	263.52	243.11	600	8.50	10.80	166.62

### 3-3.4 試拌配比表 (3)

#### 細砂/水泥 $V_s/V_c=3$

$V_s/V_c$	孔隙比	水灰比	水 (Kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (Kg/m <sup>3</sup> )	天然砂 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材 (Kg/m <sup>3</sup> )	砂吸水 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材吸水 (Kg/m <sup>3</sup> )	總拌合水量(Kg/m <sup>3</sup> )
3	0.5	0.27	38.31	140.31	194.16	600	6.79	10.80	55.90
3	0.5	0.32	43.64	136.10	188.34	600	6.59	10.80	61.03
3	0.5	0.37	48.67	132.15	182.87	600	6.39	10.80	65.86
3	0.5	0.42	53.41	128.41	177.70	600	6.21	10.80	70.42
3	0.5	0.46	57.89	124.89	172.82	600	6.04	10.80	74.73
3	0.5	0.51	62.13	121.55	168.20	600	5.88	10.80	78.81
3	0.6	0.29	48.13	168.37	232.99	600	8.15	10.80	67.08
3	0.6	0.33	54.53	163.33	226.01	600	7.90	10.80	73.23
3	0.6	0.38	60.56	158.58	219.44	600	7.67	10.80	79.03
3	0.6	0.43	66.25	154.10	213.24	600	7.46	10.80	84.51
3	0.6	0.48	71.62	149.86	207.38	600	7.25	10.80	89.68
3	0.6	0.53	76.71	145.86	201.84	600	7.06	10.80	94.57
3	0.7	0.30	57.95	196.43	271.82	600	9.51	10.80	78.26
3	0.7	0.34	65.42	190.55	263.68	600	9.22	10.80	85.44
3	0.7	0.39	72.45	185.01	256.01	600	8.95	10.80	92.21
3	0.7	0.44	79.09	179.78	248.78	600	8.70	10.80	98.59
3	0.7	0.49	85.36	174.84	241.95	600	8.46	10.80	104.62
3	0.7	0.54	91.30	170.17	235.48	600	8.23	10.80	110.33
3	0.8	0.30	67.77	224.49	310.65	600	10.86	10.80	89.43
3	0.8	0.35	76.31	217.77	301.35	600	10.54	10.80	97.64
3	0.8	0.40	84.35	211.44	292.59	600	10.23	10.80	105.38
3	0.8	0.45	91.93	205.46	284.32	600	9.94	10.80	112.67
3	0.8	0.50	99.10	199.82	276.51	600	9.67	10.80	119.57
3	0.8	0.54	105.88	194.47	269.12	600	9.41	10.80	126.10
3	0.9	0.31	77.59	252.55	349.48	600	12.22	10.80	100.61
3	0.9	0.36	87.20	244.99	339.02	600	11.86	10.80	109.85
3	0.9	0.40	96.24	237.87	329.16	600	11.51	10.80	118.55
3	0.9	0.45	104.77	231.15	319.86	600	11.19	10.80	126.76
3	0.9	0.50	112.84	224.79	311.07	600	10.88	10.80	134.52
3	0.9	0.55	120.47	218.78	302.76	600	10.59	10.80	141.86

### 3-3.5 試拌配比表 (4)

水泥：波索蘭材料 = 70%：30%之試拌脫模配比

填充孔隙比	水膠比	水量 $kg/m^3$	水泥量 $kg/m^3$	飛灰量 $kg/m^3$	爐石量 $kg/m^3$	輕質骨材量 $kg/m^3$	水化用水量 $kg/m^3$	修正水膠比
0.10	0.90	33.16	27.97	3.94	4.93	600.00	22.37	0.61
	1.00	34.08	25.87	3.65	4.56	600.00	23.29	0.68
0.20	0.40	49.57	94.06	13.26	16.59	600.00	38.77	0.31
	0.50	54.53	82.77	11.67	14.60	600.00	43.73	0.40
	0.60	58.42	73.91	10.42	13.04	600.00	47.63	0.49
0.30	0.40	74.35	141.08	19.90	24.89	600.00	63.56	0.34
	0.45	78.31	132.08	18.63	23.30	600.00	67.51	0.39
	0.50	81.79	124.16	17.51	21.91	600.00	71.00	0.43
0.40	0.30	86.08	217.80	30.72	38.43	600.00	75.29	0.26
	0.35	93.08	201.87	28.47	35.62	600.00	82.29	0.31
	0.40	99.13	188.11	26.53	33.19	600.00	88.34	0.36
0.50	0.30	107.60	272.25	38.39	48.03	600.00	96.81	0.27
	0.35	116.36	252.34	35.59	44.52	600.00	105.56	0.32
	0.40	123.91	235.14	33.16	41.49	600.00	113.12	0.37
0.60	0.30	129.12	326.70	46.07	57.64	600.00	118.33	0.27
	0.35	139.63	302.80	42.70	53.43	600.00	128.84	0.32
	0.40	148.70	282.17	39.79	49.78	600.00	137.91	0.37
0.70	0.25	136.29	413.80	58.36	73.01	600.00	125.50	0.23
	0.30	150.64	381.15	53.75	67.25	600.00	139.85	0.28

### 3-3.6 試拌配比表 (5)

水泥：波索蘭材料 = 50%:50%之試拌脫模配比

填充孔隙 比	水膠比	水量 $kg/m^3$	水泥量 $kg/m^3$	飛灰量 $kg/m^3$	爐石量 $kg/m^3$	輕質骨材 量 $kg/m^3$	水化用水 量 $kg/m^3$	修正水膠 比
0.10	0.90	32.78	19.96	7.32	9.15	600.00	21.99	0.60
	1.00	33.72	18.48	6.77	8.48	600.00	22.93	0.68
0.20	0.45	51.28	62.42	22.89	30.55	600.00	40.48	0.35
	0.50	53.61	58.74	21.54	26.95	600.00	42.82	0.40
	0.6	57.55	52.54	19.27	24.10	600.00	46.76	0.49
0.30	0.35	68.39	107.05	39.25	49.11	600.00	57.60	0.29
	0.40	72.94	99.89	36.63	45.82	600.00	62.15	0.34
	0.45	76.91	93.63	34.33	42.95	600.00	66.12	0.39
	0.50	80.42	88.11	32.31	40.42	600.00	69.63	0.43
0.40	0.30	84.20	153.75	56.38	70.53	600.00	73.41	0.26
	0.35	91.19	142.74	52.34	65.48	600.00	80.40	0.31
	0.40	97.25	133.19	48.84	61.10	600.00	86.46	0.36
0.50	0.30	105.25	192.19	70.47	88.16	600.00	94.46	0.27
	0.35	113.99	178.42	65.42	81.85	600.00	103.20	0.32
	0.40	121.56	166.49	61.05	76.37	600.00	110.77	0.36
0.60	0.30	126.30	230.63	84.56	105.80	600.00	115.51	0.27
	0.35	136.79	214.10	78.50	98.22	600.00	126.00	0.32
	0.40	145.88	199.79	73.26	91.65	600.00	135.09	0.37
0.70	0.25	133.06	291.57	106.91	133.75	600.00	122.27	0.23
	0.30	147.35	269.07	98.66	123.43	600.00	136.55	0.28



### 3-3.7 試拌配比表 (6)

**水泥：波索蘭材料 = 30%:70%之試拌脫模配比**

填充孔隙 比	水膠比	水量 <i>kg/m<sup>3</sup></i>	水泥量 <i>kg/m<sup>3</sup></i>	飛灰量 <i>kg/m<sup>3</sup></i>	爐石量 <i>kg/m<sup>3</sup></i>	輕質骨材 量 <i>kg/m<sup>3</sup></i>	水化用水 量 <i>kg/m<sup>3</sup></i>	修正水膠 比
0.10	0.90	32.42	12.31	10.53	13.18	600.00	21.63	0.60
	1.00	33.38	11.41	9.76	12.21	600.00	22.59	0.68
0.20	0.40	47.74	40.79	34.90	43.66	600.00	36.95	0.31
	0.50	52.75	36.06	30.85	38.60	600.00	41.96	0.40
0.30	0.40	71.61	61.19	52.35	65.49	600.00	60.82	0.34
	0.45	75.60	57.42	49.13	61.46	600.00	64.81	0.39
	0.50	79.13	54.09	46.27	57.89	600.00	68.34	0.43
0.40	0.35	89.42	87.32	74.70	93.46	600.00	78.63	0.31
	0.40	95.48	81.59	69.80	87.33	600.00	84.69	0.35
	0.50	105.50	72.12	61.70	77.19	600.00	94.71	0.45
0.50	0.35	111.77	109.15	93.38	116.83	600.00	100.98	0.32
	0.40	119.36	101.98	87.25	109.16	600.00	108.56	0.36
	0.5	131.88	90.15	77.12	96.49	600.00	121.09	0.46
0.60	0.30	123.66	140.87	120.52	150.79	600.00	112.86	0.27
	0.40	143.23	122.38	104.70	130.99	600.00	132.44	0.37
0.70	0.25	130.05	177.79	152.11	190.30	600.00	119.26	0.23
	0.30	144.26	164.35	140.61	175.92	600.00	133.47	0.28

### 3-3.8 輕質骨材物理及力學性質

顆粒密度 (kg/m <sup>3</sup> )	鬆單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	30 min 吸水率 (%)	24 hr 吸水率 (%)	筒壓強度 (MPa)
1000	543	6.84	10.77	7.2

### 3-3.9 A 組水泥 (砂) 漿配比及性質

配比編號	C:W:FA:SL:S (重量比)	震動前流度 (%)	震動後流度 (%)	7 天抗壓強度 (MPa)	28 天抗壓強度 (MPa)
<b>0.42Aa</b>	1:0.42:0:0:0	34	162	45.7	64.2
<b>0.42Ab</b>	1:0.42:0:0:0.5	14	161	51.4	67.8
<b>0.46Ab</b>	1:0.46:0:0:0.5	40	176	44.3	59.2
<b>0.46Ac</b>	1:0.46:0:0:1	11	160	48.8	70.9
<b>0.50Ab</b>	1:0.50:0:0:0.5	75	188	41.1	54.6
<b>0.50Ac</b>	1:0.50:0:0:1	38	180	42.1	61.2
<b>0.54Ab</b>	1:0.54:0:0:0.5	99	201	33.5	41.0
<b>0.54Ac</b>	1:0.54:0:0:1	65	184	39.2	43.5
<b>0.54Ad</b>	1:0.54:0:0:2	5	132	42.2	54.2
<b>0.58Ac</b>	1:0.58:0:0:1	81	198	29.4	42.5
<b>0.58Ad</b>	1:0.58:0:0:2	8	144	39.2	48.9
<b>0.62Ac</b>	1:0.62:0:0:1	114	211	29.2	38.3
<b>0.62Ad</b>	1:0.62:0:0:2	19	166	30.6	44.1
<b>0.66Ad</b>	1:0.66:0:0:2	43	175	29.9	43.5

### 3-3.10 B 組水泥 (砂) 漿配比及性質

配比編號	C:W:FA:SL:S (重量比)	震動前流度 (%)	震動後流度 (%)	7 天抗壓強度 (MPa)	28 天抗壓強度 (MPa)
0.38Ba	0.7:0.38:0.15:0.15:0	10	138	52.7	77.9
0.42Ba	0.7:0.42:0.15:0.15:0	19	160	42.5	52.2
0.42Bb	0.7:0.42:0.15:0.15:0.5	13	164	49.0	68.2
0.46Bb	0.7:0.46:0.15:0.15:0.5	28	169	39.1	57.8
0.46Bc	0.7:0.46:0.15:0.15:1	12	162	41.4	61.3
0.50Bb	0.7:0.50:0.15:0.15:0.5	48	193	30.7	54.3
0.50Bc	0.7:0.50:0.15:0.15:1	34	189	34.4	59.5
0.54Bc	0.7:0.54:0.15:0.15:1	61	194	27.4	48.5
0.54Bd	0.7:0.54:0.15:0.15:2	6	150	32.5	49.4
0.58Bc	0.7:0.58:0.15:0.15:1	76	200	24.0	42.0
0.58Bd	0.7:0.58:0.15:0.15:2	10	156	30.3	47.7
0.62Bd	0.7:0.62:0.15:0.15:2	22	173	26.3	41.2
0.66Bd	0.7:0.66:0.15:0.15:2	42	185	22.3	36.7

### 3-3.11 C 組水泥 (砂) 漿配比及性質

配比編號	C:W:FA:SL:S (重量比)	震動前流度 (%)	震動後流度 (%)	7 天抗壓強度 (MPa)	28 天抗壓強度 (MPa)
0.38Ca	0.4:0.38:0.3:0.3:0	9	148	37.5	66.5
0.42Ca	0.4:0.42:0.3:0.3:0	15	155	31.8	47.5
0.42Cb	0.4:0.42:0.3:0.3:0.5	10	169	32.9	55.2
0.46Cb	0.4:0.46:0.3:0.3:0.5	30	175	27.8	51.1
0.46Cc	0.4:0.46:0.3:0.3:1	14	158	27.9	51.3
0.50Cc	0.4:0.50:0.3:0.3:1	31	166	26.2	41.8
0.50Cd	0.4:0.50:0.3:0.3:2	4	125	26.4	42.4
0.54Cc	0.4:0.54:0.3:0.3:1	51	183	20.1	36.5
0.54Cd	0.4:0.54:0.3:0.3:2	6	148	21.8	41.3
0.58Cd	0.4:0.58:0.3:0.3:2	12	160	20.1	37.2
0.62Cd	0.4:0.62:0.3:0.3:2	22	166	18.3	36.6
0.66Cd	0.4:0.66:0.3:0.3:2	41	185	16.0	33.7

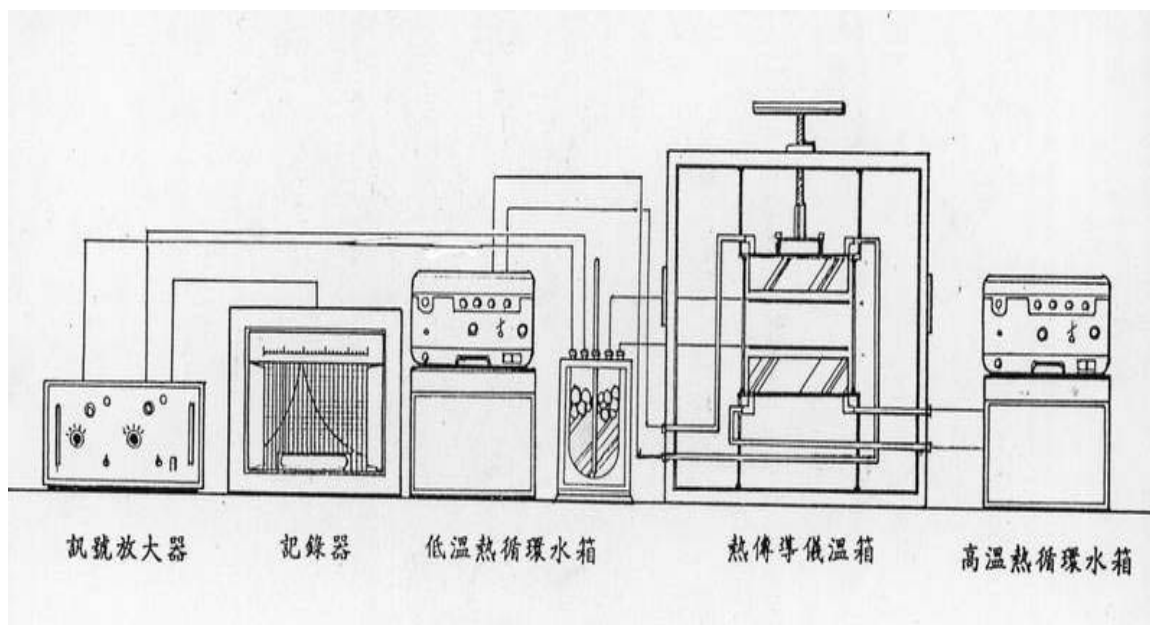


圖 3-3.1 熱傳導試驗儀

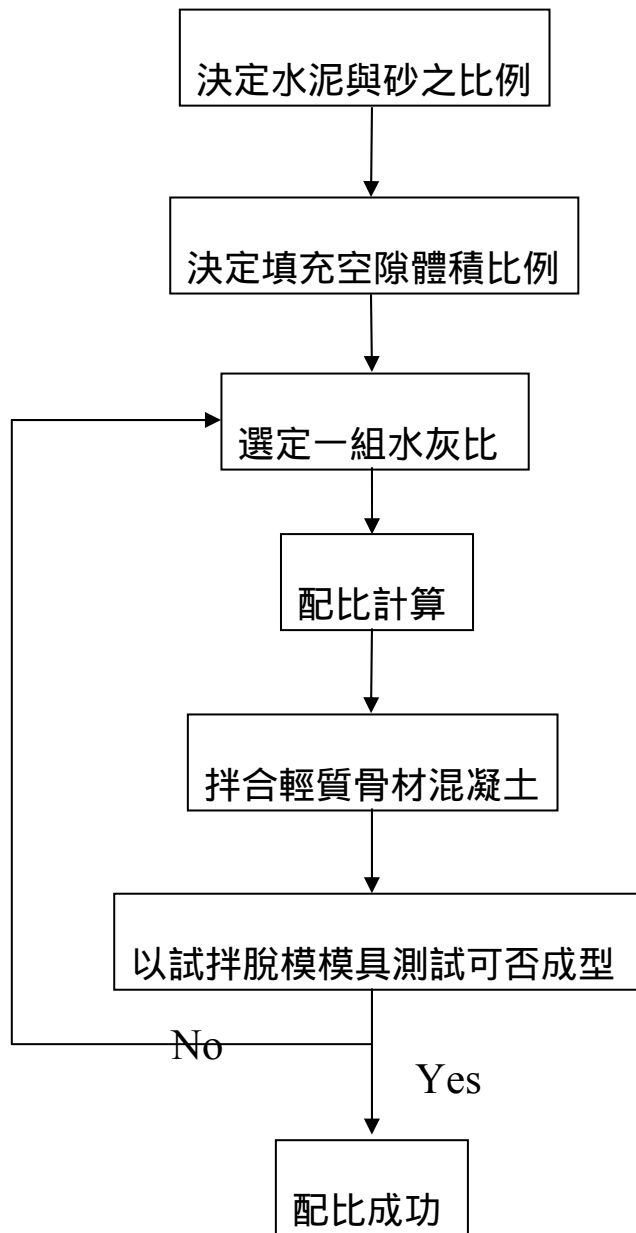


圖 3-3.2 試拌脫模流程圖

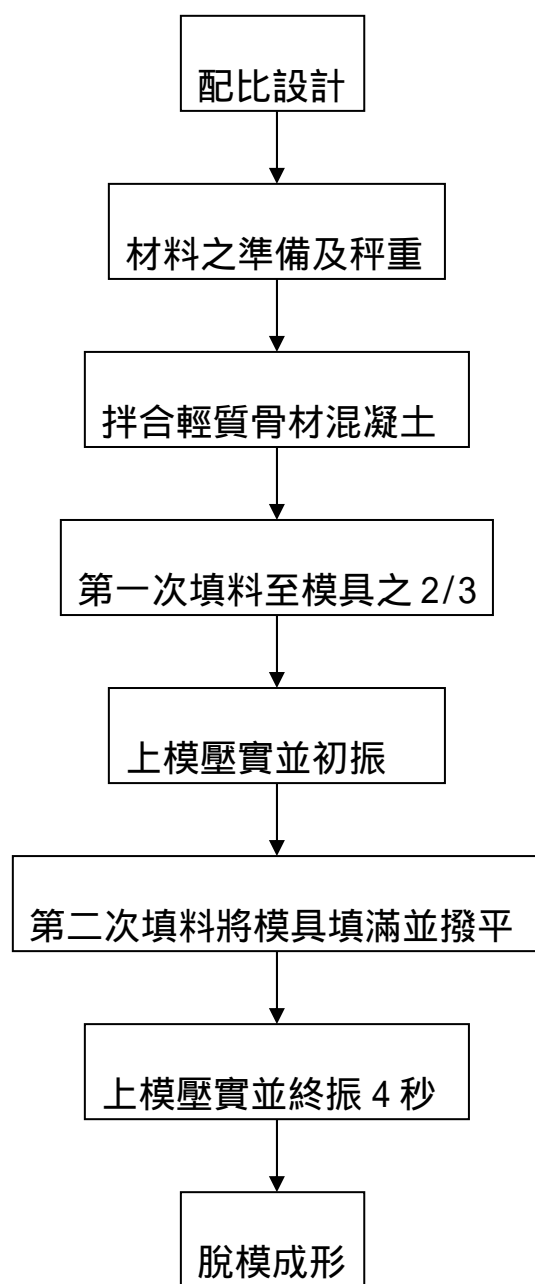


圖 3-3.3 試體製作流程圖

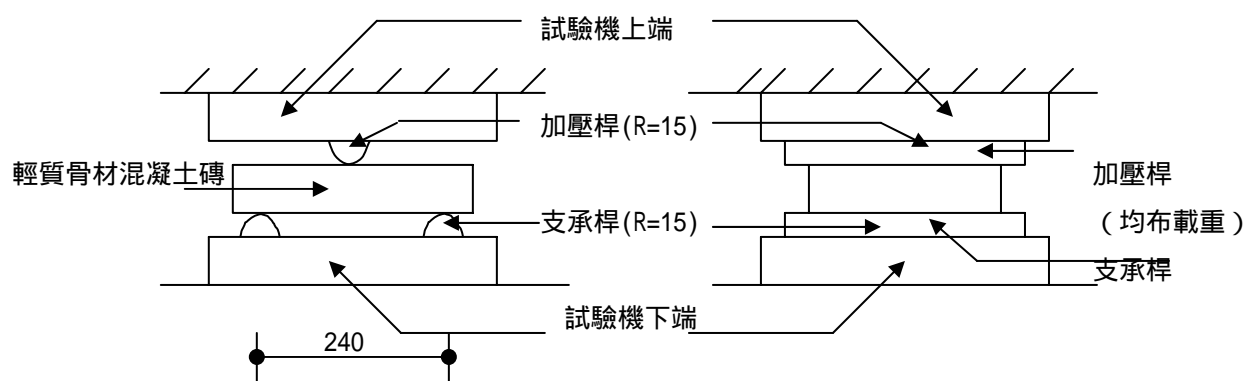


圖 3-3.4 抗彎強度試驗裝置圖

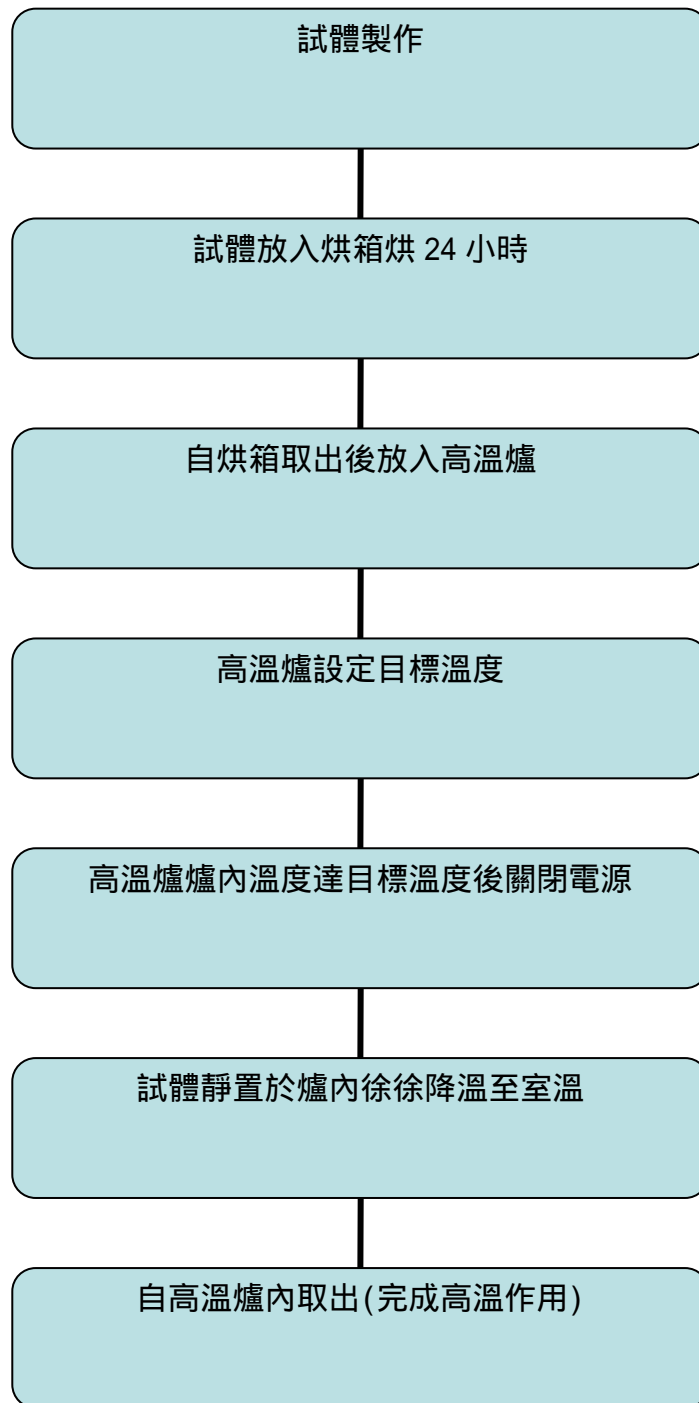


圖 3-3.5 400 高溫試驗流程圖





照片 3-3.1 主要試驗設備



照片 3-3.2 先以絕乾輕質骨材填滿模具



照片 3-3.3 漿體由排漿孔流出表示灌漿完成



照片 3-3.4 流度台



照片 3-3.5 抗壓強度試驗



照片 3-3.6 熱傳導係數試驗

## 第四節 試驗結果與討論

### 4.1 以振動夯實工法預鑄輕質骨材混凝土非結構件

#### 4.1.1 以波索蘭材料與水泥拌製之輕質磚脫模成型分析

以波索蘭材料取代部分水泥不同體積配比及不同填充孔隙體積比，對無細輕質混凝土磚立即脫模成型之試驗結果如表 3-4.1 (a) (b) (c) 所示。本研究之無細輕質混凝土磚，填充漿體需提供足夠的直立強度於輕質骨材，方可成功脫模。故由表 3-4.1 中發現無論任一種配比，可立即脫模成型之最小填充孔隙比為 0.3，此既表示填充孔隙比為 0.3 時，填充漿體對輕質骨材始提供基本之直立強度。本研究是以漿體填充孔隙體積比的觀念產製無細輕質混凝土，現以比表面積理論反推可立即脫模成型之最小包裹厚度比(包裹厚度與粒徑半徑比)：

已知平均粒徑 7 mm 比表面積： $857 \text{ m}^2/\text{m}^3$

最少填充孔隙比之漿量： $V_m = 0.455 \times 0.3 = 0.1365 \text{ m}^3/\text{m}^3$

粒徑平均最小包裹厚度： $0.1365 \div 857 = 0.16 \text{ mm}$

粒徑平均最小包裹厚度比： $0.16 \div 3.5 = 0.046$

由此可知，欲使無細輕質混凝土磚立即脫模成型所需之最小包裹厚度比為 0.046，此與文獻【23】之包裹厚度比 0.05 略小。現就不同之填充孔隙體積比及波索蘭材料取代不同水泥體積配比之脫模成型分別討論：

#### 4.1.1.1 變化波索蘭材料取代不同水泥體積對比對無細輕質混凝土磚脫模成型之分析

變化波索蘭材料取代部分水泥體積配比拌製成功之試驗結果，如表 3-4.2 所示。試驗結果繪製成圖 3-4.1。本研究的無細輕質混凝土是採點黏結骨架方式構成，由圖上結果可知在填充孔隙體積比 0.3 時，其包裹厚度 0.046 略小於文獻中的包裹厚度 0.05；對無細輕質混凝土所需直立強度尚屬不足，所以三組的水膠比還不穩定。但在填充孔隙體積

比 0.4 以上時，各組配比的水膠比已一致；此因是填充孔隙體積比 0.4 時，其包裹厚度比為 0.061，比文獻之包裹厚度比 0.05 還大，故輕質骨材間已具有足夠之直立強度來構成點黏結骨架結構，其所需黏塑性不再隨波索蘭材料取代不同水泥體積配比變化而有所改變，故每組配比之水膠比皆一致。

#### 4.1.1.2 變化填充骨材孔隙體積比對脫模成型之分析

變化填充骨材孔隙體積比對脫模成型之試驗結果如表 3-4.3 所示，並將試驗結果繪製成圖 3-4.2。一般混凝土之工作性是與水灰比成正比，水灰比愈大工作性愈佳；反之，水灰比愈小則工作性愈小黏滯性愈大。當混凝土之骨材體積與水灰比固定下，漿體體增加時可改善其工作性。由圖 3-4.2 結果可得知，在波索蘭材料取代 30 % 水泥體積時，其水膠比範圍介於 0.39 ~ 0.27 間，取代 50 % 水泥體積時，其水膠比範圍介於 0.32 ~ 0.27 間，取代 70 % 水泥體積時，其水膠比範圍介於 0.34

~ 0.27 間；在輕質骨材體積固定下，當填充骨材孔隙體積比由 0.3 增加至 0.7 時，填充漿體體積量亦隨之增加，為維持脫模成型時所需之直立強度，則所需水膠比亦相對之降低。而三組配比之漿體填充孔隙體積比在 0.4 與 0.5 時，水膠比只相差 0.01 而已，故其填充漿體對無細輕質混凝土磚的脫模直立強度而言，可視為一組填充孔隙比範圍；由於 0.6 與 0.7 的水膠比已降至 0.27，接近水泥水化所需水灰比 0.25，所以在填充孔隙體積比 0.6 以上時，無細輕質混凝土磚產製水膠比應趨於穩定。

由以上結果可得知，本研究已可成功脫模產製無細輕質混凝土磚。欲使無細輕質磚在自動化生產過程中，具有穩定之生產，以填充孔隙比在 0.4 以上具有較佳的穩定性。而本研究之試驗流程（如圖 3-3.1，3-3.2，3-3.3），先測試材料性質後，選定一組配比，經試拌脫模模具脫模成型，再經震動夯實脫模成型之流程，可供業界參考應用於新材料之產品製作。

#### 4.1.2 以波索蘭材料取代部分水泥輕質磚工程性質分析

為了解漿體填充孔隙體積比的多寡，及波索蘭材料取代不同水泥

體積對產製無細輕質混凝土磚之各項工程性質的影響，本研究變化填充孔隙體積比從 0.3 至 0.7，波索蘭材料取代水泥體積分別為 30%、50% 和 70%，探討其對單位重、熱傳導係數、抗壓強度及抗彎強度之影響。

#### 4.1.2.1 單位重分析

表 3-4.4 為變化填充骨材孔隙體積比之輕質骨材混凝土磚單位重試驗結果，並繪製成圖 3-4.3。從表 3-4.4 中可得知隨填充孔隙比增加，飛灰與爐石取代 30%水泥體積之單位重為  $761.19\sim 1130.98\text{ kg/m}^3$ ，由圖 3-4.3 中可發現單位重隨填充孔隙體積比增加而呈線性增加；而取代 50%及 70%水泥體積配比之單位重分別介於、 $834.69\sim 1143.10\text{ kg/m}^3$  與  $811.86\sim 1036.53\text{ kg/m}^3$ ，其單位重亦隨填充孔隙比增加而呈線性增加。由上述所得之結論得知，當無細輕質混凝土之波索蘭材料取代水泥體積的配比固定及粒徑不變時，其單位重隨填充孔隙漿量之增加呈線性增加，此與文獻【23】相符。

而且從圖中可以發現在相同填充孔隙體積比下，在取代水泥體積 50%和 30%時，兩者的平均單位重相差無幾。而取代 70% 水泥體積的這組配比，在填充孔隙體積比為 0.3 和 0.4 時，其單位重和其餘兩組相差約 2.46%和 2.93%，但隨著填充孔隙體積比的增加，單位重才明顯減少。如填充孔隙比 0.5 時，減少 4.54%，0.6 時為 9.1%和 0.7 時為 9.36%。此因是一般在相同體積下，以比重小的材料取代比重大的材料，其單位體積重會降低，當取代量越大時，單位重下降會更明顯。所以波索蘭材料取代水泥體積比需在 50%以上，且填充孔隙體積比在 0.5 以上時，才有助於減輕單位重。

#### 4.1.2.2 熱傳導係數試驗分析

一般普通混凝土的熱傳導係數約介於  $1.0\sim 1.5\text{ kcal/m}^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$  之間，而無細輕質骨材混凝土則可大幅降低其熱傳導係數。表 3-4.5 為以波索蘭材料取代不同水泥體積配比，所產製之無細輕質混凝土磚的熱傳導係數試驗結果，由表中可知，取代 30%水泥體積之熱傳導係數介於 0.228



~ 0.323 kcal/m.° C.hr 間，取代 50%水泥體積者 0.226 ~ 0.332 kcal/m.° C.hr 之間，而取代 70%者為 0.215~0.282 kcal/m.° C.hr。而本試驗所得之熱傳導係數與普通混凝土比較時，約只有普通混凝土熱傳導係數的 20%左右，若與靜水的熱傳導係數 0.67 kcal/m.° C.hr 相較，亦只有 50%左右，故其隔熱性非常優異。若再將表中結果繪製成圖 3-4.4, 可發現取代 30%與 50%水泥體積的熱傳導係數差異性不大，但取代 70%水泥體積之熱傳導係數，隨填充孔隙體積比的增加至 0.7，其熱傳導係數可降低 15%左右。此因波索蘭材料取代水泥體積 30%和 50%的單位重相差不多，所以兩組織熱傳道係數差異不大；而取代 70%水泥體積之單位重較其餘兩組小，且隨著填充孔隙體積比的增加而差距更大，使得熱傳導係數明顯降低。

而材料之隔熱性除了本身材質的影響外，亦受其孔隙與單位重之影響。當漿體填充孔隙體積比由 0.3 增加至 0.7，將導致無細輕質混凝土之熱傳導係數增加。所以由圖 3-4.5 也可發現，當漿體填充孔隙體積比愈大時，各組配比的熱傳導係數也會隨之增加且幾乎呈線性成長。也就是當孔隙量愈少時，隔熱性愈差。

由於圖 3-4.3 單位重與圖 3-4.4 熱傳導係數的曲線分布極為相似，為瞭解兩者關係，將前述之單位重與熱傳導係數結果合併繪成圖 3-4.5。由圖上可發現在相同填充孔隙體積下，各組配比之單位重與熱傳導係數成比例關係，既單位重小之配比其熱傳導係數也隨之減少。此因是單位重小的孔隙含量較單位重大者為多且組織較不緻密。且從圖 3-4.5 中更可發現，三組配比的熱傳導係數主要受控於單位重，而不受波索蘭材料取代不同水泥體積的影響。因此可得知，當材料之材質相同時，材料孔隙與單位重會同時直接影響其隔熱性，以上之結論與文獻【6, 25, 28】相符。

整體而言，由於波索蘭材料取代水泥體積 50%以上時，可有效降低單位重而使熱傳導係數降低，所以波索蘭材料有助於隔熱性。

#### 4.1.2.3 抗壓強度試驗分析

為瞭解波索蘭材料取代不同水泥體積配比對強度成長之影響，製作兩組試體測試 7 天及 28 天的抗壓強度，試驗結果如表 3-4.6 所示，並繪製成圖 3-4.6。從表中可發現波索蘭材料取代 30 % 水泥體積的 7 天抗壓強度介於  $103.2\sim 232.67\text{ kg/cm}^2$ ，28 天抗壓強度介於  $136\sim 342\text{ kg/cm}^2$ ；取代 50% 水泥體積配比的 7 天抗壓強度為  $77.67\sim 206.67\text{ kg/cm}^2$ ，28 天之抗壓強度為  $124\sim 230.33\text{ kg/cm}^2$ ；取代 70% 的 7 天抗壓強度為  $76.67\sim 162.33\text{ kg/cm}^2$ ，28 天的抗壓強度是  $91\sim 177\text{ kg/cm}^2$ 。三組配比的 7 天抗壓強度平均約為 28 天抗壓強度的 73 % 左右，此與一般輕質骨材混凝土 7 天抗壓強度約為 28 天抗壓強度的 80 % ~90% 略為不同，其原因是所有文獻中提到之波索蘭材料之強度需至晚期時，才開始發揮；且本研究所採用之飛灰為 F 級，其 CaO 含量較少，對混凝土早期強度不會有太大的幫助，所以 7 天的抗壓強度無法如一般輕質骨材混凝土使用水泥砂漿般，為 28 天抗壓強度之 80%~90%。

當漿體填充孔隙體積比由 0.3 變化至 0.7 時，在表 3-4.6 中可發現填充孔隙體積比 0.3 時，由於漿量不足，所獲得之抗壓強度較輕質骨材的筒壓強度  $72.55\text{ kg/cm}^2$  提昇不大。現將三組配比 28 天抗壓強度繪成圖 3-4.7，由圖中可發現抗壓強度隨填充孔隙體積比之增加而呈線性增加，此與文獻【25，23】的小粒徑無細輕質骨材混凝土中，當漿體填充孔隙體積增加時，抗壓強度會呈線性關係是相符合。

本研究所採用的飛灰為 F 級，因 CaO 含量較低，所以當飛灰使用量越大時，早期強度發展較慢；且波索蘭材料一般早期強度較差，需至晚期強度才較優；因此，從圖 3-4.7 中可發現，在相同填充孔隙體積比下，以波索蘭材料取代 30% 者強度最佳，取代 70% 者強度較差。因此可得知，無細輕質混凝土磚的抗壓強度，隨波索蘭材料取代水泥體積的增加而降低。而再波索蘭材料取代 70% 水泥體積這一組配比，當填充孔隙體積比在 0.4 時，其抗壓強度以達到  $156\text{ kg/cm}^2$ ，單位重亦只



有  $827.2\text{ kg/m}^3$ ，熱傳導係更降低至  $0.245\text{ kcal/m}^\circ\text{C.hr}$ ；不但可滿足 CNS 對一般磚之強度要求，更可大幅降低單位重及熱傳導係數。

#### 4.1.2.4 變化填充骨材孔隙體積比對抗彎載重之影響

無細輕質骨材混凝土磚的抗彎載重試驗結果如表 3-4.7 所示，並繪製成圖 3-4.7。當漿體由 0.3 增至 0.7 時，由表中可得知波索蘭材料取代 30% 水泥體積之配比的抗彎載重介於 556~1477kg，取代 50% 水泥體積之配比的抗彎載重介於 520~1006kg，而取代 70% 者之抗彎載重為 452~830kg 間。由圖中可發現抗彎強度隨填充孔隙體積比的增加而呈線性發展，且隨波索蘭材料取代水泥體積的增而降低；此種趨勢與抗壓強度非常相似，所以將上述之抗壓強度與抗彎載重重新整理成圖 3-4.8，由圖上可發現無論任一組配比的抗彎載重與抗壓強度關係呈線性關係；若將抗壓強度換算成抗壓破壞載重，則可發現抗彎載重約為抗壓破壞載重的 1/10~1/15 間。本研究之無細輕質混凝土磚為多孔隙的材料，此與緻密性輕質混凝土的抗彎強度約為抗壓強度的 1/5 相比是合理的。

由以上結果可得到之結論為無細輕質混凝土磚單位重、熱傳導係數、抗壓強度及抗彎載重隨漿體填充孔隙體積比增加而成長；隨波索蘭材料取代水泥體積的增而降低。

#### 4.1.2.5 輕質混凝土磚受 400 高溫試驗分析

一般火害模擬皆以 ASTM E119 火害之標準升溫曲線為準，如圖 3-4.31 所示，但該曲線之升溫速率太快，本次試驗採用之高溫爐設備無法達到，且為了避免試體在高溫過程中產生爆裂，先於烘箱烘 24 小時至試體完全乾燥後，方放入高溫爐中。因此加溫過程中採用如圖 3-4.32 所示之加溫曲線。

#### 4.1.3 無細輕質混凝土之材料生產成本分析

為推廣淤泥燒製輕質骨材相關產品，需考量其成本單價。本研究之無細輕質混凝土磚的材料成本單價如下：

水泥：1.84元/kg

飛灰：0.3元/kg

爐石：0.97元/kg

輕質骨材：1500元/ $m^3$

三種配比與填充孔隙體積比產製之 20×20×5 cm的無細輕質混凝土磚之每平方單價分析結果如表 3-4.8 所示。波索蘭材料取代 30%水泥體積之單價成本介於 89~114 元/ $m^2$ ，取代 50%水泥體積的為 88~108 元/ $m^2$  而取代 30%者為 85~101 元/ $m^2$ 。

本研究之無細輕質混凝土磚的產製方式，是配合高壓地磚的機具設備與生產模式製造，該廠的材料成本費用約為 80 元/ $m^2$ 。若以隔熱性考量，以波索蘭材料取代 70%水泥體積，填充孔隙體積比為 0.4，其材料成本約為 88.67 元/ $m^2$ ；雖然比高壓地磚高約 9 元，但因無細輕質混凝土磚的單位重較輕，可製造成大尺寸的無細輕質混凝土磚。如此不但可降低運費外，更可減少施工時人工費用。所以隨著施工面積的增加，總成本費用可大幅降低。我們預期在進入量產階段後，無細輕質混凝土磚必可成為具有市場競爭力的新建材。

#### 4.1.4 以細砂與水泥拌製之輕質磚脫模成型分析

由於本研究之試體乃是採用立即脫模之方式製造，所以成功與否之關鍵在於所用之配比是否適合立即脫模，而漿量的多寡以及水灰比的高低則是其決定因素。又因為本實驗配比之選擇乃是採用試誤之方法，若是直接製作試體，則失敗之機率極高，將造成人力、材料及時間上之浪費，於是本實驗於實際製作輕質骨材混凝土磚之前，有先行作了一個小模具（15cm×6cm×4 cm）之立即脫模試拌試驗，先行篩選出較為可行之配比，以簡化試誤之過程。

本試拌試驗是在固定砂與水泥的比例下參照表 3-3.3、表 3-3.4 及

表 3-3.5 之配比,以不同的水泥砂漿填充孔隙體積比及水灰比來拌合輕質骨材混凝土磚,再依圖 3-3.2 之測試流程來作配比測試,將測試結果列於表 3-4.9 內,由結果顯示水泥砂漿填充孔隙體積比應大於 0.4,而水灰比則介於 0.36~0.51 之間

當砂與水泥比例 ( $V_s/V_c$ ) 為 1 時,從水泥砂漿填充孔隙體積比來看,可立即脫模之填充孔隙體積比最低約為 0.4,比 0.4 低的填充孔隙比將無法立即成形。這是因為在填充孔隙體積比為 0.4 時,將其換算成骨材之水泥砂漿包裹厚度,只有 0.19mm 而已,只能勉強提供骨材粘結時所需之漿量,所以當填充孔隙體積比低於 0.4 時,骨材間將因為粘結漿量之不足,而導致無法立即脫模成形、提供立即拆模所需之直立強度。

圖 3-4.10 為砂與水泥比例 ( $V_s/V_c$ ) 為 1 時,水灰比與填充孔隙體積比之關係圖,由圖中可看出,可立即脫模之水灰比是介於 0.36~0.5 之間,且隨著填充孔隙體積比從 0.4 增加到 0.7,水灰比會從 0.5 逐漸的降低到 0.36,但當填充孔隙體積比增加到 0.7、0.8 時,水灰比則會停留在 0.36,不再有明顯之降低。因為在填充孔隙體積比低時,漿量較少,所以需要較高的水灰比及流動性,才可完全將骨材包裹住,而在填充孔隙體積比高時,包裹骨材所需之漿量已相當足夠,受水灰比之影響較低,故只要水泥砂漿本身可以立即站立,原則上輕質骨材混凝土磚皆可成形,所以水灰比的變動幅度才會差不多。而  $V_s/V_c = 2$  與  $V_s/V_c = 3$  這兩組亦與  $V_s/V_c = 1$  這組有相同之趨勢,如圖 3-4.11 與圖 3-4.12。

將上述三組之結果繪成圖 3-4.13,由圖中可發現,在相同的水泥砂漿填充孔隙體積比下, $V_s/V_c=3$  這組之水灰比最高,其次為  $V_s/V_c=2$  這組,最後才是  $V_s/V_c=1$  這組,這個結果與水泥砂漿的粘滯性有很大的關係,因為可立即脫模之輕質骨材混凝土磚,其中當粘結料的水泥砂漿必需要有一定之粘滯性,而砂含量的多寡,則會導致水泥砂漿粘滯性之差異,一般來說砂的含量越多、粘滯性會越差,故只好增加用水量來增加水泥砂漿之粘滯性,所以砂的含量越多水灰比會越高。

#### 4.1.5 夯實及脫模技術之探討

本研究輕質骨材混凝土磚試體之製作，是依照 3-5 節所述，配合現有工業生產線上之填料、振動及夯實後立即脫模之方式進行。係利用相關工廠提供之振動夯實壓模機，如照片 3-3 及 3-4 所示，以上壓力  $250\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 288\text{kg}/\text{cm}^2$ 、振動頻率 44.82 Hz、振動時間 4 秒鐘來進行試體之製作，試體製作流程如圖 3-3.3 及所示。

試體於施作時，會造成試體失敗的原因，除了本身的配比不合適之外，常常會遇到以下的幾個問題：

##### 1、夯實的不確實

由於本試驗所採用之水灰比非常低，因此本身的坍度幾乎等於零、工作性非常的差，實驗之初本來是採用一次填料的模式，將模具填滿然後振動、夯實，但是常常發現在脫模後，試體的四個角落容易因為沒有確實的夯實而崩落，所以後來才會改用兩次填料及夯實的模式，以改善角落夯實不確實的問題。

##### 2、脫模時受到擾動

本試驗試體於水泥砂漿填充孔隙體積比較低時，其骨材間之粘結方式有點類似無細混凝土之點粘結方式，在脫模時受到擾動的影響會較填充孔隙體積比高時來的大。因此在脫模時，若下模無法平穩且垂直的往上移動，往往會造成試驗試體的擾動，使試體不密實，而影響了試體的強度及各項性質。所以在製作試體的過程中，要注意下模移動時是否有晃動，如果有則要將機器重新調整好，使其擾動減到最小。

##### 3、骨材與水泥砂漿拌合不均勻

目前試驗所用的拌合方式是採用手提式拌合器，且骨材之比重又較水泥砂漿小，因此拌合時水泥砂漿很容易就沉積在拌合筒底部，在填料時若不在意，就將其填入模具內，往往會造成所製作之試體與設計之配比不符之結果。所以在拌合時就應確實將骨材與水泥砂漿拌合

均勻，以避免這個問題的產生。

#### 4.1.6 輕質骨材混凝土磚各項性質之探討

本實驗乃利用填充孔隙體積比的概念來進行配比計算，並拌製輕質骨材混凝土磚，做其單位重、抗壓強度、抗彎強度及熱傳導係數等等的試驗，探討在不同的砂與水泥的比例以及在不同的水泥砂漿填充孔隙體積比下，其對輕質骨材混凝土各項性質之影響。

##### 4.1.6.1 單位重試驗

以砂與水泥比例( $V_s/V_c$ )為 1 時之試驗結果為例，由結果中發現，當水泥砂漿填充孔隙體積比從 0.4 增加到 0.8 時，單位重也由  $793 \text{ kg/m}^3$  增加到  $1063 \text{ kg/m}^3$ ，將其繪成圖 3-4.5，可看出輕質骨材混凝土磚單位重之變化情形幾乎呈現線性發展的趨勢。而  $V_s/V_c = 2$  與  $V_s/V_c = 3$  這兩組之趨勢亦與  $V_s/V_c = 1$  這組相同，由此可知，輕質骨材混凝土磚之單位重與水泥砂漿填充孔隙體積比是呈線性發展之趨勢。將三組之結果列於表 3-4.10，並分別繪成圖 3-4.15 及圖 3-4.16。

將上列三組結果同繪於圖 3-4.17，可看出在相同的水泥砂漿填充孔隙體積之下， $V_s/V_c = 1$  這組之單位重最高、 $V_s/V_c = 2$  這組次之、 $V_s/V_c = 3$  這組最低，水泥砂漿中砂比例越高者，輕質骨材混凝土磚之單位重越低。此乃水泥砂漿中砂之比重較水泥為低所致，因為水泥砂漿的體積固定下，而砂的比例越高，也就表示水泥砂漿之重量將會越低，所以輕質骨材混凝土磚之單位重也會跟著越低。

##### 4.1.6.2 抗壓強度試驗

表 3-4.11 為在不同的水泥與砂之比例下、變化水泥砂漿填充孔隙體積，所得輕質骨材混凝土磚試體之抗壓強度結果，其抗壓強度約從

80 kg/cm<sup>2</sup> 到 300 kg/cm<sup>2</sup>。以  $V_s/V_c = 1$  這組之試驗結果為例，由結果中發現，當水泥砂漿填充孔隙體積比從 0.4 增加到 0.8 時，其 28 天抗壓強度也由 81.8 kg/cm<sup>2</sup> 增加到 306.4 kg/cm<sup>2</sup>，將其繪成圖 3-4.15，可看出輕質骨材混凝土磚抗壓強度之變化情形幾乎呈現線性發展的趨勢。而  $V_s/V_c = 2$  與  $V_s/V_c = 3$  這兩組之趨勢（如圖 3-4.19、圖 3-4.20）亦與  $V_s/V_c = 1$  這組相同，由此可知，輕質骨材混凝土磚之抗壓強度與水泥砂漿填充孔隙體積比是呈線性發展之趨勢。

另外為了考慮材料齡期與抗壓強度的關係，又做了一組材齡為 7 天的抗壓試體，來與 28 天之試體作一比較，原則上 7 天強度均有 28 天強度之 8 到 9 成，且由圖 3-4.18、圖 3-4.19 及圖 3-4.20 可知，當水泥砂漿填充孔隙比較低時，輕質骨材混凝土磚之 7 天及 28 天抗壓強度較為接近，而水泥砂漿填充孔隙比較高時，7 天及 28 天抗壓強度差距則較大。這是因為在填充孔隙體積比低時，骨材粘結方式有點類似無細混凝土之點粘結，所以輕質骨材混凝土磚之抗壓強度主要控制在輕質骨材本身，故 7 天強度與 28 天強度差距不大；而在填充孔隙體積比高時，骨材間已不在只是點粘結，所以抗壓強度會隨水泥砂漿 28 天抗壓強度的增加而增加。

再將表 3-4.11 之結果分為 7 天與 28 天繪於圖 3-4.21 及圖 3-4.22，可看出不管是 7 天或 28 天，在水泥砂漿填充孔隙體積比高時，水泥砂漿中砂比例越高者，輕質骨材混凝土磚之抗壓強度則越低，而在水泥砂漿填充孔隙體積比低時，此現象則較不明顯。這也是因為在填充孔隙體積比低時，骨材粘結方式類似點粘結，所以輕質骨材混凝土磚之抗壓強度主要控制在輕質骨材本身，水泥砂漿強度的影響較小，而在填充孔隙體積比高時，骨材間已不在只是點粘結，所以抗壓強度才會隨水泥砂漿強度的增加而增加。

而由試驗結果知，填充孔隙體積比為 0.4 時之抗壓強度 76.77 kg/cm<sup>2</sup> 與輕質骨材筒壓強度 72.4 kg/cm<sup>2</sup> 相差無幾，可約略的看出在填充孔隙體積比低時，抗壓強度主要是由骨材強度控制。

#### 4.1.6.3 抗彎載重試驗

表 3-4.12 為在不同的水泥與砂之比例下、變化水泥砂漿填充孔隙體積，所得輕質骨材混凝土磚試體之抗彎強度結果，抗彎載重約從 500kg 到 1100kg。圖 3-4.23 為以  $V_s/V_c = 1$  這組之結果所繪出之關係圖，由圖中可看出，當水泥砂漿填充孔隙體積比從 0.4 增加到 0.8 時，其 28 天抗彎載重也由 554 kg 增加到 1076 kg，輕質骨材混凝土磚抗彎載重之變化情形幾乎呈現線性發展。而圖 3-4.24 與圖 3-4.25 則為  $V_s/V_c = 2$  及  $V_s/V_c = 3$  這兩組結果所繪成之圖，也與  $V_s/V_c = 1$  這組有相同之趨勢。由上述結果可知，不管砂與水泥的比例為何，輕質骨材混凝土磚之抗彎載重均會隨水泥砂漿填充孔隙量之增加而增加，且約呈線性發展之趨勢。

另外再將上述三組之結果繪成圖 3-4.26，可看出在水泥砂漿填充孔隙體積比固定時，水泥砂漿中砂比例越高者，輕質骨材混凝土磚之抗彎載重則越低，因為抗彎載重與粘結料的強度有關，所以水泥砂漿的強度越強時其抗彎載重值會越高。

#### 4.1.6.4 熱傳導係數試驗

表 3-4.13 為在不同的水泥與砂之比例下、變化水泥砂漿填充孔隙體積，所得輕質骨材混凝土磚試體之熱傳導係數結果，熱傳導係數約介於 0.21 kcal/m.hr. ~0.35 kcal/m.hr. 之間。圖 3-4.27 為以  $V_s/V_c = 1$  這組之結果所繪出之關係圖，由圖中可看出，當水泥砂漿填充孔隙體積比從 0.4 增加到 0.8 時，其熱傳導係數也由 0.219 kcal/m.hr. 增加到 0.299 kcal/m.hr.，變化情形幾乎呈現線性發展。而圖 3-4.28 與圖 3-4.29 則為  $V_s/V_c = 2$  及  $V_s/V_c = 3$  這兩組結果之圖，也與  $V_s/V_c = 1$  這組有相同之趨勢。由上述結果可知，輕質骨材混凝土磚之熱傳導係數與水泥砂漿填充孔隙體積比是呈線性成長之趨勢。

圖 3-4.21 為由上述三組結果所繪之圖，可看出在水泥砂漿填充孔隙體積比低於 0.5 時，不管水泥砂漿中砂的比例多高，其熱傳導係數值

差異性並不大，但隨著填充孔隙體積比的持續增加，熱傳導係數也會跟著不斷的上升，且水泥砂漿中砂的比例較高者，其增加的幅度也會較比例低者來的大。探討其原因為當填充孔隙體積比低時，水泥砂漿佔整體體積的比例並不高，所以熱傳導係數主要是由輕值骨材來決定，故三組之熱傳導係數差異性並不大，但當水泥砂漿量持續增加時，其所佔整體體積的比例相對的也會提高，故水泥砂漿對熱傳導係數的影響也會慢慢的增加，又因為砂的熱傳導係數較高，所以水泥砂漿中砂比例越高者，其熱傳導係數增加的幅度也會越大。

#### 4.1.6.5 400 高溫試驗

Haroid Cruz【30】由實驗結果指出，在加溫的過程中混凝土在 100 左右有最高之熱傳係數，當溫度大於 100 時，熱傳遞係數開始下降，而當溫度達 300 以上時，由於裂縫的產生，熱傳遞係數下降，當溫度達 600 時，因孔隙之熱傳導轉以輻射為主，致使熱傳遞係數逐漸回升。本實驗之熱傳遞係數試驗為加溫前測一次，加溫 400 冷卻後再測一次，經實驗後發現三種漿體比例的熱傳遞係數均有上升之趨勢，如圖 3-4.33，3-4.34，3-4.35 所示。此現象可能是水泥漿體與飛灰、爐石之熱膨脹係數不同，在高溫下因界面漲縮不諧和而產生二次應力及異常變形，當應力超過漿體與骨材間之黏結力時，將在界面造成開裂。文獻【31】亦指出，添加飛灰在高溫下有較高之熱傳導速率，且因其溼度含量較高，造成其承受較高之熱應力，產生其受熱應力而發展之裂縫較寬大。且因本次試驗之為多孔隙之試體，用點連結的方式製成，若骨材與漿體分離後，其孔隙與孔隙間因漿體與骨材開裂而形成大孔隙，熱傳遞將由傳導轉以氣體對流為主，造成熱傳遞係數變大。

為瞭解波索蘭材料取代不同水泥體積配比對受 400 高溫後之強度影響，將試體受 400 溫度後再做抗壓試驗，試驗結果如表 3-4.14 所示，從表中可發現波索蘭材料取代 30%水泥體積者其受 400 高溫後抗壓強度介於 91~294 kg/cm<sup>2</sup> 之間（原 28 天抗壓強度介於 136~342 kg/cm



<sup>2</sup>之間); 取代 50%水泥體積者其受 400 高溫後抗壓強度介於 75~88 kg/cm<sup>2</sup>之間(原 28 天抗壓強度介於 124~230 kg/cm<sup>2</sup>之間); 取代 70%水泥體積者其受 400 高溫後抗壓強度介於 73~165 kg/cm<sup>2</sup>之間(原 28 天抗壓強度介於 91~177 kg/cm<sup>2</sup>之間)。

在漿體比例 70%:30%中, 填充孔隙比 0.3、0.4、0.5 其各別殘留強度百分比為 67%、60%、66%, 在其他組的配比中也有同樣的趨勢, 其殘留強度比隨填充孔隙比增加而增加。其原因可能為水泥漿體受 400 高溫後產生裂縫導致強度降低, 加上試體強度來源為水泥漿點連結作用, 故漿體一但出現裂縫後會使試體抗壓強度相對損失較大, 填充孔隙比越大則強度殘留比也越大。在波索蘭材料取代 70%水泥體積中之填充孔隙比 0.3, 此一數據其強度損失百分比偏高, 應是作抗壓強度時, 其水泥漿體點連結能力喪失後, 產生堆積效應後骨材繼續提供破裂強度所導致。再若以波索蘭材料取代水泥漿體越多者, 強度損失會越嚴重。

#### 4.1.6.6 成本分析

為了將來輕質骨材的推廣應用, 成本考量佔了很重要的因素。本研究在不考慮人事及機具的費用下, 單純的針對輕質骨材混凝土磚的材料成本來作分析, 而目前材料的單價成本如下:

水泥: 1.84 元/kg

大陸砂: 0.33 元/kg

輕質骨材: 1500 元/m<sup>3</sup>

三種配比與填充孔隙體積比產製之 20×20×5 cm的無細輕質混凝土磚之每平方材料單價分析結果如表 3-4.14 所示, Vs/Vc=1 的單價約介於 90~110 元/m<sup>2</sup>, Vs/Vc=2 的單價約介於 92~107 元/m<sup>2</sup>, 而 Vs/Vc=3 的單價則介於 89~103 元/m<sup>2</sup>。

從上述結果可知, 材料成本隨水泥砂漿填充孔隙體積的增加而增加, 而在相同的填充孔隙體積比時, 水泥砂漿中砂的含量越高者, 其材料成本也越低。在不考慮抗壓強度的情形下, 單純的只對隔熱性作

考量時， $V_s/V_c=2$  及水泥砂漿填充孔隙體積比為 0.5 這組之試體，擁有較低的熱傳導係數 0.221 kcal/m.hr. 以及較少的材料成本 92 元/m<sup>2</sup>。

再從另一方面來看，由協力廠商所提供的資料，目前一般高壓地磚的材料成本約為 80 元/m<sup>2</sup>，與上述輕質骨材混凝土磚試體之材料成本 92 元/m<sup>2</sup> 作一比較，雖然輕質骨材混凝土磚之材料成本較高，但差距並不大，考量以後可減少的人力搬運、運送成本以及其擁有的隔熱效能之後，輕質骨材混凝土磚實有其市場之競爭力，為一隔熱性良好之新建材。

## 4.2 以低壓灌漿工法產製輕質骨材混凝土非結構件

### 4.2.1 水泥 (砂) 漿流動性試驗

本研究採取低壓灌漿方式施作，因此漿體流動性之優劣為灌漿成功與否之關鍵，各組配比之流動性試驗結果如表 3-3.9、表 3-3.10 及表 3-3.11。在震動前流度方面，由表中可得知，無論 A 系列 (純水泥)、B 系列 (15%飛灰、15%爐石) 或 C 系列 (30%飛灰、30%爐石)，在天然砂添加量相同下，漿體之流動性與水膠比成正比；而在水膠比相同下，則流動性與天然砂添加量成反比。

另外，飛灰、爐石添加量亦對漿體之流動性造成影響。當用砂量較低 (S/B = 1) 時，由於飛灰、爐石之粒徑小於水泥，比表面積較大，因此在水膠比相同之情況下，若飛灰、爐石添加量愈高，則漿體愈黏稠，流動性隨之降低；而當用砂量較高 (S/B= 2) 時，整體水泥砂漿中之漿量相對變少，細微之飛灰、爐石顆粒反能提供潤滑效果，因此可降低摩擦力，若水膠比相同時，此時漿體之流動性隨飛灰、爐石用量之增加而提高。

在震動後流度方面，其值一般約在 130% ~210%間，由於試樣經過外來能量之施加使其強制變形，故其變化趨勢不似震動前具明顯規則性，在配比取決上不易判斷，因此僅視為輔助參考資料，而以震動前流度為主要參考依據。經試拌後決定採用震動前流度 15% ~40%、震動

後流度 150%~190%之配比，共計 12 組進行輕質混凝土磚之灌製。

#### 4.2.2 水泥 (砂) 漿抗壓強度試驗

以複合材料觀點視之，混凝土為粗骨材與水泥 (砂) 漿兩相材料所組成，因此水泥 (砂) 漿強度將直接影響輕質混凝土磚之各項力學性質，各組配比之 7 天、28 天抗壓強度試驗結果如表 3-3.9 ~表 3-3.11。由表中發現，無論 A 系列、B 系列或 C 系列，在天然砂添加量相同下，水泥 (砂) 漿之抗壓強度與水膠比成反比；而在水膠比相同下，則抗壓強度與天然砂添加量成正比，此乃因天然砂強度高於水泥 (砂) 漿強度所致。

除此之外，飛灰、爐石添加量當然亦對水泥 (砂) 漿之抗壓強度造成影響。當水膠比與天然砂用量均相同時，A、B、C 三系列之 7 天抗壓強度均隨飛灰、爐石添加量增加而明顯降低；然而飛灰、爐石會產生二次作用之卜作嵐反應，故 B 系列之 28 天強度雖仍低於 A 系列，但其差距相當有限，且可預期在 56 天或 91 天時將追上 A 系列；而 C 系列由於飛灰、爐石添加量高達 60%，因此抗壓強度較之 A 系列大幅降低，但仍遠大於輕質骨材強度，故不致對輕質混凝土磚之強度產生太大影響。

#### 4.2.3 輕質混凝土磚之產製

根據水泥 (砂) 漿流動性試驗結果挑選 12 組配比進行輕質混凝土磚之灌製，但用砂量較高 ( $S/B=2$ ) 之 3 組配比由於漿體無法帶動天然砂流動，以致灌漿口堵塞，無法順利灌漿，實際完成輕質混凝土磚灌製之配比共計 9 組，其灌漿壓力、拆模時間及水泥 (砂) 漿凝結時間試驗結果如表 3-4.17。

一般灌漿壓力以  $20 \text{ kgf/cm}^2$  為分界，大於  $20 \text{ kgf/cm}^2$  稱之為高壓灌漿，反之則稱為低壓灌漿。本文慮及施工上之便利性，將灌漿壓力上

限定於  $10 \text{ kgf/cm}^2$ ，由表 3-4.17 結果可知，在水膠比與天然砂用量適當搭配下，順利完成灌漿之 9 組配比，其灌漿壓力均介於  $2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 7.5 \text{ kgf/cm}^2$  之間。拆模時間方面，大致均在四至五小時之間，亦即約在水泥（砂）漿達到初凝時即可進行拆模。

以本工法預鑄輕質混凝土磚之目的，主要乃希望磚體能在短時間內達到直立強度，以便迅速進行拆模，增加鋼模之再使用率，進而能在預鑄工廠內大量生產。若欲提高產能，則可考慮在水泥（砂）漿中添加速凝劑，或以高溫蒸汽養護，以縮短拆模時間；另外，若在生產設備許可，且無安全性顧慮下，適度提高灌漿壓力亦為可行方法之一。

#### 4.2.4 輕質混凝土磚之性質

以前節所述方法找出各試驗配比之最適灌漿壓力與拆模時間後，在相同條件下進行重製，每組灌製 6 顆試體，養護至試驗齡期後，進行各項輕質混凝土磚物理與力學性質之試驗，包括單位重、抗壓強度及熱傳導係數，其結果如表 3-4.18 所示。在單位重方面，大致約在  $1200 \text{ kg/m}^3 \sim 1300 \text{ kg/m}^3$  之間，由於飛灰、爐石比重均低於水泥比重，故在水膠比與用砂量均相同情況下，輕質混凝土磚之單位重隨飛灰、爐石用量之增加而降低。

抗壓強度方面，除 0.50Cc 組之外，7 天約介於  $13 \text{ MPa} \sim 17 \text{ MPa}$  之間，28 天約介於  $15 \text{ MPa} \sim 20 \text{ MPa}$  之間（一等紅磚抗壓強度不得低於  $150 \text{ kgf/cm}^2$ ，即約  $14.7 \text{ MPa}$ ），趨勢則與水泥（砂）漿相同，即當水膠比與天然砂用量均相同時，抗壓強度隨飛灰、爐石添加量增加而降低，A、B、C 三系列均相似，而 0.50Cc 組之強度特別低，經試驗觀察，乃是因為漿體未能完全填滿孔隙所致；各組之單位重與 28 天抗壓強度關係如圖 3-4.43 所示，可發現其關係略成正比。

隔熱性方面則趨勢與抗壓強度相反，飛灰、爐石之添加有利於提昇輕質混凝土磚之隔熱性，即熱傳導係數降低，其值約為  $0.38 \sim 0.55 \text{ kcal/m-hr}$ ，不但遠低於普通混凝土，甚至低於一般建築紅磚；各組

之單位重與熱傳導係數關係如圖 3-4.44 所示，可發現其趨勢呈現良好之正比關係。

另外，將水泥（砂）漿抗壓強度與輕質混凝土磚抗壓強度關係繪成圖 3-4.45 及圖 3-4.46，可明顯看出其落差極大，輕質混凝土磚之強度並不隨水泥（砂）漿強度增加而提昇，亦即表示輕質混凝土磚抗壓強度乃是由輕質骨材強度主控，此一現象亦可由抗壓試驗中印證，輕質混凝土磚之破壞面均貫穿弱相之輕質骨材。因此，飛灰、爐石添加量可再提高，除可降低單位重與熱傳導係數外，更有利於經濟性；而添加適量之天然砂，則對強度有些微助益，亦有利於經濟性，但使用量不可過高，粒徑亦不可過大，否則將影響工作性，甚而導致灌漿失敗。

#### 4.2.5 中空輕質混凝土牆版之製作及其性質

以低壓灌漿工法產製輕質混凝土磚獲得優良之成效，故本研究開發另一套模具，以相同工法製作中空輕質混凝土版（照片 3-4.2），試體尺寸 20 cm × 20 cm × 8 cm，其中有配置 6 根  $\psi 4$  cm 鋼管（照片 3-4.3），並改良灌漿方法，灌漿口與排漿孔均設於模具頂面（照片 3-4.4），以期能更確實使漿體完全填滿模具，亦獲得優良之成果，試體表面極為光滑平整（照片 3-4.5）。中空輕質混凝土牆版之單位重約介於 500 kg/m<sup>3</sup>~1100 kg/m<sup>3</sup> 之間，其熱傳導係數可低至 0.2 kcal/m-hr- 以下。

表 3-4.1(a) 水泥：波索蘭材料 = 70%：30%之立即脫模成型試驗結果

填充孔隙比	水膠比	修正水膠比	脫模狀況
0.10	0.90	0.61	<b>1</b>
0.10	1.00	0.68	<b>1</b>
0.20	0.40	0.31	<b>3</b>
0.20	0.50	0.40	<b>3</b>
0.20	0.60	0.49	<b>2</b>
0.30	0.40	0.34	<b>4</b>
0.30	0.45	0.39	<b>ok</b>
0.30	0.50	0.43	<b>5</b>
0.40	0.30	0.26	<b>4</b>
0.40	0.35	0.31	<b>ok</b>
0.40	0.40	0.36	<b>5</b>
0.50	0.30	0.27	<b>4</b>
0.50	0.35	0.32	<b>ok</b>
0.50	0.40	0.37	<b>5</b>
0.60	0.30	0.27	<b>ok</b>
0.60	0.35	0.32	<b>5</b>
0.60	0.40	0.37	<b>5</b>
0.70	0.25	0.23	<b>4</b>
0.70	0.30	0.28	<b>ok</b>

**1**：漿量過少，試拌脫模失敗。**2**：漿量過多，試拌脫模失敗。

**3**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量過少而失敗。

**4**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量黏滯性不足而失敗。

**5**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量黏滯性過大而失敗。

**ok**：脫模成功。

表 3-4.1(b) 水泥：波索蘭材料 = 50%：50%之立即脫模成型試驗結果

填充孔隙比	水膠比	修正水膠比	脫模狀況
0.10	0.90	0.60	<b>1</b>
0.10	1.00	0.68	<b>1</b>
0.20	0.45	0.35	<b>3</b>
0.20	0.50	0.40	<b>3</b>
0.20	0.6	0.49	<b>2</b>
0.30	0.35	0.29	<b>ok</b>
0.30	0.40	0.34	<b>5</b>
0.30	0.45	0.39	<b>5</b>
0.30	0.50	0.43	<b>5</b>
0.40	0.30	0.26	<b>4</b>
0.40	0.35	0.31	<b>ok</b>
0.40	0.40	0.36	<b>5</b>
0.50	0.30	0.27	<b>4</b>
0.50	0.35	0.32	<b>ok</b>
0.50	0.40	0.36	<b>5</b>
0.60	0.30	0.27	<b>ok</b>
0.60	0.35	0.32	<b>5</b>
0.60	0.40	0.37	<b>5</b>
0.70	0.25	0.23	<b>4</b>
0.70	0.30	0.28	<b>ok</b>

**1**：漿量過少，試拌脫模失敗。**2**：漿量過多，試拌脫模失敗。

**3**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量過少而失敗。

**4**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量黏滯性不足而失敗。

**5**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量黏滯性過大而失敗。

**ok**：脫模成功。

表 3-4.1(c) 水泥：波索蘭材料 = 30%：70%之立即脫模成型試驗結果

填充孔隙比	水膠比	修正水膠比	脫模狀況
0.10	0.90	0.60	<b>1</b>
0.10	1.00	0.68	<b>1</b>
0.20	0.40	0.31	<b>3</b>
0.20	0.50	0.40	<b>3</b>
0.30	0.40	0.34	<b>ok</b>
0.30	0.45	0.39	<b>5</b>
0.30	0.50	0.43	<b>5</b>
0.40	0.35	0.31	<b>ok</b>
0.40	0.40	0.35	<b>5</b>
0.40	0.50	0.45	<b>5</b>
0.50	0.35	0.32	<b>ok</b>
0.50	0.40	0.36	<b>5</b>
0.50	0.50	0.46	<b>5</b>
0.60	0.30	0.27	<b>ok</b>
0.60	0.40	0.37	<b>5</b>
0.70	0.25	0.23	<b>4</b>
0.70	0.30	0.28	<b>ok</b>

**1**：漿量過少，試拌脫模失敗。**2**：漿量過多，試拌脫模失敗。

**3**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量過少而失敗。

**4**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量黏滯性不足而失敗。

**5**：試拌脫模成功，但輕質磚脫模時，漿量黏滯性過大而失敗。

**ok**：脫模成功。



表 3-4.2 變化波索蘭材料取代部分水泥體積之立即脫模成型試驗結果

填充孔隙比	70%:30% 修正水膠比	50%:50% 修正水膠比	30%:70% 修正水膠比
0.3	0.39	0.29	0.34
0.4	0.31	0.31	0.31
0.5	0.32	0.32	0.32
0.6	0.27	0.27	0.27
0.7	0.28	0.28	0.28

表 3-4.3 ( a ) 變化填充骨材孔隙體積比之立即脫模成型試驗結果

漿體比例	填充孔隙比	修正水膠比
70% : 30%	0.3	0.39
	0.4	0.31
	0.5	0.32
	0.6	0.27
	0.7	0.28

表 3-4.3 ( b ) 變化填充骨材孔隙體積比之立即脫模成型試驗結果

漿體比例	填充孔隙比	修正水膠比
50% : 50%	0.3	0.29
	0.4	0.31
	0.5	0.32
	0.6	0.27
	0.7	0.28

表 3-4.3 ( c ) 變化填充骨材孔隙體積比之立即脫模成型試驗結果

漿體比例	填充孔隙比	修正水膠比
30% : 70 %	0.3	0.34
	0.4	0.31
	0.5	0.32
	0.6	0.27
	0.7	0.28

表 3-4.4 單位重試驗結果

漿體比例	填充孔隙比	單位重( $kg/m^3$ )
水泥：波索蘭材料 70%:30%	0.3	761.19
	0.4	918.41
	0.5	972.13
	0.6	1053.24
	0.7	1130.98
水泥：波索蘭材料 50%:50%	0.3	834.69
	0.4	852.13
	0.5	943.99
	0.6	1099.78
	0.7	1143.10
水泥：波索蘭材料 30%:70%	0.3	811.86
	0.4	827.18
	0.5	899.73
	0.6	999.66
	0.7	1036.53

表 3-4.5 無細輕質混凝土磚之熱傳導係數試驗結果

漿體比例	孔隙比	導熱係數( $kcal/m.^{\circ}C.hr$ )
水泥：波索蘭材料 70%:30%	0.3	0.228
	0.4	0.257
	0.5	0.272
	0.6	0.295
	0.7	0.323
水泥：波索蘭材料 50%:50%	0.3	0.226
	0.4	0.253
	0.5	0.281
	0.6	0.290
	0.7	0.332
水泥：波索蘭材料 30%:70%	0.3	0.215
	0.4	0.245
	0.5	0.274
	0.6	0.282
	0.7	0.296

表 3-4.6 無細輕質混凝土磚抗壓強度成長試驗結果

漿體配比	孔隙比	7 天抗壓強度 $kg/cm^2$	28 天抗壓強度 $kg/cm^2$
水泥：波索蘭材料 70%:30%	0.3	103.20	136.00
	0.4	130.67	185.00
	0.5	154.67	207.33
	0.6	179.33	226.00
	0.7	232.67	342.00
水泥：波索蘭材料 50%:50%	0.3	77.67	124.00
	0.4	102.33	170.67
	0.5	111.00	172.00
	0.6	169.00	186.00
	0.7	206.67	230.33
水泥：波索蘭材料 30%:70%	0.3	76.67	91.00
	0.4	98.00	156.67
	0.5	110.67	160.33
	0.6	113.67	165.00
	0.7	162.33	177.00

表 3-4.7 無細輕質混凝土磚抗彎載重試驗結果

孔隙比	水泥：波索蘭材料 70%:30% 抗彎載重 kg	水泥：波索蘭材料 50%:50% 抗彎載重 kg	水泥：波索蘭材料 30%:70% 抗彎載重 kg
0.3	556	520	452
0.4	632	739	688
0.5	960	788	750
0.6	1044	864	772
0.7	1477	1006	830

表 3-4.8 20×20×5 cm之無細輕質混凝土磚單價成本

填充孔隙比	水泥：波索蘭材料 70%:30% 單價(元/ $m^2$ )	水泥：波索蘭材料 50%:50% 單價(元/ $m^2$ )	水泥：波索蘭材料 30%:70% 單價(元/ $m^2$ )
0.3	88.56	87.81	84.58
0.4	95.72	92.08	88.67
0.5	100.90	96.35	92.09
0.6	108.53	102.60	97.06
0.7	114.12	107.20	100.73

表 3-4.9 可立即脫模之試拌配比

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	總拌合水量 (Kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (Kg/m <sup>3</sup> )	天然砂 (Kg/m <sup>3</sup> )	骨材 (Kg/m <sup>3</sup> )
1	0.4	0.5	86.87	153.44	70.78	600
1	0.5	0.45	103.36	200.25	92.37	600
1	0.6	0.41	117.18	251.38	115.95	600
1	0.7	0.36	127.94	307.45	141.82	600
1	0.8	0.36	146.21	351.37	162.07	600
2	0.5	0.44	83.29	156.48	144.36	600
2	0.6	0.44	99.95	187.78	173.23	600
2	0.7	0.4	109.42	226.89	209.31	600
2	0.8	0.36	116.23	268.89	248.06	600
2	0.9	0.36	130.76	302.50	279.07	600
3	0.5	0.51	78.81	121.55	168.20	600
3	0.6	0.48	89.68	149.86	207.38	600
3	0.7	0.44	98.59	179.78	248.78	600
3	0.8	0.4	105.38	211.44	292.59	600
3	0.9	0.36	109.85	244.99	339.02	600

表 3-4.10 單位重試驗之結果

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	單位重(Kg/m <sup>3</sup> )
1	0.4	0.5	792.6
1	0.5	0.45	837.5
1	0.6	0.41	882.6
1	0.7	0.36	986.4
1	0.8	0.37	1063
2	0.5	0.43	800.8
2	0.6	0.44	865.7
2	0.7	0.4	953.9
2	0.8	0.36	1032
2	0.9	0.36	1081
3	0.5	0.51	783.6
3	0.6	0.48	856.9
3	0.7	0.44	918.5
3	0.8	0.4	960
3	0.9	0.36	1093

表 3-4.11 抗壓強度試驗之結果

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	7 天抗壓強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	28 天抗壓強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	0.4	0.5	76.77	81.8
1	0.5	0.45	122.6	129.3
1	0.6	0.41	205.4	208.5
1	0.7	0.36	244.1	263
1	0.8	0.37	294.2	306.4
2	0.5	0.43	99.83	103.2
2	0.6	0.44	135.5	132.9
2	0.7	0.4	181.2	182.2
2	0.8	0.36	230.5	248.2
2	0.9	0.36	273.7	288.5
3	0.5	0.51	93.33	98.1
3	0.6	0.48	131.3	134.7
3	0.7	0.44	144	145.6
3	0.8	0.4	183.3	173.2
3	0.9	0.36	241	250.1



表 3-4.12 抗彎強度試驗之結果

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	28 天抗彎載重(Kg)
1	0.4	0.5	554
1	0.5	0.45	772
1	0.6	0.41	848
1	0.7	0.36	1044
1	0.8	0.37	1076
2	0.5	0.43	616
2	0.6	0.44	790
2	0.7	0.4	876
2	0.8	0.36	940
2	0.9	0.36	1096
3	0.5	0.51	594
3	0.6	0.48	718
3	0.7	0.44	886
3	0.8	0.4	975
3	0.9	0.36	1022

表 3-4.13 熱傳導係數試驗之結果

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	熱傳導係數 (kcal/m.hr. )
1	0.4	0.5	0.219
1	0.5	0.45	0.222
1	0.6	0.41	0.262
1	0.7	0.36	0.271
1	0.8	0.37	0.299
2	0.5	0.43	0.221
2	0.6	0.44	0.246
2	0.7	0.4	0.264
2	0.8	0.36	0.295
2	0.9	0.36	0.32
3	0.5	0.51	0.238
3	0.6	0.48	0.251
3	0.7	0.44	0.272
3	0.8	0.4	0.308
3	0.9	0.36	0.345

表 3-4.14 各配比混凝土於火害後之殘餘強度

漿體比例	填充孔隙比	水膠比	抗壓強度(400 ) (kg/cm <sup>2</sup> )	28 天抗壓強 度(kg/cm <sup>2</sup> )	殘留強度比 %
水泥：波索蘭 材料 (70%：30%)	0.3	0.39	91.11	136.00	66.99%
	0.4	0.31	111.53	185.00	60.29%
	0.5	0.32	136.39	207.33	65.78%
	0.6	0.27	208.68	226.00	92.34%
	0.7	0.28	294.17	342.00	85.76%
水泥：波索蘭 材料 (50%：50%)	0.3	0.29	74.72	124.00	60.26%
	0.4	0.31	87.78	170.67	51.43%
	0.5	0.32	86.53	172.00	50.31%
	0.6	0.27		186.00	
	0.7	0.28		230.33	
水泥：波索蘭 材料 (30%：70%)	0.3	0.34	73.26	91.00	80.51%
	0.4	0.31	90.07	156.67	57.49%
	0.5	0.32	103.26	160.33	64.41%
	0.6	0.27	112.22	165.00	68.01%
	0.7	0.28	164.65	177.00	93.02%

表 3-4.15 各配比混凝土於火害後熱傳導係數之變化

漿體比例	填充孔隙比	水膠比	熱傳導係數(400 )	熱傳導係數(常溫下)
水泥：波索蘭 材料 (70%：30%)	0.3	0.39	0.209	0.195
	0.4	0.31	0.249	0.212
	0.5	0.32	0.243	0.222
	0.6	0.27	0.271	0.283
	0.7	0.28	0.235	0.260
水泥：波索蘭 材料 (50%：50%)	0.3	0.29	0.282	0.246
	0.4	0.31	0.296	0.252
	0.5	0.32	0.340	0.336
	0.6	0.27	0.347	0.265
	0.7	0.28	0.456	0.265
水泥：波索蘭 材料 (30%：70%)	0.3	0.34	0.225	0.228
	0.4	0.31	0.261	0.257
	0.5	0.32	0.276	0.272
	0.6	0.27	0.300	0.295
	0.7	0.28	0.306	0.323

表 3-4.16 輕質骨材混凝土磚之材料成本

Vs/Vc	孔隙比	水灰比	成本 (元/m <sup>2</sup> )
1	0.4	0.5	90.28
1	0.5	0.45	94.95
1	0.6	0.41	100.04
1	0.7	0.36	105.63
1	0.8	0.36	110.00
2	0.5	0.43	91.78
2	0.6	0.44	95.13
2	0.7	0.4	99.33
2	0.8	0.36	103.83
2	0.9	0.36	107.43
3	0.5	0.51	88.96
3	0.6	0.48	92.21
3	0.7	0.44	95.64
3	0.8	0.4	99.28
3	0.9	0.36	103.13

表 3-4.17 新製輕質骨材混凝土磚之性質

配比編號	水泥(砂)漿流度		灌漿壓力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	拆模時間 (hr)	水泥(砂)漿凝結時間	
	震動前(%)	震動後(%)			初凝(hr)	終凝(hr)
0.42Aa	34	162	3.5	4	4	5.5
0.42Ba	19	160	2	4	4	7
0.42Ca	15	155	4	5	5.5	8.5
0.46Ab	40	176	5	4	4	5.5
0.46Bb	28	169	3	5	4.5	7
0.46Cb	30	175	3.5	5	5.5	9
0.50Ac	38	180	7.5	4	4	5.5
0.50Bc	34	189	3	5	4.5	8
0.50Cc	31	166	3	5	5	8.5

表 3-4.18 硬固輕質骨材混凝土磚之性質

配比編號	混凝土磚抗壓強度		單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	熱傳導係數 (kcal/hr-m- )	水泥(砂)漿抗壓強度	
	7 天(MPa)	28 天(MPa)			7 天(MPa)	28 天(MPa)
0.42Aa	14.9	19.1	1229	0.436	45.7	64.2
0.42Ba	14.2	17.0	1221	0.408	42.5	52.2
0.42Ca	13.9	16.0	1199	0.389	31.8	47.5
0.46Ab	16.8	20.2	1307	0.550	44.3	59.2
0.46Bb	13.6	16.5	1275	0.503	39.1	57.8
0.46Cb	12.8	15.8	1255	0.472	27.8	51.1
0.50Ac	15.5	18.9	1244	0.502	42.1	61.2
0.50Bc	14.0	15.7	1232	0.478	34.4	59.5
0.50Cc	6.0	8.3	1189	0.425	26.2	41.8

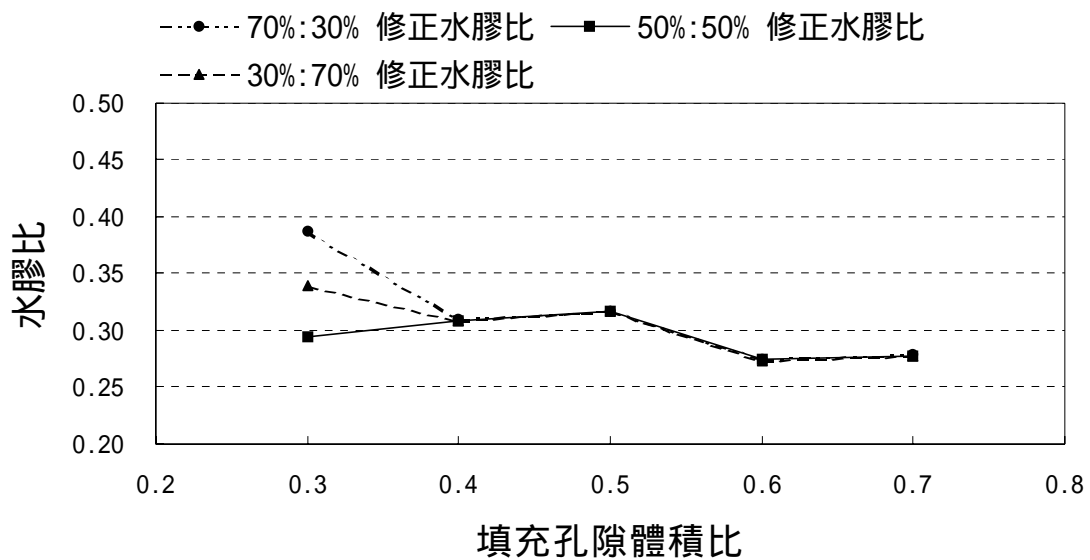


圖 3-4.1 變化波索蘭材料取代部分水泥體積之立即脫模成型試驗結果

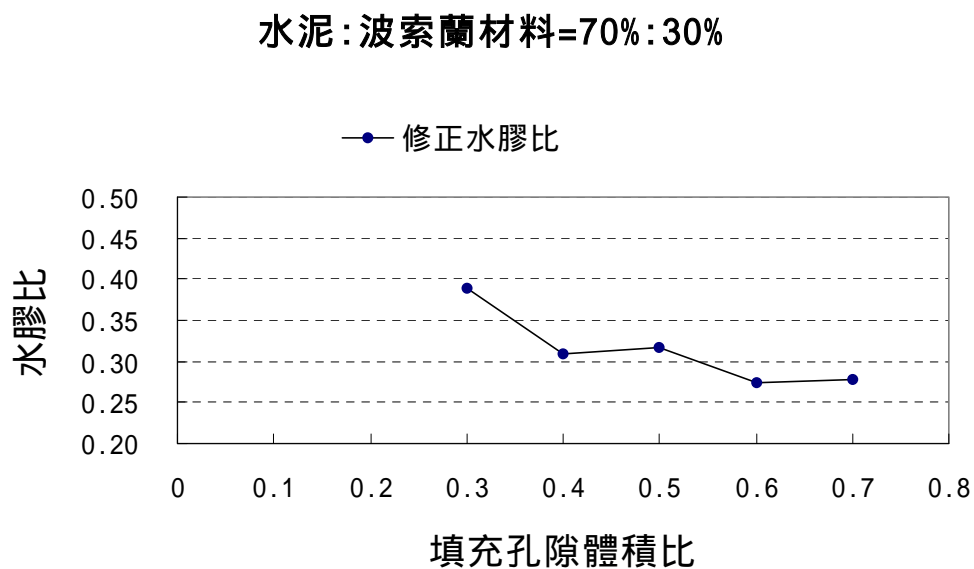


圖 3-4.2 (a) 變化填充骨材孔隙體積比之立即脫模成型試驗結果

水泥：波索蘭材料=50%：50%

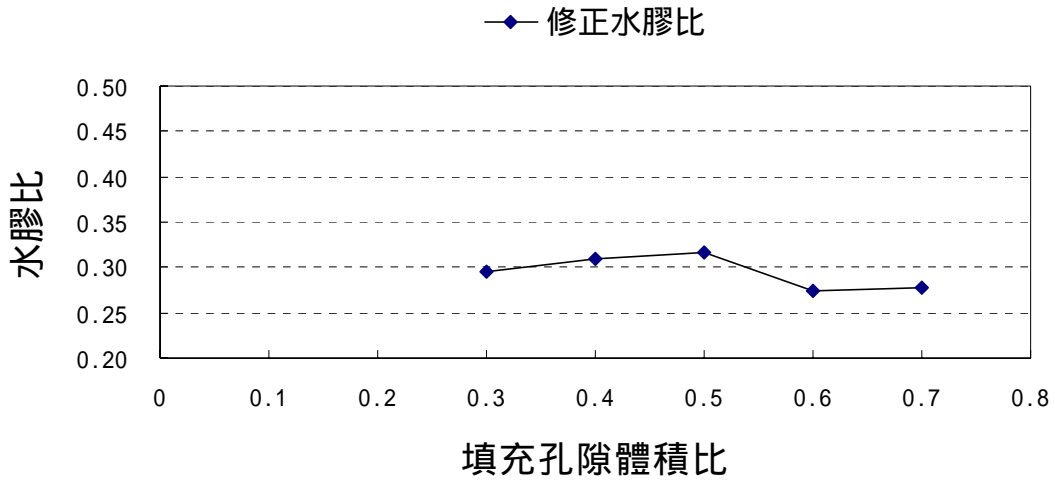


圖 3-4.2 (b) 變化填充骨材孔隙體積比之立即脫模成型試驗結果

水泥：波索蘭材料=30%：70%

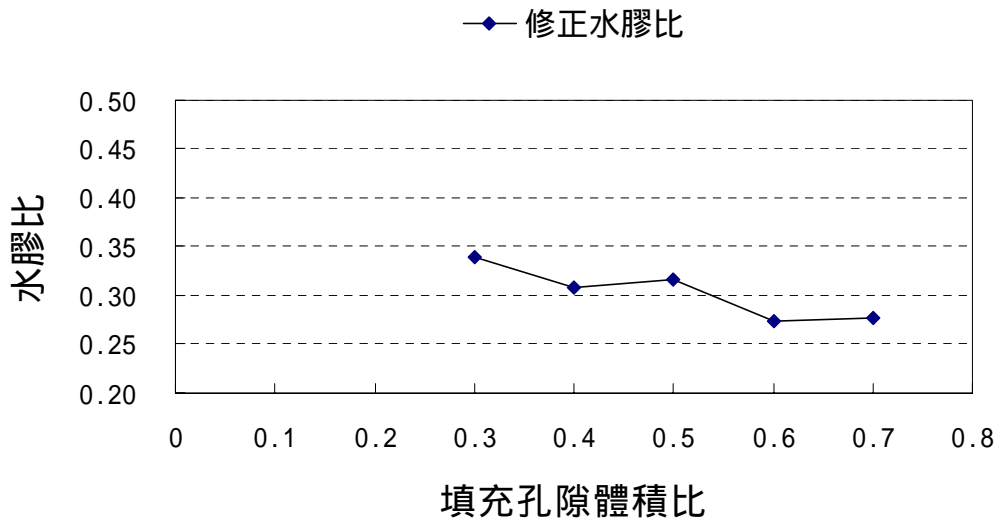


圖 3-4.2 (c) 變化填充骨材孔隙體積比之立即脫模成型試驗結果



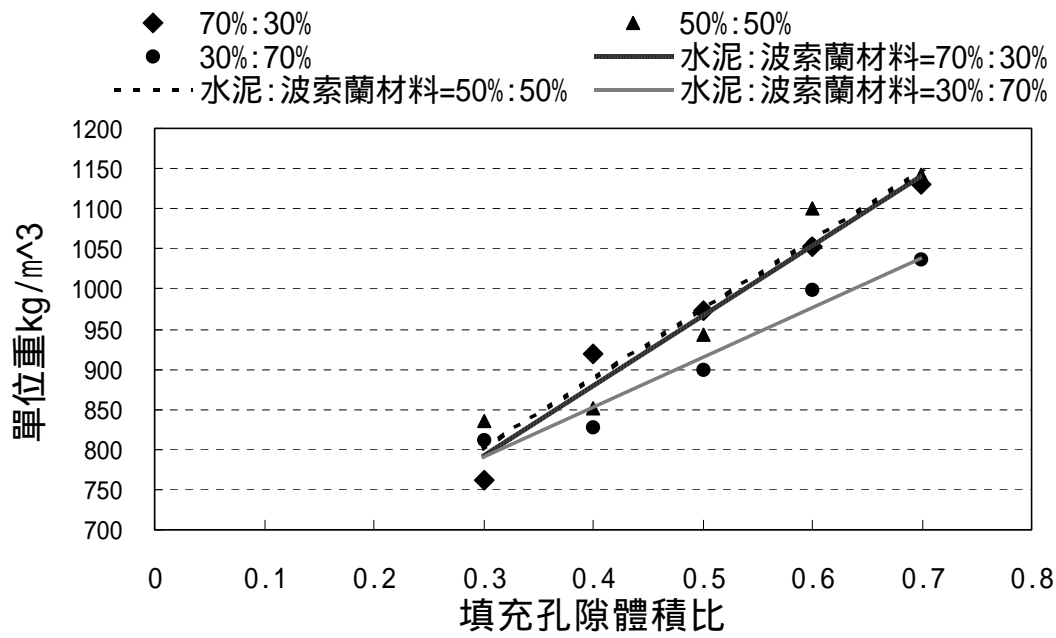


圖 3-4.3 無細輕質混凝土磚單位重視驗結果

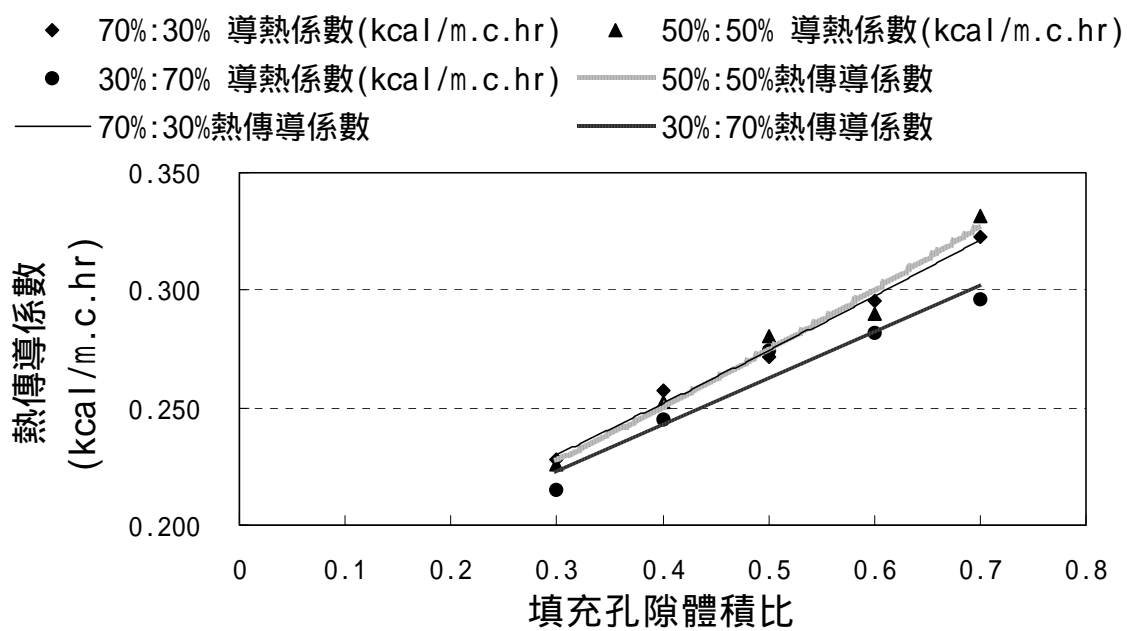


圖 3-4.4 無細輕質混凝土磚之熱傳導係數試驗結果

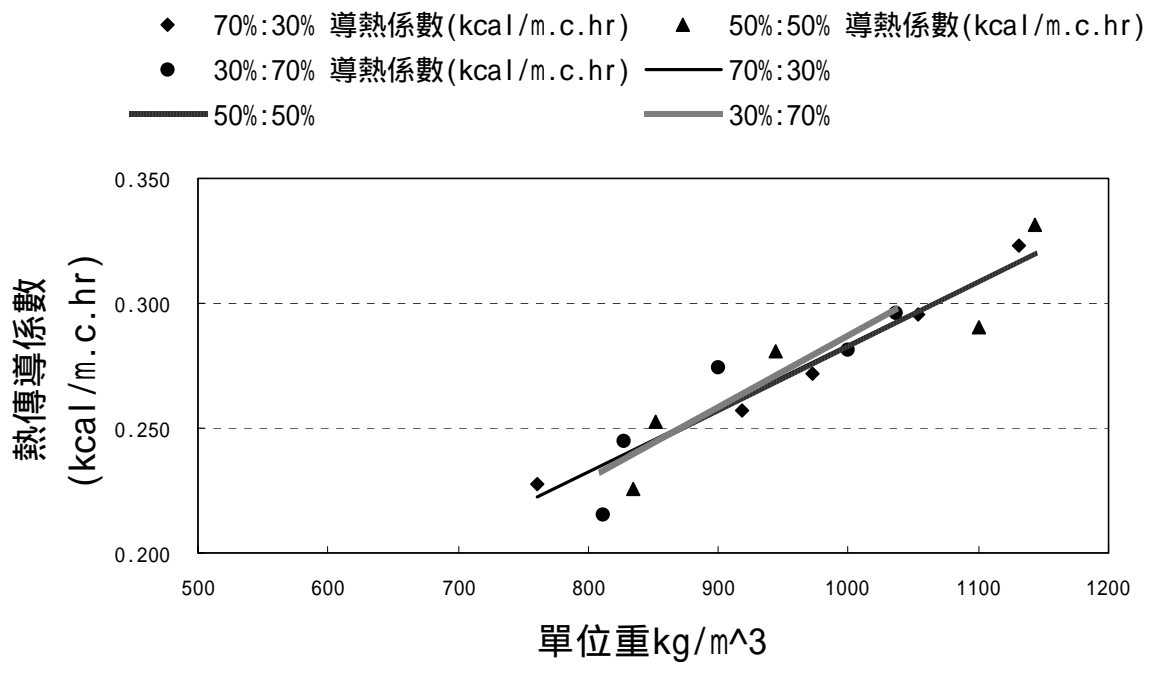


圖 3-4.5 無細輕質混凝土磚之熱傳導係數與單位重之關係

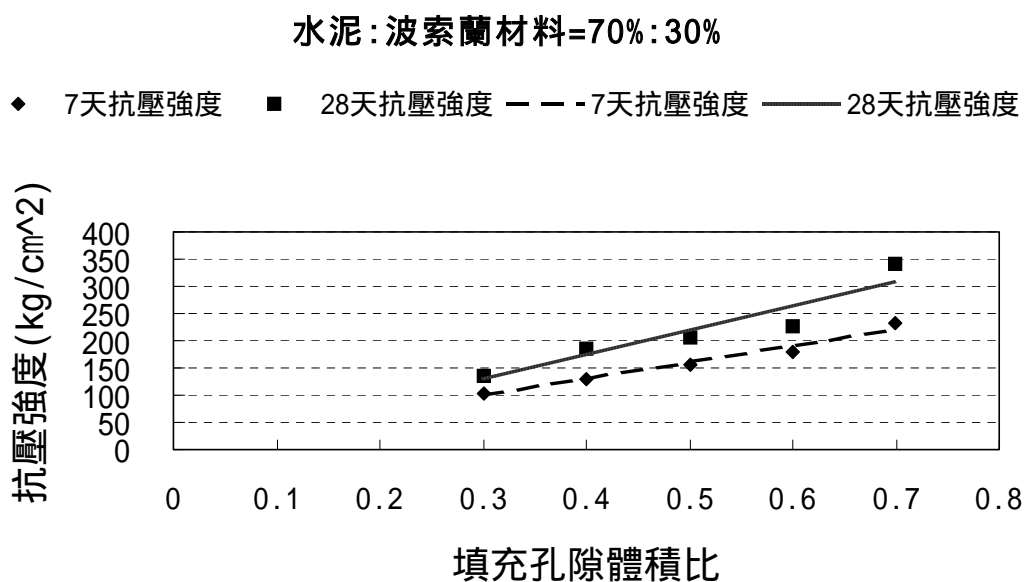


圖 3-4.6 (a) 無細輕質混凝土磚之 7 天和 28 天抗壓強度試驗結果

水泥:波索蘭材料=50%:50%

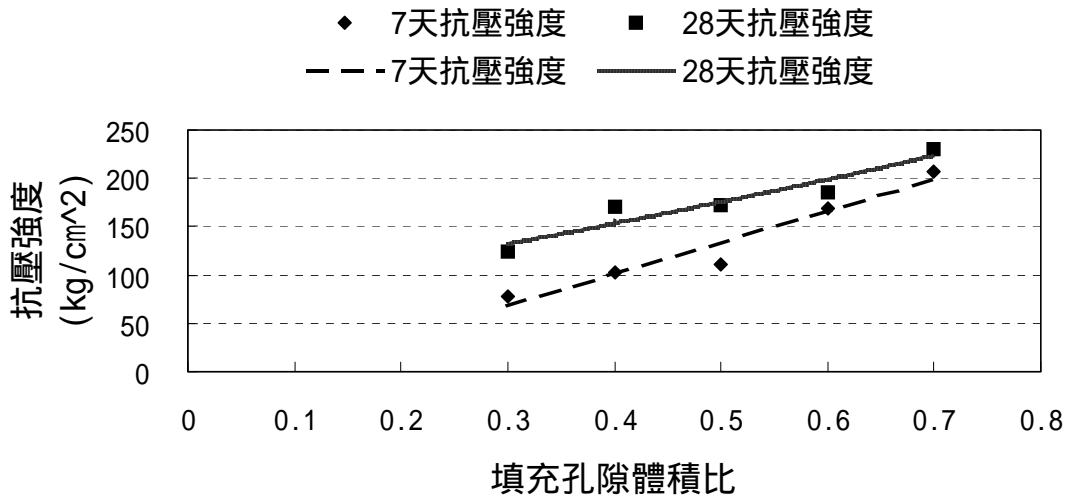


圖 3-4.6 (b) 無細輕質混凝土磚之 7 天和 28 天抗壓強度試驗結果

水泥:波索蘭材料=30%:70%

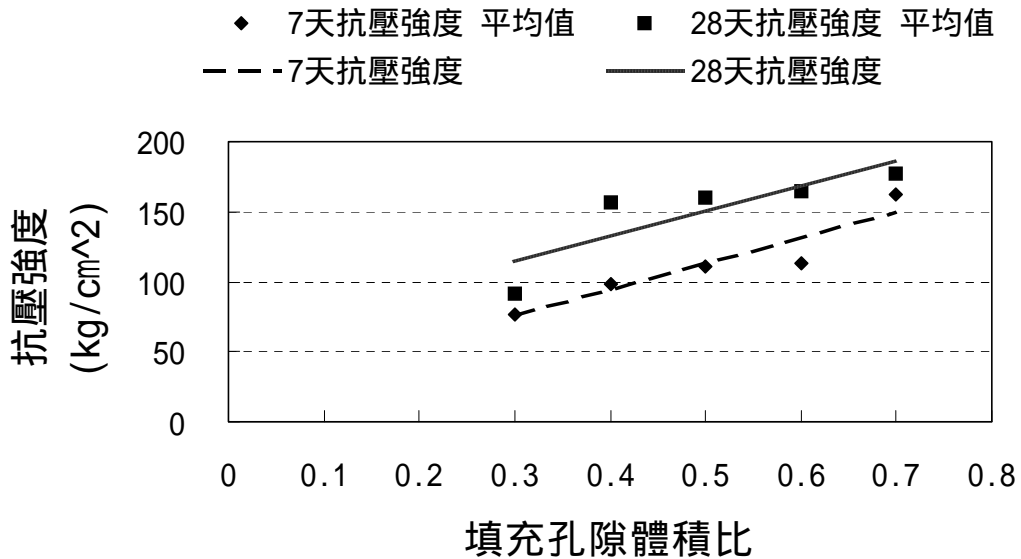


圖 3-4.6 (c) 無細輕質混凝土磚之 7 天和 28 天抗壓強度試驗結果

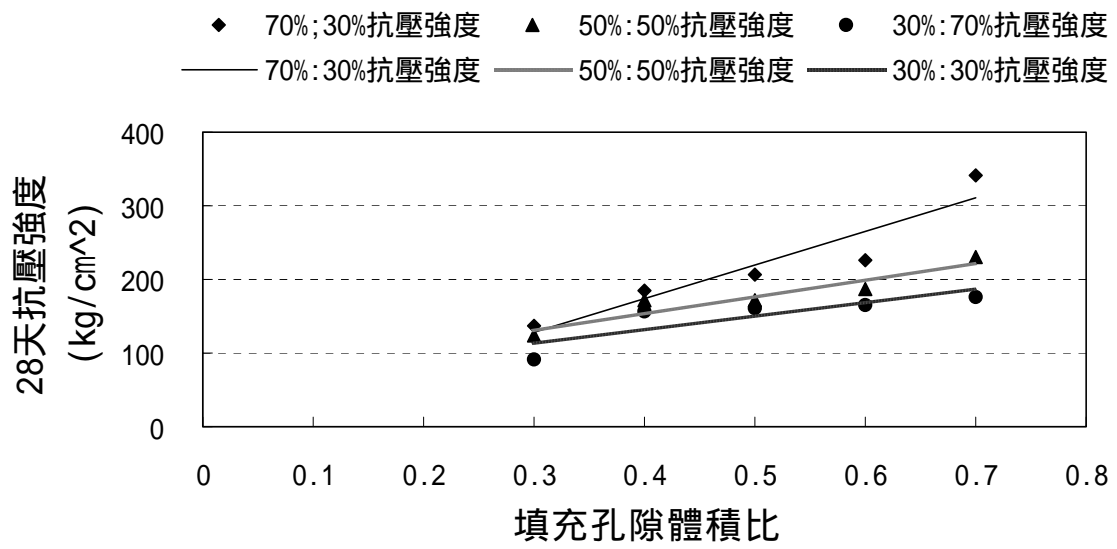


圖 3-4.7 無細輕質混凝土磚之抗壓強度試驗結果

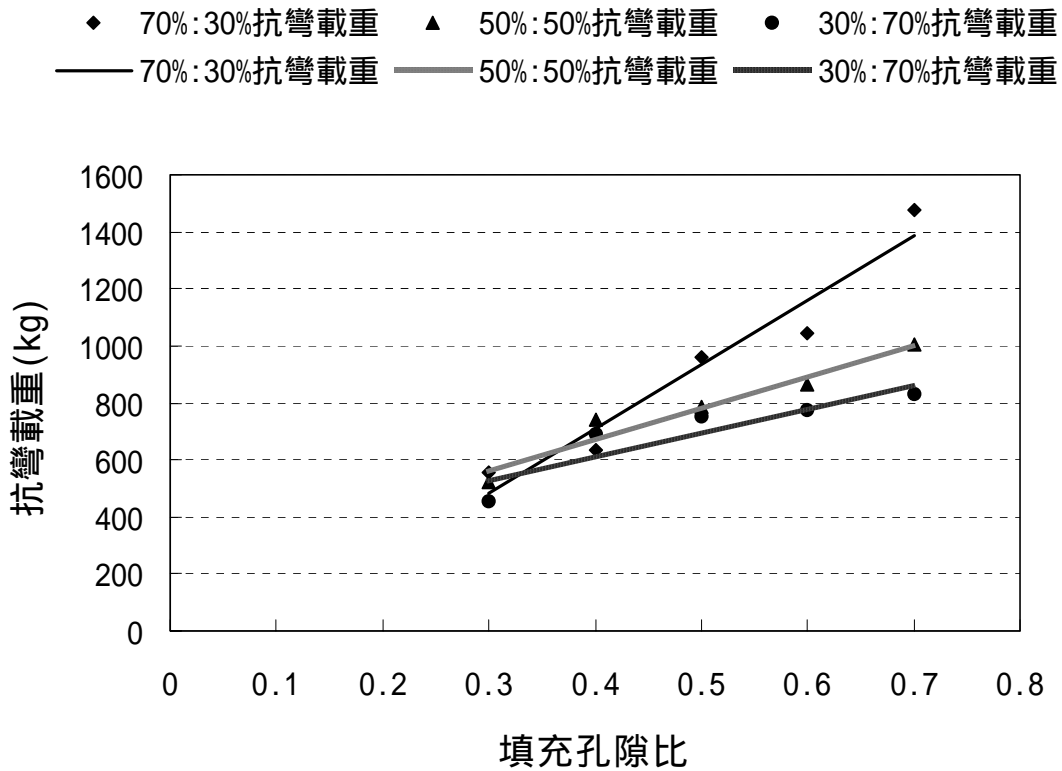


圖 3-4.8 無細輕質混凝土磚之抗彎載重試驗結果

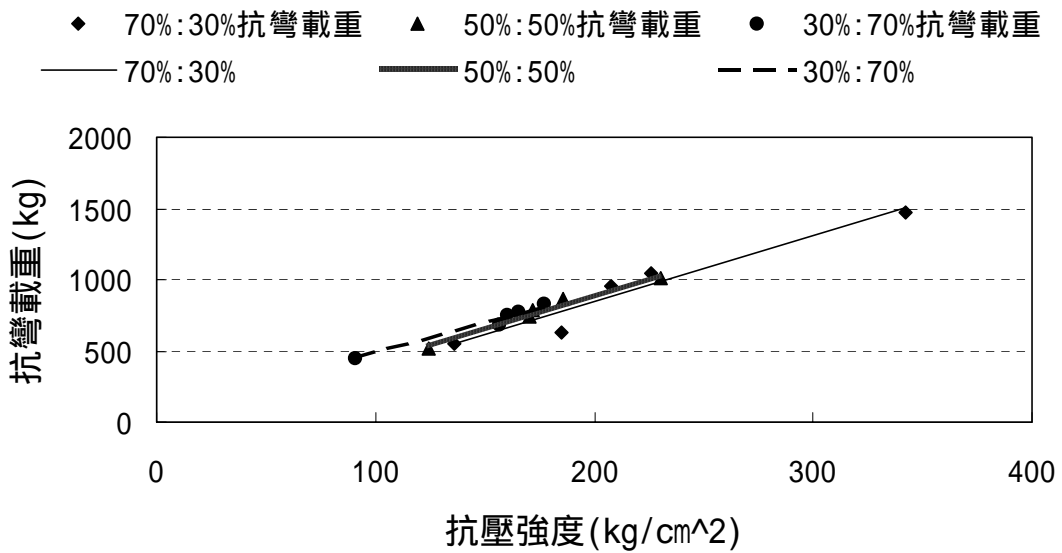


圖 3-4.9 無細輕質混凝土磚之抗壓強度與抗彎載重之關係

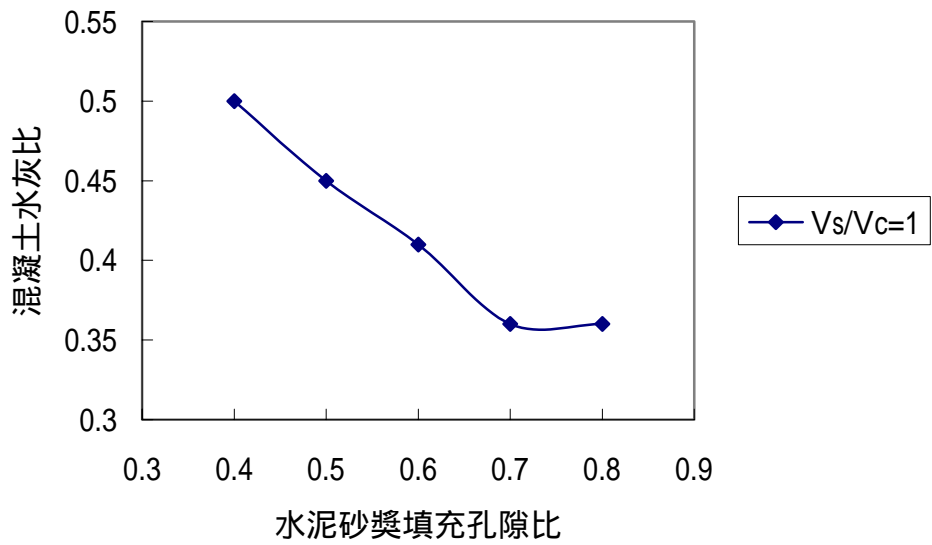


圖 3-4.10  $V_s/V_c=1$  水灰比與填充孔隙體積比關係圖

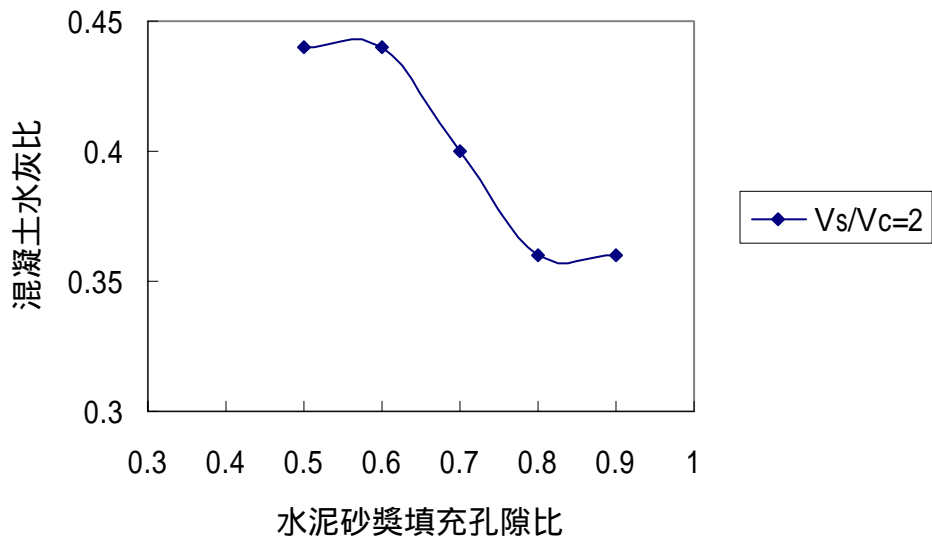


圖 3-4.11  $V_s/V_c=2$  水灰比與填充孔隙體積比關係圖

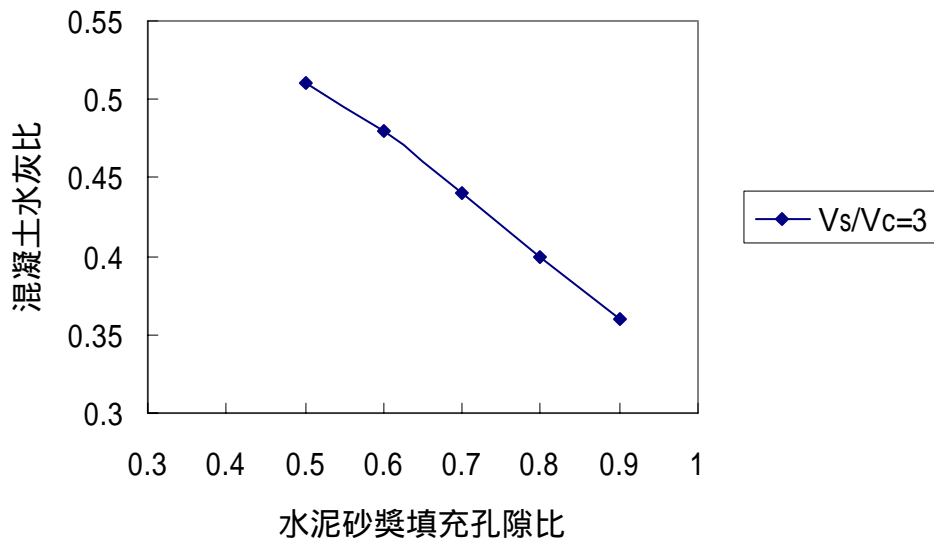


圖 3-4.12  $V_s/V_c=3$  水灰比與填充孔隙體積比關係圖

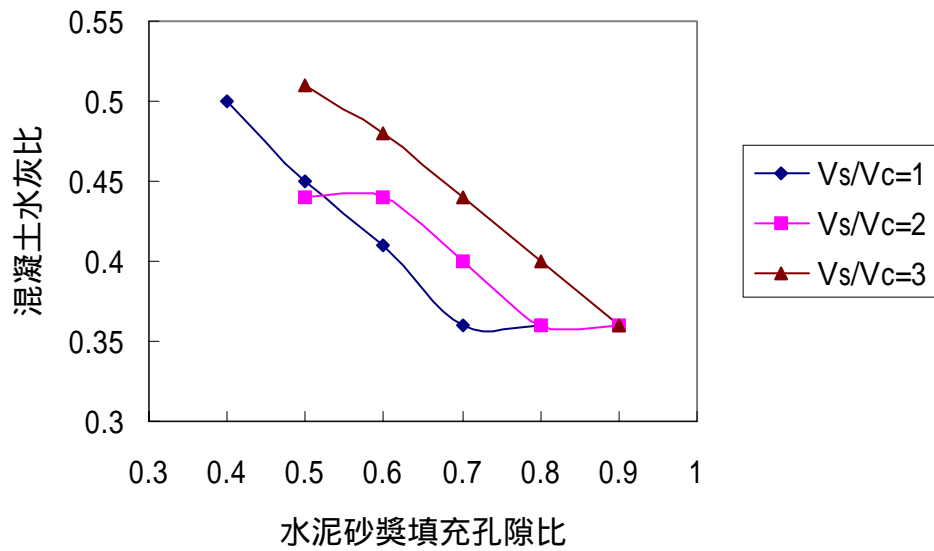


圖 3-4.13 水灰比與填充孔隙體積比關係圖



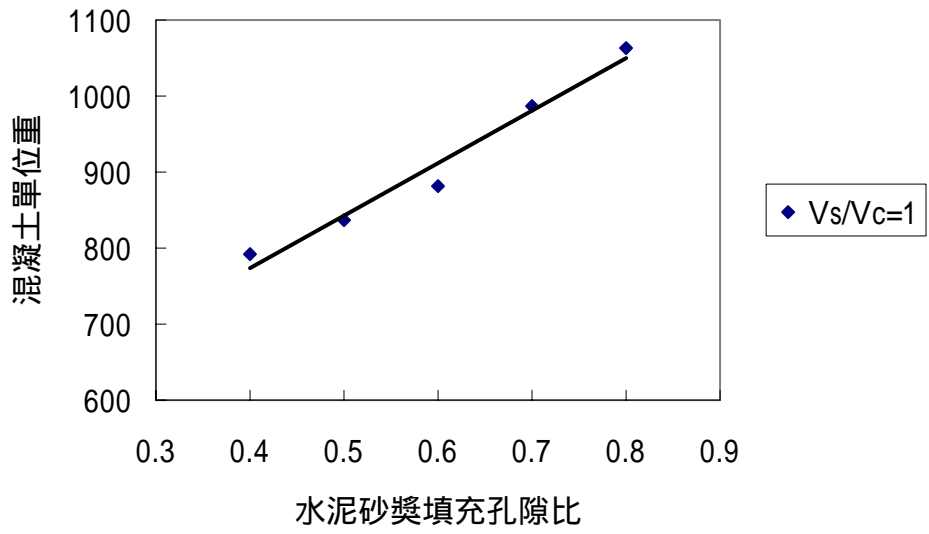


圖 3-4.14  $V_s/V_c=1$  單位重與填充孔隙體積比關係圖

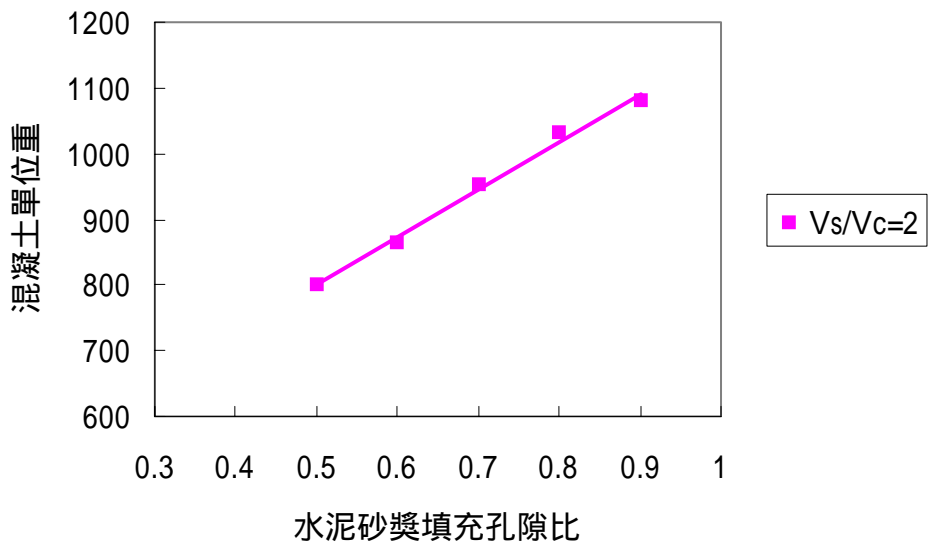


圖 3-4.15  $V_s/V_c=2$  單位重與填充孔隙體積比關係圖

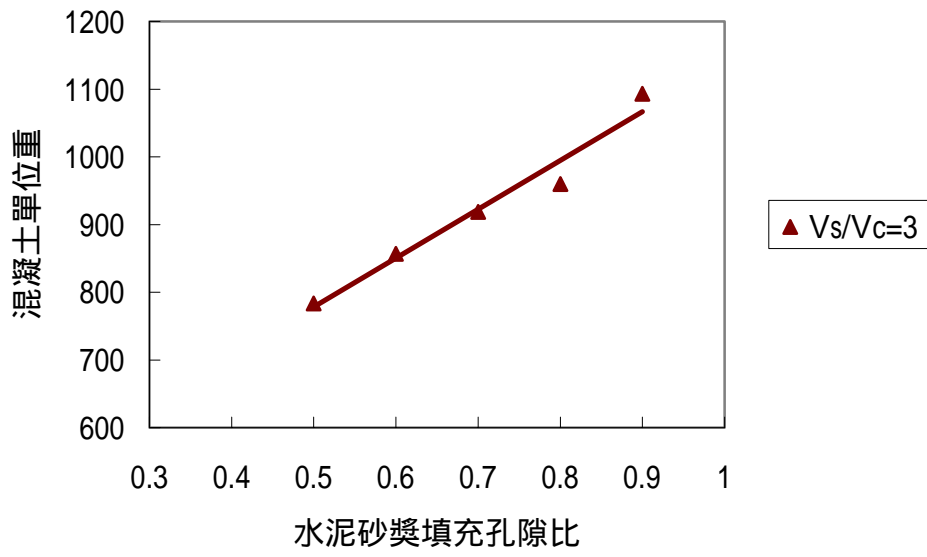


圖 3-4.16  $V_s/V_c=3$  單位重與填充孔隙體積比關係圖

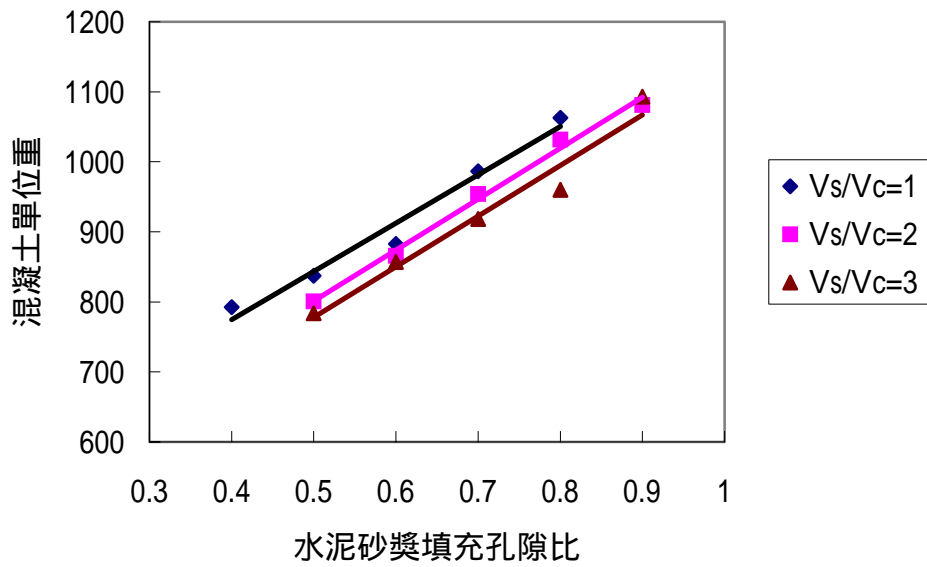


圖 3-4.17 單位重與填充孔隙體積比關係圖

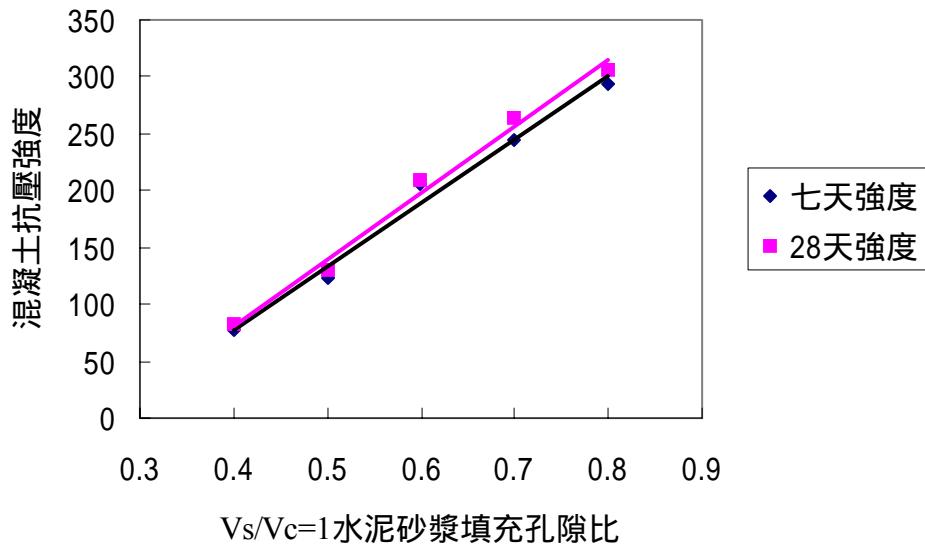


圖 3-4.18  $V_s/V_c=1$  抗壓強度與填充孔隙體積比關係圖

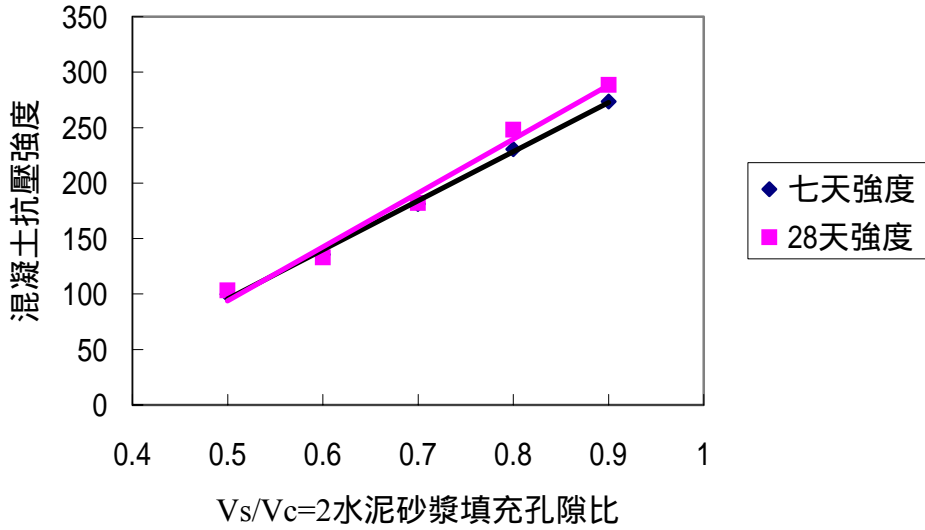


圖 3-4.19  $V_s/V_c=2$  抗壓強度與填充孔隙體積比關係圖

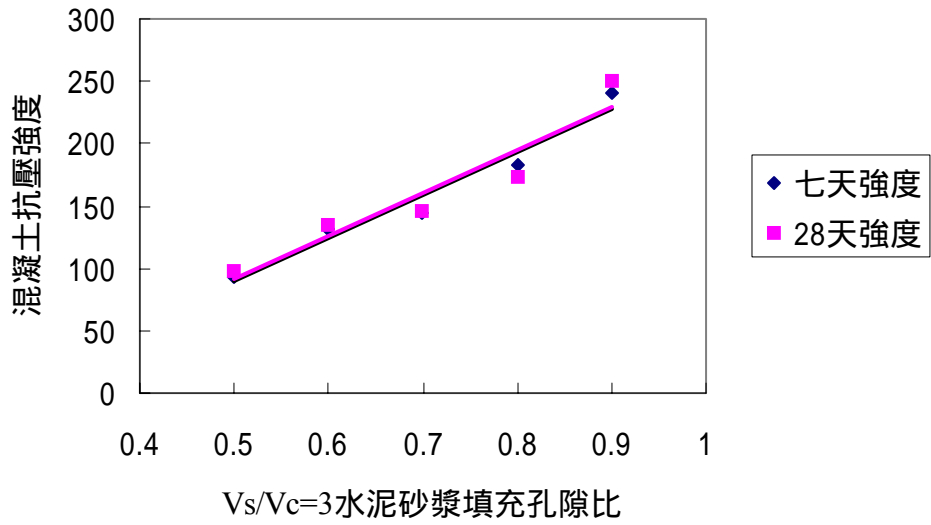


圖 3-4.20  $V_s/V_c=3$  抗壓強度與填充孔隙體積比關係圖

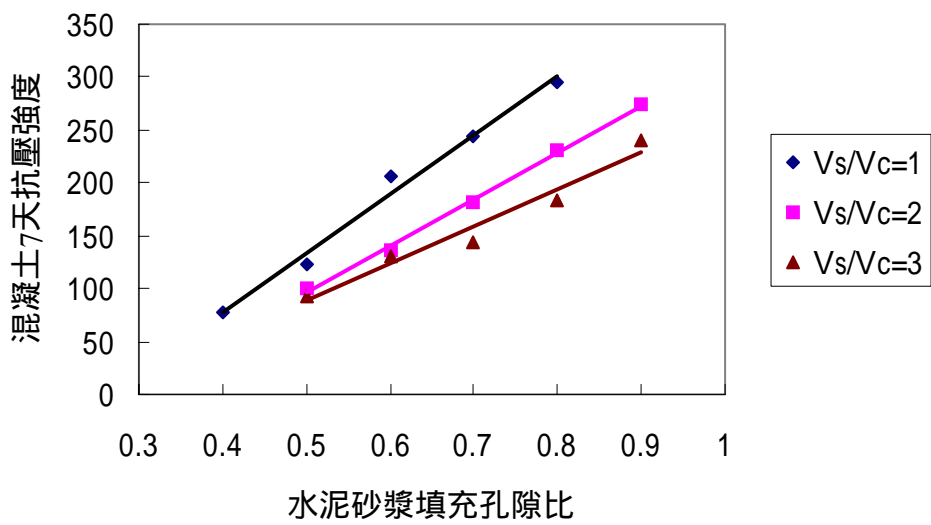


圖 3-4.21 7 天抗壓強度與填充孔隙體積比關係圖

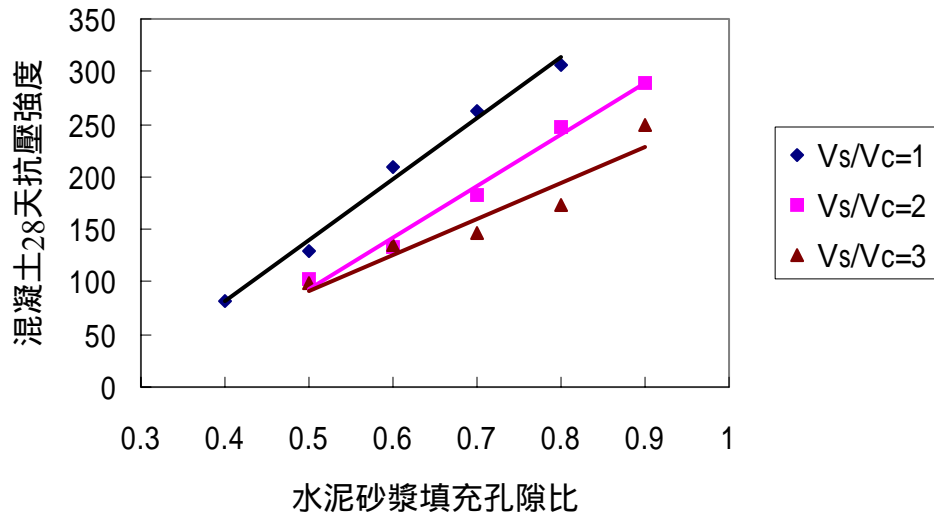


圖 3-4.22 28 天抗壓強度與填充孔隙體積比關係圖

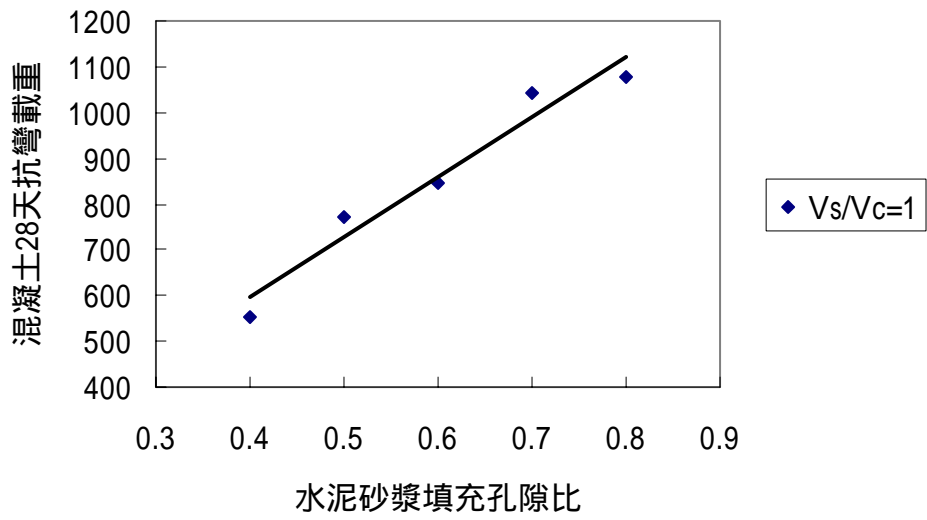


圖 3-4.23  $V_s/V_c=1$  抗彎載重與填充孔隙體積比關係圖

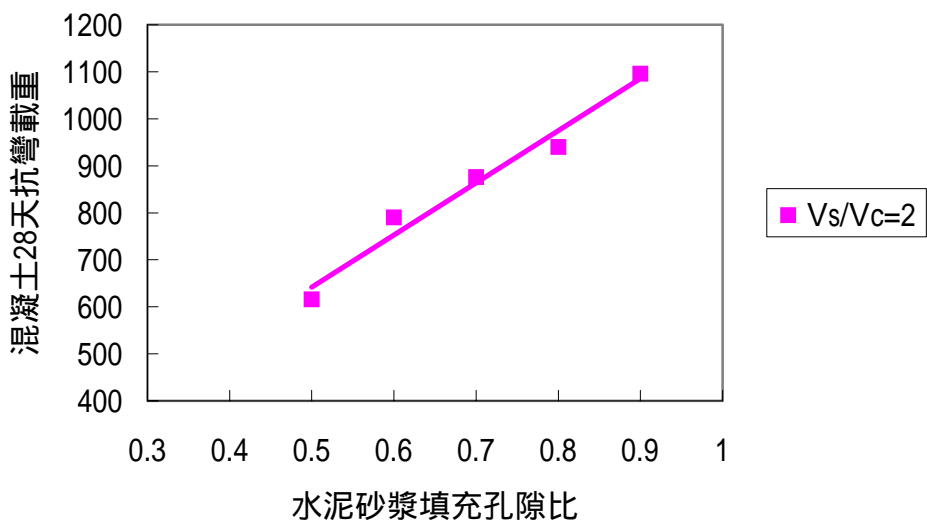


圖 3-4.24  $V_s/V_c=2$  抗彎載重與填充孔隙體積比關係圖

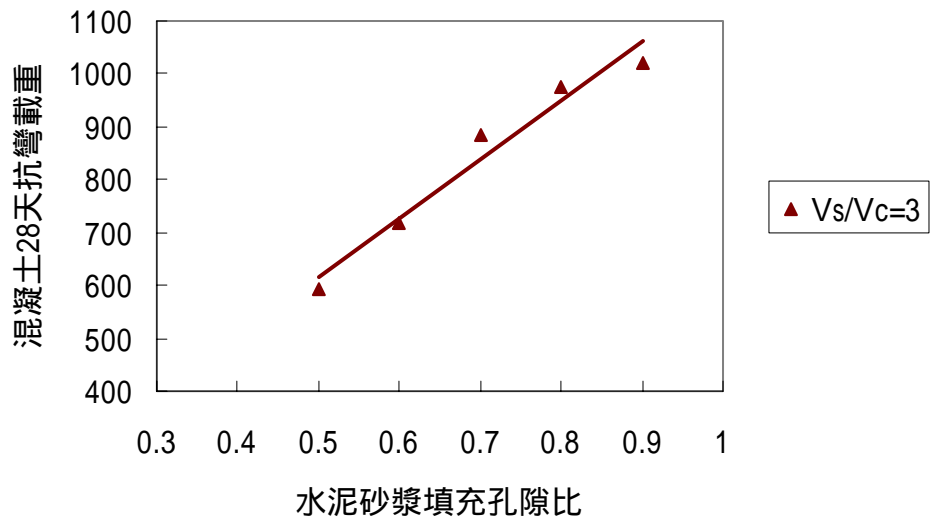


圖 3-4.25  $V_s/V_c=3$  抗彎載重與填充孔隙體積比關係圖

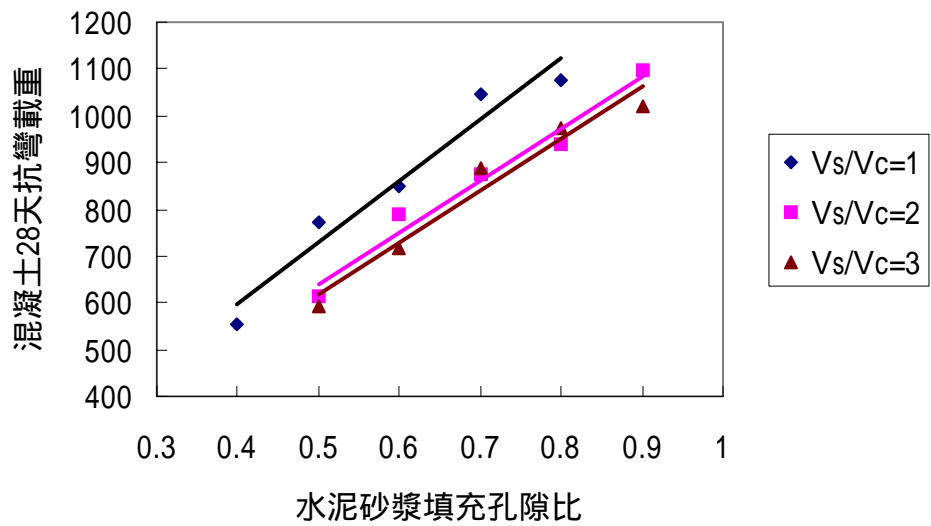


圖 3-4.26 抗彎載重與填充孔隙體積比關係圖

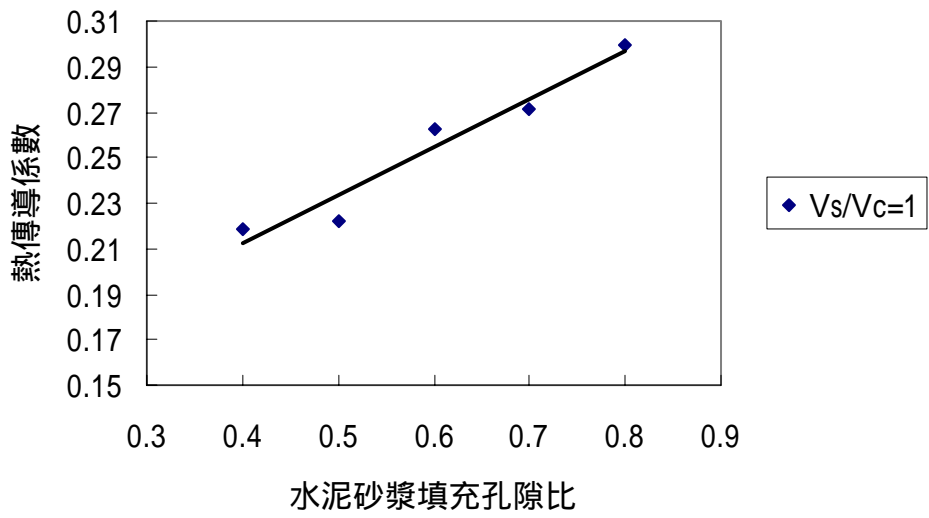


圖 3-4.27  $V_s/V_c=1$  熱傳導係數與填充孔隙體積比關係

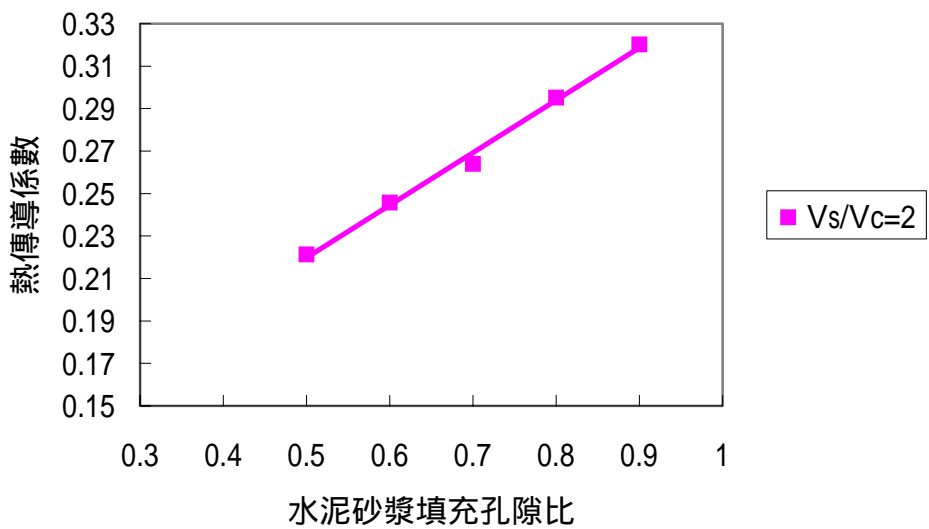


圖 3-4.28  $V_s/V_c=2$  熱傳導係數與填充孔隙體積比關係圖



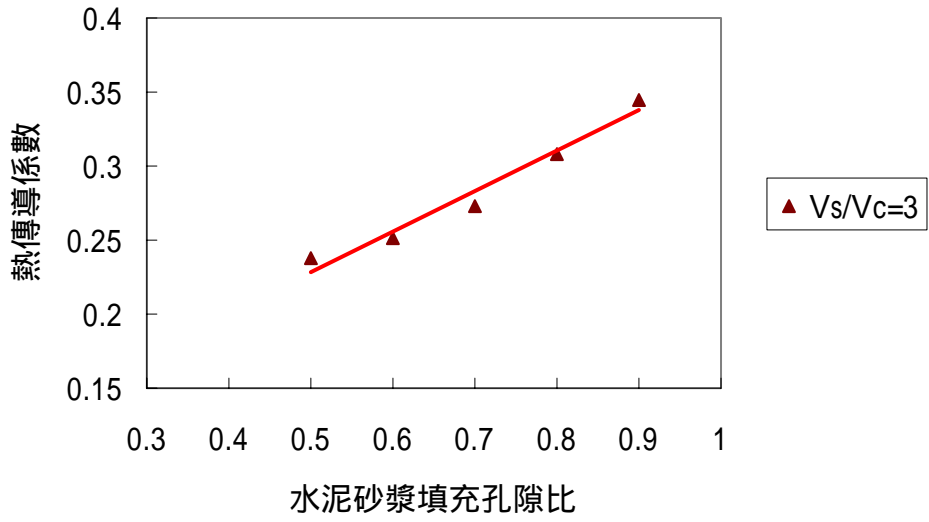


圖 3-4.29  $V_s/V_c=3$  熱傳導係數與填充孔隙體積比關係圖

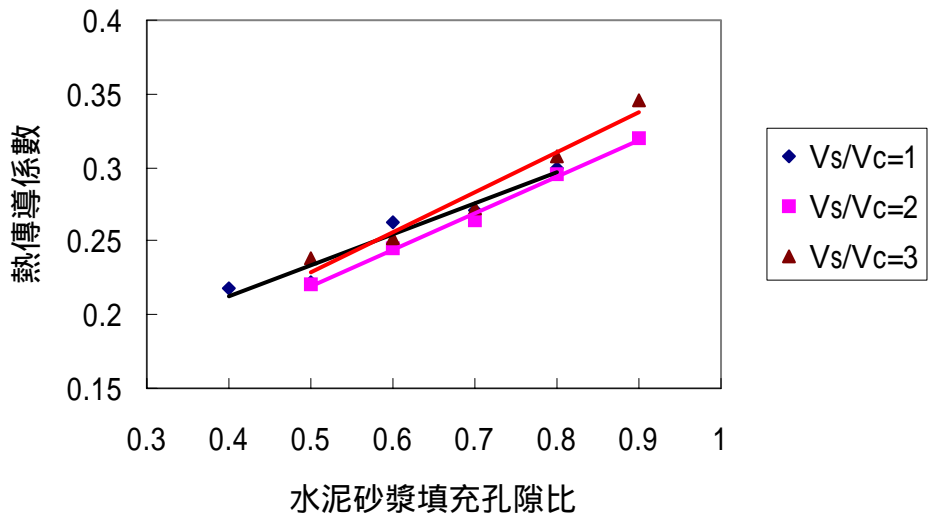


圖 3-4.30 熱傳導係數與填充孔隙體積比關係圖

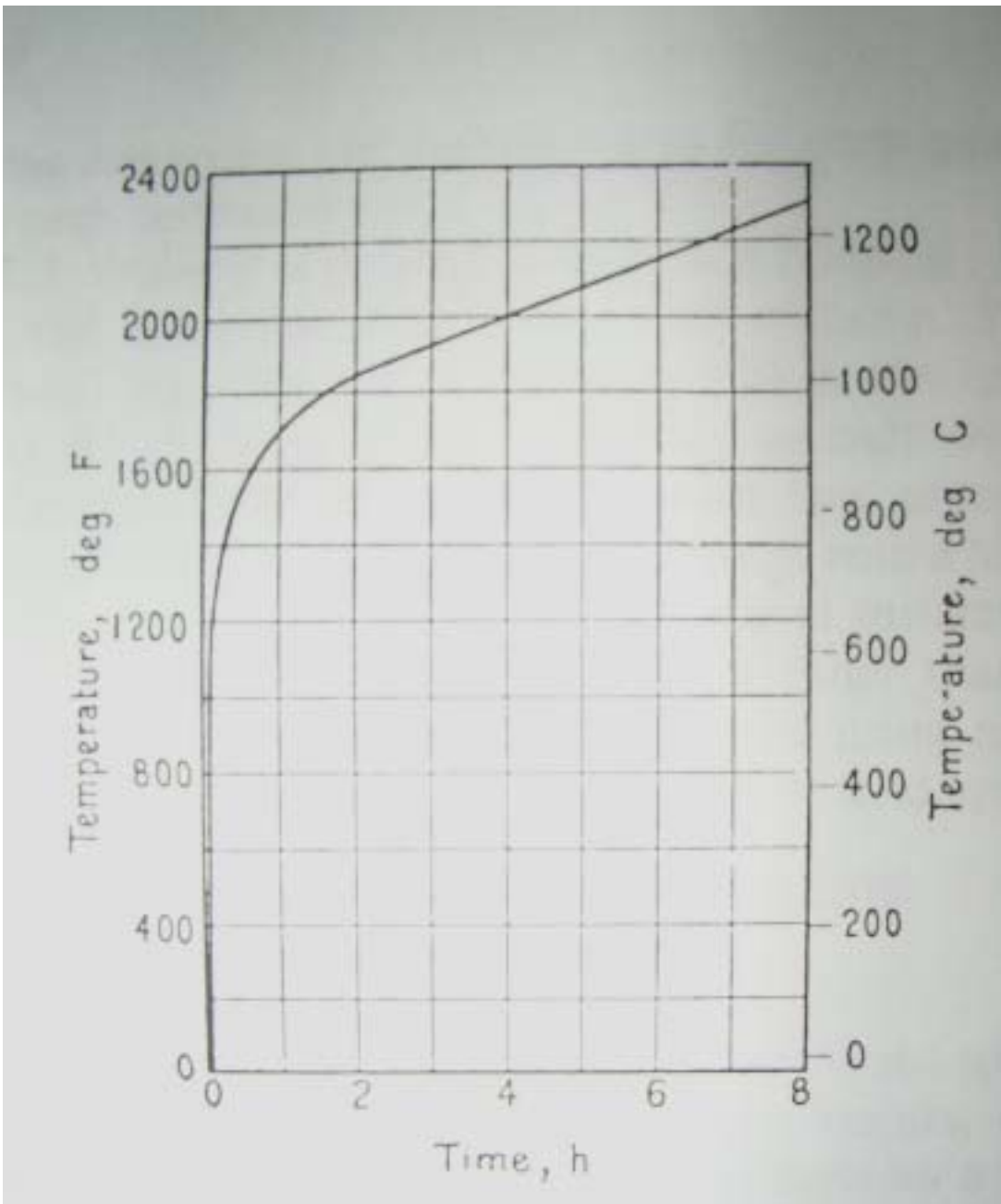


圖 3-4.31 ASTM E119 標準升溫曲線

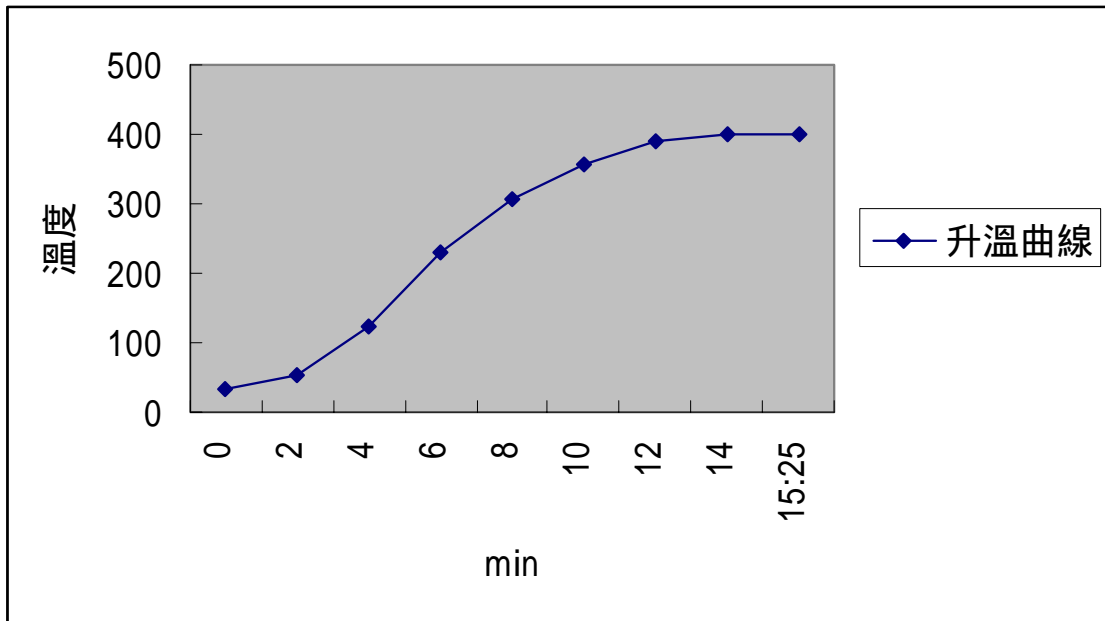


圖 3-4.32 高溫爐之升溫曲線

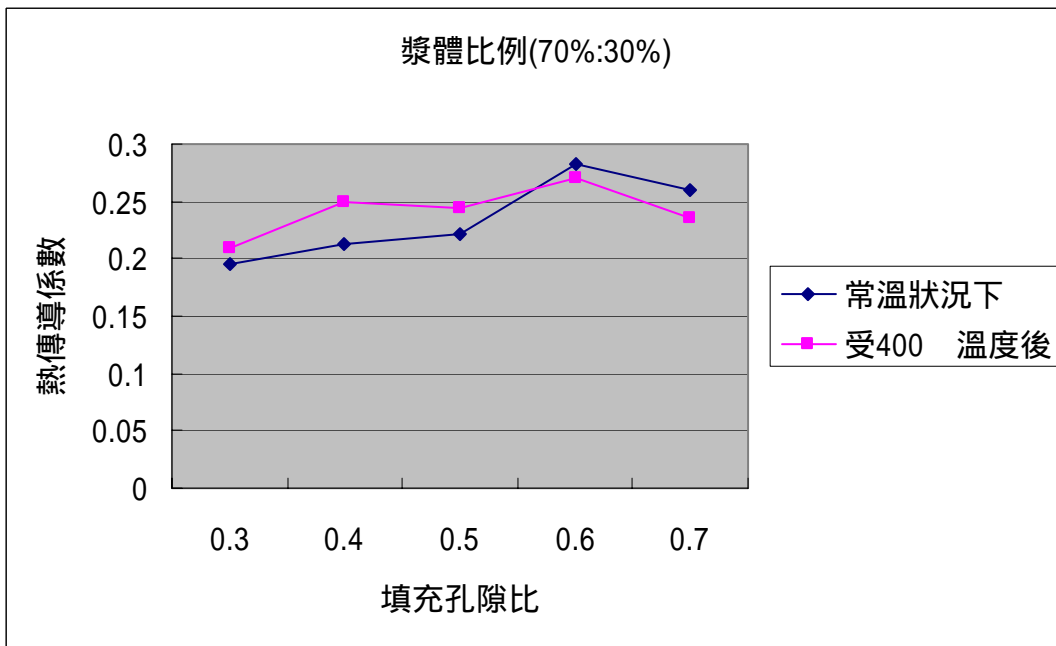


圖 3-4.33 受 400 溫度後之熱傳遞係數

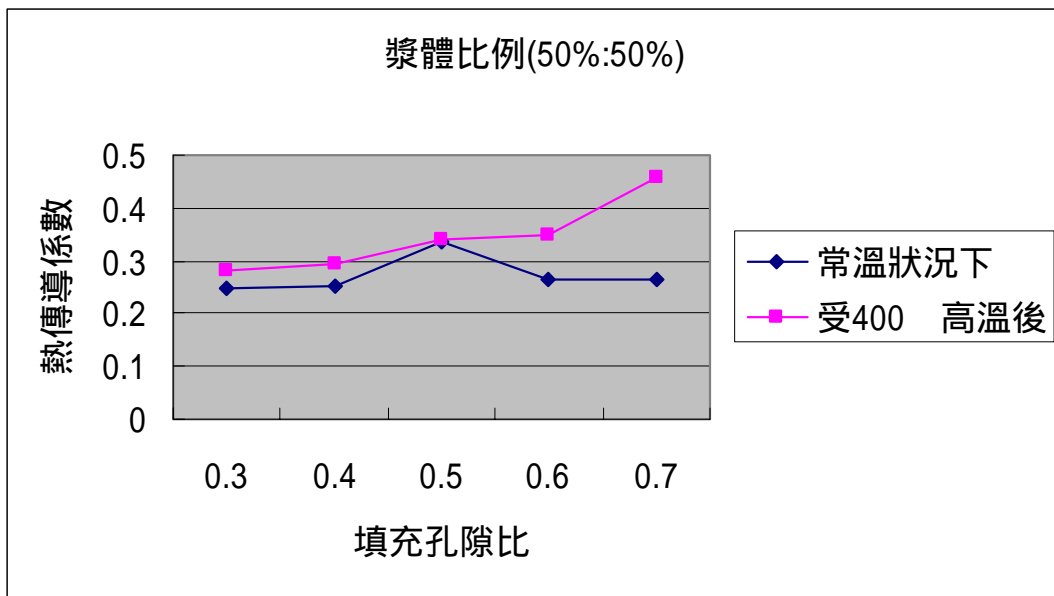


圖 3-4.34 受 400 溫度後之熱傳遞係數

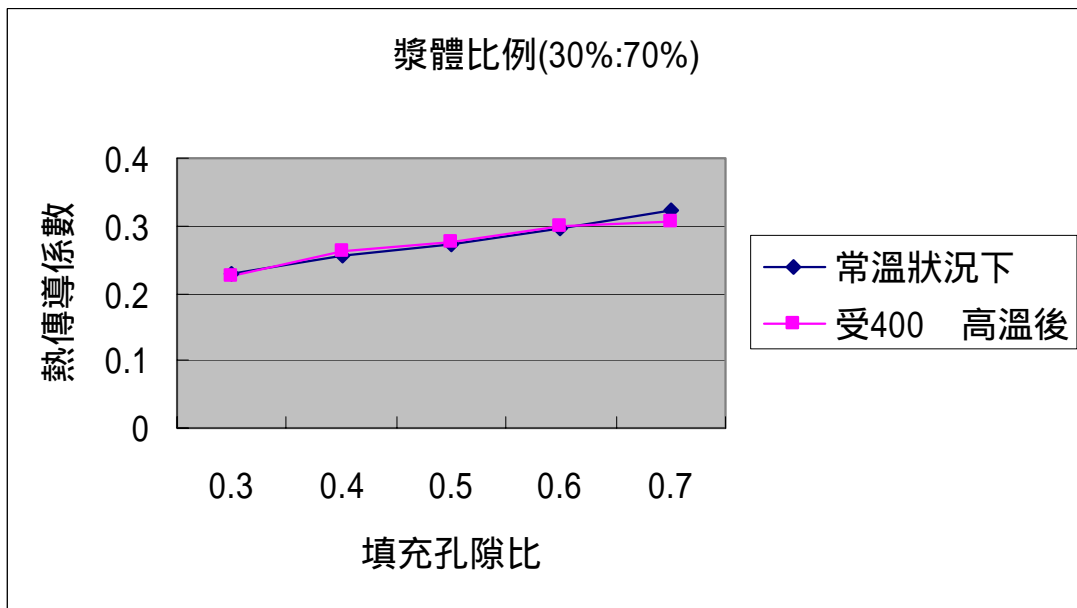


圖 3-4.35 受 400 溫度後之熱傳遞係數

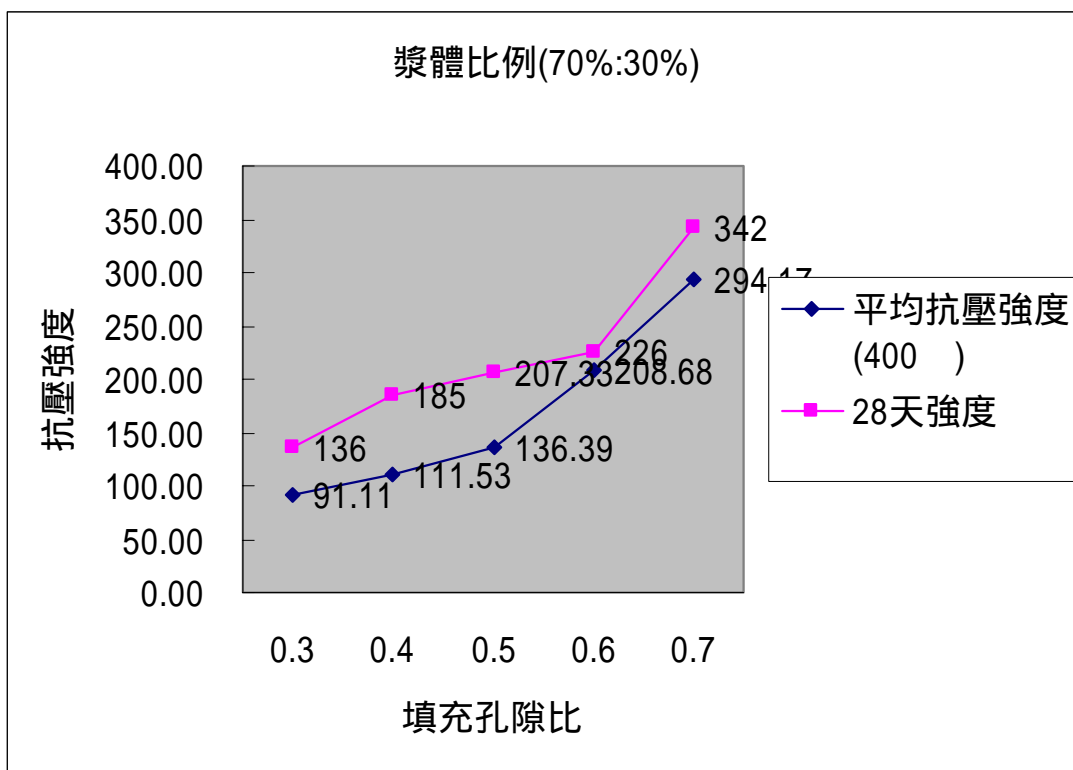


圖 3-4.36 波索蘭材料取代 30%之火害後殘留強度

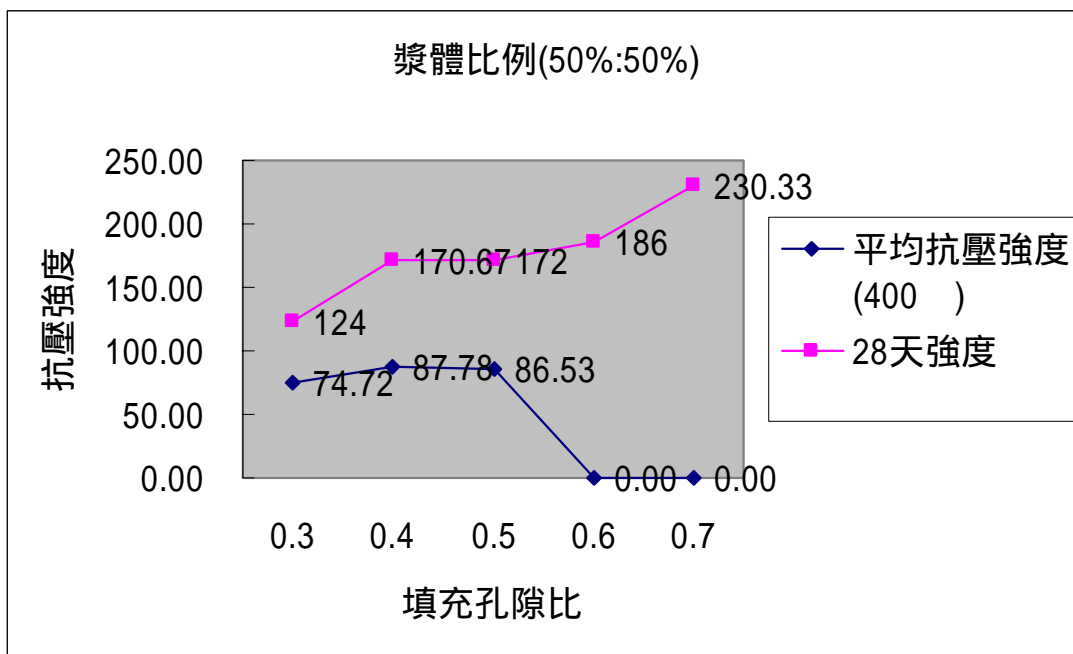


圖 3-4.37 波索蘭材料取代 50%之火害後殘留強度

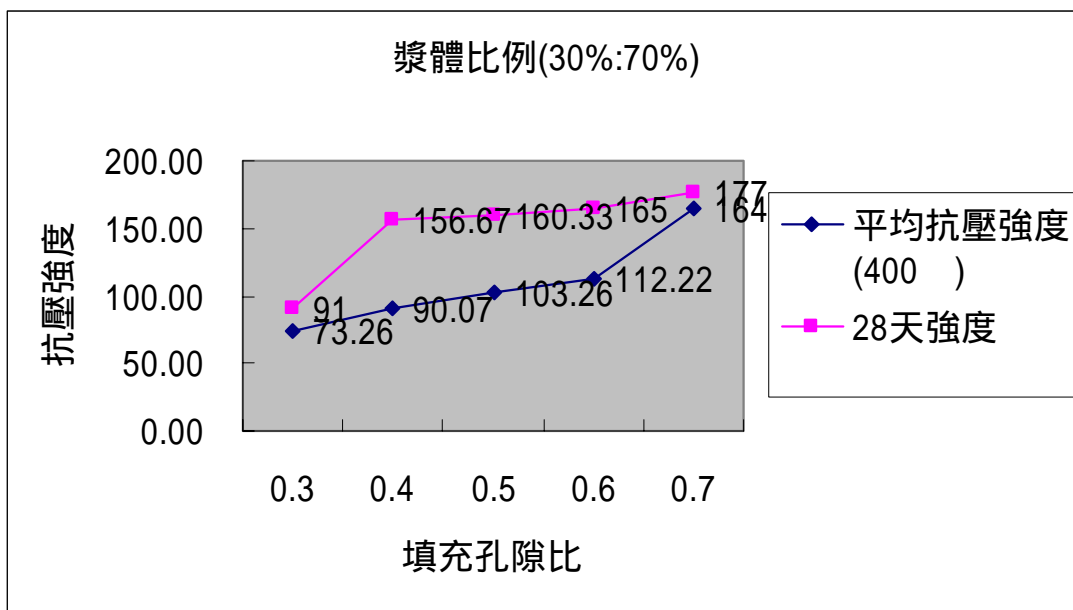


圖 3-4.38 波索蘭材料取代 70%之火害後殘留強度

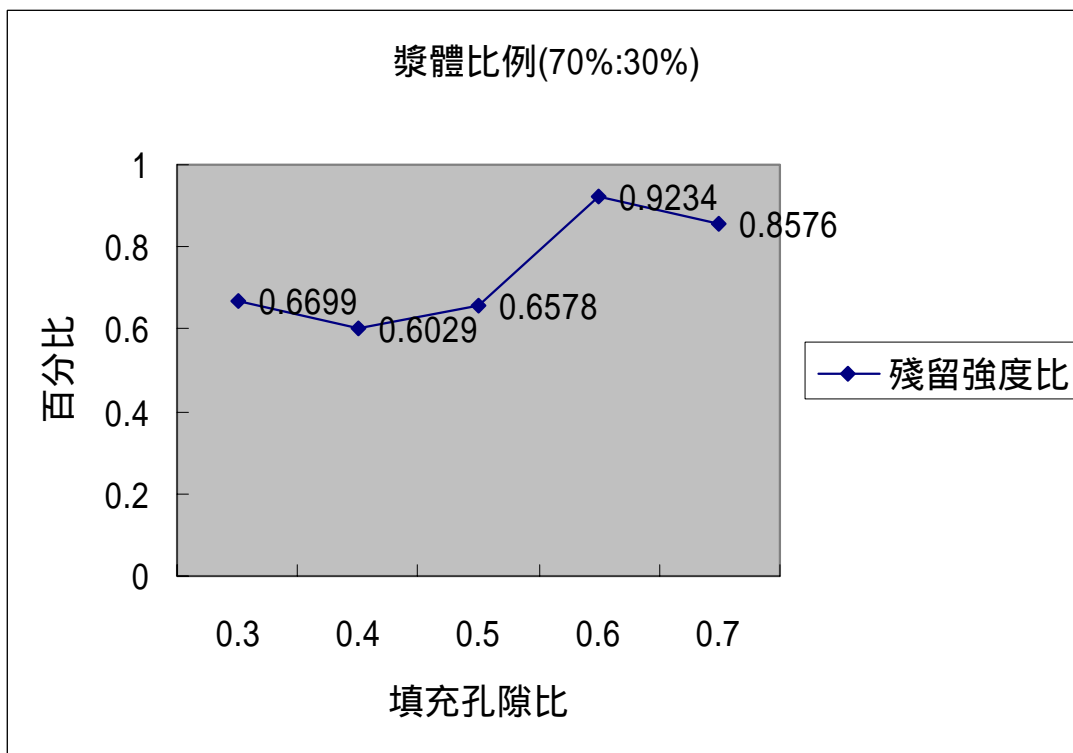


圖 3-4.39 波索蘭材料取代 30%之火害後殘留強度百分比

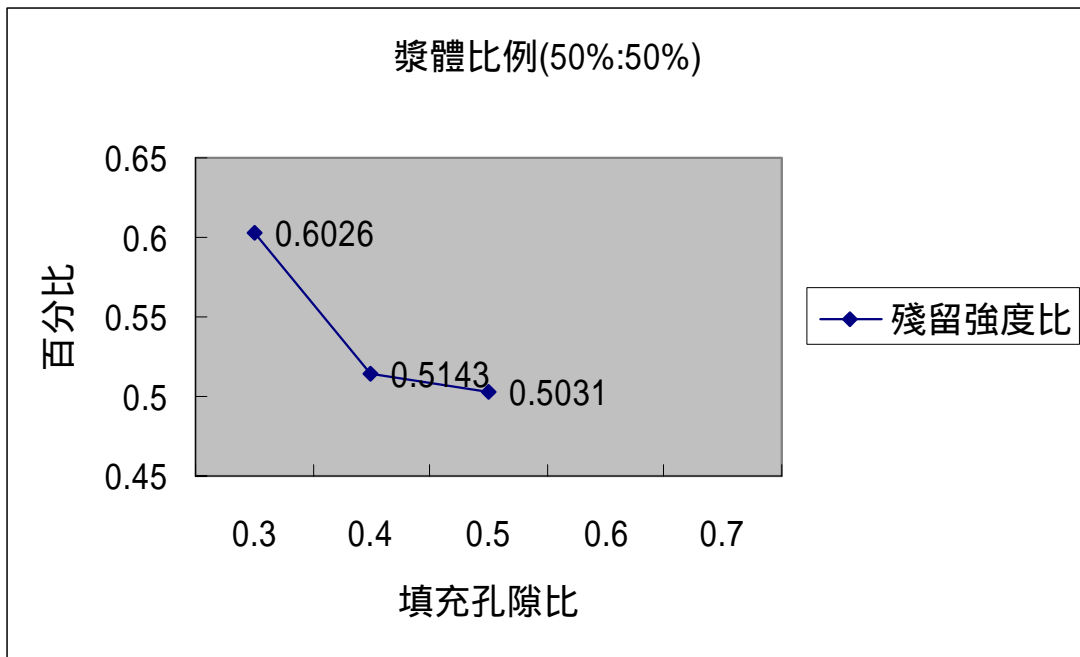


圖 3-4.40 波索蘭材料取代 50%之火害後殘留強度百分比

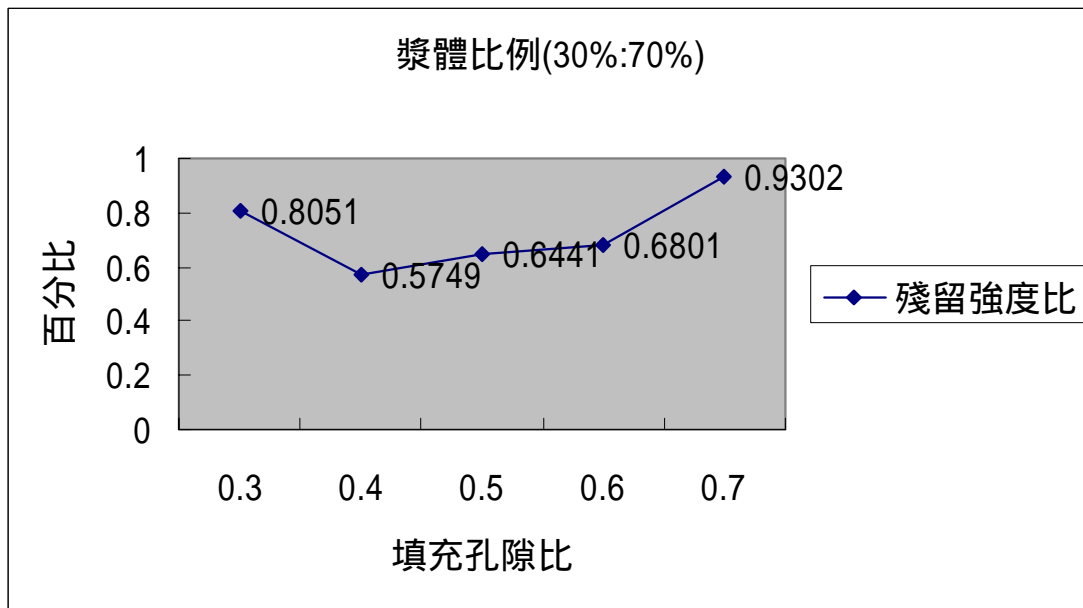


圖 3-4.41 波索蘭材料取代 70%之火害後殘留強度百分比

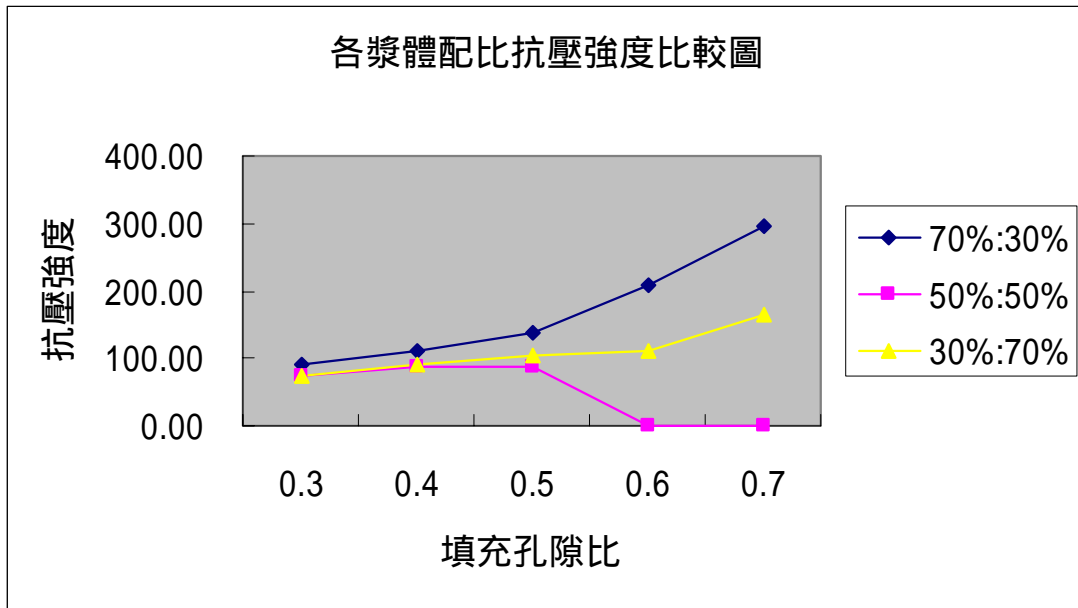


圖 3-4.42 各漿體配比火害後之抗壓強度

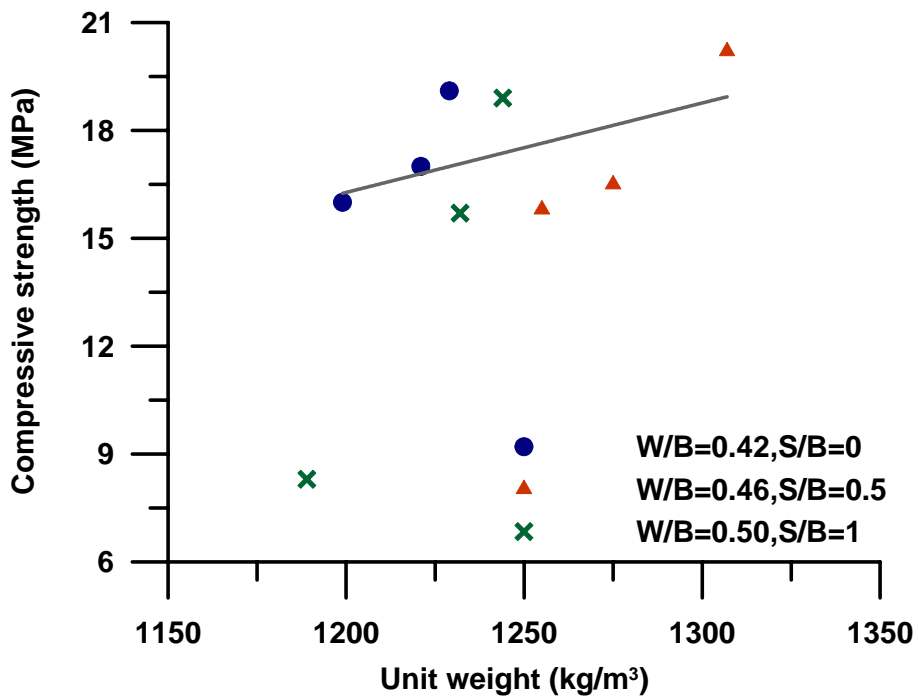


圖 3-4.43 輕質混凝土磚單位重與抗壓強度關係



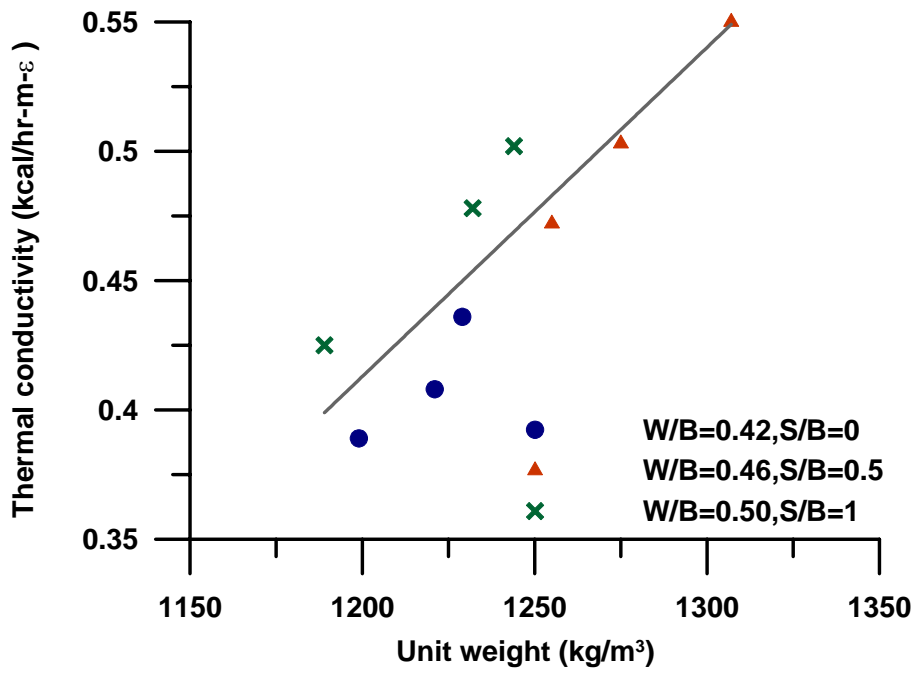


圖 3-4.44 輕質混凝土磚單位重與熱傳導係數關係

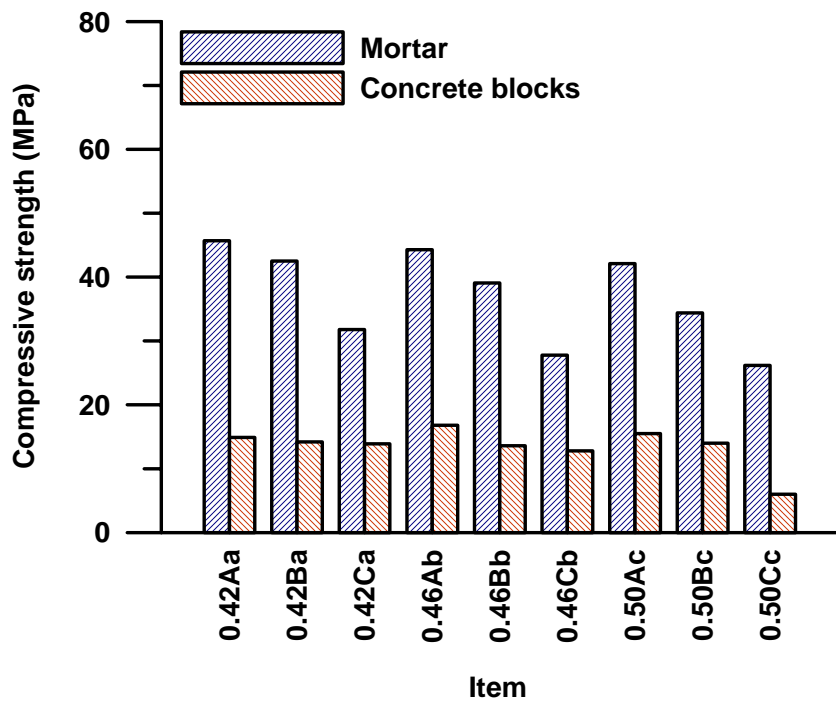


圖 3-4.45 水泥砂漿與輕質混凝土磚 7 天抗壓強度關係

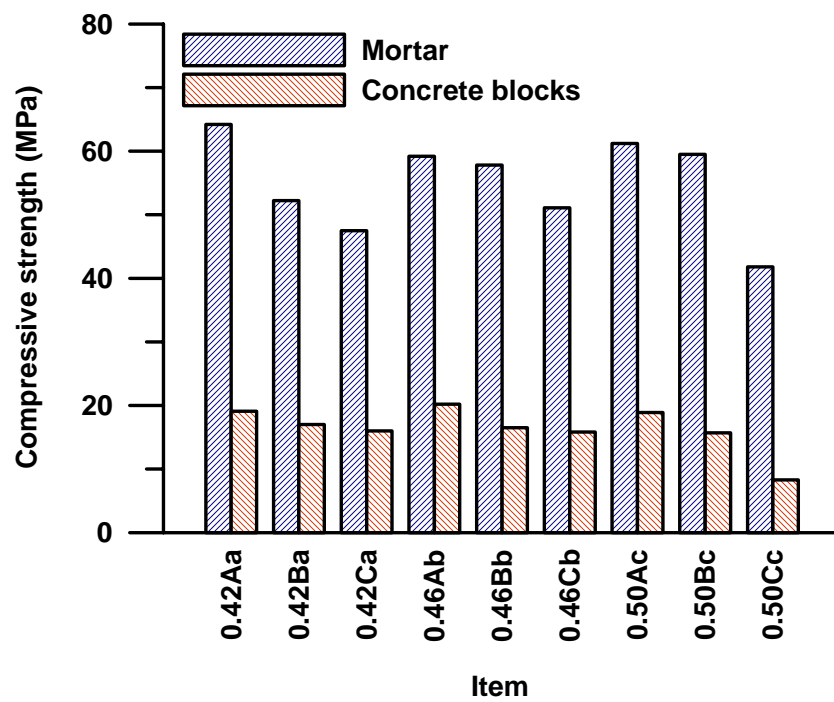


圖 3-4.46 水泥砂漿與輕質混凝土磚 28 天抗壓強度關係



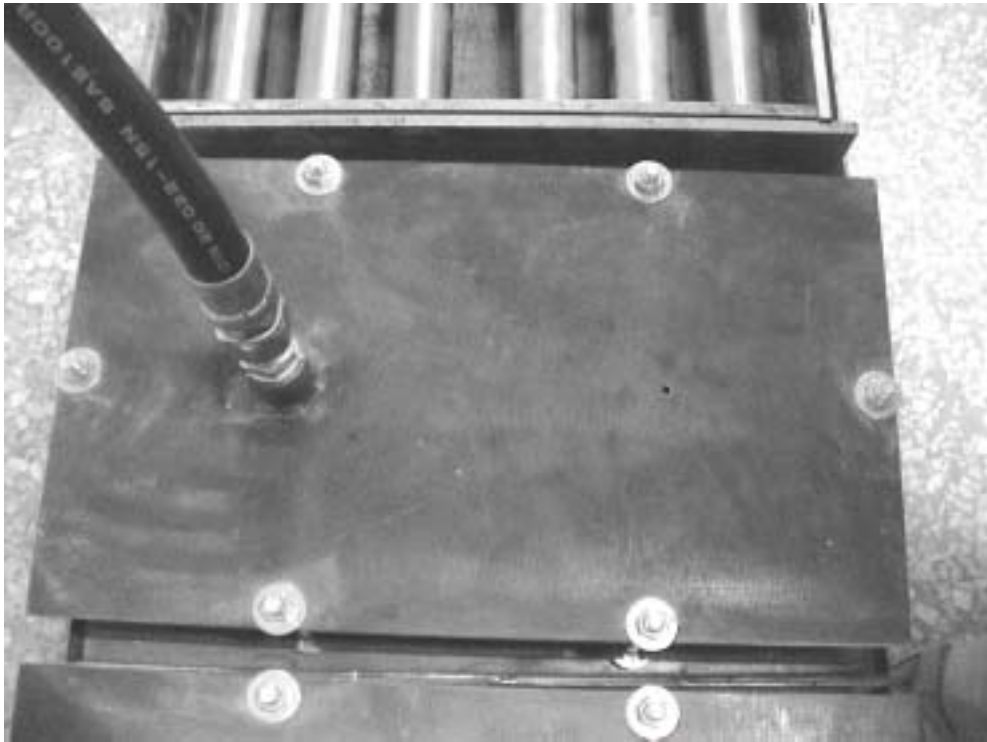
照片 3-4.1 試體受火害抗壓後破裂面



照片 3-4.2 中空輕質混凝土版試驗設備



照片 3-4.3 中空輕質混凝土版模具



照片 3-4.4 灌漿口與排漿孔均位於模具頂面



照片 3-4.5 中空輕質混凝土版成品表面光滑平整

## 第五節 結論與建議

### 5.1 波索蘭材料與水泥拌製之預鑄非結構件

#### 5.1.1 結論

本文利用填充骨材孔隙比的方式，配合協力工廠設備和作業方式，進行無細輕質混凝土磚的產製技術研究，及其相關工程性質如：單位重、熱傳導係數、抗壓強度及抗彎載重之研究，並作材料成本分析；由試驗結果可獲得之結論如下所示：

1. 本文成功的利用協力廠商設備和作業方式，順利產製無細輕質混凝土磚。在填充孔隙體積比 0.3 時，填充漿體對輕質骨材始提供基本之直立強度。填充孔隙體積比 0.4 時，其包裹厚度比為 0.061，比文獻之包裹厚度比 0.05 還大，故輕質骨材間已具有足夠之直立強度來構成點黏結骨架結構，所以水膠比不受波索蘭材料的多寡影響，而成穩定狀況。水膠比同時受填充孔隙體積比影響，當填充孔隙比增加至 0.6 時，水膠比才固定。
2. 無細輕質混凝土磚單位重、熱傳導係數、抗壓強度及抗彎載重隨漿體填充孔隙體積比增加而提高。
3. 當波索蘭材料取代不同水泥體積時，取代體積需在 50% 以上且填充孔隙體積比 0.5 以上時，可有效減少單位重；熱傳導係數主要受單位重和孔隙的影響，所以當波索蘭材料取代水泥體積大於 50% 以上時，熱傳導係數最大可降低 15% 左右。
4. 無細輕質混凝土磚的抗壓強度，隨波索蘭材料取代水泥體積的增加而減低，且隨填充孔隙體積比的增加而減緩；抗彎載重約為抗壓強度的 1/10~1/15。
5. 本研究之無細輕質混凝土因具有甚低之熱傳導係數 0.215 至 0.332  $kcal/m.^{\circ}C.hr$  間，約只有普通混凝土之 1/5，且單位重輕、具有足夠之抗壓強度及抗彎載重，所以適用於隔熱磚、隔間磚等之應用。

6.輕質混凝土磚受高溫後強度的變平均殘留強度介於 54% - 74%之間。填充孔隙比越小者，高溫後強度損失愈大。波索蘭材料取代水泥漿體量越多時，其強度損失愈多。熱傳導係數在高溫後有升高之趨勢。

### 5.1.2 建議

由以上的研究結果可知無細輕質混凝土磚適用於非結構性之結構物，因其具有低單位重、隔熱性佳，唯一缺點是磚之孔隙多，不適用於外牆磚使用。且本產製無細混凝土磚為一新建材，尚有幾個方向可探討：

- 1.改變飛灰與爐石間的比例，探討彼此對無細輕質混凝土之影響。
- 2.以本研究之漿體取代水泥砂漿中之水泥，探討產製無細輕質混凝土磚之可行性。
- 3.考慮增加漿量及減少輕質骨材體積，研究產製無孔隙外牆磚之可行性。
- 4.配合目前隔間牆版、磚的試驗模式，探討以輕質骨材產製隔間牆版、磚之可行性。

## 5.2 細砂與水泥拌製之預鑄非結構件

### 5.2.1 結論

本文利用水泥砂漿填充骨材間孔隙體積比例的配比方式，及相關工廠所提供之振動、夯實、壓模機具，進行輕質骨材混凝土磚之製作，並作了其單位重、抗壓強度、抗彎強度及熱傳導係數之研究，由試驗結果可以得到以下之結論：

- 1、以現行高壓地磚的生產方式進行輕質骨材混凝土磚的生產是可行的。從配比設計、試拌脫模到產品的製作，本研究提供了一套試體製作的完整流程，可作為以後生產線實際生產時之參考。

- 2、以平均粒徑為 7mm 之輕質骨材與水泥砂漿所製作之輕質骨材混凝土磚，其水泥砂漿填充孔隙體積比最低約為 0.4，水灰比則介於 0.36~0.51 之間。
- 3、單位重約介於  $800\text{kg}/\text{m}^3$  到  $1100\text{kg}/\text{m}^3$ ，抗彎載重則約從 500kg 到 1100kg，兩者均與水泥砂漿填充孔隙體積比成線性成長之關係，且其中水泥砂漿中砂含量較高者其單位重與抗彎載重均會較低。
- 4、抗壓強度約從  $80\text{ kg}/\text{cm}^2$  到  $300\text{ kg}/\text{cm}^2$ ，且有隨水泥砂漿填充孔隙體積比的增加而增加之趨勢。當水泥砂漿填充孔隙比高時，水泥砂漿中砂含量較低者其強度會較高，而在填充孔隙體積比低時，此現象則較不明顯。
- 5、熱傳導係數介於  $0.21\text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}$ . ~ $0.35\text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}$ . 之間，約只有普通混凝土之 1/5，其中水泥砂漿中砂含量低者，熱傳導係數也會較低。且有隨水泥砂漿填充孔隙體積比的減少而減少之關係，但當填充孔隙比降到 0.5 以後，其減少的程度則有趨緩的趨勢。
- 6、在不考慮抗壓強度的情形下，單純的只對隔熱性作考量時， $V_s/V_c=2$  及水泥砂漿填充孔隙體積比為 0.5 這組之試體，擁有較低的熱傳導係數  $0.221\text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}$ . 以及較少的材料成本  $92\text{ 元}/\text{m}^2$ 。
- 7、本研究所製作之試體為一單位重低、材料成本合理且隔熱性相當良好之新建材。

### 5.2.2 建議

由以上的研究結果可知，輕質骨材混凝土磚為一質輕且隔熱性相當優良之產品，用於非結構性之結構物相當適合，唯一之缺點為強度不是非常足夠。基於本次實驗的結果，對於將來製造輕質骨材混凝土磚時，提出以下的建議：

- 1、輕質骨材的強度對於混凝土的強度來說是非常重要的，若可製造出質量更輕且顆粒強度更高之輕質骨材，則對於輕質骨材混凝土磚之強度將有相當之助益。

- 2、另一方面，也可考慮將水泥砂漿填充孔隙體積繼續提高，直到超過整個混凝土的孔隙體積或繼續增加，探討對強度是否會有所助益，進而繪出其強度與填充孔隙體積之關係曲線。
- 3、在成本考量下，也可考慮將飛灰與爐石取代部分水泥砂漿中之水泥，製造輕質骨材混凝土磚，並探討其可行性。
- 4、因為本研究試體之製作是採用一般高壓地磚的生產方式，故對於試體所作之各項試驗皆是參照高壓地磚之規範，建議未來可將本研究所用之配比，應用在不同的產品之上，並依照各產品規範之試驗方法作試驗，測其各項性質。

### 5.3 低壓灌漿工法產製之輕質混凝土磚

#### 5.3.1 結論

本研究利用輕質骨材之高吸水率特性，嘗試以低壓灌漿工法進行預鑄輕質混凝土磚之產製，依試驗結果之分析與討論，歸納結論如下：

- (1) 以絕乾之輕質骨材，配合流動性適當之水泥(砂)漿配比，輕質混凝土磚可在預鑄工廠中，以低壓灌漿工法迅速且大量地生產。
- (2) 本工法所產製之輕質混凝土磚，單位重僅約普通混凝土之25%至50%，不僅便於施工，且具有良好之強度性質與隔熱性能，優於一般建築紅磚。

#### 5.3.2 建議

- (1) 若欲提高產能，在水泥(砂)漿中添加速凝劑、採高溫蒸汽養護，或適度提高灌漿壓力，均為縮短拆模時間之可行方法。
- (2) 輕質混凝土磚抗壓強度由輕質骨材強度主控，故可提高飛灰、爐石添加量，除可降低單位重與熱傳導係數外，更有利於經濟性；若欲添加天然砂，則使用量不可過高，粒徑亦不可過大，否則將影響工作性，甚而導致灌漿失敗。



## 參考文獻

- [ 1 ] 顏聰, “ 輕質混凝土之工學性質及工程特性”, 混凝土工程技術研習會, 台灣營建研究中心, 民國 64 年。
- [ 2 ] 林維明, 吳介源, “ 當前輕質粒料混凝土應用的重要”, 台灣公路工程, 第二十六卷, 第五期, pp.36-48, 民國 88 年。
- [ 3 ] Shortand Kinniburgh, “ Light - Weight Concrete ”, MAMLX III, London, 1963
- [ 4 ] 陳澤修, “ 綠色建築新材料冷結型煤灰輕質骨材”, 現代營建, 208 期, 民國 86 年。
- [ 5 ] Sidney Mindness and J. Francis Young, “ Concrete”, Prentice - Hall, inc, 1981
- [ 6 ] 林銅柱, “ 從國外輕質骨材科技展望國內輕質混凝土工業”, 高壓蒸汽養護輕質混凝土研討會, 經濟部工業局, 台北, 民國 80 年。
- [ 7 ] Badhan- Roy, B. K., “ Light weight Aggregate Concrete In U K ”, International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 1995
- [ 8 ] Ikeda, Shoji, ” Development of Light weight Aggregate Concrete in Japan ” international Symposium on Structural Light weight Aggregate Concrete, Norway, June 1995 .
- [ 9 ] J.J.SHIDELER(1958),”Recommended Proctric for Selecting Proportions for Structural Lightweight concrete”,ACI Journal No55-18.
- [ 10 ] Kluget, R. W. Sparkst, M. M. and Tumasss, E. C., ( 1949 ), ” Light weight - Aggregate Concrete ”, ACI Journal, May 1949, pp 625 - 642 .
- [ 11 ] 顏聰, “ 從輕質骨材談輕質混凝土的製作與力學特性 ”, 高壓蒸汽養護輕質混凝土研討會, 經濟部工業局, 台北, 民國80年。
- [ 12 ] Mindness and young ,(1981),”concrete”,Prentice- Hall , Inc. , Englewood Cliffs , N.J. 07632 , pp.588-593.
- [ 13 ] 王櫻茂, ( 1976 ), ” 人造輕質混凝土 ”, 豐生出版社, 台南。
- [ 15 ] 黃兆龍, 「高爐熟料在水泥上之利用」, 現代混凝土技術研討會講義, 財團法人台灣營建研究中心, PP.159-196, 民國73年12

月。

- [ 16 ] Majumder , A. J. , Speakman , K. and Fletcher , K. E. , “A Current Review of Cement Research ” , Building Research Station Current Paper 4 / 71 , Building Research Station , England , 1971。
- [ 17 ] ACI Committee 211 , “Recommended Practice for Selecting Proportions for Structure Lightweight Concrete” , ACI 211.2-69 1977。
- [ 18 ] R.W.Kluge , “Structure Lightweight Aggregate Concrete” , J , Amer.Concr.Inst 1956。
- [ 19 ] 林維明 , “ 結構用輕質骨材混凝土性質” , 結構工程 , 第七卷 , 第二期 , pp89 119 , 1992。
- [ 20 ] Min-Hong Zhong and Odd E. Gjorv , “ Mechanical properties of High-strength Lightweight Concrete” , ACI Material Journal May-June 1991。
- [ 21 ] E. Vocke , “ Kleine Leichtbefon Kundt Fure DIE Praxis” , Bauverlag Wiesbaden , 1959。
- [ 22 ] Charles.T.Kennedy, ”The Design of Concrete Mixes ” , ACI,1940。
- [ 23 ] 林建國, ”無細輕質骨材混凝土性質之研究”, 中興大學碩士論文, 2000。
- [ 24 ] 詹文宗“ 以表面積理論探討高強度混凝土之配合設計法” , 中興大學碩士論文, 1988 。
- [ 25 ] 顏聰、劉玉雯 , “ 添加天然砂對輕質混凝土強度及隔熱性之影響” , 國科會短期科技研究 , 1993。
- [ 26 ] 顏聰 , “輕質混凝土的隔熱性能與能源節約” , 營建知訊 , pp.17-29 , 台北 1992。
- [ 27 ] Vicent Sussman , “ Lightweight Pasties Aggregate Concrte ” , ACI Journal , Jul 1975。
- [ 28 ] 潘存真 , “輕質骨材之級配條件對輕質混凝土強度及隔熱性之影響” , 中興大學研究所碩士論文 , 1993。
- [ 29 ] 范國晃 , “淤泥骨材燒製及拌製混凝土之研究” , 中興大學碩士論文 , 2001。
- [ 30 ] 張郁慧,沈進發,陳舜田,“火害延時對混凝土材料性質之影響”,國立台灣工業技術學院碩士論文,1993。

- [ 31 ] 林慶元,鄭紹材,楊志強,許坤煌,“冷結飛灰輕質骨材混凝土之高溫行為”,中國土木水利工程學刊,第九卷,第三期,1997。
- [ 32 ] 黃兆龍,“高等混凝土技術”,國立台灣工業技術學院教案,1992。
- [ 33 ] 林草英,黃兆龍,郭淑德等,“飛灰取代部分混凝土細骨材之可行性研究”,台灣電力綜合研究所專題研究報告,1986。
- [ 34 ] 蔡明儒,沈得縣,林慶元,“含飛灰水泥漿體與砂漿在高溫作用後巨微觀性質之研究”,國立台灣工業技術學院碩士論文,1992。

## 第四章 建築用途輕質骨材混凝土預鑄產品(如版、樑、柱、預鑄構件、隔間牆等)之產製技術開發

### 摘 要

本研究計畫為一整合型計畫「水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」之第三分項計畫「水庫淤泥輕質骨材混凝土應用研究」之第四子計畫「水庫淤泥輕質骨材混凝土結構用途之產品研發」,主要研究工作為尋找一合作廠商,共同進行預鑄構件(樑、柱、版、牆)之「實際量產研究」與「構件性質測試」。

所謂「實際量產研究」,即是在合作廠商處利用廠商之拌合設備成功拌製輕質骨材混凝土,並利用廠商之傳輸設備將輕質混凝土運送至預鑄試體模具處,成功製作樑、柱、版、牆試體。所謂「構件性質測試」,即是將成功製作之樑、版、柱、牆試體,攜回各負責學校之試驗室進行構件性質測試。

「實際量產研究」由潤弘精密工程公司與成功大學、台灣科技大學及中興大學共同於潤弘精密工程公司工廠內執行;「構件性質測試」中之樑構件研究由成功大學負責,版構件研究由台灣科技大學負責,柱與牆構件研究由中興大學負責。

構件性質測試研究之各項研究結果都顯示,從工廠實際量產之各項輕質骨材混凝土構件,無論是強度方面或性能方面,都足以取代由常重混凝土製作之構件,亦即在中等強度(約 4000psi)附近,工廠量產之輕質骨材混凝土可以作為結構用途。

## 第一節 緒論

### 1.1 前言

內政部建築研究所委託「中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會」執行「水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」整合型研究計畫，此研究計畫包含四個分項計畫：

- 1.水庫淤泥輕質骨材量產技術研究。
- 2.水庫淤泥輕質骨材混凝土標準規範訂定。
- 3.水庫淤泥輕質骨材混凝土應用研究。
- 4.輕質骨材市場需求及輕質骨材混凝土應用推廣。

前述第 3 分項計畫「水庫淤泥輕質骨材混凝土應用研究」又包含四個子計畫：

1. 混凝土最佳配比設計研究。
2. 輕質骨材混凝土之輸送、灌製及夯實技術研究。
3. 水庫淤泥輕質骨材混凝土非結構用途之產品研發
4. 水庫淤泥輕質骨材混凝土結構用途之產品研發

本研究計畫即為此整合型計畫之第 3 分項計畫之第 4 子計畫。

水庫淤泥可燒結成品質優良之輕質骨材，使水庫淤泥從不知如何處理之廢棄物頓時變成一種資源，但是燒結成功之輕質骨材必須使用者眾，才是真正有價值之資源，本研究計畫即在探討水庫淤泥輕質骨材之結構用途。

國外將輕質骨材混凝土使用於結構用途，由來已久，1950 年代房

屋構架、橋面版及預鑄構件等已普遍使用輕質混凝土，例如芝加哥的 42 層高樓 (Prudential Life Building) 就是以 LWAC(Lightweight Aggregate Concrete)建造的[1]；另外英國於 1954 年起即陸續利用倫敦粘土燒製而成之輕質骨材應用於建築物及橋樑上[2]；還有 Australia Square Tower，樓高總計 184 公尺、半徑 41 公尺，50 層之辦公大樓幾乎全由輕質骨材混凝土建造而成；挪威更於 1989 年起陸續應用高達 75MPa 之高強度輕質骨材(膨脹粘土)混凝土於大型橋樑建築上[3]。

以輕質骨材拌製結構用途之較高強度混凝土，須選用顆料密度較大、強度較高的輕質骨材[4]，文獻[5]列有典型之抗壓強度與單位重之關係圖。輕質骨材的彈性模數大都小於水泥石，但前者的顆粒強度有可能大於、也可能小於後者[6]，使該兩項材料間之關係變得複雜。輕質混凝土的強度形成、受力下的應力—應變行為、時間性變形、乃至於使用在鋼筋混凝土上的力性，與普通混凝土之間存有不小的差別。本研究即在探討兩者用於結構用途之差別。

以輕質骨材拌製混凝土，坍度太大時骨材易於浮起，坍度太小時混凝土之流動性太差，造成難以灌漿情況，尤其是以輕質骨材混凝土去澆注綁紮綿密鋼筋之結構件時更為困難。輕質骨材混凝土適當之坍度範圍其實很狹窄，因此全世界都是將之普遍使用於預鑄用途上，以其品質較易掌握，構件品質較易控制之故。本研究計畫亦然，主要也在探討預鑄結構件之應用問題。

## 1.2 研究內容

本研究計畫主要在研究水庫淤泥輕質骨材混凝土結構用途之產品研發，探討水庫淤泥輕質預鑄構件（樑、柱、版、牆）在預鑄工廠之實際量產問題，以及預鑄產品之構件性質是否適用問題。因此，本研究計畫之主要工作有兩項：1.實際量產研究及 2.預鑄構件性質研究兩項，分別說明如下。

### 1. 實際量產研究

實際量產研究之工作內容為，尋找一個有規模之廠商，與其共同研發如何在工廠內成功地達到量產之地步。整個輕質骨材混凝土灌注預鑄構件之量產過程包含輕質骨材之儲存、輕質骨材輸送至料倉、電腦控制進料至拌合機、拌合機攪拌、坍度控制、混凝土鮮料輸送至模具處、預鑄結構件之灌漿及震動夯實、表面**鏟平**等程序。其中最具挑戰性之工作為，如何控制坍度大小使灌漿及震動夯實過程不會造成輕質骨材之浮起，以及如何**鏟平**混凝土表面。此部分之研究工作係由成功大學、台灣科技大學、中興大學及潤弘精密工程公司共同進行

## 2. 預鑄構件性質研究

本研究計畫之預鑄結構件包含樑構件、版構件、柱構件及牆構件，此四類構件試體都在潤弘精密工程公司內經由量產化之過程灌製完成，並在工廠內依照一般量產化之養生方式養生，俟混凝土之強度成熟後，再分別運送至各負責學校進行構件之力學性質研究。其中樑構件之力學性質研究係由成功大學負責，版構件之力學性質研究由台灣科技大學負責，柱及牆構件之力學性質研究由中興大學負責。

## 第二節 輕質骨材混凝土預鑄構件之實際量產化研究

### 2.1 前言

輕質骨材混凝土之使用於結構件，全世界之趨勢都是以預鑄型式在使用，主要是因為輕質骨材混凝土有灌漿時骨材浮起之問題及表面較難鏟平之問題，若在工廠中以預鑄型式使用，較易控制上述兩項問題。本研究計畫也是依循此趨勢以在工廠製作預鑄構件之方式進行研究。整個研究內容包含兩項，第一項為工廠實際量產化研究，第二項為預鑄結構件之力學性質研究。本章即在敘述第一項研究內容及研究結果。

### 2.2 工廠設備

本研究計畫之執行首須尋找一家具有相當規模之預鑄廠商合作，始能完成全部之研究工作，本研究獲得潤弘精密工程公司之合作，該公司為國內最優良預鑄工廠之一。

潤弘精密工程公司位於楊梅，創立於民國 84 年，資本額為 4 億 2 千萬，年營業額 10 億，員工人數為 70 人，主要營業項目有預鑄設計/生產/施工及泥作建材/施工等，土地面積約 48,000m<sup>2</sup>，廠房面積約 12000 m<sup>2</sup>，基本上為國內頗具規模之公司。

### 2.3 輕質骨材混凝土結構件之工廠量產化

本研究計畫擬研究強度為 5000psi 之輕質骨材混凝土預鑄構件，根據整合計畫之分項計畫三「水庫淤泥輕質骨材混凝土應用研究」之研究結果建議此種強度之配比如表 4-2.1 所示。預鑄構件之工廠量產化係經由下列幾個程序而完成。



## 一、決定量產化之配比

表 4-2.1 之配比是基於在試驗室之試驗結果所建議，在工廠量產化之程序中，可能需要調整，因此先進行量產之試拌動作，在潤弘精密工程公司將輕質骨材與砂首先儲存於儲料間(照片 4-2.1)中，再經由輸送帶(照片 4-2.2)將各項材料輸送至圓形料槽(照片 4-2.3)中，準備進入拌合機(照片 4-2.4)進行攪拌工作。由於工廠內之進料動作係由電腦控制，因此在控制室(照片 4-2.5)內將表 4-2.2(92.06.06-1)之配比輸入電腦，此配比基本上與表 4-2.1 相同，只是添加劑改用 G-type 之添加劑，此後電腦即可準確指揮各料槽送料至拌合機進行攪拌工作，此拌合機一次可拌製 1.5 立方之混凝土。混凝土拌合完畢後，經由軌吊送料車送到適當地區以檢查坍度是否合適。

坍度之合適與否，是以輕質骨材是否有不良之浮起現象為準。根據表 4-2.2(92.06.06-1)配比拌出之混凝土坍度很大(如照片 4-2.6 所示)，呈現完全流動現象，輕質骨材幾乎全部浮起，目視即知無法拌製預鑄構件，因此重新再拌。

改用表 4-2.2(92.06.06-2)之配比，添加劑改用 F-100(松江)藥劑，此時混凝土坍度變為 5.5cm，混凝土流動性變得不理想，如照片 4-2.7 至 4-2.8 所示，為欲使流動性滿足實際工作之需求，乃更改配比如表 4-2.2(92.06.06-3) 之配比，將添加劑之使用量略微升至 7.58kg，此時坍度增加至 18 公分，但初拌混凝土並無明顯浮起現象(如照片 4-2.9 至 4-2.10 所示)，乃決定此配比作為未來拌製預鑄構件之配比，此最終之配比及各天期之強度列於表 4-2.3 中。

前述之工廠配比，俟後又發現一個缺點，即很難加以**鏟平**，無論如何抹，最後總是在表面會有輕微顆粒狀之隆起現象，為克服此一問題，乃在試驗室進行小規模之拌製、灌漿及**鏟平**試驗，期望找出可以完全**鏟平**之方法。

## 二、試體表面鏟平之研究

任何預鑄構件之表面都必須平整，此為預鑄構件之基本要求，為克服輕質骨材混凝土表面較難鏟平之問題，乃在試驗室進行小規模之鏟平研究。

首先採用與工廠配比(表 4-2.2(92.06.06-3))幾乎完全一樣之配比(表 4-2.4 之 92.06.17-1 配比，添加劑為 1.52%)拌製混凝土，此配比之坍度為 24 公分(參考照片 4-2.11)，此混凝土表面有輕質骨材顆粒浮起現象(參考照片 4-2.12)，經努力鏟平後，表面仍有明顯之顆粒狀隆起(參考照片 4-2.13 及 4-2.14)。

其次將添加劑之用量調整為 1.2%，配比調整為表 4-2.4 之 92.06.17-2 配比，此配比混凝土之坍度為 1 公分(參考照片 4-2.15)，此種混凝土流動性極差且鏟平不易，即使免強鏟平，表面亦會有孔動及隙縫存在(參考照片 4-2.16)。

再將添加劑之用量調整為 1.5%，配比調整為表 4-2.4 之 92.06.17-3 配比，此配比混凝土之坍度為 8.5 公分，此種混凝土拌製完成後並未有輕質骨材浮起現象，初步鏟平效果雖然仍有輕微之顆粒隆起現象(參考照片 4-2.17)，但在等 20 分鐘後再施以第二次鏟平後，即有甚佳之鏟平結果(參考照片 4-2.18)。

此部分之研究結果顯示，當輕質骨材混凝土之坍度為 8 公分左右，且經由 20 分鐘後之二次鏟平動作，可以得到甚佳之鏟平效果。

## 三、預鑄結構件之量產化製造

在結構用輕質骨材混凝土配比決定及結構件表面鏟平之問題解決之後，本研究即開始準備預鑄構件之灌製。本研究之預鑄構件包含樑、版、柱及牆構件，其中樑構件共包含輕質骨材混凝土

樑試體 8 枝，版構件共包含輕質骨材混凝土版試體 12 片，柱構件共包含輕質骨材混凝土柱試體 4 枝及常重混凝土柱試體 3 枝，牆構件共包含輕質骨材混凝土牆試體 8 片及常重混凝土牆試體 6 片。

灌製預鑄構件時，首先採用表 4-2.2(92.06.06-3)之配比，結果此混凝土之坍度為 18 公分，拌製之試體經由震動夯實後，呈現明顯之骨材浮起現象，如照片 4-2.19 及 4-2.20 所示。因而再調低添加劑之用量，希望將坍度調整至 8 公分左右，此次調整之配比如表 4-2.4 所示，混凝土坍度變為 8 公分，此時拌製之試體雖經徹底之震動夯實，也無明顯之骨材浮起現象，如照片 4-2.21 及 4-2.22 所示。然而，坍度 8 公分之輕質骨材混凝土當初在試驗室時可以鏟平良好，此時由於試體較大，混凝土灌漿之時間較長，等到開始可以鏟平時，混凝土已經較為硬化，較難鏟平了，不過若將混凝土表面輕微灑水，則又可以鏟平良好，如照片 4-2.23 至 4-2.24 所示。最後所有樑、版、柱及牆試體皆在此種程序中成功地在預鑄工廠量產成功。

## 2.4 小結

綜合本章之研究結果，可小結為下列幾點：

1. 本研究結果顯示輕質骨材混凝土預鑄構件可以在工廠量產成功。
2. 試驗室進行之任何試驗結果，基本上經由小規模之調整後均可於工廠之量產化中重現。
3. 量產化程序中，坍度為 8 公分左右之輕質骨材混凝土，雖經由徹底之震動夯實，仍不會發生骨材浮起現象。
4. 輕質骨材混凝土對坍度甚為敏感，當坍度小於 4 公分時，流動性變得很差，不適合使用於灌製預鑄構件；當坍度大於 12 公分時，在震動夯實過程中，輕質骨材會明顯浮起，亦不適合使

用於灌製預鑄構件。

5. 量產化程序中，坍度為 8 公分左右之輕質骨材混凝土表面不易鏟平，但若在表面輕微灑水再鏟平，則鏟平效果良好。
6. 相同之試驗室及工廠配比會有不同的拌合結果，調整要點為都必需將坍度控制在  $8\pm 2$  公分之內。

表 4-2.1 計畫三研究結果所建議之配比

水膠比	水泥	爐石	水	SP 添加劑	細骨材	輕質骨材
0.368	330	144	170	7.11	681	476

表 4-2.2 推求量產化配比過程中之配比

<b>試驗日期</b>	92.06.06-1	92.06.06-2	92.06.06-3
水膠比	0.368	0.368	0.367
水泥 Type I Low Alkali (kg)	330	330	330
爐石(kg)	144	144	144
水(kg)	170	170	170
添加劑(kg)	F-HP100(松江)	F-100(松江)	F-100(松江)
	7.11	7.11	7.58
河砂(kg)	681	681	681
輕質骨材(kg)	476	476	476
坍度(cm)	--	5.5	18
含氣量%	0.02	0.02	0.02
養生	--	--	水中

表 4-2.3 配比 92.06.06-3 配比之抗壓強度

抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	24 hrs	189.3
		179.7
		180.2
	3days	315.5
		311.6
		320.6
	7 days	411.0
		412.9
		409.3
	14 days	423.1
		429.3
		442.8
	28 days	457.0
		457.7
		458.4

表 4-2.4 推求最佳鏘平配比過程中之配比

試驗日期	92.06.17-1	92.06.17-2	92.06.17-3
水膠比	0.374	0.366	0.369
水泥 Type I Low Alkali (kg)	330	336	336
爐石(kg)	144	144	144
水(kg)	170	170	170
添加劑(kg)	7.2	5.76	7.2
	1.52%	1.20%	1.50%
河砂(kg)	672	680	678.5
輕質骨材(kg)	473	479	479
坍度(cm)	24	1	8.5
含氣量 %	2%	2%	2%



照片 4-2.1 量產工廠之儲料間



照片 4-2.2 量產工廠之輸送帶





照片 4-2.3 圓形料槽



照片 4-2.4 量產工廠之拌合機



照片 4-2.5 量產工廠之電腦控制室



照片 4-2.6 配比 92.06.06-1 之坍度



照片 4-2.7 配比 92.06.06-2 之黏稠程度



照片 4-2.8 配比 92.06.06-2 之坍度





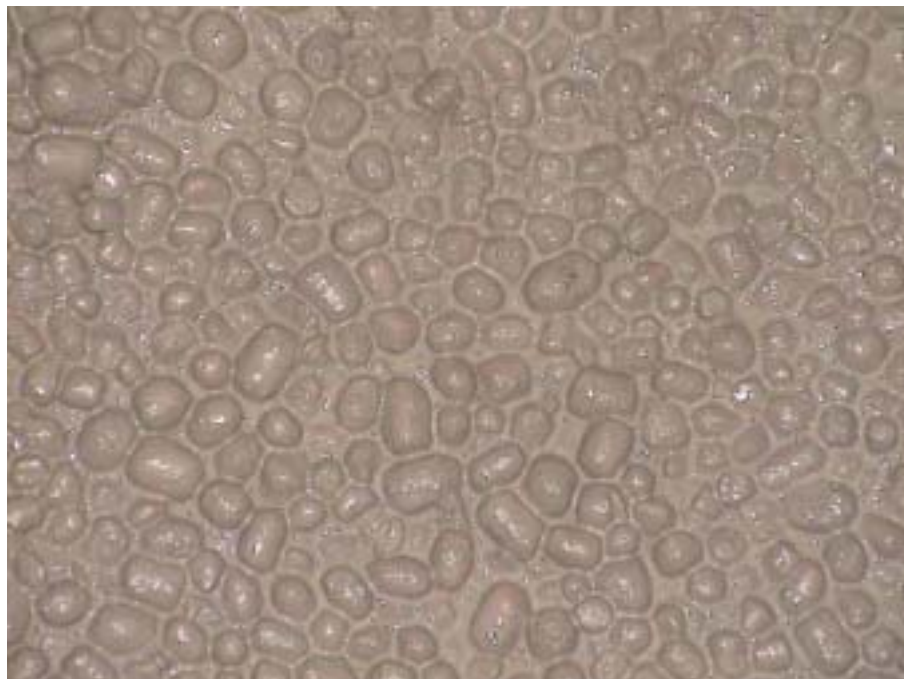
照片 4-2.9 配比 92.06.06-3 之黏稠程度



照片 4-2.10 配比 92.06.06-3 之坍度



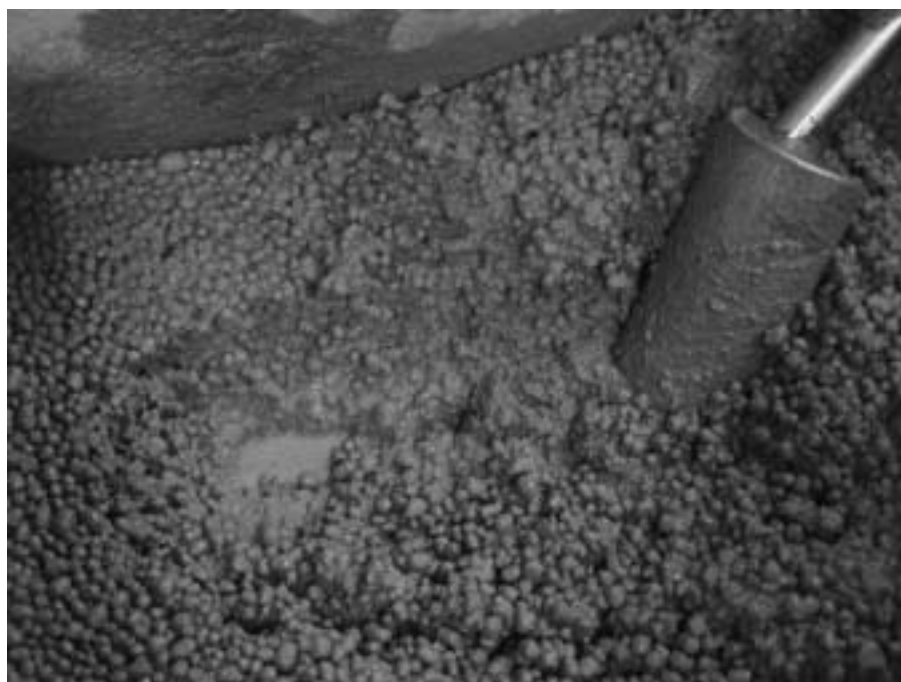
照片 4-2.11 鏟平試驗配比 92.06.17-1 配比之坍度



照片 4-2.12 鏟平試驗配比 92.06.17-1 下輕質骨材顆粒浮起現象



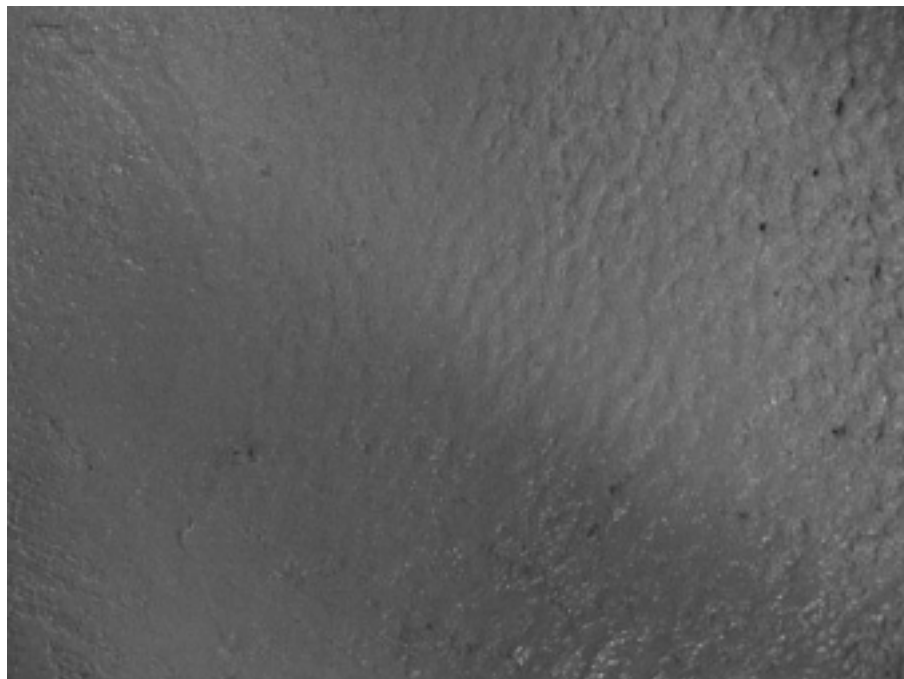
照片 4-2.13 鏟平試驗配比 92.06.17-1 下經努力鏟平後  
仍有顆粒浮起現象(一)



照片 4-2.14 鏟平試驗配比 92.06.17-1 下經努力鏟平後  
仍有顆粒浮起現象(二)



照片 4-2.15 配比 92.06.17-2 之坍度



照片 4-2.16 配比 92.06.17-2 下表面很難鏟平





照片 4-2.17 配比 92.06.17-3 下表面仍有輕微顆粒隆起現象



照片 4-2.18 等 20 分鐘後再第二次鑲平效果良好





照片 4-2.19 使用配比 92.06.06-3 配比灌製構件時有顆粒隆起現象(一)



照片 4-2.20 使用配比 92.06.06-3 配比灌製構件時有顆粒隆起現象(二)



照片 4-2.21 坍度改 8 公分時即使用震動機亦無明顯顆粒隆起現象(一)



照片 4-2.22 坍度改 8 公分時即使用震動機亦無明顯顆粒隆起現象(二)



照片 4-2.23 工廠量產化下輕質版之鏟平(一)



照片 4-2.24 工廠量產化下輕質版之鏟平(二)

## 第三節 輕質骨材混凝土預鑄樑構件之性質研究

### 3.1 研究目的

本子計畫在梁構件部分旨在探討以輕質骨材製作鋼筋混凝土預鑄梁之量產技術，並進而研究輕質骨材混凝土梁構件在組合載重下之力學特性，以供設計者之參考。自 1950 年代起，輕質骨材混凝土開始被大量應用在建築結構中[7, 8, 9]。由於輕質骨材混凝土之單位重約為常重混凝土之 70~80%，在結構設計時可以有效地降低結構物的自重，並且減少鋼筋用量，因此能夠大幅減少營建成本。隨著輕質骨材製程技術的進步與製造成本的降低，輕質骨材混凝土已被使用在高樓結構物以及預鑄混凝土結構中，在現行結構混凝土構件之設計規範中，有許多條文已納入輕質骨材混凝土抗張強度較低於常重混凝土之特性，一般均以 0.85 之折減係數處理。在實際結構中，所有的構件會因為所在位置不同而同時受到各種不同比例之組合載重作用，例如承受偏心載重的曲橋與房屋結構中之邊梁，便是同時承受相當大的扭矩、剪力與彎矩作用，構件之破壞模式也會因為組合載重作用力比例的變化而會有顯著地改變[10, 11, 12, 13]，因此，本計畫將探討輕質骨材混凝土預鑄梁在受到純彎矩、純扭矩以及扭矩與彎矩組合載重作用下之力學特性，在不同比例之組合作用力下，探討梁試體的破壞模式、變形行為、強度發展、以及容許應力等相關問題，也包括梁在配置較高及較低鋼筋量情形下，承受純扭矩及純彎矩載重之特性。

### 3.2 研究方法與實驗步驟

本期計畫主要在探討量產預鑄輕質骨材 RC 梁構件之技術問題，並測試其在扭矩與彎矩組合載重作用下之承力行為。在實驗工作方面，本期計畫共規劃 14 根矩形斷面鋼筋混凝土梁，其中 8 根為輕質骨材混凝土梁，另 6 根為常重混凝土梁，主要分為四部分工作：

#### 1. 預鑄梁試體製作

8 根輕質骨材預鑄梁在楊梅\_潤弘預鑄廠製作，對照組之



6 根常重混凝土梁將在台南市由當地預拌廠提供預拌混凝土製作。

## 2. 純彎矩試驗

這部分試驗共有兩根輕質骨材梁試體，一根配置現行設計規範要求之最低撓曲鋼筋量，另一根配置高撓曲鋼筋量，試體之配筋如圖 4-3.1 中 A-Series 與 LB-1 斷面所示。為了比對輕質骨材混凝土之撓曲特性，本計畫將另製作 2 根常重混凝土試體，配置相同之高、低撓曲鋼筋量，探討重點在開裂後及壓力區力學特性之差異，加載裝置如圖 4-3.2 及照片 4-3.1 所示。

## 3. 純扭矩試驗

這部分試驗共有兩根輕質骨材梁試體，一根配置現行設計規範之開裂扭矩強度之 1.4 倍抗扭鋼筋量，另一根配置高抗扭鋼筋量，其測試區長度約為 1700 mm，試體之配筋如圖 4-3.1 中之 A-Series 與 LB-6 斷面所示，縱向鋼筋在梁端採用 180 度標準彎鉤，為了比對輕質骨材混凝土之抗扭特性，本計畫將另製作 2 根常重混凝土試體，配置相同之高、低抗扭鋼筋量，探討重點在開裂後及斜壓桿件力學特性之差異，加載裝置如圖 4-3.3 及照片 4-3.2 所示。

## 4. 彎矩與扭矩組合載重試驗

這部分試驗共有 4 根輕質骨材梁試體，全部配置現行設計規範之開裂扭矩強度的 1.4 倍抗扭鋼筋量，其測試區長度約為 1700 mm，本計畫將另製作 4 根常重混凝土試體，配置相同之抗扭鋼筋量，其測試區長度約為 1500 mm，探討重點為輕質骨材混凝土梁在不同組合載重下，斜壓桿件力學特性之差異，梁試體之縱向鋼筋在梁端均採用 180 度標準彎鉤。加載裝置如圖 4-3.4 及照片 4-3.3 所示，利用扭力夾具夾在試體之兩端，由 500 噸萬能試驗機施加垂直力，並透過傳力鋼梁將該垂直力分別施加在扭力夾具上，在試體測試區產生均勻

之扭矩與彎矩，在加載過程中量測扭矩與彎矩值、相對之扭轉角、垂直撓度以及試體表面之變形。

在理論分析方面，本研究將探討輕質骨材混凝土梁在承受扭矩與彎矩組合載重作用下，不同比例之組合作用力與壓力區厚度和試體內、外部變形行為之特性，並提出加載歷程中扭矩與彎矩強度、扭轉勁度、延展性及破壞模式上之差異性。

### 3.3 預鑄輕質骨材鋼筋混凝土梁試體製作過程

潤弘預鑄廠根據執行單位所提供之梁配筋圖，先行協助完成鋼筋之剪裁、彎紮、製作 8 個鋼筋籠，隨後並完成 8 套模版。本年 6 月 30 日，執行單位之研究生開始在每根梁的鋼筋上黏貼應變計，於 7 月 4 日，潤弘預鑄廠協助模版組立，如照片 4-3.4 所示。7 月 6 日開始澆置混凝土，先行完成版、牆構件之混凝土澆置，然後以同樣之配比灌置梁之混凝土，如照片 4-3.5 至 4-3.15 所示，約以 3 至 4 個升層灌注混凝土，由於坍度僅約 7.5 公分，又因坍度損失較快，在接近表面層之澆置相當費時，所以每根梁之混凝土澆置時間需要約 25 分鐘，在最後兩根梁的澆置過程，因稍微增加強塑劑之劑量，使混凝土澆置工作困難度大為改善，梁頂面之修飾工作也較易施行，經由此次之大型試拌，吾人獲得一寶貴經驗，由於梁深較大，澆置時可能要有 2 至 3 個升層，使用此種坍度較小之混凝土，其坍度損失之控制相當重要。

澆置混凝土 3 天後拆模，並將梁吊離，於 7 月 16 日，由預鑄廠協助將梁以拖板車運送至成大土木系之試驗室，經檢視梁之混凝土完成面，均相當良好，如照片 4-3.16 至 4-3.18 所示。目前以帆布將這 8 根梁覆蓋，用濕氣養護，等待後續之力學試驗測試。

### 3.4 結果與討論

#### 3.4.1 預鑄輕質骨材鋼筋混凝土梁量產技術檢討

在預鑄場量產預鑄輕質骨材鋼筋混凝土梁時，由於梁深為 500

mm，而混凝土坍度僅約 75 mm，須以約 3 至 4 個升層澆置混凝土，又因坍度損失較快，在接近表面層之澆置相當費時，所以每根梁之混凝土澆置時間需要約 25 分鐘，在最後兩根梁的澆置過程，因稍微增加強塑劑之劑量，使混凝土澆置工作困難度大為改善，未來在大型構件施作時，應特別注意此問題。

### 3.4.2 預鑄輕質骨材鋼筋混凝土梁之承力行為

預鑄輕質骨材鋼筋混凝土梁及對照用場鑄常重鋼筋混凝土梁在承受純彎矩、純扭矩及彎矩與扭矩組合載重作用下之主要試驗結果如表 4-3.1 至 4-3.3 所示，試體在破壞時之四面合成圖如照片 4-3.22 至 4-3.35 所示。

#### 3.4.2.1 梁承受純彎矩作用之行為

在本試驗中，試體 LA-1 及 LB-1 為承受純彎矩作用之輕質骨材鋼筋混凝土梁，如表 4-3.1 所示，試體 LA-1 的撓曲鋼筋( $\rho_{total} = 1.11\%$ )係根據 ACI318-02 之最低撓曲鋼筋量規定配置，試體 LB-1 的撓曲鋼筋量較高，約為  $\rho_s = 3.07\%$ ，接近  $0.75\rho_b$ ，作為對照之用。圖 4-3.5 為試體在跨徑中央的彎矩與曲率關係，圖中 NC-1 為配置最低撓曲鋼筋量的常重混凝土試體( $\rho_{total} = 1.19\%$ )，以供比對之用。試體 NC-1 與 LA-1 均有良好之撓曲韌性，對於量化之撓曲韌性而言，本研究以撓曲鋼筋降伏時的彎矩  $M_y$  所對應之曲率  $\psi_y$ ，與試體在最大彎矩值所對應的曲率  $\psi_u$  之間的曲率變化加以定義，對於試體 LA-1， $\psi_u/\psi_y$  比值約為 11.94，對應之常重混凝土試體 NC-1 的  $\psi_u/\psi_y$  比值約為 6.91，含較高撓曲鋼筋量的試體 LB-1 之對應值甚小，所以本研究另以試體跨徑中點彎矩與垂直變位關係表示，如圖 4-3.6 及圖 4-3.7 所示，試體 LB-1 在極限彎矩到達前，彎矩-變位幾呈線性關係，過了極限彎矩後，彎矩快速下降，在壓力區之混凝土有大範圍之壓碎現象發生，試體 LA-1 及 NC-1 則有良好之韌性，如照片 4-3.19 至 4-3.21 所示。

各試體的撓曲開裂彎矩預測值 ( $M_{cr(ACI)}$ ) 係根據實測的  $f_c'$  值加以推算，由表 4-3.3 中，試體 LA-1 及 LB-1 的  $M_{cr(test)}$  值分別為 58.2 kN-m 及 125.5 kN-m，對應的規範預測值  $M_{cr(ACI)}$  分別為 59.5 kN-m 及 62.2 kN-m。對照用試體 NC-1 的  $M_{cr(test)}$  值為 43.9 kN-m，規範的預測值為 54.6 kN-m。表 4-3.3 中同時也列出各試體的撓曲強度( $M_n$ )預測值與實測值之比較，含最低撓曲鋼筋量的輕質骨材混凝土試體 LA-1 之  $M_{n(test)}=157.5$  kN-m，大於預測值  $M_{n(ACI)}=122.4$  kN-m，含較高撓曲鋼筋量的試體 LB-1 的  $M_{n(test)}=629.7$  kN-m，大於預測值  $M_{n(ACI)}=562.3$  kN-m。

本研究根據實際量測之扭矩與扭轉角關係圖中未開裂前之勁度  $k_{uc(T)}$  以及由開裂扭矩至極限階段的扭轉勁度  $k_{cr(T)}$  此二值表示試體之扭轉勁度變化。根據試驗結果顯示，常重混凝土梁試體之  $k_{uc(T)}$  值範圍在 18478 ~ 47973 kN-m<sup>2</sup>/rad，其  $k_{cr(T)}$  值範圍在 1189 ~ 2090 kN-m<sup>2</sup>/rad，此外輕質骨材混凝土梁之  $k_{uc(T)}$  值及  $k_{cr(T)}$  範圍分別在 5279 ~ 49000 與 321~3509 kN-m<sup>2</sup>/rad，根據上述結果可知，輕質骨材混凝土梁之扭轉勁度較常重混凝土梁之扭轉勁度低。

根據試驗結果顯示，常重混凝土試體 NC-1 在試體頂面混凝土被壓碎時的最大壓縮應變約為 0.0027，由於此梁配置規範所規定的最低撓曲鋼筋量，所以在  $\epsilon_c=0.0027$  發生時，鋼筋已降伏， $\epsilon_c$  值較一般設計所假設之  $\epsilon_c = 0.003$  來的小。對於輕質骨材混凝土而言，試體 LA-1 在梁頂混凝土  $\epsilon_c = 0.0032$  時，撓曲鋼筋已降伏，在梁頂被壓碎時所受的  $\epsilon_c$  值，較之含對應鋼筋量的常重混凝土梁 NC-1 的  $\epsilon_c$  值來的高，另一輕質骨材混凝土試體 LB-1 的對應混凝土壓縮應變值  $\epsilon_c = 0.0034$ 。

#### 3.4.2.2 梁承受純扭矩作用之行為

鋼筋混凝土梁或預力混凝土梁在受到剪力或扭力作用時，試體表面之混凝土會產生斜拉裂縫，梁構件在開裂後之承力行為與斜拉裂縫間混凝土對剪應力之阻抗有密切關係。在本期試驗中，試體 LA-6 及 LB-6 為承受純扭矩作用之輕質骨材鋼筋混凝土梁，如表 4-3.1 所示，試體 LA-6 的總鋼筋比( $\rho_{total} = 1.11\%$ )係根據 ACI318-02 之最低扭矩總



鋼筋量配合底層鋼筋為最低撓曲鋼筋量規定配置，試體 LB-6 的扭矩鋼筋量較高，約為  $\rho_{total} = 1.68\%$ ，縱向鋼筋沿試體的四個面均勻分佈，作為對照之用。圖 4-3.8 為上述兩試體在跨徑中央測試區的扭矩與扭轉角關係圖，由於試體 LB-6 含較高鋼筋量，在開裂後的扭轉勁度高於試體 LA-6，也較圖中配置最低撓曲鋼筋量的常重混凝土試體 NC-6 ( $\rho_{total} = 1.19\%$ ) 來的高。在承受最大扭矩後，試體 LA-6 有很好的韌性，由於試體 NC-6 之鋼筋量稍高於試體 LA-6 且試體 NC-6 鋼筋的降伏強度亦高於試體 LA-6，所以極限扭矩強度較試體 LA-6 來的大。根據 ACI 318-02 規範所預測的極限扭矩強度  $T_{n(ACI)}$  而言，試體 LA-6 及 LB-6 分別為 49.1 kN-m 及 73.7 kN-m，均小於實測值  $T_{u(test)}$  的 71.3 kN-m 及 106.9 kN-m，而常重混凝土試體 NC-6 的計算值為 61.5 kN-m 也小於實測值的 88.1 kN-m。

根據最新的結構混凝土設計規範 ACI 318-02 規定，在預測輕質骨材混凝土梁 (sand-lightweight concrete) 的剪力或扭矩強度時，混凝土的開裂張力強度應依常重混凝土的開裂強度預測值乘以 0.85 加以折減，如表 4-3.3 所示，本研究依此規定計算試體 LA-6 及試體 LB-6 之計算開裂扭矩強度  $T_{cr(ACI)}$ ，分別為 40.7 kN-m 及 40.3 kN-m，小於實測的  $T_{cr(test)} = 63.1$  kN-m 及 69.7 kN-m。另對應編號為 NC-6 的常重混凝土梁，其計算開裂扭矩強度  $T_{cr(ACI)} = 36.0$  kN-m 亦小於其實測開裂扭矩強度  $T_{cr(test)} = 42.9$  kN-m。

### 3.4.2.3 梁承受彎矩與扭矩組合載重作用之行為

對於同時承受彎矩與扭矩作用的試體， $T/M$  比例值較大，亦即承受較大扭矩作用力與較小彎矩作用力之情況，其扭矩與扭轉角關係如圖 4-3.11 至圖 4-3.14 所示。輕質骨材混凝土試體 LA-3、LA-4 及 LA-5 ( $T/M = 1.17, 2.08$  與  $3.10$ ) 均有良好之扭矩韌性，但相較於常重混凝土試體 NC-3、NC-4 及 NC-5，輕質骨材混凝土試體的扭矩韌性稍差於常重混凝土試體。對於量化比較這些試體之扭矩韌性而言，本研究以縱向或橫向鋼筋降伏時的扭矩  $T_y$  所對應之扭轉角  $\theta_y$ ，與試體在最大扭矩值

過後，於強度下降段  $85\%T_u$  發生時所對應的扭轉角  $\theta_{u(0.85)}$  之間的  $\theta$  角度變化值加以定義，輕質骨材混凝土試體 LA-3、LA-4 及 LA-5 之  $\theta_{u(0.85)}/\theta_y$  比值分別為 7.92, 13.71 與 4.08，對應之常重混凝土試體 NC-3、NC-4 及 NC-5 的  $\theta_{u(0.85)}/\theta_y$  比值分別為 9.40, 15.78 與 5.82。

對於同時承受彎矩與扭矩作用的試體，其破壞模式(failure modes)會因 T/M 比例值的變化而改變，常重混凝土試體 NC-6、NC-5 及 NC-4 與輕質骨材混凝土試體 LB-6、LA-6、LA-5、LA-4 及 LA-3，承受較大扭矩作用力，亦即 T/M 比例值較大，破壞時為試體長邊的混凝土被壓碎，當組合載重 T/M 比例值較低，亦即彎矩作用力較大時，試體的破壞面則發生在頂面，亦即試體之短邊，輕質骨材混凝土試體 LA-1、LA-2 及 LB-1 及常重混凝土試體 NC-1、NC-2 及 NC-3 屬於此類型破壞。試體在破壞後之四個面開裂合成圖如照片 4-3.22 至 4-3.35 所示。

關於試體破壞時彎矩與扭矩作用力之互制關係，本研究分別以下列 M. P. Collins (公式 1 與 2) 及空間桁架模式(Truss model)之理論(公式 3 與 4)預測值加以比較：

$$\gamma \left( \frac{T_u}{T_{uo}} \right)^2 + \frac{M_u}{M_{uo}} = 1 \quad (1)$$

$$\left( \frac{T_u}{T_{uo}} \right)^2 - \frac{1}{\gamma} \frac{M_u}{M_{uo}} = 1 \quad (2)$$

$$\left( \frac{T_u}{T_{uo}} \right)^2 + \frac{M_u}{M_{uo}} = 1 \quad (3)$$

$$\left( \frac{T_u}{T_{uo}} \right)^2 - \frac{M_u}{M_{uo}} = R \quad (4)$$

其中  $\gamma = \frac{A_{lt} f_{lt}}{A_{lb} f_{lb}} \quad ; \quad R = \frac{A_{lt}}{A_{lb}}$

上述理論預測模式的預測對象主要是常重混凝土梁試體，圖 4-3.9

及圖 4-3.10 分別為常重混凝土試體與輕質骨材混凝土試體正規化之開裂強度及極限強度受彎矩與扭矩交互影響的實測與理論值比較，以桁架模式(Truss model)之理論預測較為保守，在彎矩較大之情況，M. P. Collins 之理論預測值稍高於實測值，由於本研究中所涵蓋的試體數目較少，不足以評估輕質骨材混凝土試體的實測值與預測值差異之百分比，此項結果有待更進一步之研究。

本研究所用試體除少數為比對用而採用較高鋼筋量(LB-6 及 LB-1)外，均以設計規範所規定的最低抗扭鋼筋量另補充試體底層撓曲鋼筋量，使其成為設計規範所規定的最低撓曲鋼筋量，然後施加不同 T 與 M 的組合載重作用。

圖 4-3.11 圖 4-3.14 為輕質骨材混凝土與常重混凝土兩種不同混凝土試體於不同組合力作用下，在試體跨徑中央測試區的扭矩與扭轉角關係，隨著彎矩的加大，試體的扭轉勁度會隨之增加。圖 4-3.15 圖 4-3.18 為兩種不同混凝土試體於不同組合力作用下，在試體跨徑中央測試區的彎矩與曲率關係，隨著扭矩的加大，試體的撓曲勁度隨之增加。

### 3.5 小結及建議

本研究旨在探討以預鑄方式產製輕質骨材混凝土梁的可行性及相關技術，並測試其在純彎矩，純扭矩及彎矩與扭矩組合載重作用下之承力行為，在試驗方面共測試 8 根輕質骨材混凝土及 6 根常重混凝土全尺寸的鋼筋混凝土梁，根據產製試體梁及在試驗室測試結果得到以下初步結論。

- 1.在潤弘預鑄場以現有設備可以產製 350 mm×500 mm×4500 mm 之全尺寸預鑄輕質骨材混凝土梁，澆置混凝土後 14 天的混凝土抗壓強度約在 38~42 MPa，28 天的抗壓強度可達 42~46 MPa。
- 2.配置設計規範所規定的最低撓曲鋼筋量的梁，在承受純扭矩作用時，其實測開裂強度及極限強度均大於規範之預測值，承受純彎矩作用之試體 LA-1 與 NC-1 的實測開裂強度小於規範之預測值，而承受純

彎矩作用之試體 LB-1 的實測開裂強度大於規範之預測值，承受純彎矩作用之試體的實測極限強度均大於規範之預測值。在彎矩與扭矩組合載重作用下，試體實測值大於用空間桁架模式所預測之結果，但在彎矩較大之情況，實測值小於 M. P. Collins 的理論預測值。

3. 常重混凝土試體與輕質骨材混凝土梁試體，在受到純彎矩或純扭矩作用下，均有良好之撓曲或扭矩韌性，在彎矩與扭矩組合載重作用下，尤其是在扭矩較大時，扭矩韌性良好，但稍差於對應之常重混凝土梁。
4. 本研究在預鑄場產製全尺寸梁的過程中，梁在拆模後，試體表面雖然相當平整光亮，但因梁深為 500 mm，在澆置混凝土時，對於低坍度混凝土的澆置後材料均勻性及澆置工時的縮短，均有再改善的空間。由各種加載方式所測得之結果，固然可看到國內自行產製輕質骨材混凝土梁的良好承力行為，及與設計規範之合理相關性，但因試體數目甚少，在實際大量推廣前，仍應審慎再擇要測試及確認，以符合一般工程設計及施工之需要。

表 4-3.1 試體規劃總表

Spec. No.	T/M	$f'_c$ (MPa)	$f_{yv}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	Long. Bars	$\rho_t$ (%)	$\rho_b$ (%)	Stirrups (mm)	$\rho_t$ (%)	$\rho_{total}$ (%)
LA-1	0	43	317	353	3-No.3 and 4-No.4 and 2-No.5	0.19	0.37	130	0.47	1.11
LA-2	0.23	42								
LA-3	1.17	43								
LA-4	2.08	43								
LA-5	3.10	43								
LA-6	$\infty$	46								
NC-1	0	36	445	350	3-No.3 and 2-No.4 and 4-No.5	0.19	0.45			1.19
NC-2	0.25	37								
NC-3	1.29	37								
NC-4	2.22	36								
NC-5	3.18	36								
NC-6	$\infty$	36								
LB-1	0	46	317	409	3-No.4 and 2-No.5 and 8-No.8	0.30	2.32	200	0.31	3.07
LB-6	$\infty$	45		342	4-No.4 and 4-No.5	0.30	0.30	65	0.94	1.68

Note :  $\rho_t = \frac{A_t p_h}{A_{cp} S} \times 100\%$  ;  $\rho = \frac{A_l}{A_{cp}} \times 100\%$  ;  $\rho_{total} = \rho_t + \rho$

$\rho_t = \frac{A_{lt}}{A_{cp}} \times 100\%$  ;  $\rho_b = \frac{A_{lb}}{A_{cp}} \times 100\%$

**LA1**

- 1, 2, 3, 4, 5, 6 : T/M = 0,  $0.5T_{uo}/M_{uo}$ ,  $2.5T_{uo}/M_{uo}$ ,  $4.5T_{uo}/M_{uo}$ ,  $6.4T_{uo}/M_{uo}$ , , respectively
- A : Lower amounts of reinforcement
- B : Higher amounts of reinforcement
- L : Lightweight aggregate concrete
- N: Normal concrete

表 4-3.2 試驗結果總表

BA : 試體背面 (長邊)                      BO : 試體底面 (短邊)  
 F : 試體正面 (長邊)                      T : 試體頂面 (短邊)  
*Yielding surface* : 試體鋼筋發生降伏的面  
*Crushed surface* : 試體表面混凝土發生壓碎的面

<b>Spec. No.</b>	<b><math>T_{cr (test)}</math> (kN-m)</b>	<b><math>M_{cr (test)}</math> (kN-m)</b>	<b><math>T_y (test)</math> (kN-m)</b>	<b><math>M_y (test)</math> (kN-m)</b>	<b><math>T_u (test)</math> (kN-m)</b>	<b><math>M_u (test)</math> (kN-m)</b>	<b><i>Yielding surface</i></b>	<b><i>Crushed surface</i></b>
<b>LA-1</b>	---	58.2	---	67.6	---	157.5	T、F BA、BO	T
<b>LA-2</b>	9.8	42.4	17.4	74.9	27.8	119.8	F、BA BO	T
<b>LA-3</b>	46.8	38.5	57.2	48.8	63.1	53.8	F、BA BO	F
<b>LA-4</b>	39.3	19.0	54.4	26.1	70.6	33.9	T、F BA、BO	BA
<b>LA-5</b>	50.5	16.2	60.0	19.3	66.1	21.3	T、BO	BA
<b>LA-6</b>	63.1	---	64.0	---	71.3	---	T、F BA、BO	F
<b>NC-1</b>	---	43.9	---	108.9	---	180.1	F、BA BO	T
<b>NC-2</b>	10.3	41.5	27.1	108.7	38.5	155.4	F、B BO	T
<b>NC-3</b>	31.9	24.8	61.8	48.1	70.6	54.9	F、BA BO	T
<b>NC-4</b>	36.9	16.6	53.9	24.3	81.3	36.6	T、F BA、BO	F
<b>NC-5</b>	38.3	12.1	66.6	20.9	82.9	26.1	T、F BA、BO	F
<b>NC-6</b>	43.2	---	78.0	---	88.1	---	T、F BA、BO	F
<b>LB-1</b>	---	125.5	---	445.8	---	629.7	T、F BA、BO	T
<b>LB-6</b>	69.7	---	75.3	---	106.9	---	T、F BA、BO	BA

表 4-3.3 試體開裂及極限強度總表

Specimen Number	$M_{cr(ACI)}$ (kN-m)	$M_{n(ACI)}$ (kN-m)	$T_{cr(ACI)}$ (kN-m)	$T_{n(ACI)}$ (kN-m)	$M_{cr(test)}$ (kN-m)	$M_{u(test)}$ (kN-m)	$T_{cr(test)}$ (kN-m)	$T_{u(test)}$ (kN-m)
LA-1	59.5	122.3	---	---	58.2	157.5	---	---
LA-6	---	---	40.7	49.1	---	---	63.1	71.3
NC-1	54.6	140.2	---	---	43.9	180.1	---	---
NC-6	---	---	36.0	61.5	---	---	42.9	88.1
LB-1	62.2	562.3	---	---	125.5	629.7	---	---
LB-6	---	---	40.3	73.7	---	---	69.7	106.9

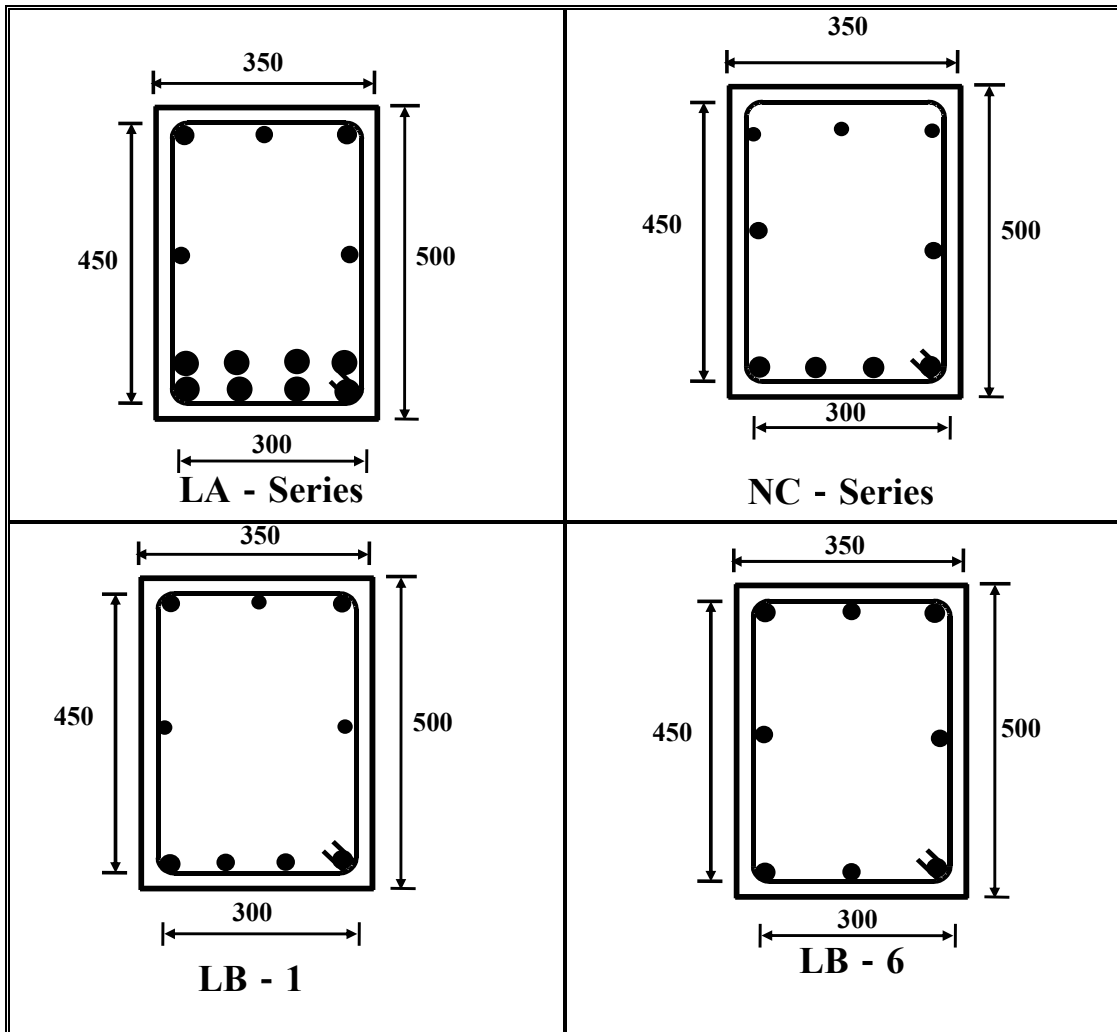


圖 4-3.1 試體斷面圖

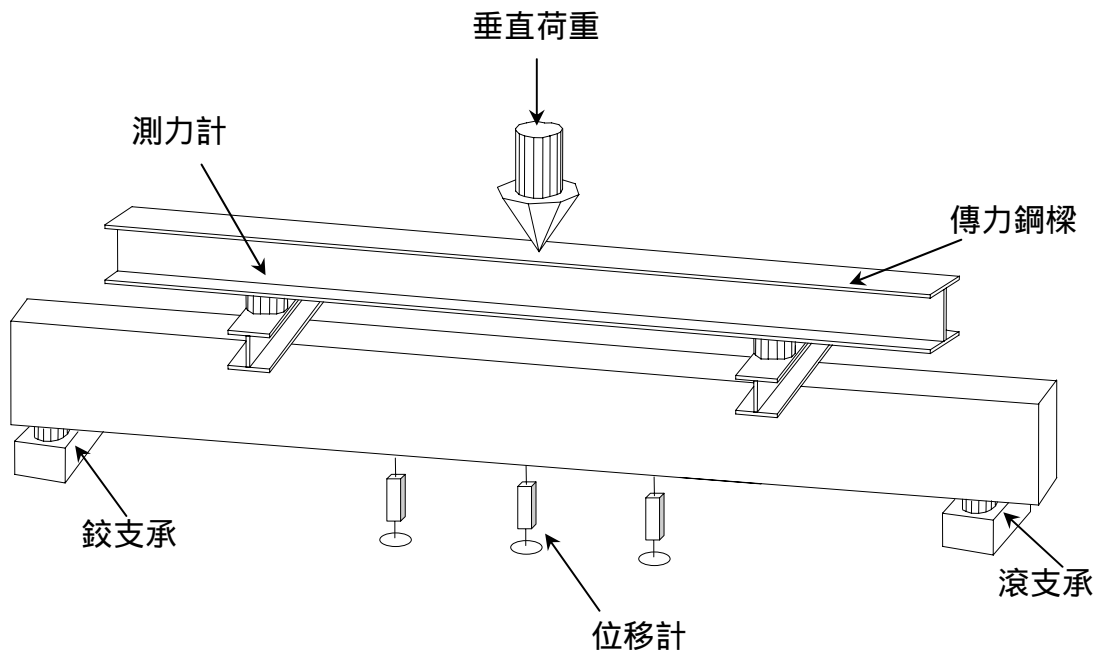


圖 4-3.2 純彎矩試驗加載設備示意圖

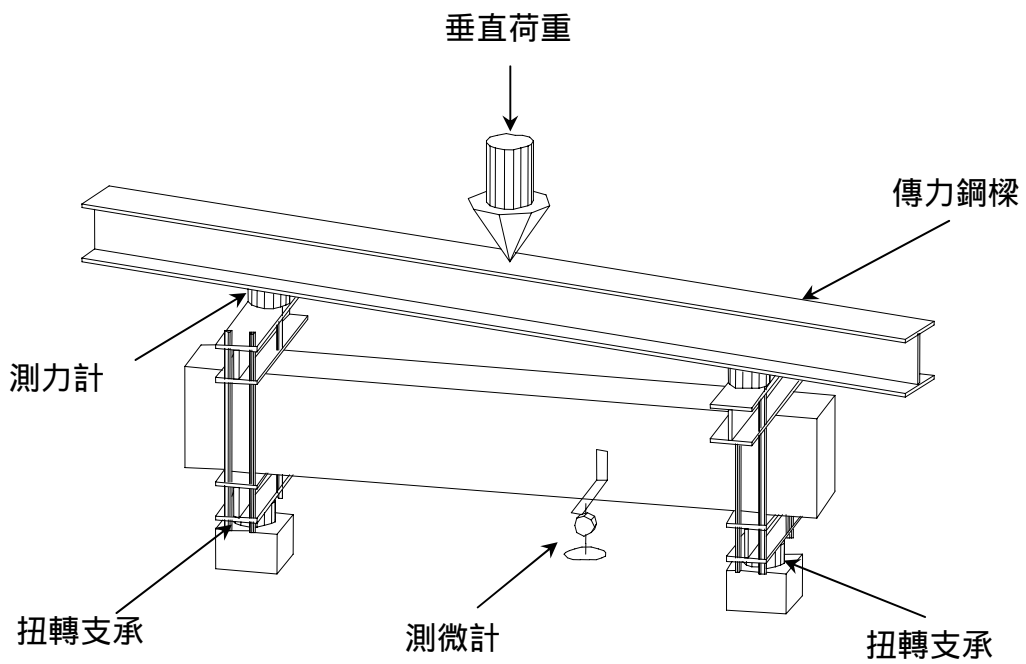


圖 4-3.3 純扭矩試驗加載設備示意圖



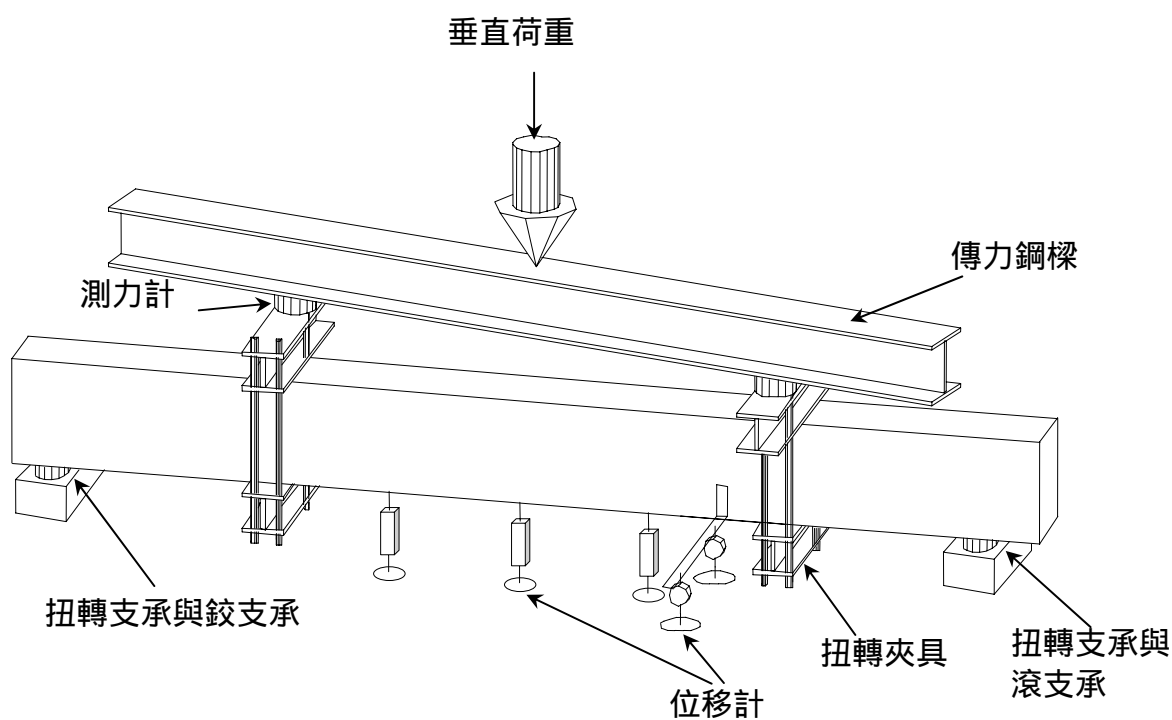


圖 4-3.4 扭矩及彎矩組合載重之加載裝置示意圖

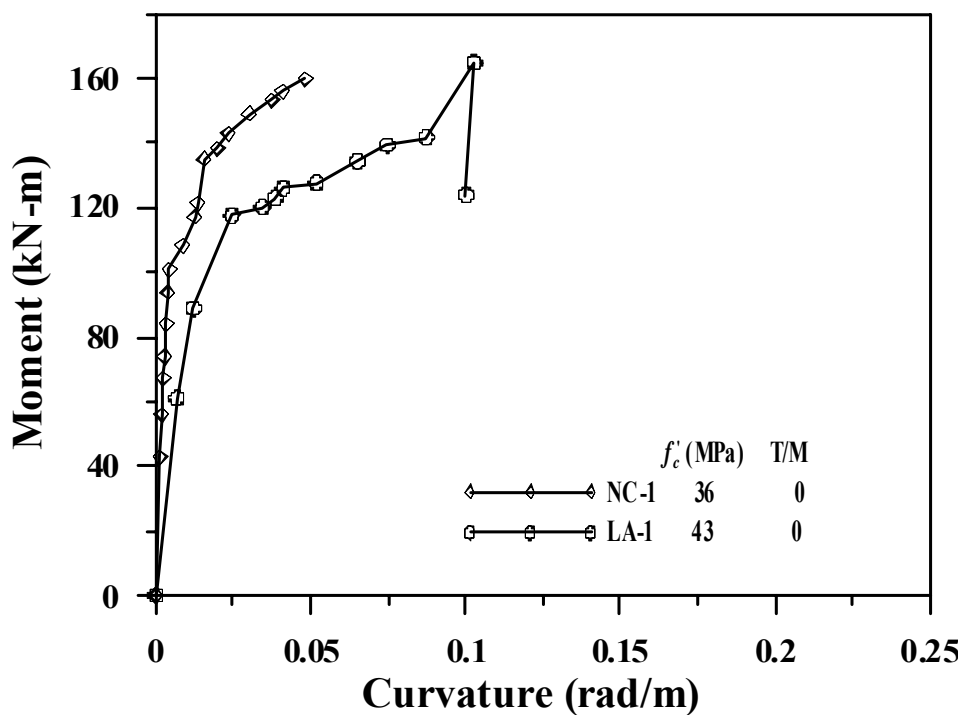


圖 4-3.5 試體 NC-1 及 LA-1 之彎矩與曲率關係圖

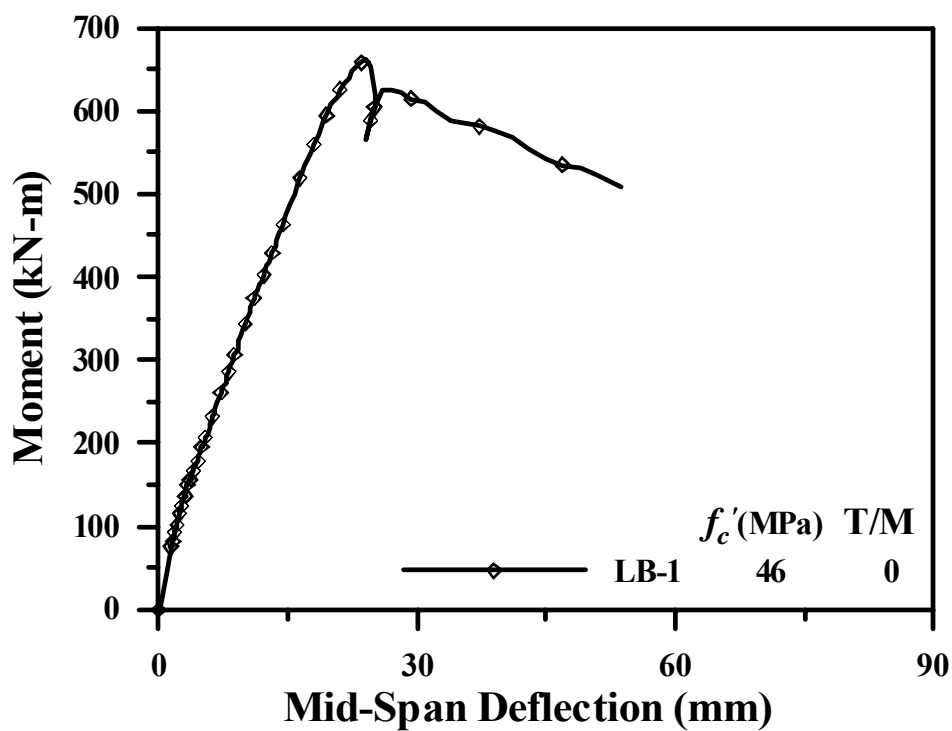


圖 4-3.6 試體 LB-1 之彎矩與跨徑中央垂直位移關係圖

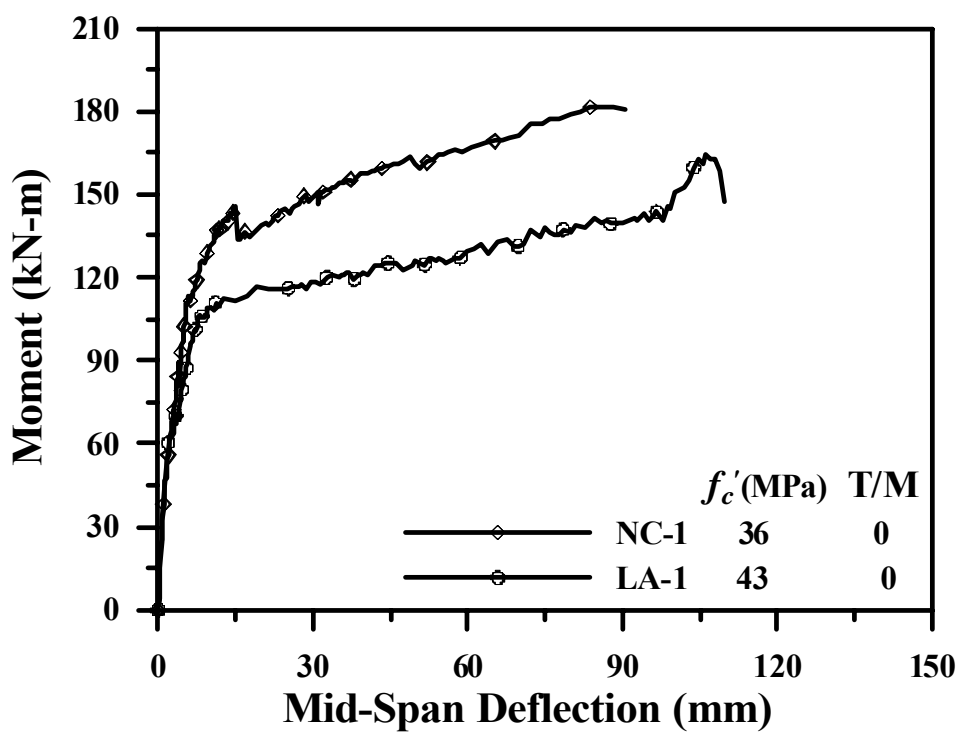


圖 4-3.7 試體 NC-1 及 LA-1 之彎矩與跨徑中央垂直位移關係圖

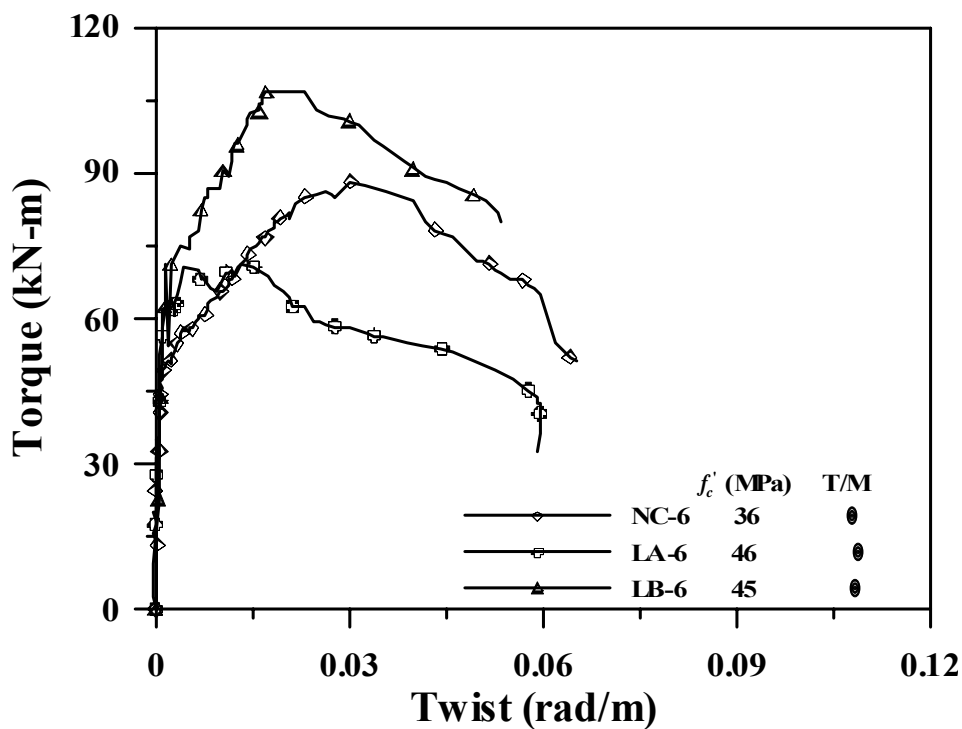


圖 4-3.8 試體 NC-6 , LA-6 及 LB-6 之扭矩與扭轉角關係圖

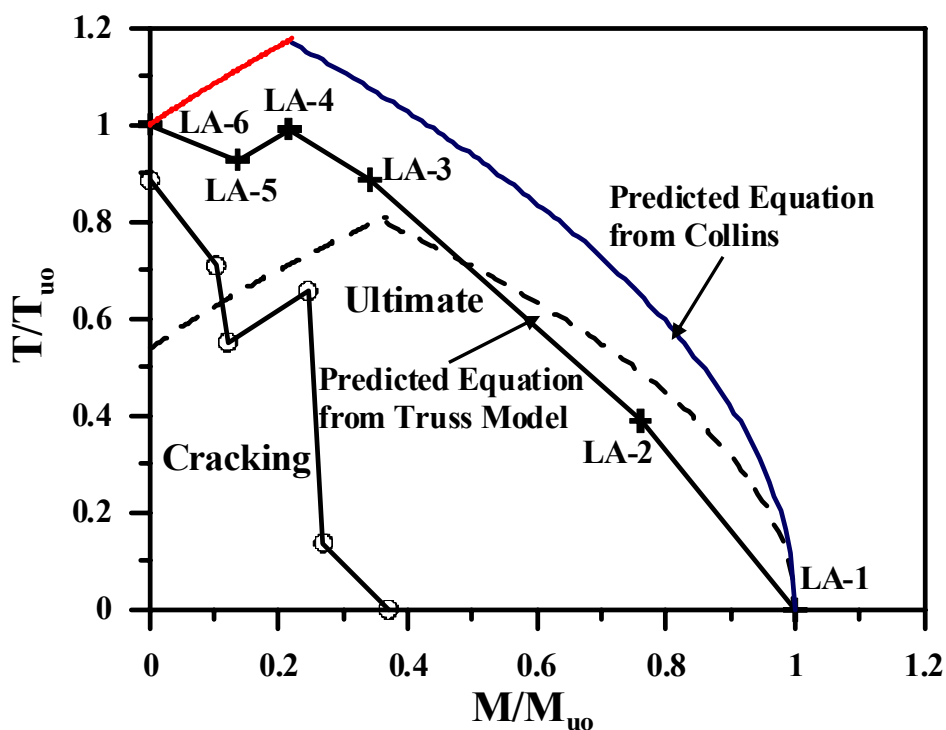


圖 4-3.9 輕質骨材混凝土梁之正規化扭矩與彎矩互制關係圖

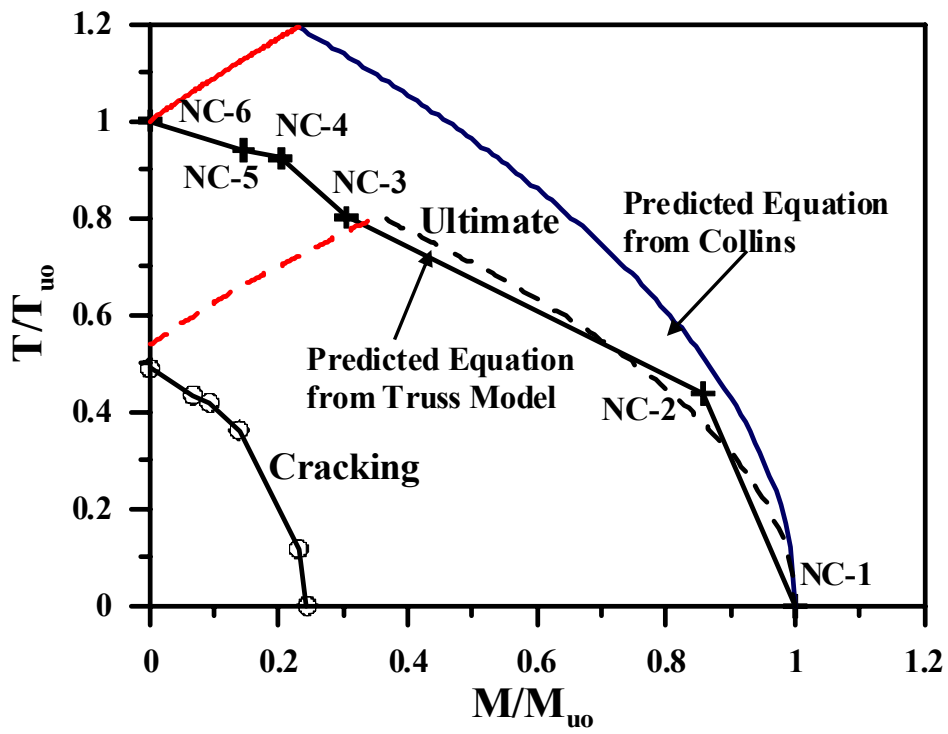


圖 4-3.10 常重混凝土梁之正規化扭矩與彎矩互制關係圖

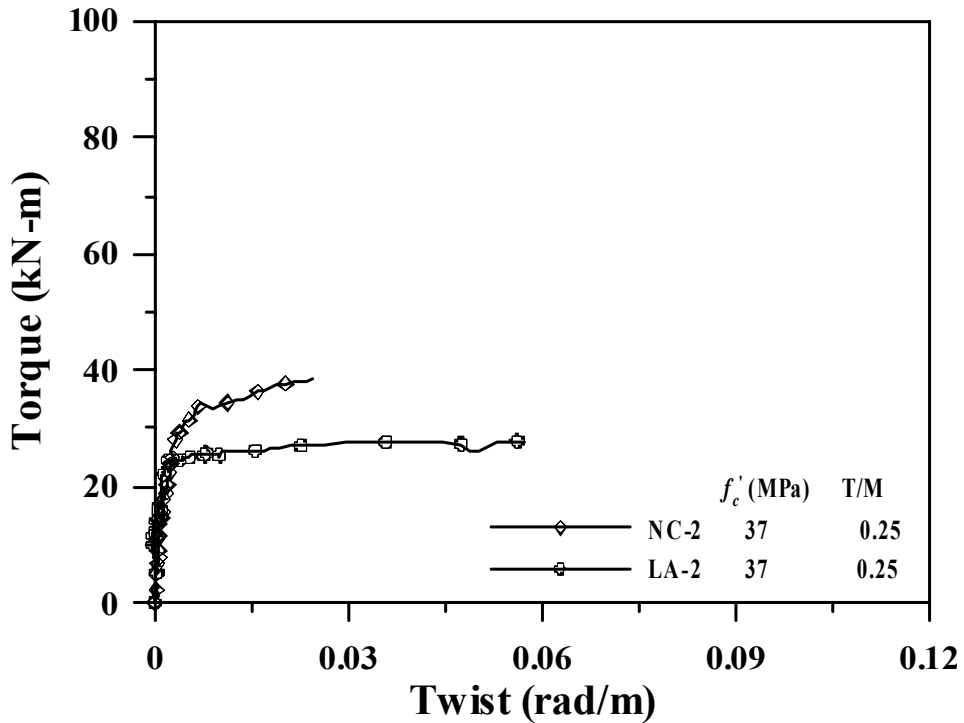


圖 4-3.11 試體 NC-2 及 LA-2 之扭矩與扭轉角關係圖

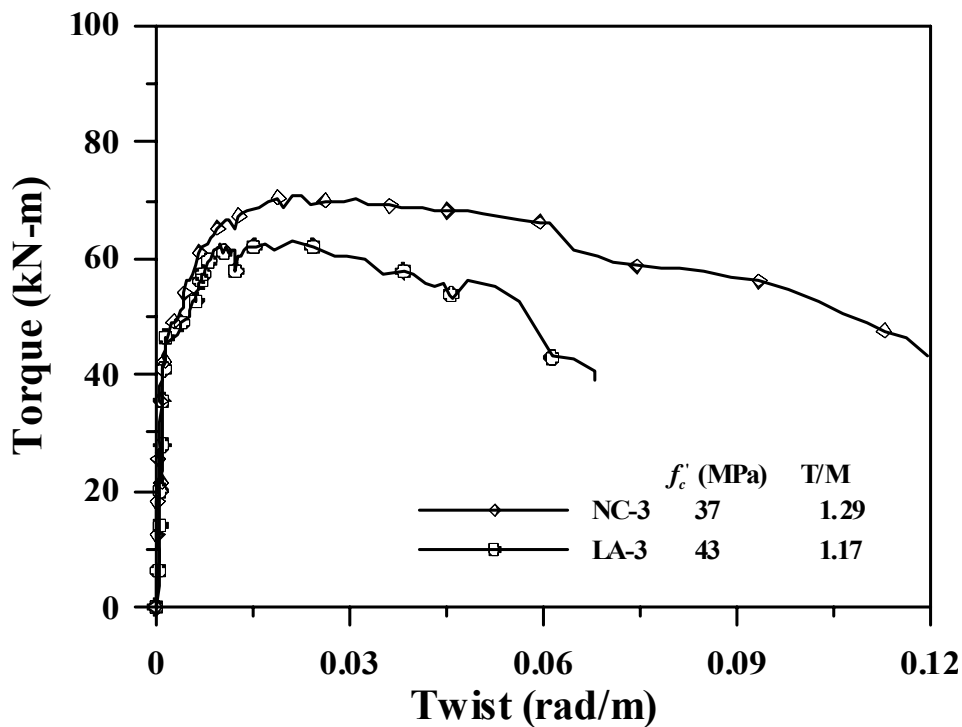


圖 4-3.12 試體 NC-3 及 LA-3 之扭矩與扭轉角關係圖

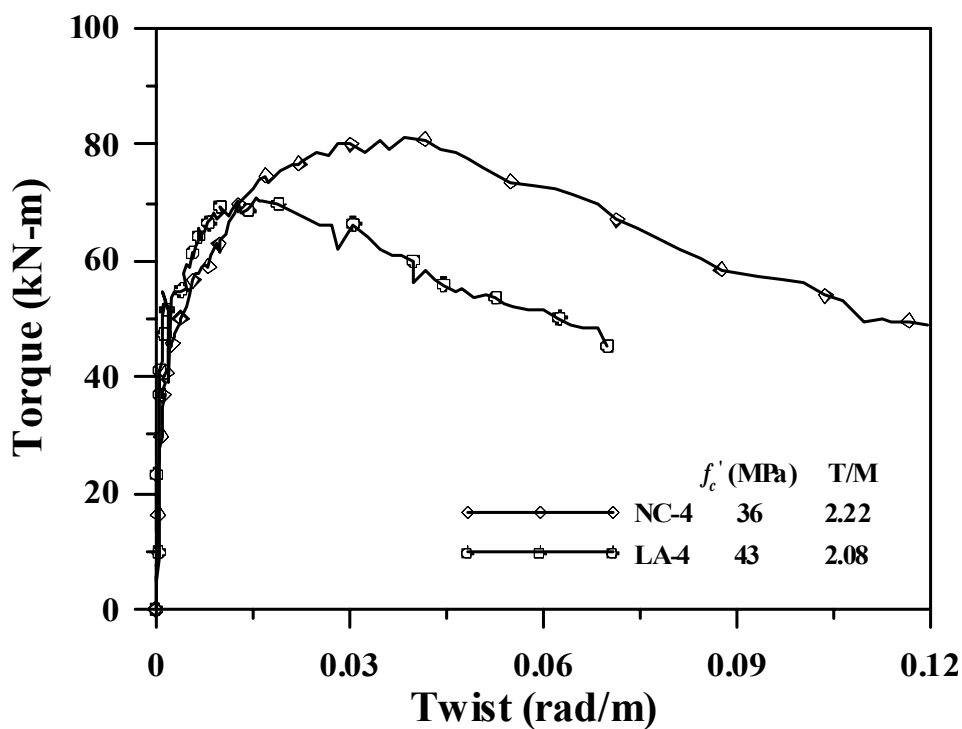


圖 4-3.13 試體 NC-4 及 LA-4 之扭矩與扭轉角關係圖

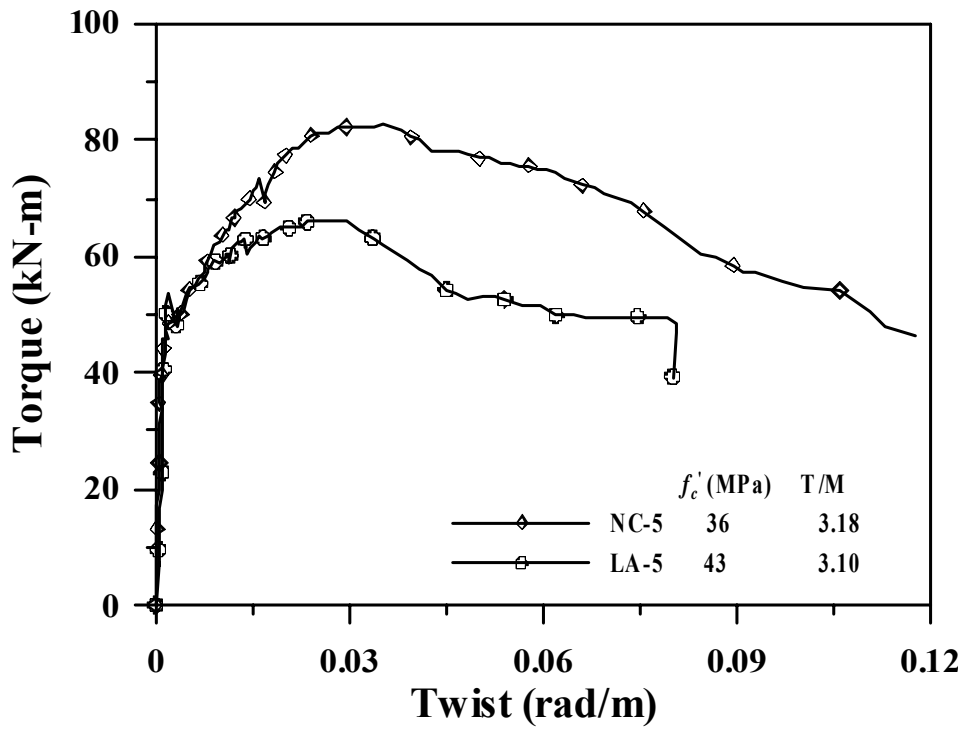


圖 4-3.14 試體 NC-5 及 LA-5 之扭矩與扭轉角關係圖

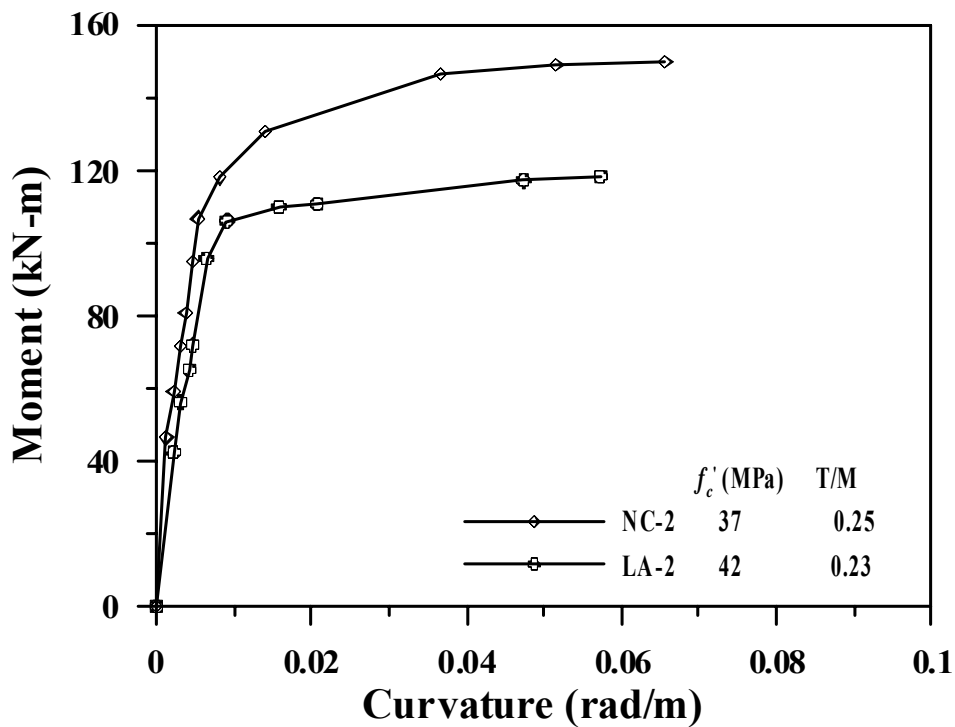


圖 4-3.15 試體 NC-2 及 LA-2 之彎矩與曲率關係圖

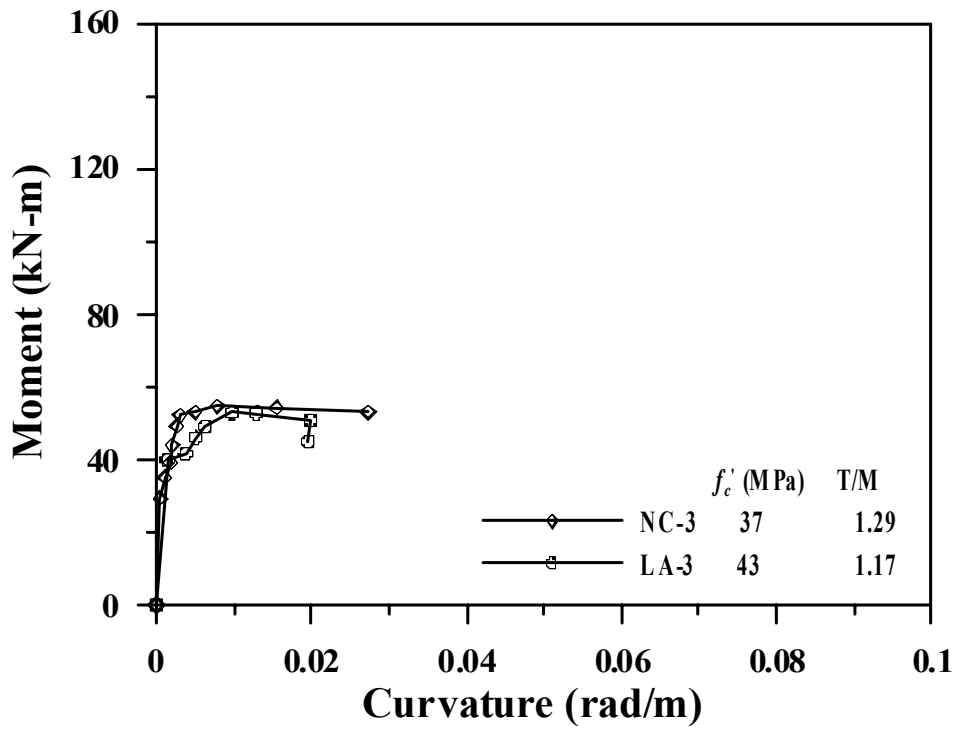


圖 4-3.16 試體 NC-3 及 LA-3 之彎矩與曲率關係圖

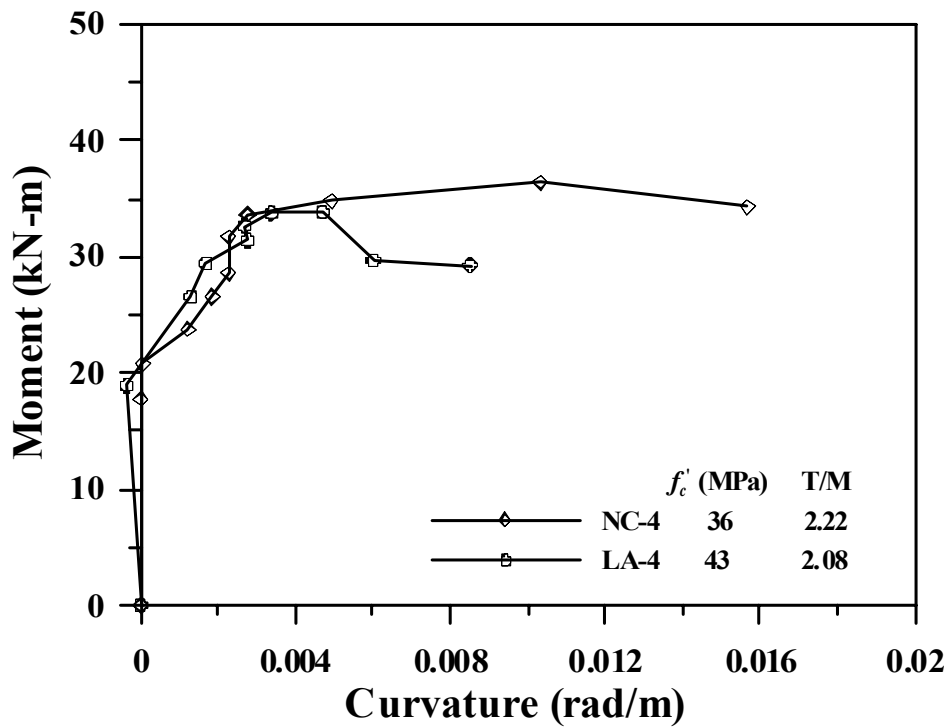


圖 4-3.17 試體 NC-4 及 LA-4 之彎矩與曲率關係圖

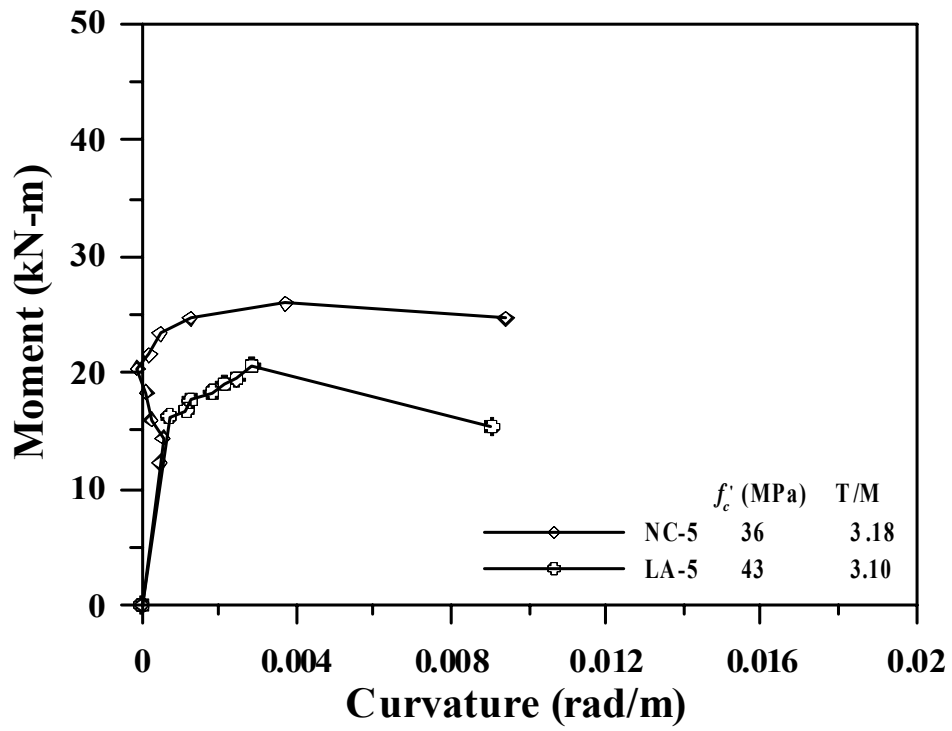


圖 4-3.18 試體 NC-5 及 LA-5 之彎矩與曲率關係圖





照片 4-3.1 加載設備 (純彎矩)



照片 4-3.2 加載設備 (純扭矩)



照片 4-3.3 加載設備 (彎矩與扭矩組合載重)

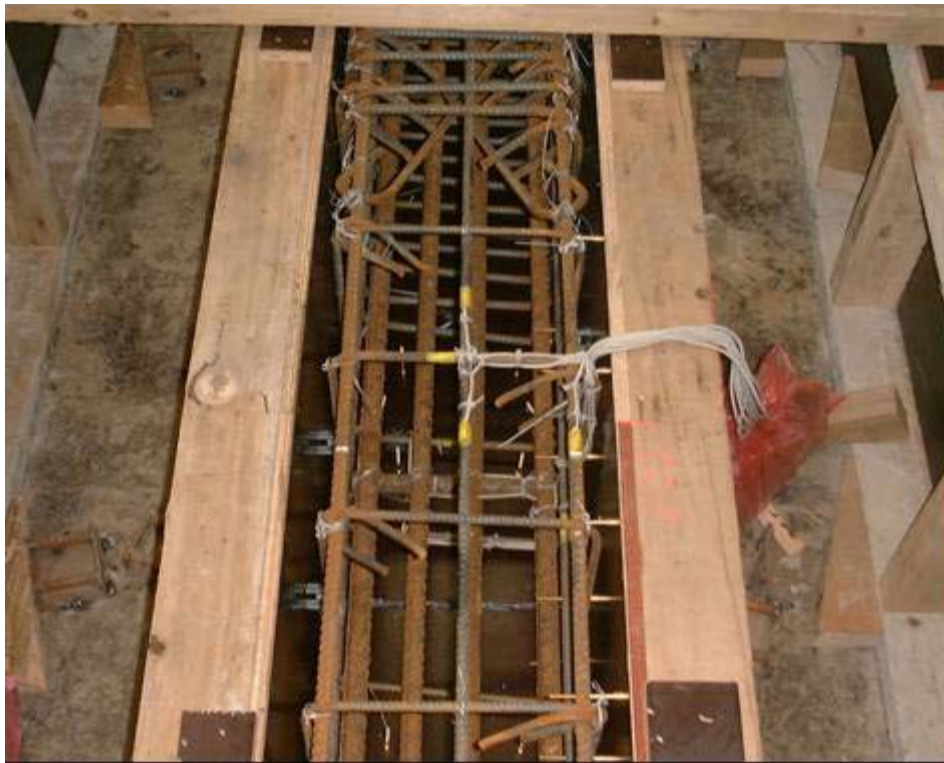


照片 4-3.4 模版組立完成及澆置混凝土作業平台配置情形

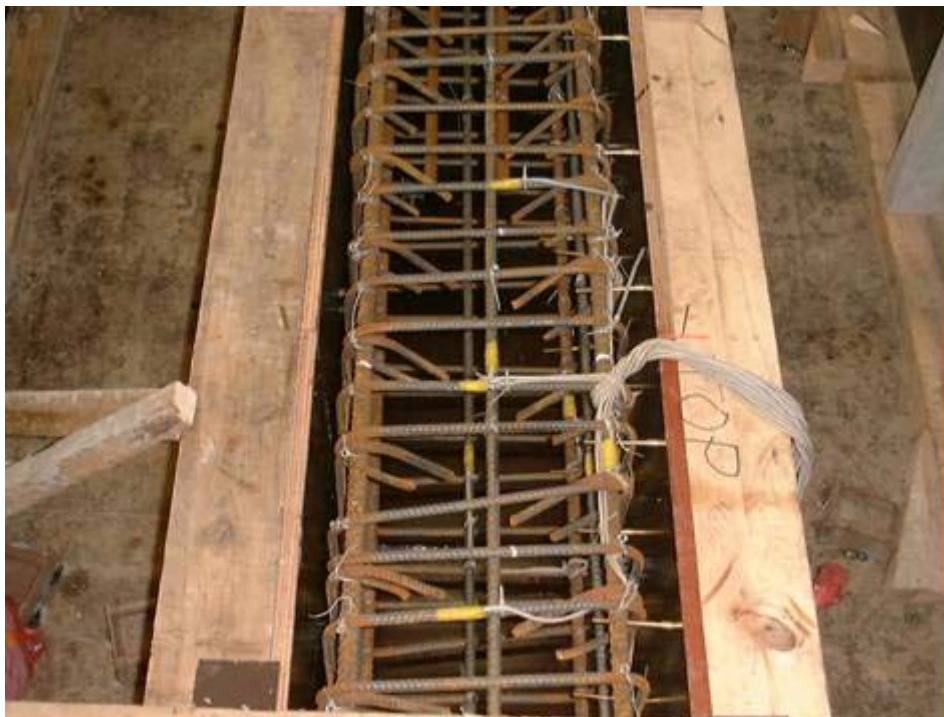


照片 4-3.5 LA 系列試體測試區之鋼筋及應變計配置圖





照片 4-3.6 LB1 試體測試區之鋼筋及應變計配置圖



照片 4-3.7 LB6 試體測試區之鋼筋及應變計配置圖



照片 4-3.8 輕質骨材混凝土坍度試驗



照片 4-3.9 輕質骨材混凝土坍度試驗



照片 4-3.10 澆置梁試體混凝土情形



照片 4-3.11 澆置梁試體混凝土情形





照片 4-3.12 澆置梁試體混凝土情形



照片 4-3.13 澆置梁試體混凝土情形



照片 4-3.14 澆置梁試體混凝土情形



照片 4-3.15 以振動棒擣實梁試體內部混凝土情形





照片 4-3.16 混凝土硬固後梁試體外觀圖



照片 4-3.17 混凝土硬固後梁試體外觀圖

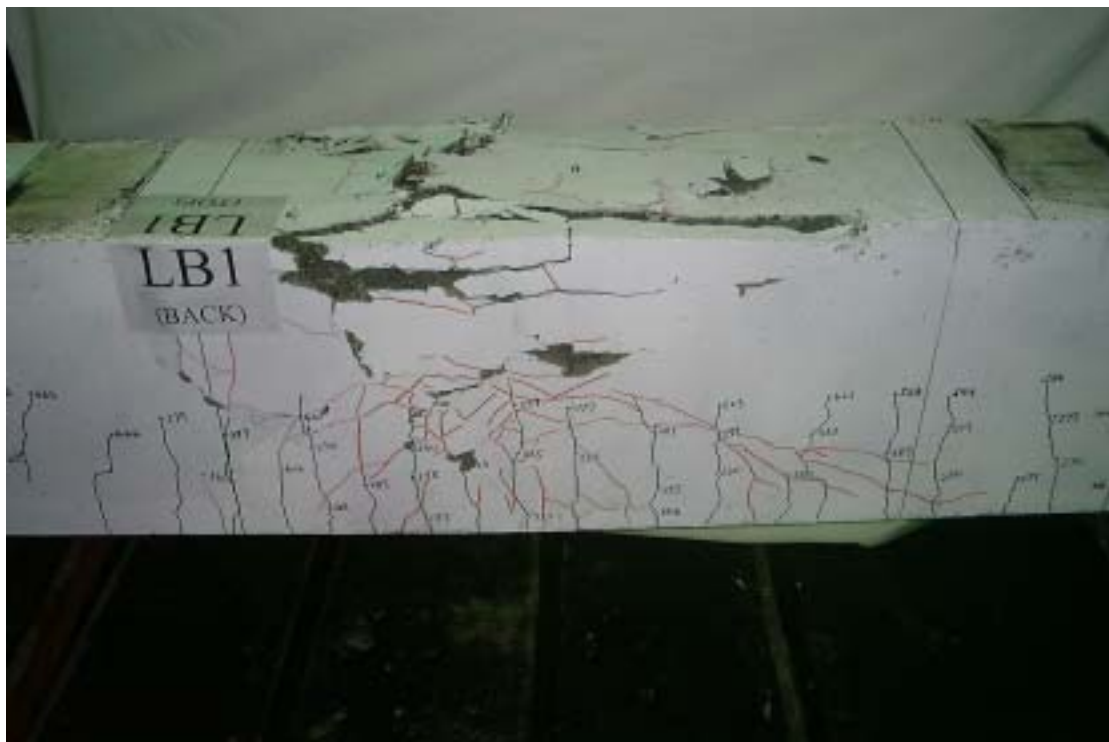


照片 4-3.18 混凝土硬固後梁試體表面情形



照片 4-3.19 試體 LA-1 到達破壞階段之情形

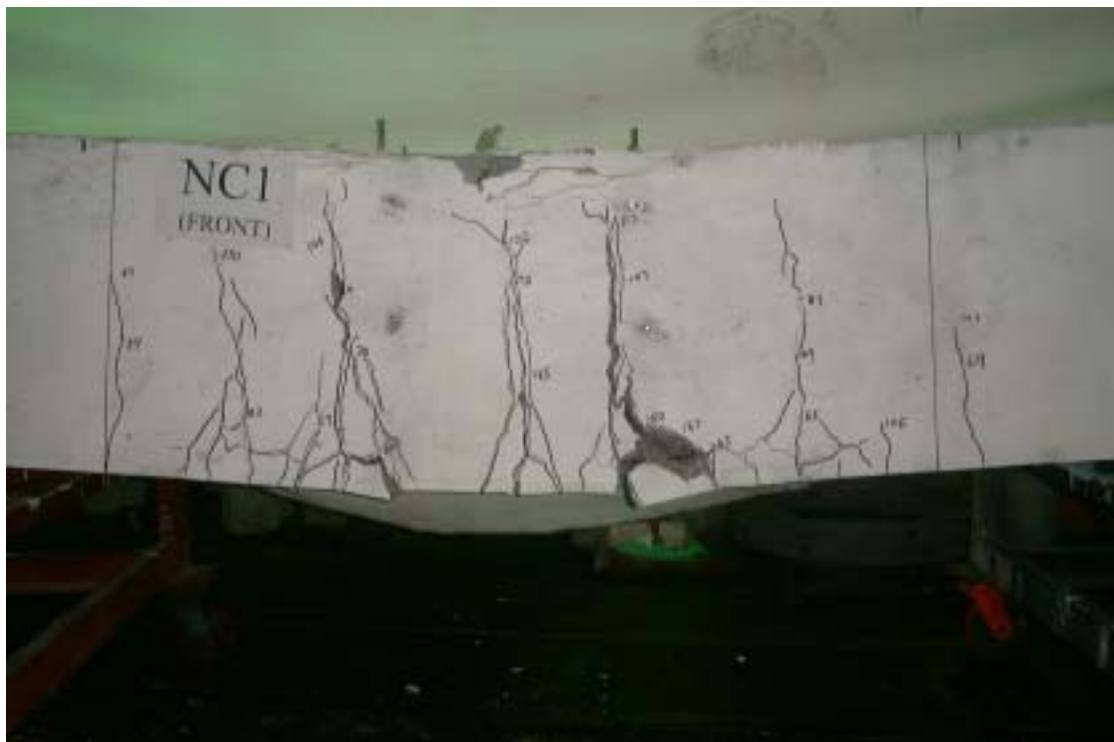




照片 4-3.20(a) 試體 LB-1 到達破壞階段之情形

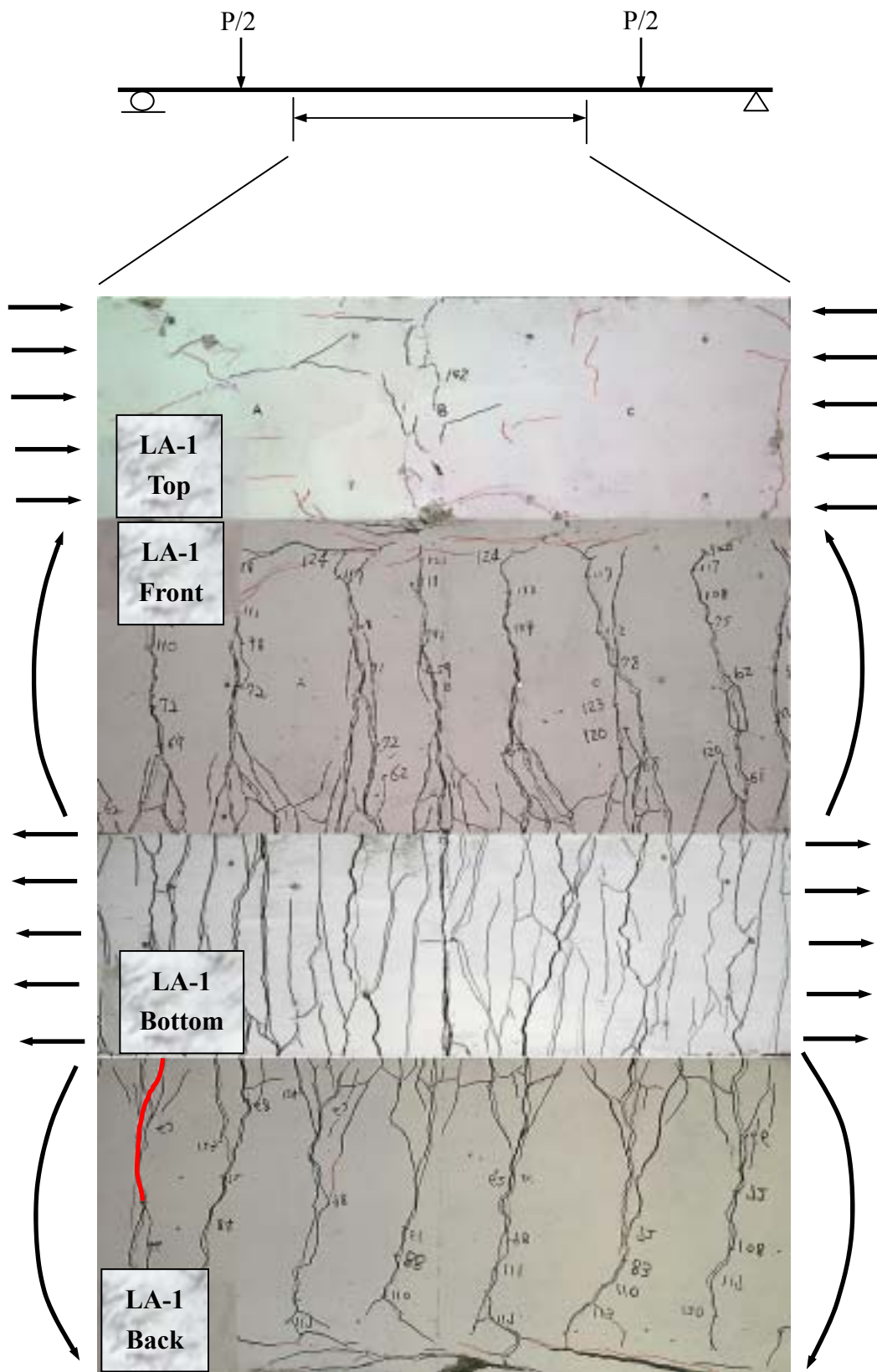


照片 4-3.21 試體 NC-1 到達破壞階段之情形

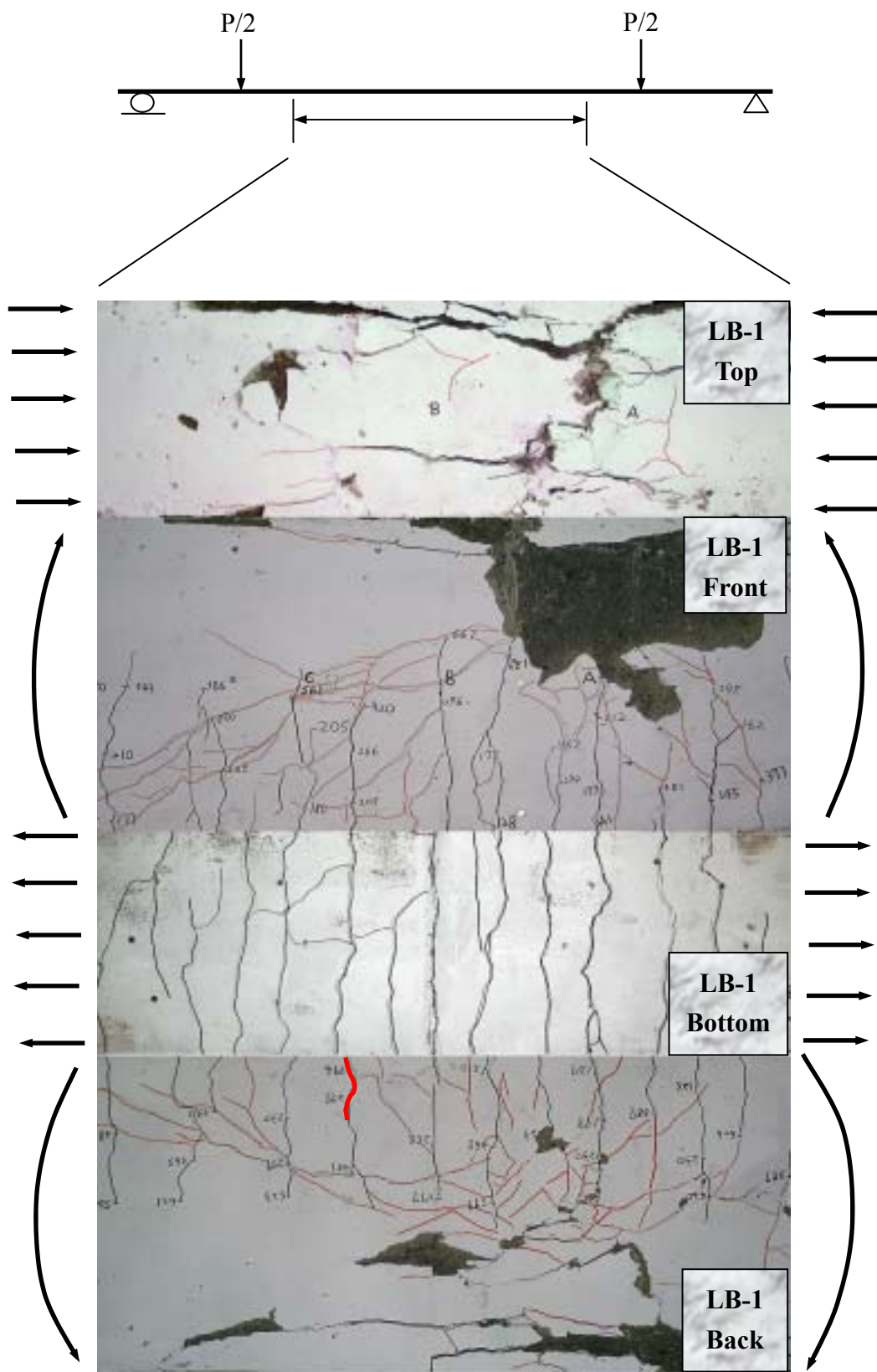


照片 4-3.21(a) 試體 NC-1 到達破壞階段之情形

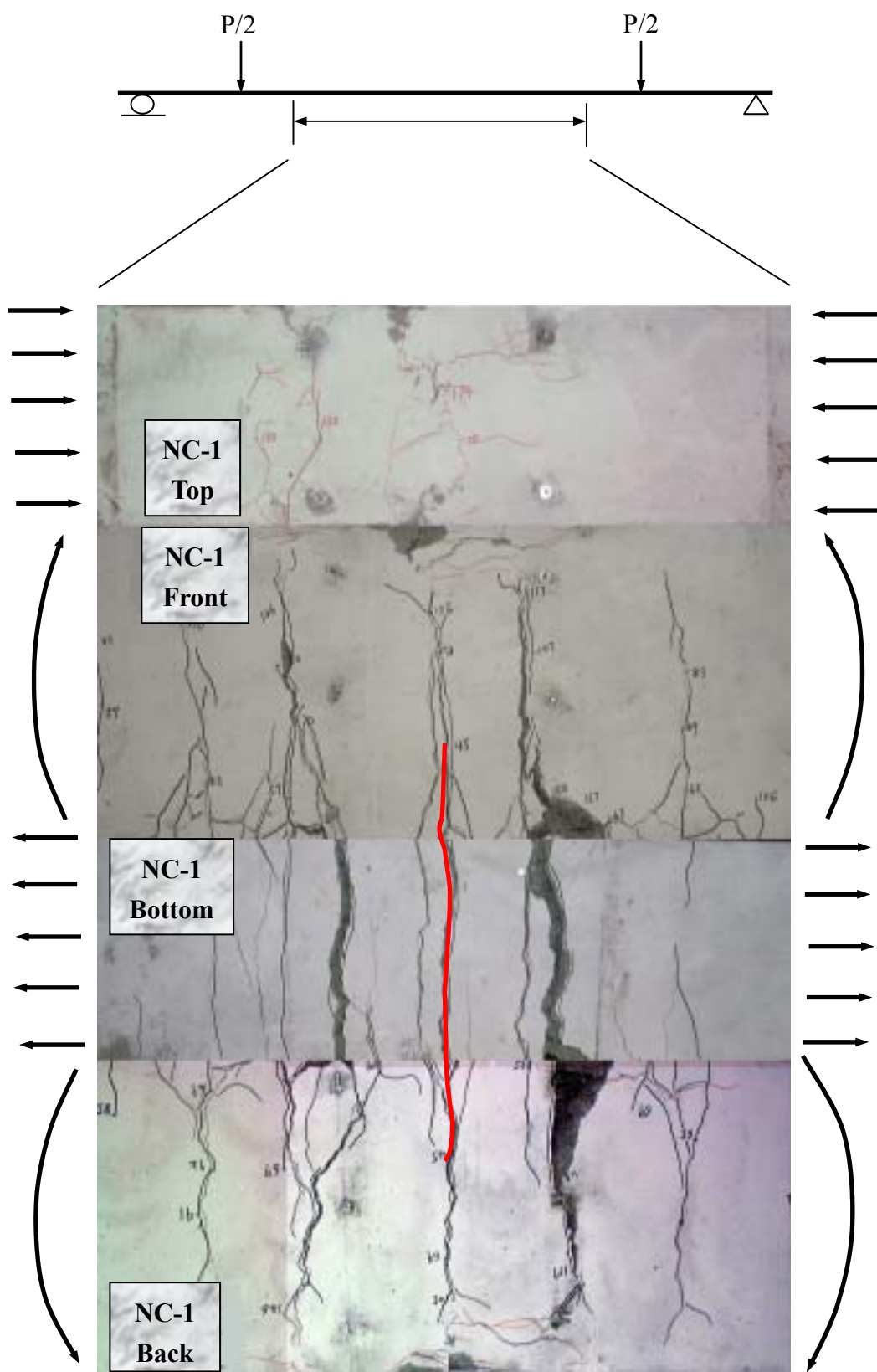




照片 4-3.22 試體 LA-1 在破壞時四個面之開裂狀態

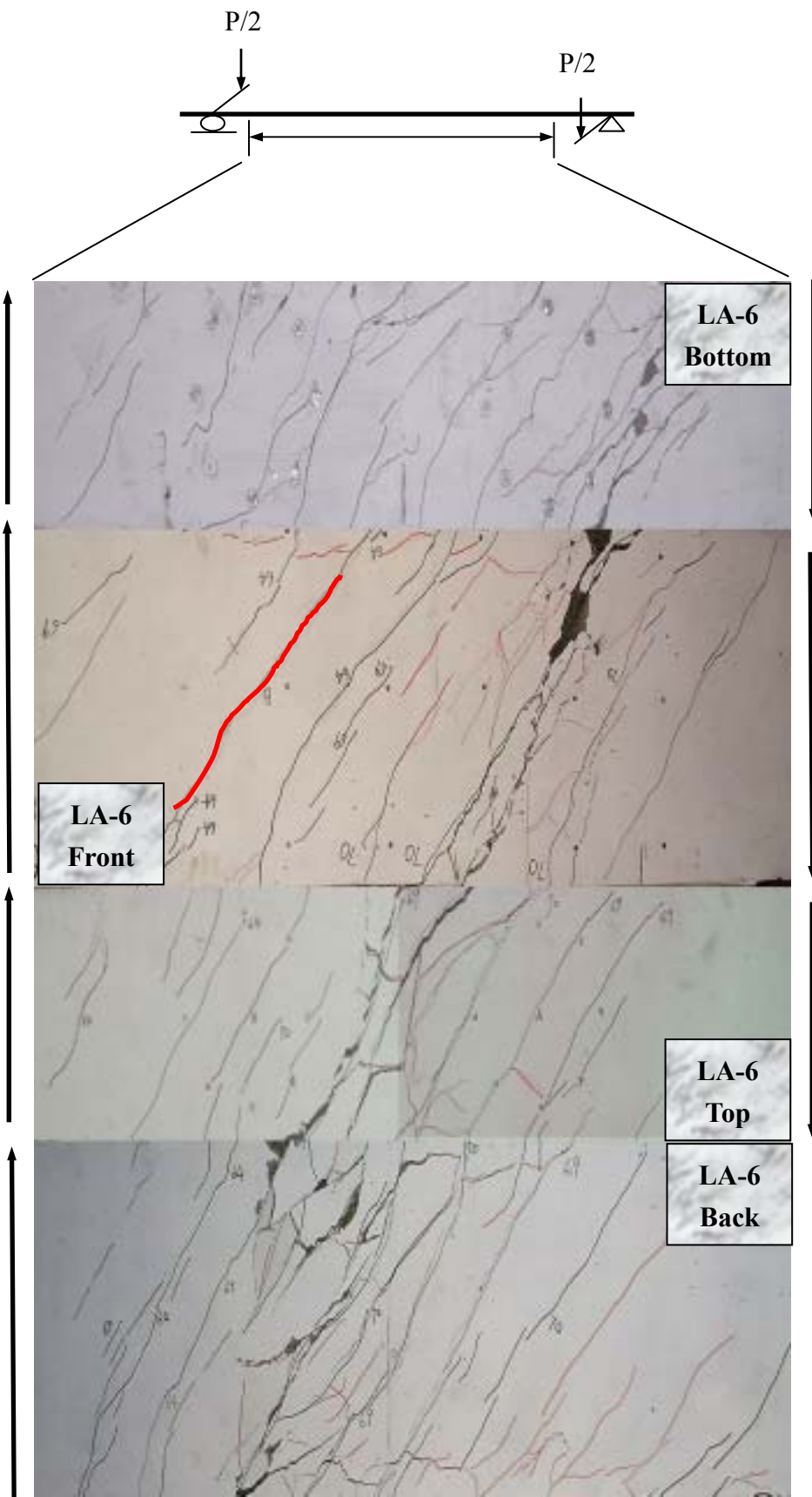


照片 4-3.23 試體 LB-1 在破壞時四個面之開裂狀態

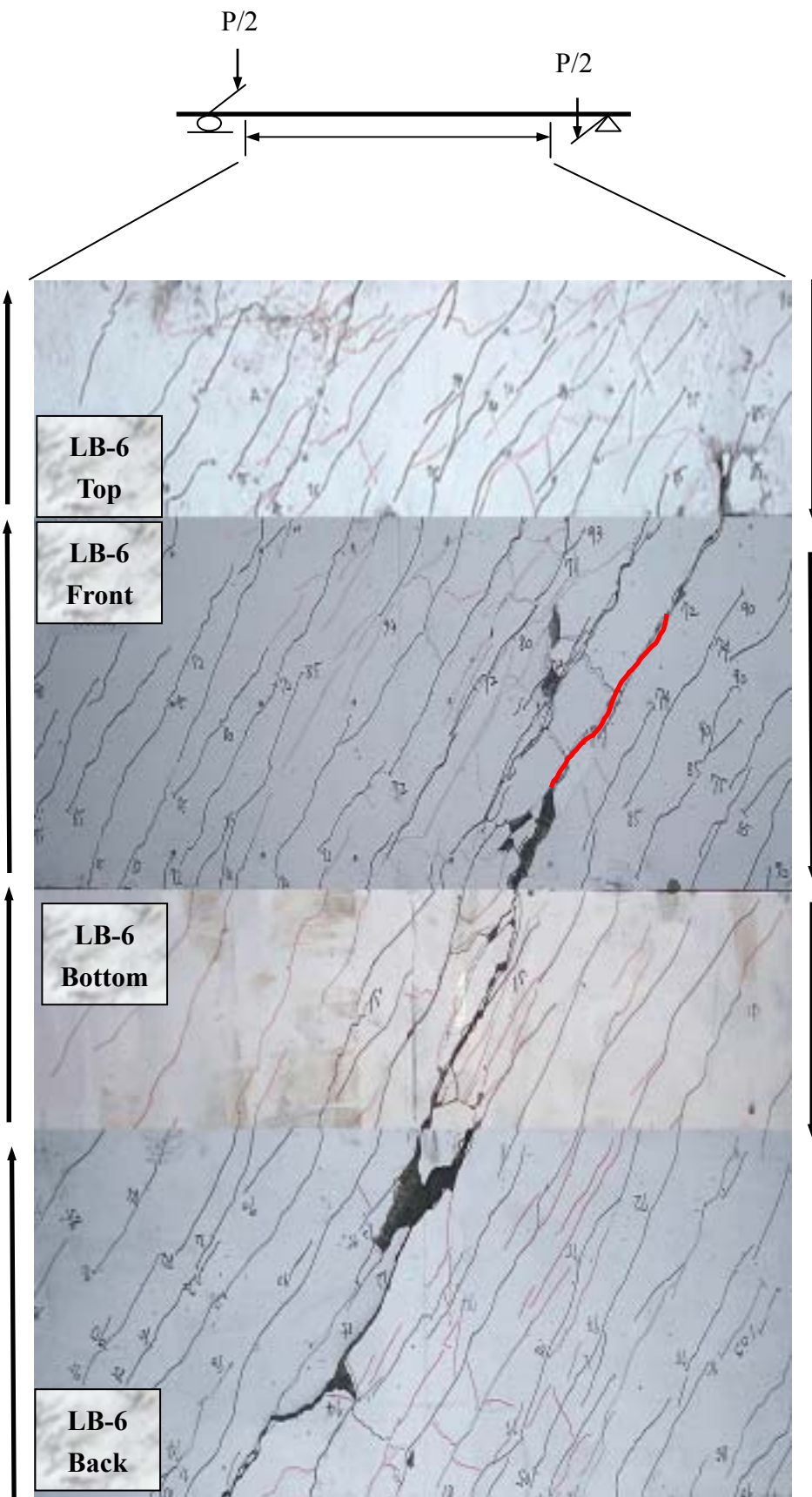


照片 4-3.24 試體 NC-1 在破壞時四個面之開裂狀態

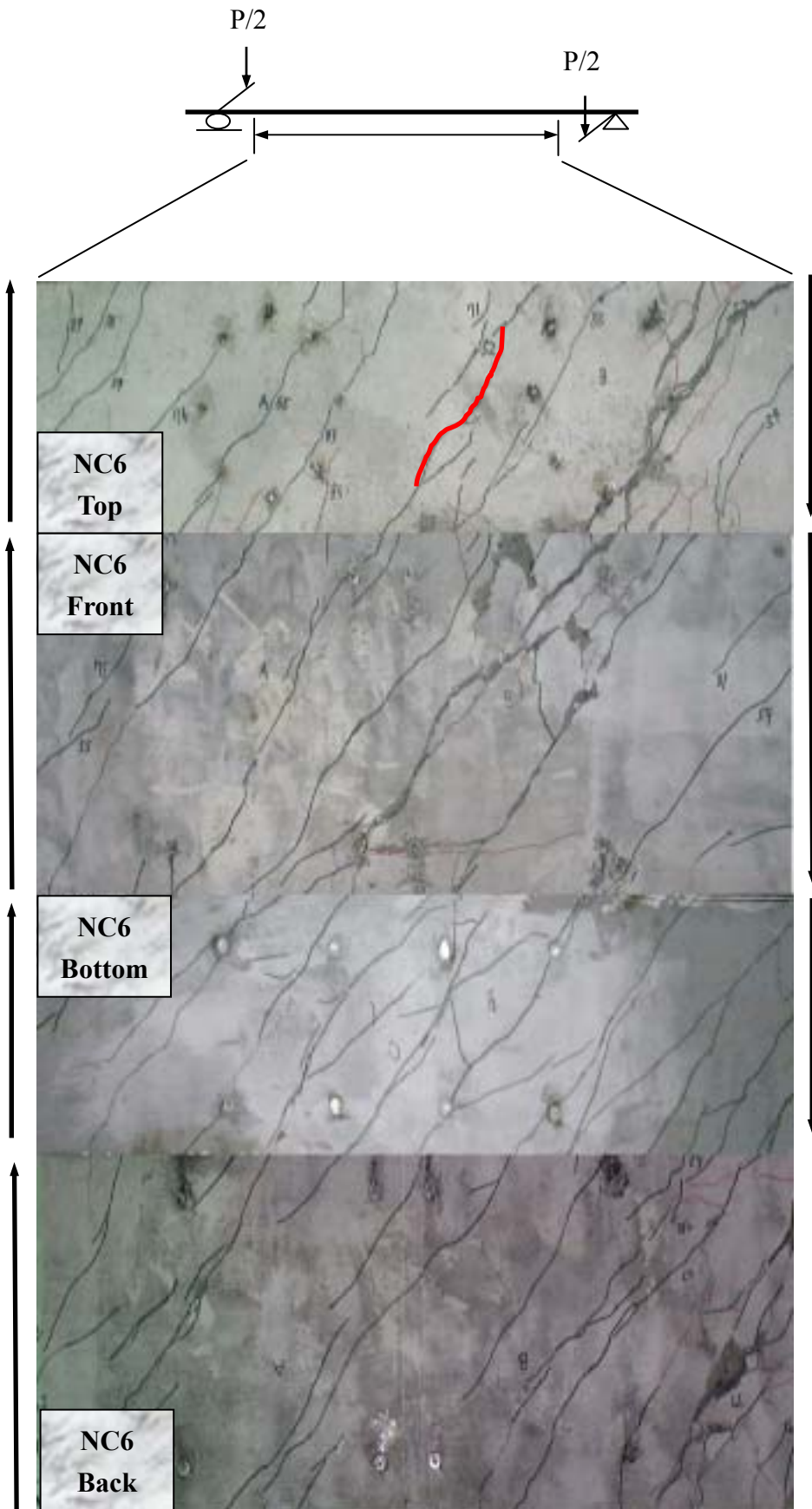




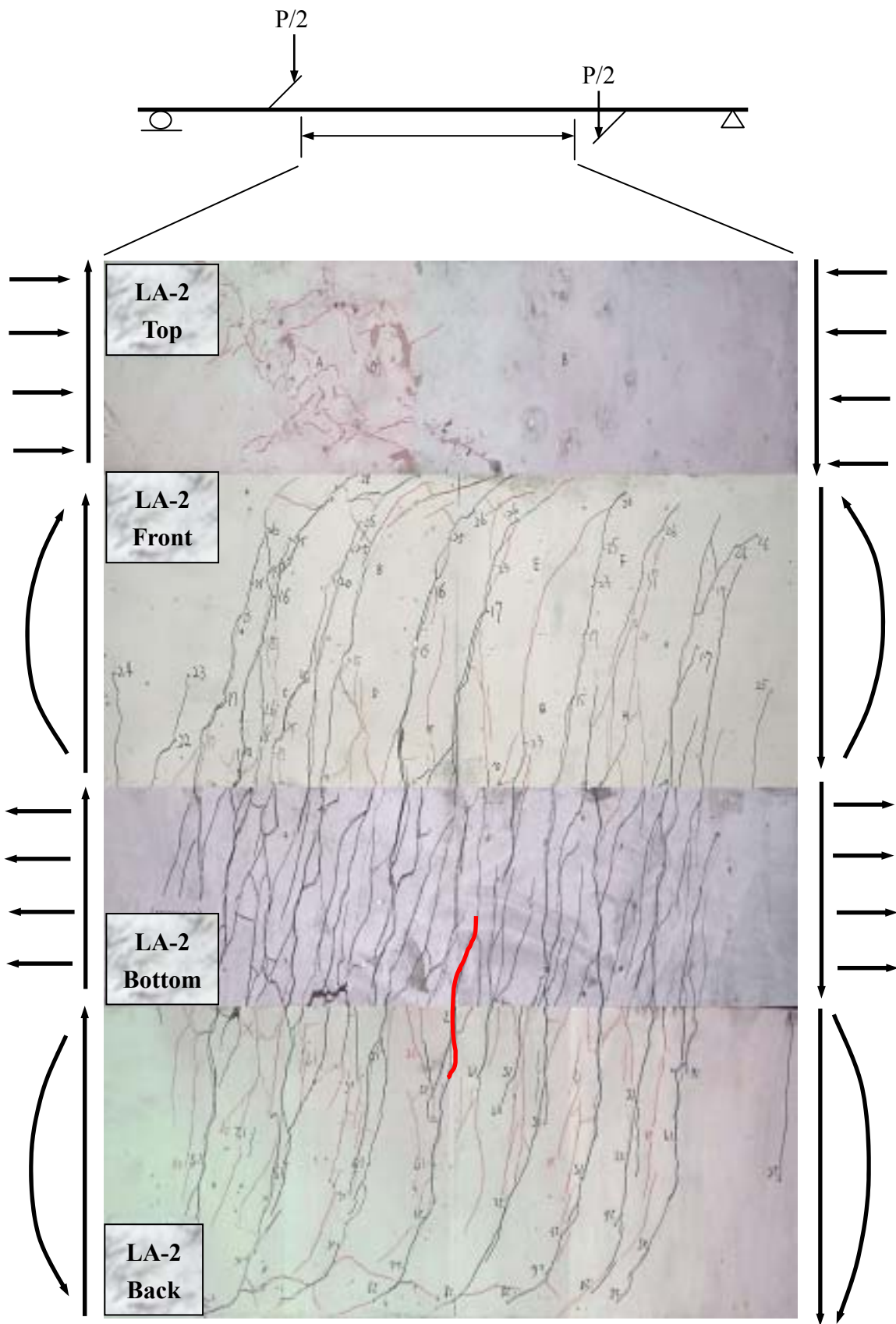
照片 4-3.25 試體 LA-6 在破壞時四個面之開裂狀態



照片 4-3.26 試體 LB-6 在破壞時四個面之開裂狀態

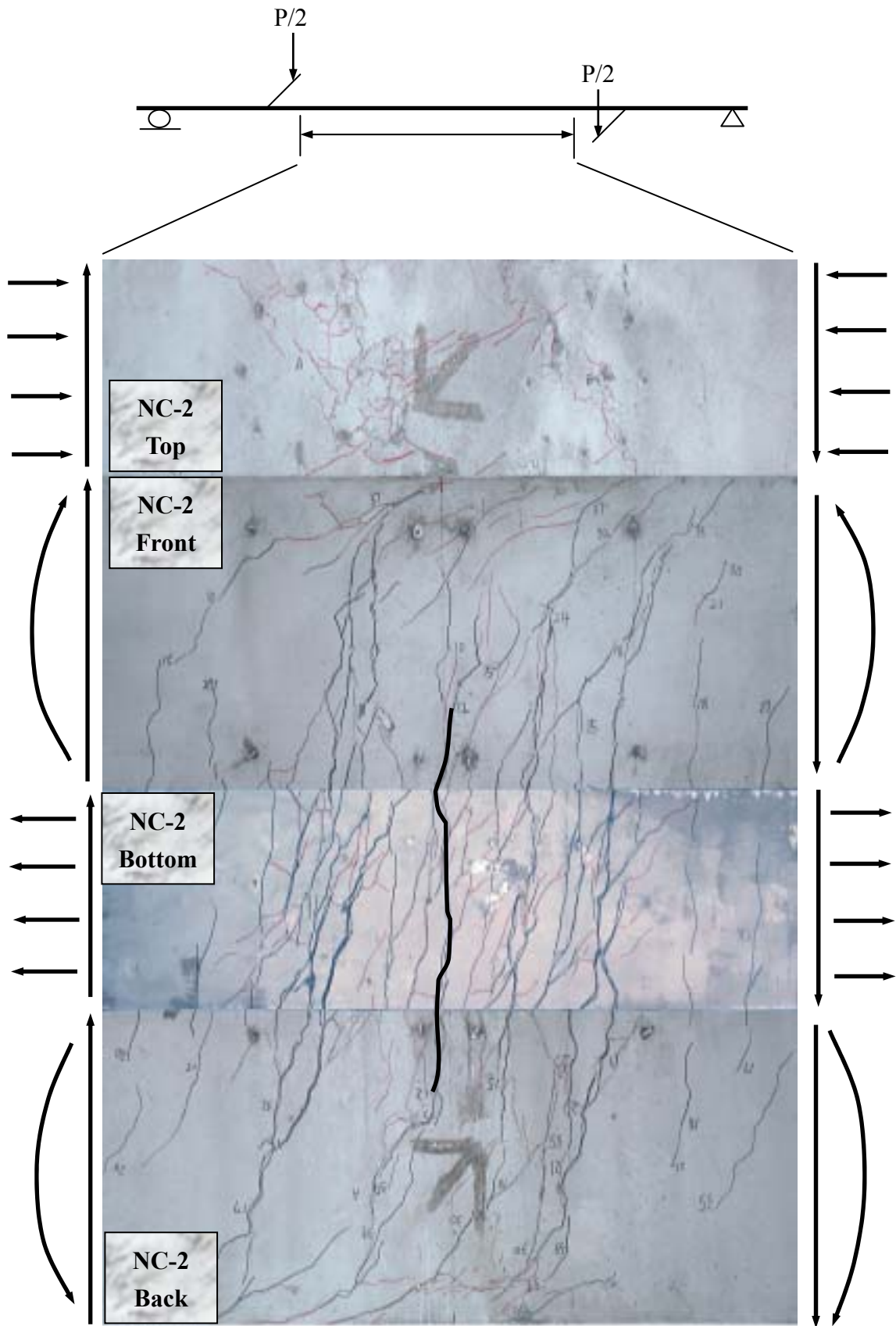


照片 4-3.27 試體 NC-6 在破壞時四個面之開裂狀態

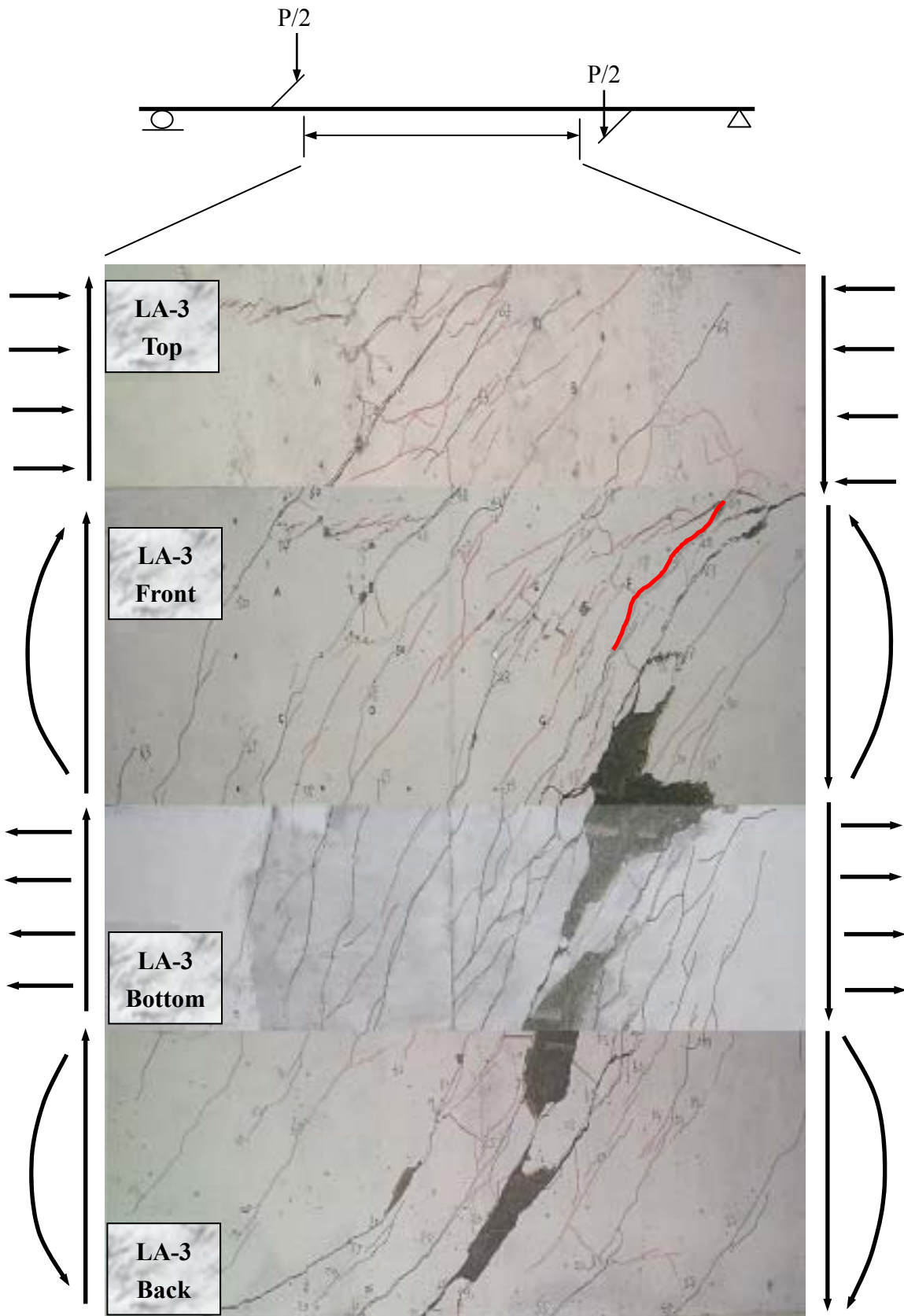


照片 4-3.28 試體 LA-2 破壞時四個面之開裂狀態

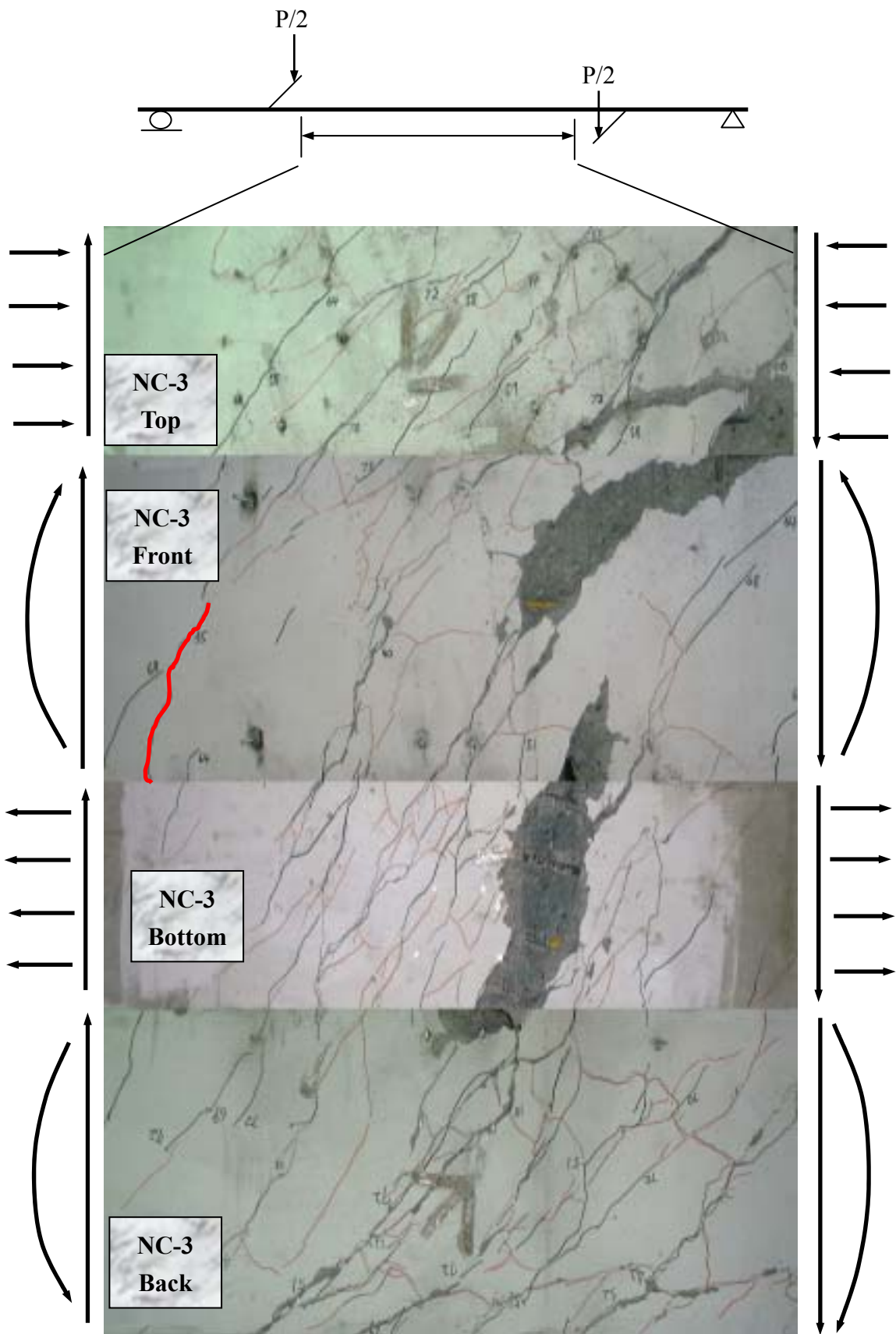




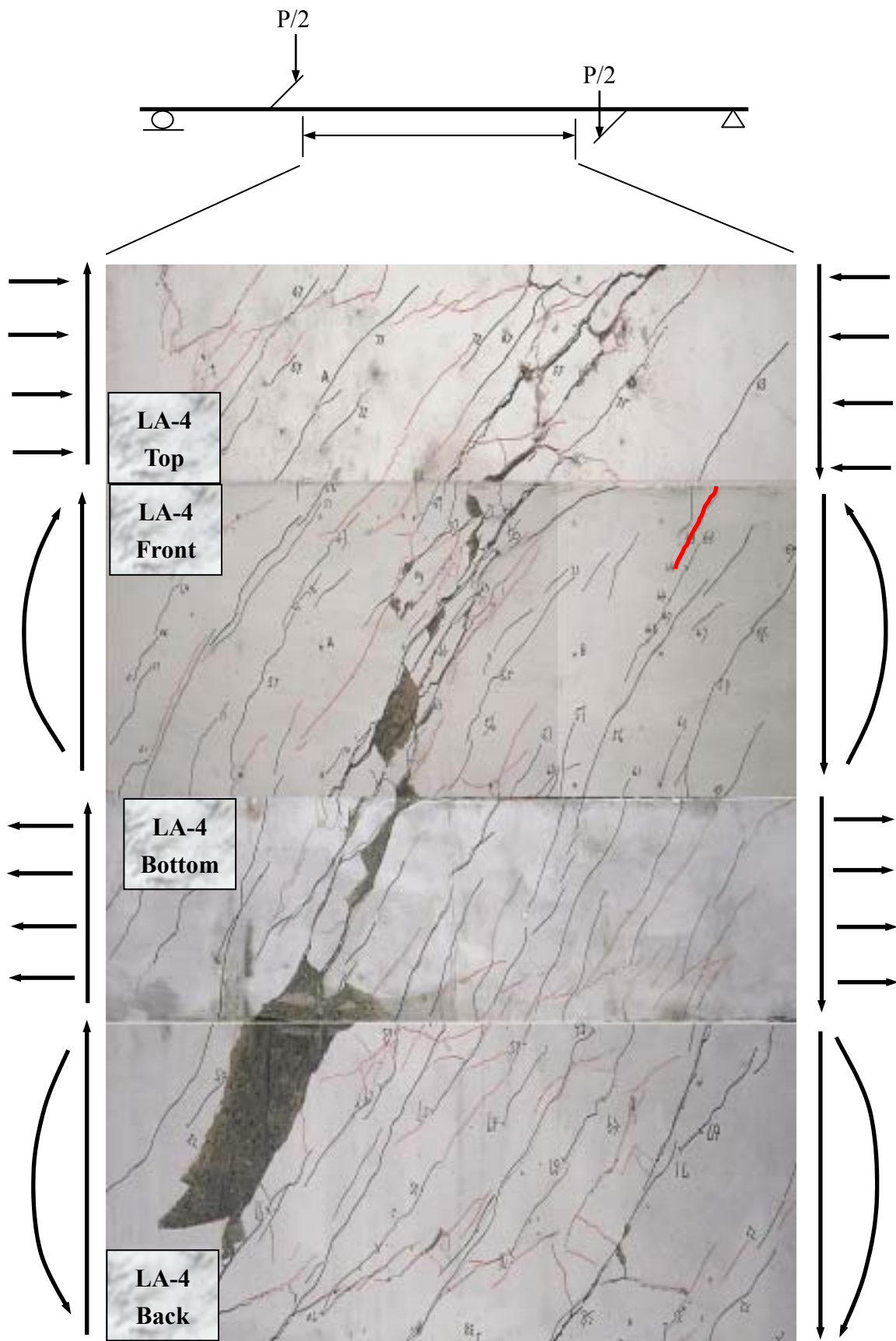
照片 4-3.29 試體 NC-2 在破壞時四個面之開裂狀態



照片 4-3.30 試體 LA-3 在破壞時四個面之開裂狀態

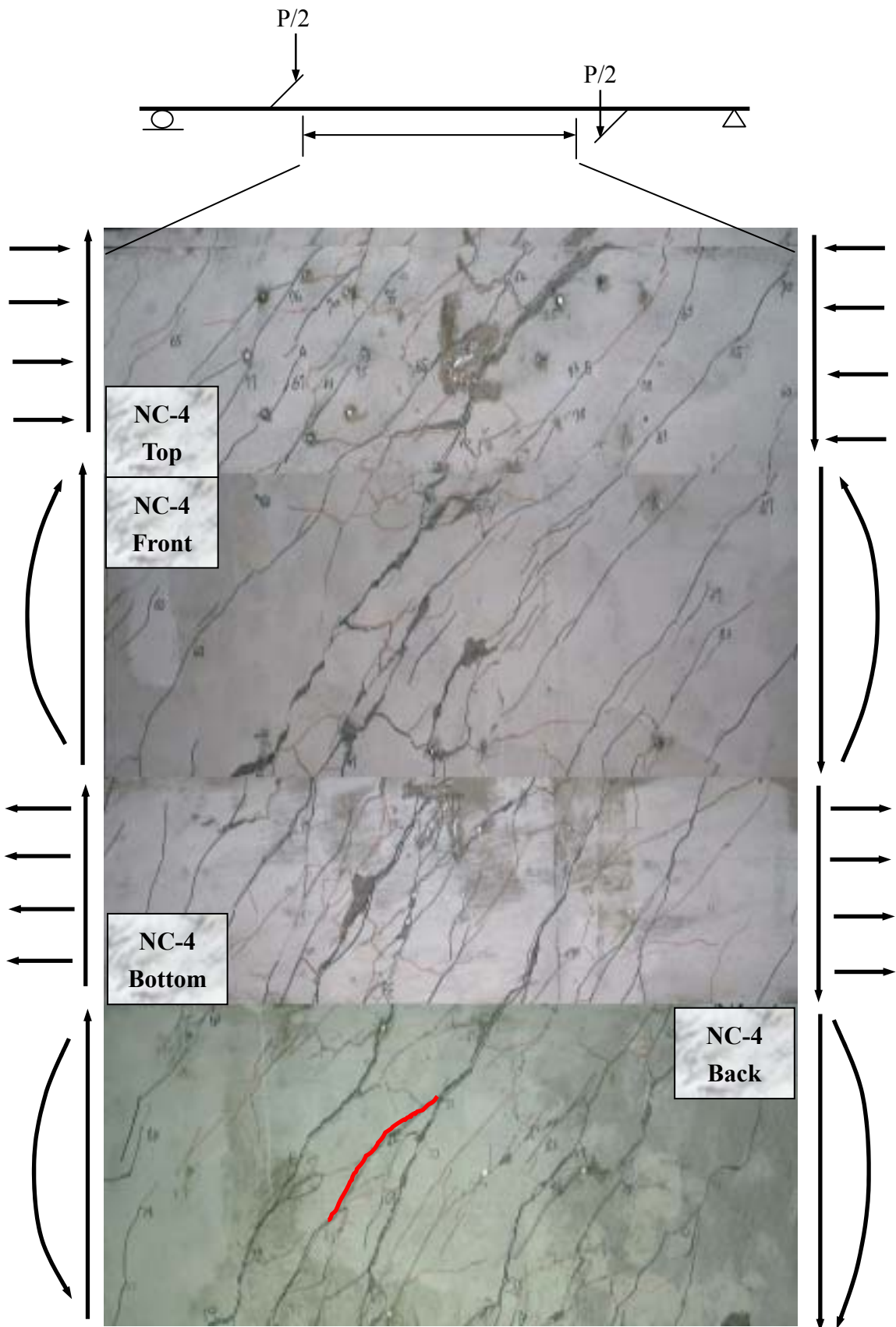


照片 4-3.31 試體 NC-3 在破壞時四個面之開裂狀態

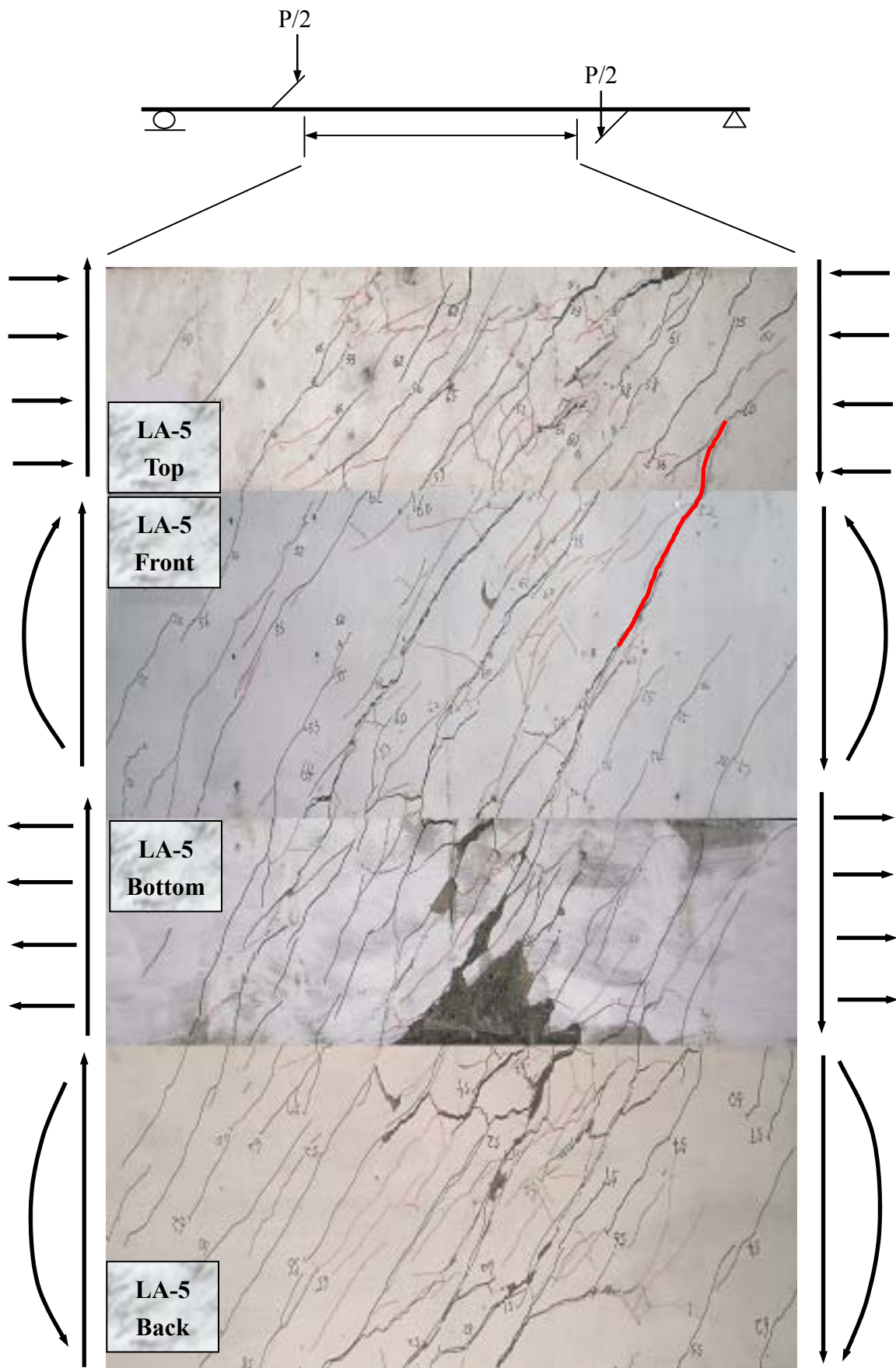


照片 4-3.32 試體 LA-4 在破壞時四個面之開裂狀態

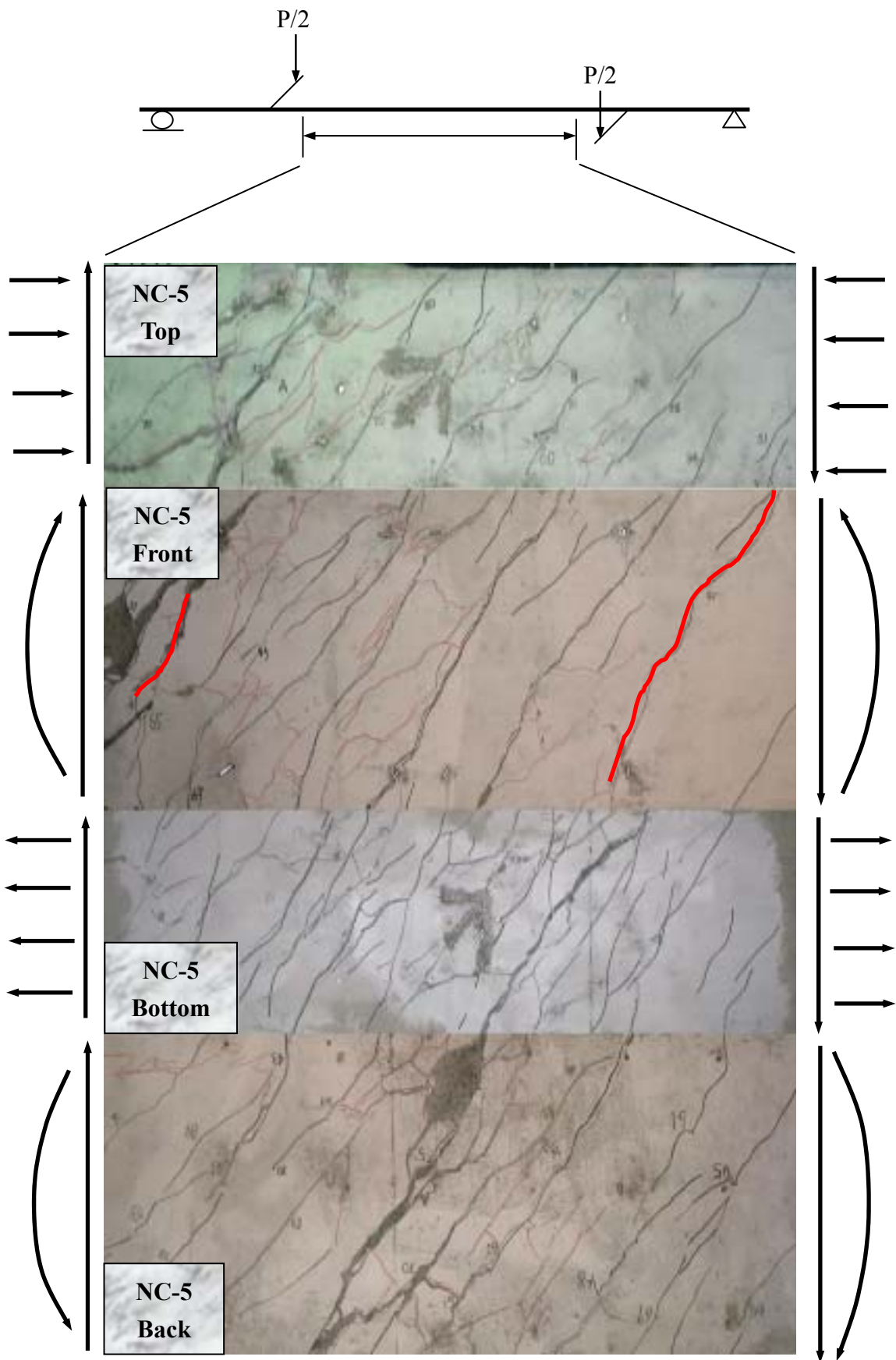




照片 4-3.33 試體 NC-4 在破壞時四個面之開裂狀態



照片 4-3.34 試體 LA-5 在破壞時四個面之開裂狀態



照片 4-3.35 試體 NC-5 在破壞時四個面之開裂狀態

## 第四節 輕質骨材混凝土預鑄版構件之性質研究

### 4.1 前言

在一般的鋼筋混凝土建築結構中，版自重於整個結構中所佔比例為最大，因此使用輕質骨材混凝土預鑄版可使得結構物的重量降低，有效降低地震水平力，而有助於減少梁與柱的斷面，減少混凝土用量及節省減少建造成本。輕質骨材採製於水庫淤泥，不僅得以消化水庫淤泥，增加水庫蓄水容量，解決環保問題，還可充實天然砂石資源之不足。因此對於輕質骨材混凝土版力學性質之研究，將成為一個經濟性及生態性的重要課題。本研究目的就是要探討輕質骨材混凝土版的力學行為，確認輕質骨材混凝土作為版構件的適用性。

### 4.2 研究目的

本研究之主要目的主要有二，其一為瞭解輕質骨材混凝土版之構件行為，以確認輕質骨材混凝土作為版構件之適用性，此部分之目的以三點抗彎試驗進行探討；其二為針對輕量 C 型鋼的圍束作用及因鋼筋相互焊接而應力相互傳遞之輕質骨材混凝土版構件的構件行為，以探討其相互之間之力學行為。

### 4.3 試體規劃

版構件全部皆以輕質骨材混凝土灌製，輕質骨材混凝土混凝土之配比如表 4-4.1 所示。基本上都以 5000psi 為目標強度。

版構件之尺寸為 100×300 公分，用以試驗構件行為，試體之厚度為 15 公分；斷面配置方式分為六種，如圖 4-4.1 至 4-4.6 及照片 4-4.1 所示。

本研究共有輕質骨材混凝土版構件 12 片，每一斷面配置有 2 片，如表 4-4.2 所示。為了探討構件內部之應力應變行為，於版構件中之鋼筋及輕量 C 型鋼裝置應變計，應變計之配置如圖 4-4.7 及照片 4-4.1 所示。

#### 4.4 試驗項目與方法

本研究之試驗分為材料試驗與構件試驗兩部分，材料試驗有二項，包含圓柱抗壓試驗及三點抗彎試驗。版構件之主要試驗內容為版試體之三點抗彎試驗，測定其極限載重並量測其相對之變位，作為日後產品安全性及相關性能之參考依據。所有試驗項目之試驗方式及研究內容敘述如下：

##### 一、材料試驗部分

###### 1. 圓柱抗壓試驗

採用 ASTM C39-96 的方法進行輕質骨材混凝土之抗壓試驗，其計算式如下：

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2}$$

其中  $\sigma$  為材料之抗壓強度

P 為試驗載重

r 為試體半徑

抗壓試體試體尺寸為  $10\phi \times 20\text{cm}$ ，5 組共 15 個，如照片 4-4.3 所示，在與版構件相同養護環境下，測定其 28 天後（預鑄版試驗當日）之抗壓強度以為參考。

###### 2. 三點抗彎試驗

採用 ASTM C293-94 的方法進行輕質骨材混凝土之抗彎試驗，其計算式如下：

$$\sigma = \frac{PS}{bD^2}$$

其中  $\sigma$  為材料之抗彎強度

P 為試驗載重

S 為試驗跨距

b 為試體寬度

D 為試體深度

抗彎試體試體尺寸為  $15 \times 15 \times 53$  cm, 3 組共 3 個, 如照片 4-4.3 所示, 在與版構件相同養護環境下, 將試體作簡支承, 而在其三分點上加載重, 測定其 28 天後 (預鑄版試驗當日) 之抗彎強度以為參考。

## 二、版構件試體試驗部分

### 1. 版構件抗彎試驗

版構件以三點抗彎試驗模擬版之受垂直載重時的結構行為, 版構件之抗彎試驗如圖 4-4.8 所示, 兩個集中荷重作用於約版構件之三分之一位置, 版構件之兩端以簡支撐方式處理, 版構件中央下緣將裝置位移計以記錄變位資料, 位移計配置圖如圖 4-4.9 所示, 試驗將以位移控制方式進行, 試驗將進行至版構件完全壓壞為止。本項試驗將探討下列幾點議題:

#### (1) 版構件之力學行為

將輕質骨材混凝土版以位移控制法施加線形荷重至完全破壞為止, 根據位移計及應變計之讀數, 探討輕質骨材混凝土版 28 天後之載重性能和力學行為, 藉以探討輕質骨材混凝土作為版構件材料之可行性。

#### (2) 版構件之使用性

根據位移計之資料, 繪製其載重與位移關係, 瞭解輕質混凝土版構件在撓度控制方面的使用性, 藉以探討輕質

骨材混凝土作為版構件材料之可行性。

### (3) 版構件內材料之應力應變關係

根據應變計之資料，瞭解版構件內之鋼筋、輕量 C 型鋼及混凝土之應力應變關係，藉以探討其內部應力之分佈狀態、輕量 C 型鋼圍束行為及各材料對版構件載重性能之貢獻。

### (4) 版構件之破壞模式

由於試體都將被壓至破壞為止，因此將探討輕質骨材混凝土版之破壞模式。

## 4.5 試驗結果及討論

### 一、材料試驗部分

#### 1. 圓柱抗壓試驗

採用 ASTM C39-96 的方法進行輕質骨材混凝土之抗壓試驗，其平均抗壓強度為  $375.20 \text{ kg/cm}^2$  (設計強度  $350 \text{ kg/cm}^2$ )，各試體之抗壓強度詳表 4-4.3，其試驗情形如照片 4-4.9~4-4.10。

#### 2. 三點抗彎試驗

採用 ASTM C293-94 的方法進行輕質骨材混凝土之抗彎試驗，其平均抗彎強度為  $17.22 \text{ kg/cm}^2$ ，與「混凝土工程設計規範與解說」規定的  $2\sqrt{f'_c} = 2\sqrt{375.2} = 38.74 \text{ kg/cm}^2$  有很大的差異，此一輕質混凝土配比之抗彎強度遠低於常重混凝土，各試體之抗彎強度詳表 4-4.4，其試驗情形如照片 4-4.11~4-4.12。

### 二、版構件試體試驗部分

## 1. 版構件之力學行為

版構件以「混凝土工程設計規範與解說」之規定去計算理論極限強度如下：

$$f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_y = 2,800 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_s = A_s' = 7 \times 0.713 = 4.99 \text{ cm}^2$$

$$C150 \times 65 \times 20 \times 2.3 \text{ mm} \quad \text{降伏強度 } f_{yc} = 2,400 \text{ kg/cm}^2$$

### (1) 無 C 型輕型鋼之單向版

假設中性軸深度為  $x$ ，並假設拉力鋼筋降伏，壓力筋未降伏：

$$\text{則 } C_s = A_s' f_s' = A_s' E_s \varepsilon_s' = 4.99 \times 6,120 \times \frac{x-2.5}{x} = 30,538.8 \frac{x-2.5}{x}$$

$$C_c = 0.85 \beta_1 f'_c b x = 0.85 \times 0.80 \times 350 \times 100 \times x = 23,800x$$

$$T = A_s f_y = 4.99 \times 2,800 = 13,972$$

$$\text{令 } T = C_c + C_s \quad \text{解得 } x = 1.48 \text{ cm}$$

check 拉力鋼筋降伏否：

$$\varepsilon_s = 0.003 \times \frac{d-x}{x} = 0.003 \times \frac{12.5-1.48}{1.48} = 0.0223 > \varepsilon_y = 0.00137 \text{ (OK)}$$

check 壓力鋼筋降伏否：

$$\varepsilon_s = 0.003 \times \frac{x-2.5}{x} = 0.003 \times \frac{1.48-2.5}{1.48} = -0.00207 < \varepsilon_y = -0.00137$$

(NG)



重新假設中性軸深度為  $x$ ，並假設拉力鋼筋降伏，壓力筋降伏且為拉力：

$$\text{則 } C_s = A_s' f_y = 4.99 \times (-2,800) = -13,972$$

$$C_c = 0.85 \beta_1 f_c' b x = 0.85 \times 0.80 \times 350 \times 100 \times x = 23,800x$$

$$T = A_s f_y = 4.99 \times 2,800 = 13,972$$

$$\text{令 } T = C_c + C_s \quad \text{解得 } x = 1.17 \text{ cm}$$

check 拉力鋼筋降伏否：

$$\varepsilon_s = 0.003 \times \frac{d-x}{x} = 0.003 \times \frac{12.5-1.17}{1.17} = 0.0291 > \varepsilon_y = 0.00137 \quad (\text{OK})$$

check 壓力鋼筋降伏否：

$$\varepsilon_s = 0.003 \times \frac{x-2.5}{x} = 0.003 \times \frac{1.17-2.5}{1.17} = -0.00341 < \varepsilon_y = -0.00137$$

(OK)

回代得  $C_c = 27,846 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} \text{故得 } Mn &= C_c \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + C_s (d - d') \\ &= 27,846 \times \left( 12.5 - \frac{0.80 \times 1.17}{2} \right) + (-13,972) \times (12.5 - 2.5) \\ &= 1.95 \times 10^5 \text{ t-cm} \\ &= 1.95 \text{ t-m} \end{aligned}$$

## (2) 具 C 型輕型鋼之單向版

假設中性軸深度為  $x$ ，且  $x$  小於 2cm，並假設拉力鋼筋降伏，壓力筋未降伏：

$$\text{則 } C_s = A_s' f_s' = A_s' E_s \varepsilon_s' = 4.99 \times 6,120 \times \frac{x-2.5}{x} = 30,538.8 \frac{x-2.5}{x}$$

$$C_{sc1} = 2 \times (2400 \times 6.5 \times 0.23) = 7,176$$

$$C_{sc2} = 2 \times (2400 \times 2 \times 0.608x \times 0.23) = 1,342.46x$$

$$C_{sc3} = 2 \times (2400/2 \times 2 \times 0.392x \times 0.23) = 432.77x$$

$$C_c = 0.85 \beta_1 f_c' b x = 0.85 \times 0.80 \times 350 \times 100 \times x = 23,800x$$

$$T = A_s f_y = 4.99 \times 2,800 = 13,972$$

$$T_1 = 2 \times (2400 \times 6.5 \times 0.23) = 7,176$$

$$T_2 = 2 \times (2400 \times 2 \times 0.23) = 2,208$$

$$T_3 = 2 \times [2400 \times (15 - 1.392x) \times 0.23] = 16,560 - 1,536.77x$$

$$T_4 = 2 \times (2400/2 \times 0.392x \times 0.23) = 216.38x$$

$$T_5 = 2 \times \left[ 2400 \times \frac{2-x}{0.392x} \times \frac{1}{2} \times (2-x) \times 0.23 \right] = 1,408.16 \times \frac{(2-x)^2}{x}$$

$$\text{令 } T + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = C_c + C_s + C_{sc1} + C_{sc2} + C_{sc3}$$

$$\text{解得 } x = 1.73 \text{ cm}$$

check 拉力鋼筋降伏否：

$$\varepsilon_s = 0.003 \times \frac{d-x}{x} = 0.003 \times \frac{12.5-1.73}{1.73} = 0.0187 > \varepsilon_y = 0.0137 \text{ (OK)}$$

check 壓力鋼筋降伏否：

$$\varepsilon_s = 0.003 \times \frac{x-2.5}{x} = 0.003 \times \frac{1.73-2.5}{1.73} = -0.00134 > \varepsilon_y = -0.00137$$

(OK)

回代得  $C_s = -13,592.41$ 、 $C_{sc2} = 2,322.45$ 、 $C_{sc3} = 748.69$ 、

$$C_c = 41,174、T_3 = 13,901.39、T_4 = 374.34、T_5 = 54.71$$

故得

$$\begin{aligned} Mn &= Cc \left( d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + Cs (d - d') + T1 \times h + T2 \times (2.5 - 1) - T3 \times 3.80 \\ &\quad - T4 \times 10.32 - T5 \times 10.68 + Csc2 \times 11.97 + Cs3 \times 11.22 \\ &= 41,174 \times \left( 12.5 - \frac{0.80 \times 1.73}{2} \right) + (-13,592.41) \times (12.5 - 2.5) \\ &\quad + 7,176 \times 15 + 2,208 \times 1.5 - 13,901.39 \times 3.8 - 374.34 \times 10.32 \\ &\quad - 54.74 \times 10.68 + 2,322.45 \times 11.97 + 748.69 \times 11.22 \\ &= 4.40 \times 10^5 t - cm \\ &= 4.40t - m \end{aligned}$$

版構件以三點抗彎試驗模擬版之受垂直載重時的結構行為，其試驗結果如表 4-4.5；由表 4-4.6 可知其極限強度比理論極限強度都還要大，所以輕質骨材用於版構件之力學行為可謂是合宜的。

## 2. 版構件之使用性

版構件依據「混凝土工程設計規範與解說」之第 2.11.2.6 節規定，對於用於「樓版，不支承或不連繫於因其較大撓度而易遭破壞之非結構體者」於活載重造成之瞬時容許撓度為跨度之三百六十分之一（ $2700/360 = 7.5 \text{ mm}$ ），依據中間撓度為 7.5mm 所對應之使用載重及彎矩如表 4-4.7。

依「混凝土工程設計規範與解說」之第 2.4.2 節規定設計載重  $U = 1.4D + 1.7L$ ，吾等可假設當極限載重與使用載重之比值大於 1.7 時，其撓度不符合規範規定，反之則是認定其撓度符合規定。計算結果如表 4-4.8，其比值皆小於 1.7，所以該版構件皆符合規範規定。

吾等可假設極限彎矩與使用彎矩之比值為 1.7 ( 因為  $U = 1.4D + 1.7L$  , 試驗載重為活載重 ) 及基本材料力學公式換算出輕質骨材混凝土的等值  $E_c I_e$  , 其結果如表 4-4.9 , 得到無 C 型鋼的等值  $E_c I_e$  值為  $118.14 \text{ t}\cdot\text{m}^2$  , 而有 C 型鋼的等值  $E_c I_e$  值為  $312.07 \text{ t}\cdot\text{m}^2$  , 顯示有 C 型鋼的版構件之剛度較大 , 而且大很多。探究其原因 , 有三項主要原因 :

- (1) C 型鋼材料本身提供更大的斷面模數  $I_{go}$ 。
- (2) 由於 C 型鋼的圍束效果使得混凝土的  $E_c$  值提高。
- (3) 由於 C 型鋼的關係使得混凝土較不易開裂 , 以致開裂斷面模數  $I_{cr}$  較高 , 所以有效慣性矩  $I_e$  會比較大。

### 3. 試驗過程之破壞情形

預鑄版在加載不久之後 , 首先在版試體中央及加載點底部產生了細微的垂直撓曲裂縫 , 接著裂縫在兩加載點間之底部陸續產生 , 且裂縫寬度隨著荷重的增加而增加 , 其開裂情形有如牙齒裂縫般 , 詳細狀況詳如照片 4-4.13~4-4.29。

從試驗過程的破壞情形中可以發現預鑄版受到彎矩控制 , 而非剪力控制。加載過程中由於「受拉鋼筋之應變值」遠超過鋼筋降伏應變值 , 此時產生之大變形量有充分之預警作用 , 是屬於「韌性破壞」的狀況。

### 4. 載重-位移曲線

載重-位移曲線為研究版之延展性、勁度...等之基本數據 , 在試驗過程中 , 載重及版跨徑中間點之位移 ( 位移計 2 ) 變化情形均加以記錄 , 繪製成載重-位移曲線 , 詳圖 4-4.10~圖 4-4.21。

從加載至主斜裂縫形成前 , 整個鋼筋混凝土版可是為一彈

性體，由圖 4-4.10~圖 4-4.21 載重-位移曲線圖中可發現每一片預鑄版於開裂前，其曲線皆非常接近線性的行為，然而當主傾斜裂縫形成後，其載重與位移曲線之斜率瞬間變小。另由試驗記錄之載重-位移曲線關係上可以發現一個至兩個明顯的荷重跳躍現象，如圖 4-4.10 所示。此乃因為主裂縫形成後，當荷重施加至某一階段時，其開裂裂縫突然變大，導致載重的突然下降。

一直持續加載後，由於位移計的變形範圍有限，故停止試驗。在此要注意的是，曲線的終點並不代表試體破壞之點，只是 LVDT 位移計無法量測，所以並無法了解繼續增加載重後的行為。

為了了解繼續增加載重後之行為，本試驗特別將 SB1 版及 SE1 版於試驗中將 LVDT 位移計移出，試圖將試體試驗到完全破壞，結果受限到 MTS 的位移控制的限制無法將試體完全給壓壞，證明該預鑄版韌性很好，不會發生非預警的破壞，且載重仍持續增加。

## 5. 短向筋間距的影響

依試驗結果可知短向鋼筋對預鑄版彎矩強度的貢獻不大，所有的預鑄版都是屬於單向版的模式，其比較結果如表 4-4.10。

## 6. 輕量 C 型鋼的影響

由試驗結果可知具有輕量 C 型鋼之預鑄版 (SC、SD)，較未具有輕量 C 型鋼之預鑄版 (SA、SB) 的彎矩強度大的很多，其主要之強度貢獻來自於輕量 C 型鋼所提供之抗彎能力，其餘少部分則應該是由於混凝土受到圍束效應之影響，其混凝土抗壓強度增加而使得抗彎能力增加，其比較結果如表 4-4.12。

由理論抗彎強度計算中，可以假設輕量 C 型鋼所能提供之抗彎強度約為 2.45 t-m ( $4.4-1.95 = 2.45$ )，而扣除輕量 C 型鋼所貢獻之抗彎強度外，具有輕量 C 型鋼之預鑄版又較無輕量 C 型鋼之預鑄版增加約三成之強度。

#### 7. 鋼筋焊接的影響

根據試驗結果發現鋼筋間接觸處有焊接者，其抗彎強度會較佳，尤其當短向鋼筋間距愈小者，其差異比較明顯。但增加之幅度並不大，可見鋼筋焊接在此預鑄版中的實際效益並不大，其比較結果如表 4-4.13。

#### 4.6 結論

本計畫主要是要探討輕質骨材混凝土預鑄版構件之力學行為，經過試驗結果可以得到以下之結論：

1. 輕質骨材混凝土抗壓強度皆能符合設計強度之要求。
2. 輕質骨材混凝土抗彎強度遠低於規範之規定(約規範值的二分之一)。
3. 輕質骨材混凝土預鑄版之抗彎強度皆能達到規範強度之要求，甚至高於理論強度之 16%~54%。
4. 輕質骨材混凝土預鑄版之撓度皆能符合規範之要求。
5. 從試驗過程的破壞情形中，可以發現輕質骨材混凝土預鑄版在加載過程中會產生大變形量，提供充分之預警作用，是屬於「韌性破壞」的狀況。
6. 所有的預鑄版在試驗過程中都是屬於「單向版」的情況，抗彎強度不因短向鋼筋量之增加而有所大增。
7. 輕質骨材混凝土會受到圍束效應之影響，導致其混凝土抗壓強

度增加而使得抗彎能力增加。

表 4-4.1 輕質骨材混凝土配比表

試驗日期	92.07.06-1	92.07.06-2	92.07.06-3			
水膠比	0.3657	0.3662	0.3659			
水泥 Type I Low Alkali (kg)	330	330	330			
爐石(kg)	144	144	144			
水(kg)	170	170	170			
添加劑(kg)	F-100(松江)	F-100(松江)	F-100(松江)			
	5.20	5.98	5.69			
河砂(kg)	681	681	681			
輕質骨材(kg)	476	476	476			
坍度(cm)	1	18	8			
含氣量%	0.02	0.02	0.02			
版構件	SD2	SF2	SB1 SB2 SF1	SC1 SC2 SD1	SA1 SE1 SE2	SA2
抗壓試體	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	*
抗彎試體	-	-	SM1	SM2	SM3	*

註： - 表示未製作

\* 表示由成功大學製作及試驗



表 4-4.2 試驗試體規劃一覽表

試體名稱 (編號)	版構件 (SA)	版構件 (SB)	版構件 (SC)	版構件 (SD)	版構件 (SE)	版構件 (SF)	抗壓試體 (SP)	抗彎試體 (SM)
試體尺寸 cm	300×100×15						Φ10×20	15×15×53
試體數量	2	2	2	2	2	2	15	3
備註	三分點載重試驗試驗齡期 28 天						共 5 組，每 組 3 個，試 驗齡期為 28 天。	試驗齡期 為 28 天

表 4-4.3 抗壓試體試驗結果一覽表

試體編號	28 天抗壓強度 kg/cm <sup>2</sup>	平均抗壓強度 kg/cm <sup>2</sup>
SP1	362	361.67
	352	
	371	
SP2	369	358.33
	341	
	365	
SP3	398	385.33
	381	
	377	
SP4	370	384.67
	381	
	403	
SP5	395	386.00
	388	
	375	
總平均		375.20

表 4-4.4 抗彎試體試驗結果一覽表

試體編號	28 天抗彎強度 kg/cm <sup>2</sup>	平均抗彎強度 kg/cm <sup>2</sup>
SM1	19.87	
SM2	13.47	
SM3	18.33	
總平均		17.22

表 4-4.5 預鑄版試體試驗結果一覽表

試體 編號	極限載重 T	極限彎矩 T-M	平均極限彎矩 T-M	備註
SA1	5.01	2.38	2.54	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@15cm、無輕量型鋼
SA2	5.66	2.69		
SB1	4.79	2.28	2.27	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@20cm、無輕量型鋼
SB2	4.74	2.25		
SC1	13.38	6.36	6.34	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@15cm、具輕量型鋼
SC2	13.30	6.32		
SD1	13.27	6.30	6.13	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@20cm、具輕量型鋼
SD2	12.53	5.95		
SE1	14.50	6.89	6.79	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@15cm、具輕量型鋼及鋼筋焊接
SE2	14.06	6.68		
SF1	13.26	6.30	6.19	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@20cm、具輕量型鋼及鋼筋焊接
SF2	12.79	6.08		

表 4-4.6 試驗極限彎矩與理論極限彎矩對照表

試體 編號	試驗極限彎矩 T-M	理論極限彎矩 T-M	相差百分比 %
SA	2.54	1.95	30.26
SB	2.27		16.41
SC	6.34	4.40	44.09
SD	6.13		39.32
SE	6.79		54.32
SF	6.19		40.68

表 4-4.7 預鑄版撓度控制強度表

試體 編號	使用載重 T	使用彎矩 T-M	平均使用彎矩 T-M	備註
SA1	3.10	1.47	1.50	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@15cm、無輕量型鋼
SA2	3.20	1.52		
SB1	2.91	1.38	1.52	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@20cm、無輕量型鋼
SB2	3.50	1.66		
SC1	6.30	2.99	3.07	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@15cm、具輕量型鋼
SC2	6.60	3.14		
SD1	6.40	3.04	3.04	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@20cm、具輕量型鋼
SD2	6.38	3.03		
SE1	6.30	2.99	2.82	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@15cm、具輕量型鋼及鋼筋焊接
SE2	5.57	2.65		
SF1	6.10	2.90	2.88	長向筋：#3@15cm、短向筋：#3@20cm、具輕量型鋼及鋼筋焊接
SF2	6.01	2.85		

表 4-4.8 理論極限彎矩與使用彎矩對照表

試體 編號	理論極限彎矩 T-M	平均使用彎矩 T-M	理論極限彎矩與使用 彎矩之比值
SA	1.95	1.50	1.30
SB		1.52	1.28
SC	4.40	3.07	1.43
SD		3.04	1.45
SE		2.82	1.56
SF		2.88	1.53

表 4-4.9 等值 EI 計算表

$E_c I_g = \frac{2282.5M}{3\Delta}$					
試體 編號	理論使用彎矩 T-M	位移 mm	等值 $E_c I_e$ t-m <sup>2</sup>	平均等值 $E_c I_e$ t-m <sup>2</sup>	平均等值 $E_c I_e$ t-m <sup>2</sup>
SA1	1.95/1.7 = 1.15	5.03	173.95	205.22	188.14
SA2		3.70	236.48		
SB1		5.35	163.54	171.05	
SB2		4.90	178.56		
SC1	4.40/1.7 = 2.59	6.25	315.29	324.08	312.07
SC2		5.92	332.86		
SD1		6.05	325.71	323.07	
SD2		6.15	320.42		
SE1		6.25	315.29	292.99	
SE2		7.28	270.68		
SF1		6.42	306.94	308.15	
SF2		6.37	309.35		

表 4-4.10 短向筋效應比較表

試體 編號	平均極限彎矩 T-M	增加百分比 %	備註
SA	2.54	11.89	無輕量型鋼
SB	2.27		
SC	6.34	3.43	具輕量型鋼
SD	6.13		
SE	6.79	9.69	具輕量型鋼及鋼筋焊接
SF	6.19		

表 4-4.11 輕量 C 型鋼效應比較表

試體 編號	平均極限彎矩 T-M	增加百分比 %	備註
SA	2.54	149.61	短向筋為 # 3@15cm
SC	6.34		
SB	2.27	170.04	短向筋為 # 3@20cm
SD	6.13		

表 4-4.12 輕量 C 型鋼效應比較表 (考慮 C 型鋼提供強度)

輕量 C 型鋼提供強度為 $4.40-1.95 = 2.45$ T-M			
試體 編號	平均極限彎矩 T-M	增加百分比 %	備註
SA	$2.54+2.45 = 4.99$	27.05	短向筋為 # 3@15cm
SC	6.34		
SB	$2.27+2.45 = 4.72$	29.87	短向筋為 # 3@20cm
SD	6.13		

表 4-4.13 鋼筋焊接效應比較表

試體 編號	平均極限彎矩 T-M	增加百分比 %	備註
SC	6.34	7.10	短向筋為 # 3@15cm
SE	6.79		
SD	6.13	0.98	短向筋為 # 3@20cm
SF	6.19		

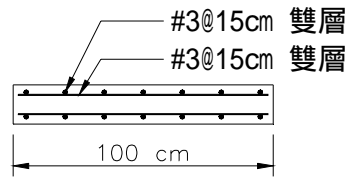


圖 4-4.1 SA 版配筋圖

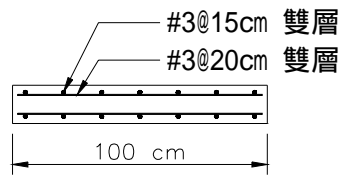


圖 4-4.2 SB 版配筋圖

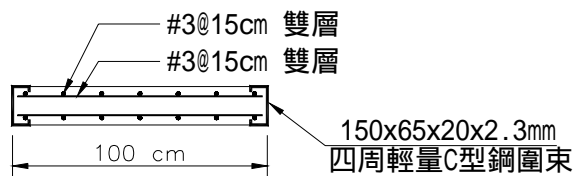


圖 4-4.3 SC 版配筋圖

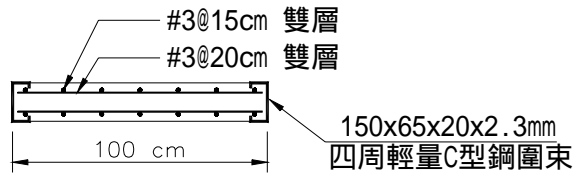


圖 4-4.4 SD 版配筋圖

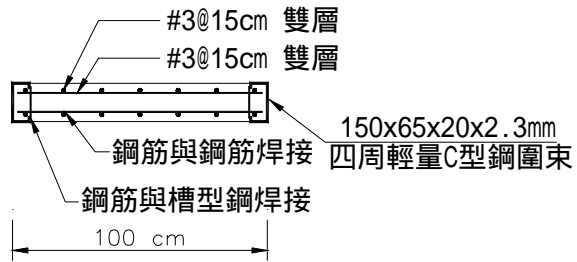


圖 4-4.5 SE 版配筋圖

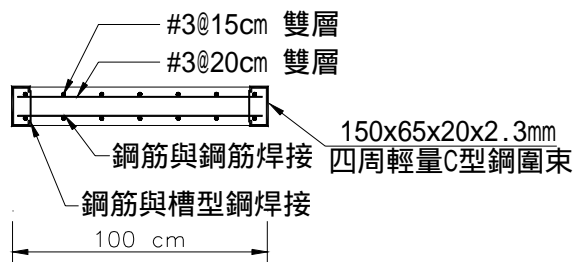


圖 4-4.6 SF 版配筋圖



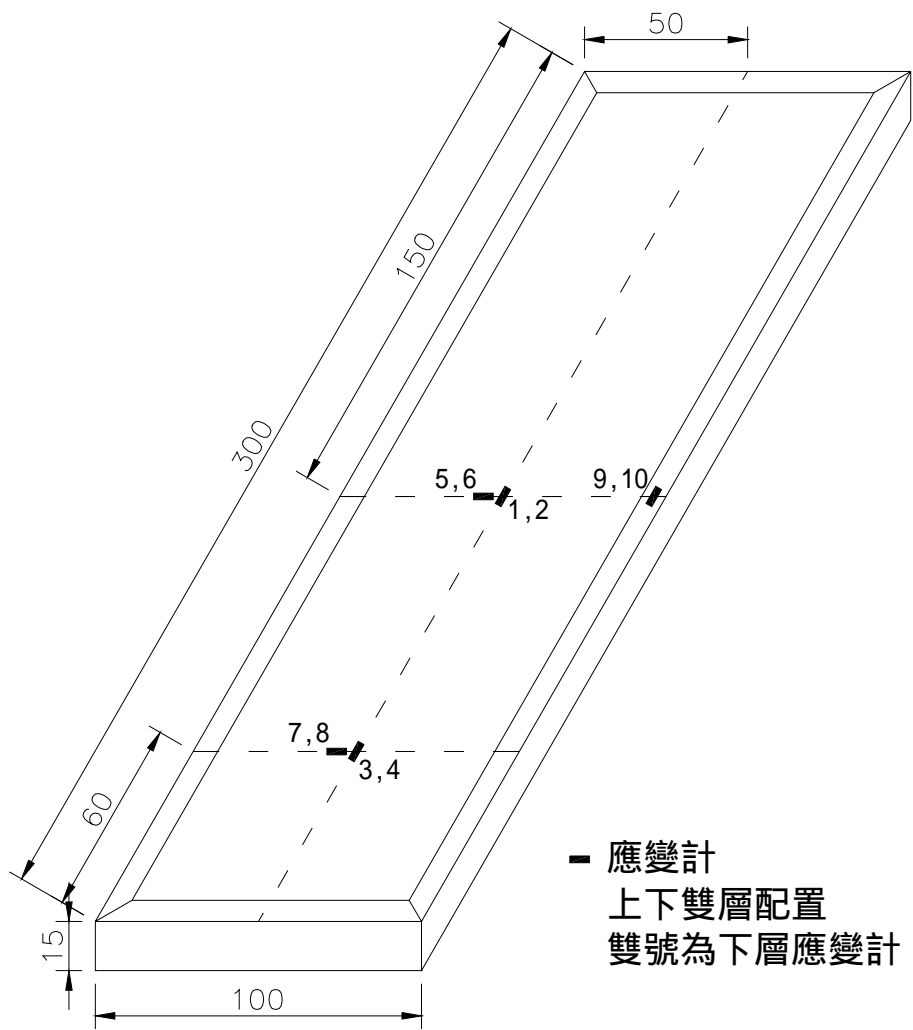


圖 4-4.7 應變計配置示意圖

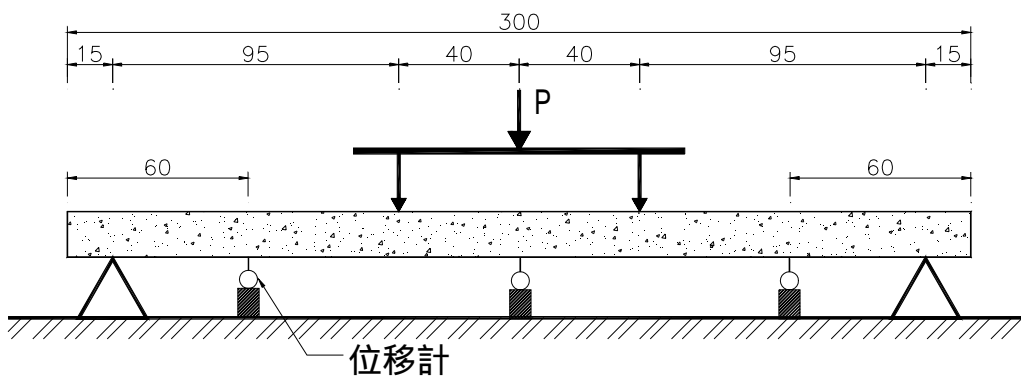


圖 4-4.8 三點抗彎載重示意圖

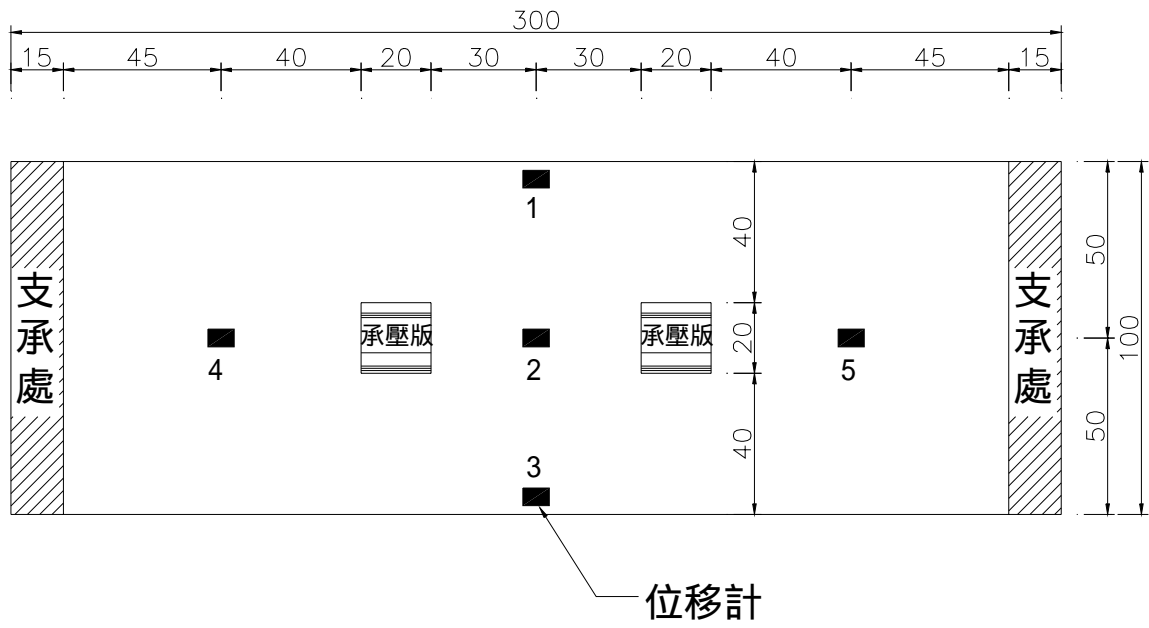


圖 4-4.9 位移計配置平面圖

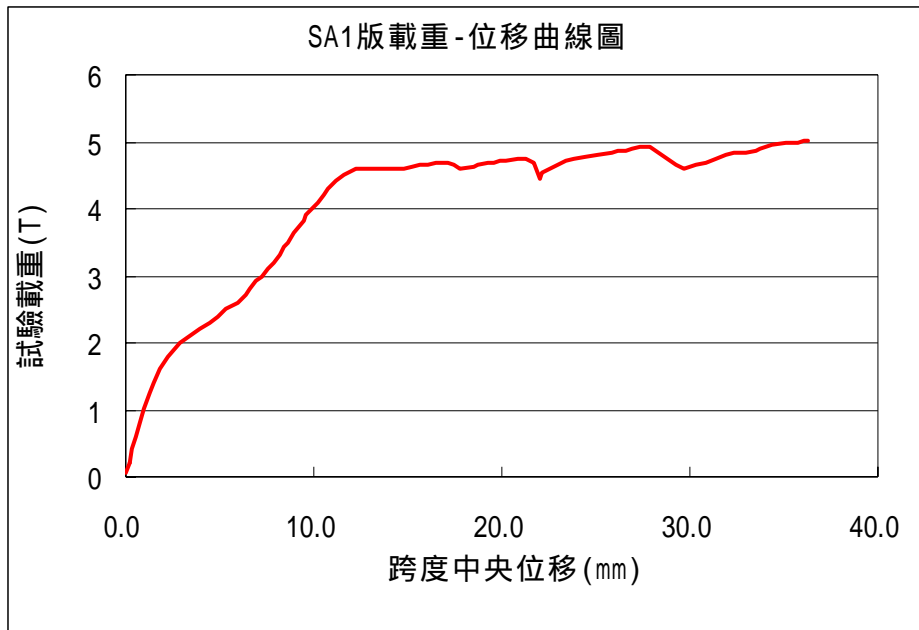


圖 4-4.10 SA1 版載重位移曲線圖

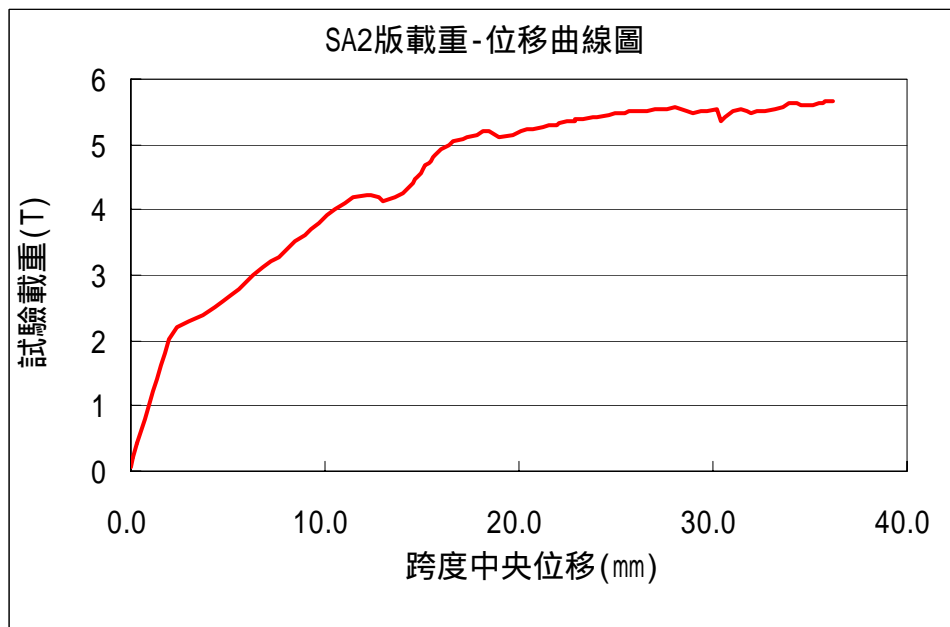


圖 4-4.11 SA2 版載重位移曲線圖

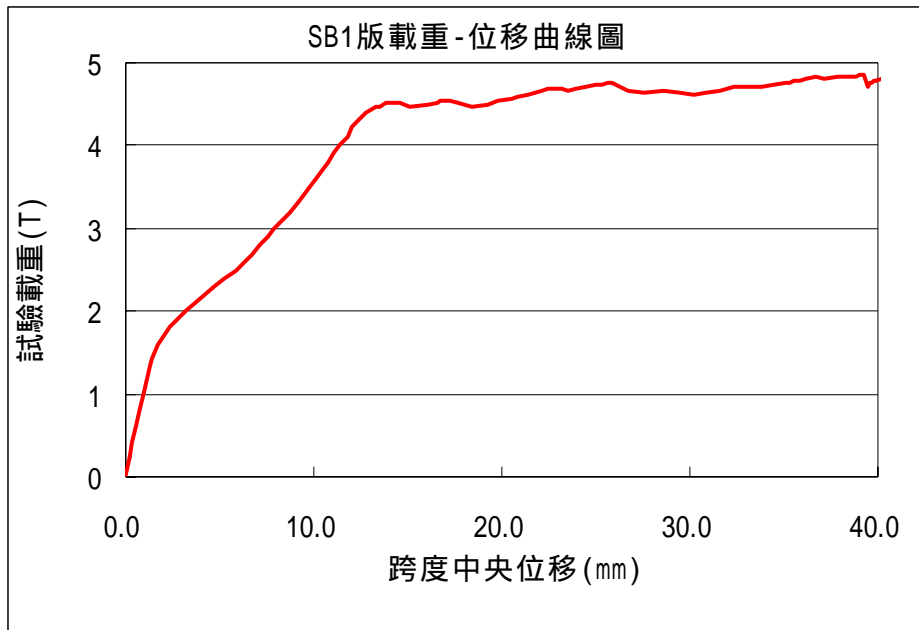


圖 4-4.12 SB1 版載重位移曲線圖

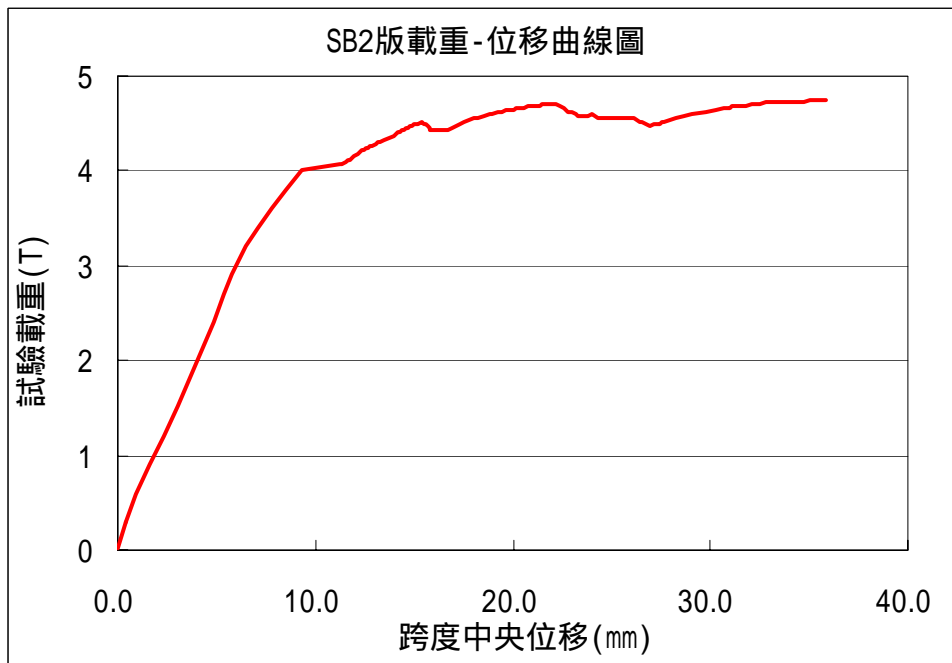


圖 4-4.13 SB2 版載重位移曲線圖

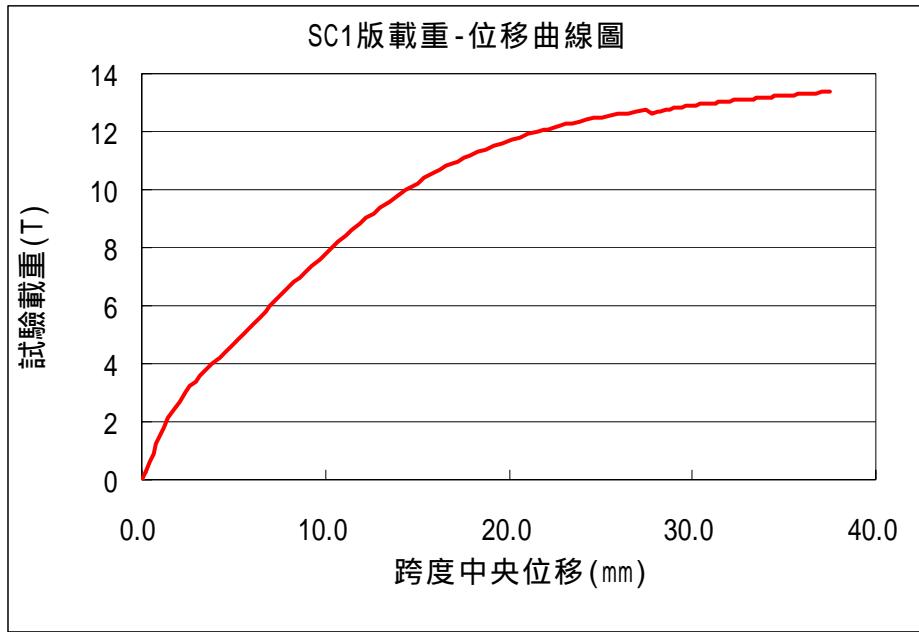


圖 4-4.14 SC1 版載重位移曲線圖

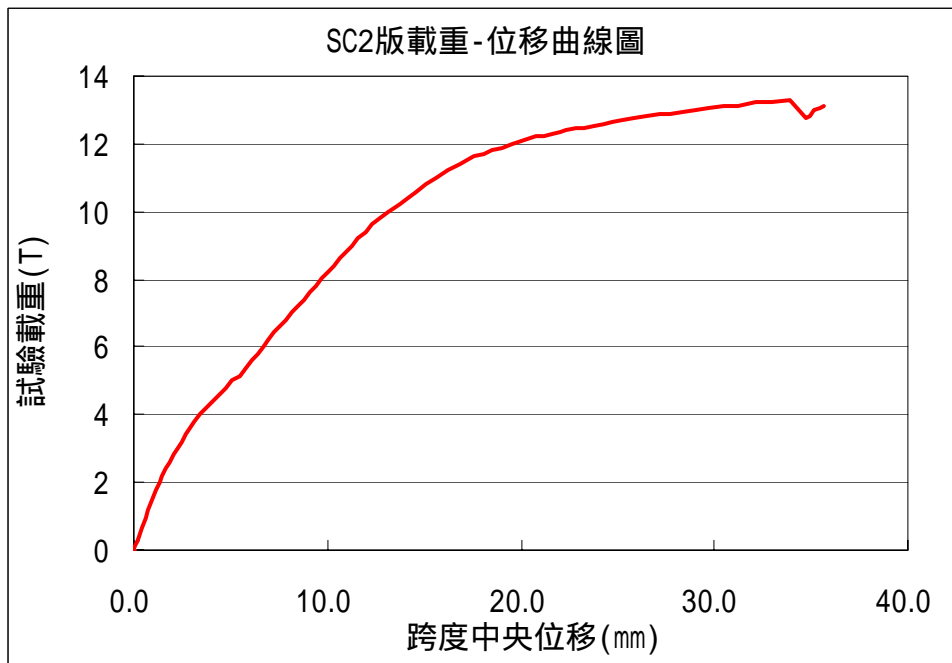


圖 4-4.15 SC2 版載重位移曲線圖

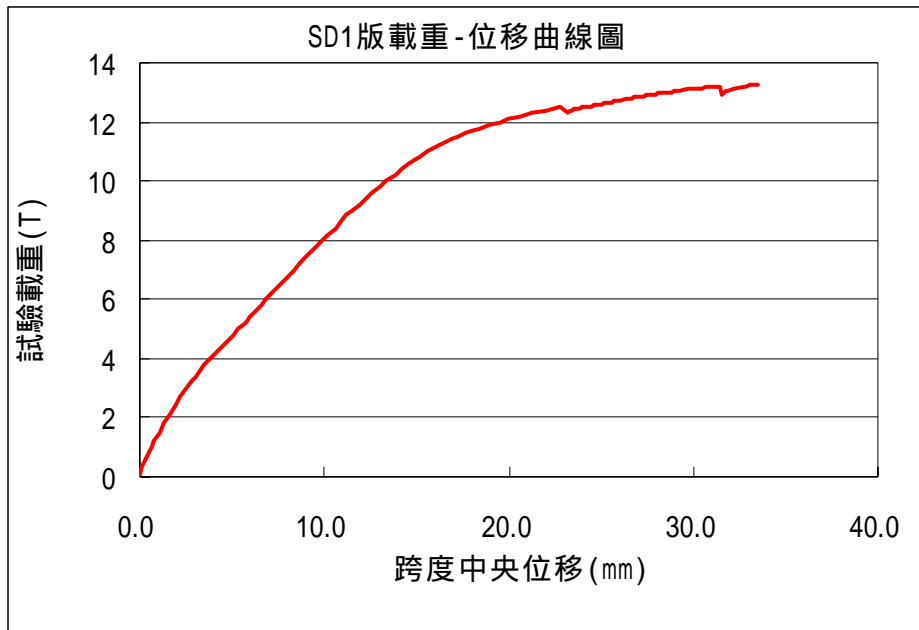


圖 4-4.16 SD1 版載重位移曲線圖

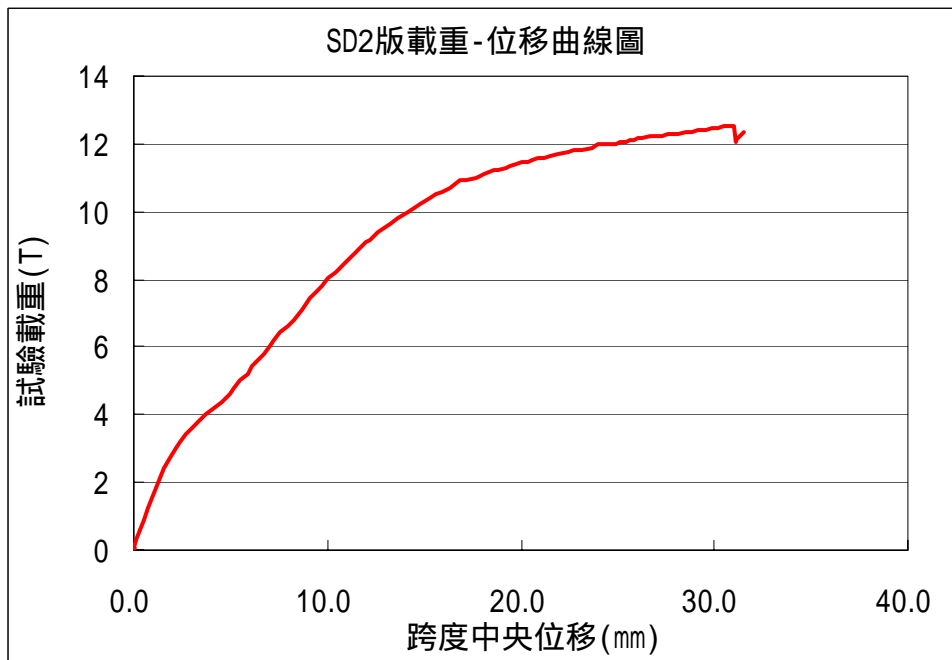


圖 4-4.17 SD2 版載重位移曲線圖

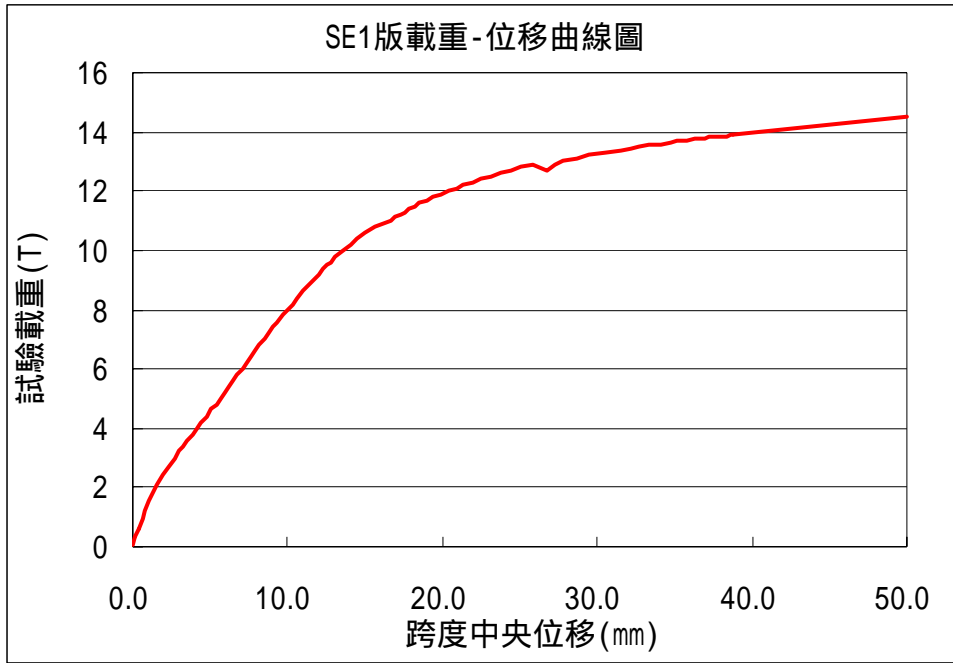


圖 4-4.18 SE1 版載重位移曲線圖

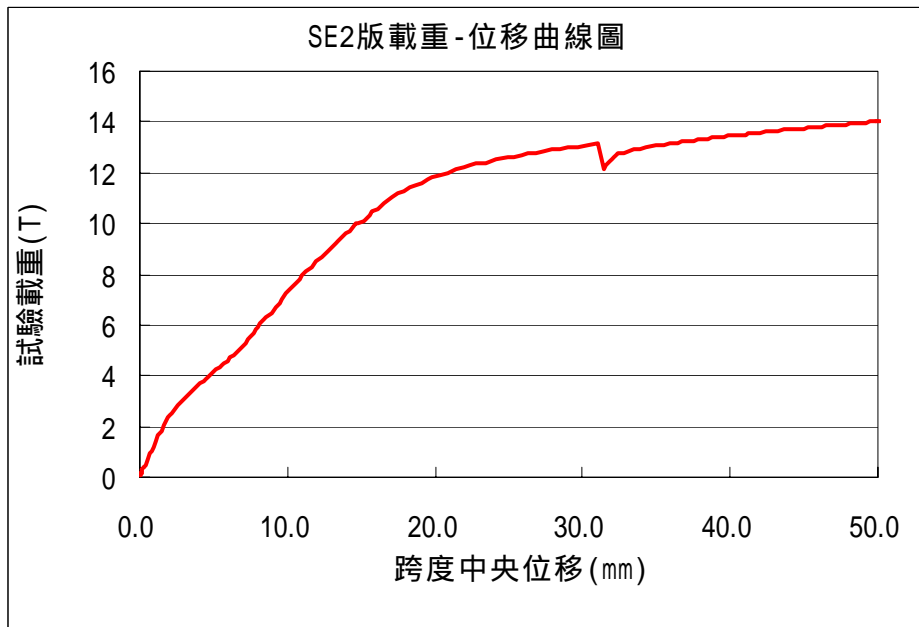


圖 4-4.19 SE2 版載重位移曲線圖

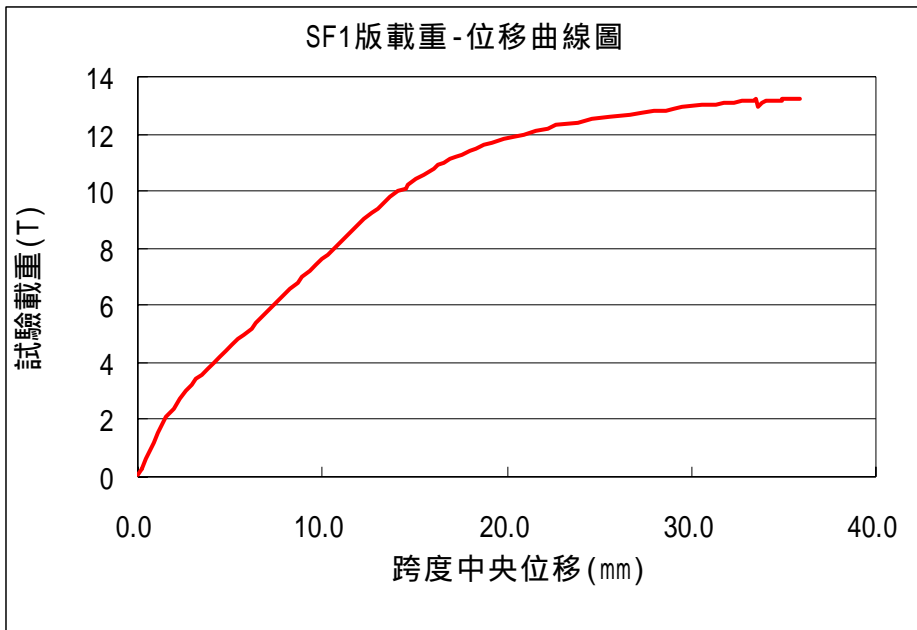


圖 4-4.20 SF1 版載重位移曲線圖

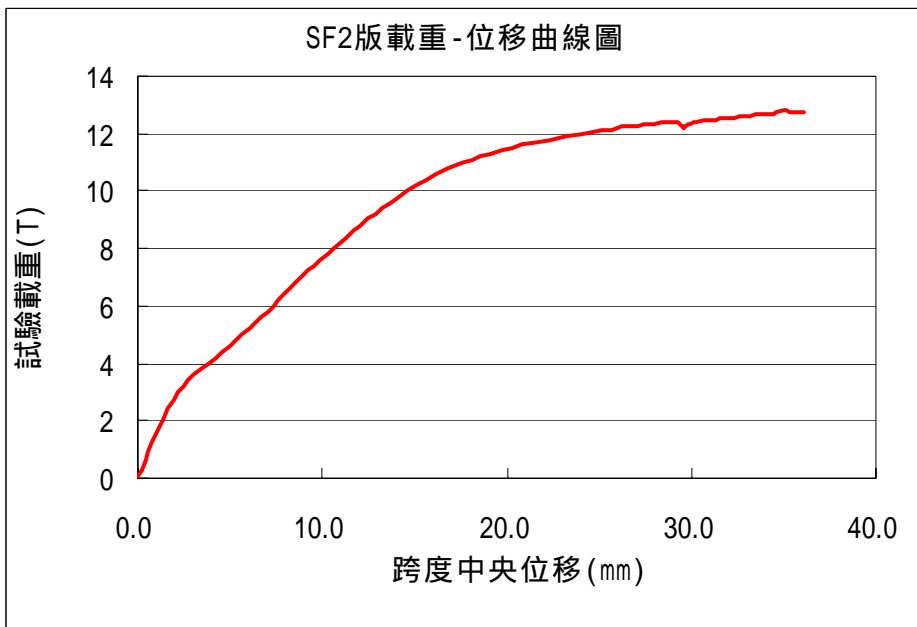


圖 4-4.21 SF2 版載重位移曲線圖





照片 4-4.1 鋼筋綁紮



照片 4-4.2 應變計貼覆



照片 4-4.3 抗壓及抗彎試體



照片 4-4.4 MTS 安裝定位



照片 4-4.5 位移計安裝定位



照片 4-4.6 V8 監錄裂縫發展情形





照片 4-4.7 資料擷取器



照片 4-4.8 底部裂縫觀測



照片 4-4.9 抗壓試體試驗



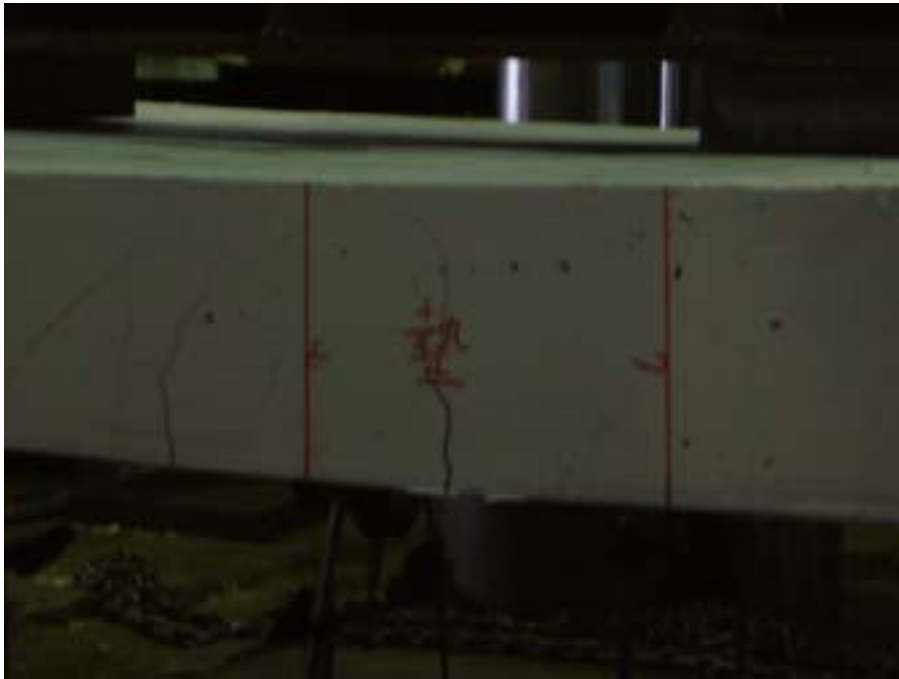
照片 4-4.10 抗壓試驗後之試體



照片 4-4.11 抗彎試驗



照片 4-4.12 抗彎試體試驗後



照片 4-4.13 側向裂縫發展情形



照片 4-4.14 SA1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.15 SA1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.16 SA2 試體試驗後裂縫發展情形





照片 4-4.17 SA2 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.18 SB1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.19 SB1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.20 SB2 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.21 SB2 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.22 SC1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.23 SC2 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.24 SD1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.25 SD2 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.26 SE1 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.27 SE2 試體試驗後裂縫發展情形



照片 4-4.28 SF1 試體試驗後裂縫發展情形





照片 4-4.29 SF2 試體試驗後裂縫發展情形

## 第五節 輕質骨材混凝土預鑄柱構件之性質研究

### 5.1 前言

在建築結構中柱構件比較被建議以常重混凝土灌製，主要原因為柱子是最重要之結構件，以常重混凝土灌製，無論對業主或設計者而言都會較有信心，另外，柱子佔有之重量百分比也較小，以輕質骨材混凝土灌製，節省之重量不會很大，因此對於純 R.C.之高層建築物，建議柱子以常重混凝土灌製。但對較低樓層而言，柱、樑、版其實是同時一體澆注的，若以常重混凝土灌製柱子，以輕質骨材混凝土灌製樑、版，在工地現場較不被接受，另外對較低樓層而言，柱子之負載遠較高樓層之柱為小，因此柱、樑、版一起以輕質骨材混凝土同時灌製乃必然之趨勢。本研究之目的即在探討較小柱子以輕質骨材混凝土或常重混凝土製成時力學性質之異同。

### 5.2 研究目的

本研究之目的在比較輕質骨材混凝土柱及常重混凝土柱之構件行為，藉以探討輕質骨材混凝土使用於預鑄柱構件之適用性。

### 5.3 試體規劃

柱構件分別以常重混凝土與輕質骨材混凝土灌製，常重混凝土之配比如表 4-5.1 所示，輕質骨材混凝土混凝土之配比如表 4-5.2 所示。基本上都以 5000psi 為目標強度。

本研究柱試體之斷面為 28×28 公分，高度為 111 公分，如照片 4-5.1 及 4-5.2 所示，其配筋如圖 4-5.1 所示，共配有 8 支#5 主筋，兩端箍筋間距為 8 公分，中間箍筋間距為 15 公分，每根主筋都有箍筋或繫筋圍繞。輕質骨材混凝土柱與常重混凝土柱之尺寸與配筋完全相同，混凝土之目標設計強度亦相同。照片 4-3 為柱試體於工廠灌注完畢後之情況。照片 4-4 為柱試體運回試驗室存放之情形。

本研究共有常重混凝土柱試體 3 支，輕質骨材混凝土柱試體 4 支。



每支柱試體之主筋、箍筋及混凝土都黏貼有應變計，用以記錄各項試驗數據。

#### 5.4 試驗項目與方法

柱試體主要進行軸向荷重試驗，試驗方式如圖 4-5.2 所示，軸向荷重直接施加至柱試體之上下端，由於主筋、箍筋及混凝土都黏貼有應變計，隨著軸向荷重之增加，將記錄輕質骨材混凝土柱與常重混凝土柱內鋼筋及混凝土之應變值，為使柱試體破壞於非圍束區，實驗時於柱試體之上下端用鋼板加以圍束。本試驗將探討下列三點議題：

##### 一、柱構件內材料之應力應變關係

將輕質骨材混凝土柱與常重混凝土柱以位移控制法施加軸向荷重至完全破壞為止，根據應變計之資料，繪出輕質骨材混凝土柱與常重混凝土柱內主筋、箍筋及混凝土之應力應變關係，比較兩者之異同，藉以探討輕質骨材混凝土作為柱構件材料之可行性。

##### 二、柱構件之力學行為

將輕質骨材混凝土柱與常重混凝土柱以位移控制法施加軸向荷重至完全破壞為止，根據柱試體之軸向變形、橫向變形及應變計之讀數，藉以探討兩者之彈性段、塑性段以及延展性之異同，探討輕質骨材混凝土作為柱構件材料之可行性。

##### 三、柱構件之破壞模式

由於試體都將被壓至破壞為止，因此輕質骨材混凝土柱與常重混凝土柱之破壞模式將被探討比較。

## 5.5 實驗結果分析與討論

### 一、混凝土抗壓強度之試驗結果

輕質骨材混凝土與常重混凝土的抗壓強度試驗結果如表 4-5.3 所示，其中輕質骨材混凝土有兩車，第一車輕質骨材混凝土稱為 LC1，第二車輕質骨材混凝土稱為 LC2，試驗結果常重混凝土強度為  $400\text{kg/cm}^2$ ，輕質混凝土 LC1 之強度為  $430\text{kg/cm}^2$ ，輕質混凝土 LC2 之抗壓強度為  $390\text{kg/cm}^2$ ，三者之抗壓強度大致相近，雖然兩批輕質骨材混凝土之抗壓強度略為不同，但都顯示以水庫淤泥所燒結之輕質骨材來拌製結構用之混凝土，基本上沒有問題。

### 二、柱試體之試驗結果

柱試體共有 4 個，常重混凝土兩個，編號為 NC1 及 NC2；輕質第一批料製成之柱試體為 L1C，輕質第二批料製成之柱試體為 L2C。柱試體軸向荷重試驗結果如表 4-5.4 及圖 4-5.3 至圖 4-5.22 所示。破壞狀況如照片 4-5.9 及 4-5.12 所示。此部分之試驗結果分為下列三方向加以討論。

#### (一) 柱構件內材料之荷重應變關係

輕質骨材混凝土柱試體之荷重與主筋應變之關係如圖 4-5.3 及 4-5.4 所示；常重混凝土柱試體之荷重與主筋應變之關係如圖 4-5.5 及 4-5.6 所示。試驗結果顯示，輕質骨材混凝土柱內鋼筋之荷重與應變關係與常重混凝土柱內鋼筋幾乎完全一樣。

輕質骨材混凝土柱試體之荷重與箍筋應變之關係如圖 4-5.7 及 4-5.8 所示；常重混凝土柱試體之荷重與箍筋應變之關係如圖 4-5.9 及 4-5.10 所示。試驗結果顯示，輕質試體 LC1 及常重試體 NC1 非常相似，但試體 LC2 卻顯示極差之延展性，而 NC2 又顯示較明顯之延展性，由於主筋並非直接承受軸向荷重，而是經由

混凝土間接承受，當混凝土破壞時，主筋及箍筋即不再受力，因此就箍筋延展性之試驗結果而言，其實是顯現常重混凝土之延展性比輕質混凝土為佳。

輕質骨材混凝土柱試體之荷重與混凝土軸向應變之關係如圖 4-5.11 及 4-5.12 所示；常重混凝土柱試體之荷重與混凝土軸向應變之關係如圖 4-5.13 及 4-5.14 所示。試驗結果顯示，輕質與常重之變化趨勢極為相似，但常重混凝土顯現出具有較佳之延展性。

輕質骨材混凝土柱試體之荷重與混凝土橫向應變之關係如圖 4-5.15 及 4-5.16 所示；常重混凝土柱試體之荷重與混凝土橫向應變之關係如圖 4-5.17 及 4-5.18 所示。試驗結果顯示，兩者之行為極為近似，但常重混凝土具有稍佳之延展性。

## (二) 柱構件之力學行為

輕質骨材混凝土柱試體之荷重與軸向變形之關係如圖 4-5.19 及 4-5.20 所示；常重混凝土柱試體之荷重與軸向變形之關係如圖 4-5.21 及 4-5.22 所示。觀察表 4-5.4，四個柱子之極限荷重大致上與混凝土強度成正比；NC1 和 NC2 在極限荷重下的變形分別為 5.8mm 和 6.4mm，LC1 和 LC2 在極限荷重下的變形都約為 6.5mm，兩種混凝土柱之在極限荷重下之變形量極為相似；再加上前述四個關係圖形之趨勢變化亦頗為近似，整體而言，兩種混凝土灌製之柱試體，在承受軸向荷重時之變形行為極為相似。但輕質骨材混凝土柱，在達到最大荷重之後，荷重之下降趨勢較為直接及尖銳，且極限軸向變形量也是常重混凝土稍大，此部分之試驗結果顯示常重混凝土柱之延展性稍佳，也間接顯示常重混凝土材料之延展性稍佳。

## (三) 柱構件之破壞模式

輕質骨材混凝土柱試體之破壞模式如照片 4-5.9 及 4-5.10 所示；常重混凝土柱試體之破壞模式如照片 4-5.11 及 4-5.12 所示。由於柱試體之兩端均以鋼板加以圍束，柱試體之破壞位置均位於

柱試體之中央位置。上述照片顯示兩種混凝土之破壞模式完全相同，都是混凝土先行開裂、繼而保護層爆開、最後主筋挫屈破壞。本研究之箍筋間距為 30 公分，最後之破壞模式與預期相符。

工廠量產化製作之輕質骨材混凝土柱，雖然表現出較稍差之延展性，不過整體而言，整個柱試體之抗壓行為(無論是極限荷重或是對應之變形量)基本上與常重混凝土柱極為相似，因此無論是結構或非結構用途，工廠量產化製作之輕質骨材混凝土柱可以取代常重混凝土柱使用。

## 5.6 小結

1. 輕質混凝土經適當的配比設計，確實可以達到結構用途之強度。
2. 在柱試體承受軸向荷重之過程中，根據鋼筋及混凝土應變之變化趨勢而言，輕質及常重兩種柱子之行為可視為一致，只是輕質骨材混凝土柱之延展性稍差，但差異極小。
3. 柱試體承受軸向荷重之過程中，根據軸向變形量之變化趨勢而言，輕質及常重兩種柱子之行為亦可視為一致，但也顯示輕質骨材混凝土柱之延展性稍差，但差異極小。
4. 就破壞模式而言兩種混凝土灌製之柱子，其破壞模式完全相同。
5. 工廠量產化製作之輕質骨材混凝土柱，雖然表現出較稍差之延展性，不過整體而言，整個柱試體之抗壓行為與常重混凝土柱極為相似，因此可以取代常重混凝土柱使用。
6. 輕質骨材混凝土柱之延展性稍差，建議可由添加鋼纖維予以補強，添加之方式則有賴後續之研究。

表 4-5.1 常重配比表

水膠比	0.45
水泥 Type I Low Alkali (kg)	390
爐石(kg)	0
水(kg)	173
添加劑(kg)	F-100(松江)
	3.6
河砂(kg)	800
碎石(kg)	982
坍度(cm)	10
含氣量%	2

表 4-5.2 輕質配比表

試驗日期	92.07.06-1	92.07.06-2
水膠比	0.3662	0.3659
水泥 Type I Low Alkali (kg)	330	330
爐石(kg)	144	144
水(kg)	170	170
添加劑(kg)	F-100(松江)	F-100(松江)
	5.98	5.69
河砂(kg)	681	681
輕質骨材(kg)	476	476
坍度(cm)	18	6
含氣量%	0.02	0.02

表 4-5.3 圓柱試體 28 天抗壓強度

	L1(輕質)		L2(輕質)		N(常重)	
	破壞荷重 ( kg )	破壞應力 (kg/cm <sup>2</sup> )	破壞荷重 ( kg )	破壞應力 (kg/cm <sup>2</sup> )	破壞荷重 ( kg )	破壞應力 (kg/cm <sup>2</sup> )
28 天	32956	419.61	29836	379.88	31733	404.04
	34740	442.32	31899	406.15	31172	396.89
平均		431.11		393.02		400.47

表 4-5.4 柱極限荷重及極限變位

	L1C* <sup>1</sup>	L2C	NC1* <sup>2</sup>	NC2
極限荷重 ( ton )	454.1	402.9	405.6	361.7
極限荷重 之變位 ( mm )	6.45	6.67	5.80	6.38

\*<sup>1</sup> : L1C 為由第一車輕質骨材混凝土所灌製之柱試體。

\*<sup>2</sup> : NC1 為#1 常重混凝土柱。

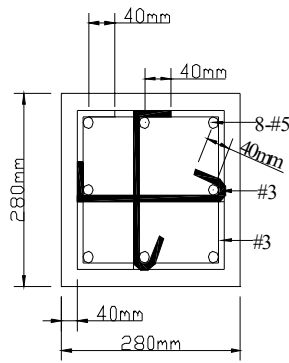
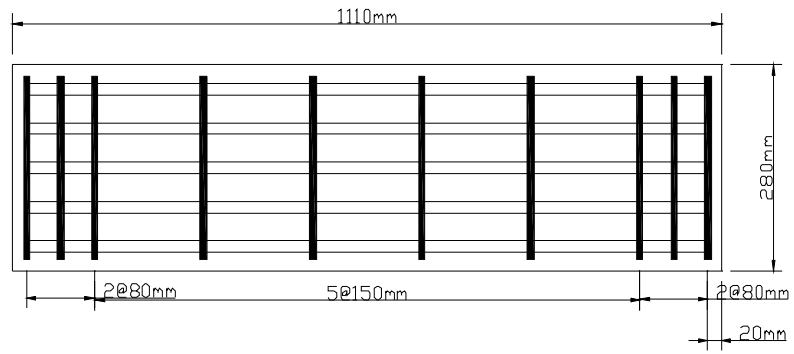


圖 4-5.1 柱配筋圖

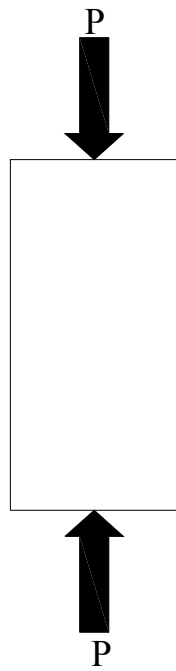


圖 4-5.2 柱軸向荷重圖



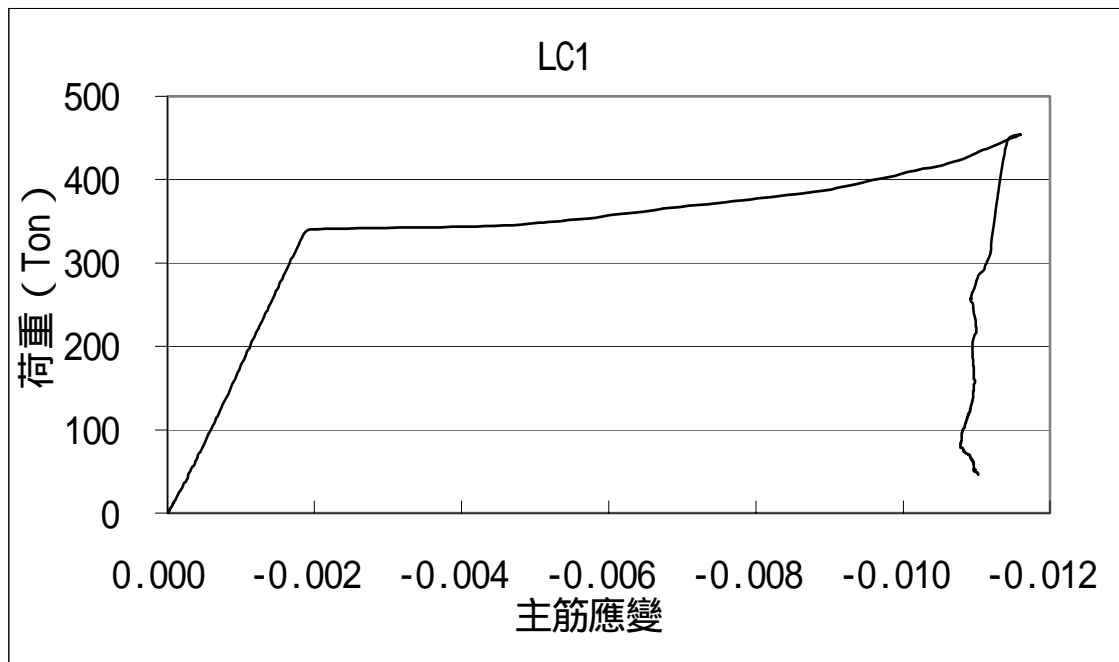


圖 4-5.3 LC1 荷重與主筋應變關係

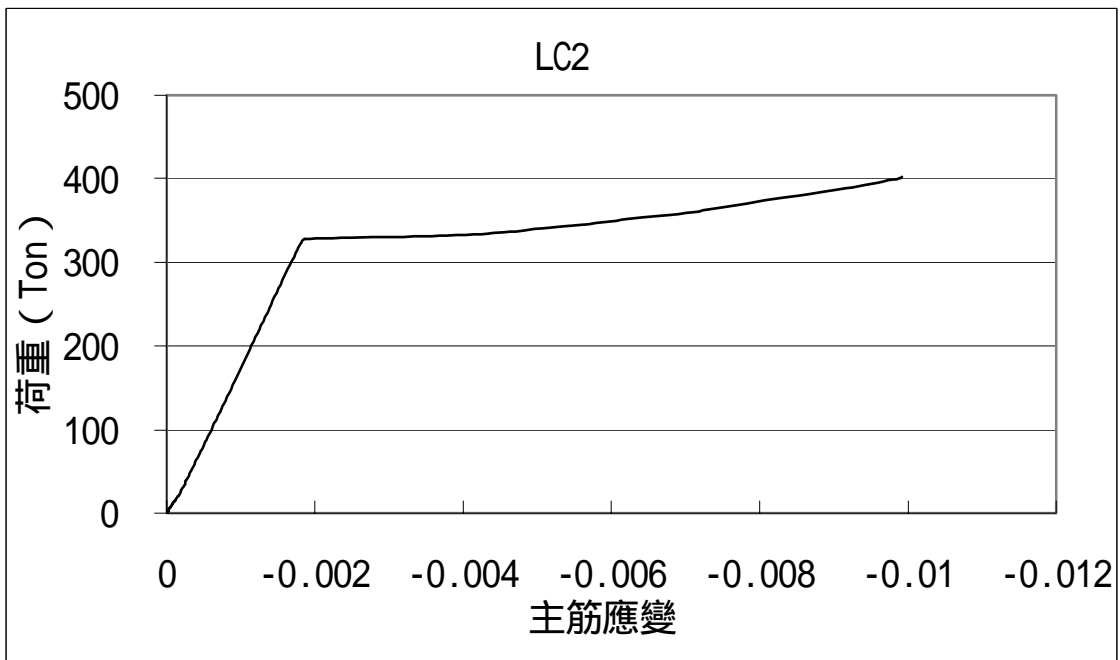


圖 4-5.4 LC2 荷重與主筋應變關係

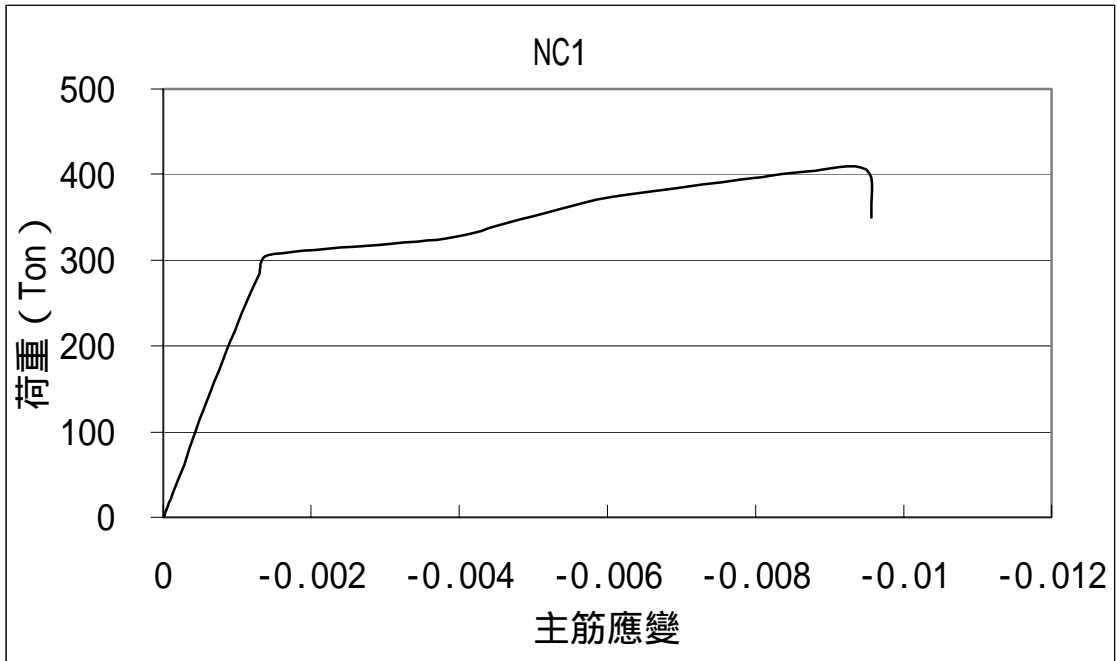


圖 4-5.5 NC1 荷重與主筋應變關係

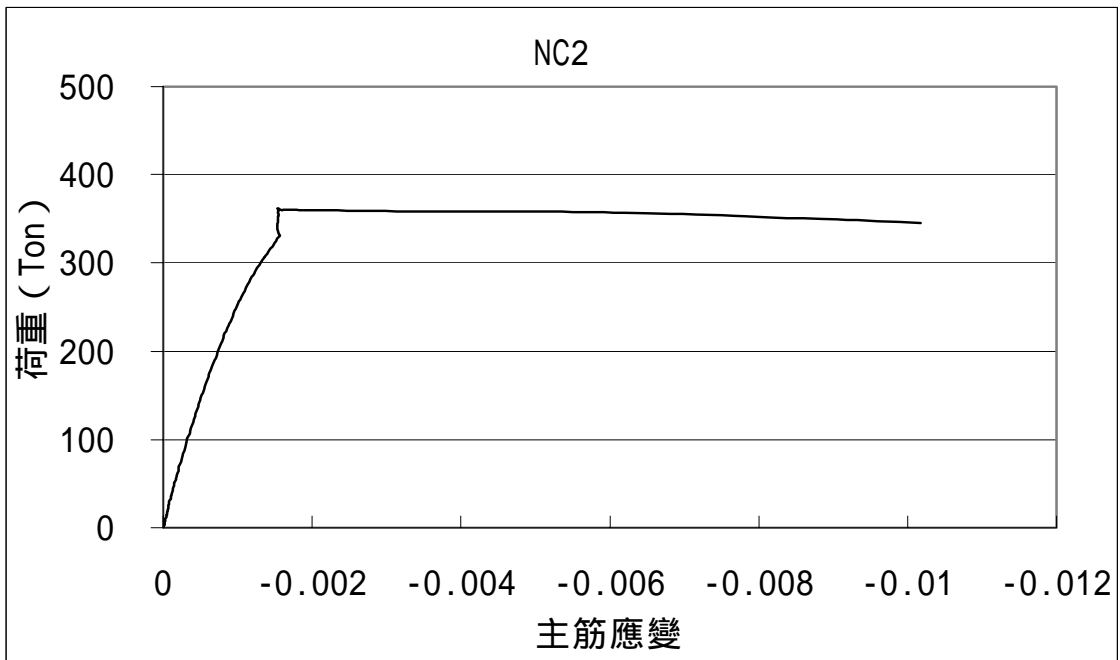


圖 4-5.6 NC2 荷重與主筋應變關係

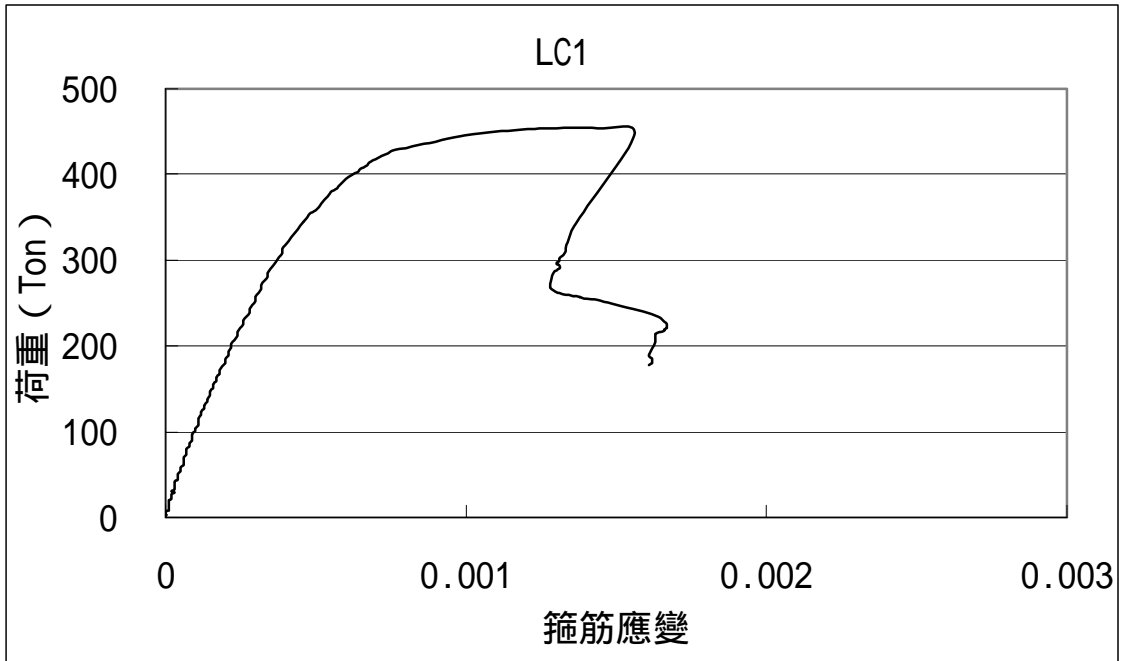


圖 4-5.7 LC1 荷重與箍筋應變關係

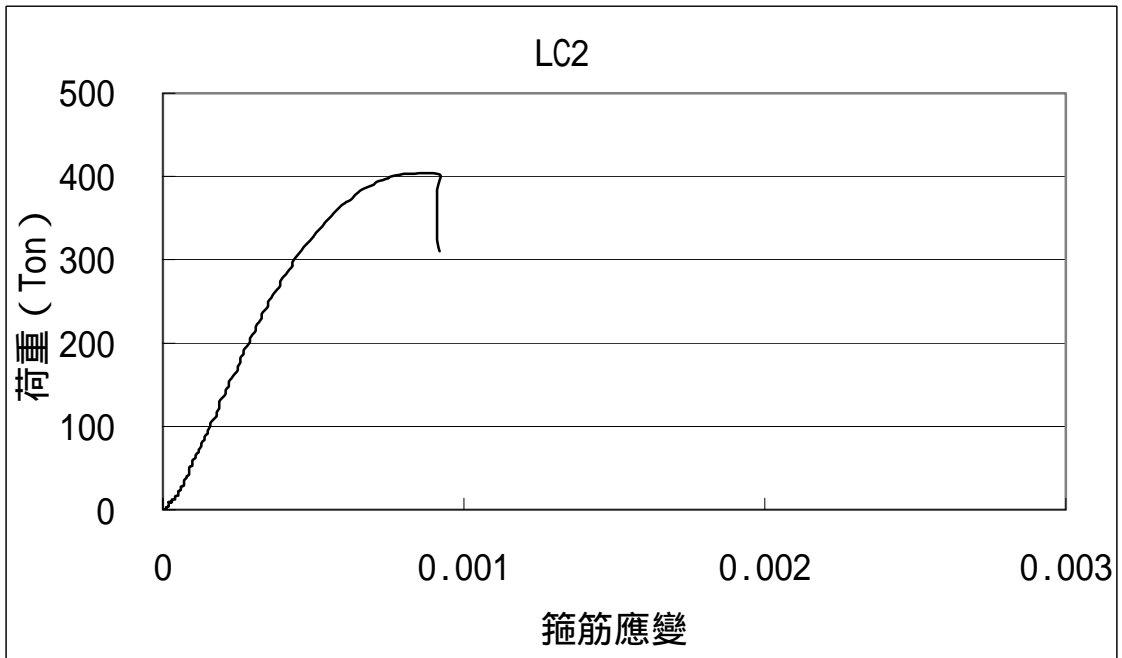


圖 4-5.8 LC2 荷重與箍筋應變關係

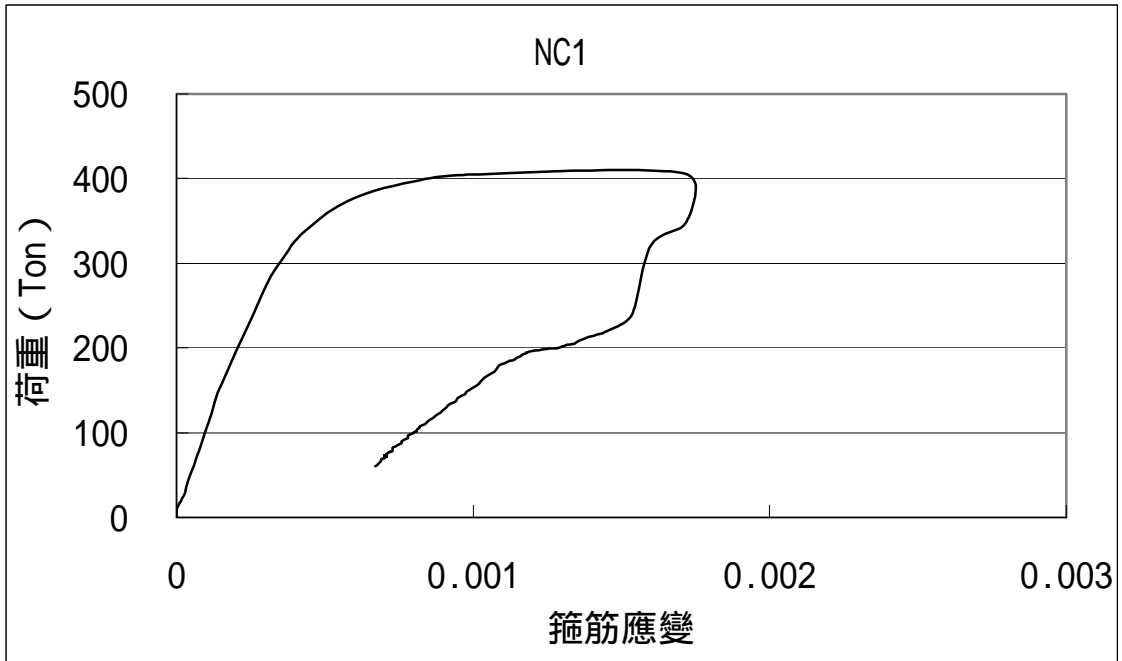


圖 4-5.9 NC1 荷重與箍筋應變關係

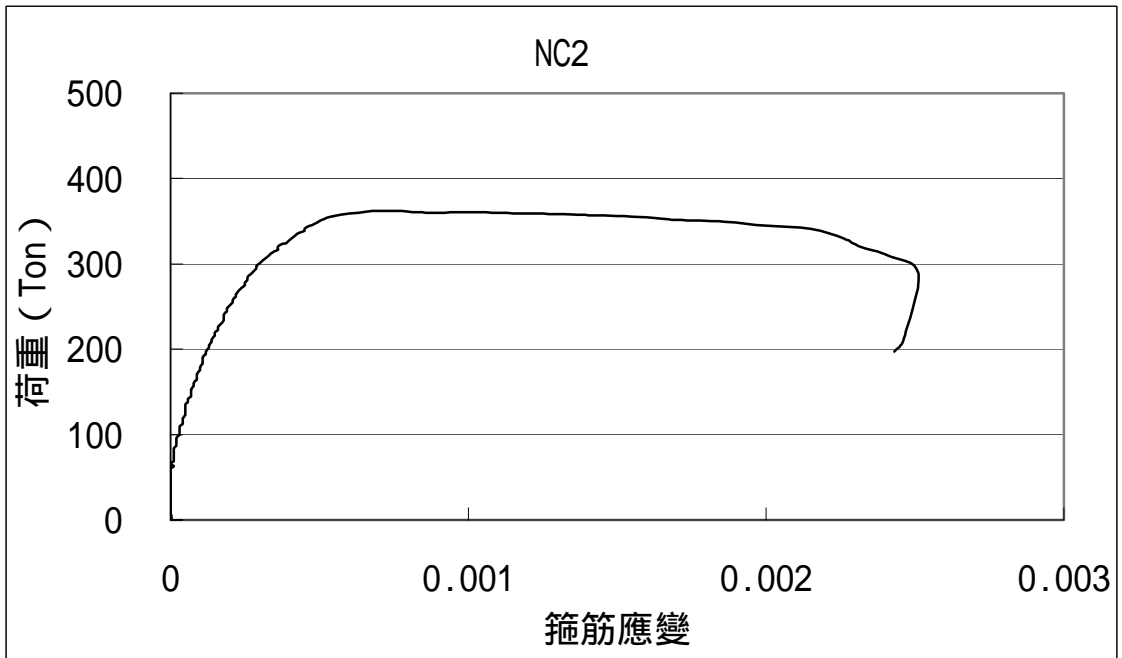


圖 4-5.10 NC2 荷重與箍筋應變關係

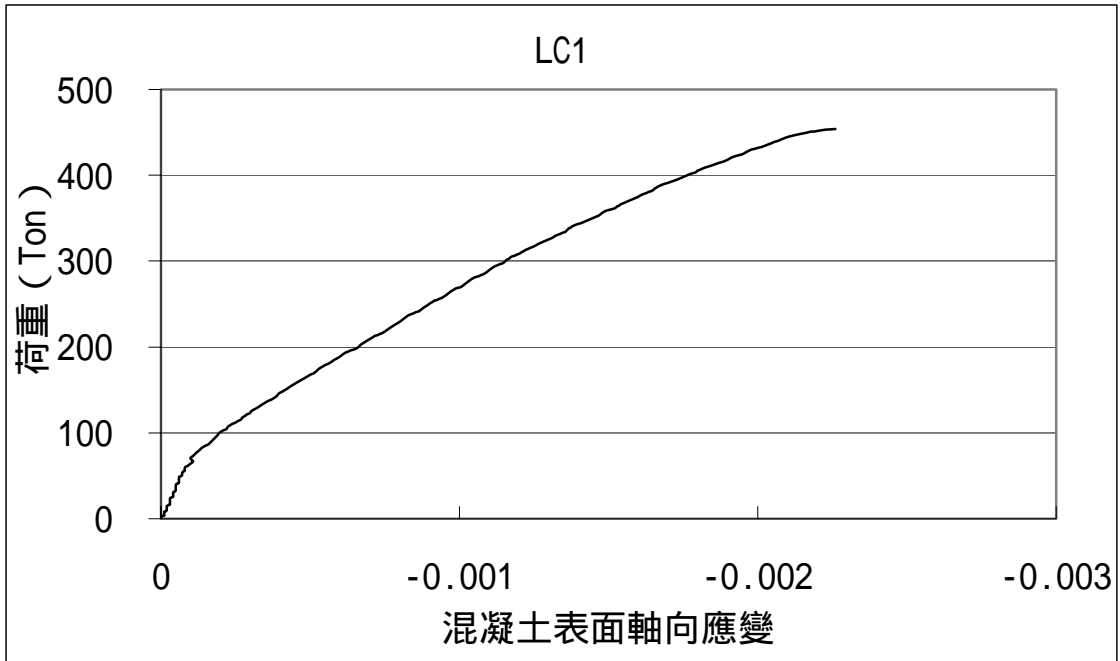


圖 4-5.11 LC1 荷重與混凝土表面軸向應變關係

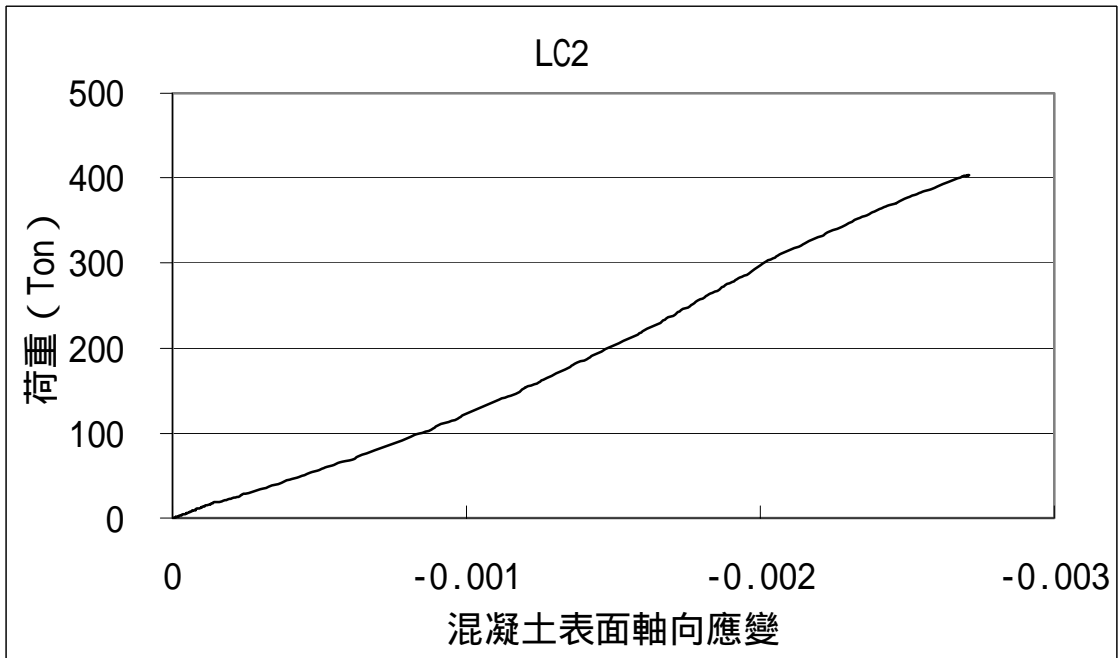


圖 4-5.12 LC2 荷重與混凝土表面軸向應變關係

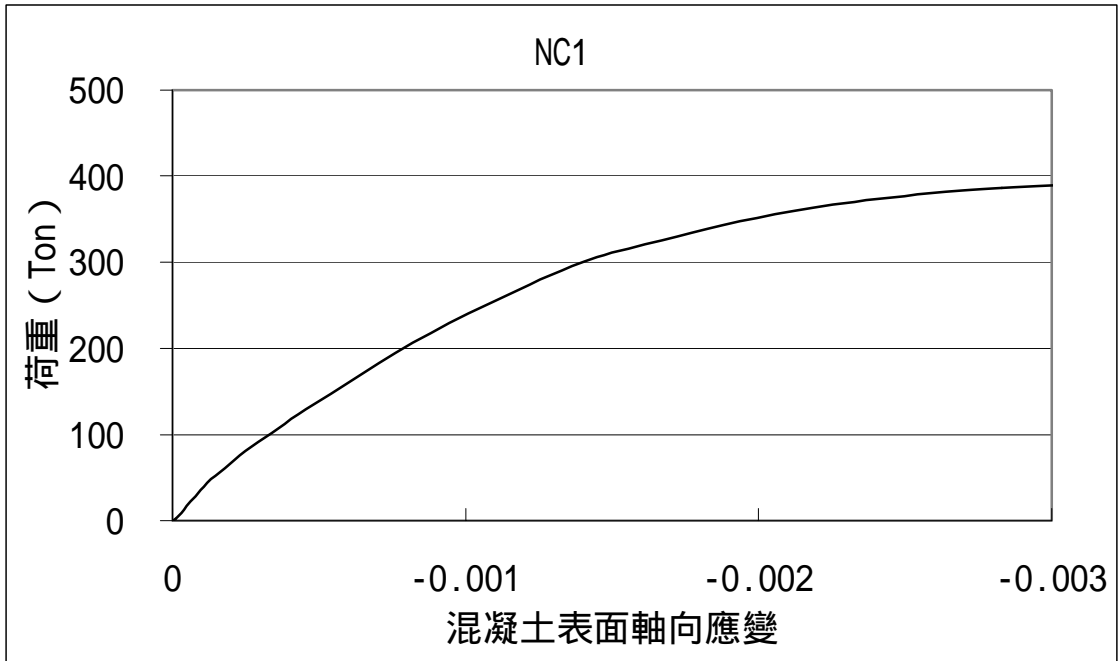


圖 4-5.13 NC1 荷重與混凝土表面軸向應變關係

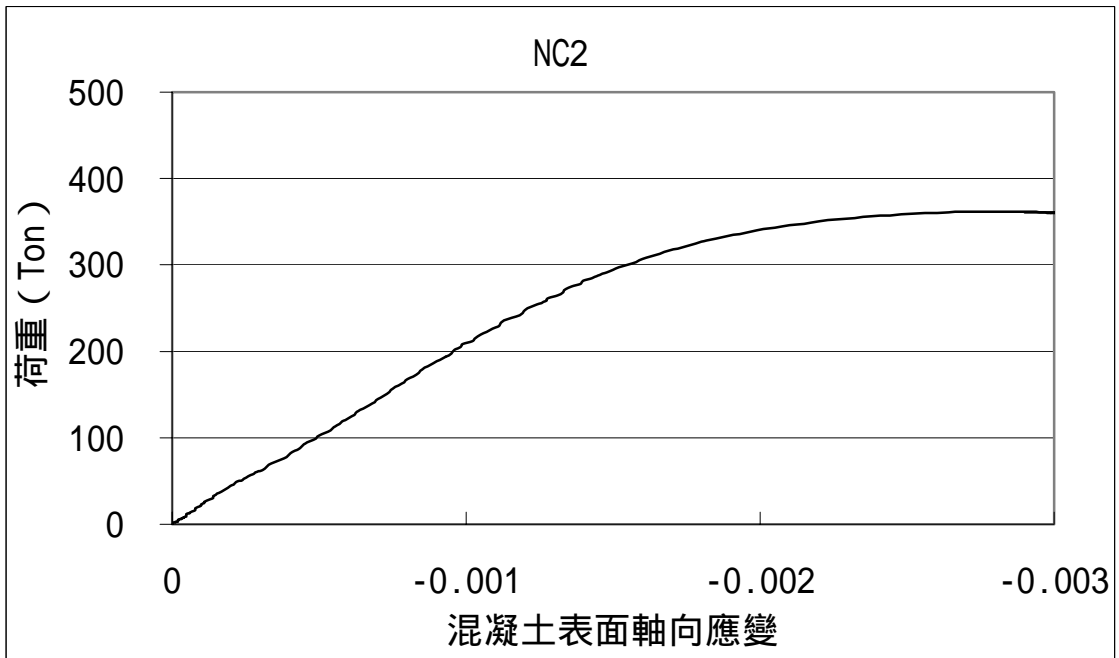


圖 4-5.14 NC2 荷重與混凝土表面軸向應變關係

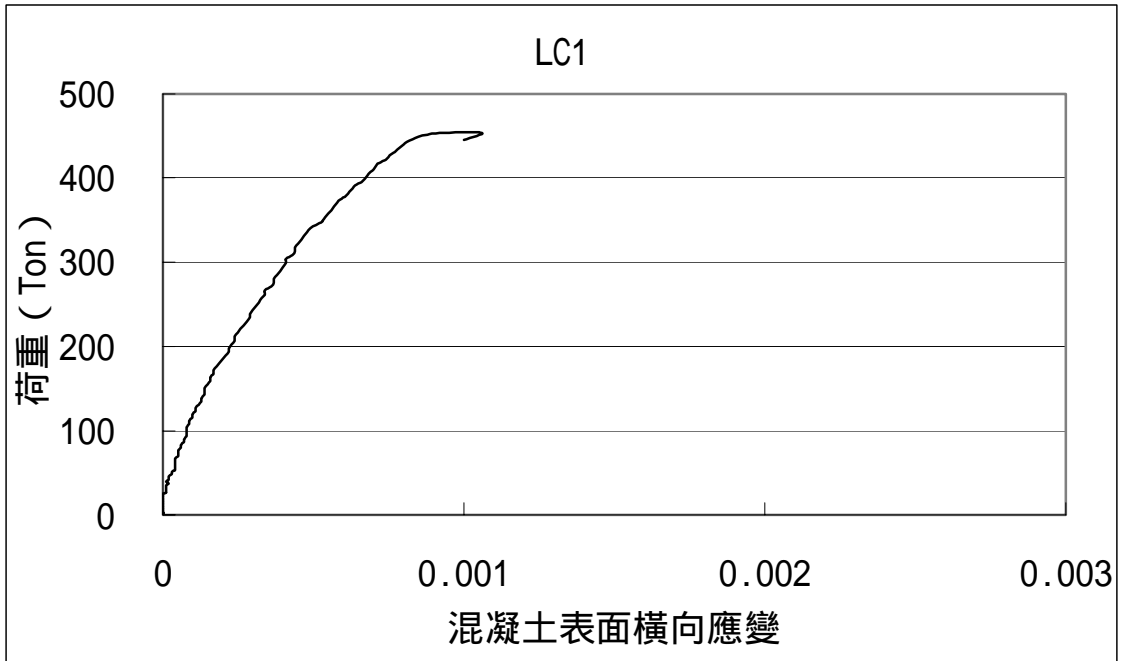


圖 4-5.15 LC1 荷重與混凝土表面橫向應變關係

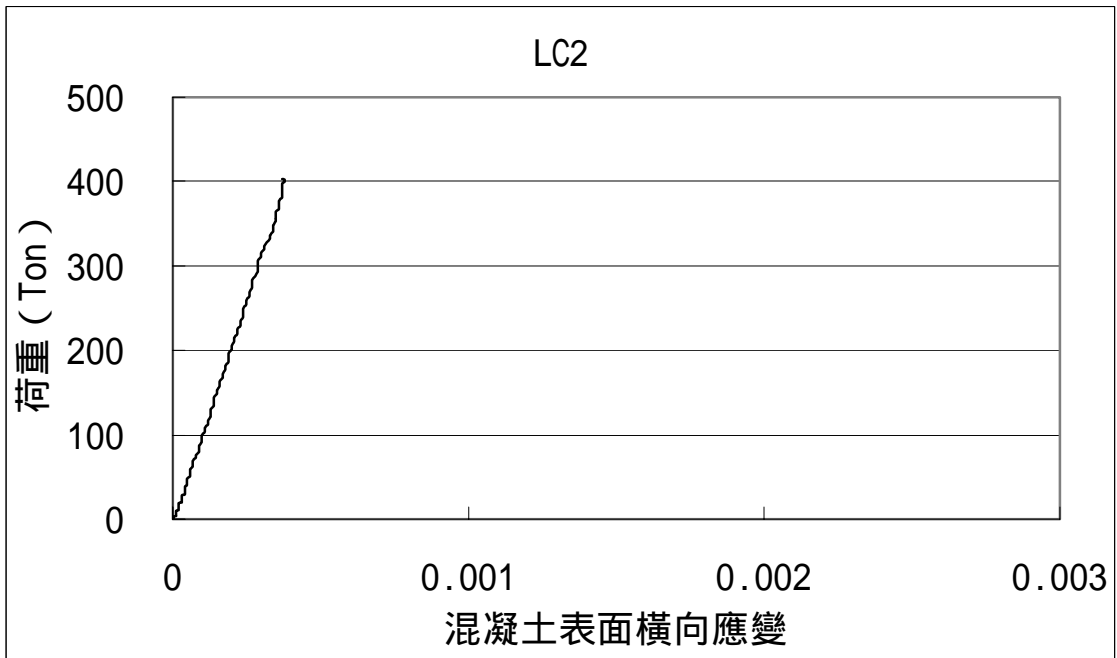


圖 4-5.16 LC2 荷重與混凝土表面橫向應變關係

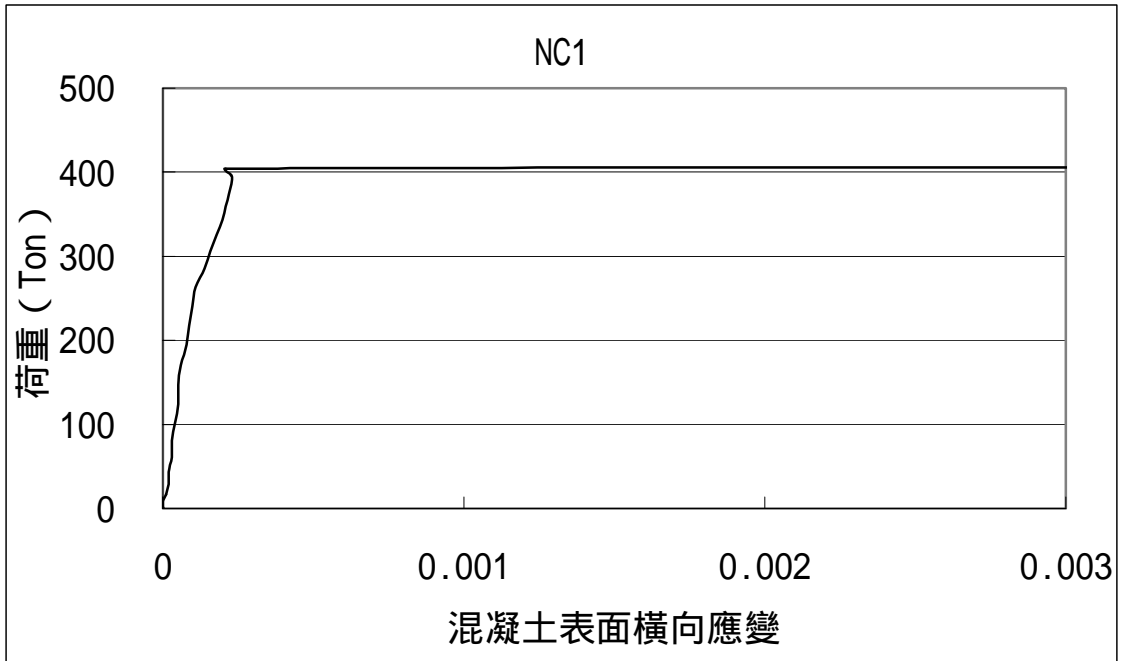


圖 4-5.17 NC1 荷重與混凝土表面橫向應變關係

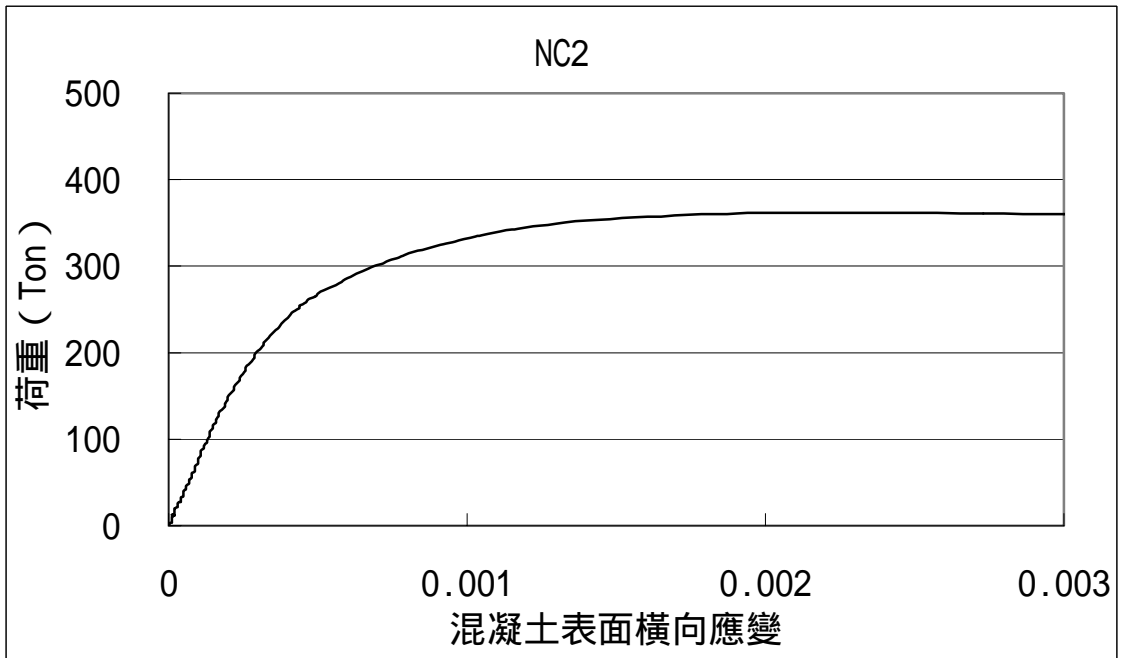


圖 4-5.18 NC2 荷重與混凝土表面橫向應變關係



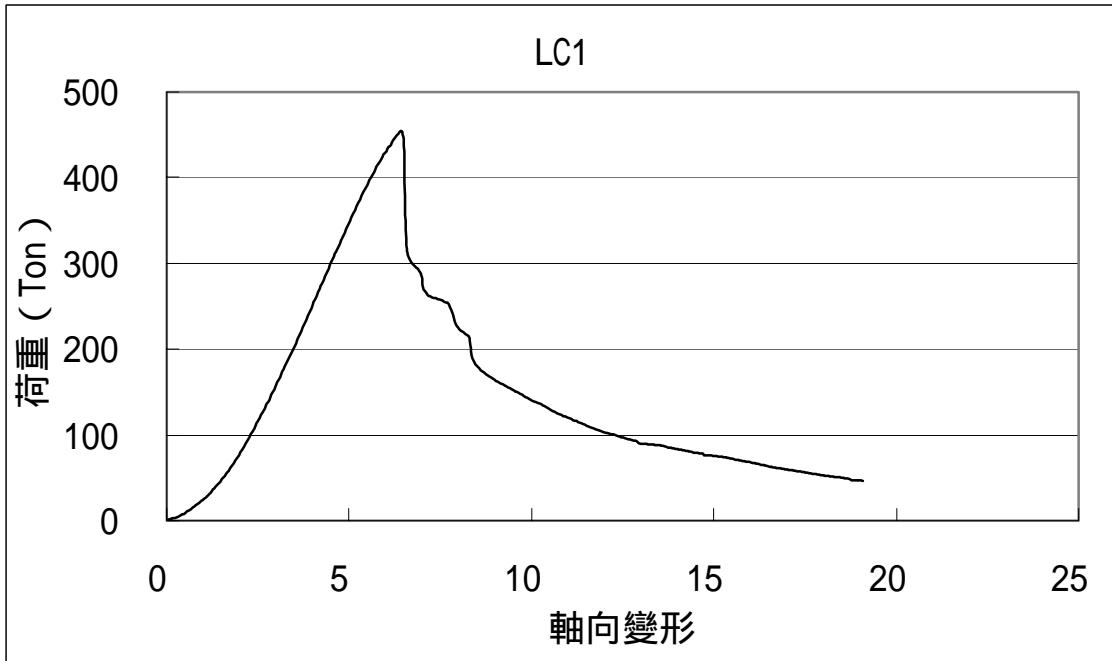


圖 4-5.19 LC1 荷重與軸向變形關係

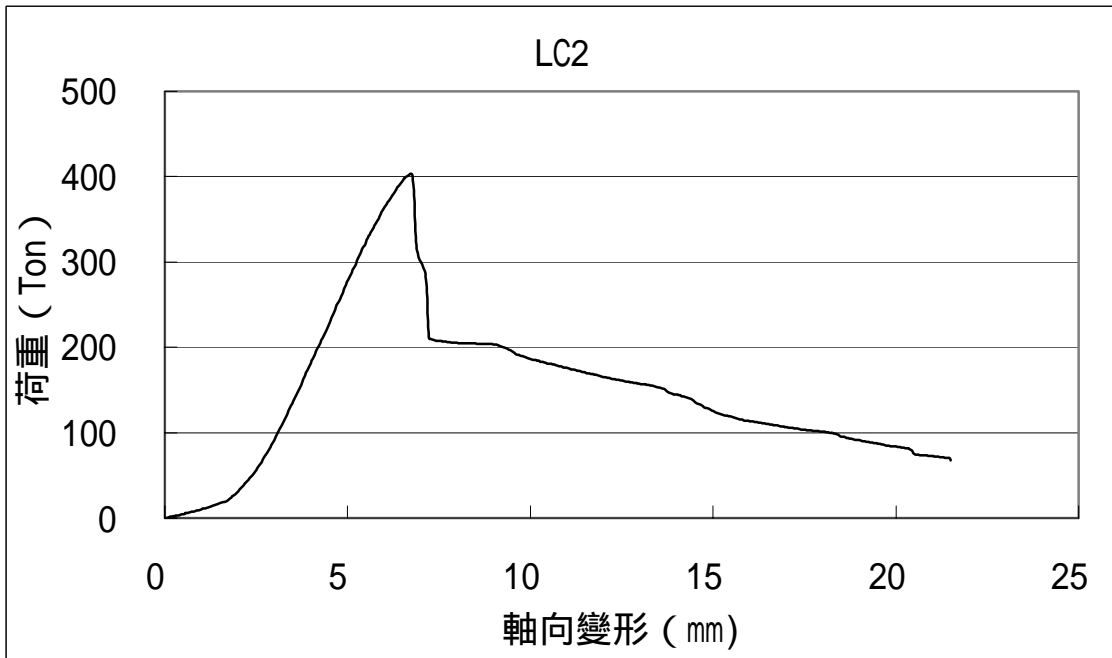


圖 4-5.20 LC2 荷重與軸向變形關係

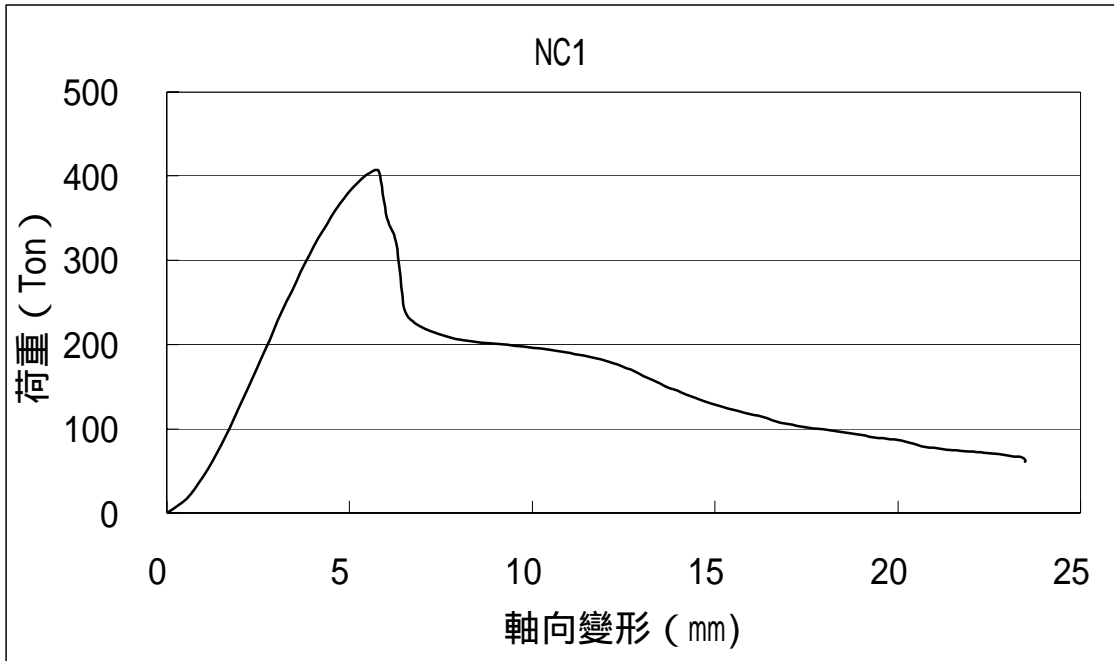


圖 4-5.21 NC1 荷重與軸向變形關係

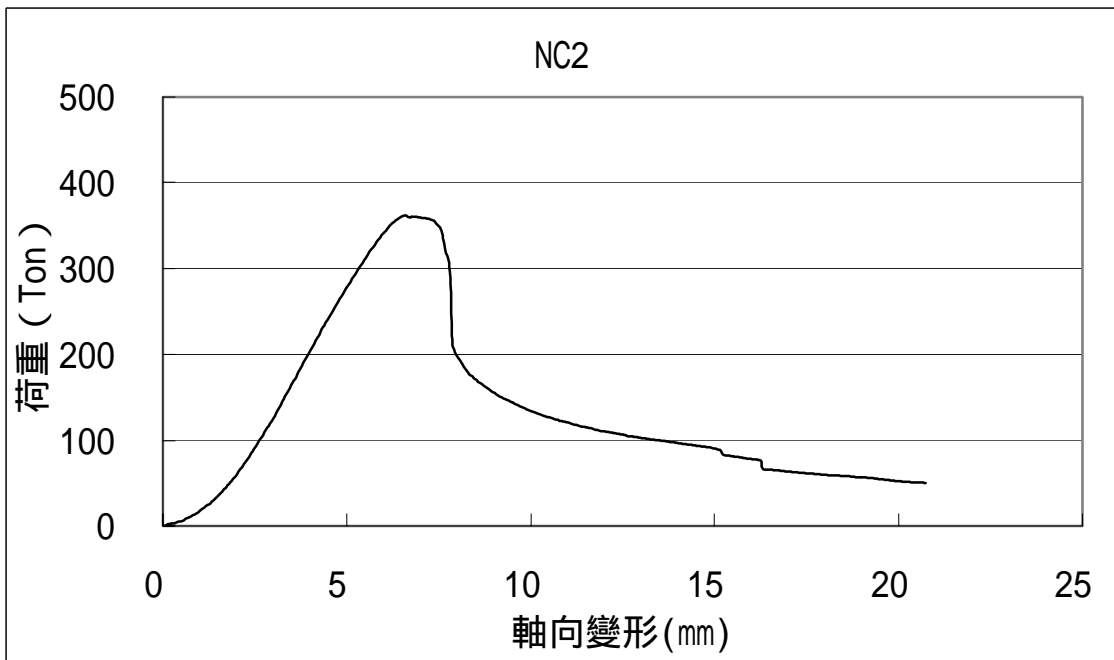
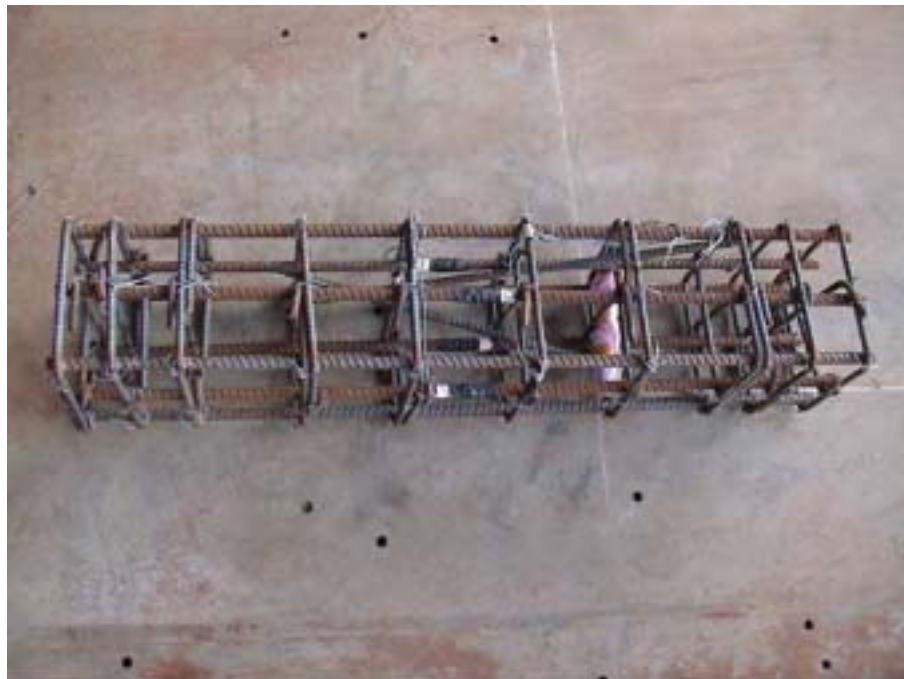
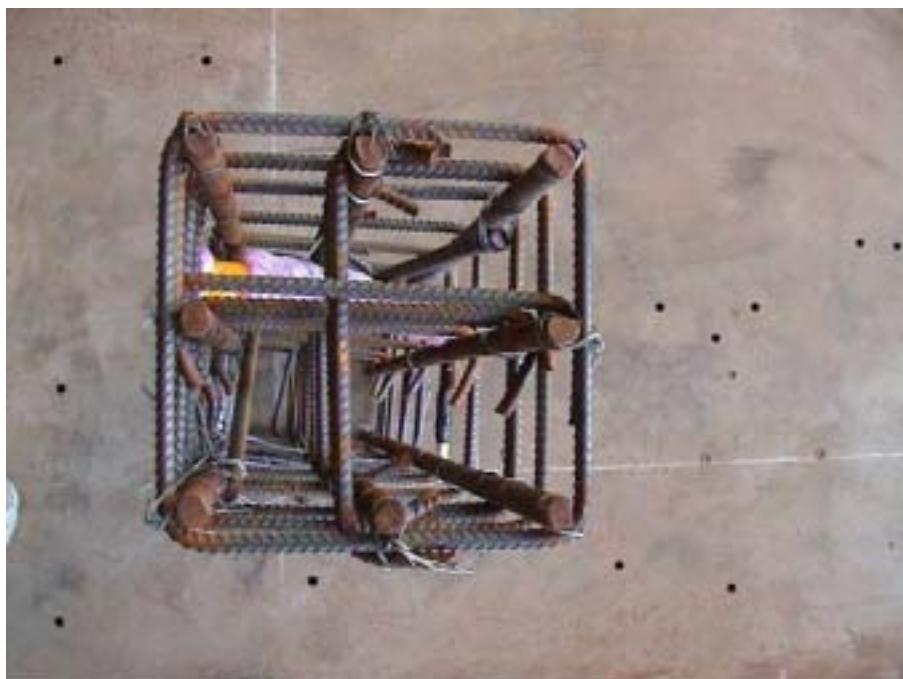


圖 4-5.22 NC2 荷重與軸向變形關係



照片 4-5.1 柱試體之長度與配筋



照片 4-5.2 柱試體之斷面與配筋



照片 4-5.3 柱試體在工廠灌注之情形



照片 4-5.4 柱試體在試驗室存放之情形



照片 4-5.5 柱試體進行試驗（一）

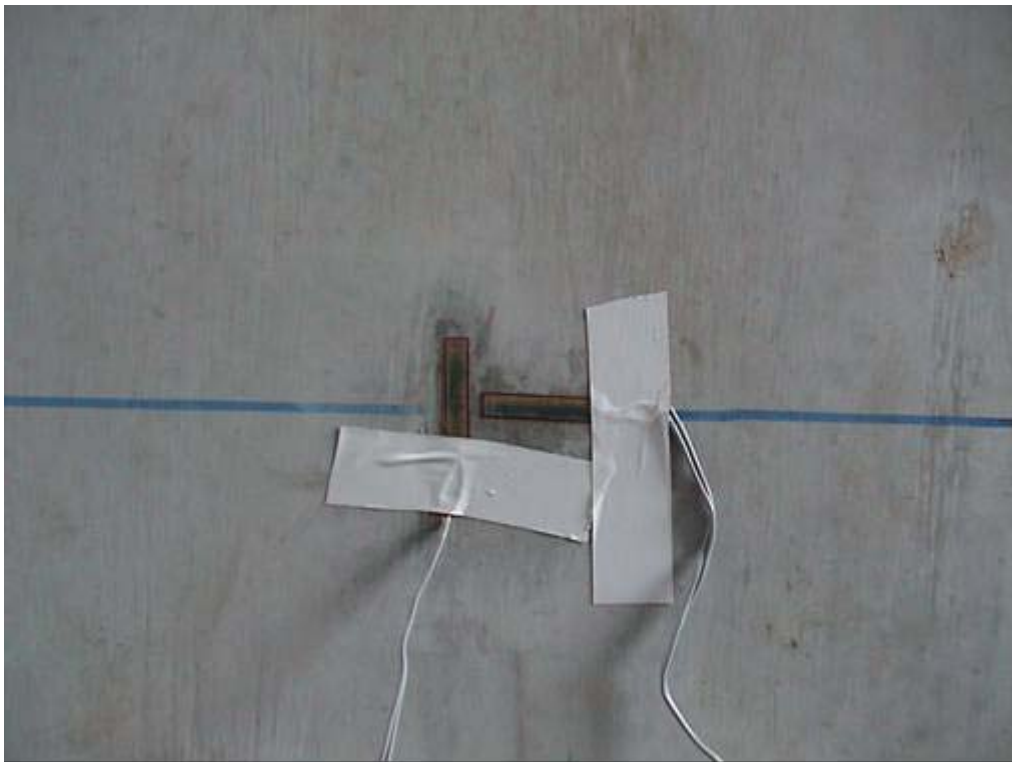


照片 4-5.6 柱試體進行試驗（二）





照片 4-5.7 柱試體混凝土應變計一



照片 4-5.8 柱試體混凝土應變計二



照片 4-5.9 LC1 破壞狀況



照片 4-5.10 LC2 破壞狀況



照片 4-5.11 NC1 破壞狀況



照片 4-5.12 NC2 破壞狀況



## 第六節 輕質骨材混凝土預鑄牆構件之性質研究

### 6.1 前言

隨著工業化發展對效率之要求以及建築物之往上發展趨勢，預鑄牆構件之使用漸趨普遍化，輕質骨材混凝土預鑄牆有兩大優勢，優勢之一為重量減輕，重量減輕之優勢在高層建築更為明顯，因為由於重量減輕可以使地震力變小，因此可使主要結構件之斷面變小，可以節省建造成本；優勢之二為隔熱性佳，預鑄外牆除了須抵抗風雨之侵襲外，還必須面臨烈日之照射，隔熱性佳之優勢除了可以節省夏日之冷氣能源外，冬季亦可降低室內之暖氣外逸速率，保持室內之舒適。然而輕質骨材混凝土預鑄牆必須具備適宜之結構行為，使得安全無虞後，上述之優勢始能有機會發揮。

### 6.2 研究目的

本研究之主要目的有二，其一為比較輕質骨材混凝土牆與常重混凝土牆之構件行為，以確認輕質骨材混凝土作為牆構件之適用性，此部分將以抗彎試驗進行探討；其二為藉比較輕質骨材混凝土牆構件與常重混凝土牆構件之隔熱效能，以探討輕質骨材混凝土牆構件隔熱性之優勢，此部分將以牆之隔熱試驗進行探討。

### 6.3 試體規劃

牆構件分別以常重混凝土與輕質骨材混凝土灌製，常重混凝土之配比如表 4-5.1 所示，輕質骨材混凝土之配比如表 4-5.2 所示。基本上都以 5000psi 為目標強度。

牆試體之尺寸有兩種，其一為 100×100 公分，用以試驗隔熱效能；另一為 100×300 公分，用以試驗結構行為，兩種試體之厚度都是 15 公分；兩種試體之配筋亦為相同，如圖 4-6.1 至 5-6.3 所示，基本上是雙層之#4 筋，間距為 30 公分，再配上雙層 6/6, 100×100 之 wire mesh。

本研究共有常重混凝土牆試體 100×100 公分者 3 片、100×300 公

分者 3 片；輕質骨材混凝土牆試體 100×100 公分者 4 片、100×300 公分者 4 片，如照片 4-6.1 所示。100×100 公分牆試體熱電偶之裝置如照片 4-6.1 所示，熱電偶之裝置乃是為了量測溫度梯度之用，100×300 公分牆試體應變計之裝置如照片 4-6.2 所示，應變計之裝置乃是為了探討構件之應力應變行為之用。照片 4-6.3 及 4-6.4 為牆試體於工廠灌注完畢後之情況。抗彎試驗牆試體及隔熱試驗牆試體目前已運回試驗室存放，如照片 4-6.5 至 4-6.8 所示。

## 6.4 試驗項目與方法

本研究之試驗分為材料試驗與構件試驗兩部分，材料試驗有四項，包含圓柱抗壓試驗、抗彎試驗、滲透試驗及熱傳試驗，試體數量亦如照片 4-6.1 所示。牆構件之主要試驗內容有兩項，其一為牆試體之抗彎試驗，其二為牆試體之隔熱試驗。所有試驗都同時使用常重混凝土與輕質骨材混凝土材料，兩者試驗結果都會加以比較。所有試驗項目之試驗方式及研究內容敘述如下：

### 一、材料試驗部分

#### 1. 圓柱抗壓試驗

參照 CNS1232 規範進行試驗，試體尺寸為  $10\phi\times 20\text{cm}$ ，將試驗 28 天之抗壓強度。

#### 2. 抗彎試驗

參照 CNS1233 規範進行試驗，試體尺寸為  $10\times 10\times 36\text{cm}$ ，將試體作成簡單支承型態，在其三分點施加载重，以求混凝土抗彎強度。

#### 3. 滲透試驗

試體尺寸為  $15\phi\times 30\text{cm}$ ，以  $5\text{kg}/\text{cm}^2$  之水壓進行 5 小時加

壓，將試驗齡期為 28 天試體之滲透深度。

#### 4. 劈裂試驗

參照 CNS3801 規範進行試驗，試體尺寸為  $15\phi\times 30\text{cm}$ ，將圓柱試體平躺放置於下承塊之上，再於試體上方放置上承塊，使圓柱試體中心線與上下承塊中心線重合。抗壓機直接施壓於上方承塊，直至圓柱試體劈開為止，以求混凝土劈裂強度。

#### 5. 熱傳導係數試驗

參照 CNS7333 規範進行試驗，試體尺寸為  $20\times 20\times 5\text{cm}$ ，以平板直接法測定齡期為 28 天試體之導熱係數。

## 二、牆構件試體試驗部分

### 1. 牆試體抗彎試驗

牆試體以抗彎試驗模擬牆之受風行為，牆試體之抗彎試驗如圖 4-6.4 所示，兩個線形荷重作用於牆試體之三分之一位置，牆試體之兩端以簡單支撐方式處理，牆試體下緣將裝置位移計以記錄下陷資料，試驗將以位移控制方式進行，試驗將進行至牆試體完全壓壞為止，如照片 4-6.9 至照片 4-6.12。本項試驗將探討下列幾點議題：

#### (1) 牆構件內材料之荷重應變關係

將輕質骨材混凝土牆與常重混凝土牆以位移控制法施加線形荷重至完全破壞為止，根據應變計之資料，繪出輕質骨材混凝土牆與常重混凝土牆內鋼筋及混凝土之應力應變關係，比較兩者之異同，藉以探討輕質骨材混凝土作為牆構件材料之可行性。

## (2) 牆構件之荷重變形行為

將輕質骨材混凝土牆與常重混凝土牆以位移控制法施加線形荷重至完全破壞為止，根據位移計及應變計之讀數，繪圖探討兩者 28 天之彈性段、塑性段以及延展性之異同，藉以探討輕質骨材混凝土作為牆構件材料之可行性。

## (3) 牆構件之破壞模式

由於試體都將被壓至破壞為止，因此輕質骨材混凝土牆與常重混凝土牆之破壞模式將被探討比較。

## 2. 牆試體之隔熱試驗

由於輕質骨材之孔隙較多，牆構件若以輕質骨材混凝土灌製，理應隔熱效果較佳，尤其是外牆必須面臨夏日陽光之照射以及冬日寒流之侵襲，較佳之隔熱性質除了舒適度較佳外，長久下來也必能結省大量能源，本項試驗即在探討常重混凝土牆構件與輕質骨材混凝土牆構件隔熱效能之差異。

在  $100 \times 100 \times 15$ cm 牆試體之中央位置埋設有熱力偶，試驗時將於牆體之一側設置固定熱源，熱量將自熱源側傳至另外一側，試驗時將持續記錄熱力偶之溫度資料，根據這些資料可求得各時間段牆體內之溫度梯度，將常重混凝土牆試體與輕質骨材混凝土牆試體都進行同樣之試驗，以比較兩者之隔熱效能，試驗方式如照片 4-6.13 及照片 4-6.14 所示。

## 6.5 實驗結果分析與討論

### 一、材料試驗部分

#### 1. 圓柱抗壓試驗

圓柱抗壓試驗之實驗結果如表 4-6.2 所示，常重混凝土抗

壓強度為  $400\text{kg}/\text{cm}^2$ ，輕質骨材混凝土兩車之強度有些差異，輕質混凝土之抗壓強度為  $430\text{kg}/\text{cm}^2$ ，輕質混凝土之抗壓強度為  $390\text{kg}/\text{cm}^2$ 。輕質骨材混凝土圓柱試體之破壞模式為，破壞面皆穿過輕質骨材，參考照片 4-6.15，常重混凝土則無此現象，參考照片 4-6.16。此現象係因輕質骨材之強度較差，在  $400\text{kg}/\text{cm}^2$  壓力下，輕質骨材已無法承受，因而破裂面貫穿而過。

## 2. 抗彎試驗

抗彎試驗之實驗結果如表 4-6.3 及照片 4-6.17 所示。常重混凝土的破裂模數平均值約為  $68.7(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ ，而輕質混凝土 L1 之平均值約為  $40.6(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ ，L2 之平均值約為  $33.7(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 。整體而言，輕質混凝土的抗彎能力比常重混凝土差。

## 3. 滲透試驗

滲透試驗之實驗結果如表 4-6.4 及照片 4-6.18 所示，輕質混凝土 L1 的抗壓強度比 L2 高，因而較為致密，故抗滲透較佳，但 L1 及 L2 的抗滲透能力都比常重來的佳。此原因可能是水庫淤泥燒結之輕質骨材表面磁化較佳之故，造成輕質骨材之滲透性較常重骨材為佳。

## 4. 劈裂試驗

劈裂試驗之實驗結果如表 4-6.5 所示，此表顯示常重混凝土與輕質混凝土劈裂強度相近。破壞模式方面，由於輕質混凝土骨材強度較差，故其破壞面皆穿過骨材，如照片 4-6.19 所示，常重混凝土則於介面區破壞，如照片 4-6.20 所示。

## 5. 熱傳導係數試驗

熱傳導係數試驗之實驗結果如表 4-6.6 所示，輕質混凝土

L1 的熱傳導係數為  $0.91(\text{kcal}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$  ; L2 的熱傳導係數為  $0.77(\text{kcal}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$  , 常重混凝土熱傳導係數為  $1.43(\text{kcal}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$  , 輕質骨材混凝土之熱傳導係數接比常重混凝土小很多。

## 二、牆構件試體試驗部分

### 1. 牆試體抗彎試驗

抗彎試驗之牆試體共有 4 個，常重混凝土兩個，編號為 NW1 及 NW2；輕質第一批料製成之牆試體為 LW1，輕質第二批料製成之牆試體為 LW2。牆試體抗彎試驗結果如表 4-6.7 及圖 4-6.5 至圖 4-6.20 所示。破壞狀況如照片 4-6.20 及 4-6.21 所示。此部分之試驗結果分為下列三方向加以討論。

#### (1) 牆構件內材料之荷重應變關係

觀察荷重與上層鋼筋應變關係（圖 4-6.5 至圖 4-6.8），發現不論是常重牆或輕質牆，都有中性軸由上層鋼筋下方轉移至上層鋼筋上方之情況，使得上層鋼筋由受壓狀況改為受拉狀況。常重牆約在荷重為 4ton 以後，中性軸移動至上層鋼筋之上，輕質牆分別在 7ton 和 10ton 以後，才發生此種情況。此乃由於輕質混凝土的握裹強度優於常重混凝土之故，使下層鋼筋能發揮的強度較高，中性軸轉移之速度較慢。

觀察荷重與下層鋼筋應變關係（圖 4-6.9 製圖 4-6.12），常重牆及輕質牆試體下層鋼筋自始至終都承受拉力，且都有明顯之降服現象出現，但只有輕質牆試體之下層鋼筋有應變硬化現象出現，此種現象可能是輕質混凝土的握裹強度比常重混凝土為佳，使下層鋼筋可以完全發揮作用之故，也因而造成輕質牆試體的破壞是漸進的而常重牆試體的破壞是急遽的。

觀察荷重與混凝土應變關係(圖 4-6.13 至圖 4-6.16), 輕質牆與常重牆的混凝土應變行為非常相近。

### (2) 牆構件之荷重變形行為

牆構件之荷重變形試驗結果如表 4-6.7 所示, 此表顯示四個試體之極限荷重大致相等, 但輕質骨材混凝土試體 LW1 及 LW2 的極限荷重所對應的中點極限變位(88.3 及 84.7mm)比常重混凝土試體 NW1 及 NW2(74.5 及 66.4mm)稍大, 由於各試體之斷面都一樣大, 此部分之勁度較小應是由於輕質骨材混凝土之彈性係數較小所造成。另外, 由荷重與中點變位關係(圖 4-6.17 至圖 4-6.20), 顯示常重與輕質牆試體之抗彎行為非常類似。

### (3) 牆構件之破壞模式

牆試體試驗之破壞狀況如照片 4-6.21 及 4-6.22 所示, 試驗結果顯示兩者之破壞模式完全一樣。

工廠量產化製作之輕質骨材混凝土牆表現出較佳之鋼筋握裹能力, 但也表現出較差之勁度, 不過整體而言, 整個牆試體之抗彎行為基本上與常重混凝土牆極為相似, 因此無論是結構或非結構用途, 工廠量產化製作之輕質骨材混凝土牆可以取代常重混凝土牆使用。

## 2. 牆試體之隔熱試驗

利用 1200W 的加熱器進行實驗, 試驗裝置如圖 4-6.5 所示, 試體隔熱試驗數據如表 4-6.8 至表 4-6.13 所示, 加熱時間與試體溫度變化曲線如圖 4-6.21 至圖 4-6.26。

在相同的加熱功率下, 加熱一小時(表 4-6.8)後, 輕質骨材混凝土牆試體 LT1、LT2 及 LT3 牆外表面溫度變化平均

為 34.4 ，牆內表面溫度變化平均為 0.4 (牆內表面尚無明顯溫度變化，加熱一小時應以加熱初期視之)；常重混凝土牆試體 NT1、NT2 及 NT3 牆外表面溫度變化平均為 30.1 ，牆內表面溫度變化平均為 1.7 ，輕質牆之外表面較常重牆之外表面高 3.3 ，輕質牆之內表面較常重牆之內表面低 1.3 。此乃由於輕質骨材混凝土的熱傳導係數為 ( 0.91 或 0.77 kcal/m.°C.hr) ，小於常重混凝土的熱傳係數 ( 1.43 kcal/m.°C.hr) ，在相同的加熱條件下，輕質牆將大部分熱量阻擋在牆外，導致輕質牆外表面溫度上升比常重牆高，而內表面的溫度上升則較慢。再從牆內外表面在加熱 1 小時之溫差值而言，輕質牆內外牆溫差之平均值為 33.9 ，常重牆內外牆溫差之平均值為 28.4 ，也顯示出輕質牆之隔熱效果。

加熱時間 2-5 小時後 ( 如表 4-6.9 至表 4-6.13 和圖 4-6.22 至圖 4-6.26 ) ，其溫度變化的趨勢亦相近。以加熱 5 小時(第 6 小時)者而言，參考表 4-6.13，輕質骨材混凝土牆試體 LT1、LT2 及 LT3 牆內表面溫度變化平均為 15.2 ，常重混凝土牆內表面溫度變化平均為 17.4 ，(牆內表面已有溫度變化，根據自然界日照時間週期，加熱五小時可以加熱長期視之)，兩者內表面溫度差相差達 2 ，在常期高熱日晒下，大規模之建築物，室內溫度若能降低 2 ，可以節約龐大之能源費用。再分別觀察兩種牆試體之內外表面溫差，輕質牆之內外表面溫差平均為 38.5 ，常重牆之內外表面溫差平均為 27.2 ，兩者相差高達 11.3 ，也展現出輕質牆之優異隔熱功能。另外，就加熱時間與溫度變化曲線而言(圖 4-6.21 至圖 4-6.26)，發現輕質牆的曲線分佈較為分散，常重牆的曲線分佈比較集中。整體而言，輕質骨材混凝土牆顯示較為優良之隔熱效果。

## 6.6 小結

1. 材料性質方面，輕質混凝土抗彎能力比常重混凝土小，抗滲透能力和隔熱性都比常重混凝土佳。



2. 就中強度混凝土而言，輕質混凝土的握裹強度優於常重混凝土，所以輕質牆的下層鋼筋能完全發揮鋼筋材料強度。
3. 就中強度混凝土而言，由於輕質骨材之強度較差，各項輕質骨材混凝土材料試驗之破壞面都從骨材直接貫穿，常重混凝土之材料試驗則無此現象。
4. 工廠量產化製作之輕質骨材混凝土牆表現出較佳之鋼筋握裹能力，但也表現出較差之勁度，不過整體而言，整個牆試體之抗彎行為基本上與常重混凝土牆極為相近，因此無論是結構或非結構用途，工廠量產化製作之輕質骨材混凝土牆可以取代常重混凝土牆使用。
5. 輕質混凝土的隔熱性較佳，易將熱能阻隔於外層，使傳到室內的熱能減少。故輕質牆的外表面溫度高於常重牆，內表面的溫度比常重牆低，在烈日長期照射下，輕質骨材混凝土牆可以低 2°C。
6. 輕質混凝土結構韌性之補強建議使用鋼筋；輕質混凝土材料韌性之補強建議使用鋼纖維。

表 4-6.1 牆試體與材料試驗試體之數量

試體名稱	試體尺寸 cm	試體數量			備註
		輕質	常重	總計	
牆(1)	300×100×15	4	3	7	三分點載重試驗 試驗齡期 28 天
牆(2)	100×100×15	4	3	7	溫度梯度試驗試 驗齡期 28 天
圓柱試體	Φ10×20	24	12	36	抗壓試驗 試驗齡期為 3、7、 14、28 天
抗彎試體	10×10×36	6	3	9	抗彎試驗 試驗齡期 28 天
滲透試體	Φ15×30	6	3	9	滲透、劈裂試驗 試驗齡期 28 天
熱傳試體	20×20×5	6	3	9	熱傳試驗 試驗齡期 28 天

表 4-6.2 圓柱試體抗壓強度

	破壞荷重 ( kg )	應力 (kg/cm <sup>2</sup> )	平均應力 (kg/cm <sup>2</sup> )
N	31733	404.04	400.47
	31172	396.89	
L1	32956	419.61	431.11
	34740	442.32	
L2	29836	379.88	393.02
	31899	406.15	

表 4-6.3 抗彎破裂模數

	抗彎強度 ( kg )	破裂模數(kgf/cm <sup>2</sup> )
N	2004.9	60.1470
	2396.1	71.8830
	2493.9	74.8170
L1	1369.2	41.0760
	1662.6	49.8780
	1026.9	30.8070
L2	1271.9	38.1570
	1075.8	32.2740
	1026.9	30.8070

表 4-6.4 滲透試驗結果

	乾重 (kg)	滲透後 重 (kg)	滲透水 量(g)	滲透深 度 (左) mm	滲透深 度 (中 心) mm	滲透深 度 (右) mm	滲透寬 度 mm
N	11.893	11.929	36	39.4	27.4	29.7	116.7
	11.908	11.933	25	36.9	27.9	24.9	118.6
	11.926	11.967	41	45.4	31.2	32.1	123.4
L1	9.733	9.756	22	32.1	27.2	24.0	103.9
	9.734	9.756	21	34.9	23.1	24.9	88.9
	9.797	9.822	25	32.3	26.8	23.0	113.4
L2	8.685	8.716	31	33.7	20.2	27.8	105.9
	8.733	8.768	35	34.4	23.2	24.7	100.7
	8.946	9.015	69	50.7	37.8	40.1	150.0

表 4-6.5 劈裂試驗結果

	劈裂強度( kgf )	抗張應力強度 ( kg/cm <sup>2</sup> )	平均抗張應力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
N	22790	32.24	
	19230	27.21	28.88
	19210	27.18	
L1	20120	28.46	
	24350	34.45	31.53
	22380	31.66	
L2	16710	23.64	
	17870	25.28	25.44
	19370	27.40	

表 4-6.6 熱傳導係數試驗結果

	導熱係數 (kcal/m.°c.hr)	平均
N	1.430570	1.43152
	1.449086	
	1.414917	
L1	0.907538	0.91312
	0.917972	
	0.913850	
L2	0.765935	0.77269
	0.749910	
	0.802226	

表 4-6.7 牆試體極限荷重及中點極限變位

	LW1	LW2	NW1	NW2
極限荷重 (ton)	16.0	15.0	14.9	16.5
極限變位 (mm)	88.3	84.7	74.5	66.4

表 4-6.8 牆試體隔熱試驗第 1 小時溫度變化

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	牆內外 面 溫 差	平均 溫 差
LT1	31.1	13.1	6.4	3.2	0.3	30.7	33.9
LT2	34.5	16.3	4.6	1.6	0.4	34.0	
LT3	37.6	13.0	6.2	2.2	0.6	37.0	
NT1	28.8	9.9	4.5	2.5	1.3	27.5	28.4
NT2	32.8	11.5	6.3	3.6	2.0	30.9	
NT3	28.7	9.0	5.6	3.6	1.8	26.9	

註：ch1 為牆外表面，ch5 為牆內表面，其餘介於兩者之間。

表 4-6.9 牆試體隔熱試驗第 2 小時溫度變化

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	牆內外 面 溫 差	平均 溫 差
LT1	38.9	22.0	14.4	9.8	4.5	34.4	37.9
LT2	42.1	25.3	11.9	7.3	3.7	38.5	
LT3	45.3	22.5	14.6	8.5	4.5	40.8	
NT1	34.4	17.0	11.5	8.0	5.5	29.0	29.4
NT2	38.9	19.4	13.6	10.5	7.3	31.6	
NT3	34.4	16.4	12.7	10.2	6.6	27.7	

註：ch1 為牆外表面，ch5 為牆內表面，其餘介於兩者之間。

表 4-6.10 牆試體隔熱試驗第 3 小時溫度變化

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	牆內外表面 溫差	平均 溫差
LT1	44.7	28.4	20.5	16.1	9.3	35.5	38.5
LT2	46.5	31.0	18.0	12.8	7.6	38.9	
LT3	50.1	29.2	21.3	14.8	8.9	41.2	
NT1	36.9	21.9	16.4	12.8	10.3	26.6	28.2
NT2	42.6	25.1	19.4	16.0	11.7	30.8	
NT3	38.2	22.2	18.3	15.8	11.0	27.2	

註：ch1 為牆外表面，ch5 為牆內表面，其餘介於兩者之間。

表 4-6.11 牆試體隔熱試驗第 4 小時溫度變化

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	牆內外表面 溫差	平均 溫差
LT1	48.5	34.0	25.8	21.0	12.8	35.6	38.5
LT2	49.8	35.4	23.0	17.6	11.2	38.6	
LT3	53.9	34.4	26.6	19.9	12.8	41.2	
NT1	41.3	26.2	21.4	17.7	14.3	27.0	28.1
NT2	45.0	29.4	23.7	20.4	14.3	30.8	
NT3	41.2	26.6	22.7	20.2	14.7	26.5	

註：ch1 為牆外表面，ch5 為牆內表面，其餘介於兩者之間。

表 4-6.12 牆試體隔熱試驗第 5 小時溫度變化

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	牆內外 面 溫 差	平均 溫 差
LT1	51.3	38.0	29.6	25.3	15.9	35.4	38.5
LT2	52.8	38.9	27.0	21.5	14.0	38.7	
LT3	57.3	38.5	30.8	24.1	15.7	41.5	
NT1	43.2	29.3	24.2	20.3	16.8	26.3	27.2
NT2	46.9	32.8	27.2	23.9	18.0	29.0	
NT3	43.6	30.0	26.2	23.6	17.4	26.3	

註：ch1 為牆外表面，ch5 為牆內表面，其餘介於兩者之間。

表 4-6.13 牆試體隔熱試驗第 6 小時溫度變化

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	牆內外 面 溫 差	平均 溫 差
LT1	53.5	41.1	33.1	28.7	18.5	35.0	38.4
LT2	54.8	41.6	30.2	24.6	16.0	38.8	
LT3	59.5	41.9	34.4	27.6	18.1	41.4	
NT1	45.7	32.1	27.3	23.4	19.0	26.7	27.1
NT2	48.8	35.8	30.2	26.8	20.4	28.4	
NT3	45.6	32.7	28.9	26.2	19.4	26.2	

註：ch1 為牆外表面，ch5 為牆內表面，其餘介於兩者之間。



1. 牆版標準配筋

W=1.0M

H=3.0M

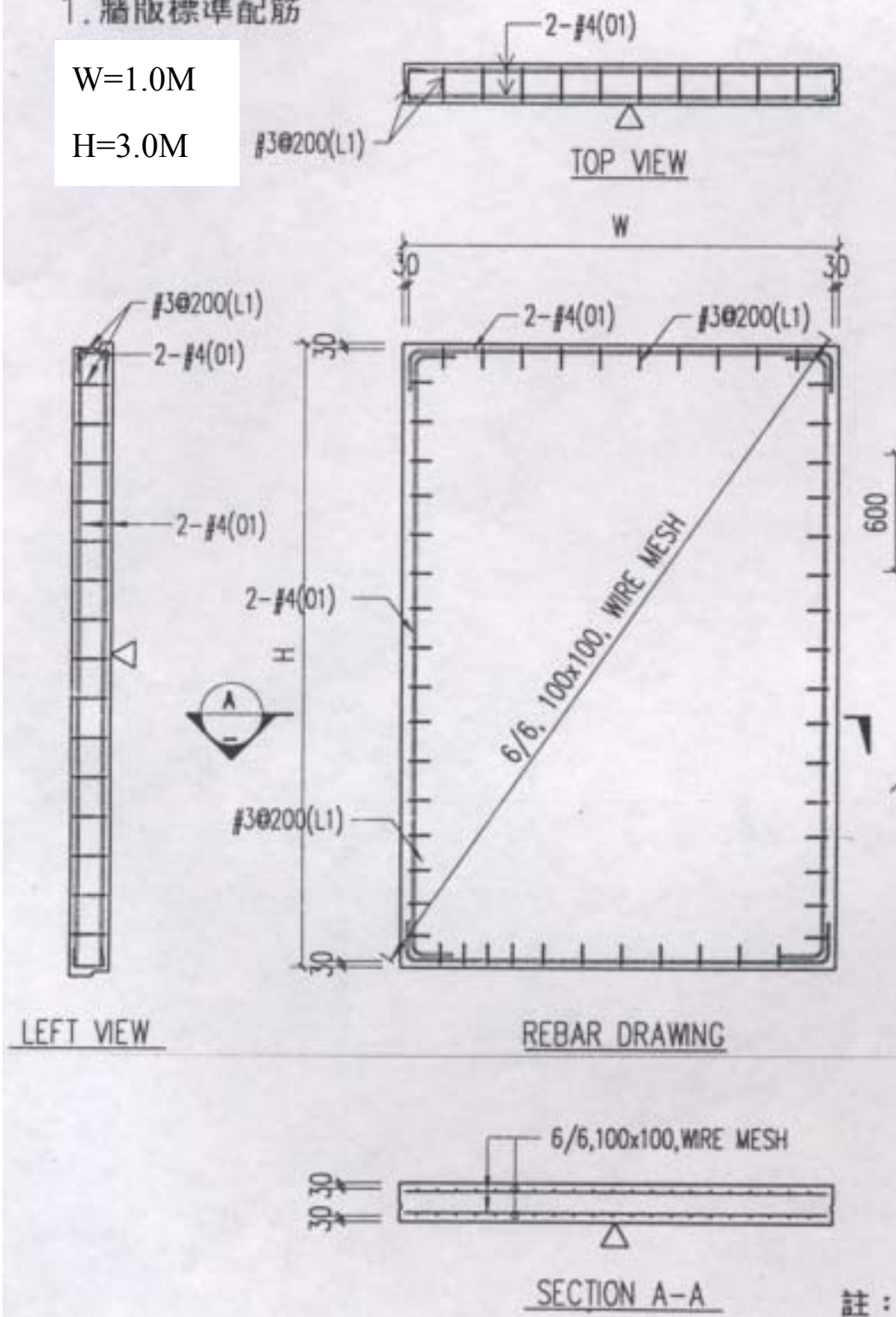


圖 4-6.1 牆試體配筋圖(一)

1. 版片垂直補強筋

W=1.0M  
H=3.0M

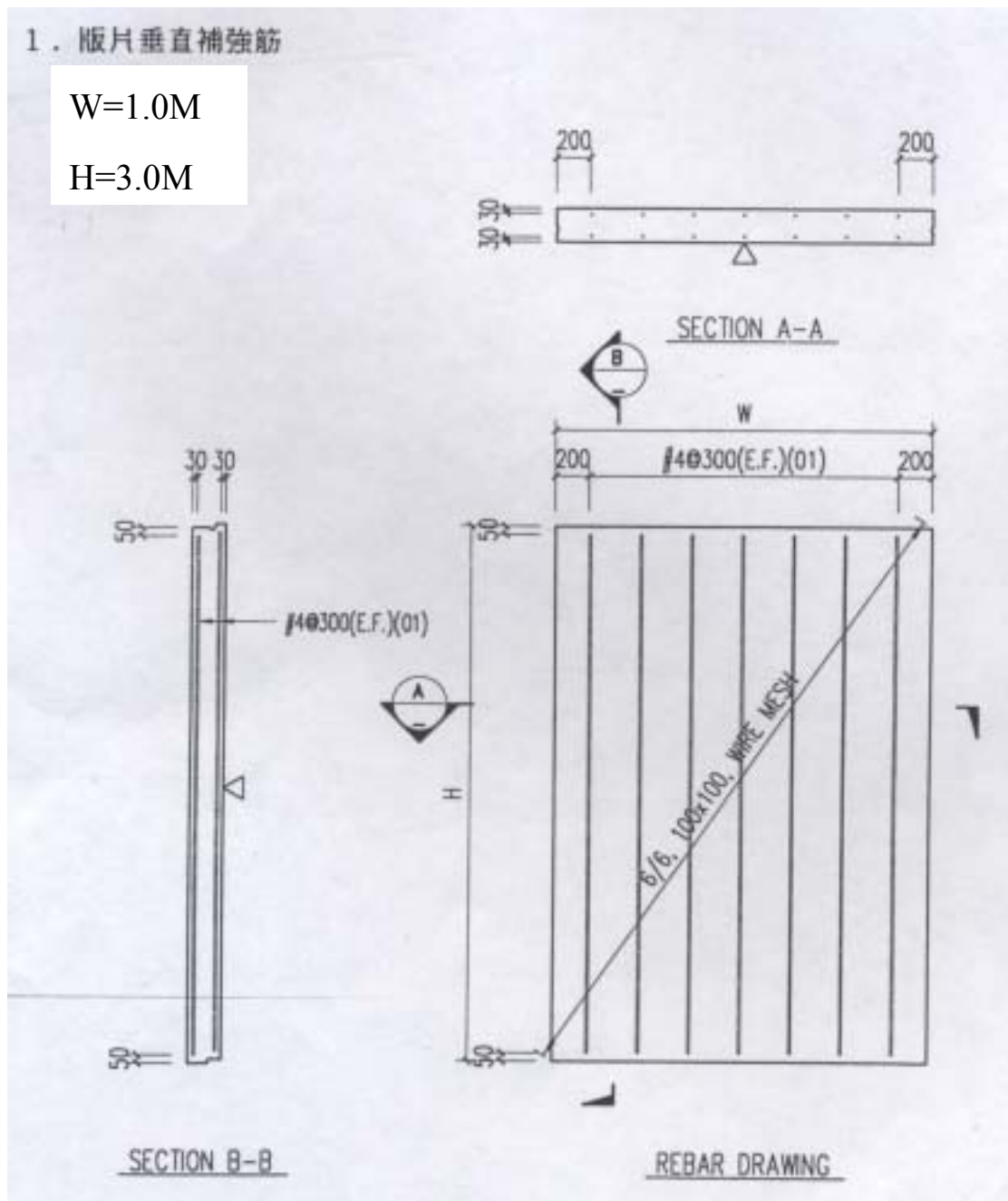


圖 4-6.2 牆試體配筋圖(二)

2. 版片水平補強筋：版片寬 $W > 1.0M$

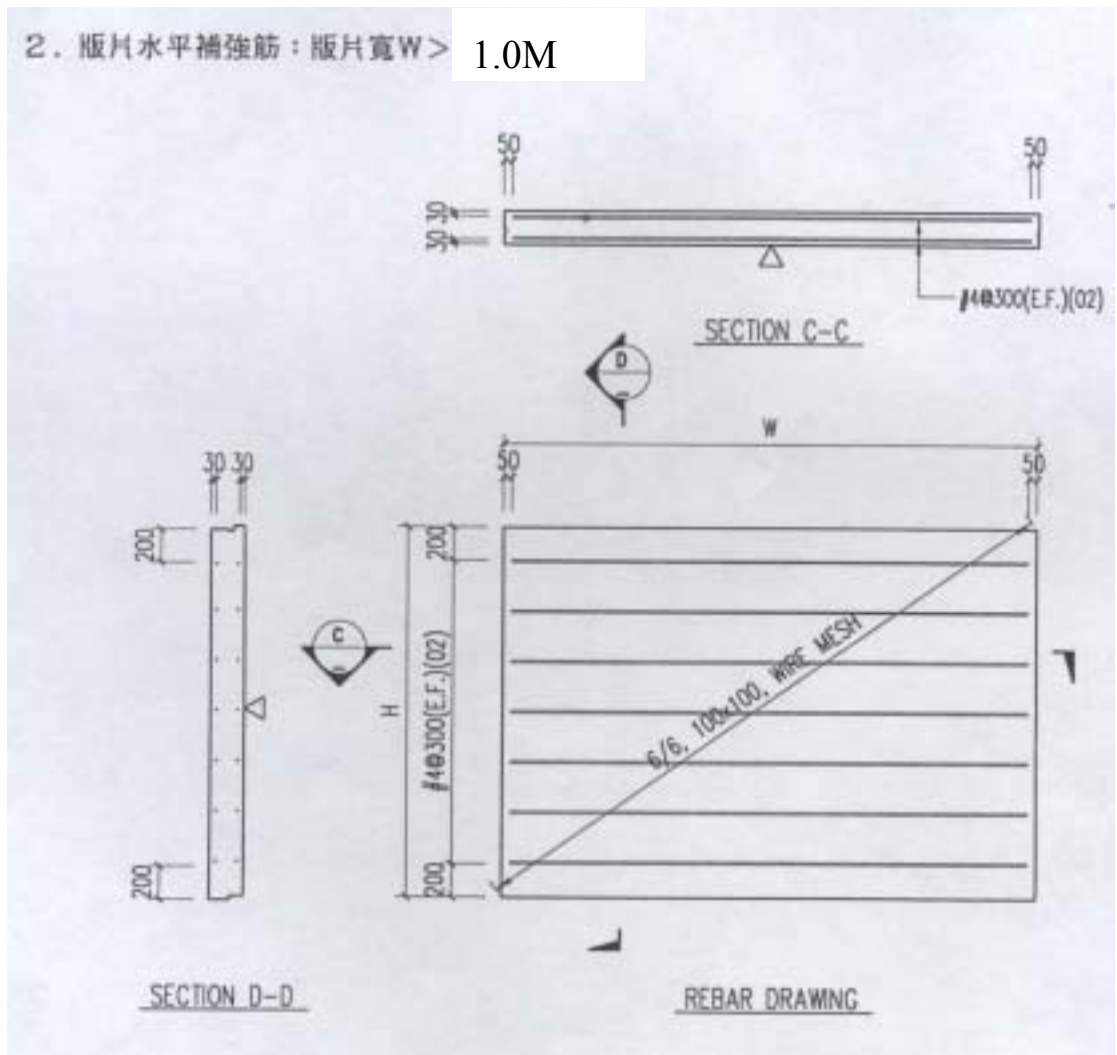


圖 4-6.3 牆試體之配筋圖

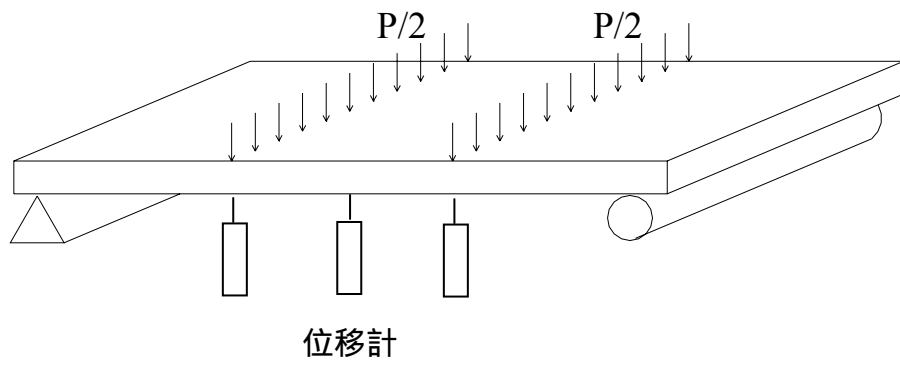


圖 4-6.4 牆試體之抗彎試驗

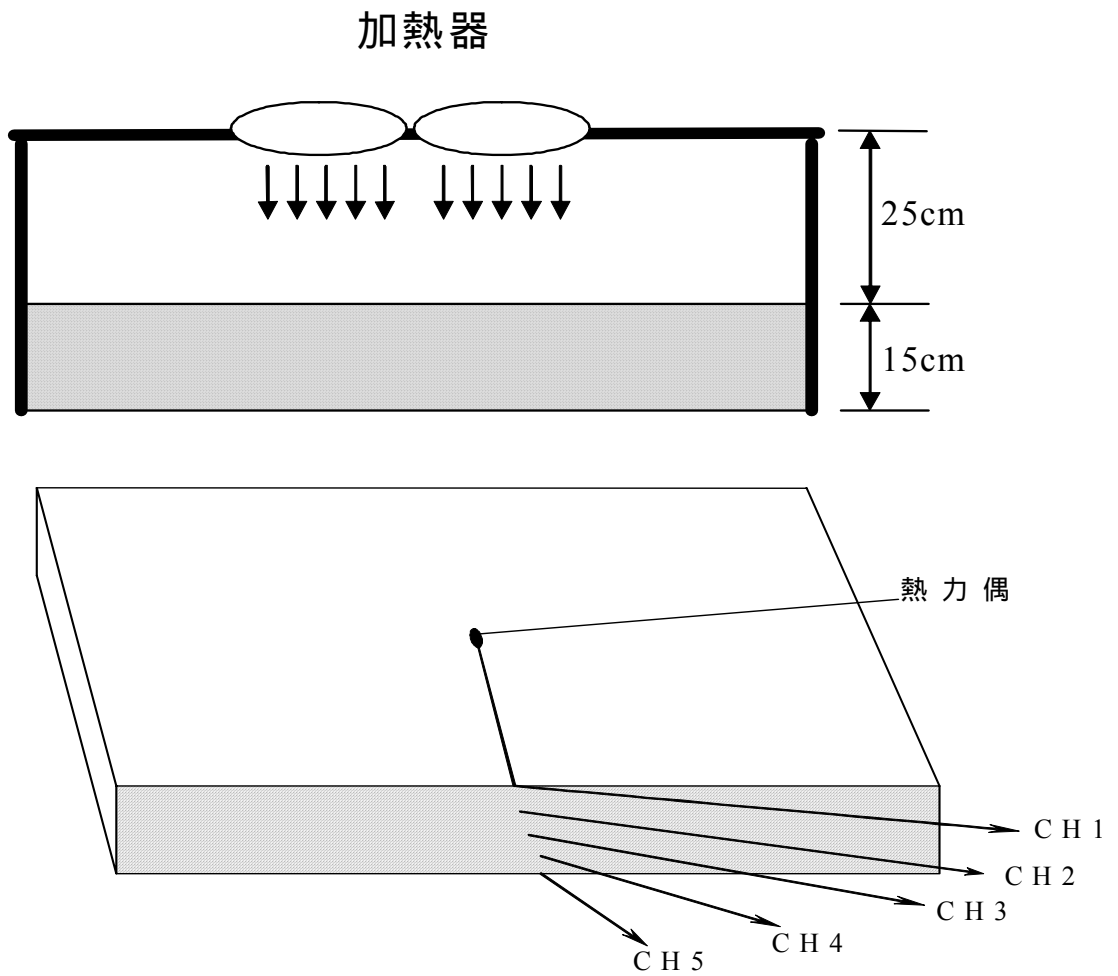


圖 4-6.5 牆試體之隔熱試驗

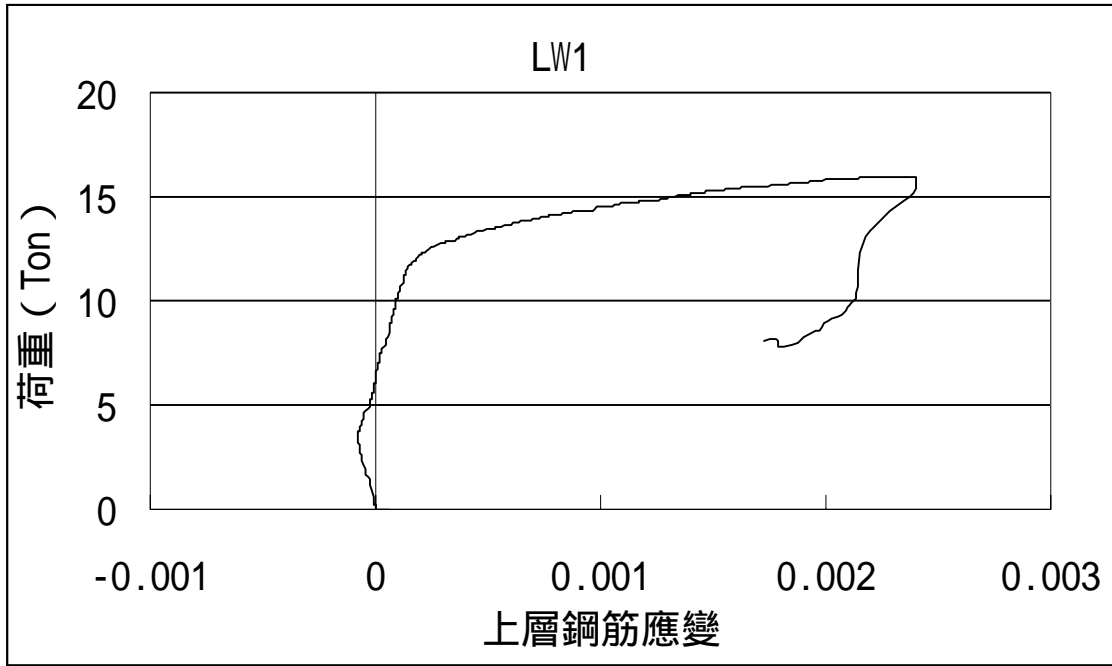


圖 4-6.5 牆試體抗灣試驗 LW1 試體荷重與上層鋼筋應變關係

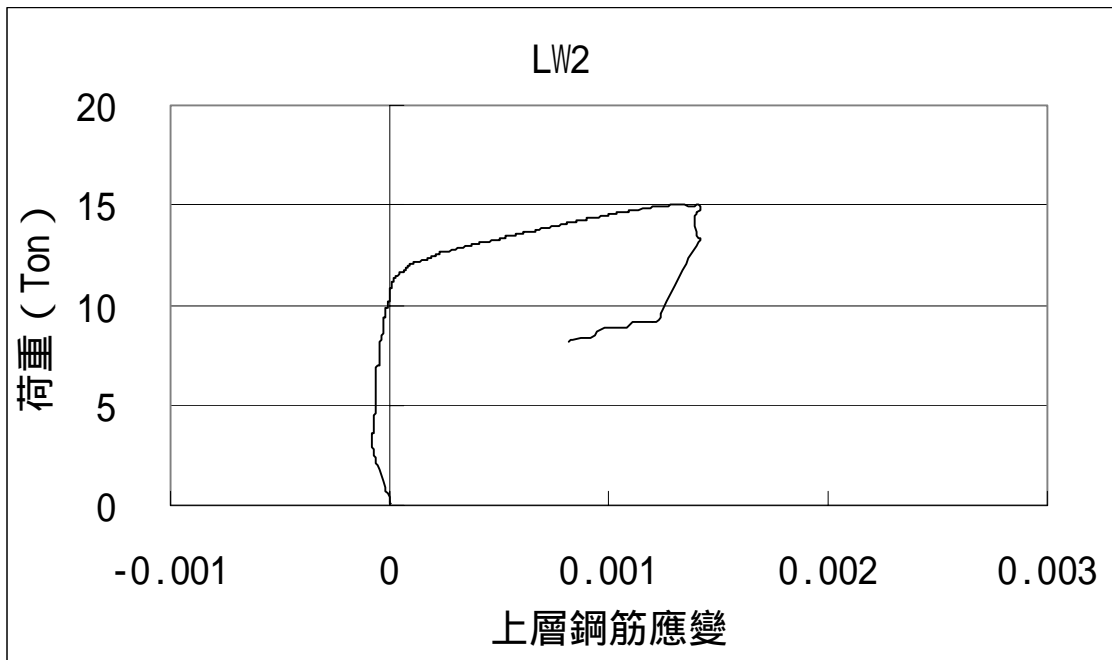


圖 4-6.6 牆試體抗灣試驗 LW2 試體荷重與上層鋼筋應變關係

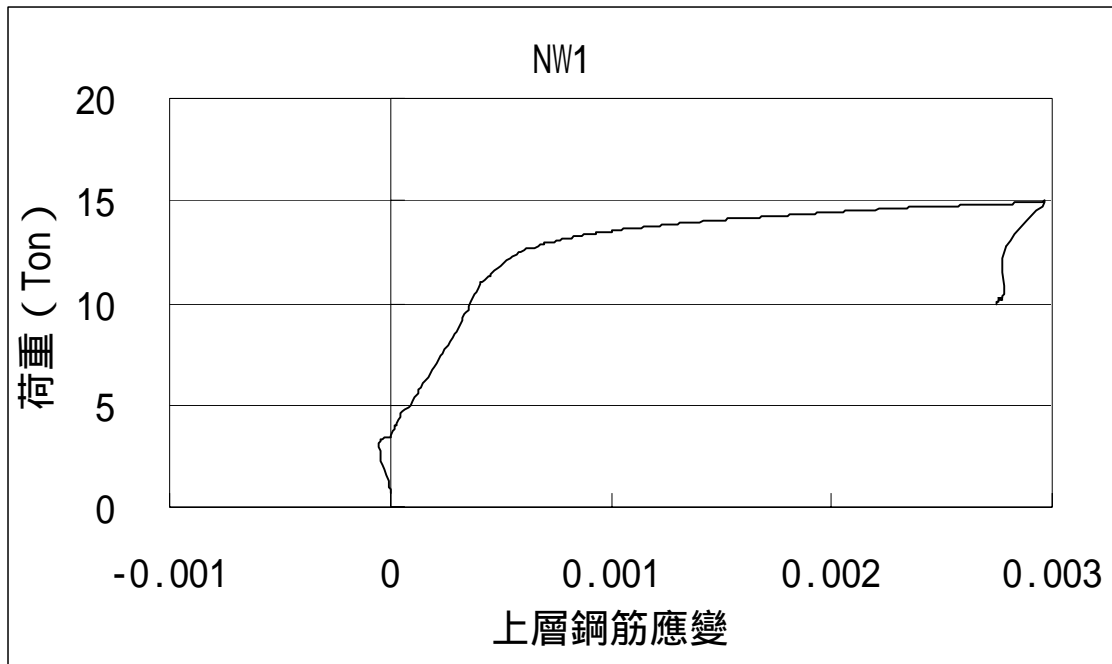


圖 4-6.7 牆試體抗灣試驗 NW1 試體荷重與上層鋼筋應變關係

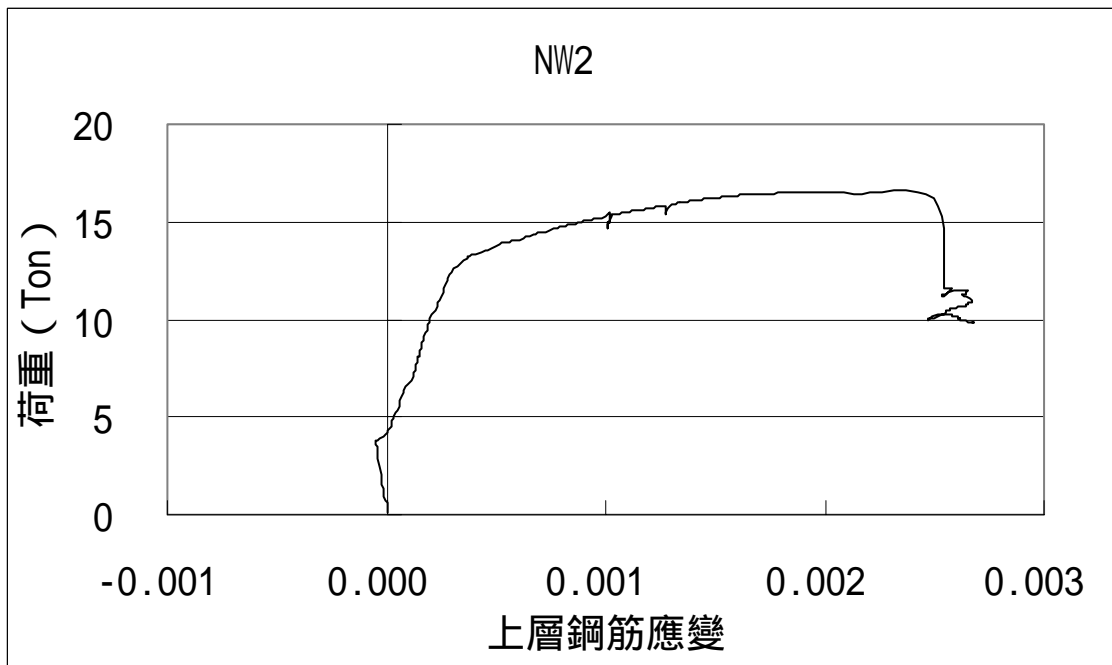


圖 4-6.8 牆試體抗灣試驗 NW1 試體荷重與上層鋼筋應變關係

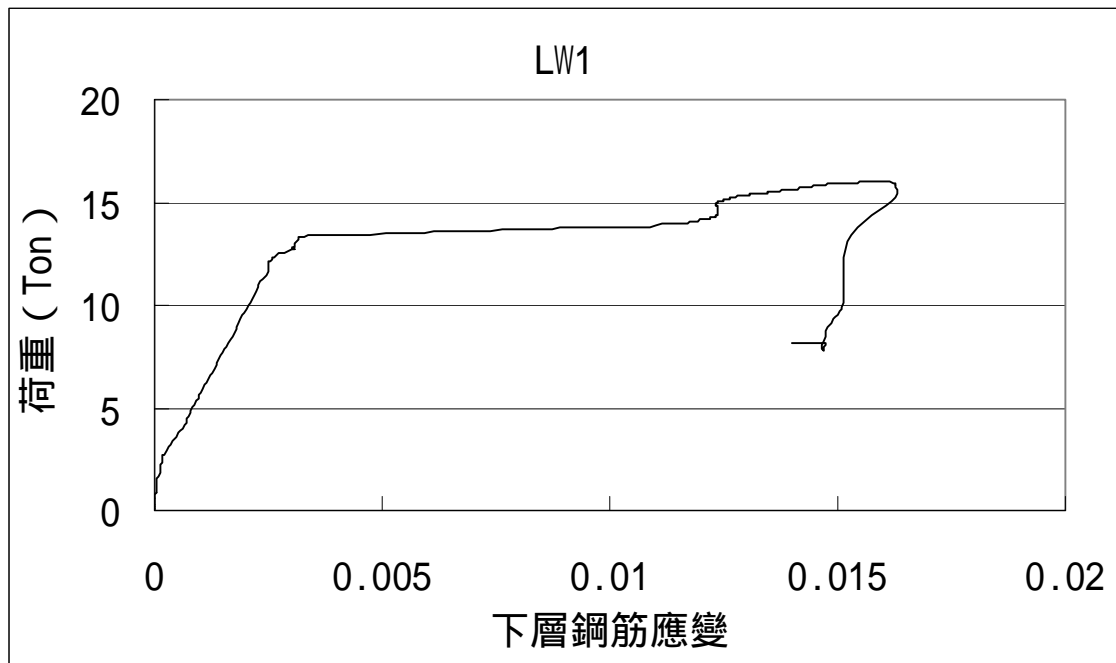


圖 4-6.9 牆試體抗灣試驗 LW1 試體荷重與下層鋼筋應變關係

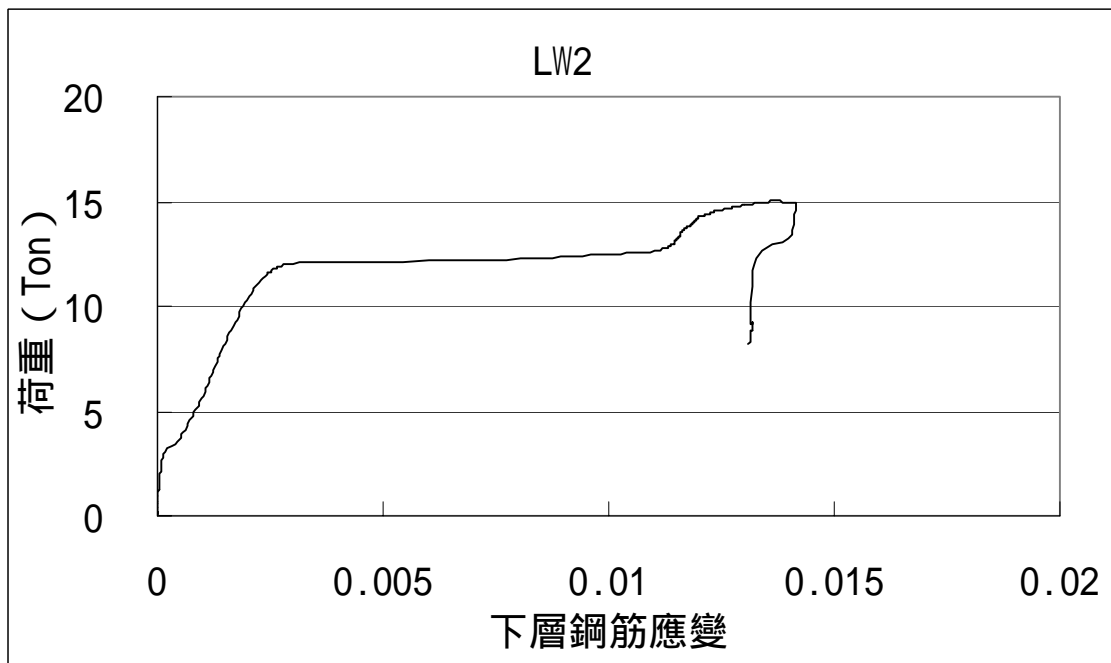


圖 4-6.10 牆試體抗灣試驗 LW2 試體荷重與下層鋼筋應變關係

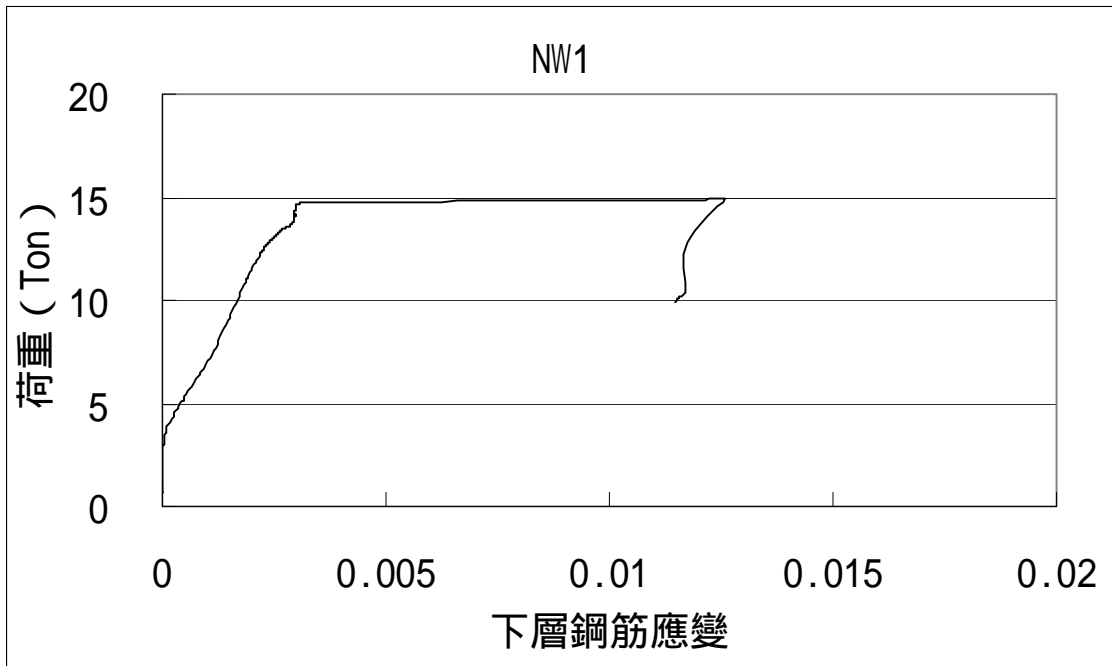


圖 4-6.11 牆試體抗灣試驗 NW1 試體荷重與下層鋼筋應變關係

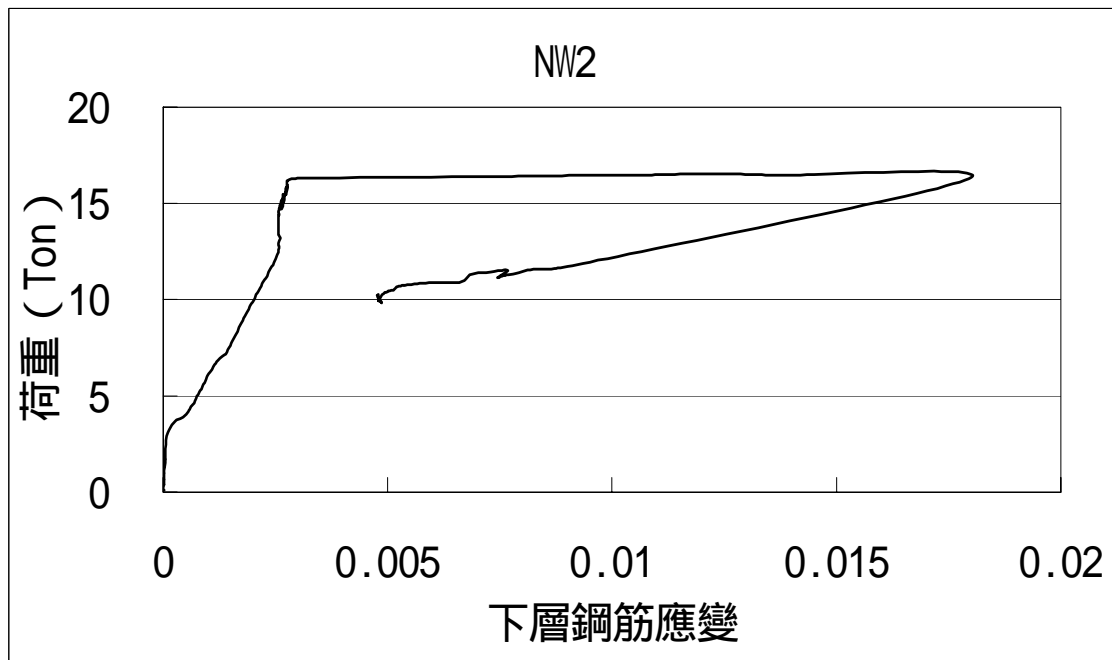


圖 4-6.12 牆試體抗灣試驗 NW2 試體荷重與下層鋼筋應變關係



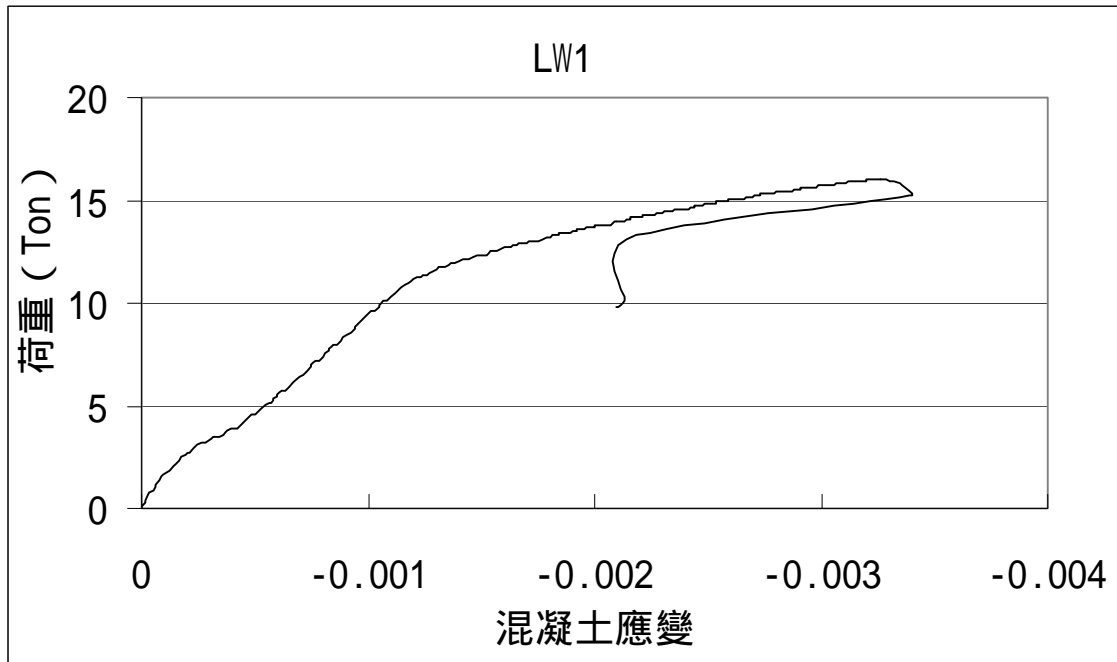


圖 4-6.13 牆試體抗灣試驗 LW1 試體荷重與混凝土應變關係

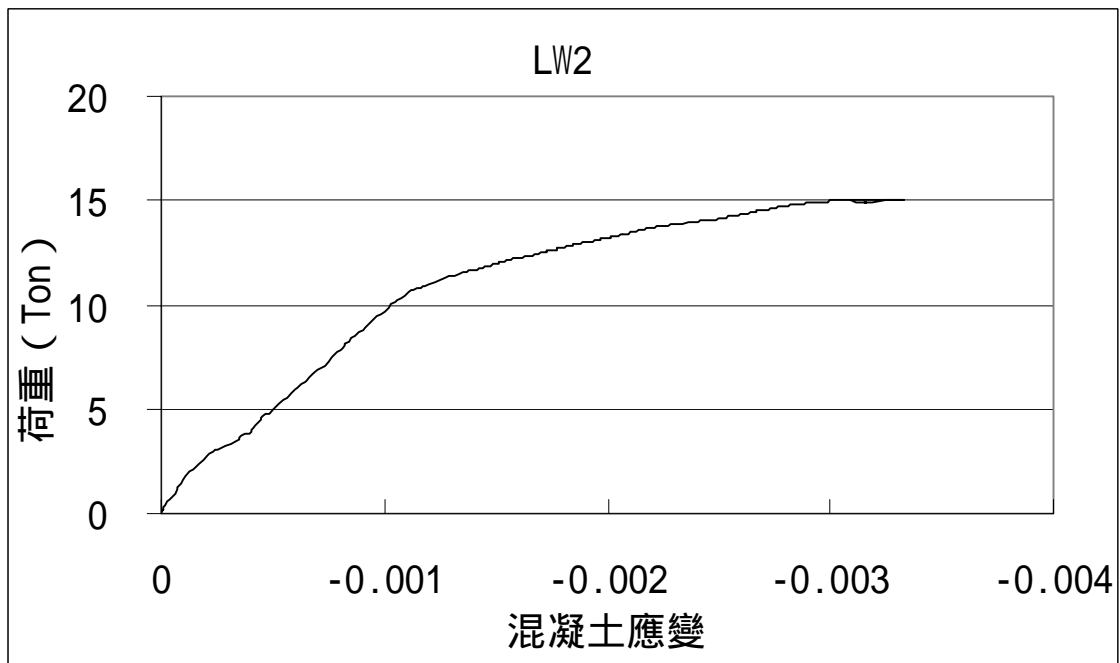


圖 4-6.14 牆試體抗灣試驗 LW2 試體荷重與混凝土應變關係

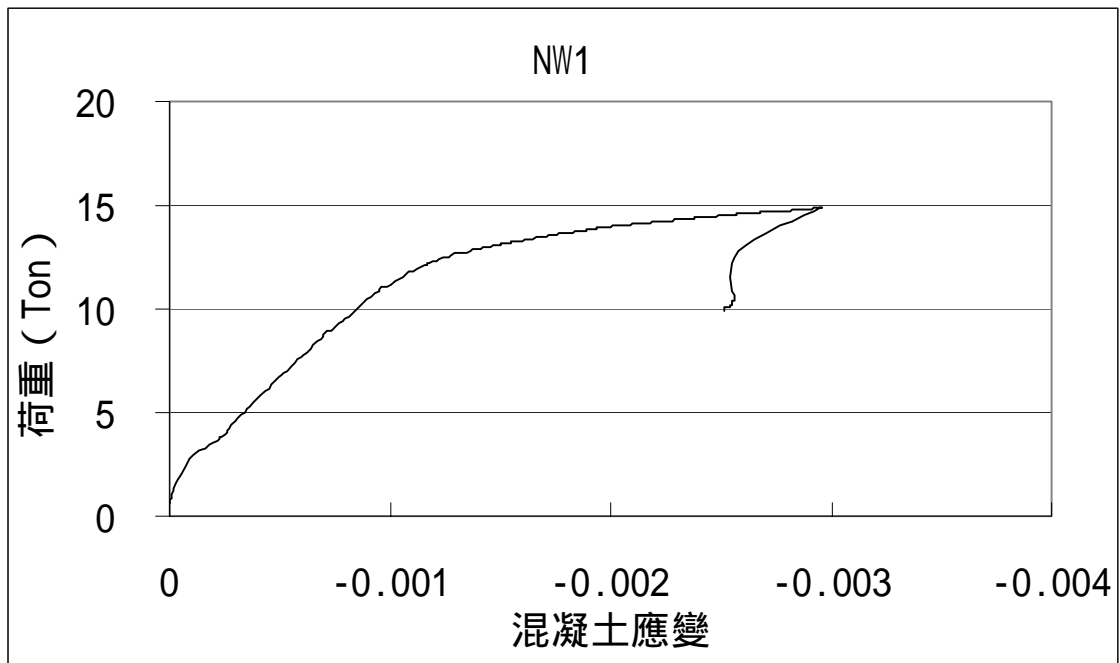


圖 4-6.15 牆試體抗灣試驗 NW1 試體荷重與混凝土應變關係

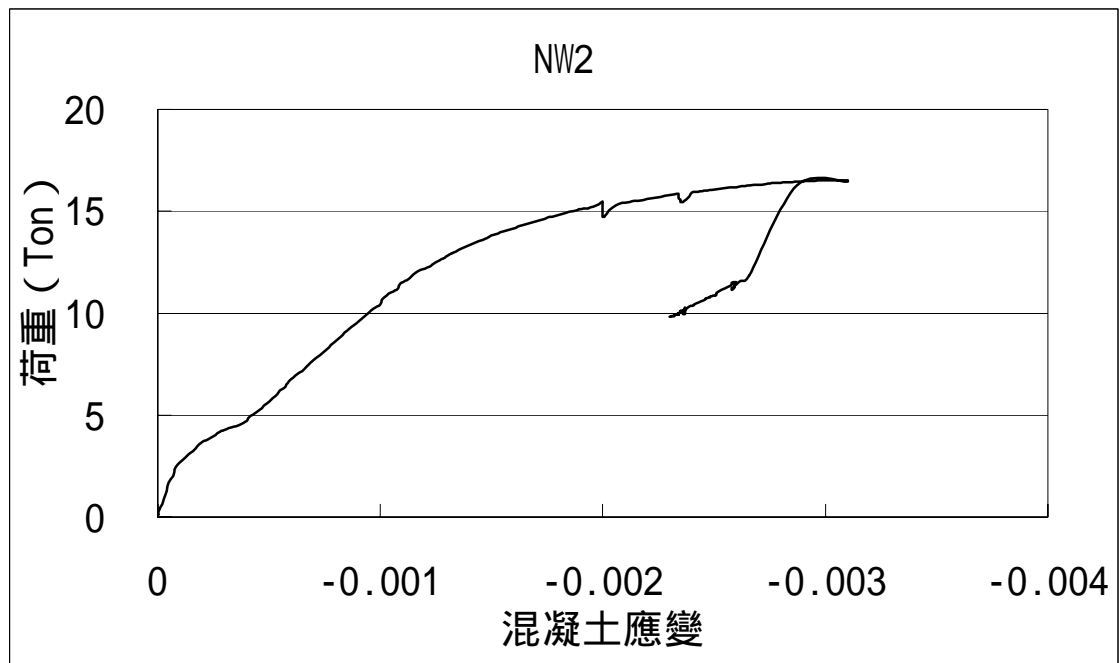


圖 4-6.16 牆試體抗灣試驗 NW2 試體荷重與混凝土應變關係

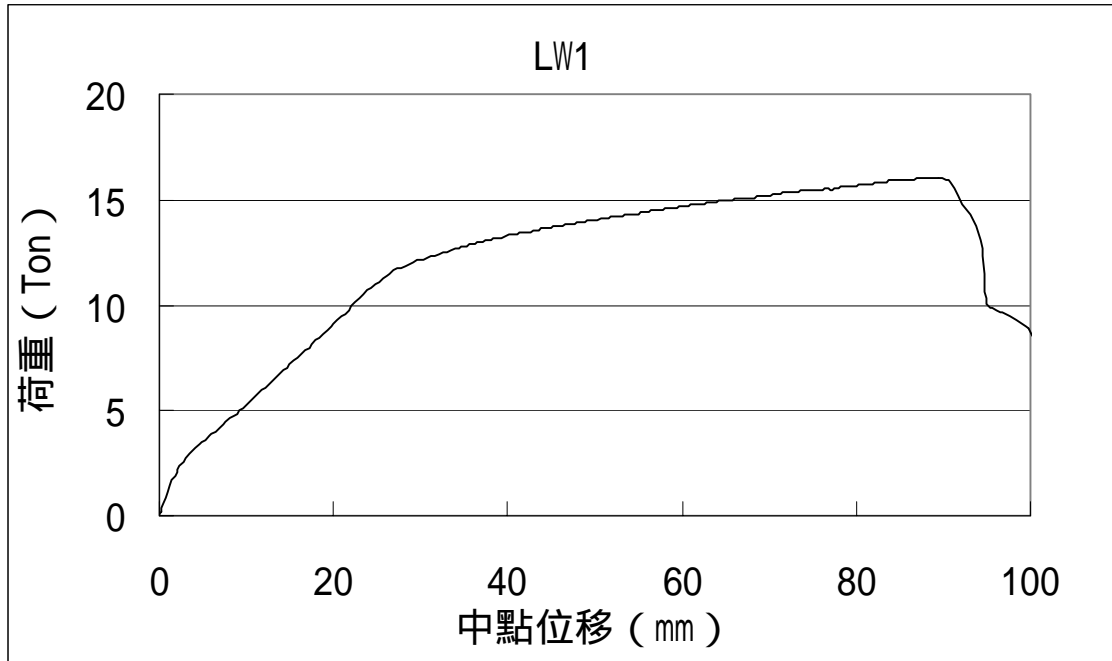


圖 4-6.17 牆試體抗灣試驗 LW1 試體荷重與中點變位關係

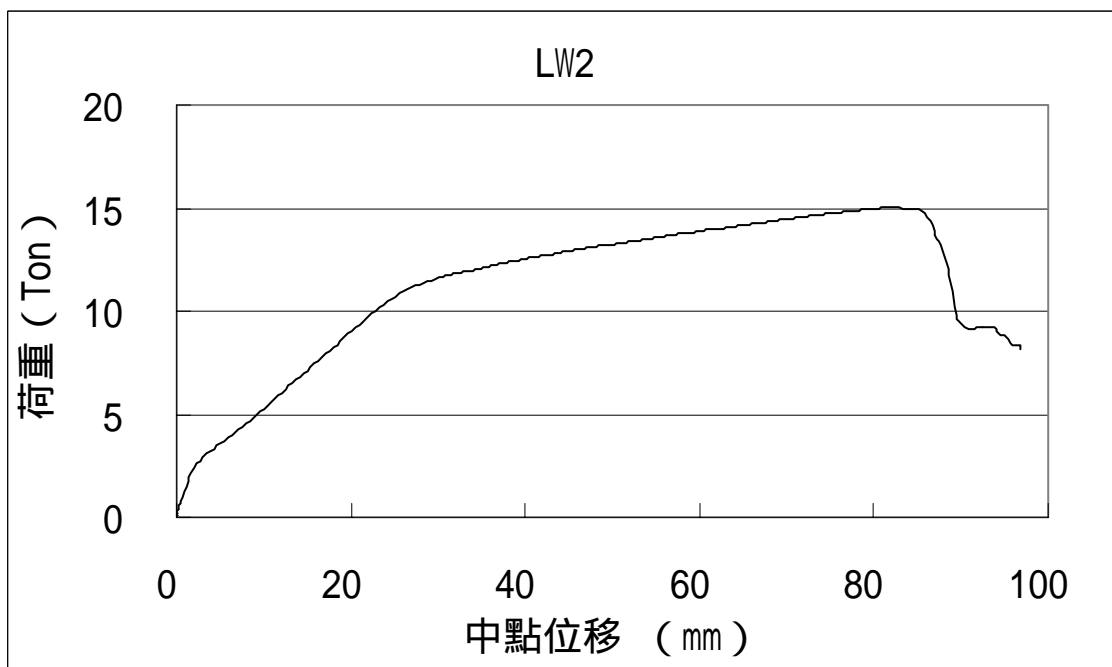


圖 4-6.18 牆試體抗灣試驗 LW2 試體荷重與中點變位關係

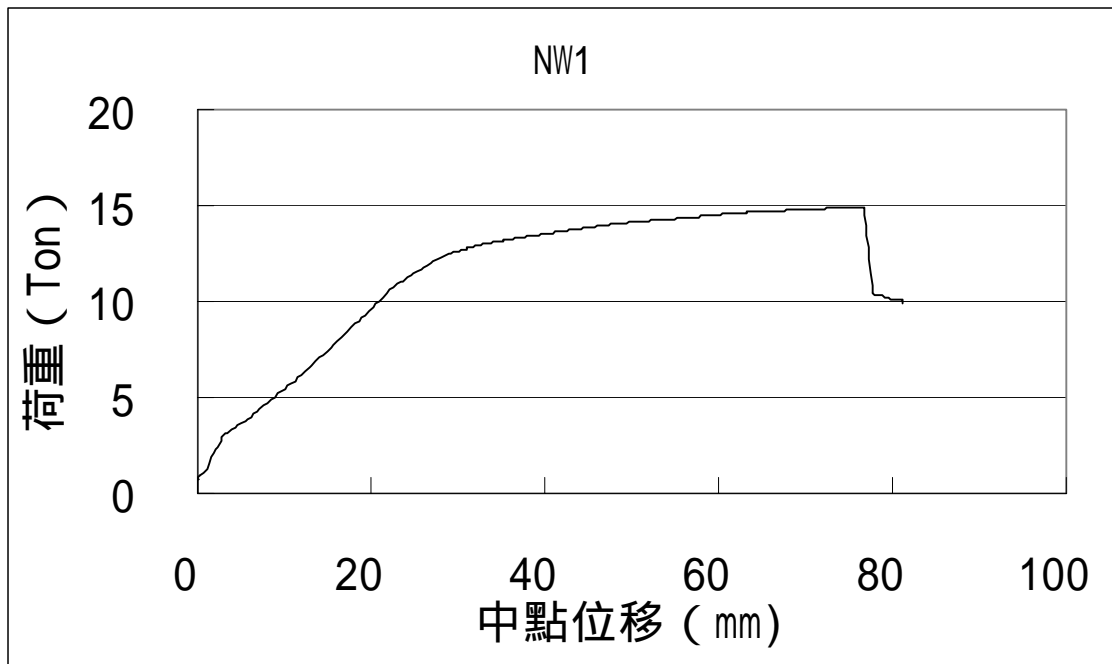


圖 4-6.19 牆試體抗灣試驗 NW1 試體荷重與中點變位關係

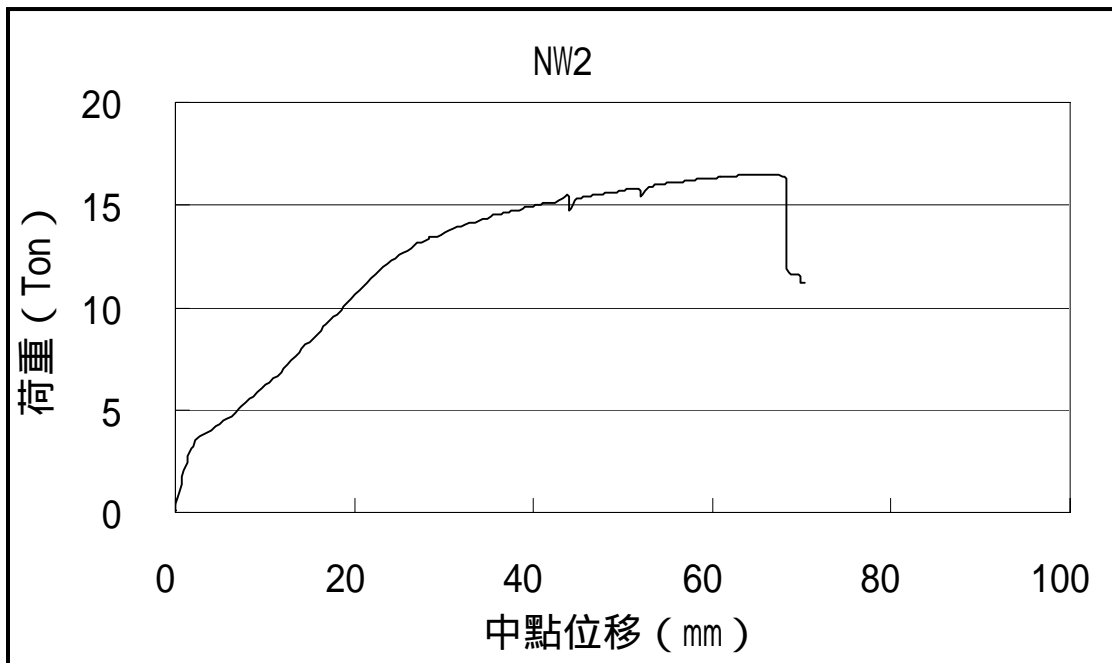


圖 4-6.20 牆試體抗灣試驗 NW2 試體荷重與中點變位關係

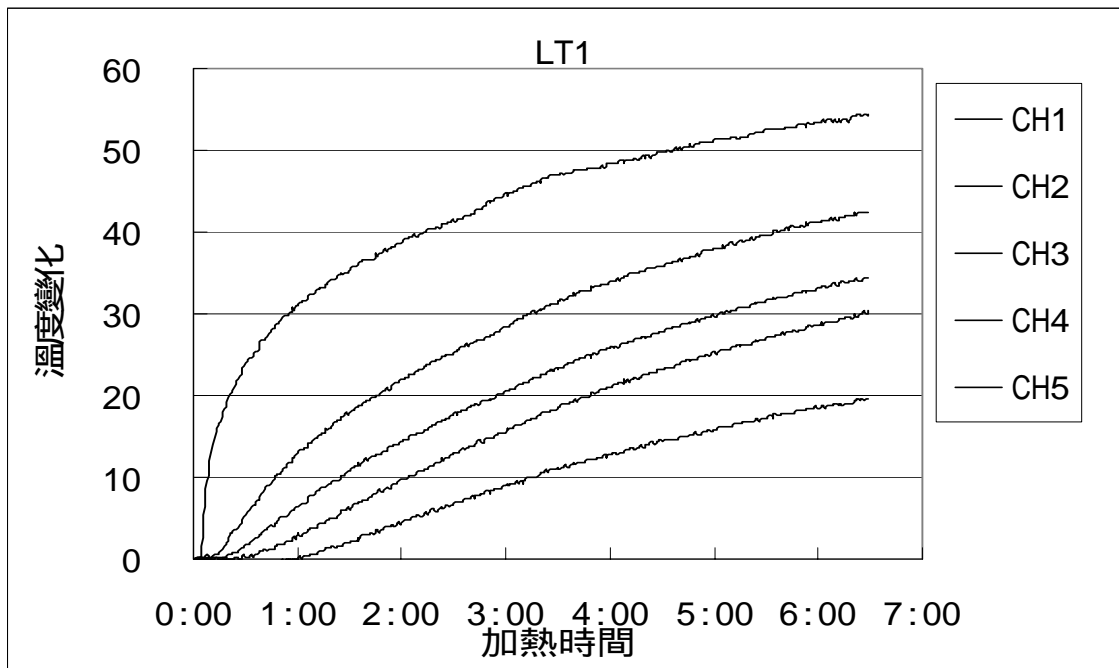


圖 4-6.21 LT1 溫度變化與加熱時間關係

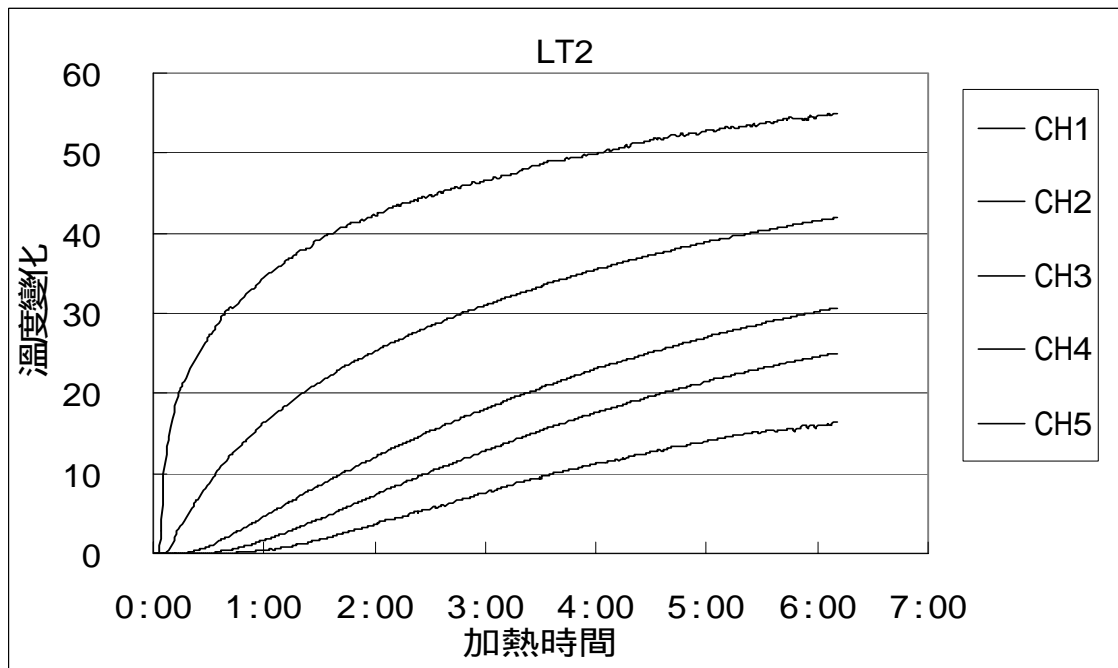


圖 4-6.22 LT2 溫度變化與加熱時間關係

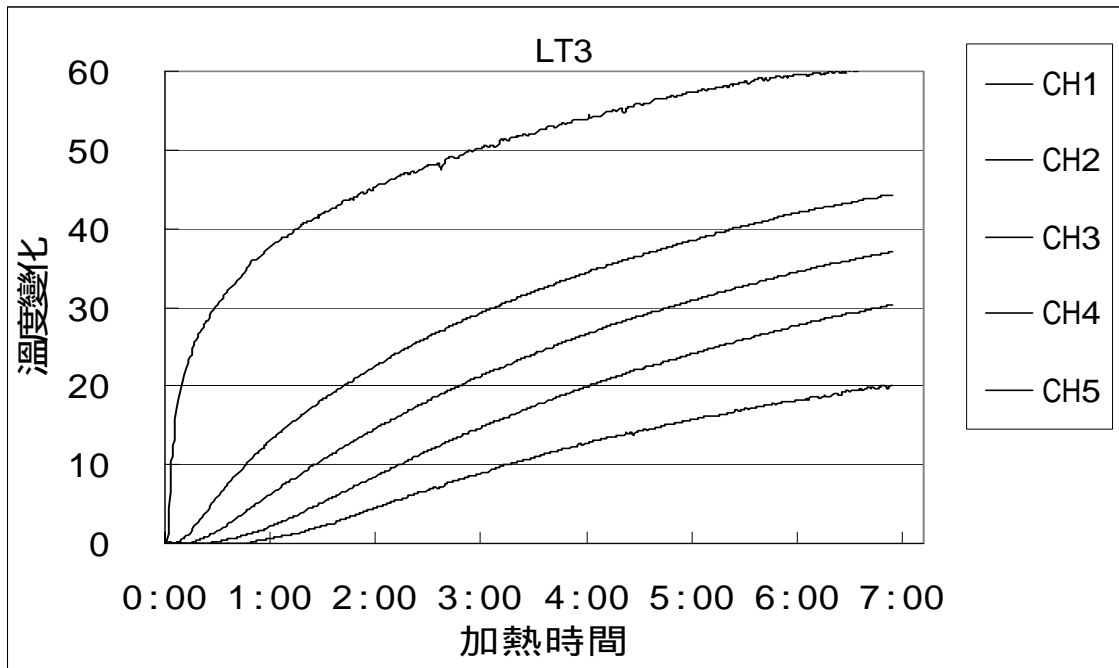


圖 4-6.23 LT3 溫度變化與加熱時間關係

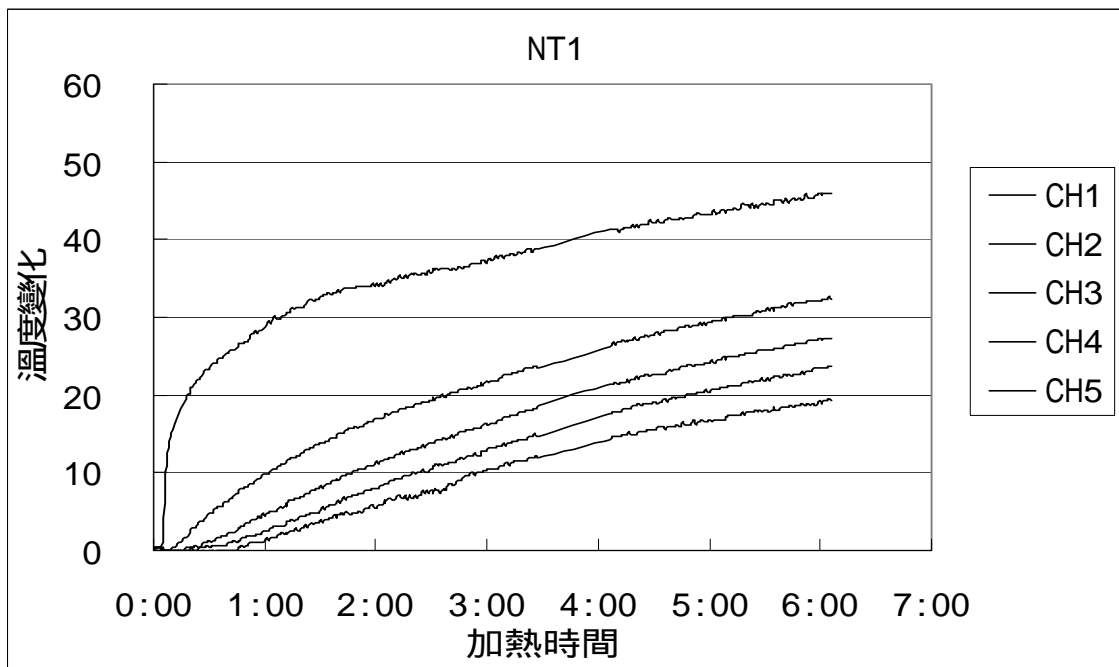


圖 4-6.24 NT1 溫度變化與加熱時間關係

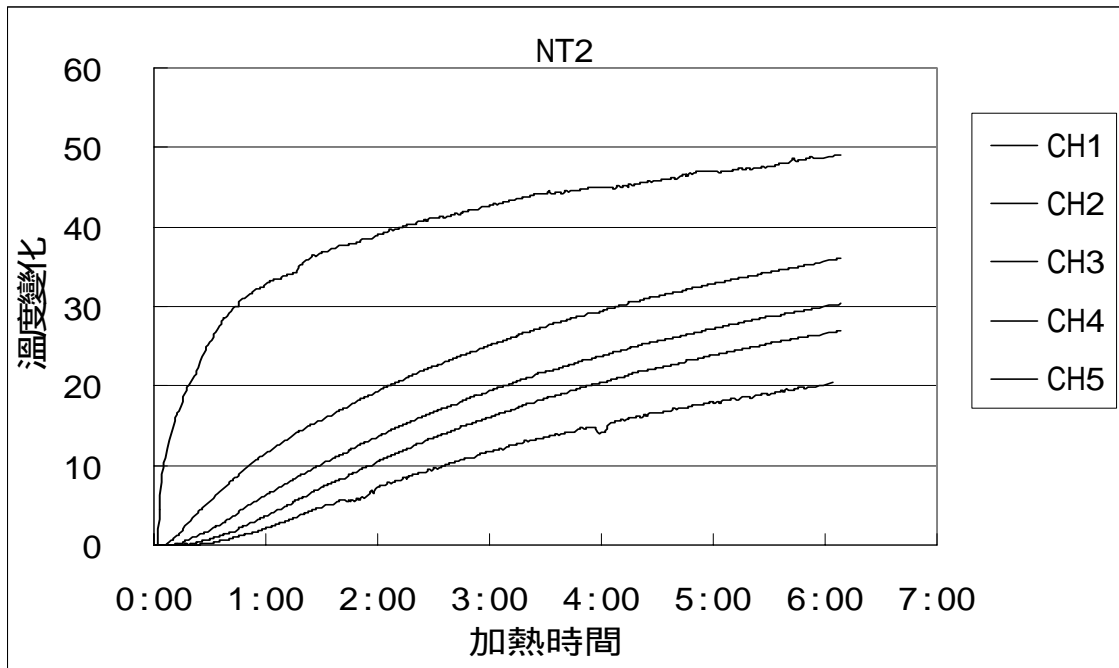


圖 4-6.25 NT2 溫度變化與加熱時間關係

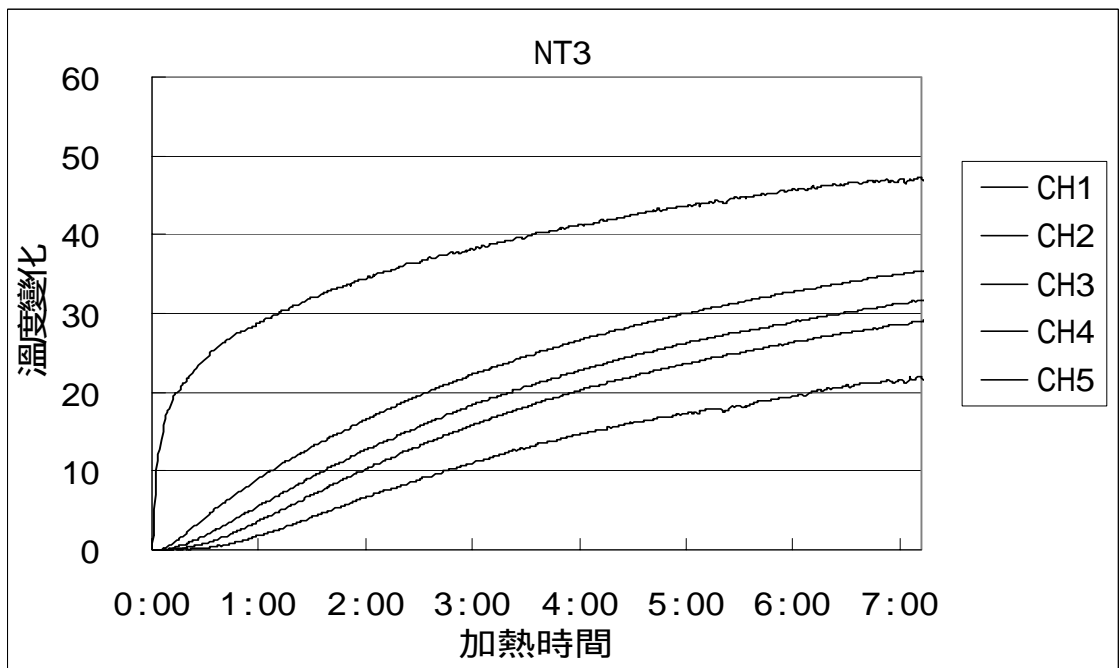


圖 4-6.26 NT3 溫度變化與加熱時間關係



照片 4-6.1 隔熱試驗牆試體之配筋



照片 4-6.2 抗彎試驗牆試體之配筋





照片 4-6.3 抗彎試驗牆試體灌注之情形



照片 4-6.4 隔熱試驗牆試體灌注之情形



照片 4-6.5 抗彎試驗牆試體在試驗室存放之情形(一)



照片 4-6.6 抗彎試驗牆試體在試驗室存放之情形(二)



照片 4-6.7 隔熱試驗牆試體在試驗室存放之情形(一)



照片 4-6.8 隔熱試驗牆試體在試驗室存放之情形(二)





照片 4-6.9 牆試體試驗安裝一



照片 4-6.10 牆試體試驗安裝二



照片 4-6.11 牆試體試驗安裝三



照片 4-6.12 牆試體試驗安裝四



照片 4-6.13 牆試體熱傳試驗安裝一



照片 4-6.14 牆試體熱傳試驗安裝二





照片 4-6.15 輕質混凝土抗壓試驗破壞



照片 4-6.16 常重混凝土抗壓試驗破壞



照片 4-6.17 抗彎試驗破壞



照片 4-6.18 滲透試驗破壞





照片 4-6.19 輕質混凝土劈裂破壞



照片 4-6.20 常重混凝土劈裂試驗破壞



照片 4-6.21 LW1 牆試體破壞



照片 4-6.22 NW2 牆試體破壞

## 參考文獻

1. 林銅柱, “從國外輕質骨材科技展望國內輕質混凝土工業”, 高壓蒸氣養護輕質混凝土研討會, 經濟部工業局, 台北, 1991.
2. Bardhan-Roy, B. K., “Lightweight Aggregate Concrete in UK”, International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 1995.
3. Helgesen, Kjell Hakon, “Lightweight Aggregate Concrete in Norway”, International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 1995.
4. J. J. Shideler, “Lightweight Aggregate Concrete for Structural USE”, ACI Journal October 1957.
5. Spratt, H., “The Structural Use of Lightweight Aggregate Concrete”, C. C. A., New York, N. Y. 1974.
6. Weigler, H., “Gefuegedichter Leichtbeton”, Beton, PP. 292, 1972.
7. ACI 213R-87, Guide for structural lightweight concrete, *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1 : Materials and General Properties of Concrete*, 27 pp. (Detroit, Michigan, 1998)
8. Tomas, A. H. and Alexander, M. V., “Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, SP-136,” American Concrete Institute, Michigan, 1992, 424 pp.
9. Precast/Prestressed Concrete Institute, Manual for Quality Control for Plants and Production of Architectural Precast Concrete Products, 219 pp. (Chicago, 1996)
10. Collins, M. P.; Walsh, P. F.; Archer, F. E.; and Hall, A. S., “Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion, Bending and Shear,” UNICIV Report, No. R-14, University of New South Wales, October 1965.

11. Collins, M. P.; Walsh, P. F.; Archer, F. E.; and Hall, A. S., "Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion, and Bending," Torsion of Structure, SP-18, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 279-420.
12. Ewida A. A. and McMullen A. E., "Torsion-shear-flexure interaction in reinforced concrete members" Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No.115, June 1981.
13. Rahal K. N. and Collins M. P., " Analysis of Sections Subjected to Combined Shear and Torsion- A Theoretical Model" ACI Structural Journal July-August 1995.