

內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告
計畫名稱：輕質混凝土配比設計及拌製技術之
研究

計畫編號：MOIS 830012

執行期間：82年7月31日至83年4月30日

輕質混凝土配比設計及拌製
技術之研究

計畫主持人：顏聰教授

共同主持人：林宜清 副教授

黃玉麟 副教授

陳豪吉 講師

執行單位：財團法人臺灣營建研究中心

中華民國八十三年五月

輕質混凝土配比設計及拌製技術之研究

計畫主持人：顏 聰 國立中興大學工學院院長

共同主持人：林宜清 國立中興大學土木工程研究所副教授

黃玉麟 國立中興大學土木工程研究所副教授

陳豪吉 國立中興大學土木工程學系講師

研究人員： 賴朝鵬 國立中興大學土木工程博士班研究生

陳國駿 專任助理

內政部建築研究所籌備處

財團法人臺灣營建中心

國立中興大學工學院

中華民國八十三年五月

中文摘要

輕質混凝土的組成材料和混合模式，基本上與普通混凝土相近，在配比理念上也可彼此引用。但因輕質骨材的顆粒密度、強度乃至於吸水率的差異，將使混凝土配比的準確性不易掌握，在拌合製造上發生偏差。對於配比設計法因而將從骨材顆粒密度，混凝土受力結構及水泥含量等，相對於傳統設計法做必要的調整，在拌製方法上也將針對輕質骨材較輕及吸水率較大的特性，探求合宜可行的拌合與製造技術。

應用到實務上的輕質混凝土構造體，分為結構性及非結構性兩類，其組成材料和構成方式也各自不同。結構性用途的輕質混凝土，以承重能力為主要考量因素；而非結構性輕質混凝土則以隔熱為考慮重點，在配比設計上，前者講究強度的形成，後者著重於孔隙的存在。對於拌製技術，則於拌合過程與方法的研擬外，將著重在預鑄體製作的技術探討。

經實驗方法驗證，本文提出結構性與非結構性輕質混凝土之配比設計方法及最佳拌製技術。

Abstract

The ingredients and the mixing method of lightweight concrete (L.C) are essentially similar to that of the normal weight concrete. However, the variabilities of the particle density, strength and water absorption of lightweight aggregate will lead to the inaccuracies of the proportions as well as the mixing technology of lightweight concrete. It is therefore necessary to adjust the conventional proportioning method for the mixture design of L.C. subjected to the properties of particle density, stress distribution of concrete and the cement content. A suitable mixing and manufacturing technics of L.C. will be thereby also investigated.

In construction practices the L.C. structure has two categories of structural and nonstructural type, their constitution material and construction mode are different to each other. For L.C. of structural usage the loading capacity is the major factor to be considered, while the thermal insulation is the main consideration for the nonstructural L.C.

Moreover, the former aims at the strength development by the proportioning design, while the later emphasizes the existence of voids. As to the manufacture technics this investigation will be focus on the ready mixed concrete technology in addition to the laboratory mixing procedures.

Based on the results of test, by different approaches and technics, a suitable proportioning design method and manufacturing technics of L.C. is proposed.

目 錄

第一章 緒言

- 1-1 前言 1
- 1-2 研究目的與內涵 2

第二章 文獻回顧

- 2-1 輕質混凝土之工程性質 4
- 2-2 輕質混凝土配比設計方法 8
- 2-3 輕質混凝土之拌製技術 12

第三章 研究方法與進行步驟

- 3-1 非結構性輕質混凝土之配合設計 25
- 3-2 結構性輕質混凝土之配合設計 25
- 3-3 輕質混凝土之拌製方法 26
- 3-4 預拌廠之拌合作業實驗 27

第四章 試驗工作

- 4-1 試驗材料準備及性質量測 33
- 4-2 試驗儀器及設備 33
- 4-3 非結構性輕質混凝土試驗工作 34
- 4-4 結構性輕質混凝土試驗工作 36

第五章 結果與討論

- 5-1 非結構性輕質混凝土之配比設計 58
- 5-2 非結構性輕質混凝土之拌製方法 58
- 5-3 結構性輕質混凝土之配比設計 59
- 5-4 結構性輕質混凝土之拌製方法 61
- 5-5 預拌廠之預拌作業 62

第六章 結論與建議 86

參考文獻 88

第一章 緒言

1.1 前言

以人造輕質骨材製作的輕質混凝土，在非結構性用途上，可基於其低熱傳導性造成優良的隔熱建材。本項特性對屬於亞熱帶的台灣地而言，從能源節約角度加以考量時，在房屋建築建材應用上極具意義。在結構性用途方面，則除了量輕、自重降低而可減少建築成本外，遇有地震發生時，尚可形成較小的水平作用力，對處於環太平洋地震帶上的台灣地區高樓建築更具意義。再者，由於近年來國內工程建設蓬勃發展，混凝土材料的需求量大幅增加，而另一方面，基於河川保育及水土保持的考量，天然骨材的開採已漸受限制，造成骨材之取得不易。為疏解國內骨材趨於短缺的情況，人造輕質骨材實具特殊的開發價值。[1][2]

近兩、三年來，國內在輕質混凝土的本土化發展上，透過八十一年度執行的「混凝土輕質骨材技術發展及應用」研究計劃[3]，在產、官、學研各方面的通力合作推動下，已經利用採自台灣島上北部及南部地區的頁岩原料，燒製成功輕質骨材。所有輕質骨材的物理和機械性質已逐步建立，並完成拌製結構用輕質混凝土的初步實驗。

為能有效的應用輕質骨材到混凝土的製造上，必須對輕質混凝土的配比設計法以及實用上的拌製技術，先做周延的研究。過去，輕質混凝土的製作方法，大都沿用普通混凝土的既有理論與做法。事實上，由於輕質骨材特有的性質差異，已使該傳統方法難以適用，不但配比設計所得結果誤差較大，混凝土的拌製技術也須作必要的調整[4、5、6]。本研究即基於前述考量，擬從配比設計及拌製

技術兩方面，進行本土化的實驗研究，提出實驗的實用資料與技術，供業界參考。

1.2 研究目的與內涵

目前國內的輕質骨材燒製技術已經建立，在不久的將來可進入量產應用的階段。另一方面，由於超高層建築的普遍化以及預鑄構造觀念的引進，部份前衛業界已開始從國外購進輕質骨材，製造帷幕牆之類預鑄構件，企圖應用到高樓建築上。基本上，業界對輕質混凝土的瞭解有限，在工業技術，如配比、拌製等的專業知識方面更為缺乏，其所從向製作的輕質混凝土乃至於預鑄構件，在品質控制上難臻理想。為對輕質混凝土在國內的開發應用未雨綢繆，做好普遍使用前的準備工作，先行完成輕質混凝土的配比設計，提出完整的各類級輕質混凝土配合比例資料，並研擬合宜適用的輕質混凝土拌合製作技術，以供業界實用上的依循與參考，已有實質上必要性。

輕質混凝土的組成材料和混合模式，基本上與普通混凝土相近，在配比理念上也可彼此引用。但因輕質骨材的顆粒密度，強度以至於吸水率的差異，將使混凝土配比的準確性不易掌握，在拌合製造上發生偏差。對於配比設計法因而將從骨材顆粒密度，混凝土受力結構及水泥含量等，相對於傳統設計法做必要的調整，在拌製方法上也將針對輕質骨材較輕及吸水率較大的特性，探求合宜可行的拌合與製造技術。

應用到實務上的輕質混凝土構造體，分為結構性及非結構性兩類，其組成材料和構成方式也各自不同。結構性用途的輕質混凝土，以承重能力為主要的考量因素；而非結構性輕質混凝土則以隔熱為考慮重點，在配比設計上，前者講究強度的形成，後者著重於孔

際的存在。對於拌製技術，則於拌合過程與方法的研擬外，將著重在預鑄體製作的技術探討。

因此本計劃有多方面的研究目的，條列如下：

1. 提供非結構性輕質混凝土的配合設計法及拌製技術。
2. 對各等級的結構性輕質混凝土建議其配比設計法及拌製技術。
3. 建立各種強度之輕質混凝土配比資料庫。
4. 提出在預拌廠量產輕質混凝土的拌製技術。

第二章 文獻回顧

2.1 輕質混凝土之工程性質

輕質混凝土的分類方式有多種可能，例如德國之DIN以密度分類，上限為 $2.0\text{kg}/\text{l}$ ；ASTM以用途分類為使用於結構體、預鑄版塊及隔熱吸音三種；JIS以骨材來源分類則有天然、人造及工業副產品三種。所有分類方式事實都可以用骨材之種類、製造方式來區別，如膨脹黏土、膨脹頁岩或板岩、膨脹爐石輕質骨材混凝土，以及燒結型、冷結型飛灰輕質骨材混凝土等。表 2-1 為各種不同輕質骨材所製成混凝土之典型工程性質一覽表 [7,8]。

國內外以往有關輕質混凝土研究已不少，但因研究之骨材種類、混凝土配比、環境條件、用途等變數甚多，很難統一規定輕質混凝土應有何標準之工程性質行為。表 2-2 所示 [7~15]，列舉近年來相關學者對輕質混凝土工程性質之研究結果，以為參考。

對於輕質骨材混凝土的工程性質較重要者有下列多項：

一、單位重

輕質混凝土其氣乾單位重一般均不超過 $2000\text{kg}/\text{m}^3$ [8,13,15]，但這種定義並不是強制的標準，譬如ASTM規定的氣乾單位重為 $1850\text{kg}/\text{m}^3$ 以下。不過，優良的輕質混凝土其單位重應較相同配比之常重混凝土低約25~40%為佳。

二、強度性質

輕質混凝土強度與其單位重有密切關係，故CNS 3691 A2046和ASTM C330中對強度性質的規定，都以單位重高低作為分級標準。表2-3為CNS及ASTM對結構用輕質混凝土強度性質之規定。有關輕質混凝土強度性質分述如下：

(一) 抗壓強度

抗壓強度和單位重之比例關係，是衡量輕質骨材混凝土品質優劣的重要依據。在各先進國家，對輕質混凝土均有劃定出一抗壓強度與單位重之關係範圍，圖2-1為典型之抗壓強度與單位重關係圖[9]。

影響輕質混凝土抗壓強度之因素包括骨材種類、級配、強度、水泥漿量及水灰比等。骨材粒徑愈大對混凝土強度愈不利，故一般建議輕質骨材最大粒徑應在25mm以下。水灰比對輕質混凝土強度的影響不大，但對工作性影響頗大；全輕質骨材在低水灰比時，工作性將嚴重影響，解決之道為增加水泥漿量或改用天然砂做為細骨材，而後者較經濟可行。在相同水灰比下，天然砂輕質混凝土之抗壓強度較高，這點不因輕質骨材種類不同而有差異。圖2-2為各種輕質混凝土全輕質與砂輕質之抗壓強度比較圖[7]。

(二) 劈裂抗張及彎曲強度

混凝土之張力強度難以用直接而令人滿意的方法來量測。因此，一般都是採劈裂破壞或彎曲破壞之方式，間接測定其張力強度。從表2-2的文獻可知，劈裂強度或抗彎強度均以抗壓強度為變數之函數，不過有的是以 $\sqrt{f'c}$ 為正比關係，如Andrew & Willian；有的則以 $f'c^{2/3}$ 為關係式，如CEB / FIP；但也有直接以 $f'c$ 為關係式者，如柚原治美、Swamy & Lambert及王櫻茂教授等[16,17,18]。

三、力學性質

(一) 應力－應變關係

輕質骨材混凝土之應力－應變曲線較普通混凝土更接近直線，因為輕質混凝土在降伏破壞以前，其受力主要由水泥砂漿承擔，而水泥砂漿為均質材料，故應力－應變關係呈線性發展。當輕質混凝土受力超過強度上限時，水泥漿體承受力量迅速傳至輕骨材，將因

骨材強度無法承受而急遽破壞，所以使輕質混凝土之破壞更具脆性。

(二) 彈性模數

輕質混凝土之彈性模數一般約介於 $1.0 \sim 2.4 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 之間 [7~15]。影響彈性模數的因素甚多，一般之研究大都歸納出彈性模數與混凝土單位重、抗壓強度之關係式，如表2-2所示，其中並以主張 $E_c = K\sqrt{\rho^3 f'c}$ 居多，包括ACI，CBF/FIP，Holm、柚原治美等的研究報告。由此可知，影響彈性模數之最大要素為單位重(ρ)，其次為抗壓強度。式中K值常數各研究之結果大抵相同，故參考之關係式可寫成：

$$E_c = 40000\sqrt{\rho^3 f'c} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-1)$$

$$\text{或 } E_c = 4300\sqrt{\rho^3 f'c} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-2)$$

其中 ρ_c 為混凝土之28天乾單位重(kg/m^3)， $f'c$ 為28天立方試體抗壓強度(kgf/cm^2)。另外文獻[19]也提出典型的輕質混凝土彈性模數與單位重及抗壓強度之關係，如表2-4示。

(三) 柏松比

輕質混凝土與常重混凝土之柏松比相似，其值約介於 0.15~0.25 之間[18,19]，視骨材種類、用漿量、齡期及含水量等因素而定。

四、乾縮

乾縮的發生在於混凝土中水份的喪失，因此如果能減少水泥漿量或降低水灰比，或是採用緻密而大的骨材，均能有效減少乾縮。低強度輕質混凝土之乾縮量較大，但高強度者反而較小。一般輕質骨材混凝土之乾縮值約在 4×10^{-4} 至 6×10^{-4} 間居多，而普通混凝土為 7×10^{-4} 至 10×10^{-4} ，故輕質混凝土乾縮量較低。但表2-2中部份

文獻指出，輕質混凝土乾縮量比普通混凝土高，顯見乾縮量之高低並非絕對，而且變數亦多，如水灰比、用漿量、骨材種類。環境條件及尺寸效應等，都有影響，無法一概而論。不過，蒸汽養護可減少10~40%之乾縮量[8,12]，尤其是高壓蒸汽養護更具效果，這點是可以肯定的。

五、潛變

影響潛變之因素包括：水泥性質、骨材種類、級配、水泥漿體品質、用量、環境條件、所受應力大小及時間長短等。由其影響因素可知，潛變與乾縮有密切之關係，因為潛變之發生通常都是從乾縮或膨脹變形處開始蔓延的。

強度較高之輕質混凝土，容許承載重高、潛變量少；另常壓蒸氣養護比濕養之試體可減少25%至40%之潛變，而高壓蒸氣養護則可減少高達60%至80%之潛變[8]。

六、熱學性質

(一) 熱傳導率(Thermal Conductivity)

熱傳導率係指通過材料單位厚度之熱流通量。輕質混凝土熱傳導率的主要影響因素為其單位重及含水量，其他如孔隙結構、材料組成等也為影響因素。通常混凝土單位重及含水量愈高則熱傳導率愈高如圖2-3所示[20]。另外，結晶材料(Crystalline Materials)(如石英砂)的傳熱性比非結晶材料(Amorphous Materials)(如陶瓷、水泥)為高，而玻璃化材料(Vitreous Materials)(如高爐礦渣)其熱傳導率最低。因此，若輕質骨材混凝土中添加石英質砂，將對其比重及熱傳導率有相當之影響，如表2-5所示[8]。至於燒結型輕質骨材，若有表面玻璃化的組織，將有助於熱傳導性之降低。

(二) 熱膨脹係數(Coefficient of Thermal Expansion)

影響混凝土熱膨脹性之因素，包括骨材與漿體的變形模數(Modulus of Deformation)，所佔體積比例及混凝土溫度。輕質混凝土在常溫下之熱膨脹係數(αT)介於 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，平均約 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，比普通混凝土低20~30%。當溫度升高至 600°C 時，普通混凝土的 αT 約增為常溫時之兩倍，而輕質混凝土仍無顯著變化[17]。此特性使得輕質混凝土更適用於預防高溫或火害的場所，為良好之耐火材料。

2.2 輕質混凝土配比設計方法

2.2.1 非結構性輕質混凝土

粒間孔隙混凝土之拌製要點為慮及要求之強度，儘可能造成較大的粒間孔隙，通常均只使用單一骨材顆粒，例如8/16mm粒群。此外做為粘結用的水泥砂漿應儘可能少，在極端情形也可只用水泥漿，如此製成的混凝土具有點粘結方式之骨材構架，見圖2-4，其粒間孔隙體積相當大，由於係點粘結，故一般而言所能達到之強度對密度之比例上較低。惟其強度(密度亦然)將可提高，若於點粘結外之三角楔充以水泥砂漿，見圖2-5。於粒間孔隙再利用不同骨材粒群填充，自可進一步提高混凝土強度及密度，見圖2-6。[21]

粒間孔隙混凝土的配合設計於紙上作業時只能得粗略值。混凝土中存在的粒間孔隙很難做正確之估計，因夯實度具有甚大且決定性之影響。強烈之夯實對緻密混凝土而言，可能會造成析離現象，卻不太會引起孔隙變化；但是對粒間孔隙混凝土而言，太強烈的夯實通常會減低孔隙體積而提高密度。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。

進行粒間孔隙混凝土的配合設計時，粒群或混合骨材於夯實狀態下之單位重為基本資料。做為粘結用的水泥漿及細骨材不致於增

加混凝土體積，而只會減少粒間孔隙。混凝土之密度乃可先近似的假設為夯實之粗骨材鬆單位重、水泥含量、水含量及細骨材量等之重量和。以此假設資料確實進行拌製試驗後即可定出拌合用之配合比。拌製試驗中最應注意者為確定最佳水泥砂漿含量一項，因含量太少會減低黏結強度而影響混凝土強度，使即刻拆模之直立強度不夠。若水泥砂漿含量太多，則混凝土強度會產生不必要之升高，同時混凝土密度也增大。這種情形在稠度小（軟體）之混凝土上更會導致不均勻之混凝土組成。[22]

2.2.2 結構性輕質混凝土

結構性輕質混凝土配比設計必須考慮單位重、強度及工作性等要項。由於輕質骨材的彈性模數大都小於水泥石，而前者的顆粒強度則可能大於、也可能小於後者[23]，該兩項材料之間的複雜關係，使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、及至於使用在鋼筋混凝土上的力性，與普通混凝土之間有不小的差別。

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，成爲一個次要的承力系統。如圖2-7(a)所示，壓應力主要由水泥石承擔[24,25]；相對的，骨材分擔的應力則依其彈性模數值而定。

上述受力結構在普通混凝土內，將有幾乎相反的應力分擔行為，主要原因是普通骨材的彈性模數大於水泥石。因此其受力系統將如圖2-7(b)所示，壓應力主要由骨材承擔，此時水泥石反而只成爲骨材間應力傳遞的介質而已[24,25]。這種迥然不同的受力行爲，將使輕質混凝土的強度性質脫離傳統的混凝土觀念。

由以上討論的應力分配觀念可知，輕質混凝土可達到的強度，不像普通混凝土幾乎以水泥石強度爲準，而是依骨材及水泥石兩項材料的各自強度，以及其應力分擔值而定。D.A. Abrams於1918年所

發表『水灰比理論』[26]，以水灰比確定混凝土強度的配合設計理念，可能不適用於輕質混凝土。

輕質混凝土配合設計標準在美國ACI 318、德國DIN及日本土木學會中皆訂有規範，除了考慮質輕的要求外，對於骨材最大粒徑與級配之選擇，及所需用水量計算原則上與普通混凝土配合設計的標準相近似。在配比計算時因仍採用材料體積觀念，須注意輕質骨材不同粒群間其密度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。由多位前人研究證實[27,28]，人造輕質骨材在絕乾狀態下浸入水中，前2分鐘之瞬間吸水率約達24小時吸水率之25至30%，以後吸水速度非常緩慢。顯然地由於輕質骨材吸水率大所造成的困擾只在新拌混凝土澆置前較為重要，故為配合實務需求，可在骨材面乾內飽和吸水率外，另訂一拌製施工用的某一時間內吸水率以為拌製混凝土時用水量之依據。例如德國工程即以30分鐘吸水率為準[29]。

對於輕質混凝土配比設計方法，文獻[30,31]提供下列幾種方法：

(1)絕對體積法：

混凝土的體積為水泥、骨材、水及空氣等絕對體積之和，因此 1m^3 之混凝土中所含輕質骨材數量可由總體積 1m^3 減去水、空氣與水泥等的體積得之，再依級配要求及各粒徑輕質骨材密度推求各粒群輕質骨材用量。

(2)體積分析法：

此法仍是先預估製作混凝土所需的水泥用量及概略的粗細骨材比率之骨材用量進行試拌，以要求的坍度控制所加之拌合水，直到坍度及稠度符合要求後，再測定坍度、空氣含量、新拌單位量，從而反推算 1m^3 混凝土實際材料所使用之數量。由所測定的資料加以調

整後，再經由試拌控制直到獲得滿意之配比為止。計算過程中需獲知骨材乾鬆單位重、氣乾含水量、評估粗細骨材率及估算一定強度要求下所需水泥用量。

(3) 比重因子法(試拌法)

依材料體積分析理念，雖混凝土體積在扣除水泥、空氣及總水量(設計用水量+骨材吸水量)等體積後即得骨材體積。假設粗、細骨材體積之混合比例與其乾鬆單位成正比關係，此比值稱之比重因子。藉比重因子決定配比，再經由試拌調整推求配比資料。

(4) 比重因子法(比重瓶法)

本法乃利用比重瓶測定輕質骨材(乾燥或潤濕)實際吸水狀況下，骨材於拌製時所排開的水體積，計算比重因子，將輕質骨材之濕氣含量變化加以考慮從而修正配比。

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。須注意粒徑不同其密度將有所差異的事實。例如膨脹粘土類骨材粒群0/4mm中，0/0.25mm部分的顆粒密度可達 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ，而2/4mm部份只為約 $1.2\text{g}/\text{m}^3$ ；此時若推算其混合比例，則0/0.25mm部份的重量百分比達20%，但其體積百分比將只佔約13%。

就普通混凝土工學上的考量，骨材最大粒徑愈大對混凝土品質愈有利。此觀念在輕質混凝土方面，對拌合用水量的減少可獲得一樣的效果，不過因粒徑愈大的輕質骨材，其強度將愈低，足以造成對混凝土強度的影響，這是配合設計上須加考量的一個重要因子。如此則以圖2-8的顆粒分佈曲線來考慮時，粗顆粒較多的A 16-B 16骨材級配，在混凝土強度的表現上會比B16-C16級配者差。

天然砂的添加是人造輕質骨材，尤其是人造粒型骨材常須考慮的手段。雖然它可有限度的提高輕質混凝土強度，但因大幅度提升

其密度，且一般常用的石英砂還會降低混凝土隔熱，故於使用宜小心為之。

對於各種不同等級輕質骨材而言，為達到一特定之混凝土強度所需之水泥用量可能變化相當大。由混凝土受力結構分析可推知，水泥用量依骨材顆粒之強度及彈性模數而改變，同時亦依工作度所需之用水量等因素而定。這些因素之影響無法可靠地加以預測，通常所需之水泥用量常藉試拌而獲之。[32]

2.3 輕質混凝土之拌製技術

2.3.1 非結構性輕質混凝土

混凝土為了得到較佳的隔熱性，於配合拌製過程以不添加細骨材，而以適量水泥漿包裹粗骨材，藉由粗骨材顆粒間的接觸結合，以製造顆粒間孔隙，達到減輕混凝土自身單位重，降低熱傳導係數之目的。此類混凝土稱為無細混凝土 (no fine concrete) [33]。

無細混凝土之粗骨材若採用擁有大量孔隙的輕質骨材來取代天然骨材，製成非結構性輕質混凝土，將可大幅降低混凝土單位重，對於一般建築物中之非結構性構件如外牆、帷幕牆等，具有相當有利的隔熱效果。

但為使非結構性輕質土達到使用上之需求強度，常利用加壓振動方式製造非結構性預鑄構件。加壓振動係利用外加壓力於混凝土表面，配合強制震動，所提供的能量，使各骨材顆粒間之排列趨於穩定且緊密接觸。[34]

2.3.2 結構性輕質混凝土

普通混凝土拌製方式係先將10%之拌和水注入拌合鼓中，然後將80%之拌合水與其他材料同時均勻加入，尚餘10%之拌合水最後注水，拌合約1.5分鐘[35]

輕質混凝土由於所含之輕質骨材吸水率，如表2-6所示，不平均比較大，且變化大而不穩定。該吸水率特性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，參閱圖2-9骨材的吸水量不穩定時，混凝土水灰比將不易掌握，同時會發生骨材吸水量過大影響到稠度的情形。

由於混凝土的拌合水除了少部份供水泥水化作用外，大部份是形成稠度使具工作性，輕質骨材的大吸水率，必然在混凝土拌合、澆置階段造成甚大的困擾。事實上，這些影響顯然只在新拌混凝土的澆置以前較為重要，故為配合實務需求，可在骨材的面乾飽和吸水率外，另訂一拌製施工用的某一時間內吸水率。例如德國工程界即以30分鐘吸水率為準[36]。

進行拌合工作時，輕質骨材的乾濕狀況必須正確掌握。將骨材充分預濕以供拌合為不可行的做法，目前大都採用接近乾燥，即零含水率的骨材於拌合上。由於輕質骨材的吸水率甚大，則於乾燥骨材外另加的拌合水量相當大，一次加入總水量的作法，有造成混凝土稠度過小而有析離現象的危險。故於拌合施工上，常將輕質骨材與部份拌合水先攪拌，隨後再與水泥等材料一起混合。

粒徑較大的輕質骨材，其強度較差，單位重也較小，進行混凝土拌合時，拌合時間不宜過長，一般拌合機的攪拌時間最好不超過90秒，以防止造成顆粒破壞或水泥漿下沉的析離現象。

較輕的大粒徑輕質骨材，在強烈的振動夯實或長時間的夯實作用後，將會浮上混凝土表層，形成混合不理想的析離現象；這種情形在稠度愈小的輕質混凝土愈容易發生。另一方面，輕質混凝土卻因其振動阻尼效應較大，而需較大的振動能量以達成夯實效果。故於夯實施工上須適當處理之，例如部份學者[37,38]即建議正常條件下以2分鐘為限。

表 2-1 輕質骨材混凝土性質一覽表 [7,8]

用途	輕質骨材名稱	分類	單位重 (kg/m ³)	抗压強度 (kg/cm ²)	劈裂強度 (kg/cm ²)	抗彎強度 (kg/cm ²)	彈性模數 ($\times 10^5$) (kg/cm ²)	乾縮 ($\times 10^{-4}$)	滲水 ($\times 10^{-4}$)	熱膨脹係數 ($\times 10^{-6}$)	熱傳導係數 (W/m°C)
結構 (高強度)	膨脹性粘土	N+P	1000-1700	100-600	10-11	28-65	1.0-2.0	4-6	4-7	7-12	0.25-0.74
	膨脹性頁岩或板岩	N+P	1300-1600	200-600	15-43	25-65	1.4-2.1	4-6	4-12	7-12	0.22-0.76
	膨脹質石	DP	1000-2000	100-150	10-27	15-50	1.0-1.75	3-7	4-14	10-12	0.16-0.45
	煤礦土塊石	DP	1400-1600	100-100	12-20	15-40	1.1-1.7	4-8	4-12	8-12	0.33-0.56
	煤結晶質灰矽質頁岩	DP	1500-1600	300-500	22-44	30-60	1.4-1.8	4-6	4-16	7-12	0.21-0.79
	冷結型煤灰矽質頁岩	DP	1600-1700	150-120	15-10	20-60	1.2-1.7	4-6	4-16	4-8	0.22-0.8
結構板塊 (中強度)	碎石	N	700-1600	50-150				5-7			0.14-0.17
隔熱吸音 (低強度)	珍珠石	N+P	400-500	12-20							
	灰石	N+P	300-700	2-20							0.12-0.15
	天然骨片	N	200	20-80	150-800	30-120	2.1-2.7	7-10	6-9	10-13	1.4-1.7

表 2-2 有關輕質混凝土性質研究文獻一覽表 (7-15)

作者	材料	單位重 (kg/m ³)	抗壓強度 (f_c)(kg/cm ²)	劈裂強度 (f_{cs})(kg/cm ²)	抗拉強度 (f_t)(kg/cm ²)	彈性模數 (kg/cm ²)	乾重 ($\times 10^3$)	熱膨脹係數 ($\times 10^{-5}$)	熱傳導係數 (W/m ² °C)	吸水性
Andrew Short & William Kinniburgh	結構輕質混 凝土	1200-2000	70-350	K/f_c K=0.32-0.42	K/f_c K=0.56-0.64	K^2/f_c^2 K=7.67	4-6	—	0.15-2.0	—
CEB/FIP	膨脹粘土 膨脹頁岩 膨脹頁岩 灰結型灰灰	1000-1700 1300-1600 1800-2000 1500-1600	100-600 200-600 100-350 300-500	0.23 $f_c^{0.15}$ or 0.375 $f_c^{0.3+0.7}$ $P_{1,c}/P_{oc}$ 之 f_c i.e. 輕質 或, 常重	0.46 $f_c^{0.15}$	0.04 $\sqrt{p/f_c}$ p: 28 天氣乾抗压強 fcj: 立方試塊抗压強度	4-6 4-6 4-6 4-6	4-7 4-12 4-14 4-16	w/m ² K 0.27-0.14 0.56-0.76 0.16-0.74 0.41-0.79	精重 (kg/m ³) 20-500 積重 30-55 分貝
B. H Spratt	灰結型灰灰 (lyragel) 膨脹頁岩 (Solite) 膨脹粘土 (Ag-lite) 膨脹頁岩	1100-1850 950-1800 950-1700 1050-2000	560 520 420 400	氣乾下較 相同強度之 常重混凝 土低 30%	氣乾狀態比 飽和水狀態 低 50%	$1.4 \times 10^3 - 1.76 \times 10^3$ $1.05 \times 10^3 - 1.76 \times 10^3$ $1.4 \times 10^3 - 1.7^3 \times 10^3$ $1.4 \times 10^3 - 2.1 \times 10^3$	常重混凝 土之 1.3 至 -1.6 倍	7-11	0.23-0.47 0.22-0.68 0.23-0.38 0.16-0.39	15 cm 50 分貝 10 cm 35 分貝 10 cm 40 分貝 15 cm 50 分貝
T. A Holm	結構輕質 混凝土 (膨脹性良 材)	1300-1900	105-710	相同強度常重 混凝土之 75-100%	—	0.043 $\sqrt{p/f_c}$ 約 1.70×10^3	較常重混凝 土為高, 但 氣乾強度而 持久	—	0.072 \times $e^{-0.00125p}$ 約 0.072	—
F. D Lendon T. A Holm	高強度 或強度	1380-1630 1780-1990	400-710 400-710	— 40-60	—	$1.6 \times 10^3 - 4.1 \times 10^3$ $0.04\sqrt{W/f_c}$	4.5-12 4.5-8	—	—	—
相原浩典	天然輕質骨 料人造輕質骨 料	1400-2100 1600-1900	200-300 約 500	$\frac{1}{9} \frac{1}{15}$ 之 f_c	$\frac{1}{6} \frac{1}{10}$ 之 f_c	4.300 $p^{0.15}$ (ACI) 2.1 $\times 10^3 \times$ (0.2-2) $^{0.15} \times \sqrt{f_c}/200$	氣乾 6 以下 , 常用 8 以 下	—	0.5-1.4 kcal/mh ² c	—

表 2-2 有關輕質混凝土性質研究文獻一覽表(續)

作者	種類	單位重 (kg/m ³)	抗壓強度 f _c (kg/cm ²)	劈裂強度 f _{ct} (kg/cm ²)	抗彎強度 f _{cr} (kg/cm ²)	彈性係數 (kg/cm ²)	乾燥 (× 10 ⁻⁴)	潛度 (× 10 ⁻⁴)	熱膨脹係數 (× 10 ⁻⁶)	熱傳導係數 (W/m°C)	吸音性
Bhatty & Reidt	單次輕質 A-S-C-W=40:45:75:7.5 球形型 I 球形型 II 非球形型 I 非球形型 II 膨脹粒土	1583	95	-	-	-	-	-	-	0.37-0.60	-
		1343	95	-	-	-	-	-	-	-	-
		1583	75	-	-	-	-	-	-	-	-
		1389 1243	58 68	-	-	-	-	-	-	-	-
Dijfen	煤灰輕質 球形型 財結型 (AC 電線)	1770	310	-	40	-	-	-	-	-	-
		2070	260	-	35	-	-	-	-	-	-
ACI 213 R-79	結構用	1440-1840	210-350	20-35	30-50	0.043W 1.5 √ f _c 波松比 γ=0.15-0.25	4-10	-	6-9	K=0.072 ρ _{0.00125W} 0.1-1.4	-
游錫賢 郭政賢 黃榮君	膨脹粘土	2015-2132	比普通混凝土低 6%-15%	-	比普通混凝土低 6%-20%	E _c =2.74 X 10 ⁵ -2.85 X 10 ⁵ E _s =2.38 X 10 ⁵ -3.13 X 10 ⁵	-	-	-	-	-
王傳茂 黃榮君 張建偉	膨脹粘土	1660-2030	120-420	9-15 f _c	6-10 f _c	-	比普通混凝土 6-34%	-	-	-	-
Swamy & Lambert	膨脹型煤灰 (砂輕質) (lytag)	1810-1935	200-610	21-46 1-1 20-9.1	24.0-51.0 1-1 20-6.25	1.4 X 10 ⁵ -2.2 X 10 ⁵ E _s =5.82 f _{cu} ^{0.32} kN/mm ² f _{cu} 立方 試體抗壓 強度	-	-	-	-	-

表 2-3 CNS 及 ASTM 對輕質混凝土強度規定

規 範		最大平均單位重(Kg/m ³)	最小平均28天抗弱、製張力強度(kg/cm ²)	最小平均28天抗壓強度(kg/cm ²)
CNS		1840	20	280以上
3691		1760	20	210
A2046		1680	20	175
ASTM C330	全 輕 質	1760	22.5	281
		1680	21.1	211
	1600	20.4	176	
	砂 輕 質	1840	23.2	281
		1760	21.8	211
	1680	21.1	176	

表 2-4 輕質混凝土彈性模數與單位重、抗壓強度之關係

抗壓強度 N/mm ² (lb/in ²)	彈 性 模 數 KN/mm ² (lb/in ² × 10 ⁻⁶)		
	輕 質 混 凝 土		常 重 混 凝 土
	單 位 重 1400kg/m ³	單 位 重 1900kg/m ³	單 位 重 2300kg/m ³
30 (4300)	11 (1.6)	19 (2.8)	28 (4.0)
40 (5800)	12 (1.7)	21 (3.0)	31 (4.5)
50 (7200)	13 (1.9)	23 (3.3)	34 (4.9)
60 (8700)	14 (2.0)	25 (3.6)	36 (5.2)

表 2-5 輕質混凝土中石英砂用量比例對熱傳導係數之影響
(含水量 5% 狀況)

混凝土單位重 kg/m ³	石英砂用量比例 %	熱傳導係數 W/mK
1400	None	0.58
1600	None	0.64
1600	25	0.87
1800	25	0.93
2000	47	1.16

表 2-6 重要之輕質骨材物理性質

來源	名稱	原料	製法	構造	顆粒形狀大小	顆粒外表面構造	顆粒顏色	單位重量 (g/cm ³)	顆粒密度 (g/cm ³)	吸水量 %	顆粒孔隙率 Vol. %
天然材料	浮石	火山玻璃石	碎天碎洞	蜂巢	圓方形 顆粒至15mm 粗至25mm 細至3mm	孔隙易露, 輕微 粗糙至中等孔隙 細小等孔隙	白至淡灰 灰中帶黃 棕色, 深褐色	0.34-0.63 0.75-1.40	0.35-1.85 1.00-2.00	→ 50% ~ 10%	→ 85% → 40%
	泡沫火山石	多孔隙玄武	碎洞	蜂巢	粗圓形 至長 立條形 極至15mm	極極密 孔隙封閉 至極細 向上	白色至淡灰色 黃棕色	0.04-0.15 0.08-0.17	-0.10-0.30 -0.10-0.35		→ ~ 95% → ~ 95%
工業天然材料	真珠石	火山砂石	碎洞	蜂巢	圓形 至長 立條形 極至15mm	極極密 孔隙封閉 至極細 向上	白色至淡灰色 黃棕色	0.04-0.15 0.08-0.17	-0.10-0.30 -0.10-0.35		→ ~ 95% → ~ 95%
	蛭石	雲母	碎洞	蜂巢	圓形 至長 立條形 極至15mm	極極密 孔隙封閉 至極細 向上	白色至淡灰色 黃棕色	0.04-0.15 0.08-0.17	-0.10-0.30 -0.10-0.35		→ ~ 95% → ~ 95%
天然材料 (合成質骨材)	膨脹黏土	具膨脹性 黏土	碾碎, 碾碎, 碾碎, 碾碎	蜂巢	圓形 至長 立條形 極至15mm	極極密 孔隙封閉 至極細 向上	棕色, 紅棕色 或黑色	0.30-0.90 0.45-0.90	粗 0.6-1.5 細 1.3-1.8	0-20% 5-10%	→ 75% → 70%
	膨脹頁岩	具膨脹性 頁岩	碾碎, 碾碎, 碾碎, 碾碎	蜂巢	圓形 至長 立條形 極至15mm	極極密 孔隙封閉 至極細 向上	棕色, 紅棕色 或黑色	0.30-0.90 0.45-0.90	粗 0.6-1.5 細 1.3-1.8	0-20% 5-10%	→ 75% → 70%
工業材料	膨脹爐渣	高爐渣	加水起泡沫	加水起泡沫	粗形 至多 至尖 角多形 至細裂	粗中等孔隙, 孔隙易露	灰色, 棕灰色 暗灰色	0.50-0.85	1.00-2.00	20-35%	→ 60% ~ 45%
	Aggloporite (煇結黏土)	膨脹或附有 膨脹性 黏土之 飛灰, 膨粉 Absorber	粉碎, 碾碎, 碾碎, 碾碎	在碾碎, 碾碎, 碾碎	圓形 至長 立條形 極至15mm	粗中等孔隙, 孔隙易露	暗灰色, 黑色 暗灰色至棕色	0.45-0.72 0.70	0.90-1.50 1.70	22-30%	→ 70%
人造材料	高分子烯起泡沫	高分子烯 人造樹脂	高起泡沫	高起泡沫	圓形 至3mm	極極密 孔隙封閉 至極細 向上	白色	-0.02	-0.04	~ 0	~ 99%

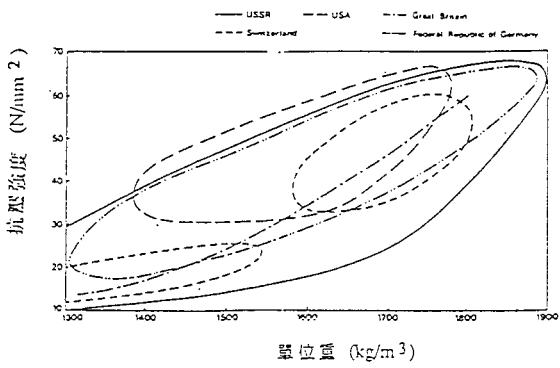


圖 2-1 結構輕質混凝土單位重與抗壓強度關係圖〔9〕

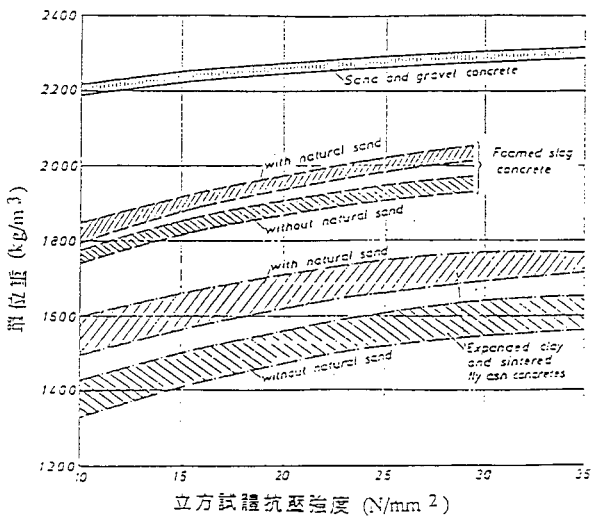


圖 2-2 全輕質及砂輕質混凝土單位重與抗壓強度關係圖〔7〕

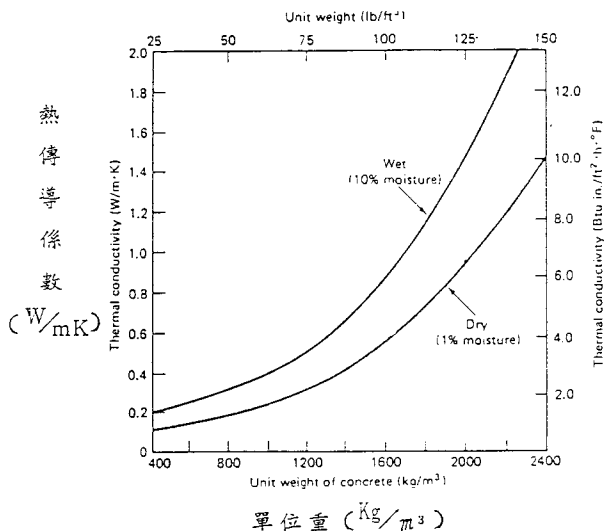


圖 2-3 輕質混凝土單位重及濕度對其熱傳導係數之影響

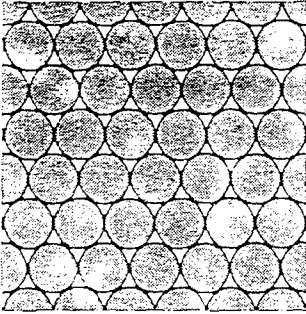
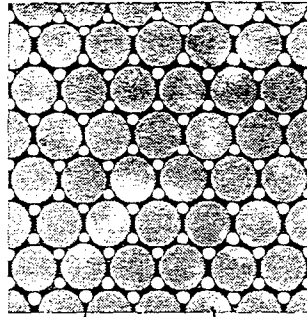
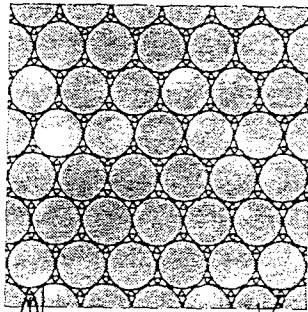


圖 2-4 粒間孔隙混凝土，
單粒混凝土，點黏結



水泥砂漿 顆粒

圖 2-5 粒間孔隙混凝土，
水泥砂漿含量較高
而充滿部份粒間三角楔



水泥漿或水泥砂漿 顆粒

圖 2-6 部份粒間孔隙之混凝土，除單粒骨材外另加入細粒群填充部份粒間孔隙

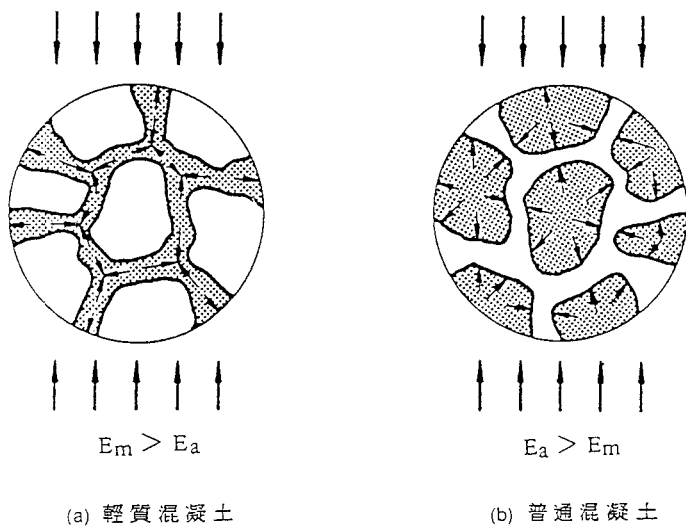


圖 2-7 混凝土之受力結構

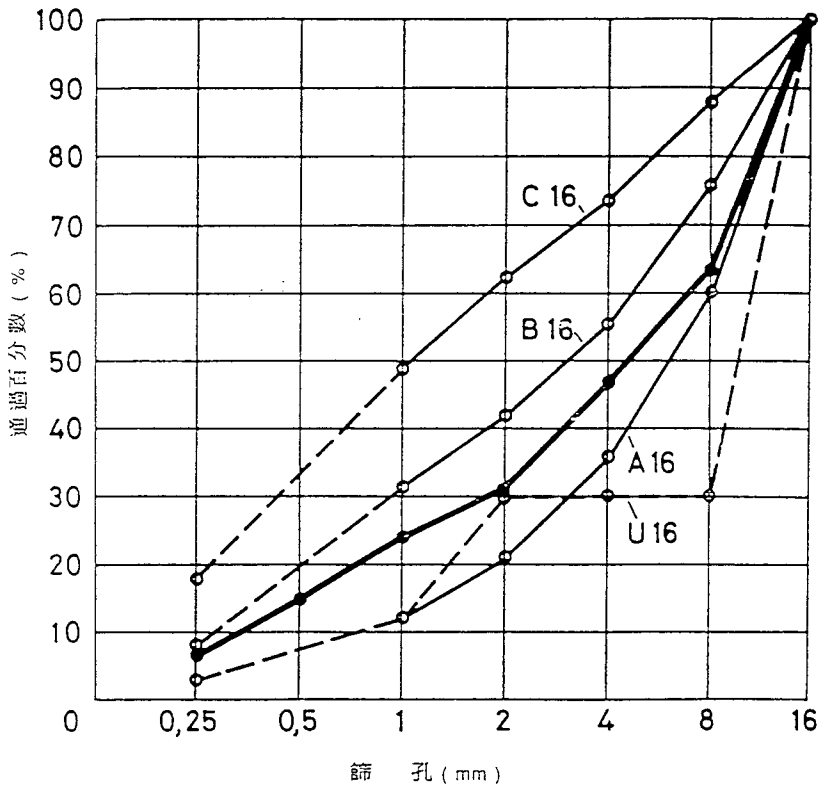


圖 2-8 標準骨材顆粒分佈曲線 (DIN 1045)

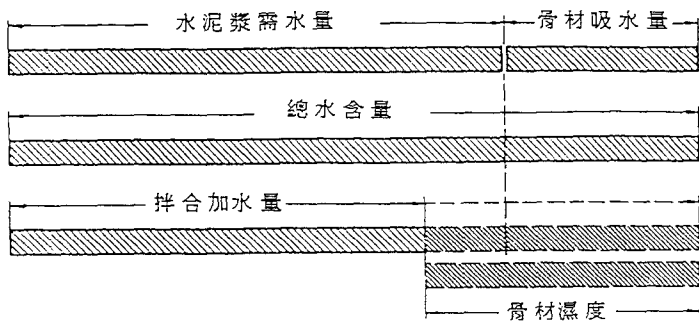


圖 2-9 輕質混凝土之含水量

第三章 研究方法與進行步驟

輕質混凝土的配合設計，在計算上可一如普通混凝土之基於材料體積觀念進行，但其性質準確性的掌握，會因骨材性質的差異，如顆粒密度變化、顆粒強度、吸水率等，而起變化。對於結構性及非結構性兩種輕質混凝土的配合設計法及拌製技術，將依其組成材料和構造方式的不同，分別探討之。最後並利用試驗室所得之配合設計結果及拌製技術，於預拌廠進行廠拌試驗，從而研擬輕質混凝土之量產製作技術，以供業界實用上的參考。

本研究計劃分四部份進行，所有研究工作流程如圖 3-1，各部份工作的研究方法依執行步驟敘述如下：

3.1 非結構性輕質混凝土之配合設計

進行非結構性輕質混凝土配合設計時，須先取得單一粒徑或混合級配輕質骨材的乾鬆單位重作為基本資料，並以加壓振動後之顆粒組構所需達到之直立強度及造成低熱傳導係數孔隙率為要求條件，探討包裹輕質骨材顆粒及粘結顆粒的適當水泥漿量及水灰比，透過系列之試拌及試驗，研擬出非結構性輕質混凝土之配合比例。其試驗流程如附圖 3-2 所示。

3.2 結構性輕質混凝土之配合設計

利用國內生產及大陸地區之人造輕質骨材，先進行骨材物理性質量測。以 ASTM C330 規定之標準骨材級配條件，採用骨材最大粒徑分別為 3/4"、1/2"，進行級配及砂率計算。

其次，選用不同單位水泥量，依材料體積觀念進行結構性輕質混凝土之配比計算得配合比例。利用該等配比進行試拌，測析新拌

混凝土單位重、坍度、空氣含量並拌製抗壓試體測試抗壓強度，從而探討出不同等級輕質骨材，其單位水泥量與輕質混凝土抗壓強度之關係。最後配合參考前導研究[1][3]之結果，擬定結構性輕質混凝土之配比計算方法與步驟，建立國內輕質骨材之配比資料庫。其試驗流程如附圖3-3。

3.3 輕質混凝土之拌製方法

3.3.1 非結構性輕質混凝土

利用3.1節所研擬之非結構性輕質混凝土配比資料，從混凝土拌合加料的順序著手，觀察水泥漿體包裹骨材情形及顆粒組構狀況，探討適宜的非結構性輕質混凝土拌合方式。

其次以上述所得之適宜拌合方式，拌製非結構性輕質混凝土。於試體製作時，針對預鑄構件需求之直立強度，變化加载之上壓力及振動時間，探求合適的壓振方式，從而研擬出非結構性輕質混凝土之拌製方法。其試驗流程如附圖3-4所示。

3.3.2 結構性輕質混凝土

基於輕質骨材的高吸水率特性，使得混凝土拌合方式有異於普通混凝土，本研究採用常用之三種不同拌合方式，包含加料順序，水量分次摻加等之變化，在充分控制配比、骨材條件及總拌合時間之條件下進行試驗及測試。就拌合試驗的條件與結果，配合測析所得之新拌混凝土坍度損失及混凝土抗壓強度，研討出適當的結構性輕質混凝土拌合方式。其試驗流程如附圖3-5所示。

另外，為瞭解輕質混凝土利用振動棒夯實之理想振動時間，本研究就振動時間與強度關係及空氣含量變化情況進行系列試驗，以探討輕質混凝土合理之振動夯實。

3.4 預拌廠之拌合作業實驗

為實際了解廠拌作業與實驗室拌製工作過程可能引起的混凝土性質上差異，選取國內生產之造粒型輕質骨材及大陸產輕質骨材各一種，於國產實業股份有限公司中壢預拌廠，進行現場廠拌作業。基本上，一切拌合作業的作業流程，以拌合廠一貫生產的過程為準，只有在進料順序，水分摻加控制及拌合時間上，參考配比數據及實驗室拌合法，作必要的調整。

廠拌實驗從材料計量、分次加水、分次拌合、攪拌時間控制到拌合結束等採控，都在拌合廠控制室內，由電腦操作指揮，完全自動化的完成廠拌作業試驗，拌合試驗過程中，並隨時由監控銀幕觀察混凝土攪拌情形，以瞭解拌合試驗的成效。

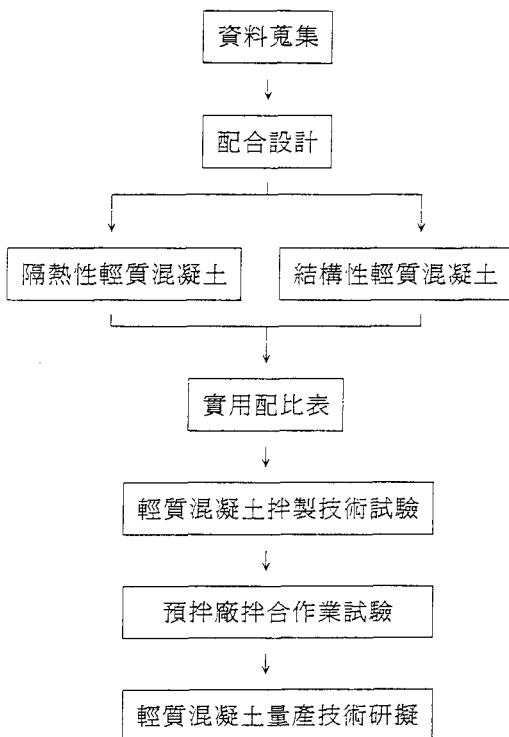


圖 3-1 研究計劃之工作流程圖

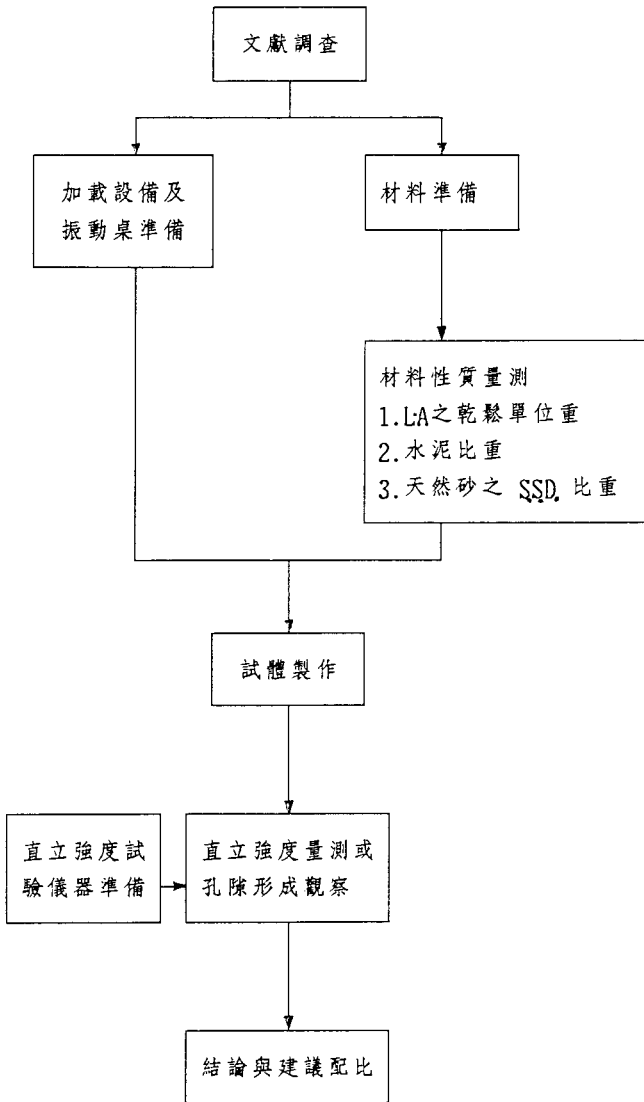


圖 3-2 試驗流程圖

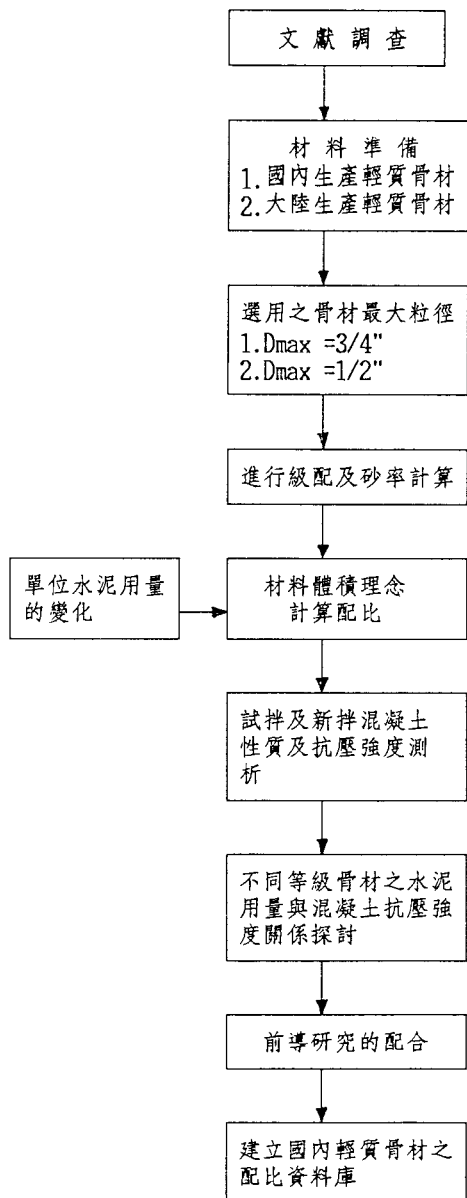


圖 3-3 試驗流程圖

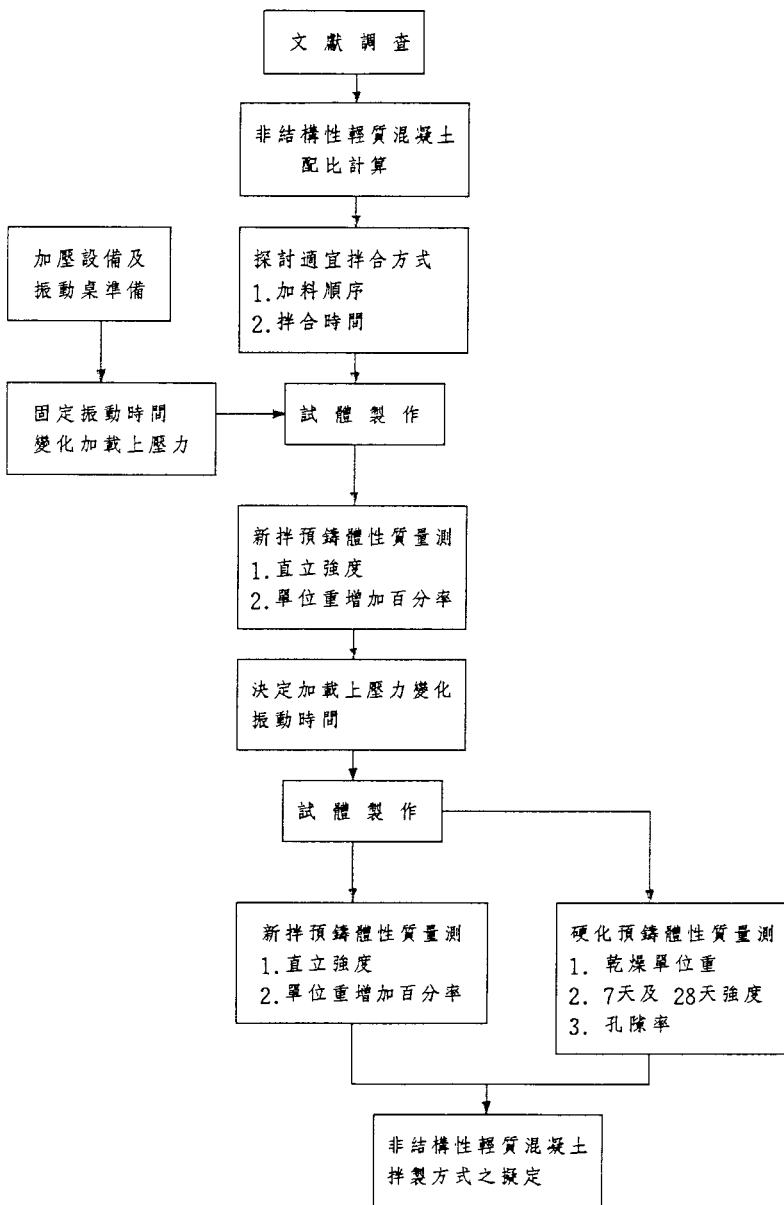


圖 3-4 試驗流程圖

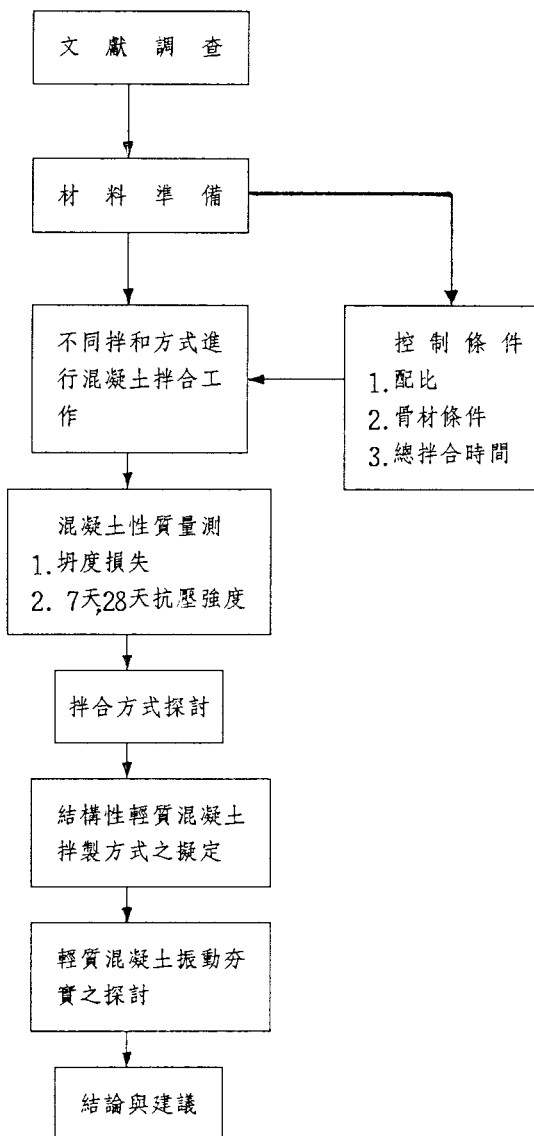


圖 3-5 試驗流程圖

第四章 試驗工作

4.1 試驗材料準備及性質量測

1. 水 泥—台灣水泥公司之TYPE I波特蘭水泥。

比重：3.15

細度： $347\text{m}^2/\text{kg}$

2. 天然砂—料源：雲林縣西螺濁水溪一帶。

比重：2.63

吸水率：1.2%

細度模數：2.1

篩分析表：如附表4-1

篩分析曲線：如附圖 4-1

3. 輕質骨材：本研究採用三批輕質骨材，分別為中壢地區非造粒形，中壢—新營混合造粒型，大陸產輕質骨材。其物理性質如表4-2，表4-3及表 4-4，並將骨材篩分成四個粒群， $1''\sim 3/4''$ ， $3/4''\sim 1/2''$ ， $1/2''\sim 3/8''$ ， $3/8''\sim \#4$ ，以進行各項試驗研究工作。

4.2 試驗儀器及設備

1. 震生機械有限公司之振動桌。如圖4-2所示。

振動數：0~6000HZ

振 幅：0~12mm

2. 美國 FORNEY公司之200TON 萬能試驗機。如圖4-3 所示。

3. 台灣高鐵公司之KT - 7010 - A2型2000KG單軸試驗機。如圖4-4 所示。

4. 日製ESEN BC 25DS 型表動棒。

尺寸：25 ϕ × 447 mm

振動數：13000~15000rpm

振幅：1.2mm

4.3 非結構性輕質混凝土試驗工作

4.3.1 非結構性輕質混凝土配比設計及試拌

進行非結構性輕質混凝土之配比設計時，須先取得單一粒徑或混合級配骨材的乾搗單位重作為基本資料。另外做為粘結用的水泥漿及細骨材用量應儘量以不增加混凝土單位重及孔隙率為原則，藉由試拌尋求最佳配比。至於新拌混凝土的單位重，可先假設為粗骨材使用量、水泥含量、水含量及細骨材量等的重量和，以此假設資料確實進行試拌試驗後，即可定出拌合之配比。於試拌試驗中尤須注意，應確定最佳水泥砂漿含量，因含量太少會減低粘結強度，並降低混凝土強度；若水泥砂漿太多，則混凝土強度產生不必要之升高，同時混凝土的單位重也會增大。本文依據吾人前導研究之結果 [1]，採用水泥量為 250kg/m³，水灰比=0.35 (決定用水量)。以大湖地區顆粒密度 < 1.0g/m² 之非造粒型輕質骨材進行配比計算及試拌。輕質骨材物理性質經測出列於表 4-5，配比計算步驟如下，結果則如附表 4-6 所示：

非結構用無細輕質混凝土配合設計：

Step 1. 測定骨材物理性質：

單一粒徑或粗骨材級配之鬆密度： γ kg/m³

單一粒徑或粗骨材級配之 30min 吸水率： ω %

Step 2. 決定使用骨材級配或單一粗骨材粒徑

Step 3. 決定水泥用量： $C=200$ kg/m³

Step 4. 決定天然砂用量： $S=150$ kg/m³

Step 5. 輕質骨材用量： γ kg/m³

Step 6. 設計用水量：

以水灰比 =0.35計算設計用水量

$$w200 \times 0.35 = 70 \text{ kg/m}^3$$

Step 7. 計算輕質骨材30min吸水量：

$$\text{輕質骨材30min吸水量} = \gamma \times \omega\%$$

Step 8. 計算新拌混凝土單位重

$$\text{新拌混凝土單位重} = C + S + W + (1 + \omega\%) \gamma$$

另外，針對預鑄體組構於加壓振動後所需之直立強度及鑄模性考量，本計劃以中壢一新營混合造粒型輕質骨材，選用單一粒徑，由輕質骨材顆粒包裹及粘結顆粒所需最佳水泥砂漿量及水灰比，進行系列試拌及試驗觀察，得到建議配比如表4-7所示。其中輕質骨材5分鐘吸水率部份得視實際拌合工作時間調整。

4.3.2 非結構性輕質混凝土拌合方式

以前項造粒型骨材非結構性混凝土配比資料，藉由不同加料順序的拌合方式進行試拌後發現，由於骨材顆粒為造粒型，粒型圓滑，使水泥漿不易包裹骨材顆粒而自行聚合結塊。經另行採用他法試拌後，獲得成功拌合法；其拌合法為：在不影響預鑄體澆注時之水灰比條件下，將拌製時間內輕質骨材所吸入之水量，先行加入與骨材潤濕攪拌，然後倒入水泥及天然砂拌合至骨材顆粒表面均包裹著水泥及砂，最後再倒入設計拌合水完成拌合作業。

4.3.3 非結構性輕質混凝土預鑄之加壓振動方式

本項研究目的主要為預鑄構件需求之直立強度，從兩個方向探討加壓振動方式。首先固定振動時間，變化加載上壓力，由單位重增加百分比及直立強度測試結果決定適當上壓力；其次由前述所決定之上壓力，變化振動時間測析新拌混凝土單位重增加百分比、直

立強度以及硬化混凝土七天、廿八天抗壓強度、乾燥單位重、孔隙率等資料。

對第一部份試驗乃利用前述造粒型骨材非結構性混凝土之配比資料，及拌合方式完成混凝土拌製後，以15cm×15cm×15cm 鋼模灌製試體，每一試體先量測單位重再置於振動桌上，以砝碼加载上壓力，(上壓力變化分0,5,15,20,30g/m²等六種) 經振動頻率3000rpm 振動30秒後量測單位重。最後拆模進行直立強度量測試驗，如圖4-4所示。

另一部份試驗固定上壓力，如前述每一試體均先量稱單位重，加载上壓力後置於振動桌以3000rpm 的頻率變化振動時間，(分別為5, 10, 20, 30, 60, 90 秒)。待振動完成後，量測單位重及直立強度。另外並同時灌製不同振動時間下各六個試體，作為七天、廿八天及乾燥單位重、孔隙率試驗之用。整個試體規劃如附表4-8。

4.4 結構性輕質混凝土試驗工作

4.4.1 結構性輕質混凝土配合設計及試拌

本項試驗採用的輕質粗骨材包括：國內生產之兩種密度等級非造粒型輕質骨材(顆粒密度1.5~1.7, 1.2~1.4)，一種造粒型輕質骨材(顆粒密度1.0~1.5)，細骨材部份則採用天然砂。另外為瞭解顆粒密度小於1之輕質骨材非結構用緻密混凝土配合設計及試拌結果，亦取大陸產較質骨材一批進行試驗。輕質骨材物理性質如表4-2 表4-3 及表4-4。以八種單位水泥用量及不同骨材最大粒徑，進行配合設計及試拌，其配合設計方法仍採用材料體積觀念。以下列述配合設計步驟及實例計算，所有配比結果如表4-9-1~4-9-7所示。

材料性質：

1. 水泥比重： γ_c
2. 各粒群人造輕質骨材顆粒密度及30mins 吸水率

1"~3/4" : $\rho_1, \omega_1\%$

3/4"~1/2" : $\rho_2, \omega_2\%$

1/2"~3/8" : $\rho_3, \omega_3\%$

3/8"~#4" : $\rho_4, \omega_4\%$

3. 天然砂比重 (S.S.D) :

Step 1. 設計條件之決定 :

(1) 設計坍度

(2) 設計空氣含量, air %

(3) 粗骨材最大粒徑

Step 2. 決定單位水泥用量 :

選定水泥用量 $C = 260, 279, 300, 325, 355, 390, 433, 489$ (kg/m³)

Step 3. 決定單位設計用水量 :

依 ACI 法由設計坍度與粗骨材最大粒徑決定設計用水量

$= W$ (kg/m³)

Step 4. 計算所需骨材材料體積 :

以絕對體積觀念計算骨材體積 VA (1)

Step 5. 決定砂率及各粒群粗骨材用量比例

以符合標準級配曲線要求, 決定砂率 (S/A %) 及各粒群粗骨材體質用量比例如下 :

		$D_{\max}:3/4"; S/A: 40\%$	$D_{\max}:1/2"; S/A: 55\%$
1"~3/4" :	a%	10	0
3/4"~1/2" :	b%	20	10
1/2"~3/8" :	c%	30	40
3/8"~#4" :	d%	40	50

Step 6. 計算各粒群人造輕質骨材用量及30min吸水量

1"~3/4" : $LA_1 = VA \times (1 - S/A\%) \times a\% \times \rho_1$, $W_1 = LA_1 \times \omega_1\%$

3/4"~1/2" : $LA_2 = VA \times (1 - S/A\%) \times b\% \times \rho_2$, $W_2 = LA_2 \times \omega_2\%$

1/2"~3/8" : $LA_3 = VA \times (1 - S/A\%) \times c\% \times \rho_3$, $W_3 = LA_3 \times \omega_3\%$

3/8"~#4" : $LA_4 = VA \times (1 - S/A\%) \times d\% \times \rho_4$, $W_4 = LA_4 \times \omega_4\%$

$$\Sigma W_{30\text{min}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

Step 7. 計算天然砂用量：

$$W_s = LA \times S/A\% \times \gamma_s$$

Step 8. 設計新拌混凝土單位重

$$\rho = C + W + LA_1 + LA_2 + LA_3 + LA_4 + W_s + \Sigma W_{30\text{min}}$$

配合設計實例：

材料性質：

1. 水泥比重：3.15

2. 各粒群人造輕質骨材性質：

粒 群	顆粒密度	30min 吸水率
1"~3/4" :	1.21	5.74
3/4"~1/2" :	1.33	5.35
1/2"~3/8" :	1.37	5.27
3/8"~#4" :	1.41	5.15

3. 天然砂比重 (S.S.D) = 2.64

設計條件之決定：

1. 抗壓強度：210~280 kg f/cm²

2. 設計坍度：4~8cm

3. 設計空氣含量：2.5%

4. 粗骨材最大粒徑：3/4"

單位水泥用量：C = 350 kg/cm³

單位設計用水量：W = 195 kg/cm³

所需骨材材料體積： $VA = 1000 - (\frac{350}{3.15} + 195 + 25) = 668.89(L)$

輕質骨材用量：

$$1" \sim 3/4" : 668.89 \times 60\% \times 10\% \times 1.21 = 48.6 \text{ kg/cm}^3$$

$$3/4" \sim 1/2" : 668.89 \times 60\% \times 20\% \times 1.33 = 106.8 \text{ kg/cm}^3$$

$$1/2" \sim 3/8" : 668.89 \times 60\% \times 30\% \times 1.37 = 164.9 \text{ kg/cm}^3$$

$$3/8" \sim \#4" : 668.89 \times 60\% \times 40\% \times 1.41 = 226.4 \text{ kg/cm}^3$$

輕質骨材30min吸水量：

$$1" \sim 3/4" : 48.6 \times 5.74\% = 2.79 \text{ kg/cm}^3$$

$$3/4" \sim 1/2" : 106.8 \times 5.35\% = 5.71 \text{ kg/cm}^3$$

$$1/2" \sim 3/8" : 164.9 \times 5.27\% = 8.69 \text{ kg/cm}^3$$

$$3/8" \sim \#4" : 226.4 \times 5.15\% = 11.66 \text{ kg/cm}^3$$

$$W_{30\text{min}} = 2.79 + 5.71 + 8.69 + 11.66 = 28.85$$

天然砂用量：

$$668.89 \times 40\% \times 2.64 = 706.3 \text{ kg/cm}^3$$

拌合用水量：

$$195 + 28.85 = 223.85 \text{ kg/cm}^3$$

設計新拌混凝土單位重

$$350 + 195 + 48.6 + 106.8 + 164.9 + 226.4 + 28.85 + 706.3$$

$$= 1826.85 \text{ kg/cm}^3$$

利用材料體積觀念進行配合設計時，當骨材最大粒徑不同時，砂率及各粒徑輕質骨材用量體積比，需依ASTM C 330標準級配條件(如附表4-10)定之。為易於掌握輕質骨材在拌合時之吸水情形，拌合前輕質骨材需處於乾燥狀態，在計算用水量時則須額外加上部分骨材吸水量以補充拌合過程輕質骨材之吸水。本文以30分鐘骨材吸水

量為計算標準，測定新拌混凝土性質如坍度、空氣含量、新拌單位重等時亦以拌合30分鐘後為測定時間。

另外在拌合時，須將輕質骨材先行倒入拌合機並加入部分拌合用水，先行轉動數秒使骨材預先吸水，然後進行拌合作業，可較精確地控制混凝土稠度。

輕質混凝土由於重量較輕，其坍度均比普通混凝土小 2~3cm [31]，例如設計普通混凝土之坍度為10公分，則相同配比之輕質混凝土坍度達7至8公分即可。在輕質混凝土配比設計時，應儘可能降低拌合水量，增大混凝土粘滯性，以避免材料分離及較輕之大顆粒骨材浮於混凝土表面。

以上各組配比拌製之輕質混凝土各灌製三個10cm ϕ ×20cm圓柱型抗壓試體，量測廿八天抗壓強度，共計168個試體。

4.4.2 結構性輕質混凝土拌製技術

本項目就加料順序之拌合方式對坍度損失及強度影響，以及灌製試體振動夯實時間對輕質混凝土新拌行為及強度影響進行試驗探討。

第一部份：由於輕質骨材具有高吸水率及低顆粒密度之特性，若採普通混凝土之傳統拌合方式拌製輕質混凝土，可能造成水泥砂漿附著於拌合鼓或輕質骨材吸水不均，導致材料拌合後，混凝土品質差異。故本試驗就三種拌合方式—控制配比，骨材條件，總拌合時間等因素，進行混凝土拌製，並於拌合後0, 5, 10, 15, 30, 45分鐘量測坍度損失且灌製10cm ϕ ×20cm混凝土圓柱試體各六個，以量測七天、廿八天抗壓強度。以下將三種拌合方式以箭式圖表示：

第一種：輕質骨材+砂+水泥 $\xrightarrow{\text{倒入拌合鼓}}$ 加總拌合水
乾拌30秒
 $\xrightarrow{\text{拌合1分鐘}}$ 完成拌合工作

第二種：輕質骨材 + 一半之拌合水量 $\xrightarrow[\text{預拌30秒}]{\text{倒入拌合鼓}}$ 加砂 + 水泥

+ 剩餘一半之拌合水 $\xrightarrow{\text{拌合1分鐘}}$ 完成拌合工作

第三種：輕質骨材 + 砂 + 一半之拌合水量 $\xrightarrow[\text{預拌30秒}]{\text{倒入拌合鼓}}$ 加水泥

+ 剩餘一半之拌合水 $\xrightarrow{\text{拌合1分鐘}}$ 完成拌合工作

第二部份，以振動棒夯實輕質混凝土，由於輕質骨材密度低，過度振動易導致材料分離。故本試驗將就夯實時間對混凝土強度影響進行探討，並觀察混凝土面下陷，泌水、輕質骨上浮現象，以空氣含量量測求証混凝土達穩定緊密狀態下之夯實時間，從而決定最佳夯實時間。

試驗工作是於輕質混凝土拌合後30分鐘即以10cm ϕ ×20cm圓柱試模澆置試體，並以振動棒進行振動夯實試驗。夯實時間分別為3, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90秒共九種，每種振動時間均量測振動後新拌混凝土之空氣含量，並製作圓柱試體三個量測廿八天抗壓強度，以作為最佳振動夯實時間之判斷。

表 4-1 天然砂之篩分析表

篩 號 (g)	留 篩 量 (%)	留 篩 百 分 率 (%)	留 篩 累 計 百 分 率 (%)	過 篩 百 分 率	備 註
3 "					F.M. =2.1
2½"					
2 "					
1½"					
1 "					
¾"					
½"					
⅜"					
# 4					
# 8	69.7	7.0	7.0	93.0	
# 16	100.1	10.0	17.0	83.0	
# 30	202.7	20.2	37.2	62.8	
# 50	213.8	21.3	58.5	41.5	
#100	284.8	28.4	86.9	13.1	
#200	93.2	9.3	96.2	3.8	
底 盤	37.9				
共 計	1002.2				

表 4-2 中壢地區非造粒型輕質骨材物理性質

顆粒分佈	顆粒密度 (g/cm ³)	吸水率(粗骨材)		比重 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	備 註
		30 min	24 hrs			
3/4"	1.67	7.87 %	10.84%	2.63	36.5 %	$\rho = 1.5-1.7$ (g/cm ³)
1/2"	1.64	8.78 %	12.14%	2.63	37.6 %	
3/8"	1.59	9.21 %	12.43%	2.63	39.5 %	
# 4	1.63	8.90 %	12.47%	2.63	38.0 %	
3/4"	1.27	7.15 %	10.97%	2.62	51.5 %	$\rho = 1.2-1.4$ (g/cm ³)
1/2"	1.27	7.34 %	11.32%	2.62	51.5 %	
3/8"	1.30	7.40 %	11.35%	2.62	50.4 %	
# 4	1.42	7.46 %	10.26%	2.62	45.8 %	

表 4-3 中壢、新營混合造粒型輕質骨材物理性質(1.0g/cm³–1.5g/cm³)

粒 徑	顆粒密度 (g/cm ³)	30 分 鐘	24 小 時	顆粒真比重	孔隙率 (%)
		吸水率(%)	吸水率(%)		
1" ~ 3/4"	1.02	8.5	16.0	2.63	61.2
3/4" ~ 1/2"	1.36	8.4	14.5	2.63	48.3
1/2" ~ 3/8"	1.37	7.1	12.2	2.63	47.9
3/8" ~ #4	1.52	8.2	16.0	2.63	42.2

表 4-4 大陸產輕質粗骨材性質(1.0 g/cm³ 以下)

粒 徑	顆 粒 密 度 (g/cm ³)	30 分 鐘 吸 水 率 (%)	24 小 時 吸 水 率 (%)	顆 粒 真 比 重	孔 隙 率 (%)
1" ~ 3/4"	0.53	11.5	20.2	2.63	79.5
3/4" ~ 1/2"	0.56	11.5	18.9	2.63	78.7
1/2" ~ 3/8"	0.65	11.1	16.6	2.63	75.3
3/8" ~ # 4	0.79	8.8	13.1	2.63	70.0

表 4-5 大湖地區非造粒型輕質骨材物理性質(密度 1.0 以下)

粒 徑	顆 粒 密 度	30min 吸水率(%)	24hr 吸水率(%)
1 1/2" ~ 1"	0.77	10.44	15.07
1" ~ 3/4"	0.84	7.56	12.10
3/4" ~ 1/2"	0.87	6.26	10.36
1/2" ~ 3/8"	0.93	6.24	8.74

表 4-6 非結構性無細輕質混凝土配比表 ($\rho < 1.0 \text{ g/cm}^3$)

粗骨材粒徑	1"	3/4"	1/2"	3/8"
粗骨材乾搗單位重 kg/m^3	385.18	459.04	534.12	614.60
粗骨材30min吸水率 %	10.44	7.56	6.26	6.24
天然砂30min吸水率 %	1.23	1.23	1.23	1.23
水泥用量 (C) kg/m^3	200	200	200	200
天然砂 (NS) kg/m^3	150	150	150	150
粗骨材 (G) kg/m^3	385	459	534	615
用水量 (W) kg/m^3				
拌合水 (W1) kg/m^3	70	70	70	70
骨材吸水 (Wk) kg/m^3	36.54	30.16	27.79	30.89
新拌混凝土毛密度(ρ_{fb}) kg/m^3	841.54	909.16	981.79	1065.89

表 4-7 造粒型顆粒非結構性輕質混凝土配比資料

配 比 資 料	
1	輕質骨材乾搗單位重 = 835 kg/m^3
2	造粒型輕質骨材粒徑 = 1/2"
3	水泥用量 = 180 kg/m^3
4	水灰比 = 0.32
5	天然砂量 (S.S.D.) = 70 kg/m^3
6	輕質骨材 5 min 吸水率 4.5 %
7	設計單位重 = 1.180 kg/l

表 4-8 非結構性輕質混凝土加壓振動試驗試體規劃

試驗項目	試驗變數 (上壓力 g/cm^2)					
	0	5	15	20	30	
直立強度及單位重增加百分比	3個	3個	3個	3個	3個	
試驗項目	試驗變數 (振動時間 sec)					
	5	10	20	30	60	90
直立強度及單位重增加百分比	3個	3個	3個	3個	3個	3個
7天抗壓強度	3個	3個	3個	3個	3個	3個
28天抗壓強度及乾燥單位重孔隙率	3個	3個	3個	3個	3個	3個

表4-9-1 輕質混凝土配比結果

中壢地區非造粒型輕質骨料顆粒密度 1.5~1.7 g/cm ³									
最大粒徑 (D _{max})	坍度 (cm)	水泥用量 (Kg/m ³)	水		骨材30min吸水量	粗骨材用量 (Kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計混凝土 單位重 (Kg/L)	新拌混凝土 單位重 (Kg/L)
			設計用水量	量					
3 / 4"	4~8	260	195	60.18	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	70 137 199 273	734	1.928	1.936
3 / 4"	4~8	279	195	59.70	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	69 136 198 270	727	1.935	1.937
3 / 4"	4~8	300	195	59.10	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	69 135 196 268	720	1.942	1.938
3 / 4"	4~8	325	195	58.44	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	68 133 191 265	712	1.950	1.940
3 / 4"	4~8	355	195	57.61	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	67 131 191 261	702	1.960	1.951
3 / 4"	4~8	390	195	56.65	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	66 129 188 257	690	1.971	1.957
3 / 4"	4~8	433	195	55.48	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	64 126 184 251	676	1.986	1.986
3 / 4"	4~8	489	195	53.97	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	63 123 179 245	658	2.004	2.006

表4-9-2 輕質混凝土配比結果

中歷地區輕質骨料顆粒密度 1.5~1.7 g/cm ³									
最大粒徑 (D _{max})	坍度 (cm)	水泥用量 (Kg/m ³)	水		量 (Kg/m ³)	粗骨材用量 (Kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計混凝土 單位重 (Kg/L)	新拌混凝土 單位重 (Kg/L)
			設計用水量	骨料30min吸水量					
1/2"	4~8	260	207	44.88	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	51 196 251	992	2.002	1.989
1/2"	4~8	279	207	44.49	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	50 194 249	983	2.007	1.997
1/2"	4~8	300	207	44.05	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	50 193 247	973	2.013	2.000
1/2"	4~8	325	207	43.53	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	49 190 244	962	2.020	2.009
1/2"	4~8	355	207	42.91	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	48 188 240	948	2.029	2.017
1/2"	4~8	390	207	42.18	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	48 184 236	932	2.040	2.031
1/2"	4~8	433	207	41.29	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	47 180 231	912	2.052	2.051
1/2"	4~8	489	207	40.12	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	45 175 225	886	2.068	2.071

表4-9-3 輕質混凝土配比結果

中壢地區非造粒型輕質骨料顆粒密度 1.2~1.4 g/cm ³									
最大粒徑 (D _{max})	坍度 (cm)	水泥用量 (kg/m ³)	水		量 (Kg/m ³)	粗骨材用量 (Kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計濕凝土 單位重 (Kg/L)	新拌濕凝土 單位重 (Kg/L)
			設計用水量	骨材30min吸水量					
3 / 4"	4 ~ 8	2 6 0	1 9 5	4 1 . 4 3	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	53 106 163 238	7 3 4	1 . 7 9 1	1 . 8 1 1
3 / 4"	4 ~ 8	2 7 9	1 9 5	4 1 . 0 5	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	53 105 162 236	7 2 7	1 . 7 9 8	1 . 8 1 1
3 / 4"	4 ~ 8	3 0 0	1 9 5	4 0 . 6 6	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	52 104 160 233	7 2 0	1 . 8 0 6	1 . 8 1 4
3 / 4"	4 ~ 8	3 2 5	1 9 5	4 0 . 1 9	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	52 103 158 231	7 1 2	1 . 8 1 6	1 . 8 2 0
3 / 4"	4 ~ 8	3 5 5	1 9 5	3 9 . 6 3	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	51 102 156 227	7 0 2	1 . 8 2 8	1 . 8 3 4
3 / 4"	4 ~ 8	3 9 0	1 9 5	3 8 . 9 6	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	50 100 154 224	6 9 0	1 . 8 4 1	1 . 8 4 6
3 / 4"	4 ~ 8	4 3 3	1 9 5	3 8 . 1 6	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	49 98 150 219	6 7 6	1 . 8 5 8	1 . 8 5 4
3 / 4"	4 ~ 8	4 8 9	1 9 5	3 7 . 0 9	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	48 95 146 213	6 5 8	1 . 8 8 0	1 . 8 8 9

表4-9-4 輕質混凝土配比結果

中壢地區非造粒型輕質骨材顆粒密度 1.2~1.4 g/cm ³									
最大粒徑 (D _{max})	坍度 (cm)	水泥用量 (Kg/m ³)	水		骨材30min吸水量	粗骨材用量 (kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計混凝土 單位重 (Kg/L)	新拌混凝土 單位重 (Kg/L)
			設計用水量	量					
1/2"	4~8	260	207	31.08	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	39 160 219	992	1.908	1.923
1/2"	4~8	279	207	30.81	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	39 159 217	983	1.915	1.911
1/2"	4~8	300	207	30.51	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	38 157 215	973	1.921	1.914
1/2"	4~8	325	207	30.15	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	38 156 212	962	1.930	1.920
1/2"	4~8	355	207	29.72	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	37 153 209	948	1.940	1.923
1/2"	4~8	390	207	29.21	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	37 151 206	932	1.951	1.934
1/2"	4~8	433	207	28.59	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	36 140 231	912	1.966	1.957
1/2"	4~8	489	207	27.79	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	35 143 196	886	1.984	1.969

表4-9-5 輕質混凝土配比結果

大陸產輕質骨料顆粒密度 1.0 g/cm ³ 以下									
最大粒徑 (D _{max})	坍度 (cm)	水泥用量 (Kg/m ³)	水		粗骨材用量 (Kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計混凝土 單位重 (Kg/L)	新拌混凝土 單位重 (Kg/L)	
			設計用水量	骨材30min吸水量					
3 / 4"	4 ~ 8	260	195	28.64	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	22 47 82 132	734	1.500	1.471
3 / 4"	4 ~ 8	279	195	28.39	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	22 46 81 131	727	1.510	1.460
3 / 4"	4 ~ 8	300	195	28.11	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	22 46 80 130	720	1.521	1.457
3 / 4"	4 ~ 8	325	195	27.78	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	22 45 79 128	712	1.534	1.491
3 / 4"	4 ~ 8	355	195	27.40	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	21 45 78 127	702	1.550	1.534
3 / 4"	4 ~ 8	390	195	26.94	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	21 44 77 124	690	1.568	1.531
3 / 4"	4 ~ 8	433	195	26.38	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	20 43 75 122	676	1.591	1.549
3 / 4"	4 ~ 8	489	195	25.65	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	20 42 73 118	658	1.620	1.609

表4-9-6 輕質混凝土配比結果

大陸產輕質骨料顆粒密度 1.0 g/cm ³ 以下									
最大粒徑 (D _{max})	坍度 (cm)	水泥用量 (Kg/m ³)	水		量 (Kg/m ³)	粗骨材用量 (Kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計濕凝土 單位重 (Kg/L)	新拌濕凝土 單位重 (Kg/L)
			設計用水量	骨材30min吸水量					
1/2"	4~8	260	207	21.61	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	17 80 122	992	1.699	1.671
1/2"	4~8	279	207	21.42	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	17 79 121	983	1.708	1.686
1/2"	4~8	300	207	21.21	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	17 79 120	973	1.717	1.691
1/2"	4~8	325	207	20.96	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	17 78 118	962	1.727	1.706
1/2"	4~8	355	207	20.66	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	17 77 116	948	1.740	1.734
1/2"	4~8	390	207	20.31	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	16 75 115	932	1.755	1.760
1/2"	4~8	433	207	19.88	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	16 74 112	912	1.774	1.777
1/2"	4~8	489	207	19.32	3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"-#4	15 72 109	886	1.798	1.754

表4-9-7 輕質混凝土配比結果

中壢新營混合造粒型輕質骨材顆粒密度 1.0 ~ 1.5 g/cm ³									
最大粒徑 (Dmax)	坍度 (cm)	水泥用量 (Kg/m ³)	水		骨材30min吸水量	粗骨材用量 (Kg/m ³)	細骨材用量 (Kg/m ³)	設計混凝土 單位重 (Kg/L)	新拌混凝土 單位重 (Kg/L)
			設計用水量	量					
3 / 4"	4 ~ 8	2 6 0	1 9 5	4 6 . 2 6	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	43 114 172 254	7 3 4	1 . 8 1 8	1 . 8 5 1
3 / 4"	4 ~ 8	2 7 9	1 9 5	4 5 . 8 7	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	42 113 171 252	7 2 7	1 . 8 2 5	1 . 8 3 4
3 / 4"	4 ~ 8	3 0 0	1 9 5	4 5 . 4 2	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	42 135 196 268	7 2 0	1 . 8 3 3	1 . 8 4 9
3 / 4"	4 ~ 8	3 2 5	1 9 5	4 4 . 9 0	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	68 133 194 265	7 1 2	1 . 8 4 3	1 . 8 3 7
3 / 4"	4 ~ 8	3 5 5	1 9 5	4 4 . 2 6	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	67 131 191 261	7 0 2	1 . 8 5 4	1 . 8 5 7
3 / 4"	4 ~ 8	3 9 0	1 9 5	4 3 . 5 3	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	66 129 188 257	6 9 0	1 . 8 6 7	1 . 8 6 0
3 / 4"	4 ~ 8	4 3 3	1 9 5	4 2 . 6 2	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	64 126 184 251	6 7 6	1 . 8 8 4	1 . 8 9 4
3 / 4"	4 ~ 8	4 8 9	1 9 5	4 1 . 4 4	1"-3/4" 3/4"-1/2" 1/2"-3/8" 3/8"- #4	63 123 179 245	6 5 8	1 . 9 0 5	1 . 9 0 0

表 4-10 Grading Requirements for Lightweight Aggregates
for structure concrete (ASTM C330)

coarse aggregate	percentages (by volume) passing sieves							
	lin	3/4in	1/2in	3/8in	No.4	No.8	No.16	
lin. to No4.	95-100	.....	25-60	.....	0-10		
3/4" to No4.	100	90-100	.....	10-50	0-15		
1/2" to No4.	...	100	90-100	40-80	0-20	0-10		
3/8" to No8.	...	...	100	80-100	5-40	0-20	0-10

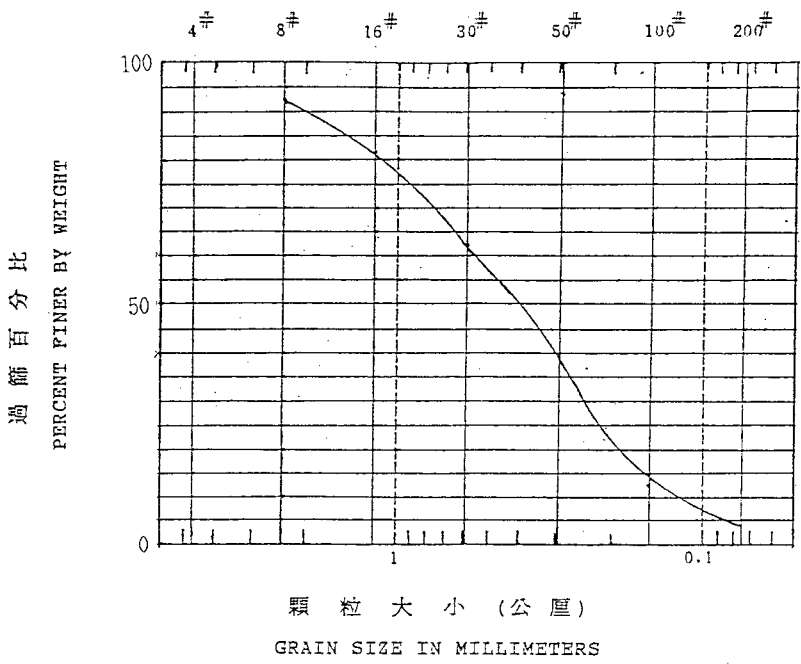


圖 4-1 天然砂篩分析曲線

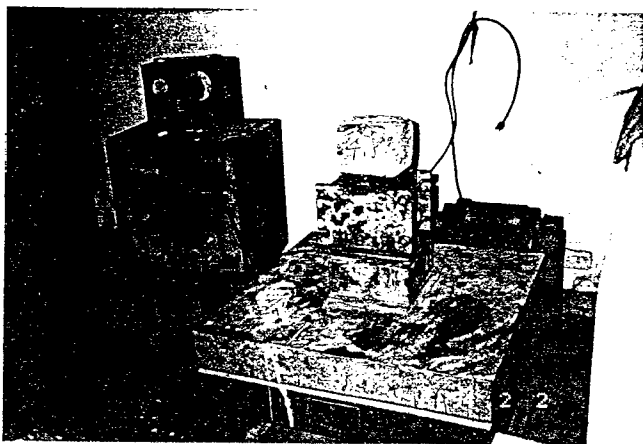


圖 4-2 振動桌

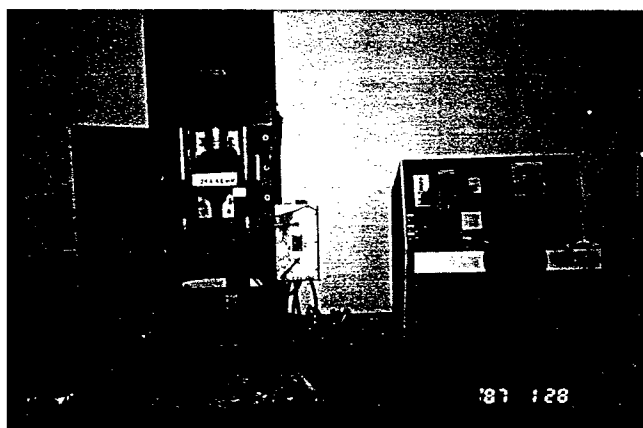


圖 4-3 200 TON 萬能試驗機

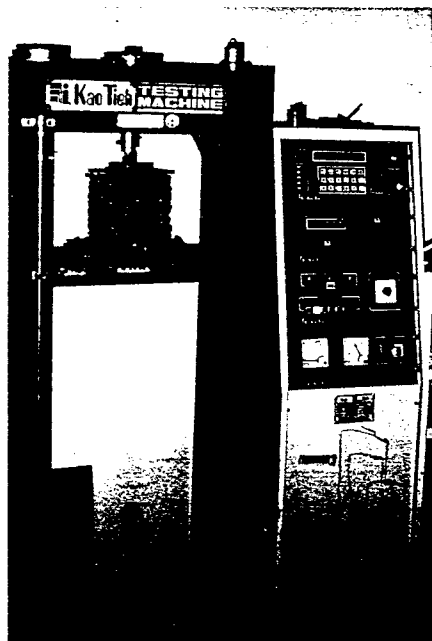


圖 4-4 KT-7010-A2 型 2 TON 單軸試驗機及直立強度量測

第五章 結果與討論

5.1 非結構性輕質混凝土之配比設計

進行非結構性混凝土之配合設計可利用圖5-1之流程圖計算配比，然後經由混凝土試拌，確定實用配比。依4.3.1節配比計算結果(附表4-6)進行無細混凝土拌製，成功地拌製出輕且低熱傳導係數的無細混凝土，其試體照片如圖5-2-1~5-2-4所示，乾密度如表5-1所示。

造粒型輕質骨材之非結構性輕質混凝土配比設計可利用骨材表面積理論[39][40]獲得基本配比資料。經以試拌，考慮顆粒組構、直立強度、輕質骨材吸水特性及儘量減少漿量維持高孔隙率再修正配比，即可得滿意之造粒型非結構性輕質混凝土配合設計資料。

對於非結構性輕質混凝土的配比結果，綜合列於表4-6，可供工程實用上的產製參考。

5.2 非結構性輕質混凝土拌製方法

由前4.3.2節之試驗工作結果獲知，因非結構性輕質混凝土配比屬低水灰比，為避免水泥漿體結塊而無法均勻包裹骨材，需將乾燥輕質骨材與拌製時間內之骨材吸水量先行預濕攪拌如附圖5-3，再將水泥及天然砂倒入拌合鼓拌合，使骨材顆粒表面得以均勻包裹著水泥及砂，如附圖5-4，最後再倒入設計拌合水完成拌合作業如附圖5-5-1及5-5-2。

非結構性輕質混凝土預鑄體的加壓振動夯實研究試驗結果包含如下兩部份：第一部份固定振動時間30秒，變化上壓力，其直立強度與單位重增加百分比經量測結果如表5-2所示。圖5-6-1表示上壓力變化與直立強度關係，圖5-6-2表示上壓力變化與單位重增加百分比關係圖。

由圖 5-6-1 及圖 5-6-2 明顯地可看出上壓力由 0 g/cm^2 增加至 5 g/cm^2 ，單位重增加百分比及直立強度均大幅提高，往後上壓力再增加則昇高趨勢減緩。顯示，顆粒排列由鬆散至緊密的加壓初期所需上壓力值約 5 g/cm^2 就足夠以克服顆粒間磨擦力而達到，若欲獲得均勻且緻密接觸，上壓力需提高至 20 g/cm^2 以上，此時對單位重增加百分比及直立強度提高效益並不太大，故繼續嘗試以上壓力 20 g/cm^2 進行振動時間的研究試驗。

上壓力固定 20 g/cm^2 ，振動時間變化所得之試驗結果如表 5-3 所示。圖 5-7-1 表示振動時間對直立強度之影響，圖 5-7-2 表示振動時間與單位重增加百分比之關係。圖 5-7-1 及圖 5-7-2 顯示，當振動時間由 5 秒增加到 60 秒之間，隨振動時間之增加，直立強度及單位重亦成正比地大幅提高，但振動時間增加至 60 秒後，提高之比率已不大，可說明加壓振動效果在振動時間 60 秒之後，其壓實效果有限。

圖 5-7-3 為振動時間與 7 天抗壓強度關係圖，圖 5-7-4 表示振動時間與 28 天抗壓強度關係圖，圖 5-7-5 表示振動時間與預鑄體孔隙率關係。明顯地顯示出與上述相同的結果，即振動時間 60 秒之後，對孔隙率、7 天強度、28 天強度提高效益不大。

本研究所拌製之造粒型非結構性輕質混凝土預鑄體，其 7 天抗壓強度約為 $3 \text{ g/cm}^2 \sim 20 \text{ kfg/cm}^2$ ，28 天抗壓強度約為 $4 \text{ kfg/cm}^2 \sim 24 \text{ kfg/cm}^2$ ，而孔隙率約為 $38\% \sim 33\%$ ，乾燥單位重為 $1.104 \text{ kg/L} \sim 1.133 \text{ kg/L}$ 。若輕質骨材密度再降低，應可使乾燥單位重降低至 1.0 kg/L 以下。

5.3 結構性輕質混凝土之配比設計

依前 4.4.1 節所得之各種輕質骨材混凝土配比設計計算結果(如表

4-9-1~4-9-7)，進行混凝土拌製，並量測其坍度、空氣含量、新拌混凝土單位重等，得新拌混凝土性質如表 5-4-1~5-4-4³ 所示。表列數值顯示，實測值大都與設計性質相近，表示配比設計法合宜可用。由表列實測結果可看出，骨材最大粒徑減小時，混凝土坍度有減小之趨勢。

考慮混凝土的坍度保持一定時，若 D_{max} 愈小，所需拌合用水量就愈高；此乃因骨材整體表面積增加所致。這種影響在輕質骨材方面可能因高吸水率特性而將此現象更爲凸顯出來。另外，由於 D_{max} 由 $3/4"$ 減小至 $1/2"$ ，骨材單位重將提高，而使新拌混凝土單位重亦明顯增加。

各等級輕質骨材不同配比下之輕質混凝土廿八天抗壓強度試驗結果列於表5-5。由表列結果可初步看出，所拌製的輕質混凝土除採用大陸產輕質骨材者，其單位水泥用量超過 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 時，抗壓強度都大於 $210\text{kgf}/\text{cm}^2$ 已可供結構性混凝土使用。從表5-5內另可看出， $D_{max}=\frac{1}{2}"$ ，骨材之輕質混凝土強度有提高的趨勢，原因是大粒徑之輕質骨材，其密度較小、強度較差所致。

圖5-8-1及圖5-8-2分別爲 $D_{max}=3/4"$ 及 $D_{max}=1/2"$ 之各級輕質骨材單位水泥用量與28天輕質混凝土抗壓強度關係圖，配合前導研究[1][3]之結果如圖5-8-3，可作爲國內輕質混凝土配合設計的基本資料。運用圖5-9之結構性輕質混凝土配合設計流程圖並參考4.4.1節範例即可進行配比設計。對採用各類級輕質骨材製作輕質混凝土之配合比例，經本文之配合設計研討後，綜合提出表4-9-1~4-9-7之各級輕質混凝土配比建議表，可供實用製作上之參考。

5.4 結構性輕質混凝土之拌製方法

以控制輕質混凝土配比、骨材條件、總拌合時間等因素，就前第四章所列的三種拌合方式進行混凝土拌製試驗，量測坍度損失及抗壓強度各項試驗結果如表5-6所示。從表上可比較出第三組拌合方式下之坍度損失較低，抗壓強度則大致相同。其原因為粗骨材與砂先行以一半拌合水進行預濕拌合，砂能夠粘著粗骨材，不致因比重相差大而拌合不均。而後再加入水泥及剩餘一半之拌合水進行拌合時，在拌合過程中水泥漿體將再與砂均勻拌合，並包裹粗骨材顆粒表面，使得骨材吸水速度減緩，減少坍度損失。

對於輕質混凝土的振動夯實行為，本文依不同之振動作用時間，量測夯實後的空氣含量及抗壓強度，所有試驗結果列於表5-7。觀察新拌輕質混凝土試體的振動夯實過程發現，當混凝土裝滿試體模，以振動棒插入開始振動夯實之瞬間，混凝土面馬上下陷，即達粗夯實階段，緊接著有大氣泡上冒。10cm ϕ ×20cm 試體經振動達7秒後，輕質骨材開始有浮上表面傾向，接著於10秒之後，氣泡浮出明顯減少，當振動時間達30秒時輕質骨材明顯析離堆積於表面。

利用試驗結果繪成的圖5-10可看出，振動時間由3秒增加至30秒之間，空氣含量明顯降低，而30秒後空氣含量就無太大變化，表示振動30秒之後，存在於混凝土中的孔隙已大部份被排除。另由圖5-11亦可看出在振動時間達10秒之前，混凝土強度隨時間增長而提高，但超過10秒後抗壓強度即有降低趨勢，此乃因一如前所述，當振動時間超過10秒後，輕質骨材開始有上浮析離現象，致使強度降低。

基本上，振動夯實能量的導入受模具邊界因素影響甚巨，單以振動時控制其最佳振動時間不甚合理，應同時考慮振動棒影響作用

範圍，再探討最佳振動時間較為適宜。本文所得結果只是初步探討而已，完整的夯實行為與效果還待進一步試驗研究。

5.5 預拌廠之廠拌作業

為瞭解試驗室研擬之拌製技術應用於廠拌作業上的實用性，以國內造粒型輕質骨材及大陸產輕質骨材於國產實業股份有限公司中壠預鑄場進行廠拌實驗。採用的混凝土如表5-8所示。在拌合作業上，參照前一節所建議之結構性輕質混凝土拌製方式，配合預拌廠的自動化生產流程順利完成拌合工作，並量測得新拌混凝土的物理性質，如表5-9所示。

從表 5-8及表 5-9的實例資料可看出，以兩種輕質骨材經廠拌所得之新拌混凝土，其各項性質與設計條件相近，顯示輕質混凝土的廠拌生產，依本文建議方法即可獲得合宜適用的產品。

另外，各廠拌輕質混凝土的抗壓強度測試結果如表 5-10、表5-11。其中，造粒型輕質骨材混凝土的七天及廿八天強度分別達 302kgf/m^2 及 366kgf/m^2 ，明顯的適用為結構性混凝土。至於其廿八天強度，亦與試驗室資料(表 5-5)之水泥含量 390kg/m^3 者相近，顯示本研究成果運用於量產作業的準確性令人滿意。

表 5-1 無細輕質混凝土之乾密度試驗結果

粒 徑	試 體 編 號			平 均 (kg/m^3)
	No.1	No.2	No.3	
1"	759.0	731.3	794.4	761.6
3/4"	811.3	870.9	887.9	856.7
1/2"	976.5	971.3	1027.1	991.7
3/8"	1048.1	1032.2	1059.6	1046.6

表 5-2 上壓力變化之直立強度與單位重增加百分比試驗結果

上壓力 (g/cm^2)	0	5	15	20	30
單位重增加百分比(%)	11.60	13.89	15.13	15.92	16.05
直立強度 (kg/cm^2)	0.066	0.136	0.168	0.173	0.184
備 註	1. 振動頻率 : 3000 rpm 2. 振動時間 : 30 sec				

表 5-3 振動時間變化之各項試驗結果

振 動 時 間 (sec)	5	10	20	30	60	90
新拌振動後單位重 增加百分比 (%)	4.62	7.52	11.54	15.76	21.40	23.44
直立強度 (kgf/cm ²)	0.077	0.094	0.120	0.173	0.287	0.330
7 天強度 (kgf/cm ²)	2.9	3.9	9.5	13.7	18.6	20.2
28 天強度 (kgf/cm ²)	3.5	4.7	14.1	15.9	21.2	23.8
孔 隙 率 (%)	38.2	36.0	34.7	33.6	33.2	33.1
乾 燥 混 凝 土 單 位 重 (kg/l)	1.014	1.026	1.034	1.072	1.129	1.133
備 註	1. 振動頻率 : 3000 rpm 2. 上壓力 : 20 g/cm ²					

表 5-4-1 中壢地區非造粒型輕質骨材新拌混凝土性質(顆粒密度=1.5-1.7 g/cm³)

D _{max}	設計水泥量 (kg/m ³)	設計坍度 (cm)	實測坍度 (cm)	設計空氣含量 (%)	實測空氣含量 (%)	設計混凝土 單位重(kg/m ³)	新拌混凝土 單位重(kg/m ³)
3/4"	260	4-8	4	2.5	2.3	1928	1936
	279	4-8	5	2.5	2.5	1935	1937
	300	4-8	5	2.5	2.3	1942	1939
	325	4-8	7	2.5	2.5	1950	1940
	355	4-8	6	2.5	2.5	1960	1951
	390	4-8	7	2.5	2.5	1971	1957
	433	4-8	6	2.5	2.6	1986	1986
	489	4-8	4	2.5	2.6	2004	2006
1/2"	260	4-8	3	2.5	2.8	2002	1989
	279	4-8	4	2.5	3.5	2007	1997
	300	4-8	4	2.5	3.5	2013	2000
	325	4-8	3	2.5	3.5	2020	2009
	355	4-8	4	2.5	3.2	2029	2017
	390	4-8	3	2.5	3.5	2040	2031
	433	4-8	3	2.5	3.2	2052	2051
	489	4-8	3	2.5	3.5	2068	2071

表 5-4-2 中壢地區非造粒型輕質骨材新拌混凝土性質(顆粒密度=1.2-1.4 g/cm³)

D _{max}	設計水泥量 (kg/m ³)	設計坍度 (cm)	實測坍度 (cm)	設計空氣含量 (%)	實測空氣含量 (%)	設計混凝土 單位重(kg/m ³)	新拌混凝土 單位重(kg/m ³)
3/4"	260	4~8	6	2.5	2.3	1791	1811
	279	4~8	8	2.5	2.5	1798	1811
	300	4~8	8	2.5	2.5	1806	1814
	325	4~8	8	2.5	2.3	1816	1820
	355	4~8	8	2.5	2.5	1828	1834
	390	4~8	7	2.5	2.5	1841	1846
	433	4~8	6	2.5	2.5	1858	1854
	489	4~8	5	2.5	2.6	1880	1889
1/2"	260	4~8	3	2.5	3.7	1908	1923
	279	4~8	4	2.5	3.3	1915	1911
	300	4~8	3	2.5	3.5	1921	1914
	325	4~8	3	2.5	3.5	1930	1920
	355	4~8	3	2.5	3.7	1940	1923
	390	4~8	5	2.5	3.5	1951	1934
	433	4~8	3	2.5	3.5	1966	1957
	489	4~8	3	2.5	3.5	1984	1969

表 5-4-3 中壘新營混合非造粒型輕質骨材新拌混凝土性質(顆粒密度=1.0-1.5 g/cm³)

Dmax	設計水泥量 (kg/m ³)	設計坍度 (cm)	實測坍度 (cm)	設計空氣含量 (%)	實測空氣含量 (%)	設計混凝土 單位重(kg/m ³)	新拌混凝土 單位重(kg/m ³)
	260	4~8	6	2.5	2.5	1818	1851
	279	4~8	7	2.5	2.3	1825	1834
	300	4~8	8	2.5	2.5	1833	1849
3/4"	325	4~8	8	2.5	2.4	1843	1837
	355	4~8	5	2.5	2.3	1854	1867
	390	4~8	7	2.5	2.5	1867	1860
	433	4~8	7	2.5	2.6	1884	1894
	489	4~8	4	2.5	2.9	1905	1900

表 5-4-4 大陸產輕質管材新拌混凝土性質(顆粒密度=1.0 g/cm³以下)

Dmax	設計水泥量 (kg/m ³)	設計坍度 (cm)	實測坍度 (cm)	設計空氣含量 (%)	實測空氣含量 (%)	設計混凝土 單位重(kg/m ³)	新拌混凝土 單位重(kg/m ³)
3/4"	260	4-8	5	2.5	3.5	1500	1471
	279	4-8	5	2.5	3.5	1510	1460
	300	4-8	7	2.5	3.5	1521	1457
	325	4-8	8	2.5	3.5	1534	1491
	355	4-8	6	2.5	3.2	1550	1534
	390	4-8	5	2.5	3.2	1568	1531
	433	4-8	4	2.5	3.2	1591	1549
	489	4-8	3	2.5	3.0	1620	1609
	260	4-8	4	2.5	3.0	1699	1671
1/2"	279	4-8	3	2.5	3.5	1708	1686
	300	4-8	3	2.5	2.5	1717	1691
	325	4-8	3	2.5	4.0	1727	1706
	355	4-8	3	2.5	3.5	1740	1734
	390	4-8	3	2.5	3.8	1755	1760
	433	4-8	3	2.5	3.8	1774	1777
	489	4-8	3	2.5	3.5	1798	1754

表 5-5 各個骨材不同配比下之28天抗壓強度試驗結果

抗 壓 強 度 (kgf/cm ²)									
水泥含量(kg/m ³)	260	279	300	325	355	390	433	489	
中非 壙造	$\rho=1.2-1.4$	200	221	247	281	326	356	369	378
	$D_{max}=3/4"$								
地粒 區	$\rho=1.2-1.4$	210	224	244	265	327	362	380	401
	$D_{max}=1/2"$								
中非 壙造	$\rho=1.5-1.7$	231	235	260	293	356	380	392	405
	$D_{max}=3/4"$								
地粒 區	$\rho=1.5-1.7$	225	261	276	312	350	399	411	418
	$D_{max}=1/2"$								
大輕 陸質	$\rho < 1.0$	53	72	91	115	129	142	162	174
	$D_{max}=3/4"$								
產骨 材	$\rho < 1.0$	97	110	131	156	179	187	195	212
	$D_{max}=1/2"$								
中混 壙合 新造 營粒	$\rho=1.0-1.5$	188	235	236	297	315	343	383	409
	$D_{max}=3/4"$								

表 5-6 拌合方式與坍度損失及抗壓強度試驗結果

組別		拌合後坍度量測時間 (min)						混凝土抗壓強度 (kg/cm ²)	
		0	5	10	15	30	45	7 天	28 天
第一組	坍度	9	6	5.5	5	3.8	3	216	314
	坍損失 %	0	33.3	38.9	44.4	57.8	66.7		
第二組	坍度	6	4.5	4.2	3.6	3	2.7	213	313
	坍損失 %	0	25	30	40	50	55		
第三組	坍度	6	5.8	4.4	3.9	3	2.8	224	316
	坍損失 %	0	3.3	26.7	35	50	53.3		

備註：

第一組：LA + 砂 + 水泥 $\xrightarrow{\text{乾拌 30sec}}$ 加水 $\xrightarrow{\text{拌合 1min}}$ 完成拌合工作

第二組：LA + 一半水量 $\xrightarrow{\text{預拌 30sec}}$ 加砂 + 水泥 + 剩餘一半之水量
 $\xrightarrow{\text{拌合 1min}}$ 完成拌合工作

第三組：LA + 砂 + 一半水量 $\xrightarrow{\text{預拌 30sec}}$ 加水泥 + 剩餘一半水量
 $\xrightarrow{\text{拌合 1min}}$ 完成拌合工作

表 5-7 輕質混凝土振動夯實時間試驗結果

振動時間 (sec)	抗壓強度 (kg/cm ²)	空氣含量 (%)	新拌單位重 (kg/m ³)
3	280.3	2.7	1933.1
5	285.3	2.5	1934.3
10	300.5	2.1	1935.5
15	289.9	1.8	1936.9
20	279.2	1.7	1940.7
30	266.6	1.3	1957.9
60	236.9	1.3	1977.6

表 5-8 輕質混凝土配比及場拌結果

造粒 $D_{max}=3/4"$

設計水泥量 (Kg/m ³)	400	設計空氣含量	2.5%
設計用水量 (Kg/m ³)	195	實測空氣含量	1.8%
水灰比 (W/C)	0.49	砂率 (%)	40%
設計坍度 (cm)	4~8 cm	實測坍度 (cm)	7.5 cm
輕質骨材各粒群用量 (Kg/m ³)			
1"~3/4"	40.0		
3/4"~1/2"	107.0		
1/2"~3/8"	161.0		
3/8"~ #4	238.0		
天然砂用量 (Kg/m ³)	687.0		
設計混凝土單位重 (Kg/m ³)	1831.0		
新拌混凝土單位重 (Kg/m ³)	1870.0		
輕質骨材30mins吸水量 (Kg/m ³)	43.3		

表 5-9 輕質混凝土配比及場拌結果

大陸骨材 $D_{max}=3/4"$

設計水泥量 (Kg/m ³)	390	設計空氣含量	2.5%
設計用水量 (Kg/m ³)	215	實測空氣含量	1.8%
水灰比 (W/C)	0.55	砂率 (%)	44%
設計坍度 (cm)	12~15cm	實測坍度 (cm)	14 cm
輕質骨材各粒群用量 (Kg/m ³)			
1" ~3/4"	8.0		
3/4"~1/2"	22.0		
1/2"~3/8"	43.0		
3/8"~ #4	164.0		
天然砂用量 (Kg/m ³)	687.0		
設計混凝土單位重 (Kg/m ³)	1553.0		
新拌混凝土單位重 (Kg/m ³)	1585.0		
輕質骨材30mins吸水量 (Kg/m ³)	23.7		

表 5-10 中壢場拌混凝土各材齡之抗壓強度結果

1.0 ≤ 輕質骨材顆粒密度 ≤ 1.5g/cm ³ , D _{max} =3/4" (中壢場拌)										
材齡(天)	1		3		7		14		28	
抗壓強度 (kgf/cm ²)	81		241		273		367		387	
	82	77	243	234	318	302	324	351	364	366
	69		219		314		361		346	

表 5-11 中壢場拌混凝土各材齡之抗壓強度結果

輕質骨材顆粒密度 ≤ 1.0g/cm ³ , D _{max} =3/4" (中壢場拌)										
材齡(天)	1		3		7		14		28	
抗壓強度 (kgf/cm ²)	64		127		151		177		179	
	61	63	134	130	181	163	145	168	192	180
	66		128		156		181		169	

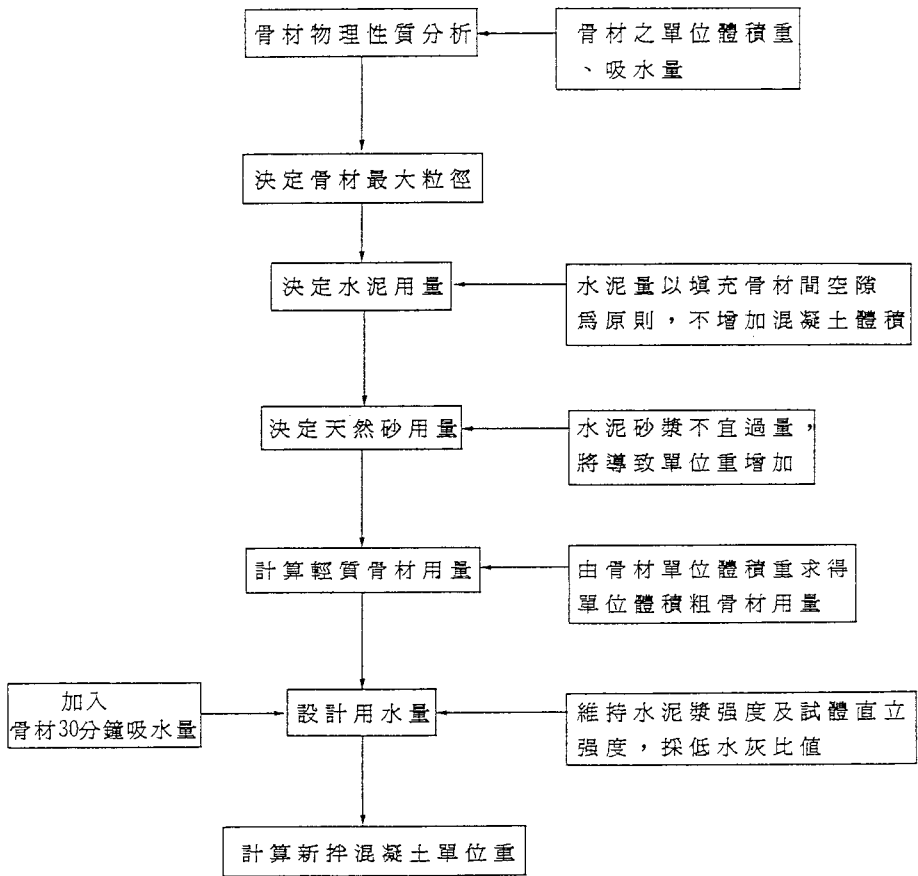


圖 5-1 非結構性無細輕質混凝土配合設計流程圖

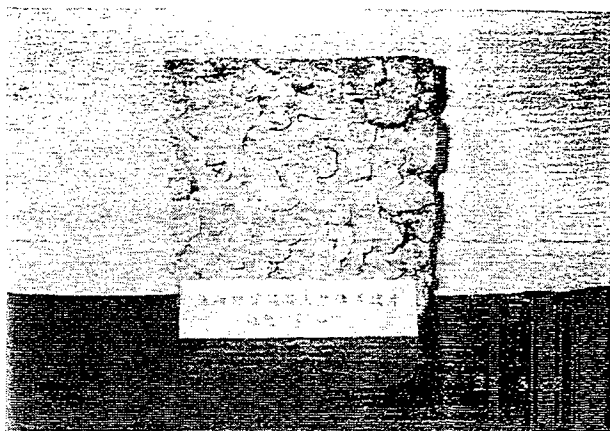


圖 5-2-1 無細輕質混凝土試體(粒徑 $1\frac{1}{2}''\sim 1''$)

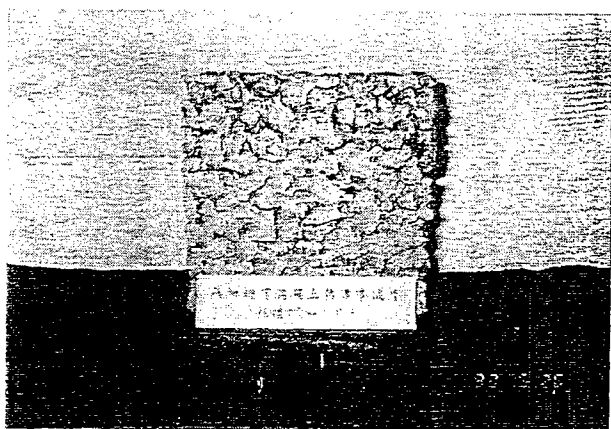


圖 5-2-2 無細輕質混凝土試體(粒徑 $1''\sim 3/4''$)

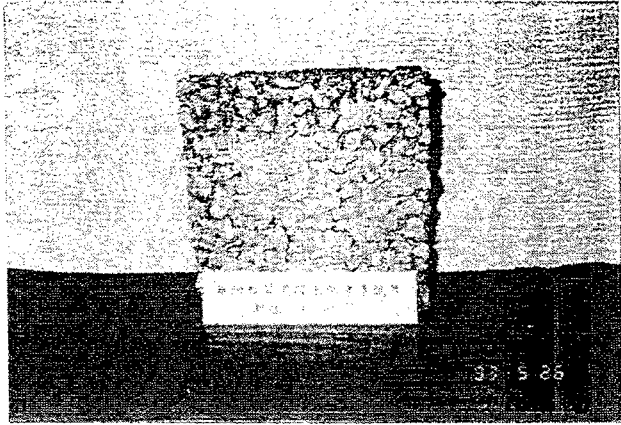


圖 5-2-3 無細輕質混凝土試體(粒徑 $3/4''\sim 1/2''$)

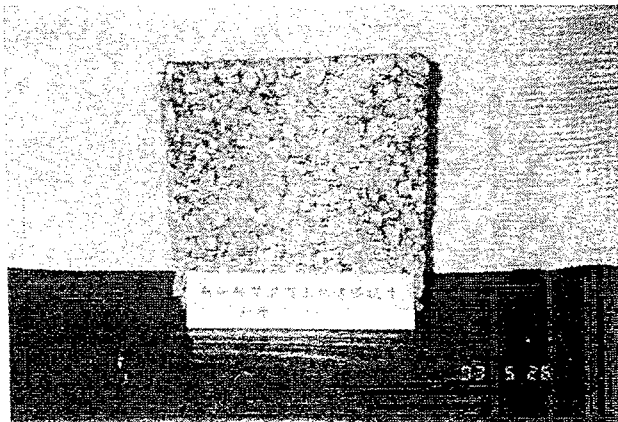


圖 5-2-4 無細輕質混凝土試體(粒徑 $1/2''\sim 3/8''$)

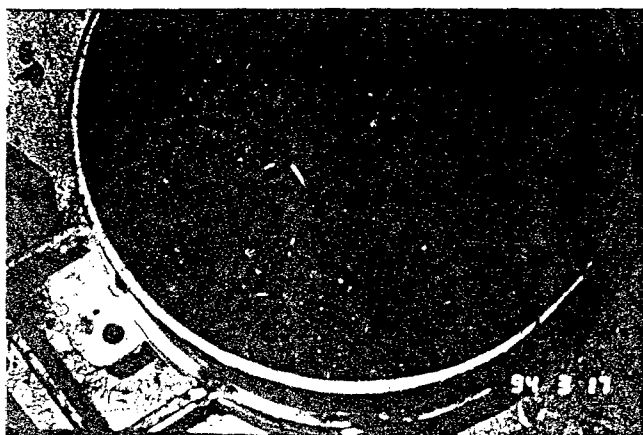


圖 5-3 輕質骨材預濕攪拌



圖 5-4 水泥及砂倒入拌合



圖 5-5-1 倒入設計拌合水拌合

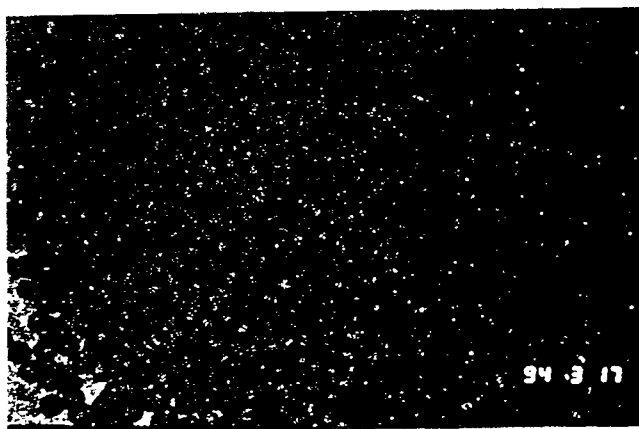


圖 5-5-2 拌製完成之造粒型非結構性輕質混凝土

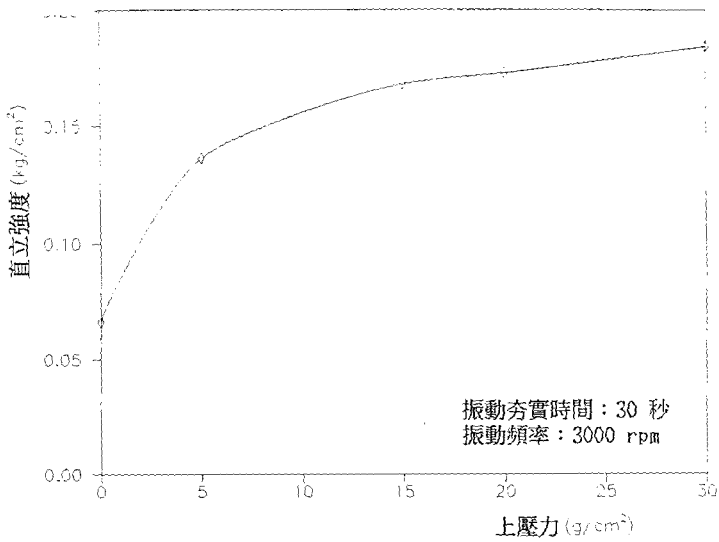


圖 5-6-1 上壓力與直立強度關係圖

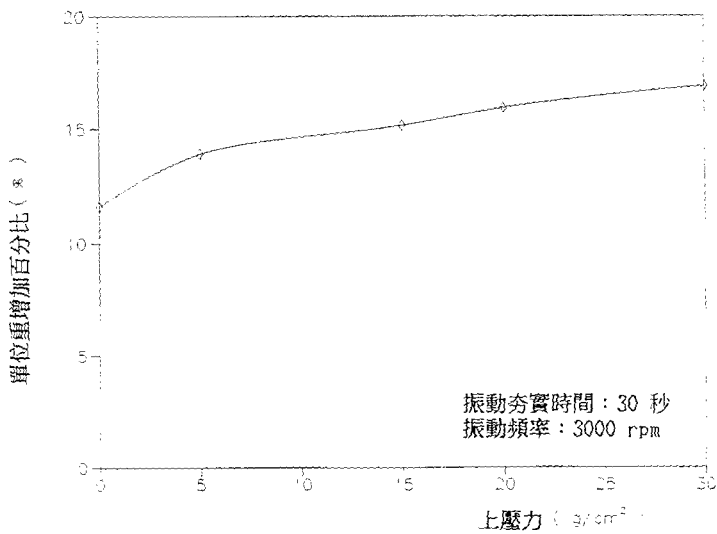


圖 5-6-2 上壓力與單位重增加百分比關係圖

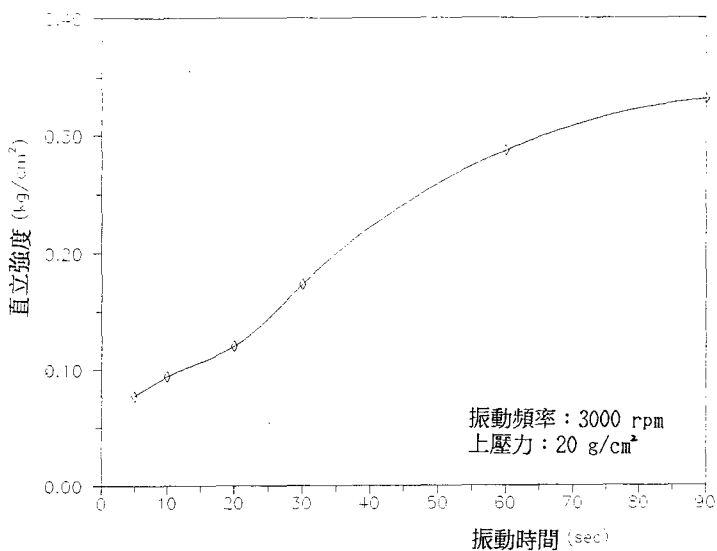


圖 5-7-1 振動時間與直立強度關係圖

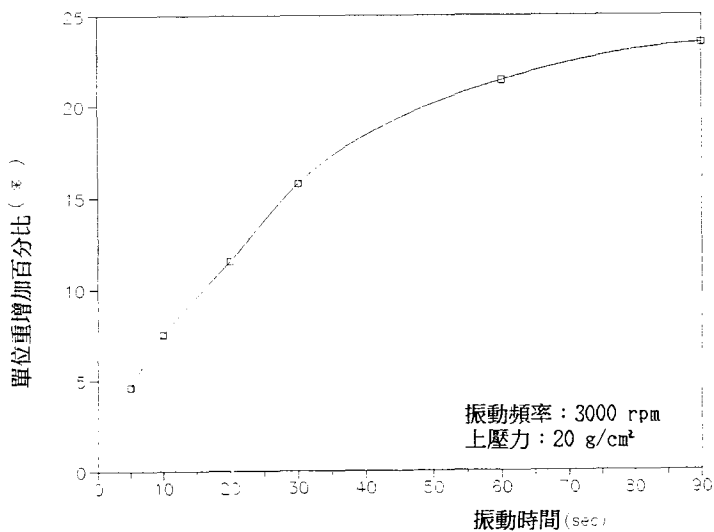


圖 5-7-2 振動時間與單位重增加百分比關係圖

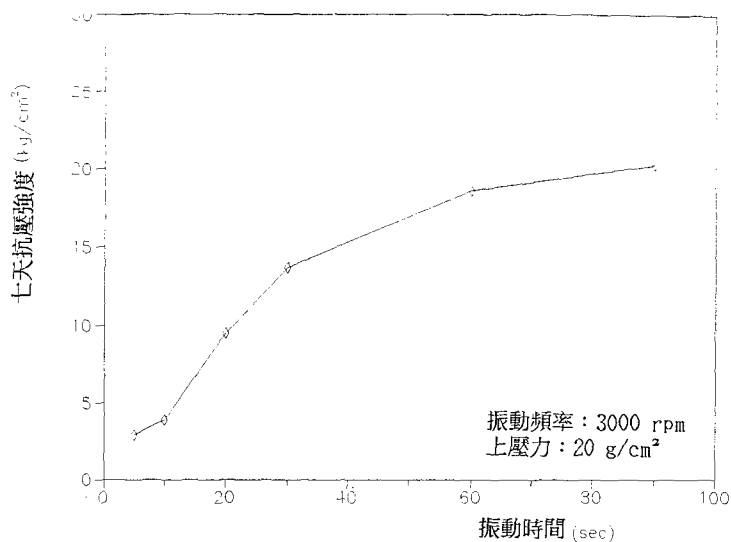


圖 5-7-3 振動時間與 7 天抗壓強度關係圖

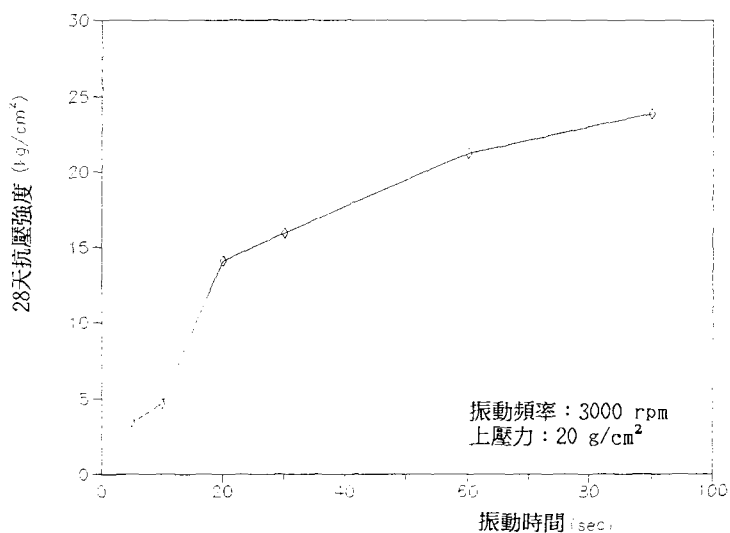


圖 5-7-4 振動時間與 28 天抗壓強度關係圖

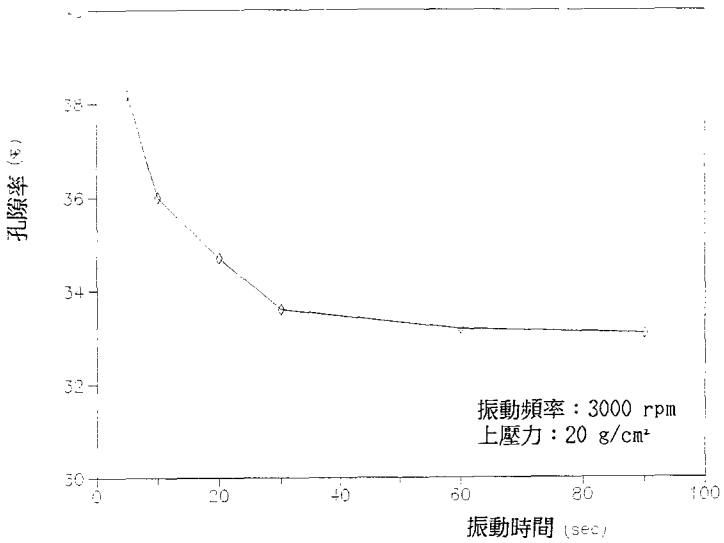


圖 5-7-5 振動時間與孔隙率關係圖

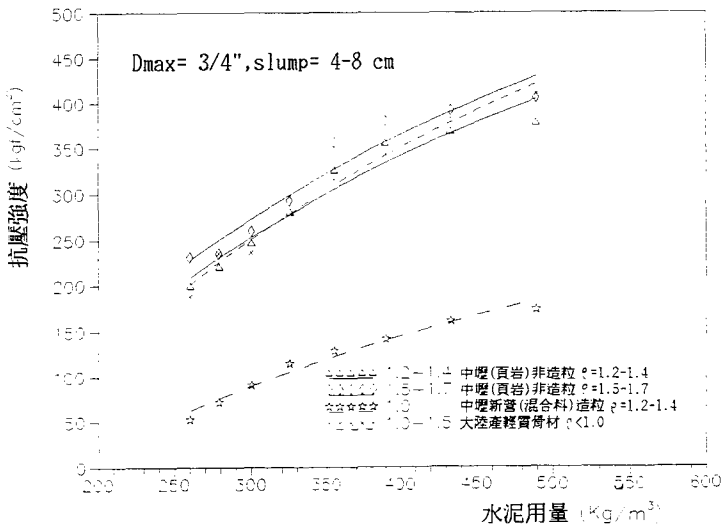


圖 5-8-1 各級輕質骨材單位水泥量與混凝土抗壓強度關係圖

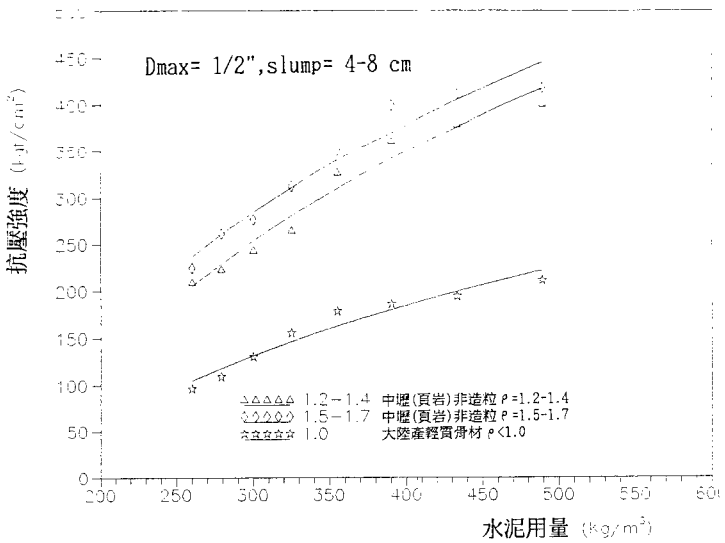


圖 5-8-2 各級輕質骨材單位水泥量與混凝土抗壓強度關係圖

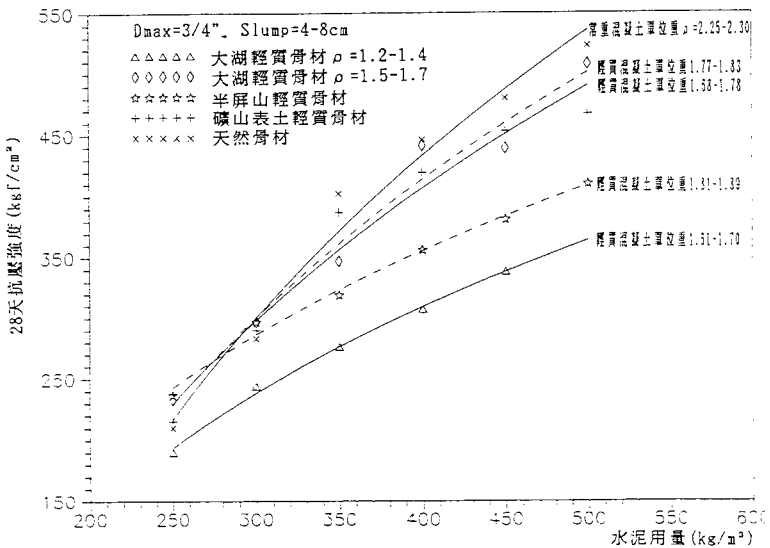


圖 5-8-3 水泥用量與輕質混凝土抗壓強度關係圖

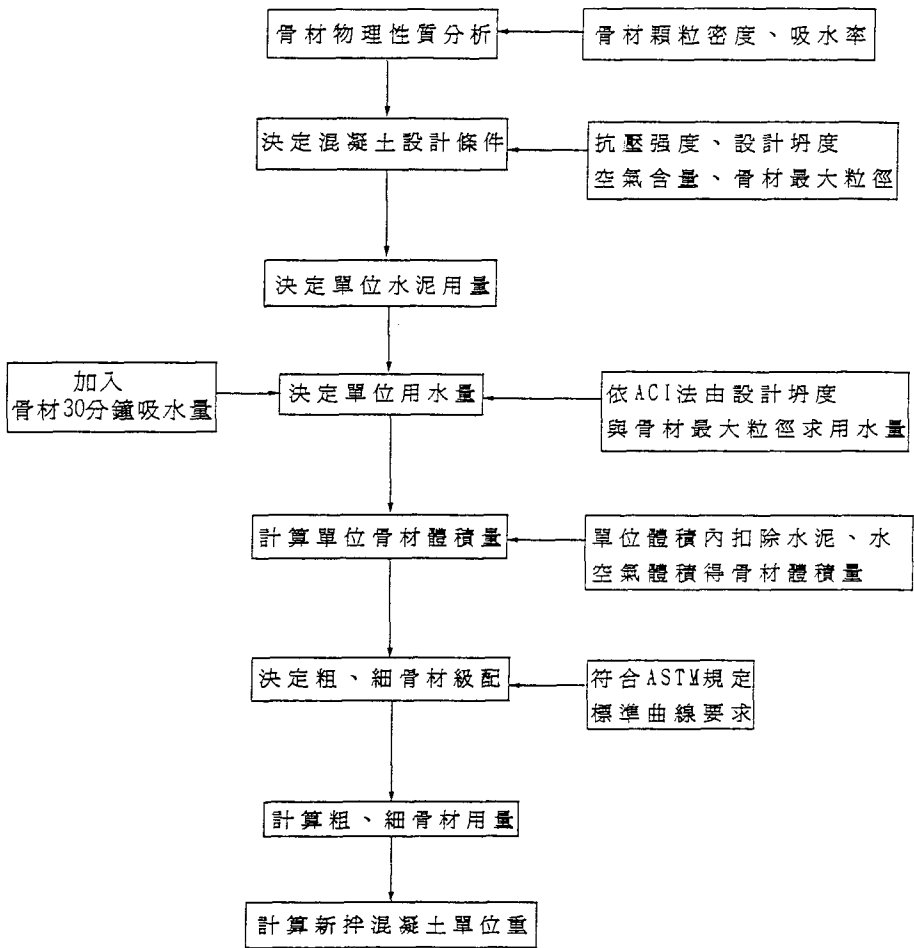


圖 5-9 結構用輕質混凝土配合設計流程圖

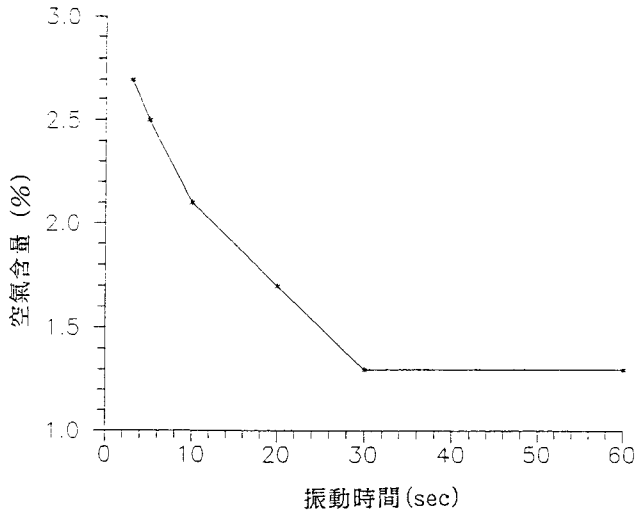


圖 5-10 輕質混凝土不同振動時間與空氣含量的關係

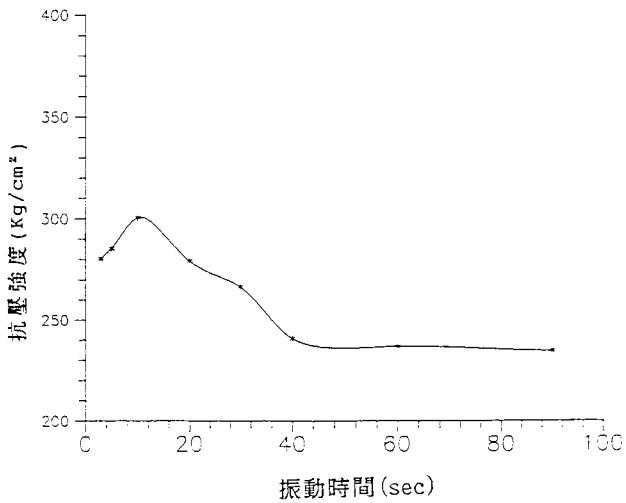


圖 5-11 輕質混凝土圓柱 10 cm ϕ ×20cm 試體不同振動時間與抗壓強度的關係

第六章 結論與建議

6.1 結論

- (1) 本文所提出之非結構性輕質混凝土(無細混凝土)及結構性輕質混凝土配比設計方法經試拌證明，新拌混凝土及乾燥後混凝土單位重皆與計算所得相近，顯示本文配比設計方法準確性良好。
- (2) 無細輕質混凝土之拌製方式以輕質骨材先行預濕攪拌再加入水泥、砂拌合數秒後，加拌合水拌合完成為最佳。振動時間達60秒以上，則可獲得良好夯實效果及提昇抗壓強度，振動時上壓力則以 20 g/cm^2 為佳。
- (3) 結構性輕質混凝土之拌製方式為避免坍度損失過大，與一般常重混凝土稍有不同，拌合加料時以輕質骨材加砂加 $1/2$ 拌合水量先行攪拌使骨材吸水再加入水泥及剩餘水量之順序，所得坍度損失較小。
- (4) 輕質混凝土振動夯實不宜過量，就常用之 $10\phi \times 20 \text{ cm}$ 之圓柱試而言，以直徑 1.5 in ，頻率 13000 r.p.m. 之振動棒夯實時，振動時間 5 至 10 秒為最佳，超過 10 秒時，混凝土有明顯分離現象，會造成混凝土抗壓強度之降低。
- (5) 輕質混凝土之拌合方式經廠拌驗證，預拌廠之拌合自動控制程式可配合輕質混凝土之加料順序，且拌合過程良好，新拌混凝土性質與原設計要求相符，拌製出之混凝土強度亦與試驗室內所得相若。
- (6) 無論是結構性或非結構性輕質混凝土，在配比設計或拌製技術上，為精準控制配比量及拌製混凝土之品質，輕質粗骨材皆採用乾燥骨材，此與常重骨材採用面乾內飽和粗骨材不同。試驗結果亦

驗證，採用乾燥後粗骨材進行配比計算或拌製混凝土所得品管較為優良。

- (7) 本文所提出之台灣本島各料源區輕質骨材混凝土其水泥含量與抗壓強度關係圖，可提供國內業界製作輕質混凝土配比設計時水泥用量之參考。
- (8) 本研究已成功拌製出單位重小於1之無細混凝土預鑄體，其配比方法及拌製技術可提供業界做為生產輕質預鑄磚之參考。

6.2 建議

- (1) 無細輕質混凝土之水泥用量及砂用量隨骨材之粒型不同(造粒或非造粒)而有變化，一般造粒型顆粒表面積小，可用較少水泥漿量包裹，但顆粒表面圓滑若要獲得足夠之直立強度，則需較多水泥砂漿量，可進一步實驗推求最佳用量。
- (2) 結構性輕質混凝土之配比設計方法已可適用，惟輕質混凝土單位水泥用量與可達強度間之關係，在輕質骨材品質及強度尚無法有效求出時，目前僅能預估輕質混凝土之可達抗壓強度。因此，如何確定輕質骨材之品質及強度是日後輕質混凝土之重要研究方向。
- (3) 輕質混凝土夯實程度如何，除與振動能量有相當關係外，受模具之週邊條件影響亦大，若欲求得最佳夯實能量，需更深入試驗探討。

參考文獻

1. 顏聰等，『人造骨材輕質混凝土之製造及工業化研究』，台灣營建中心，八十二年度專案計劃執行成果報告。
2. 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。
3. 顏聰、王櫻茂等，『混凝土輕質骨材技術發展及應用』，經濟部工業局八十二年度專案計畫執行成果報告，1993，6。
4. Mindess & Young, "Concrete", Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs, N. J. 07632, 1981, PP. 588~ 593°C
5. 顏聰，『從輕質骨材談輕質混凝土的製作與力學性質』，高溫蒸氣養護輕質混凝土(ALC)研討會，經濟部工業局等，台北，1991,11,PP.1~30.
6. Weigler, H. and Karl, So, "Stablieichtbeton", Bauverlag GMBH, Wiesbaden und Berlin, 1972, PP.37~55.
7. CEB / EIP, "Lightweight Aggrwgate Concrete, Longman Inc, New York, N. Y.(1977).
8. Short, A. and W. Kinniburgh "Lightwewght Concrete", Formerly Building Research Establishment, Garston, Watford, U. K. (1976)
9. Spratt, H., "The Structural Use of Lightweight Aggregate Concrete", C. C. A.,New York, N. Y. (1974)
10. Holm, T. A., T. W. Bremner & J. B. Newman, "Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering", Concrete International, Vol. 6, No.6,PP. (1986)
11. Lydon., F. D. "Properties of Hardened Lightweight Aggrwgate Concrete", Lightweight Concrete, ACI (1980)

12. ASTM C330, "Standard Specification for Lightweight Aggregate for Structural Concrete", ASTM (1985)
13. JIS A 5002：構造用輕量骨材，JIS (1978).
14. 中國國家標準，CNS A2046：結構用混凝土之輕質粒料，CNS (1974)。
15. DIN 1045, Befon und stahlleichtbeton, Bemessung und Ausführung, 1970
16. 柚原治美，『特殊な材料を用いたコンクリート講座(その12—輕量骨材)』，日本コンクリート工學Vol. 24, No10, PP. 88-94 (1986).
17. 王櫻茂、黃榮吾和張冠諒，「輕質骨材及輕質混凝土之試驗研究」，國科會研究報告，(1973)。
18. Swamy, R. N. & G. H. Lambbert, "The Microstructure of Lytag Aggregate", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.3, No.4(1981).
19. ACI 211.2-81, "Standard Practice for selecting Proportions, for Structural Lightweight Concrete", ACI Standard (1981).
20. 顏聰，「輕質混凝土的隔熱性能與能源節約」，營建知訊第120期，台灣營建研究中心，台北(1992).
21. E. Vocke, "Kleine Leichtbefon Kundt fuer die Praxis", Bauverlag Wiesbaden 1959.
22. H. Anrich, "Kleine Leichtbefon Kundt", Banverlag, Wiesbades and Btrlin, 1971, PP.58-60.
23. Weigler, H., "Gefuegedichter Leichtbeton", Beton, 7/1972. P.292
24. 顏聰，「骨材之強度、彈性模數與混凝土之受力結構」，土木水利季刊第三卷第四期，民國66年2月，第15-20頁。
25. Wischers, G., "Aufnahme von Druckkräften in Scherbeton and in Leichtbeton", Beton, 5/1967, P.184.

26. Abrams, D. A., (1918),"Design of Concrete Mixture", Structural Materials Research, Laboratory Lewis Institute Bull. 1, Chicago.
27. 王櫻茂，『人造輕質骨材混凝土』，豐生出版社，台南，65.8
28. Min -Hong Zhang and Odd E. G. "Characteristics of Lightweight Aggregates for High -Strength Concrete" ACI Materials Journal, March -April,1991
29. Vorlaeufiges Merkblatt I fuer Stahlleichtbeton Betonpruefung Zur Ueberwachung der Leichtzuschlaege, beton 1968, PP.309
30. ACI Committee 213. "Guide for structural lightweight aggregate concrete",Journal of the American Concrete Institute 64,(1967), No.6,PP.433-469.
31. ACI Committee 211. communication. Draft revision of "Recommended practice for selecting proportions for structural lightweight Concrete (AIC 613A-59).
32. 林維明，「輕質混凝土之配比設計研討」，結構工程第七卷第一期，民國八十一年三月，第95～116頁。
33. McIntosh R. H., Botton J. D. and Muir C. H. D., "No-fine Concrete as a Structural Material", Proc. Inst. C. E. Part I.5, No.6, PP.677-94, London.
34. 張大鵬、黃兆龍，「以顆粒材料巨微觀模式探討複合材料行爲之初步研究」，國科會研究報告，(1992)。
35. 「混凝土工程施工須知」，中國土木水利工程學會，民國80年。
36. Vorlaeufiges Merkblatt I fuer Stahlleichtbeton Betonp ruefung Zur Ueberwachung der Leichtzuschlaege, beton 1968, PP.309.
37. Yen, T., "Die Verdichtungsvorgaenge von Leichtbeton am Ruetteltisch", TU Berlin, 1975

- 38.Schumann, J., "Die Verdichtungstechnik bei der verarbeitung von Leichtbeton", Beton 12/1972, PP.559.
- 39.Kennedy, C. T., (1940),"The Design of Concrete Mixes", J. of the ACI Vol.36, Feb. 1940.
- 40.詹文宗，(1988)，『以表面積理論探討高強度混凝土之配合設計』，中興大學土木工程研究所碩士論文，台中。