

輕質骨材混凝土
設計規範及防火隔熱性質研究

內政部建築研究所委託研究報告

PG 9303-0128

093-301070000G-1013

「輕質骨材混凝土 設計規範及防火隔熱性質研究」

受委託者：中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會

研究主持人：顏聰

協同主持人：陳豪吉

研究員：湯兆緯

研究助理：陳冠宏、顏依璇

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十三年十二月

ARCHITECTURE & BUILDING RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT

Fire Performance, Thermal Insulation and
Building Code Requirements for
Reinforced Lightweight Aggregate Concrete

BY

Tsong Yen

How-Ji Chen

Chao-Wei Tang

December 2004

目次

目次.....	I
表目錄.....	III
圖目錄.....	V
照片目錄.....	VII
摘要.....	IX
英文摘要.....	XV
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究目的.....	2
第三節 研究方法與進行步驟.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 輕質骨材的種類與特性.....	5
第二節 水庫淤泥輕質骨材.....	7
第三節 輕質骨材混凝土的特性.....	8
第四節 輕質骨材混凝土的火害行為.....	12
第五節 輕質骨材混凝土的相關設計規範.....	13
第三章 試驗計畫.....	23
第一節 試體規劃.....	23
第二節 試驗材料.....	28
第三節 輕質骨材混凝土的配比計算.....	29
第四節 試體製作.....	31
第五節 試驗設備.....	32
第六節 試驗方法.....	33

第四章 輕質骨材混凝土之工程性質探討	51
第一節 輕質骨材混凝土之握裹強度.....	51
第二節 輕質骨材混凝土樑之剪力試驗.....	54
第三節 輕質骨材混凝土樑等值矩形應力塊參數	57
第四節 輕質骨材混凝土相關設計規範之檢討.....	58
第五章 輕質骨材混凝土之防火隔熱性質探討	81
第一節 混凝土之熱傳導係數.....	81
第二節 輕質骨材混凝土隔熱節能數值模擬分析	81
第三節 輕質骨材混凝土牆體密閉空間的日曬試驗	82
第四節 輕質骨材混凝土樑之火害行為.....	83
第五節 輕質骨材混凝土版之火害行為.....	84
第六章 結論	97
參考書目	99
附件一 期初簡報會議記錄及處理情形	105
附件二 期中簡報會議記錄及處理情形	107
附件三 期末簡報會議記錄及處理情形	109

表目錄

表 2-1 輕質骨材之種類與基本物理性質	16
表 2-2 CNS 及 ASTM 對輕質骨材混凝土強度規定.....	16
表 2-3 輕質骨材混凝土彈性模數與單位重、抗壓強度之關係.....	17
表 3-1 握裹試體規劃與配比	37
表 3-2 混凝土構件及防火隔熱試驗規劃總表	38
表 3-3 鋼筋混凝土樑試體規劃表	39
表 3-4 抗壓試體規劃表	39
表 3-5 鋼筋混凝土版試體.....	39
表 3-6 熱傳導係數試體規劃表	39
表 3-7 水泥之化學與物理性質	40
表 3-8 天然粗、細骨材之基本性質	41
表 3-9 天然粗、細骨材之篩分析表	41
表 3-10 石門水庫淤泥之化學性質	42
表 3-11 輕質骨材之基本性質	42
表 3-12 鋼筋之基本性質	42
表 3-13 結構性輕質骨材混凝土之級配要求 (ASTM C330).....	43
表 3-14 輕質骨材混凝土配比 (KG/M ³).....	43
表 3-15 常重混凝土配比 (KG/M ³).....	43
表 4-1 握裹試體的抗壓試驗結果	61
表 4-2 握裹試驗結果	62
表 4-3 剪力強度試驗結果及 ACI CODE 理論值比較.....	63
表 4-4 平均劈裂強度與抗壓強度平方根之比值.....	64
表 4-5 等值矩形應力應變塊參數計算值.....	64
表 5-1 混凝土熱傳導係數試驗結果.....	86
表 5-2 混凝土試體受火害前後之抗壓強度.....	86

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	4
圖 2-1 良好的輕質骨材應具有堅硬的外殼以滯含內部的孔隙.....	18
圖 2-2 輕質骨材點壓強度會隨著顆粒粒徑便大而降低.....	18
圖 2-3 細骨材含量對輕質骨材混凝土 K 值之影響.....	19
圖 2-4 水泥用量與輕質骨材混凝土抗壓強度關係.....	19
圖 2-5 輕質骨材混凝土抗壓強度與水泥砂漿、骨材強度間的關係.....	20
圖 2-6 輕質骨材混凝土的分界強度.....	20
圖 2-7 輕質、普通混凝土之強度成長比較圖.....	21
圖 2-8 E_C 、 E_M 、 E_A 之關係圖.....	21
圖 2-9 纖維與混凝土表面的剝落 (W/C=0.33、20 MM 聚丙烯纖維).....	22
圖 2-10 混凝土受高溫作用時，其強度之折減情形.....	22
圖 3-1 握裹試體示意圖.....	44
圖 3-2 有加箍筋的握裹試體平面圖.....	44
圖 3-3 剪力試驗樑.....	44
圖 3-4 極限彎矩作用下構件的壓應力分佈情形.....	45
圖 3-5 防火試驗樑.....	45
圖 3-6 防火試驗版試體.....	46
圖 3-7 混凝土牆體密閉空間日曬試驗.....	46
圖 3-8 握裹試驗裝置示意圖.....	47
圖 3-9 鋼筋混凝土樑之剪力試驗安裝圖.....	47
圖 4-1 握裹應力-滑移曲線.....	65
圖 4-2 臨界握裹強度與箍筋距離之關係.....	66
圖 4-3 標稱握裹強度與箍筋距離之關係.....	67
圖 4-4 臨界握裹強度與混凝土抗壓強度的關係.....	68
圖 4-5 標稱握裹強度與混凝土抗壓強度的關係.....	69

圖 4-6 單位抗壓強度之標稱握裹強度與混凝土抗壓強度的關係	70
圖 4-7 理論支承力與混凝土抗壓強度的關係	71
圖 4-8 L20 試體載重-樑中央位移	71
圖 4-9 L40 試體載重-樑中央位移	72
圖 4-10 L60 試體載重-樑中央位移圖	72
圖 4-11 N20 試體載重-樑中央位移圖	73
圖 4-12 N40 試體載重-樑中央位移圖	73
圖 4-13 N20 試體載重-樑中央位移圖	74
圖 4-14 剪跨比對輕質混凝土樑極限剪力強度之影響	74
圖 4-15 剪跨比對常重混凝土樑極限剪力強度之影響	75
圖 4-16 混凝土抗壓強度對輕質混凝土樑極限剪力強度之影響	75
圖 4-17 混凝土抗壓強度對常重混凝土樑極限剪力強度之影響	76
圖 4-18 混凝土應力應變關係圖	76
圖 5-1 牆體隔熱分析模型	87
圖 5-2 LINK 32 熱傳導元素	87
圖 5-3 混凝土牆版隔熱數值模擬分析結果	88
圖 5-4 混凝土房屋受日曬之升溫曲線	88
圖 5-5 常重與輕質混凝土房屋受日曬之溫差曲線	89
圖 5-6 混凝土樑於高溫爐內的升溫曲線	89
圖 5-7 混凝土版的升溫曲線	90
圖 5-8 混凝土版的背溫變化曲線	90

照片目錄

照片 3-1 應力環.....	48
照片 3-2 資料接收器 (7V14M) 及筆記型電腦.....	48
照片 3-3 鋼筋混凝土樑之剪力試驗裝置.....	49
照片 4-1 側向劈裂破壞與滑動握裹破壞.....	77
照片 4-2 輕質與常重混凝土之握裹破壞照片.....	77
照片 4-3 輕質混凝土樑試體破壞情形(A/D=1.5).....	79
照片 4-4 常重混凝土樑試體破壞情形(A/D=1.5).....	79
照片 4-5 輕質混凝土樑試體破壞情形(A/D=3.0).....	80
照片 4-6 常重混凝土樑試體破壞情形(A/D=3.0).....	80
照片 5-1 混凝土樑之防火試驗裝置.....	91
照片 5-2 混凝土樑防火試體之裝置情形.....	91
照片 5-3 防火試驗後，輕質骨材混凝土樑之破壞情形.....	92
照片 5-4 防火試驗後，常重骨材混凝土樑之破壞情形.....	92
照片 5-5 混凝土版之防火試驗裝置.....	93
照片 5-6 混凝土版防火試體之裝置情形.....	93
照片 5-7 混凝土版防火試驗過程中之觀察.....	94
照片 5-8 混凝土版背熱面之破壞情形.....	95
照片 5-9 混凝土版受熱面之破壞情形.....	96

摘要

關鍵詞：輕質混凝土、握裹強度、耐火性能、熱傳導係數

一、研究緣起

混凝土可視為水泥砂漿（基材）及骨材（填充顆粒）組合而成之複合材料。在常重混凝土中，天然骨材之彈性模數及強度都大於水泥砂漿，混凝土受力時由水泥砂漿先行開裂並貫穿整體水泥砂漿。輕質骨材混凝土受力時情形較為複雜，需視輕質骨材所具有的彈性模數及其剪應力或低於水泥砂漿者而定，因此該兩項材料之間的複雜關係，使輕質骨材混凝土的強度形成、受力下的應力-應變行為、乃至於使用在鋼筋混凝土上之性能，與常重混凝土之間有不小的差別。現行結構混凝土設計規範大都依據普通混凝土的試驗研究結果來訂定，但許多文獻資料顯示輕質骨材混凝土之力學性質與常重混凝土者有相當的差異。有鑑於此，現行結構混凝土設計規範之適用性，實有待驗證。雖然設計規範已針對使用輕質骨材混凝土的情況做了一些修訂或規定，如握裹長度增加 1.3 倍或以劈裂強度加以修訂，混凝土剪力強度亦以劈裂強度來修訂或以 0.85 或 0.75 來折減。但對強度、材料組成均異於傳統混凝土的輕質混凝土而言，通盤檢討現行規範的適用性有其必要。例如，鋼筋混凝土構件承受撓曲作用所產生的壓應力分佈情形通稱為應力塊（stress block），在評估其行為與極限強度時扮演相當重要的角色。但等值矩形應力塊參數是否仍適用於輕質混凝土，規範並無適當說明。故依現行 ACI 318 規範來推求水庫淤泥輕質骨材混凝土所拌製 RC 樑之標稱撓曲強度，其可行性尚待試驗証實。

一般而言，各國的建築規範內均明文訂定建築防火規章，它代表可被社會大眾一致接受之基本防火要求。依據 ASTM 規範相關建築材料防火測試方法之試驗結果顯示，因輕質骨材擁有與生俱來的熱穩定性（如

人造輕質骨材已事先加熱至 1093°C 以上的高溫)、較低的熱傳導性與熱膨脹係數，故一般認為結構輕質骨材混凝土（如樑、柱、版、牆）的防火性能與時效均優於等同厚度之常重混凝土構件。儘管如此，為推廣輕質骨材混凝土於國內建築上的應用，仍須探討其防火性能，俾能充分利用其優點來提升國內建築防火之安全性。

為促進與確保能源在建築上的使用效率，國內早於 1980 年代即研訂建築節能規範。易言之，改善能源效率是非常重要的課題，因其可降低一個國家的能源需求並可充分利用有限的能源。相較於一般常重骨材混凝土，輕質骨材混凝土擁有相當良好的絕熱性能，其熱傳導係數僅及一般常重骨材混凝土者的一半。因此，在國內輕質骨材混凝土逐漸量產並普遍使用之際，從事輕質混凝土隔熱性能的研究實有其必要性，亦是刻不容緩的要務。

二、研究方法及過程

綜上所述，本研究計畫擬提供的服務項目及工作範圍如下所列：

- (1). 收集國內外資料，並以實驗方法，研討現行規範對輕質骨材混凝土握裹長度與剪力強度，及計算彎矩強度之等值矩形應力塊之適用性；探討輕質骨材結構混凝土有關計算式之適用性。
- (2). 試驗求得不同單位重輕質骨材混凝土之熱傳導係數。
- (3). 以輕質及常重混凝土結構桿件或牆體作為防火及隔熱實驗驗證之研究，並標準升溫曲線對結構桿件及牆體加熱，探討結構及非結構構件之火害行為，作為防火安全性能之試驗驗證。
- (4). 以輕質及常重混凝土牆體製作密閉空間，利用數值程式模擬日曬後其內外溫差關係，並以實驗結果比較驗證之。

三、重要發現

本研究利用水庫淤泥輕質骨材混凝土，進行其構件行為與隔熱防火

性能研究，並與常重混凝土進行比較。由目前的試驗結果，其重要的研究成果整理條列如下：

- (1). 以石門水庫淤泥為原料所燒製成的造粒型輕質骨材，骨材品質良好，可作為結構與非結構用之輕質混凝土粒料。
- (2). 當混凝土強度在 40 MPa 等級以上時，輕質骨材混凝土的握裹強度將比常重混凝土高，此乃由於同強度輕質混凝土中的水泥漿，其水灰比較低而使得握裹強度較高。20 MPa 等級輕質骨材混凝土之握裹力則略低於常重混凝土約 15% 以內。
- (3). 輕質樑與常重樑之剪力強度表現相當，均比 ACI 規範之理論值高。ACI 規範以 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f'_c}$ 計算剪力，而輕質混凝土 $f_{ct}/6.7$ 約為 $0.75\sqrt{f'_c}$ ，輕質樑較常重樑更形保守。
- (4). 20 MPa 強度等級輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β 約為 0.77，高於 PCA 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 $\beta = 0.76$ ，當輕質混凝土強度高達 40MPa 時，計算所得之輕質混凝土等值應力塊深度參數 β 約為 0.73，乃高於 PCA 對輕質混凝土建議值 0.70，因此 PCA 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β 尚屬保守可行，不需對輕質混凝土做特別的修正。
- (5). 中低強度輕質骨材混凝土的熱傳導係數介於 $0.690 \text{ kcal/m.hr.}^\circ\text{C} \sim 0.750 \text{ kcal/m.hr.}^\circ\text{C}$ 之間，而常重混凝土則介於 $1.330 \text{ kcal/m.hr.}^\circ\text{C} \sim 1.425 \text{ kcal/m.hr.}^\circ\text{C}$ 之間，當混凝土強度由 20MPa 等級提高至 40MPa 等級時，混凝土熱傳導係數增加有 7~8%，且輕質混凝土熱傳導係數僅佔常重混凝土者的 53% 左右，相當有利於混凝土節約隔熱的性能。
- (6). 由日曬試驗與數值模擬分析可以發現，在台灣地區九月平均溫度、6 小時日曬條件下，輕質混凝土房屋相較同條件下之常重混凝土房屋的內溫降低約 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ ，比常重混凝土更有利於混凝土房屋保溫取涼的功能。
- (7). 輕質混凝土版試體與樑試體在進行防火試驗時，若試體未進行完全

烘乾，將會因蒸汽壓力而發生表面剝落的情形，甚至導致樑或版的破壞。常重混凝土樑或版試體則較不會發生表面剝落的情形。若為乾燥試體，則輕質骨材混凝土防火性能優於常重混凝土。

- (8). 由於輕質混凝土的熱傳導係數較低，在進行混凝土版試體的防火試驗時，其背部溫度上升的速率較慢，此為其優勢之一。輕質與常重混凝土版試體的防火時效均可達 1 小時以上。

四、主要建議事項

立即可行之建議

主辦機關：行政院

協辦機關：經濟部水利署、環境保護署、縣市政府、內政部建築研究所、內政部營建署、國家科學委員會

由本研究可知，以台灣水庫淤泥燒成之輕質骨材，其骨材品質良好，可作為結構或非結構用輕質混凝土之粒料。此研究成果不但為水庫淤泥找到最佳之處理方式，達到資源再利用之功效，更為國內拮据建築材料覓得豐富之料源，抒解天然砂石之過渡開採。若要實行水庫淤泥輕質骨材之產製，須有豐沛的水庫淤泥，輕質骨材廠設立及專業燒製技術等條件，各條件皆需政府在政策及法令上的輔助。在水庫清淤方面，經濟部可明確公告水庫淤泥為可再利用的事業廢棄物，由水利署編列清淤費用，擬定中長期水庫清淤計畫，以提供長期且穩定料源，再配合環保署推動淤泥資源化政策，避免惡意棄置造成二次污染。輕質骨材燒製廠設立於水庫周圍最具便利性及經濟性，此目標需要水利署及縣市政府協助土地之開發，及縣市政府在營業執照之開放才可達成。另外，設廠之專業知識仍需要建研所、國科會、協會及大專院校等機構，對業界進行輔導與燒製技術之研發。要使廢棄之水庫淤泥產製為可用之輕質骨材，需要行政院協調各單位做通盤整合與系統規劃才可達成。

由本研究及國內外文獻均可發現，輕質骨材混凝土對結構物或非結構物的減重、耐震、節約隔熱及防火等性能，相對於常重混凝土者均有相當程度的提升，若能大量推廣於房屋建築、橋樑及道路等工程，將有

助於水庫淤泥之清除及降低天然資源使用，並達到省能、防火及廢物減少之效益，符合綠建築精神而逐漸成為建築主流。其實輕質骨材已普遍使用於歐、美洲等許多先進國家，甚至被美國列為未來優先使用之建築材料。然而國內輕質骨材混凝土的應用尚屬蠻荒時代，需政府大力推廣，目前除了協助民間產製水庫淤泥輕質骨材外，尚可由政府率先建立輕質骨材混凝土之示範工程，如由交通部推動輕質骨材混凝土之橋樑或道路工程、由內政部建研所及營建署建造輕質骨材混凝土之外牆或樓版等實際之工程範例，以增強民眾對輕質骨材混凝土的使用信心，加速輕質骨材混凝土之推廣。

長期性建議

主辦機關：行政院

協辦機關：經濟部國家標準局、交通部、內政部、國家科學委員會

水庫淤泥輕質骨材已為台灣輕質骨材混凝土建築找到新契機，但由於國內還未有一套完善的輕質骨材混凝土建築法規，使得輕質骨材混凝土在台灣應用推廣上窒礙難行，除了由政府帶動民間使用外，為了輕質骨材混凝土長期的發展，需政府政策法令配合及應用推廣與宣導，如由國家標準檢驗局制訂輕質骨材之檢驗標準（已制訂），交通部推動使用輕質骨材混凝土於大跨度橋面版或強震區橋樑結構之政策，內政部建研所及營建署訂定施工技術規範供業界依循、訂定建築物外牆之隔熱要求及鋼骨大樓樓地板之單位重限制等法令與政策，並舉辦輕質骨材相關研討會及產業發展記者說明會，來加強其應用推廣與宣導。另外，國科會、建研所等研究機構仍須持續針對輕質骨材混凝土之預鑄產品或工程做進一步之研發，以期使輕質骨材混凝土在台灣能永續的發展。

ABSTRACT

Keywords: lightweight aggregate concrete, bond strength, fire resistance, thermal conductivity coefficient

Concrete can be regarded as a composite material composed of aggregates (filling materials) and cement paste (matrix). For the normal-weight concrete, most of the cracks are bond cracks at the aggregate-cement paste interface because the elastic modulus and strength of the aggregate are greater than those of the matrix. While for the lightweight concrete, the failure mechanism depends on whether the elastic modulus and strength of the lightweight aggregate are greater than those of the matrix and therefore its strength growth, stress-strain relationship, and mechanical properties are quite different than those of the normal-weight concrete. Current concrete design code is derived from research conducted primarily on normal-weight concrete of 20 to 40 MPa. However, numerous studies dealing with mechanical properties have shown that significant differences exist between lightweight and normal-weight concretes. In view of this, the current design recommendations should be examined for lightweight concrete members. Some modifications have been made to take the properties of lightweight concrete into account, such as the bond length and shear strength of lightweight concrete members is 1.3 and 0.85 (or 0.75) times the specified values of the normal-weight concrete members respectively. Notwithstanding this, in view of the strength and constitutions of lightweight concrete are different from normal-weight concrete, there is a great need to check the practical applications of current regulations. For example, previous research on high-strength lightweight concrete has been inconclusive as to whether the equivalent rectangular stress block recommended by the ACI Building Code for flexural design is acceptable or needs to be revised. Therefore, the validation of ACI 318 for flexural strength of the reinforced

lightweight concrete beams made with sintered fine sediment lightweight aggregates should be verified.

Generally speaking, the requirements of structural fire protection contained in most building codes represent the minimum levels of fire safety deemed acceptable to their countries. When tested according to the procedures of ASTM Method for Fire Tests of Building Construction and Materials, structural lightweight aggregate concrete slabs, walls, and beams have demonstrated greater fire endurance periods than equivalent thickness members made with normal-weight aggregates. Superior performance is due to a combination of lower thermal conductivity, lower coefficient of thermal expansion, and the inherent thermal stability developed by aggregates that have been exposed temperature greater than 1093°C during preprocessing. Notwithstanding this, to promote the applications of lightweight concrete in the domestic building and construction industry, there is a great need to take fire resistance testing for structural elements made of lightweight concrete. Then, the excellent fire performance of lightweight concrete is indeed applicable to the fire resistance of building elements.

To promote and ensure energy efficiency in buildings, the building energy code has been developed in Taiwan since 1980. In other words, improving energy efficiency is an important topic because it helps to reduce a nation's energy needs and leads to better utilization of existing limited energy resources. In comparison with ordinary normal-weight concrete, lightweight aggregate concrete exhibits relatively high thermal insulating value, of which the thermal conductivity can be half as much as that of normal-weight concrete. Therefore, there is an urgent need to take advantage of lightweight concrete's thermal characteristics to reduce energy consumption while its use has been gradually increased.

To sum up, the main objective of this proposal is to:

- (1). collect previous research and provide experimental data regarding the bond strength, shear strength, and equivalent rectangular stress block for flexural

strength of reinforced structural lightweight concrete to modify the current provisions;

- (2). study the thermal conductivity of lightweight concretes having different bulk density
- (3). implement fire resistance testing for structural and non-structural elements made of lightweight and normal-weight concretes to assess and compare their fire behavior; and
- (4). bask the closed module made with lightweight and normal-weight concretes in the sun and produce experimental and numerical simulation reports of the temperature difference between external and internal surfaces of the closed module.

In this research, the structural behavior and fire performance of lightweight aggregate concrete, of which the lightweight aggregates are made from fine sediments collected from the Shih-Men Reservoir, were tested and compared to ordinary concrete. The main conclusions derived from this study may be summarized as follows:

- (1). The lightweight aggregates made from fine sediments collected from the Shih-Men Reservoir possesses proper qualities, and thus can be used to make structural and non-structural lightweight aggregate concrete.
- (2). For the compressive strength above 40 MPa, the bond strength of lightweight aggregate concrete is better than that of ordinary concrete. This reason may attribute to the fact that the water-to-cement ration of the paste in lightweight aggregate concrete is lower than that of ordinary concrete. As for the compressive strength of 20 MPa, however, the bond strength of lightweight aggregate concrete is about 0.85 times the value of ordinary concrete.
- (3). The shear strength of reinforced lightweight aggregate concrete beams is almost equal to that of reinforced ordinary aggregate concrete beams, and both are higher than the analytic values obtained by the ACI 318-99 code. According to the ACI 318-02 code, the analytic value is $f_{ct}/6.7$ in stead of $(f_c')^{1/2}$ for ordinary aggregate concrete. As for lightweight aggregate concrete, the analytic value is also $f_{ct}/6.7$, but it is more conservative since it is

approximately $0.75(f_c')^{1/2}$.

- (4). For lightweight aggregate concrete, the β parameters of equivalent rectangular stress block are 0.77 and 0.73, respectively for compressive strength of 20 and 40 MPa, while the recommended values are 0.76 and 0.70 by the PCA code. This reveals that the PCA code is on safe side, and thus it is no need to modify the β parameter of equivalent rectangular stress block for lightweight aggregate concrete.
- (5). For compressive strength of 20 MPa, the coefficients of thermal conductivity are from 0.690 to 0.750 kcal/m.hr.°C and from 1.330 to 1.425 kcal/m.hr.°C, respectively for lightweight and ordinary aggregate concrete. As for compressive strength of 40 MPa, the coefficients of thermal conductivity are from 0.690 to 0.750 kcal/m.hr.°C and from 1.330 to 1.425 kcal/m.hr.°C, respectively for lightweight and ordinary aggregate concrete.
- (6). After basking in the sun under an average temperature of September in Taiwan for six hours, the experimental investigation and numerical simulation on the temperature difference between external and internal surfaces of the closed module made with lightweight aggregate concrete is lower (in the range 3-5°C) than module made with ordinary aggregate concrete. This demonstrates that lightweight aggregate concrete possesses better performance on preventing heat and moisture transfer in buildings.
- (7). According to the fire test results of concrete slabs and beams exposed to an ISO 834 cellulose fire, lightweight aggregate concrete has better fire resistance than ordinary aggregate concrete when the test sample is at fully dried states. While lightweight aggregate concrete compared to ordinary aggregate concrete is more severe spalling due to higher moisture content if the test sample is not at fully dried states.
- (8). In an ISO 834 cellulose fire, the temperature rise rate on the surface opposing to fire exposed surface in lightweight aggregate concrete is slower compared to ordinary aggregate concrete due to the lower coefficient of thermal conductivity. But both the fire resistance of lightweight and ordinary aggregate concrete can withstand a one hour ISO 834 cellulose fire without considerable spalling.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

以輕質骨材取代常重骨材所拌製而成的混凝土，一般稱為輕質骨材混凝土（Lightweight Aggregate Concrete，簡稱 LWAC）。事實上，早於二十世紀之初，歐美及日本等先進國家即開始生產輕質骨材，並將其應用於非結構性用途與結構混凝土工程上。在非結構性用途方面，輕質混凝土因具備低熱傳導性，常被用來製作輕質圬工磚、輕質樓版或屋頂，藉以改善建物的隔熱性，故從節約能源的角度考量時，它的性能極具意義[1-5]。至於在結構混凝土工程的應用上，若構件斷面積一樣，輕質骨材混凝土結構之柱間跨度可增加，使用淨空可增大，經濟價值亦相對提升[6-7]；在防火與耐火性能上，文獻資料顯示[8]，因輕質骨材擁有與生俱來的熱穩定性（如人造輕質骨材已事先加熱至 1000°C 以上的高溫）、較低的熱傳導性與熱膨脹係數，故輕質骨材混凝土構件（如版、牆、樑、柱）的防火性能與時效均優於等同厚度之普通混凝土構件。另一方面，輕質混凝土構件的自重較輕，致使其結構體因地震所產生的慣性力亦相對較小，故可降低設計載重，因而節省建造成本[6-11]。

由於輕質骨材混凝土擁有上述良好的工程性質且具經濟性，先進國家早已將其廣泛應用於建築結構工程上。反觀國內，雖然早期就有不少學者從事研究輕質混凝土，但僅止於零星的個別研究[12-19]。所幸，在學者們鍥而不捨的努力下，已有計畫地探討台灣地區所燒製輕質骨材之物理、化學及力學特性。由各項試驗的結果與分析中可知，台灣本島輕質骨材料源區皆適合產製人造輕質骨材，且顆粒密度及吸水率都適合結構性輕質混凝土之使用。這些基本資料庫已逐漸建立，對於未來實際工程使用上應有極大的幫助。尤其甚者，近年來在產、學、研各界的合作研究下，也已驗證水庫淤泥可燒製出性質優良的輕質骨材，並可據以量產性質良好的輕質骨材混凝土[20-23]。此項研究為世界首創，不僅能達到資源回收再利用之環保訴求，尚兼具改善水庫儲水功能及延長其使用壽命之功效。

綜上所述，為把握此千載難逢的機會，以開啟國內使用輕質混凝土之契機，學術界自當貢獻其所能與所長，積極從事輕質骨材混凝土應用性研究之計畫，協助政府推動訂定輕質骨材與輕質骨材混凝土之國家標準或修訂相關設計規範，以促成輕質骨材混凝土之推廣應用及產業化。

第二節 研究目的

輕質骨材一般具有多孔隙、低密度及高吸水率等特性，這些與常重骨材相異的性質，將導致輕質骨材混凝土在配比設計、拌和、輸送、泵送、澆置及夯實等作業偏離常重混凝土的觀念。對於輕質骨材使用於混凝土中造成其性質變化之影響，國內外已有相當多的研究[22-35]。有關輕質混凝土本身的配合設計法、工學與力學性質等，目前國內外亦有許多學者提出研究報告[27-42]，其應用在鋼筋混凝土或預力混凝土上的結構分析與設計考慮，也已由各研究報告中獲得不少建議。然而，目前國內有關於輕質骨材混凝土之設計規範或準則並不完備，顯然為輕質混凝土推廣工作上的一大障礙。此外，如所周知，人造輕質骨材的性質具有地域性，不同地區所產製之輕質骨材其性質變異性頗大；再者，各國有關輕質混凝土之工程原理雖無差異，但為適應國情之不同，故各國有其必要自訂符合需求的規範與標準。

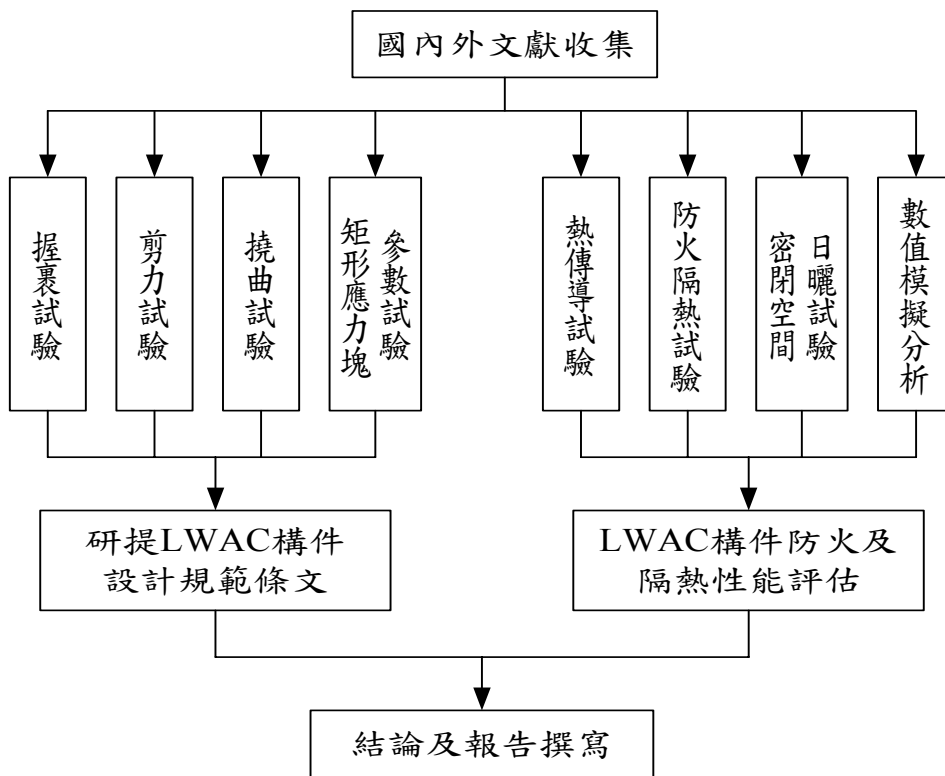
本研究計畫擬就現行設計規範於輕質混凝土之適用性及相關計算之可行性加以探討，並提出建議；此外，輕質骨材混凝土的防火及隔熱性能方面，則利用實驗驗證與程式模擬兩種方式來進行相關探討。簡言之，本研究計畫之目的旨在對針對相關規範提出建議，以作為輕質骨材混凝土使用於土木工程之設計及施工的參考準繩，從而促成輕質骨材混凝土之推廣應用及產業化。

第三節 研究方法與進行步驟

綜上所述，本研究計畫擬提供的服務項目及工作範圍如下所列，規劃的研究流程如圖 1-1 所示。

1. 收集國內外資料，並以實驗方法，研討現行規範對輕質骨材混凝土握裹長度與剪力強度，及計算彎矩強度之等值矩形應力塊之適用性；探討輕質骨材結構混凝土有關計算式之適用性。
2. 試驗求得不同單位重輕質骨材混凝土之熱傳導係數。
3. 以結構桿件或牆體作為防火及隔熱實驗驗證之研究。
4. 以標準升溫曲線對結構桿件及牆體加熱，探討結構及非結構構件之火害行為，作為防火安全性能之試驗驗證。
5. 以輕質及常重混凝土牆體之密閉空間，以數值程式模擬日曬後其內外溫差關係，並以實驗結果比較驗證之。

圖 1-1 研究流程圖



第二章 文獻回顧

第一節 輕質骨材的種類與特性

1、輕質骨材的種類

輕質骨材可大致分為天然和人造兩大類；天然的輕質骨材大都為含有孔隙組織的火山噴出岩，人造的輕質骨材種類相當多，重要的有利用天然材料如粘土、頁岩等燒製而成的膨脹粘土、膨脹頁岩等。輕質骨材在製造過程中，原料本身具起泡成份，或添加了發泡材料，使得骨材具有堅硬外殼、內部卻充滿孔洞，具有低單位重、隔熱及隔音佳的優點。輕質骨材會因種類及形成過程的不同，而產生不同的性質。可從其成形、組織及粒徑大小三方面來瞭解輕骨材與普通骨材的相異點及特質[15-32]。

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，由於在形成過程中無法加以控制，致其表面和內部孔隙變異性甚大。而人造骨材最有利之處在於製造過程的人工化，可針對性質做某種程度的控制。

在骨材製造原料方面，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、真珠石等均無堅硬之表層，外表也較不規則、吸水率也較大，使其整體骨材品質較差。頁岩及板岩可由原料打碎並直接燒製成非造粒形輕質骨材，黏土或塑性較大之頁岩則可先行造粒，然後燒製成接近圓球形的造粒形骨材，粒徑可由原造粒控制其大小。

骨材組織方面，不論是天然或人造輕質骨材，其最大特點在於材質中含有相當高比例的孔隙。骨材組織中的孔隙可分為表層孔隙和內部孔隙二種，表層孔隙的存在，較不利於骨材的品質，最明顯的是對強度、吸水率和混凝土工作性的影響。而品質已被肯定為較理想的膨脹頁岩及膨脹黏土之類的輕質骨材，除了不含表層孔隙外，最重要的是它擁有一層燒結成形且強度高的硬表殼（如圖 2-1 所示），使它能因具有高含量的內部孔隙，而

成為一種顆粒密度小，卻擁有低吸水率、高強度的輕質骨材。

輕質骨材的粒徑除了造粒型之膨脹骨材，可由事先的原料造粒完全控制其顆粒粒徑外，其餘非造粒型人造骨材其粒徑是依原料的碎粒大小而定，至於天然輕質骨材，其顆粒粒徑為自然形成。粒徑的區分大都與普通骨材同樣方式處理之一，一般而言，輕質骨材之最大粒徑以 3/4"(19mm)而不超過 1"(25mm)為宜。

目前在結構性混凝土方面使用最多的人造膨脹頁岩、黏土、板岩等有兩項共同特點，一是骨材的粒徑愈大，其顆粒密度愈小，強度也愈差。另一是細骨材部分，細顆粒較少，尤其是#30 以下的顆粒尤為缺乏。由於骨材之顆粒密度係依粒徑大小而改變，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將不一致，這是與普通骨材不同的地方。至於輕質細骨材的缺乏，可用天然砂補充，但將會增加混凝土之單位重及降低其隔熱性。然而在水泥含量及坍度條件均相同時，以天然砂取代輕質砂將能提高混凝土強度。

2、輕質骨材的物理特性

輕質骨材物理特性，會因其原料的不同及製造方式的改變而有不同的變化，如表 2-1 所示。一般而言，輕質骨材具有低密度($0.7\sim 2.4\text{ g/cm}^3$)、高吸水率(2~20%)、表面粗糙、低強度、低單位重等重要特性。輕質骨材內部孔隙多，就相同材料之輕骨材而言，顆粒密度隨粒徑減小而增加。大部分輕質骨材為圓形、方形或多角形表面粗糙等形狀之顆粒，依粒徑大小可分為粗徑、中徑與細徑三種；粗徑之直徑在 19 mm~4.8 mm 之間，中徑之直徑在 9 mm~2.4 mm 之間，若通過 4 號篩之重量在 85%以上則稱為細徑。輕質骨材之密度大多在 1.6 g/cm^3 以下，而天然骨材在 2.6 g/cm^3 左右，對於結構物的自重則可減輕 1/5 左右，相對於同樣的基礎承載力而言，以輕質骨材做建築材料，則可增加結構物的高度與樓層數。

輕質骨材因內部含有大孔隙，使其彈性模數、強度、密度等均隨粒徑增大而降低。就普通混凝土而言，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並不全然適合，因為它只能減少拌合水用量，從而減少材料析離、混凝土泌水現象及收縮等，雖有利於混凝土之強度，但粒徑愈大的輕質骨材其強度將愈低，如圖 2-2 所示，反而會限制其混凝土的強度發展。故欲得較高強度的輕質骨材混凝土，須選用粒徑小、顆料密度大、強度高的輕質骨材，然而其混凝土的單位重會較大。

第二節 水庫淤泥輕質骨材

台灣地區蘊藏著豐富的粘土、頁岩、板岩及泥岩等岩石，這些岩石均為適合用來燒製輕質骨材的原料。而水庫地區的淤泥又是由這些岩石風化，遇雨水沖刷形成泥流進入河川或水庫集水區，經沈積後造成水庫容量減低，若能應用這些水庫淤泥來燒結輕質骨材，不僅可將廢棄淤泥再生資源化，提高水庫運轉之經濟效益，同時更能製造出具有質輕、隔熱及抗震效果的輕質混凝土。

國內外對於輕質骨材及輕質骨材混凝土的研究，已有許多的文獻可供參考[1-42]。國立中興大學自 1991 年起在榮工處與內政部建研所資助下，完成頁岩及黏土人造輕質骨材之生產及輕質混凝土工業化之研究，已大致掌握台灣島內生產輕質骨材各料源區之物性。另 2000 年國科會委託之水庫淤泥製造輕質骨材研究[43]及台灣科技大學之研究報告中，已確定國內水庫淤泥具備有製造輕質骨材之條件，且水庫淤泥在製造輕質骨材過程中，可直接造粒而省去一般岩石碎化之過程，是為更有利的條件。

內政部建築研究所在 2003 年曾委託中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會進行「水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」計畫案，該計畫案的研究成果顯示[44]，經實地採取台灣西部地區 15 座水庫之淤泥樣品進行測試（包含翡翠、石門、青草湖、大埔、寶山、明德、明潭、日月潭、仁義潭、鏡面、虎頭埤、白河、阿公店、鳳山、澄清湖等），證明 15 座水庫淤泥樣品均可利用旋窯或實驗室程式控制電熱爐方式進行高溫燒結，所燒結而得之輕質骨材外表呈圓形顆粒形狀，內部則為多孔隙結構，

其比重約為 0.5~2.0、吸水率約為 5~15%，筒壓強度則大致介於 1.0~7.5 MPa 間。利用這些水庫淤泥輕質骨材所拌製而得之混凝土，單位重可降至 1800 kg/m³ 以下，相較普通混凝土的 2200~2400 kg/m³，單位重約降低 24%；而抗壓強度則隨著配比而異，可產製得強度 55 MPa 之輕質骨材混凝土；另外，輕質混凝土的熱傳導係數介於 0.75~0.81 kcal/m.hr.°C 之間，優於一般常重混凝土熱傳導係數 1.0~1.5 kcal/m.hr.°C。這些研究成果均顯示出，以水庫淤泥燒製而得之輕質骨材，不僅具有基本強度，且其混凝土製品更具有重量輕、隔熱和強度夠等優點。

第三節 輕質骨材混凝土的特性

輕質骨材混凝土性質會受到混凝土配比與所使用的輕質骨材種類相關，其與常重混凝土的差異點主要有單位重的大小、隔熱性能、抗壓強度、彈性模數等等，分述如下：

1、單位重

輕質骨材混凝土與常重混凝土最大的差異在於單位重的大小，由於輕質骨材的密度較一般砂石輕，因此所拌製的混凝土單位重也較輕。輕質骨材混凝土其氣乾單位重一般均不超過 2000 kg/m³，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 kg/m³ 以下。不過，優良的輕質骨材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。適合作為結構用途的輕質骨材混凝土，其單位重之要求至少在 1200 kg/m³ 以上，常用的輕質骨材混凝土大致在 1400~1800 kg/m³ 之間。

2、隔熱性能

熱傳遞係由於溫差所引起的能量輸送現象，只要物體中或物體間有溫度差存在，熱傳遞便會發生，基本上熱傳遞的方式可分為熱傳導、熱對流、熱輻射三種。熱傳導是在緊鄰的固定實體部分做熱的輸送，由微觀的角度看就是能量由一個原子或分子傳遞到下一個的過程；熱對流是因液體及氣體的運動及混合，而把熱由一個地方傳送到另一個地方，熱輻射是以看不

見的波來傳送熱，類似光的傳播。

混凝土熱傳遞的方式主要為熱傳導，熱傳導為二個物體之間或一個物體的不同部分之間，由於存在著溫度梯度而引起內能交換的現象，稱之為熱傳導。普通混凝土或紅磚之熱傳導係數 K 介於 $1.0\sim 1.5\text{W/mK}$ ，輕質骨材混凝土則因為輕質骨材內部多孔隙的特性，其熱傳導係數可降低至 $0.1\sim 1.0\text{W/mK}$ 。因此採用輕質骨材混凝土做為建築物的外牆，將因其具有較佳的隔熱效果，而大幅降低使用冷氣之能源消耗。輕質骨材混凝土的熱傳導係數主要與輕質骨材種類、天然砂的用量以及混凝土的中空結構相關，天然砂的含量愈少，輕質骨材混凝土的熱傳導係數愈低，如圖 2-3 所示[45]；而空心混凝土若孔隙排列在垂直於熱流方向者愈多，則 K 值愈小[46]。

3、乾縮及潛變

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。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} ，故輕質骨材混凝土乾縮量平均較低。但部份文獻則指出，輕質骨材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 $10\sim 40\%$ 之乾縮量[47]，尤其是高壓蒸汽養護更具效果，這點是可以肯定的。一般規範如 CNS、ASTM 等，對輕質骨材混凝土乾縮量之規定是不得大於 0.01% 。

在潛變方面，影響之因素包括：水泥性質、骨材種類、級配、水泥漿體品質、用量、環境條件、所受應力大小及加載時間點等。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。

強度較高之輕質骨材混凝土，承載能力較高、潛變量少；另低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。

4、抗壓強度

輕質骨材混凝土的抗壓強度與其單位重有密切關係，故 CNS 3691 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（如表 2-2 所示）。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，對輕質骨材混凝土均有劃定出一抗壓強度與單位重或水泥用量之關係範圍。台灣地區生產之膨脹頁岩輕質骨材水泥用量與混凝土強度間之關係如圖 2-4 所示[48]。

影響輕質骨材混凝土抗壓強度之因素包括輕質骨材種類、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 25 mm 以下。輕質骨材本身具有的強度亦會影響到其混凝土抗壓強度，其關係可由圖 2-5 說明之。輕質骨材混凝土在強度的發展過程中，因輕質骨材具有一定的顆粒強度，而水泥砂漿的強度則會隨著材齡而增長，當水泥砂漿的強度超越輕質骨材顆粒強度時，混凝土的破壞將由輕質骨材主空，也導致混凝土的強度受到一定的限制，這也形成輕質骨材混凝土具有分界強度的存在[49]，如圖 2-6 所示。

若欲提高輕質骨材混凝土的強度，需配比較高強度的水泥砂漿（較低水灰比），然而輕質骨材的彈性模數等於水泥砂漿彈性模數時，混凝土的受力行為將有所改變，即圖 2-6(a) 中的第一階段進入第二階段，該分界點所對應的混凝土強度，即稱之為分界強度。進入第二階段後，輕質骨材混凝土的強度提升較為趨緩，亦即提高水泥砂漿的強度，將無法有效提高輕質骨材混凝土的抗壓強度，形成不經濟的配。輕質骨材混凝土的分界強度與輕質骨材的種類有關，輕質骨材的強度愈高，其混凝土的分界強度也愈高。圖 2-6(b) 為水灰比 0.4 的常重混凝土、輕質混凝土與水泥砂漿強度的關係，由圖中可知，輕質骨材混凝土約在 35 MPa 時具有轉折點，即為該組配比的分界強度。

輕質骨材混凝土在同等強度下，其水泥砂漿強度將比一般常重混凝土所用之水泥砂漿強度高，意即其需較多之水泥用量或較低之水灰比來拌製混凝土，相對地其強度亦會發生早強現象（如圖 2-7 所示）[48]。

水灰比對輕質骨材混凝土的工作性影響頗大；若在低水灰比時使用全輕質骨材（輕質粗骨材+輕質砂），則混凝土的工作性將受到嚴重影響，解決之道為增加水泥漿量或改用天然砂做為細骨材，而後者的方式較為經濟可行。在相同水灰比下，天然砂輕質骨材混凝土之抗壓強度較高，這點不因輕質骨材種類不同而有所差異。

5、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，因為輕質骨材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。當輕質骨材混凝土受力超過強度上限而破壞時，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，所以使輕質骨材混凝土之破壞更具脆性。輕質混凝土之極限應變值 $\varepsilon_{cu}=0.002\sim 0.0035$ 間，較常重混凝土的極限應變值 $\varepsilon_{cu}=0.004\sim 0.006$ 小，ACI 則定常重混凝土的 $\varepsilon_{cu}=0.003$ 。

6、彈性模數及柏松比

輕質骨材混凝土之彈性模數一般約介於 10~25 GPa 之間，如表 2-3 所示。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、抗壓強度有關，參考的關係式可寫成：

$$E_c = 40000 \sqrt{\rho_c^3 \cdot f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2-1)$$

其中 ρ_c 為混凝土 28 天的氣乾單位重 (kg/m^3)。

輕質骨材混凝土的彈性模數亦可由水泥砂漿體積、輕質骨材體積及相對應的彈性模數來求得[50]，如圖 2-8 所示。另外，輕質骨材混凝土與常重混凝土之柏松比相近，其值約介於 0.15~0.25 間，視骨材種類、用漿量、齡期及含水量等因素而定。

7、劈裂抗張及彎曲強度

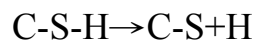
混凝土之張力強度較難以用直接而令人滿意的的方法來量測，因此，一般都是採劈裂或彎曲破壞之方式，間接測定其張力強度。劈裂強度或抗彎

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；有的直接以 $f'c^{2/3}$ 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 及王纓茂教授等。

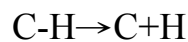
第四節 輕質骨材混凝土的火害行為

1、混凝土化學性質之變化

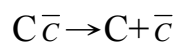
當混凝土在高溫作用下所產生之性質變化，包含物理性質與化學性質變化。當溫度由常溫上升至 200°C 間，混凝土內的孔隙水、毛細管水及吸附水會散失，此時僅是物理變化；若溫度再升高，則 C-S-H 膠體中之鍵結水也會脫離，產生不可逆之化學變化：



當溫度達 580°C 左右時，C-H 之鍵結水亦告分解：



溫度達 900°C 左右時， $\text{C}\bar{\text{c}}$ 亦告分解：



以上之結果亦可由電子顯微鏡觀察得到，當溫度達 500°C 時 C-S-H 之針刺球狀膠體之針刺萎縮。溫度達 600°C 時 C-H 六角薄板層狀亦已接近消失。

溫度對不同骨材，亦會有不同之反應，矽質骨材在 573°C 時， SiO_2 會產生晶相轉變，由 α 相轉為 β 相，且突發膨脹。碳酸鹽骨材則在溫度超過 900°C 時， CaCO_3 會分解放出二氧化碳。

2、影響輕質骨材混凝土火害行為之因素

由於輕質骨材的生產過程中，即預先在旋窯內以接近 1200°C 的高溫燒製而成，一般認為，輕質骨材混凝土會比常重混凝土的耐火性佳。然而，

由於輕質骨材內部多孔隙，吸水率較高，這些隱藏在輕質骨材內部的孔隙水，在受到高溫作用時，將可能產生額外的孔隙水壓力，而引致輕質混凝土表面的剝落[51]。

影響輕質骨材混凝土火害行為的因素，視混凝土的含水量、水灰比、溫度及所施加的軸壓力而定，而混凝土中的含水量又為主要的影響因素。文獻[52-57]指出，當混凝土中的含水量愈多時，孔隙中的水蒸汽愈多，所產生蒸汽壓力就愈大，且混凝土的內外溫度梯度也愈明顯，將容易引起輕質混凝土的表面剝落。為避免輕質混凝土受高溫作用時產生剝落，FIP/CEB指出，應將硬固輕質混凝土中的含水量降到 5%以下[58]，亦有文獻指出，添加適量的聚丙烯纖維可有效抑制混凝土的剝落，如圖 2-9 所示[59]。

輕質骨材混凝土的熱傳導係數比常重混凝土低，且其隔熱效果較佳，一般而言，樓版採用輕質骨材混凝土時，在混凝土受高溫作用的初期，其阻熱效果將比常重混凝土佳。然而，若火害時間愈長，輕質混凝土此方面的優勢將逐漸消失，而使得輕質混凝土樓版的背溫與常重混凝土相同。

3、輕質骨材混凝土火害作用後，剩餘之抗壓強度、彈性模數

混凝土的水灰比也會影響其火害行為，當水灰比愈小時，混凝土的強度愈高，相對地混凝土也愈緻密。但是，愈緻密的混凝土在受到高溫作用時，所產生的孔隙壓力也愈大，混凝土的表面愈容易剝落[55-56]。另一方面，混凝土所受到的溫度愈高、火害延時愈長，混凝土表面剝落的情形將更為嚴重，將使得混凝土承壓的有效斷面積減少，且混凝土內鋼筋缺少保護層，鋼筋將愈容易產生降伏，且混凝土的剩餘強度也愈低，如圖 2-10 所示[60]。

第五節 輕質骨材混凝土的相關設計規範

1、輕質骨材之相關規範

內政部建築研究所在 2003 年的整合與積極推動下，由中華民國節能輕

質骨材混凝土推廣協會承辦，完成研訂「燒結型輕質骨材」標準，共計有「輕質粗粒料的顆粒筒壓強度試驗法」、「輕質粒料比重及吸水率試驗法」、「結構混凝土用之輕質粒料」、「混凝土圻工用之輕質粒料」、「隔熱混凝土用之輕質粒料」、「結構輕質混凝土密度試驗法」、「輕質混凝土粒料中含鐵污染材料試驗法」，並完成研訂「輕質骨材混凝土技術規範」、「結構及非結構用輕質骨材混凝土預鑄產品技術規範」、「輕質骨材品質試驗方法」、「水庫淤泥輕質骨材之品質驗證」等，其中，輕質粗粒料的顆粒筒壓強度試驗法已獲得標準局上網公告，隔熱混凝土用之輕質粒料亦即將完成審查程序[44]。

2、美國對於輕質混凝土的相關法規

美國混凝土學會 (American Concrete Institute, ACI) 於 318-02 版的規範中，提及有關輕質混凝土和常重混凝土在設計規範中的不同，主要針對輕質混凝土的開裂模數、剪力及扭力強度與鋼筋伸展長度作了特別的規定，分述如下：

(1) 開裂模數

對常重混凝土而言，開裂模數 $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$ ；對輕質混凝土而言，其開裂模數可依下列方法之一修正之：

- (a) 當 f_{ct} 已予規定時， f_r 之公式須以 $f_{ct}/1.8$ 替代 $\sqrt{f'_c}$ ，但所用之 $f_{ct}/1.8$ 值不得超過 $\sqrt{f'_c}$ 。
- (b) 當 f_{ct} 未予規定時， f_r 之公式中之 $\sqrt{f'_c}$ ，對粗細骨材皆為輕質骨材之全輕質混凝土須乘以 0.75；對常重砂輕質混凝土須乘以 0.85。介於以上兩者間之含有部分輕質細骨材之混凝土可以內插法定之。

其中， f_{ct} = 輕質混凝土之平均開裂抗拉強度(kgf/cm²)。

(2) 剪力及扭力強度

輕質混凝土之剪力與扭力強度與常重混凝土相似，但須應用下列方法之一修正之：

- (a) 當 f_{ct} 已予規定時， f_r 之公式須以 $f_{ct}/1.8$ 替代 $\sqrt{f'c}$ ，但所用之 $f_{ct}/1.8$ 值不得超過 $\sqrt{f'c}$ 。
- (b) 當 f_{ct} 未予規定時， f_r 之公式中之 $\sqrt{f'c}$ ，對粗細骨材皆為輕質骨材之全輕質混凝土須乘以 0.75；對常重砂輕質混凝土須乘以 0.85。介於以上兩者間之含有部分輕質細骨材之混凝土可以內插法定之。

(3) 鋼筋伸展長度

在 ACI 規範中，輕質混凝土內之受拉竹節鋼筋與麻面鋼線等之基本伸展長度均要修正，以反應輕質和常重混凝土間之差異，修正因數為：

(a) 當 f_{ct} 已知時，修正因數 $= \frac{1.8\sqrt{f'c}}{f_{ct}} \geq 1.0$ 。

(b) 當 f_{ct} 未知時，修正因數 $= 1.3$ 。

(4) 彈性模數

在 ACI 規範中，混凝土之彈性模數 E_c 定為：

$$E_c = w_c^{1.5} \cdot 4270 \cdot \sqrt{f'c} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

其中， w_c 為混凝土之單位重，適用範圍為 1.5 至 2.5 tf/m^3 。若混凝土單位重超出此範圍時，則須另外以試驗方式定之。

3、國內對於輕質混凝土的相關法規

國內對於輕質混凝土的相關法規，則由中國土木工程學會依據美國 ACI 318-02 為範本，來進行設計規範之編撰。基本上，有關輕質混凝土設計規範之內容，均與上述之 ACI 318-02 版的規範相符。

表 2-1 輕質骨材之種類與基本物理性質

來源	種類	物理性質					
		顏色	外型	單位重 (g/cm ³)	統體密度 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	吸水率 (%)
天然	浮石	白色及淺灰色	渾圓或方形	0.34-0.63	0.35-1.15	85	達50
	熔岩(泡沫火山岩)	棕色或棕褐色	準圓或方形	0.75-1.4	1.8-2.8	40	10
人造輕質骨材	珠岩	白色或淡色	粗短型	0.04-0.15	0.1-0.3	95	≒0
	蛭岩	黃棕色	立方形或長條形	0.06-0.17	0.1-0.35	95	≒0
	膨脹黏土	紅棕色或黑色	圓形	0.3-0.9	0.6-1.8	75	8-20
	膨脹頁岩	棕色或灰棕色	立方形或長條形	0.45-0.9	0.8-1.8	70	5-10
	膨脹爐渣	灰色或灰暗色	粗短多角或尖銳型	0.5-0.85	1.0-2.0	46-60	20-35
	有機質泡沫球	白色	圓形	0.02	0.04	99	≒0

表 2-2 CNS 及 ASTM 對輕質骨材混凝土強度規定

規範		最大平均 單位重 (kg/m ³)	最小平均 28 天 抗劈、張力強度 (kgf/cm ²)	最小平均 28 天 抗壓強度 (kgf/cm ²)
CNS 3691		1840	20	280 以上
		1760	20	210
		1680	20	175
ASTM C330	全 輕 質	1760	22.5	281
		1680	21.1	211
		1600	20.4	176
	砂 非 輕 質	1840	23.2	281
		1760	21.8	211
		1680	21.1	176

表 2-3 輕質骨材混凝土彈性模數與單位重、抗壓強度之關係

抗壓強度 (MPa)	彈性模數 (GPa)		
	輕質骨材混凝土		常重混凝土
	單位重 1400 kg/m ³	單位重 1900 kg/m ³	單位重 2300 kg/m ³
30	11	19	28
40	12	21	31
50	13	23	34
60	14	25	36

圖 2-1 良好的輕質骨材應具有堅硬的外殼以滯含內部的孔隙



圖 2-2 輕質骨材點壓強度會隨著顆粒粒徑便大而降低

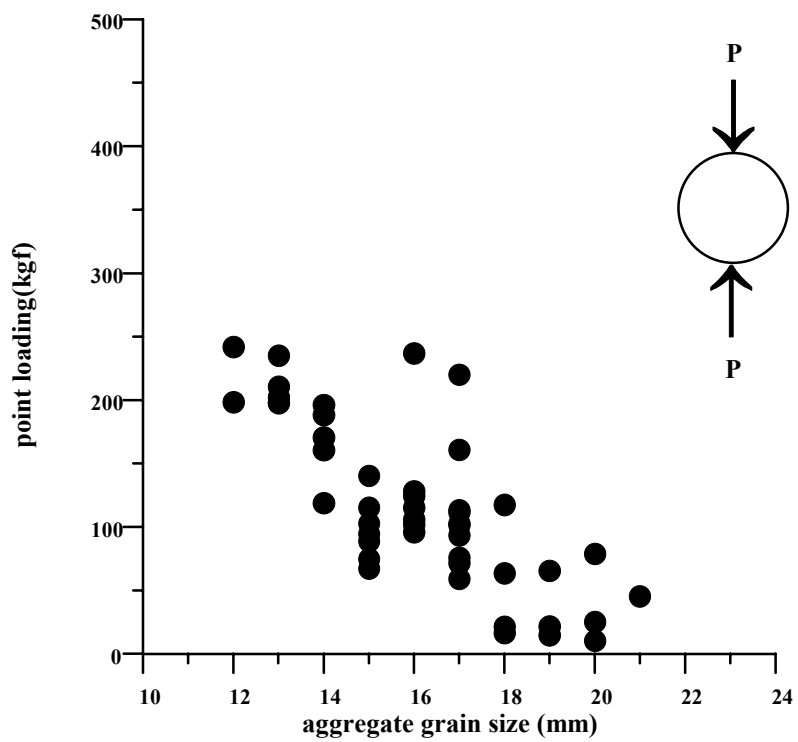


圖 2-3 細骨材含量對輕質骨材混凝土 k 值之影響

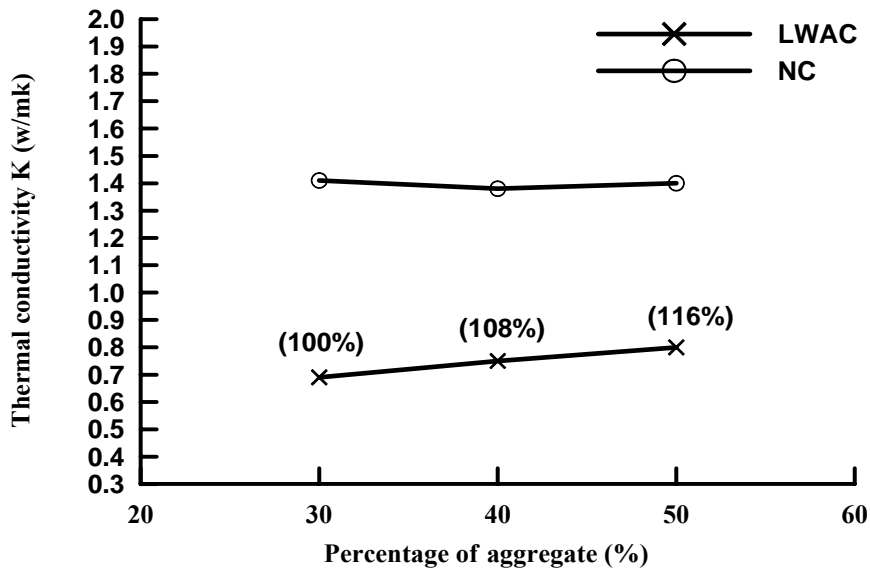


圖 2-4 水泥用量與輕質骨材混凝土抗壓強度關係

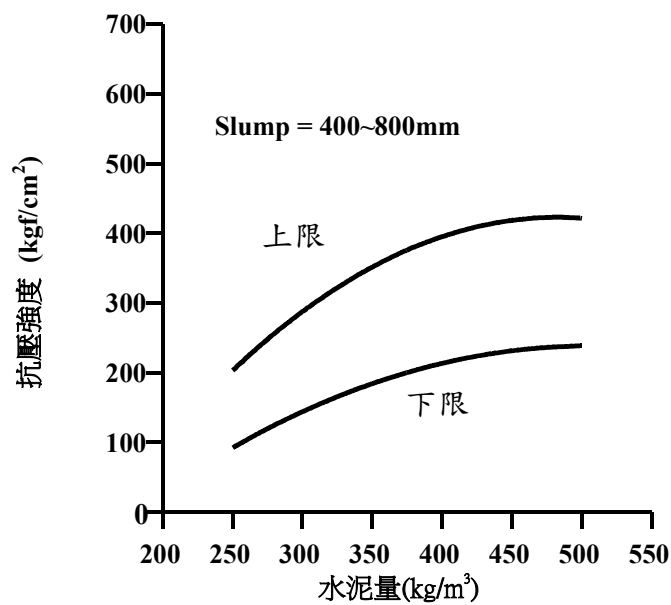


圖 2-5 輕質骨材混凝土抗壓強度與水泥砂漿、骨材強度間的關係

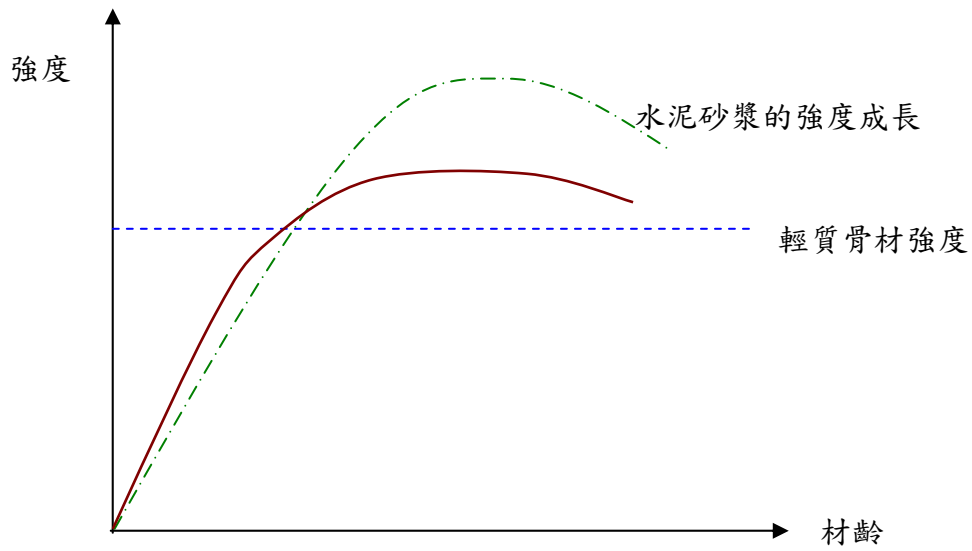


圖 2-6 輕質骨材混凝土的分界強度

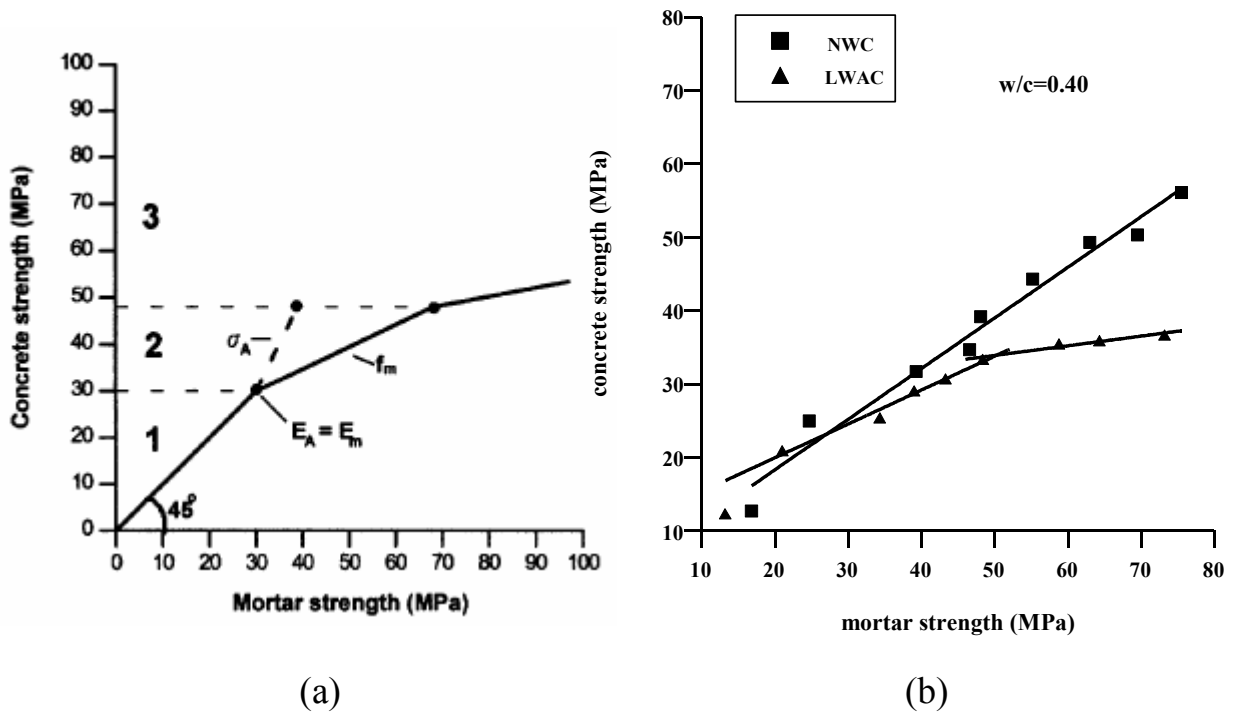


圖 2-7 輕質、普通混凝土之強度成長比較圖

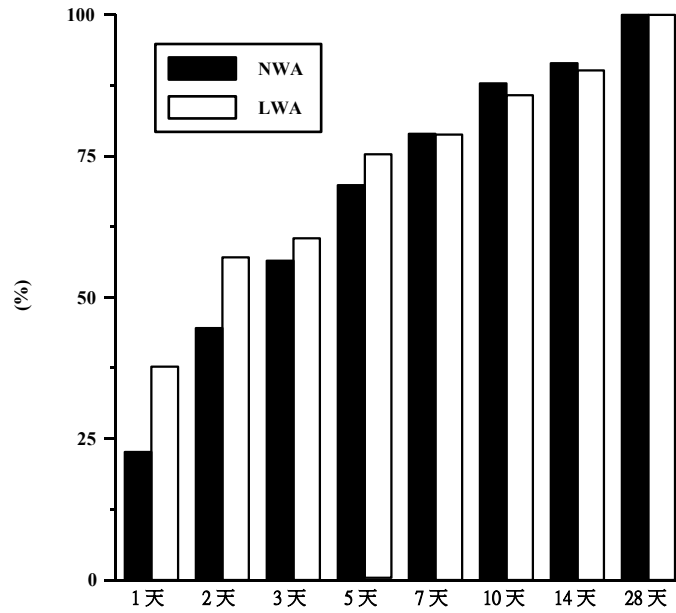


圖 2-8 E_c 、 E_m 、 E_a 之關係圖

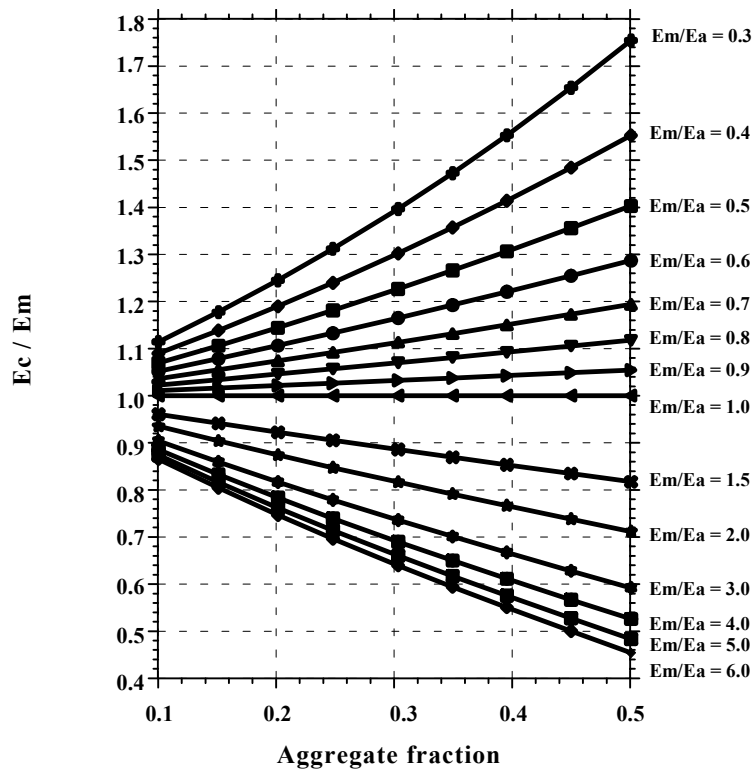


圖 2-9 纖維與混凝土表面的剝落 (W/C=0.33、20 mm 聚丙烯纖維)

(a) 沒有添加纖維 (b) 纖維添加量 = 2.5 kg/m³ (c) 纖維添加量 = 3.5 kg/m³

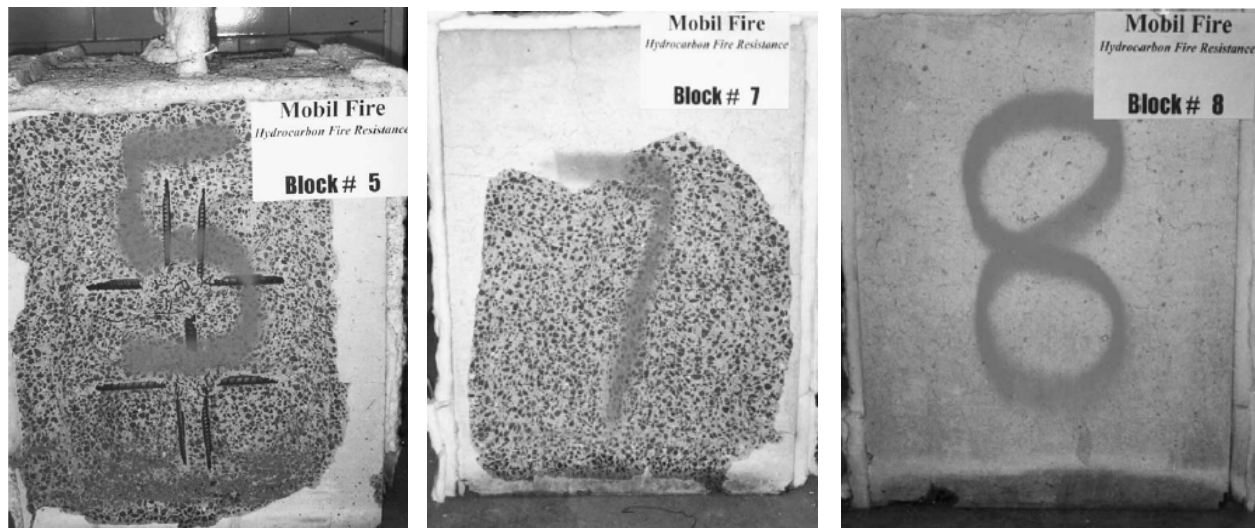
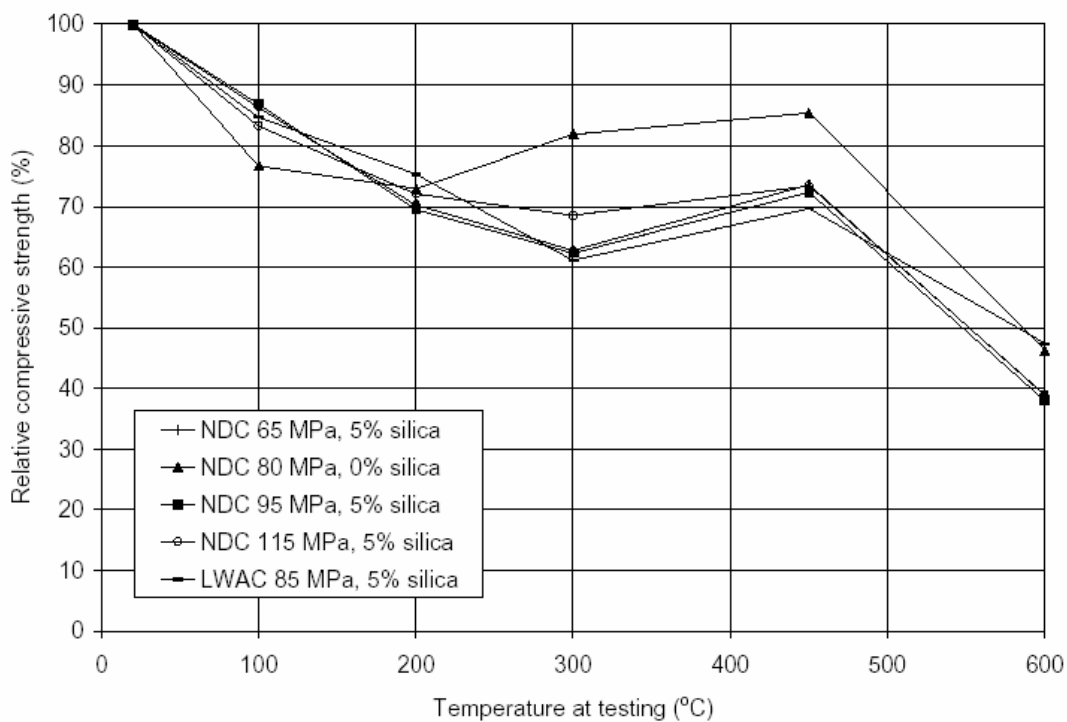


圖 2-10 混凝土受高溫作用時，其強度之折減情形



第三章 試驗計畫

第一節 試體規劃

本研究採用石門水庫淤泥所燒製成的輕質骨材，進行輕質骨材混凝土構件行為及防火隔熱性能之研究，其中包含輕質骨材混凝土基本隔熱性能測試、鋼筋輕質骨材混凝土樑、版等構件的結構性質與耐火試驗以及輕質骨材混凝土縮小尺寸密閉房屋受日曬的室溫變化等試驗，另一方面，並灌置相同強度之常重混凝土試體，以為比較分析。為完成上述之研究，就各項試驗所需之試體數量、型式、試驗之變數、材料、配比、試體製作方式以及試驗方法等細節，在本章中將個別加以說明之。

1、輕質骨材混凝土握裹長度之測析

鋼筋輕質骨材混凝土之握裹破壞行為與常重混凝土者並不相同[36-37]，其主要區別在於常重混凝土的破壞先發生於骨材與水泥漿之界面，而輕質骨材強度較低，在握裹力作用時，將因無法承受支承力而破碎，形成混凝土壓碎破壞。因此，在一般抗壓強度下，常重混凝土擁有較佳之鋼筋握裹力。然而，高強度輕質骨材混凝土則已具備常重混凝土之力學性質[38-42]。

為比較鋼筋與輕質及常重混凝土間握裹性質的差異，本項研究課題擬分別製作三種強度等級（20MPa、40MPa 及 60MPa）的輕質骨材混凝土及常重混凝土試體，以進行握裹試驗。主要乃採用 ASTM C234 規範之建議，製作 150mm×150mm×150mm 之標準混凝土拉拔試體，以及加入 3 號竹節鋼筋之箍筋的拉拔試體，安置的方式如圖 3-1，其與受拉鋼筋（6 號竹節鋼筋）之間距定義為箍筋距離 d ，如圖 3-2 所示。每組相同抗壓強度之混凝土又依箍筋距離為 30、45、60 mm 及無箍筋等細分四小組，每一小組各製作 2 個試體，合計 48 支試體，試體規劃詳列於表 3-1。

2、輕質骨材混凝土樑剪力強度之測析

文獻上有許多分析模式可以用來預測 RC 樑的剪力強度，而多數規範或經驗公式大都假設鋼筋混凝土構材臨界斷面所承受的撓曲應力與剪應力可分別處理，至於兩者之間的交互影響則透過間接的方式予以補強。故在大部分的混凝土規範中，含腹筋 RC 樑的極限剪力強度 V_n 可表示為腹筋所提供的剪力值 V_s 和混凝土所提供的極限剪力強度 V_c 之和，故引導出下式：

$$V_n = V_c + V_s \quad (3-1)$$

依據 ACI 規範[61]，含腹筋鋼筋混凝土樑得極限剪力強度可計算如下：

$$V_n = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 17.2\rho \frac{V_u d}{M_u} \right) bd + \rho_v f_{yv} bd \quad (\text{mm-N}) \quad (3-2)$$

式中： b = 樑的寬度； d = 樑的有效深度； f'_c = 混凝土抗壓強度； f_{yv} = 腹筋之降伏強度； ρ = 縱向鋼筋比； ρ_v = 橫向鋼筋比； V_u = 臨界斷面的剪力； M_u = 臨界斷面的彎矩。對於鋼筋輕質混凝土樑之剪力強度則由式(3-2)乘以 0.85 來折減。惟近年來，隨著人造輕質粒料燒製技術之改良，也可相對增進鋼筋輕質混凝土樑之剪力強度，而其改善程度則有待探討。

樑構件剪力試驗值之分析可分為剪力開裂強度及極限剪力強度之計算，分別可由式(3-3)及式(3-4)求得：

$$V_{cr} = \frac{P_{cr}/2}{bd} \quad (3-3)$$

$$V_{uc} = \frac{P_u/2}{bd} \quad (3-4)$$

式中： V_{cr} = 剪力開裂強度； P_{cr} = 樑產生剪力開裂時之載重； V_{uc} = 樑極限剪力強度； P_u = 極限狀態時之載重。

為比較鋼筋輕質及常重混凝土樑在剪力行為上的差異，本項研究課題擬分別製作輕質及常重混凝土樑試體，以進行剪力強度試驗。樑試體為不含箍筋之單筋 RC 樑，其剪力試驗擬探討之項目包括觀察剪力破壞模式，判斷跨深比在何範圍為中長樑或短樑，並將所得極限剪力強度值與 ACI 公式及文獻的建議式相比較，以檢核各建議式對鋼筋輕質混凝土樑構件之適用性。剪力試驗所考慮的變數為混凝土強度與跨深比。試體的設計為不含剪

力筋，以確保承受荷重後之破壞方式為剪力破壞。

混凝土樑剪力試驗的配筋圖及試體規劃如圖 3-3 及表 3-2 所示，試驗上澆置試體尺寸為 0.12×0.2×1.5 m 的常重與輕質混凝土樑，取抗壓強度為 20、40 及 60 MPa 三等級，主筋為 4 根 4 號竹節鋼筋，且不配置箍筋以確保樑試體為剪力破壞模式。每組各製作 2 個試體，合計 12 支樑試體，在進行剪力試驗時，分別取 2.0、2.5、3.0、3.5 四種剪跨比進行測試，以比較常重與輕質混凝土樑剪力強度的差異。

3、輕質混凝土等值矩形應力塊參數與輕質混凝土樑構件彎矩強度之測析

鋼筋混凝土構件承受撓曲作用所產生的壓應力分佈情形通稱為應力塊 (stress block)，在評估其行為與極限強度時扮演相當重要的角色。如圖 3-4 所示，構件在極限彎矩作用下，其略呈拋物線形的壓應力分佈情形可由應力塊參數 (k_1 、 k_2 、 k_3) 來描述之； k_1 為應力塊平均壓應力與最大壓應力之比值、 k_2 為由壓力側外緣起算混凝土合力作用點位置深度與中性軸深度之比值、 k_3 為最大壓應力與混凝土圓柱試體抗壓強度之比值。

由圖 3-4 可知，受壓混凝土面積上壓應力之總合力 C 可計算如下：

$$C = k_1 k_3 f'_c b c \quad (3-5)$$

式中， b =構件之寬度； c =中性軸之深度。於延性破壞情況下，鋼筋拉力 T 為：

$$T = A_s f_y \quad (3-6)$$

由平衡條件 $C=T$ ，中性軸 c 可表示為：

$$c = \frac{A_s f_y}{k_1 k_3 f'_c b} \quad (3-7)$$

構件之標稱彎矩強度則可表示為：

$$M_n = A_s f_y (d - k_2 c) = A_s f_y \left(d - \frac{k_2}{k_1 k_3} \frac{A_s f_y}{f'_c b} \right) \quad (3-8)$$

由式(3-8)可知，祇要知道 (k_2/k_1k_3) 即可算出構件之標稱彎矩強度，而不需要 k_1 、 k_2 、 k_3 之各別數值。文獻資料顯示[62]， k_2/k_1k_3 大約介於 0.55 至 0.63 之間。然而，對於設計者而言，最好能使用較簡單的方法來計算。因此，ACI 規範乃採 Whitney 之等值矩形應力塊參數[63]，以簡化構件標稱彎矩強度之計算。其中，應力塊深度 $a=\beta_1c$ ； β_1 為試驗常數。

有關應力塊參數之求得，已有許多學者對無圍束混凝土進行研究，本研究即量測混凝土圓柱試體的應力應變曲線，由其應力應變曲線再換算求得各試體之 k_1k_3 與 k_2 數值。

為驗證前項研究所求得的輕質混凝土應力塊參數，擬選定特定之構件進行鋼筋輕質混凝土樑的撓曲試驗。既有文獻資料顯示，箍筋對單筋 RC 樑與雙筋 RC 樑的延展性都有影響；在單筋樑中，拉力鋼筋比與箍筋含量可同時改變其延展性；在雙筋樑中，除了拉力鋼筋比與箍筋含量之外，還須計入壓力鋼筋比 ρ' 。因此，在參考文獻結果後，擬採用固定之構件跨深比，進行撓曲試驗，考量的參數最少為混凝土強度及拉力鋼筋比。在此同時，有若干試體係依現行 ACI 318 規範之最少剪力筋要求，參考國內常用之箍筋間距設計之。

試驗上澆置試體尺寸為 0.15×0.2×1.5 m 的混凝土樑，取抗壓強度為 20 MPa 及 40 MPa 兩等級，主筋為 4 根 4 號竹節鋼筋，箍筋取 2 號竹節鋼筋，其間距則為 100 mm，每組各製作 2 個試體，合計 8 支樑試體，並測試鋼筋混凝土樑在受火害前後之抗彎強度、撓度與延展性等撓曲性能。鋼筋混凝土樑之配筋圖及試體規劃分別如圖 3-5 及表 3-3。另外並澆置 $\phi 100 \times 200$ mm 的圓柱試體，試體規劃如表 3-4，測試其火害前後的抗壓強度變化。

4、輕質骨材混凝土防火性能之試驗驗證

耐燃性能依照材料燃燒性能的定義係指，在火災初期（閃燃發生前）應為不易或僅有微量燃燒現象、燃燒速度緩慢、不易產生有害的濃煙及氣體；在高溫火害下，不會有變形、熔化、龜裂等現象。防火材料的防火時

效測試是以時間為衡量單位，必須有隔火能力，試體是按照實際使用時的安裝方法，安裝在高溫爐中。當試驗開始時，爐內的溫度是按照 CNS 12514 的標準升溫曲線，在三十分鐘時，爐內溫度應升至 840 °C，一小時則升至 925 °C，燃燒後觀察試體外觀的變化及破壞的情形。

而依混凝土的各種升降溫速率及不同的最高溫延時之研究結果可知 [64-68]，升降溫過程由於溫度的變化，會引起骨材與硬固水泥漿體間的膨脹不諧和，導至兩者界面層產生裂縫；其升降溫速率的不同也使產生的開裂現象有所差別。至於最高溫的延時所造成的影響，則為加熱的第一小時內對抗壓強度的折損最為明顯，且隨著溫度的上升，其影響程度逐漸降低，但整體而言，強度的損失幾乎只發生在前兩小時的延時內。

依 CNS 12514 的定義，材料的阻熱性係指在標準耐火試驗條件下，受測之試體其一面受火時，能在一定時間內，其非加熱面溫度不超過規定值之能力。換言之，就是試體背火面在耐火測試時，溫度不能超過規範所規定之最高溫或平均溫。如 CNS 12514 即規定任一點之溫度不得大於 210°C，所有測點之平均溫度不得大於 170°C。

準此，為比較輕質及常重結構混凝土構件在防火安全性能上的差異，本項研究課題以標準升溫曲線對輕質及常重混凝土樑結構桿件加熱，以探討其抗彎強度、變形及延展性之變化，作為防火安全性能之試驗驗證，樑試體之規劃如圖 3-5 及表 3-3 所示。耐火加熱溫度係依據 CNS 12514 之耐火標準加熱溫度-時間曲線圖，以判定各試體的防火時效，防火試驗用試體主要以版試體為主，試體尺寸為 0.3x0.1x1.0 m，取混凝土抗壓強度為 20 MPa 及 40 MPa 兩等級，並於試體中央放置鋼筋號數為 3 號竹節鋼筋網，鋼筋間距則為 200 mm，共製作有 7 片混凝土版試體，以測試鋼筋混凝土版之耐火性能，鋼筋混凝土版之配筋圖及試體規劃分別如圖 3-6 及表 3-5。混凝土構件防火安全性能除利用實驗驗證之外，也將採用數值分析程式之模擬方式來進行比對研究。

5、輕質骨材混凝土隔熱性能之試驗驗證

混凝土熱傳導係數為各成分性質之組合，且與含水量、齡期、溫度、孔隙分佈及骨材種類等因素有關[69-70]。雖然混凝土的熱傳導係數因其組成材料的不同而異，但輕質混凝土的熱傳導係數大致介於 $0.1\sim 0.8\text{W/m}\cdot\text{C}$ ，常重混凝土者大致介於 $1.5\sim 3.5\text{W/m}\cdot\text{C}$ 。由此觀之，輕質混凝土的熱傳導係數明顯低於常重混凝土者，故兩者在熱傳遞方面亦必然有著相當大的差異。準此，本研究擬進行輕質/常重混凝土熱性質與隔熱性能之試驗驗證。研究上，以試驗求得不同單位重輕質骨材混凝土之熱傳導係數，採用 CNS 規範之建議，製作 $200\times 200\times 50\text{mm}$ 之立方混凝土塊試體，每組相同抗壓強度之混凝土各製作 3 個試體，合計 12 個熱傳導係數試體，試體規劃詳列於表 3-6。

此外，製作輕質及常重混凝土牆體之密閉空間，以模擬房屋受日曬時其混凝土屋內外溫度之變化。試驗擬澆製尺寸大小為 $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}\times 1.2\text{m}$ 的中空房屋，牆版之厚度為 50mm ，並日曬房屋各開寬 20mm 、高 40mm 的門，與寬 35mm 、高 20mm 的窗等兩個開口，其示意圖如圖 3-7 所示。而混凝土抗壓強度取 20MPa 等級，輕質骨材混凝土與常重骨材混凝土各製作 1 間日曬房屋，合計 2 間日曬房屋。

另一方面，也採用數值分析程式來進行輕質/常重混凝土構件隔熱性能之模擬。材料熱傳導係測試方法通常有平板直接測定法及平板比較法。本研究擬以符合 ASTM C518 及 ISO 8301 標準以平板比較法方式量測輕質/常重混凝土之熱傳導係數。

第二節 試驗材料

試驗時採用的材料包括水泥、水、天然粗細骨材、輕質骨材、強塑劑及竹節鋼筋等，其性質如下所述：

1. 水泥：台灣水泥公司生產的波特蘭 Type I 型水泥，其物理性質和化學性

質詳列於表 3-7。

2. 水：一般之自來水。
3. 天然粗、細骨材：天然粗骨材為大甲溪的碎石。天然細骨材取自烏溪的細砂，F.M.為 2.67。其性質列於表 3-8 和表 3-9。
4. 輕質骨材：輕質骨材為以石門水庫淤泥為原料所燒製成的造粒型輕質骨材，淤泥之化學性質如表 3-10 所示。所燒製而得之水庫淤泥輕質骨材可分為三個粒群，分別為 3/4"~1/2"、1/2"~3/8"和 3/8"~#4，其物理性質列於表 3-11。由表中可發現，骨材粒徑越大其單位重未隨之降低，主要原因為燒結型輕質骨材物理特性與燒結條件的不同（如離粒性質、燒結溫度、使用窯爐構造及冷卻方式等）而有所變化，本研究各輕質骨材粒徑採用不同之燒結溫度，使得各粒徑骨材物理性質相異於參考文獻中具有相同燒結條件下，不同粒徑輕質骨材特性之比較趨勢。
5. 強塑劑：採用仲欣公司產品 HICON HPC 1000，符合美國 ASTM C494 TYPE-G 之規範，其性質如下：

顏色：深褐色 PH 值：7 ±1

比重：1.2 固體成分：42 ±2 %

6. 鋼筋：本研究採用#2、#3 與#6 的竹節鋼筋，其性質列於表 3-12。

第三節 輕質骨材混凝土的配比計算

由於輕質骨材具有高吸水率及低顆粒單位重之特性，且其強度小於天然骨材，此種與傳統骨材間的性質差異，將使輕質骨材混凝土無法依照常重混凝土配比計算方法設計。本研究以材料體積觀念進行輕質骨材混凝土之配比設計，並藉由輕質骨材混凝土試拌，測定新拌混凝土的坍度、單位重和混凝土的抗壓強度，以確立輕質骨材混凝土之配比。以下為輕質骨材混凝土配比設計步驟：

1. 測試材料性質

(a) 水泥比重： γ_c

(b) 各粒群輕質骨材的顆粒單位重(ρ_1, ρ_2, ρ_3)及 30mins 吸水率 ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)。

3/4"~1/2"： ρ_1 (kg/m^3)， $\omega_1\%$

1/2"~3/8"： ρ_2 (kg/m^3)， $\omega_2\%$

3/8"~#4： ρ_3 (kg/m^3)， $\omega_3\%$

(c) 天然砂比重 (S.S.D.)： γ_s

2. 設計步驟

Step1. 設計之條件之決定：

(a) 設計坍度

(b) 設計空氣含量：air %

(c) 粗骨材最大粒徑

Step2. 決定單位水泥用量：選定水泥用量 C (kg/m^3) 或水灰比。

Step3. 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_w (kg/m^3)。

Step4. 計算所需骨材材料體積：以絕對體積觀念計算骨材體積 V_a 。

$$V_a = 1000 - \left[\frac{C}{\gamma_c} + \frac{W_w}{1.0} + \text{air}(\%) \times 10 \right]$$

Step5. 決定砂率及各粒群輕質骨材用量比例：以符合 ASTM C330 結構用輕質骨材混凝土標準級配曲線要求 (表 3-13)，決定各粒群輕質骨材體積用量比例如下。另依 ACI 之建議決定天然細骨材之砂率 (S/A)。

3/4”~1/2”：體積用量為 a %

1/2”~3/8”：體積用量為 b %

3/8”~#4：體積用量為 c %

Step6. 計算各粒群輕質骨材的用量(LA₁、LA₂、LA₃)及 30mins 吸水量(W₁、W₂、W₃)。

$$3/4''\sim 1/2'' : LA_1 = V_a \times (1 - S/A) \times a \% \times \frac{\rho_1}{1000}, \quad W_1 = LA_1 \times \omega_1 \%$$

$$1/2''\sim 3/8'' : LA_2 = V_a \times (1 - S/A) \times b \% \times \frac{\rho_2}{1000}, \quad W_2 = LA_2 \times \omega_2 \%$$

$$3/8''\sim \#4 : LA_3 = V_a \times (1 - S/A) \times c \% \times \frac{\rho_3}{1000}, \quad W_3 = LA_3 \times \omega_3 \%$$

$$\Sigma W_{30mins} = W_1 + W_2 + W_3$$

Step7. 計算天然砂用量：W_S

$$W_S = V_a \times S/A \times \gamma_s$$

Step8. 設計新拌混凝土單位重：ρ

$$\rho = C + W_w + LA_1 + LA_2 + LA_3 + W_S + \Sigma W_{30mins}$$

混凝土的設計強度 (fc') 分為 20、40、60 MPa 三組，由上述計算得到到配比，再根據試拌結果加以調整，輕質骨材混凝土配比詳列於表 3-14，分別以 L20、L40、L60 代表之。常重混凝土之配比設計，也根據材料體積觀念配比計算，再由試拌結果加以調整，常重混凝土配比詳列於表 3-15，分別以 N20、N40、N60 代表之。

第四節 試體製作

輕質骨材混凝土拌合過程與常重混凝土之拌合過程大致上是一樣的，

兩者間最大的不同點，是在於輕質骨材拌合前之烘乾處理。因為輕質骨材之吸水率變化大且不穩定，在絕乾狀態下浸入水中，前 2 分鐘之瞬間吸水率約為達 24 小時吸水率之 25%至 30%，而 30 分鐘以後輕質骨材吸水已經小很多且吸水速率非常緩慢，故拌製輕質骨材混凝土時的用水量需額外再加入輕質骨材 30 分鐘的吸水量。

依前述規劃的各組試驗配比，採用強制式水平雙軸拌合機拌製混凝土，其拌合及程序如下：

1. 拌合前，先將輕質骨材烘乾 24 小時處理成絕乾狀態。將天然粗、細骨材處理成面乾內飽和狀態。
2. 將水泥及天然砂置入拌合機具內，充分乾拌以達均勻混合。
3. 將水與強塑劑水充份攪拌均勻後，倒入拌合機具內，拌合約 60~90 秒，使其成為水泥砂漿。
4. 最後將粗骨材倒入拌合機具內，拌合約 90~120 秒，即成新拌混凝土。

混凝土拌合完成後，部分試料做坍度，其餘澆置試體，分兩層灌模並以振動棒夯實之，輕質骨材混凝土在夯實時，要以適度為宜，避免振動過度導致輕質骨材上浮水泥砂漿下沉，而造成材料分離之現象。澆置完成後以帆布遮蓋，以防止混凝土中水份蒸發，除了無筋混凝土樑試體和鋼筋混凝土樑試體外其餘試體在澆置完成一天後拆模。全部試體均採用戶外養護，每天灑水並用帆布遮蓋，以保持濕潤狀態，如此進行至 7 天後停止灑水，然後無筋混凝土樑試體和鋼筋混凝土樑試體在 28 天拆模。

第五節 試驗設備

本研究所使用之主要設備包含：

1. 強制式水平雙軸拌合機。

2. 600 噸 MTS 萬能試驗機 (Material testing system) 及控制系統：用以施加鋼筋混凝土樑跨度中點之垂直載重。
3. 900KN 萬能試驗機：用以進行混凝土抗壓強度與彈性模數試驗以及握裹拉拔試驗。
4. 抗彎試驗機：用以進行混凝土的抗彎強度試驗。
5. 10mm LVDT (Linear variable differential transducer) 變位計：量測握裹試驗之鋼筋與混凝土間的滑移量，以及彈性模數試驗之圓柱試體的軸向變位。
6. 50mm LVDT (Linear variable differential transducer) 變位計：量測鋼筋混凝土樑跨度中央加載點之撓度。
7. 應力環：用以進行混凝土的彈性模數試驗，如照片 3-1 所示。
8. 資料接收器 (7V14M) 及筆記型電腦：用來接收萬能試驗機、荷重計、變位計之讀數，如照片 3-2 所示。
9. 傳力鋼棒：直徑 80 mm 之鋼棒，用以傳遞 MTS 萬能試驗機之載重於鋼筋混凝土樑上。
10. 支承：由直徑 80 mm 之鋼棒及厚 20 mm 之鋼板組成，在鋼筋混凝土樑之勁度試驗中做為試體的支承。

第六節 試驗方法

彈性模數、握裹試驗和鋼筋混凝土樑勁度試驗的載重施加及變位資料均由筆記型電腦同步讀取，並在每次試驗完成後即對該組之圓柱試體進行抗壓試驗。有關各項試驗方法如下：

1、握裹試驗

依 ASTM C234 規範試驗，進行混凝土試體的握裹試驗，試驗裝置如圖 3-8 所示，以 20 kg/sec 之拉拔速率施加载重於鋼筋上，並記錄載重與位移的讀數，直至試體破壞為止。

2、抗壓試驗

$\phi 100\text{mm}\times 200\text{mm}$ 之圓柱試體依 CNS 1232 「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」之規定進行抗壓試驗。抗壓試驗前應先將試體頂底兩面以磨平機磨平或以石膏將兩面蓋平，之後將圓柱試體的軸心置於萬能試驗機的承壓軸的正中心處，其加壓速率應保持在 1.3 mm/min，試驗至試體破壞為止，並記錄其所受之最大載重。

3、熱傳導係數試驗

熱傳導係數試驗是依照 CNS 7332 A3121 之規範所進行，試驗步驟簡述如下：

A、儀器裝設：

- (1) 將兩面塑膠墊片(0.5mm 厚)之中心位置貼妥錫箔紙熱量感應器。
- (2) 設定高溫及低溫熱源循環水箱，利用訊號線接至訊號放大器上。本次試驗高溫熱源設定為 80°C，低溫熱源系統設定為 50°C。
- (3) 將溫度控制水箱和自動紀錄器聯接。
- (4) 將熱傳導測儀溫箱中之熱流計與自動紀錄器連接。

B、試驗步驟：

- (1) 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) 開啟訊號放大器。
- (4) 將訊號放大器之 range 設定為 5mv。

- (5) 靜待 10 分鐘後調整使 channel 2 和 5 紀錄於 2.0mv 位置。
- (6) 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。
- (7) 待整個系統溫度穩定達平衡溫度時，打開紀錄器，量取測值。
- (8) 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-°C。

C、熱傳導係數之推算

根據上述試驗步驟，可自記錄器中得到 4 個數據分別為：

- (1) RECORDER(1): 記錄熱傳導試片下緣所感應之熱能，即 E1mv……
 $\theta_1^{\circ}C$ (根據 JIS C1602-1981)
- (2) RECORDER(4): 記錄熱傳導試片上緣所感應之熱能，即 E2mv……
 $\theta_2^{\circ}C$ (根據 JIS C1602-1981)。
- (3) RECORDER(2): 頂層高溫熱循環系統溫度，即 E3mv * ……
 $E3/K1=Q_1(Kcal/m^{2h})$ 。
- (4) RECORDER(5): 底層低溫熱循環系統溫度，即 E4mv * ……
 $E4/K2=Q_2(Kcal/m^{2h})$ 。
- (5) 將上述資料帶入式中運算，既可推求熱傳導係數 k ($kcal/m^{\circ}C.hr$)
- (6)
$$k = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \times \frac{T}{\theta_1 - \theta_2}$$
- (7) 式中 T 為熱傳導試片的厚度以 m 為單位

4、鋼筋混凝土樑之剪力試驗

本試驗共製作 48 根樑試體，輕質混凝土樑與常重混凝土樑各 24 根。探討之變數包括骨材種類、混凝土抗壓強度及剪跨比(集中荷載到臨近支承的距離 a 與樑截面有效深度 d 的比值)。混凝土的設計強度採用 20、40、60

MPa 三種，剪跨比分為 1.5、2.0、2.5 及 3.0 四種。試驗之裝置如圖 3-9 所示，所有樑試體樑跨度中央處架設位移計，加載以三分點載重方式進行靜態載重試驗。試體架設完成之實際情形，如照片 3-3 所示。試驗過程中，載重之施加以位移控制，加載速率為 0.02 mm/sec，約每秒自動記錄資料一次。記錄內容包括加載之載重值、衝程位移值、樑跨中央位移值，以求得加載過程中樑試體之載重-樑中央位移(P- Δ)關係曲線，衝程位移之最大值設定為 50 mm，於加載過程中，衝程位移達到該值時，試驗即停止。

表 3-1 握裹試體規劃與配比

輕質骨材混凝土				常重混凝土			
試體編號	設計 f _c (MPa)	箍筋距離 d (mm)	試體個數	試體編號	設計 f _c (MPa)	箍筋距離 d (mm)	試體個數
L20	20	30	2	N20	20	30	2
		45	2			45	2
		60	2			60	2
		無箍筋	2			無箍筋	2
L40	40	30	2	N40	40	30	2
		45	2			45	2
		60	2			60	2
		無箍筋	2			無箍筋	2
L60	60	30	2	N60	60	30	2
		45	2			45	2
		60	2			60	2
		無箍筋	2			無箍筋	2

表 3-1(續) 握裹試體的混凝土配比 (kg/m³)

LWAC	W/C	Cement	Water	Natural sand	LWA			S.P.	Absorption (30min)
					13 ~ 19 (mm)	9 ~ 13 (mm)	5 ~ 9 (mm)		
L20	0.65	297	194	734	179	213	175	0	29
L40	0.40	480	194	664	166	197	162	0	29
L60	0.26	580	151	760	0	207	277	19	19
Normal Concrete	W/C	Cement	Water	Natural sand	Coarse aggregate			S.P.	Absorption (30min)
N20	0.70	280	197	781	1056			0	—
N40	0.48	410	196	672	1056			0	—
N60	0.42	450	189	659	1056			4.5	—

※ L40 : Lightweight aggregate concrete at a 40 MPa strength level

※ N60 : Normal weight concrete at a 60 MPa strength level

※ S.P. : Superplasticity

表 3-2 混凝土構件及防火隔熱試驗規劃總表

		輕質混凝土			
試驗項目		剪力樑試驗	防火試驗		日曬試驗
			樑試驗	版試驗	
試驗變數	強度 (MPa)	20、40、60	20、40	20、40	--
	配筋	主筋：4 號筋 箍筋：無箍筋	主筋：4 號筋 箍筋：2 號筋	三號鋼筋網	
	剪跨比	2.0、2.5 3.0、3.5	--	--	
試體大小 (cm)		12*20*150	12*16*120	30*10*100	80*80*120
數量		12*2	4	4	1

		常重混凝土			
試驗項目		剪力樑試驗	防火試驗		日曬試驗
			樑試驗	版試驗	
試驗變數	強度 (MPa)	20、40、60	20、40	20、40	--
	配筋	主筋：4 號筋 箍筋：無箍筋	主筋：4 號筋 箍筋：2 號筋	三號鋼筋網	
	剪跨比	2.0、2.5 3.0、3.5	--	--	
試體大小 (cm)		12*20*150	12*16*120	30*10*100	80*80*120
數量		12*2	4	3	1

表 3-3 鋼筋混凝土樑試體規劃表

輕質骨材混凝土樑			常重混凝土樑		
試體 編號	設計 f_c' (MPa)	試體 個數	試體 編號	設計 f_c' (MPa)	試體 個數
LWAC20	20	2	NC20	20	2
LWAC40	40	2	NC40	40	2

表 3-4 抗壓試體規劃表

輕質骨材混凝土			常重混凝土		
試體 編號	設計 f_c (MPa)	試體 個數	試體 編號	設計 f_c (MPa)	試體 個數
L20	20	9	N20	20	9
L40	40	9	N40	40	9

表 3-5 鋼筋混凝土版試體

輕質骨材混凝土版			常重混凝土版		
試體 編號	設計 f_c' (MPa)	試體 個數	試體 編號	設計 f_c' (MPa)	試體 個數
LWAC20	20	2	NC20	20	2
LWAC40	40	2	NC40	40	1

表 3-6 熱傳導係數試體規劃表

輕質骨材混凝土樑			常重混凝土樑		
試體 編號	設計 f_c' (MPa)	試體 個數	試體 編號	設計 f_c' (MPa)	試體 個數
LWAC20	20	3	NC20	20	3
LWAC40	40	3	NC40	40	3

表 3-7 水泥之化學與物理性質

A. 化學性質		
項 目		含 量(%)
SiO ₂		20.90
Al ₂ O ₃		5.65
Fe ₂ O ₃		3.21
CaO		63.63
MgO		2.52
SO ₃		2.16
Na ₂ O		0.10
K ₂ O		0.52
C ₃ S		48.76
C ₂ S		23.14
C ₃ A		9.54
C ₄ AF		9.77
B. 物理性質		
比 重		3.15
細 度(m ² /kg)		344
燒 失 量(%)		0.92
不 溶 殘 渣		0.11
健 度		0.055
抗壓強度	7 天(kgf/cm ²)	362
	28 天(kgf/cm ²)	472

表 3-8 天然粗、細骨材之基本性質

	S.S.D. 比重	S.S.D. 吸水率(%)	乾搗單位重 (kg/m ³)	F.M.值
天然粗骨材	2.62	1.19	1544	—
天然細骨材	2.64	0.60	—	2.67

表 3-9 天然粗、細骨材之篩分析表

天然粗骨材			
篩號	留篩百分率(%)	累積留篩百分率 (%)	過篩百分率(%)
1"	0.00	0.00	100.00
3/4"	7.03	7.03	92.97
1/2"	45.39	52.42	47.58
3/8"	25.63	78.05	21.95
#4	20.45	98.50	1.50
Pan	1.50	100.00	0.00
天然細骨材			
篩號	留篩百分率(%)	累積留篩 百分率(%)	過篩百分率(%)
#4	0.42	0.42	99.58
#8	12.99	13.42	86.58
#16	16.62	30.04	69.96
#30	23.16	53.20	46.80
#50	24.39	77.59	22.41
#100	14.68	92.28	7.72
#200	5.59	97.87	2.13
Pan	2.13	100.00	0.00

表 3-10 石門水庫淤泥之化學性質

化學成分	百分比 (%)
SiO ₂	60.65
Al ₂ O ₃	20.47
CaO	1.12
MgO	1.62
SO ₃	0.07
Fe ₂ O ₃	6.56
K ₂ O	0.08
Na ₂ O	0.01
LOI	5.49
有機物	2.90
其他	3.93
總 和	100

表 3-11 輕質骨材之基本性質

粒 群	顆粒單位重 (kg/m ³)	30 min 吸水率(%)	24hr 吸水率(%)
3/4"~1/2"	1461	8.77	13.47
1/2"~3/8"	1304	3.13	7.76
3/8"~#4	1430	5.12	8.92

表 3-12 鋼筋之基本性質

鋼筋號數	標稱直徑 (mm)	標稱面積 (mm ²)	降伏強度 (MPa)	極限強度 (MPa)
#3	9.5	71	281	476
#4	12.7	127	283	482
#6	19	287	445	611

表 3-13 結構性輕質骨材混凝土之級配要求 (ASTM C330)

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

表 3-14 輕質骨材混凝土配比 (kg/m^3)

組別	水灰比	水泥	水量	輕質骨材 30 分鐘吸水量	天然 細骨材	水庫淤泥輕質骨材		強塑劑
						1/2"~3/8"	3/8~#4	
L20	0.65	269	175	28	757	261	262	3.50
L40	0.40	438	175	26	699	241	242	5.25
L60	0.28	580	163	24	663	228	230	6.96

註：試體編號 L 代表輕質骨材混凝土，後面的數字代表設計強度(20、40、60 MPa)

表 3-15 常重混凝土配比 (kg/m^3)

組別	水灰比	水泥	水量	天然 細骨材	粗骨材		強塑劑
					六分石	三分石	
N20	0.70	250	175	836	535	535	2.50
N40	0.48	365	175	738	535	535	3.65
N60	0.42	417	175	693	0	1069	4.17

註：試體編號 N 代表常重混凝土，後面的數字代表設計強度(20、40、60 MPa)

圖 3-1 握裹試體示意圖

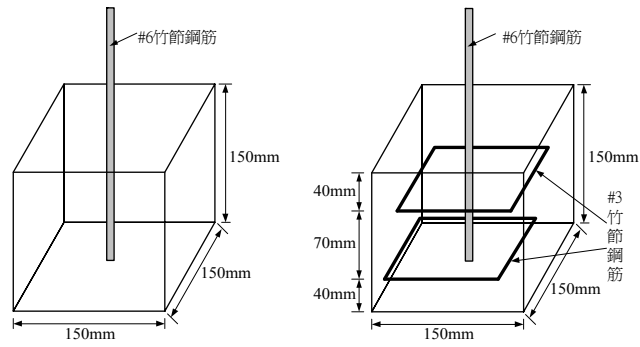


圖 3-2 有加箍筋的握裹試體平面圖

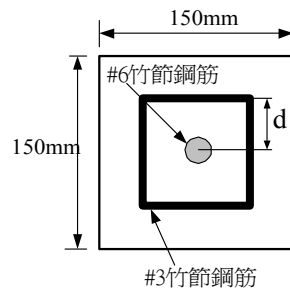


圖 3-3 剪力試驗樑

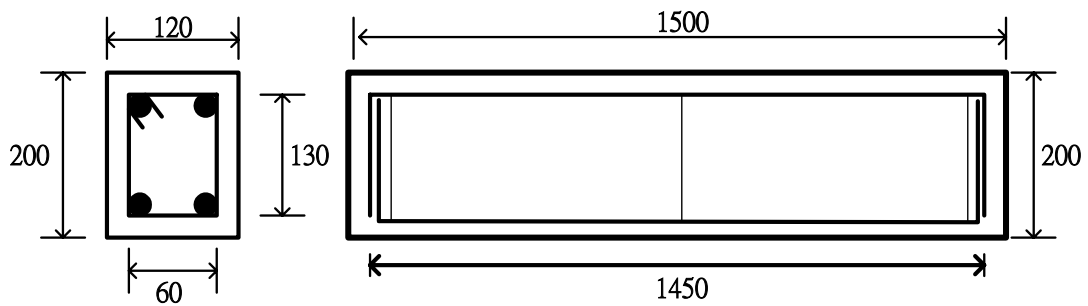


圖 3-4 極限彎矩作用下構件的壓應力分佈情形

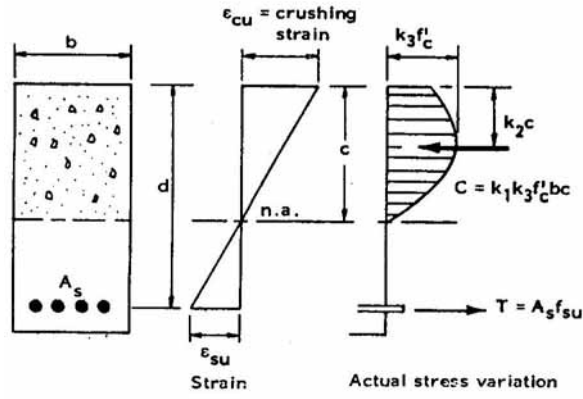


圖 3-5 防火試驗樑

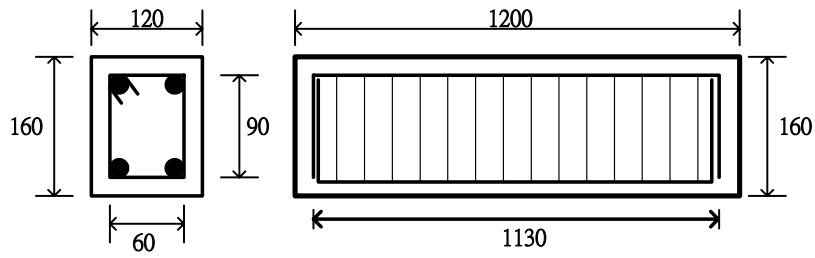


圖 3-6 防火試驗版試體

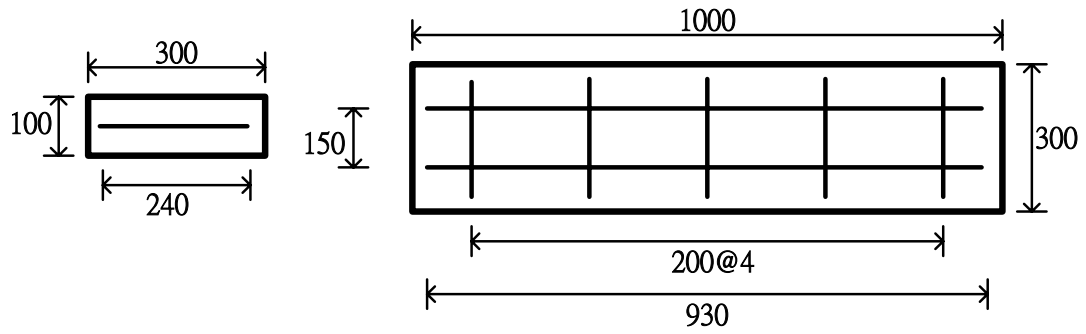


圖 3-7 混凝土牆體密閉空間日曬試驗

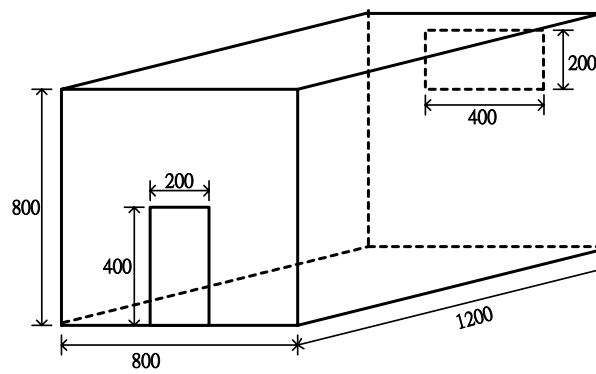


圖 3-8 握裹試驗裝置示意圖

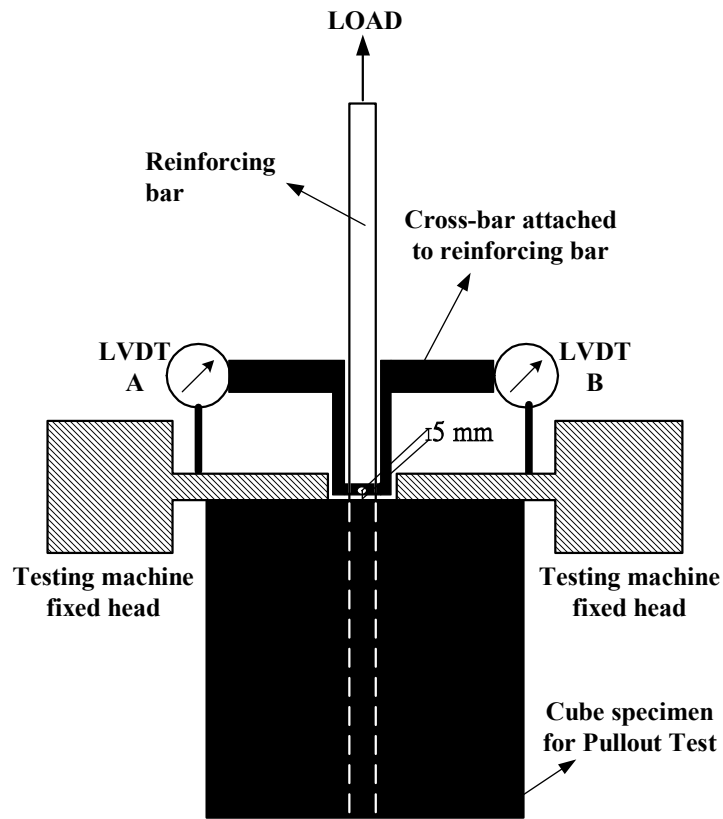
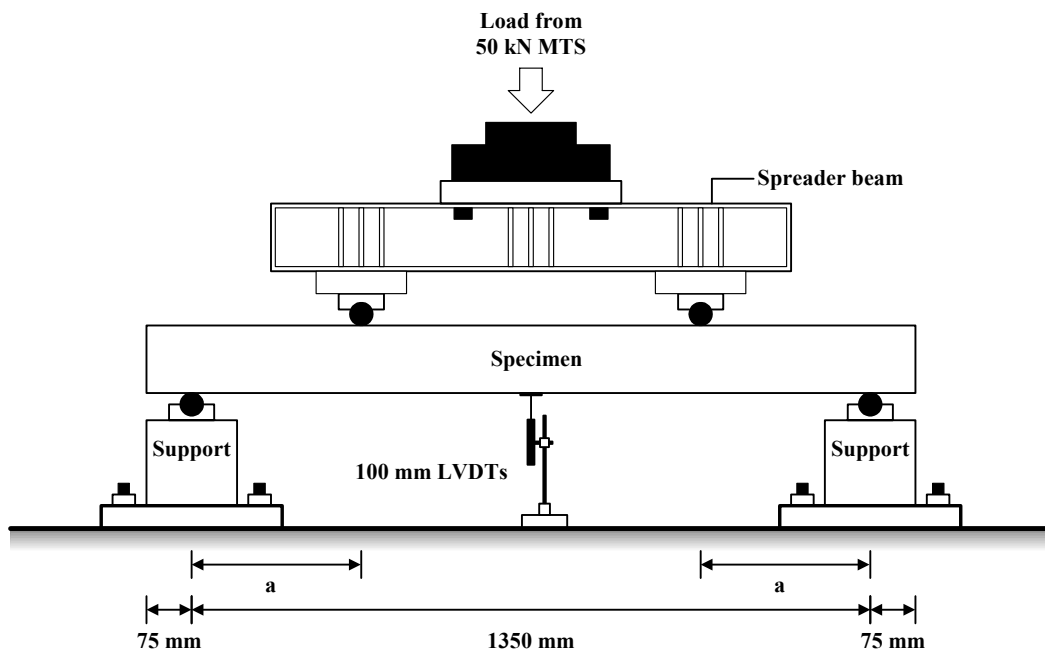


圖 3-9 鋼筋混凝土樑之剪力試驗安裝圖



照片 3-1 應力環



照片 3-2 資料接收器 (7V14M) 及筆記型電腦



照片 3-3 鋼筋混凝土樑之剪力試驗裝置



第四章 輕質骨材混凝土之工程性質探討

本章將針對輕質骨材混凝土之力學性質以及構件行為進行探討，包含伸展長度、樑之剪力強度，以及等值矩型應力塊參數等，各試驗之結果分析與討論如下。

第一節 輕質骨材混凝土之握裹強度

本試驗依照 ASTM C234 規範試驗，其試驗的試體分為加入箍筋及沒有加入箍筋兩種試體；無箍筋的試體與一般之標準試體相同，加入箍筋的試體，其安置的方式如圖 3-1，每種不同箍筋大小之試樣，分別製作 3 個輕質骨材混凝土試體與 3 個常重混凝土試體，以進行拉拔試驗。針對單一鋼筋在常重混凝土與輕質骨材混凝土兩種不同材料中，對於有無置入箍筋之試體的破壞情況、握裹強度等加以比較及探討。混凝土的設計強度採用 20、40、60 MPa 三種，而實測的混凝土抗壓強度整理成表 4-1，其 28 天抗壓強度接近於設計強度，然而，對於 60 MPa 的混凝土而言，其實測強度僅略高於 50 MPa，尚未達到設計強度的標準，顯示以本試驗所採用的水庫淤泥輕質骨材，不易拌製得高強度之輕質骨材混凝土。

各組試體握裹試驗結果彙整於表 4-2，由表中可知，對於沒有添加箍筋的混凝土試體而言，其極限滑移量為 0.60 mm 到 2.32 mm，而極限握裹應力則為 9.0~16.5 MPa；對於添加箍筋的混凝土試體而言，其極限滑移量為 1.00 mm 到 6.83 mm，極限握裹應力則為 12.1~20.7 MPa。至於輕質骨材與常重骨材混凝土握裹行為之差異，以下再針對握裹破壞型式、握裹應力-滑移曲線、混凝土的抗壓強度對握裹強度之影響等幾部分加以討論如下：

1、握裹破壞型式

一般拉拔的破壞模式分為側向劈裂與滑動握裹破壞兩種破壞模式，如照片 4-1 所示。側向劈裂破壞模式主要是由於受拉鋼筋為竹節鋼筋時，鋼筋竹節會導致垂直於受拉鋼筋軸向的剪力，此剪力平行於鋼筋直徑方向定義

為“徑向力”。徑向力會造成鋼筋周圍混凝土向外開裂，進而無法繼續傳遞軸向的握裹力，造成的破壞是為劈裂破壞（照片 4-1(a)）；若在混凝土開裂前，與鋼筋接觸面之混凝土遭到剪碎而使鋼筋產生大的鬆動而鬆動，即所謂的滑動握裹破壞（照片 4-1(b)）。試驗結果顯示，沒有添加箍筋之標準試體，不論常重與輕質骨材混凝土，其握裹破壞模式皆為混凝土側向劈裂破壞，而輕質骨材混凝土與常重混凝土破壞模式的差異主要在於，輕質骨材混凝土不論高低強度皆為裂縫貫穿骨材並繼續延伸而發生破壞，因而混凝土破壞的表面較為平整如照片 4-2，但低強度常重混凝土，混凝土破壞表面大多沿著骨材表面，使得混凝土破壞面較為凹凸不平。高強度常重混凝土因承受較大應力，常重骨材如輕質骨材般被剪破，與輕質混凝土的破壞情況相近。由以上混凝土的握裹破壞型式可知，輕質骨材混凝土與常重混凝土握裹破壞的差異，和抗壓強度破壞模式相類似，這結果驗證 ASTM 規範中，以拉拔試驗評估混凝土品質的可行性。但是有加入箍筋的混凝土試體，除了箍筋距離較大之 60 mm 組的試體表面有徑向發展的裂紋外，其餘置有箍筋的試體，均為鋼筋與混凝土發生滑動鬆脫，導致無法再承受更大的拉力。所以混凝土內加入箍筋後，握裹試體之破壞將趨向於滑動握裹破壞。

2、握裹應力-滑移曲線

Mathey 和 Watstein[71]兩位學者提出以鋼筋相對混凝土滑動 0.01 in.時所對應之握裹強度為臨界握裹強度（critical bond strength），此臨界握裹強度主要是與化學黏結力有關。當握裹強度達到臨界握裹強度時，鋼筋與混凝土間尚未完全破壞，仍可繼續抵抗外來之拉力，直至完全破壞時之握裹強度統稱為標稱握裹強度，試體由握裹應力—滑移圖，可獲得臨界握裹強度及標稱握裹強度。

圖 4-1 為輕質骨材混凝土與常重混凝土試體的握裹應力-滑移曲線圖，由圖中可觀察知，輕質骨材混凝土與常重混凝土的握裹應力-滑移曲線相近，並沒有明顯的差異點存在，反倒與混凝土的強度相關。在抗壓强度高於 40 MPa 的混凝土，各組試體的握裹應力-滑移曲線都有明顯的降伏點，其平均握裹應力約為 13 MPa，此降伏點發生於鋼筋的降伏點（420 MPa）

附近，在鋼筋降伏後，鋼筋的變形增大，連帶也使得混凝土握裹試體的滑移量變大。而 20MPa 強度的混凝土，其握裹應力-滑移曲線則沒有降伏點即破壞，其原因在於鋼筋尚未達到降伏點前，混凝土試體即發生握裹破壞，此時的握裹滑移量主要為混凝土的變形。

3、箍筋距離對握裹強度之影響

此“箍筋距離”定義為箍筋中心至受拉鋼筋中心之最小間距。由圖 4-2 的試驗結果顯示，不論常重混凝土或輕質骨材混凝土的臨界握裹強度，在加入箍筋後，其臨界握裹強度的增量甚小，可能之原因為臨界握裹強度主要與受拉鋼筋和混凝土間的化學黏結力較有關，而加入箍筋並沒有增加受拉鋼筋與混凝土間的化學黏結力，因而不論箍筋距離之大小，加入箍筋對臨界握裹強度影響不大，然而對於標稱握裹強度而言，則影響較為明顯，如圖 4-3 所示。常重與輕質骨材混凝土在加入箍筋後的標稱握裹強度，皆比未加入箍筋之標稱握裹強度平均高出 20%，此一結果表示加入箍筋後，箍筋會產生混凝土之圍束效應，使得混凝土較不易變形，因此能抵抗較高之應力，產生較大的握裹強度，且在混凝土中的箍筋，亦分擔了混凝土部分之徑向力，使得裂縫不易向外發展，這可能導致加入箍筋試體的握裹破壞模式，偏向滑動握裹破壞。

4、混凝土的抗壓強度對握裹強度之影響

圖 4-4 及圖 4-5 中每點均為三次相同試驗的平均值。由圖 4-4、4-5 顯示，輕質骨材混凝土在較低混凝土抗壓強度 (<40 MPa) 時，其臨界握裹強度與標稱握裹強度都較常重混凝土來的低，但是到中等混凝土抗壓強度 (\approx 40 MPa) 時，輕質骨材混凝土的臨界握裹強度與標稱握裹強度相若於常重混凝土，至較高混凝土抗壓強度時輕質混凝土握裹強度要比常重混凝土來得高一些。由以上分析結果可知，高強度 (>40 MPa) 輕質骨材混凝土的握裹強度並不比相同抗壓強度等級之常重混凝土來得遜色，甚至更優於常重混凝土。

土。

再由圖 4-6 觀察得知，低混凝土抗壓強度 (<40 MPa) 時，常重混凝土每單位混凝土抗壓強度能提供的標稱握裹強度比輕質骨材混凝土來得高，然而混凝土抗壓強度中等以上 (≥ 40 MPa) 時，輕質骨材混凝土與常重混凝土相近，甚至輕質骨材混凝土會比常重混凝土來得好。由破壞情況來看，輕質骨材混凝土不論高低之混凝土抗壓強度，輕質骨材混凝土中的輕質骨材皆有被剪壞之情形，可見輕質骨材提供的握裹支承力較差，所以輕質骨材混凝土之握裹破壞因子主要控制於水泥砂漿母體。常重混凝土之握裹破壞情形相較不同，在低混凝土抗壓強度時混凝土的破壞面骨材並未破壞，其骨材相對輕質骨材能夠提供較高的支承力，因而提升了整體的握裹強度，但在高混凝土抗壓強度時常重混凝土之破壞情況與輕質骨材混凝土頗為相似，無論常重或輕質骨材皆被剪壞，骨材所能提供之支承力相對較小，所以兩者的握裹破壞的主要控制因子同為水泥砂漿母體，而在相同的混凝土抗壓強度下，輕質骨材混凝土所採用的水灰比較低，亦即代表其水泥漿強度要比常重混凝土的水泥砂漿強度來的高，因此在高混凝土抗壓強度時，輕質骨材混凝土之水泥砂漿能提供較高之支承力，致使輕質骨材混凝土的握裹強度要優於常重混凝土，其結果可示意如圖 4-7。

第二節 輕質骨材混凝土樑之剪力試驗

本試驗共製作 48 根樑試體，輕質混凝土樑與常重混凝土樑各 24 根。探討之變數包括骨材種類、混凝土抗壓強度及剪跨比(集中荷載到臨近支承的距離 a 與樑截面有效深度 d 的比值)。混凝土的設計強度採用 20、40、60 MPa 三種，剪跨比分為 1.5、2.0、2.5 及 3.0 四種。各組試體剪力強度試驗結果及 ACI code 理論值彙整於表 4-3。L20 試體極限剪力強度隨剪力比變化之範圍介於 21.00~75.15 kN，L40 試體介於 30.86~82.50 kN，L60 試體介於 40.20~90.00 kN；N20 試體介於 22.35~76.54 kN，N40 試體介於 28.91~82.78 kN，N60 試體介於 40.95~95.37 kN。由表中數據可大致觀察出，極限剪力

強度有隨剪跨比之降低、抗壓強度之增加而增加之趨勢。表中 ACI code 對同時承受剪力及彎矩之構件，其混凝土剪力強度(V_C)之計算方式，如 4-1 式所示：

$$V_C = (0.5\sqrt{fc'} + 175\rho_w \frac{V_u d}{M_u})b_w d \leq 0.93\sqrt{fc'}b_w d \quad (\text{kg}) \quad (4-1)$$

式中， fc' —混凝土抗壓強度(kg/cm^2)， ρ_w —拉力鋼筋比， V_u —設計剪力， M_u —設計彎矩。公式中影響混凝土剪力強度之參數，包括混凝土強度($\sqrt{fc'}$)、拉力筋之貢獻(ρ_w)以及剪跨比($\frac{V_u d}{M_u} = \frac{V_u d}{V_u a} = \frac{d}{a}$)。

由表中可看出，ACI code 理論值較輕質混凝土樑及常重混凝土樑試驗值小，與輕質混凝土樑剪力強度比值($V_{C,LC}/V_{C,ACI}$)介於 1.49~5.25，而與常重混凝土樑剪力強度比值($V_{C,NC}/V_{C,ACI}$)介於 1.46~5.35。此外，ACI code 理論值於不同剪跨比之變化很小，由 $a/d=3.0$ 降至 $a/d=1.5$ ，剪力強度計算值增加不到 1%。由於剪跨比小之構件須承擔較高之剪力，顯示 ACI code 對於剪跨比較小之構件相當保守，此因構件之破壞模式趨於急速且無預警，故賦予較高之安全係數。

以下根據各組試體試驗結果，針對其破壞模式、剪跨比及混凝土的抗壓強度對混凝土剪力強度之影響進行討論，並就輕質混凝土樑與常重混凝土樑剪力破壞行為之差異加以比較。

1、試體破壞模式

各組樑試體剪力試驗結果之 P- Δ 關係曲線，如圖 4-8 至圖 4-10(輕質混凝土樑)及圖 4-11 至圖 4-13(常重混凝土樑)所示。由圖可看出，輕質混凝土樑破壞之趨勢與常重混凝土樑相似，於加載初期線性階段，P- Δ 曲線於低剪跨比具有較高的斜率，達到極限剪力強度後，樑試體之承载力會急劇降低而破壞(如照片 4-3 及照片 4-4， $a/d=1.5$)。隨著剪跨比的增加，初期 P- Δ 曲線之斜率較小，可達之剪力強度亦降低，破壞時承载力之降低趨於和緩。此表示樑試體之破壞模式由剪力破壞逐漸趨近撓曲破壞。但本試驗之樑試體僅配置#2 主筋，均無剪力筋，而主筋所能提供之剪力很小可忽略，剪力

幾乎完全由混凝土承擔，於加載點至支承點區域，皆會產生剪力裂縫，於較高之剪跨比時，才會於試體中央附近產生較大之撓曲裂縫(如照片 4-5 及照片 4-6, $a/d=1.5$)，但整個樑試體之破壞模式仍以剪力破壞為主。此外，由於輕質混凝土相較於常重混凝土具有較低之彈性模數，使輕質混凝土樑試體之勁度較低，因而加載初期 P- Δ 曲線線性階段之斜率略低於常重混凝土樑，但並未明顯延緩極剪力限強度之位移值，可能與輕質混凝土本身之破裂特性有關。

2、剪跨比對極限剪力強度之影響

剪跨比對樑試體極限剪力強度之影響，如圖 4-14(輕質混凝土樑)及圖 4-15(常重混凝土樑)所示。圖中顯示，輕質混凝土樑與常重混凝土樑具有相同之趨勢，樑試體剪力強度會隨剪跨比之降低而大幅增加，而對於不同強度等級之樑試體，其剪力強度隨剪跨比降低而增加之幅度(圖中線性回歸曲線之斜率)幾乎相同(斜率 $\cong -33$)，表示剪跨比對極限剪力強度之曲線斜率，主要來自於樑本身之試體尺寸，而與混凝土之種類及強度等特性並無明顯之關聯。

由於本試驗之樑試體均無配置剪力筋，故樑試體之剪力強度幾乎完全由混凝土所提供(即 $V_n=V_c$)，樑試體之破壞模式皆以剪力破壞為主，故一般鋼筋混凝土樑試體皆會配置剪力筋以提高剪力強度，使樑試體之破壞模式以撓曲破壞為主，避免產生無預警之剪力破壞模式。而對於配置剪力筋樑試體之破壞模式，亦可由圖 4-14 及圖 4-15 之曲線預估。圖中是以間距 10 cm 之 #3 剪力筋($V_s=65.84$ kN)為例，於虛線右側表示混凝土之剪力強度小於剪力筋強度($V_c < V_s$)，即剪力筋可承擔樑試體大部分之剪力，因此樑試體之破壞模式為撓曲破壞；而虛線左側表示混凝土之剪力剪強度高於剪力筋強度($V_c > V_s$)，即剪力筋無法完全承擔樑試體所受之剪力，其餘剪力將由混凝土所提供，而樑試體之破壞模式則會以剪力破壞為主。如圖 4-14 所示，輕質混凝土樑之剪跨比臨界值，約介於 1.51~2.20。而如圖 4-15，常重混凝土樑剪跨比臨界值，約介於 1.52~2.20，相較於輕質混凝土樑無明顯之差異。

3、混凝土抗壓強度對極限剪力強度之影響

如圖 4-16(輕質混凝土樑)及圖 4-17(常重混凝土樑)所示，樑試體之極限剪力強度會隨混凝土抗壓強度之增加而提升。由於剪力破壞之發生是樑試體承受剪力時，斜拉應力所造成之斜裂縫，尤其對於無腹筋樑而言，剪力強度之大小完全取決於混凝土本身抗拉強度之大小，一般混凝土之抗拉強度與 $\sqrt{f_c'}$ 成正比例之關係，故混凝土之抗壓強度愈高，抗拉強度亦隨之增加。

從 4-1 公式可知，ACI code 對於一般混凝土樑試體剪力強度(V_C) 之計算與 $\sqrt{f_c'}$ 成正比，ACI code 亦建議可以用 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 來計算剪力強度(V_C)。本研究即針對輕質骨材混凝土進行劈裂強度試驗，進而評估輕質骨材混凝土以 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 計算剪力強度(V_C)之適用性。試驗結果如表 4-4 所示，其結果顯示，對於相同強度等級之混凝土，輕質混凝土圓柱試體的 $f_{ct}/6.7$ 與 $\sqrt{f_c'}$ 比值，高低強度混凝土均介於 0.75~0.77 之間，意味著採用劈裂強度(f_{ct})預估輕質混凝土之剪力強度是為保守可行。對應至剪力樑試驗之結果，對於相同強度等級之混凝土，大部分輕質混凝土樑若採用 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 估計所得之剪力強度值將更低於實際之試驗強度，與常重混凝土樑之剪力強度計算公式所得比較，ACI 對輕質混凝土樑之剪力計算建議是保守可行的。

第三節 輕質骨材混凝土樑等值矩形應力塊參數

本試驗由圓柱試體之抗壓試驗中獲得混凝土之應力應變曲線如圖 3-18 所示，由圖中可知輕質混凝土的應力應變曲線較趨近於直線，尤其是強度較高者（40 MPa）更為明顯，且在應力值達尖峰值之後直線斜率則增大，反觀常重混凝土曲線較趨近於拋物線形。由圖中亦可發現，在相同強度等級之輕質混凝土彈性模數要低於常重混凝土，然而其極限應變則為常重混凝土者 1.2~1.4 倍，由此可知輕質混凝土樑之撓曲勁度將小於常重混凝土者，但其延展性則較優於常重混凝土者。

本試驗由圓柱試體之抗壓試驗中獲得混凝土之應力應變曲線，間接來

推求相同尺寸斷面單筋樑之等值矩形應力應變塊參數。將尖峰後段應力急速下降時之應變為極限應變（該應變大小視為中性軸之深度），並假設最大應力與圓柱試體強度相等（即參數 $K_3=1.0$ ），可間接求得之等值矩形應力應變塊參數如表 4-5 所示。20 MPa 等級常重混凝土之 K_1 與 K_2 值分別為 0.74、0.41，與 ACI 規範規定之 0.72 及 0.425 相當接近，強度為 40 MPa 等級之 K_1 與 K_2 值分別為 0.67、0.39，也趨近於 ACI 規範之 0.64、0.375 值。其主要的原因是 ACI 規範所使用之極限應變為 0.003，本實驗中乃採用之極限應變值高於 0.003，因此他們的 K_1 略大於規範值，但 K_2 則無明顯不同於規範值，不同混凝土強度之等值應力塊深度參數（ $\beta = 2*k_2$ ）試驗值相近於規範的 0.85 及 0.75 要求。

20 MPa 強度等級輕質混凝土之 K_1 與 K_2 值分別為 0.68、0.38，計算之等值應力塊深度參數 β 約為 0.77，高於 PCA（卜特蘭水泥協會）對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β （0.76），當輕質混凝土強度高達 40 MPa 時，計算所得之等值應力塊深度參數 β 約為 0.73，乃高於 PCA 對輕質混凝土建議值 0.70，由此可知，PCA 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β 尚屬保守可行，不需對輕質混凝土做特別的修正。

第四節 輕質骨材混凝土相關設計規範之檢討

1、輕質骨材混凝土的鋼筋伸展長度

在 ACI 規範中，輕質混凝土內之受拉竹節鋼筋與麻面鋼線等之基本伸展長度均要修正，以反應輕質和常重混凝土間之差異，修正因數為：

(a) 當 f_{ct} 已知時，修正因數 $= \frac{1.8\sqrt{f'_c}}{f_{ct}} \geq 1.0$ 。

(b) 當 f_{ct} 未知時，修正因數 $= 1.3$ 。

由第一節的試驗結果得知，輕質骨材混凝土在較低混凝土抗壓強度（<40 MPa）時，其標稱握裹強度較常重混凝土來的低，但是到中等混凝土

土抗壓強度（ ≈ 40 MPa）時，輕質骨材混凝土的標稱握裹強度相若於常重混凝土，至較高抗壓強度時，輕質混凝土握裹強度要比常重混凝土來得高一些。

因此在 ACI 規範中，輕質混凝土內之受拉竹節鋼筋與麻面鋼線等之基本伸展長度的修正因數為 1.3 顯得略微保守，尤其在中高強度時，輕質骨材混凝土內與鋼筋之伸展長度可採用 ACI 常重混凝土的公式，而不需修正之。

2、輕質骨材混凝土樑的剪力強度

ACI 規範對同時承受剪力及彎矩之構件，其混凝土剪力強度(V_C)之計算方式，如公式 4-1 所示。

$$V_C = (0.5\sqrt{f_c'} + 175\rho_w \frac{V_u d}{M_u})b_w d \leq 0.93\sqrt{f_c'}b_w d \quad (\text{kg}) \quad (4-1)$$

從 4-1 公式可知，ACI 規範對於一般混凝土樑試體剪力強度(V_C)之計算與 $\sqrt{f_c'}$ 成正比，ACI 規範亦建議可以用 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 來計算剪力強度(V_C)。本研究針對輕質骨材混凝土以 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 計算剪力強度(V_C)之適用性進行評估，試驗顯示對於相同強度等級之混凝土，輕質混凝土圓柱試體的 $f_{ct}/6.7$ 與 $\sqrt{f_c'}$ 比值，高低強度混凝土的比值均介於 0.75~0.77 之間，意味著採用劈裂強度(f_{ct})預估輕質混凝土之剪力強度是為保守可行。

對應至剪力樑試驗之結果，ACI 規範計算剪力強度與輕質混凝土樑試驗剪力強度比值($V_{C,LC}/V_{C,ACI}$)介於 1.49~5.25，而與常重混凝土樑剪力強度比值($V_{C,NC}/V_{C,ACI}$)介於 1.46~5.35，ACI 規範計算剪力值較輕質混凝土樑及常重混凝土樑試驗值小，顯示 ACI 規範對輕質與常重混凝土之剪力強度評估均採較大的安全係數。對於相同強度等級之混凝土，大部分輕質混凝土樑若採用 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 估計所得之剪力強度值將更低於實際之試驗強度，與常重混凝土樑之剪力強度計算公式所得比較，ACI 對輕質混凝土樑之剪力計算建議是保守可行的。

3、輕質骨材混凝土樑等值矩形應力應變塊參數

等值矩形應力應變塊參數試驗結果顯示，20 MPa 等級常重混凝土之 K_1 與 K_2 值分別為 0.74、0.41，與 ACI 規範規定之 0.72 及 0.425 相當接近，強度為 40 MPa 等級之 K_1 與 K_2 值分別為 0.67、0.39，也趨近於 ACI 規範之 0.64、0.375 值，也使得其等值應力塊深度參數 ($\beta = 2 \cdot k_2$) 相近於規範的 0.85 及 0.75 要求。

20 MPa 強度等級輕質混凝土之 K_1 與 K_2 值分別為 0.68、0.38，計算之等值應力塊深度參數 β 約為 0.77，高於 PCA (卜特蘭水泥協會) 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β (0.76)，當輕質混凝土強度高達 40 MPa 時，計算所得之等值應力塊深度參數 β 約為 0.73，高於 PCA 對輕質混凝土建議值 0.70，由此可知，PCA 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β 尚屬保守可行，不需對輕質混凝土做特別的修正。

表 4-1 握裹試體的抗壓試驗結果

齡期 (天)	20 MPa level		40 MPa level		60 MPa level	
	LC20 (MPa)	NC20 (MPa)	LC40 (MPa)	NC40 (MPa)	LC60 (MPa)	NC60 (MPa)
7	19.6	19.5	39.9	37.8	43.3	45.3
	23.1 (21.7)	19.1 (20.0)	39.8 (39.6)	41.3 (39.4)	45.4 (44.3)	43.5 (44.7)
	22.5	21.5	38.9	39.2	44.3	45.4
28	26.9	24.6	43.2	44.0	51.9	52.4
	27.5 (27.4)	23.7 (23.1)	44.6 (43.5)	44.6 (43.7)	52.0 (51.9)	54.0 (53.8)
	27.8	22.4	42.9	42.9	-	54.9

註：括弧內為平均值

表 4-2 握裹試驗結果

試體編號	箍筋距離 d (mm)	臨界握裹強度 (MPa)	極限握裹強度 (MPa)	滑移量 (mm)	破壞型式
L20	30	6.1	12.6	1.46	P
	45	6.3	12.1	1.37	P
	60	6.1	11.8	1.20	S
	∞*	5.9	9.0	0.60	S
L40	30	7.8	18.3	5.22	P
	45	7.5	18.0	4.77	P
	60	8.1	17.6	3.29	S
	∞	7.4	14.8	1.85	S
L60	30	11.4	20.7	5.14	P
	45	10.7	20.2	6.85	P
	60	10.5	19.9	5.98	S
	∞	10.4	16.5	2.32	S
N20	30	7.0	12.9	1.62	P
	45	7.3	12.8	1.45	P
	60	7.3	12.6	1.30	S
	∞	6.6	10.1	0.87	S
N40	30	8.3	17.7	4.17	P
	45	7.9	17.3	5.16	P
	60	8.1	17.6	4.56	S
	∞	7.6	14.4	2.14	S
N60	30	10.4	19.7	6.53	P
	45	9.9	19.4	6.33	P
	60	10.6	19.6	6.10	S
	∞	9.8	15.9	2.24	S

註：1. 箍筋距離∞代表沒有放箍筋

2. 破壞型式 P 代表滑動握裹破壞；S 代表側向劈裂破壞

表 4-3 剪力強度試驗結果及 ACI code 理論值比較

a/d	P_u (kN)				$V_C(=V_n=Pu/2)$ (kN)				$V_{C,ACI}$ (kN)	$V_{C,LC}/V_{C,ACI}$	$V_{C,NC}/V_{C,ACI}$
1.5	L20	150.30	N20	153.08	L20	75.15	N20	76.54	14.32	4.72	5.05
		135.27		144.65		67.64		72.33		5.25	5.35
	L40	165.00	N40	165.56	L40	82.50	N40	82.78	20.06	4.11	3.68
		159.00		147.82		79.50		73.91		3.96	4.13
	L60	180.00	N60	190.74	L60	90.00	N60	95.37	24.46	3.52	3.90
		172.00		178.40		86.00		89.20		3.68	3.65
2.0	L20	99.00	N20	112.61	L20	49.50	N20	56.31	14.20	3.49	3.96
		89.10		108.92		44.55		54.46		3.14	3.83
	L40	114.40	N40	131.02	L40	57.20	N40	65.51	19.94	2.87	2.91
		109.00		116.15		54.50		58.08		2.73	3.29
	L60	152.71	N60	147.60	L60	76.36	N60	73.80	24.35	3.14	3.03
		141.40		140.12		70.70		70.06		2.90	2.88
2.5	L20	69.00	N20	83.00	L20	34.50	N20	41.50	14.13	2.33	2.94
		66.00		79.49		33.00		39.75		2.44	2.81
	L40	83.67	N40	89.60	L40	41.84	N40	44.80	19.87	2.11	2.03
		83.00		80.84		41.50		40.42		2.09	2.25
	L60	99.66	N60	99.00	L60	49.83	N60	49.50	24.28	2.05	2.04
		91.00		92.00		45.50		46.00		1.87	1.89
3.0	L20	44.00	N20	45.83	L20	22.00	N20	22.92	14.09	1.49	1.63
		42.00		44.70		21.00		22.35		1.56	1.59
	L40	63.34	N40	62.00	L40	31.67	N40	31.00	19.83	1.60	1.46
		61.72		57.81		30.86		28.91		1.56	1.56
	L60	82.49	N60	86.95	L60	41.25	N60	43.48	24.23	1.70	1.69
		80.40		81.90		40.20		40.95		1.66	1.79

表 4-4 平均劈裂強度與抗壓強度平方根之比值

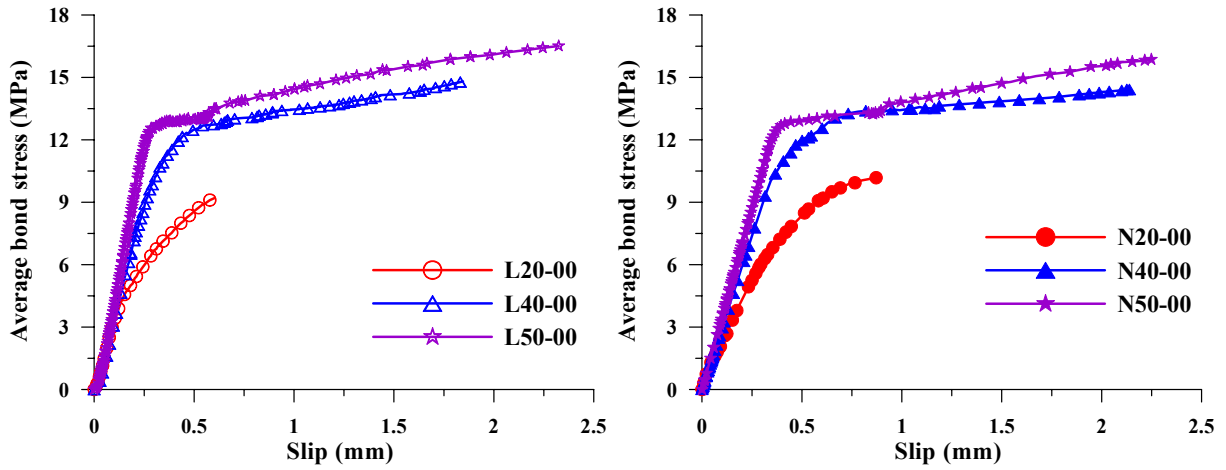
	劈裂載重 (kgf)	劈裂強度 (psi)	$\frac{f_{ct}}{6.7}$	平均抗壓 強度 f_c (psi)	平均抗壓強 度平方根 $\sqrt{f'_c}$	$\frac{f_{ct}}{6.7} / \sqrt{f'_c}$
L20	6558	297	44.27	3183	56	0.77
	6413	290	43.30			
	6413	290	43.30			
L40	8279	374	55.89	6011	78	0.75
	8644	391	58.36			
	8808	398	59.46			
N20	7913	358	53.43	3453	59	0.95
	8375	379	56.54			
	8596	389	58.04			
N40	10413	471	70.30	5855	77	0.94
	11202	507	75.63			
	10490	475	70.82			

表 4-5 等值矩形應力應變塊參數計算值

		N20	N40	L20	L40
最大應力時	應力	243	412	224	423
	應變	0.0041	0.0033	0.0049	0.0034
最大應變		0.006990	0.003389	0.007000	0.004580
K1		0.74	0.67	0.68	0.61
K2		0.41	0.39	0.38	0.37
K3		1.00	1.00	1.00	1.00

圖 4-1 握裹應力-滑移曲線

(a) 無箍筋試體



(b) 有箍筋試體 (箍筋距離 $d=30$ mm)

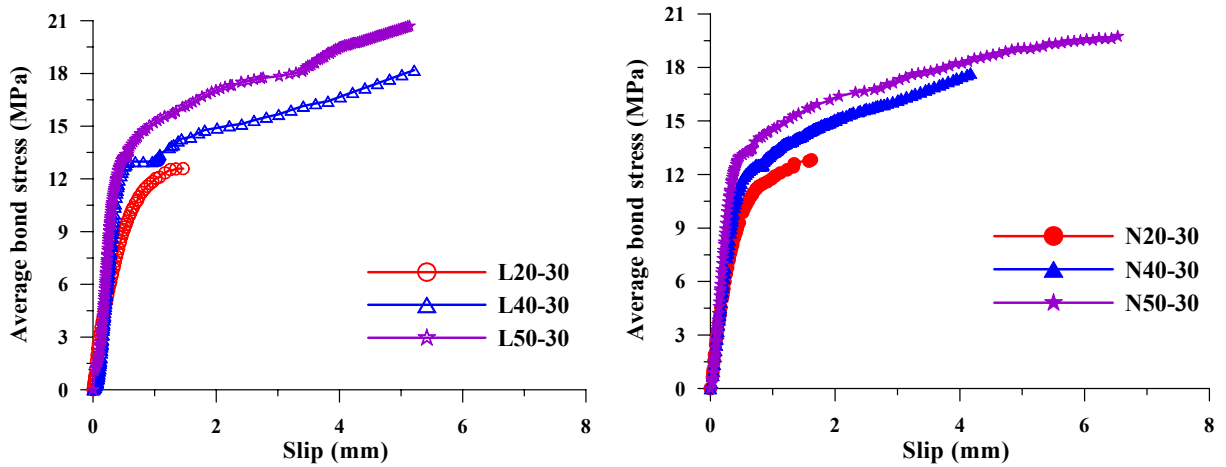


圖 4-2 臨界握裹強度與箍筋距離之關係

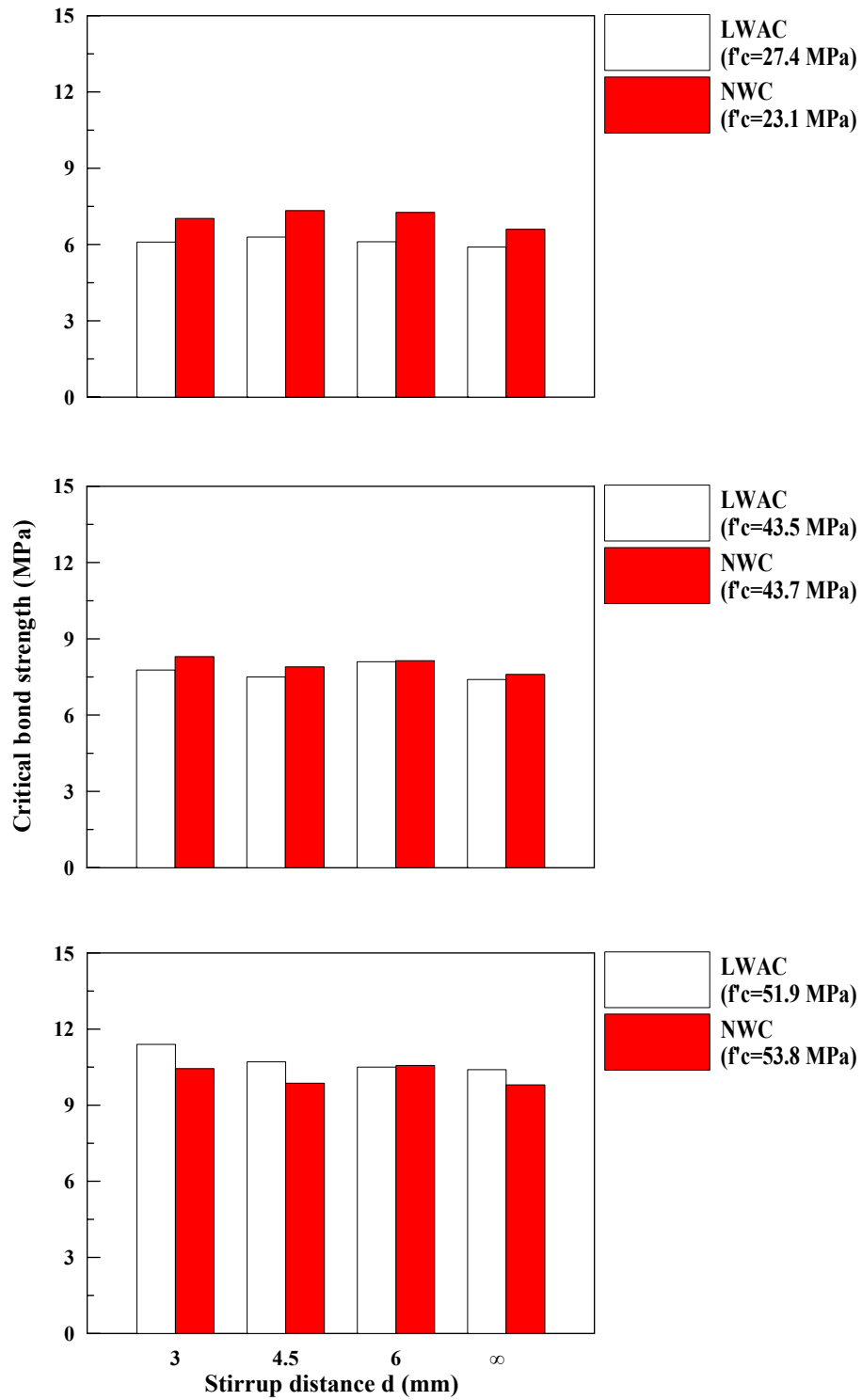


圖 4-3 標稱握裹強度與箍筋距離之關係

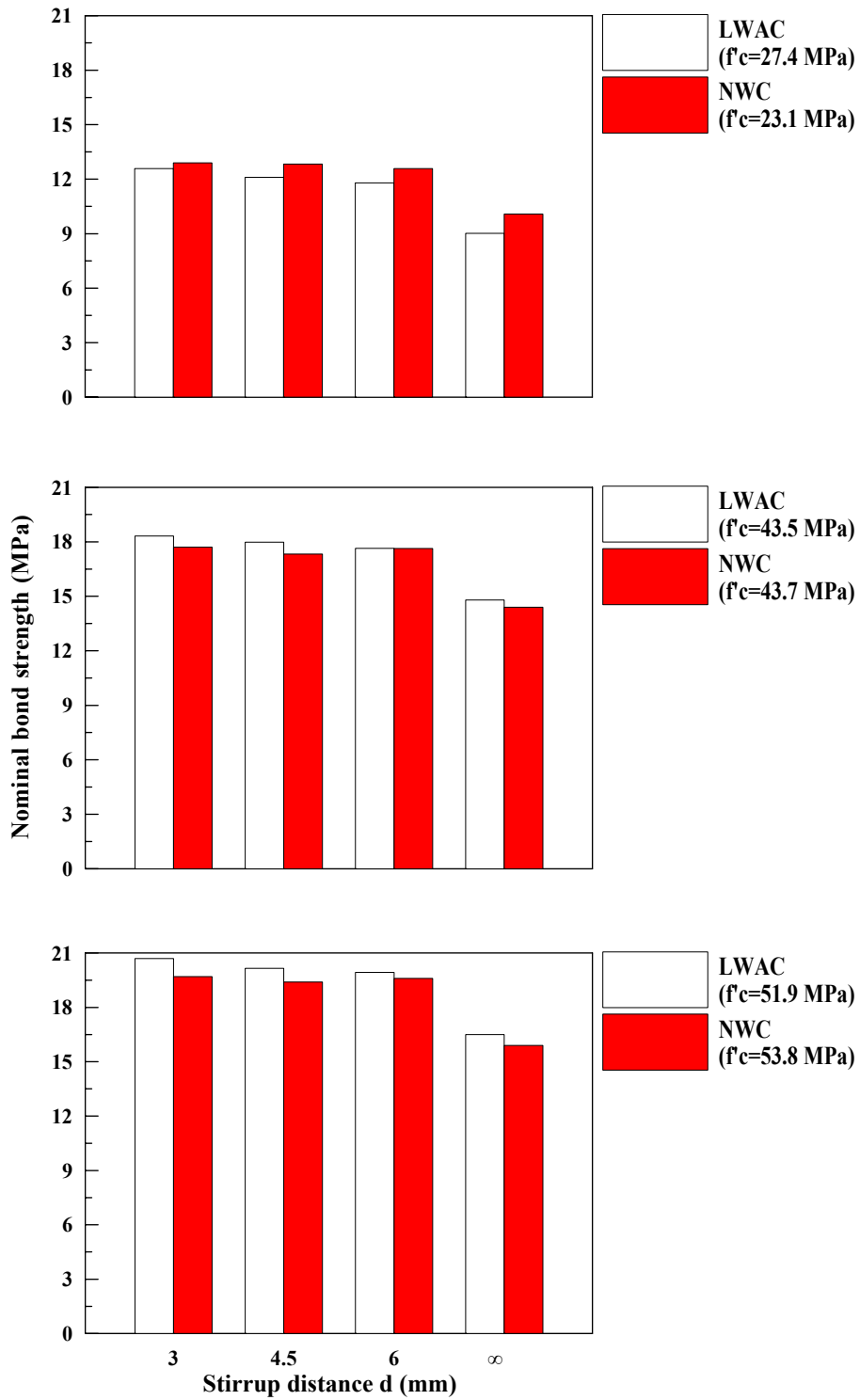


圖 4-4 臨界握裹強度與混凝土抗壓強度的關係

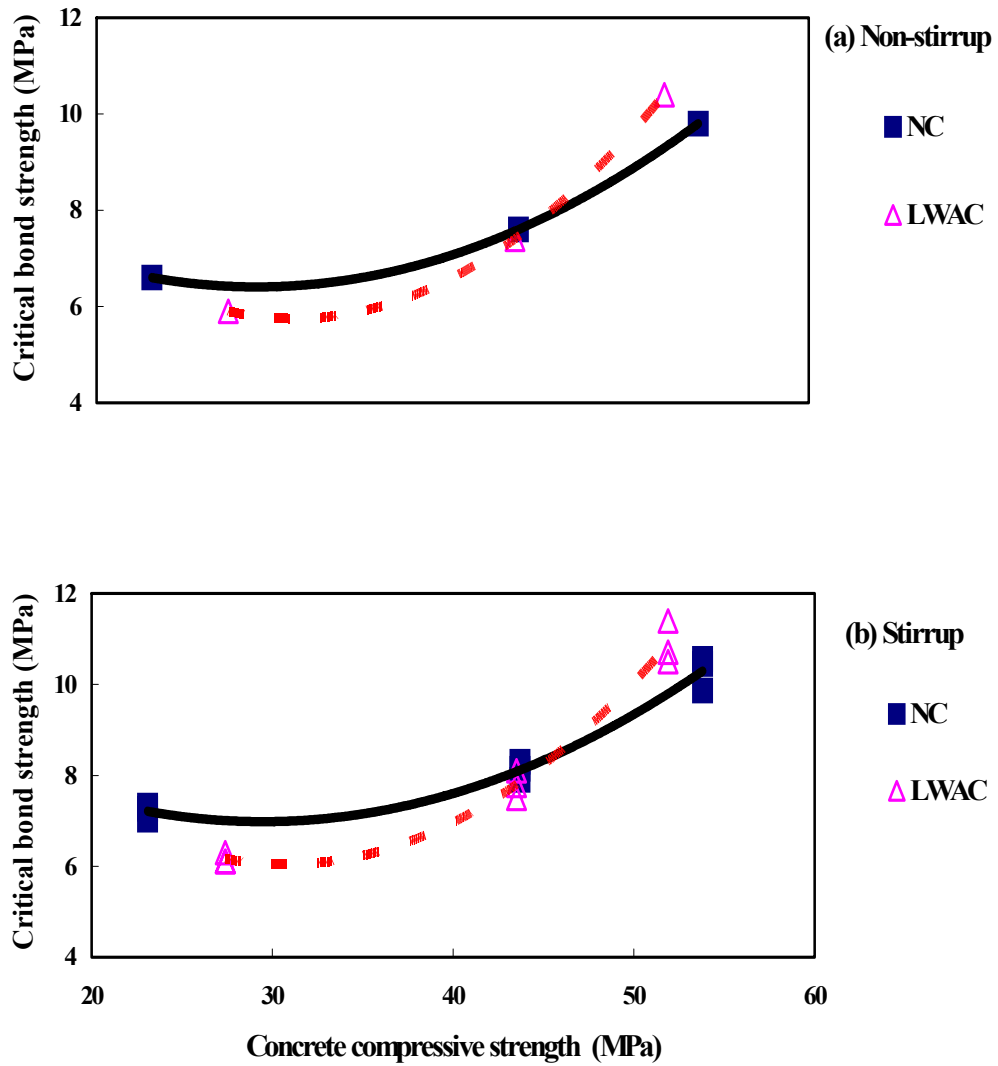


圖 4-5 標稱握裹強度與混凝土抗壓強度的關係

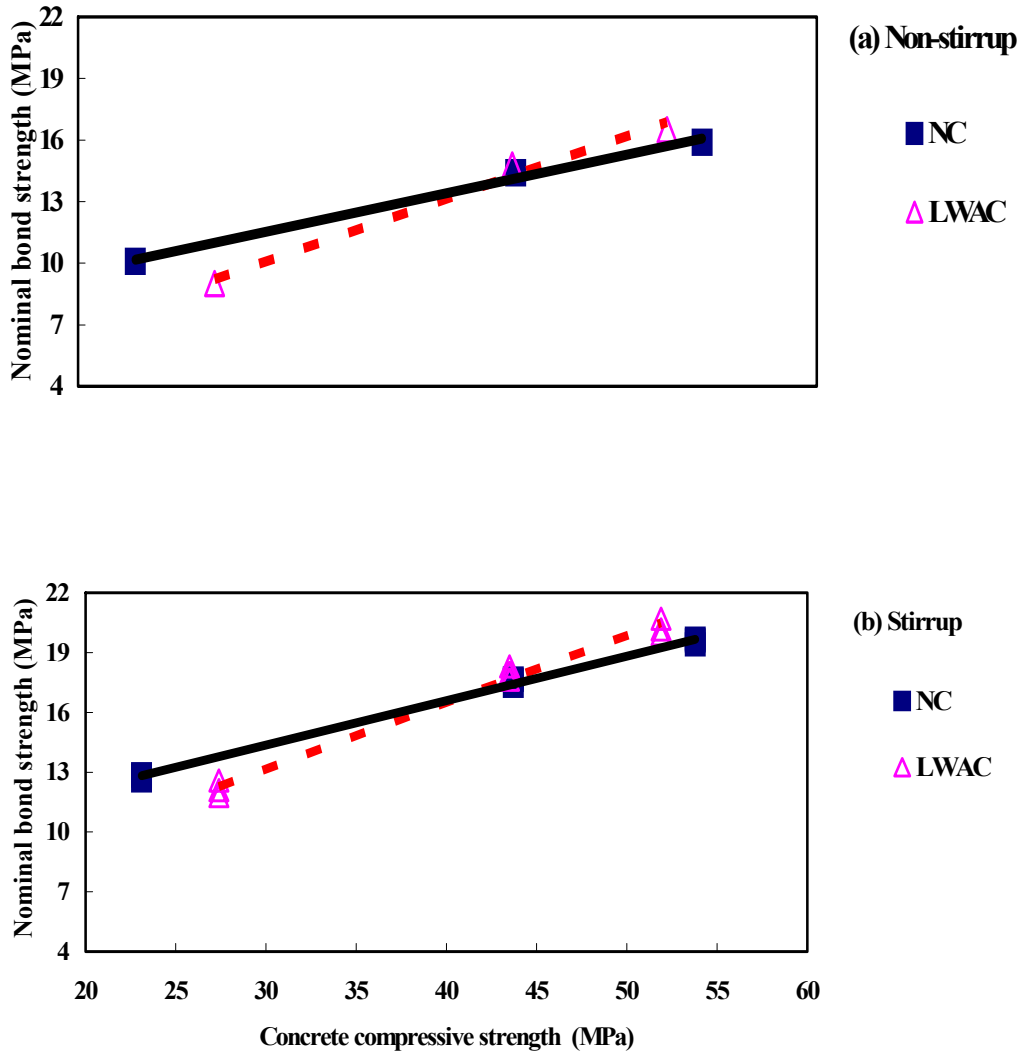


圖 4-6 單位抗壓強度之標稱握裹強度與混凝土抗壓強度的關係

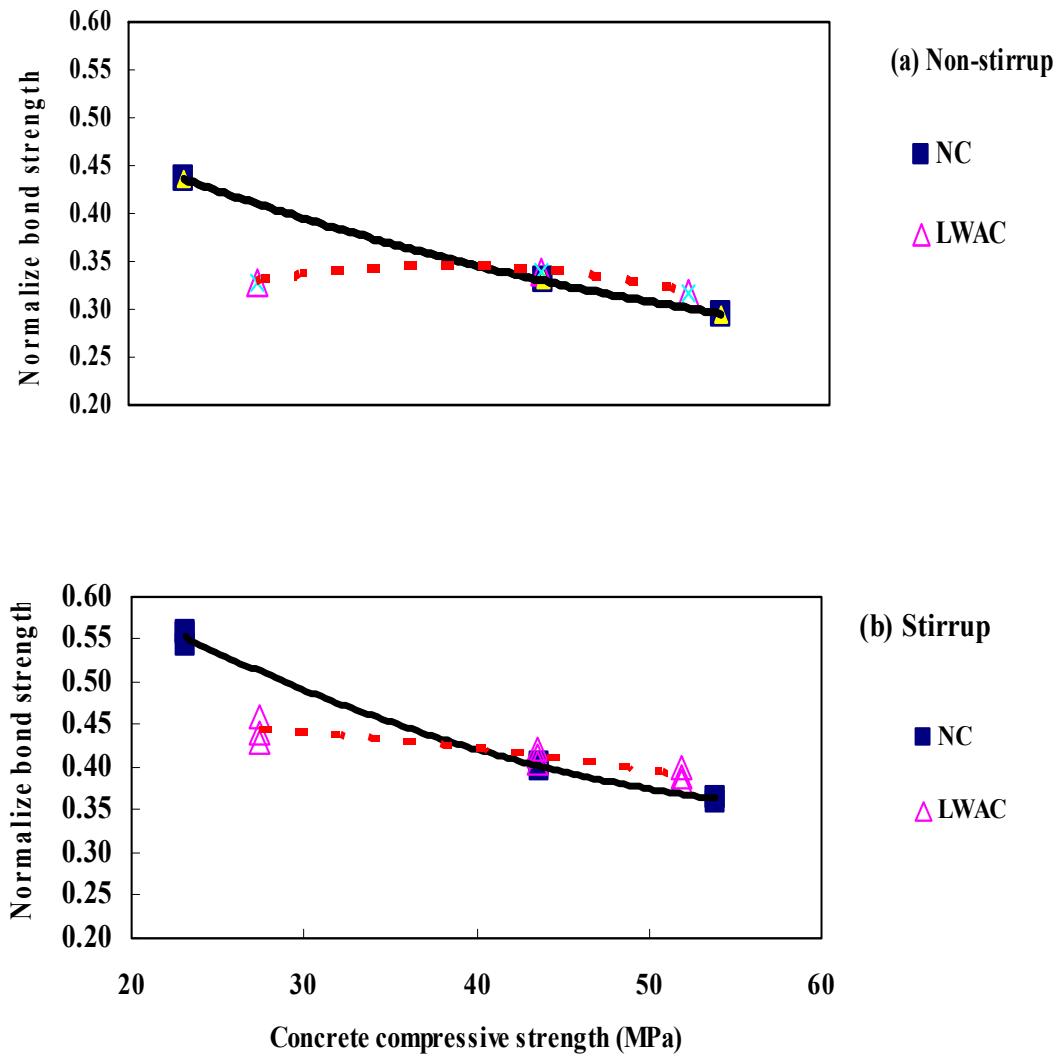


圖 4-7 理論支承力與混凝土抗壓強度的關係

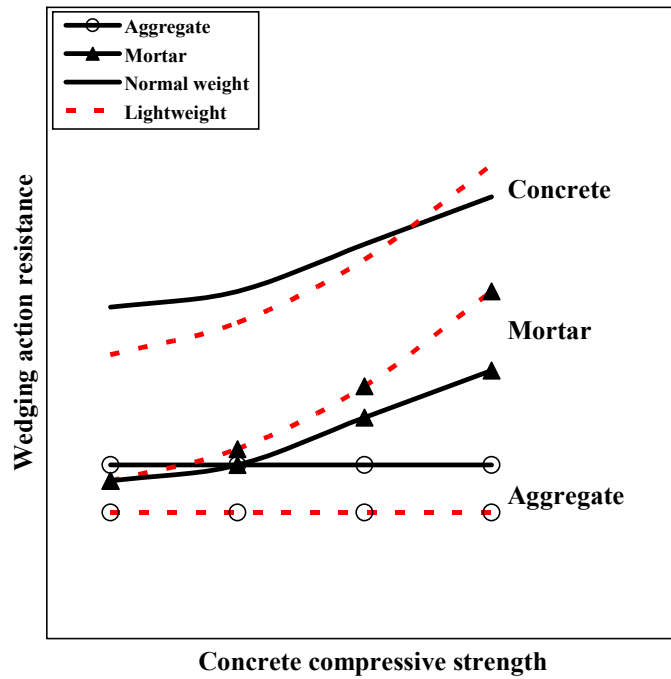


圖 4-8 L20 試體載重-樑中央位移

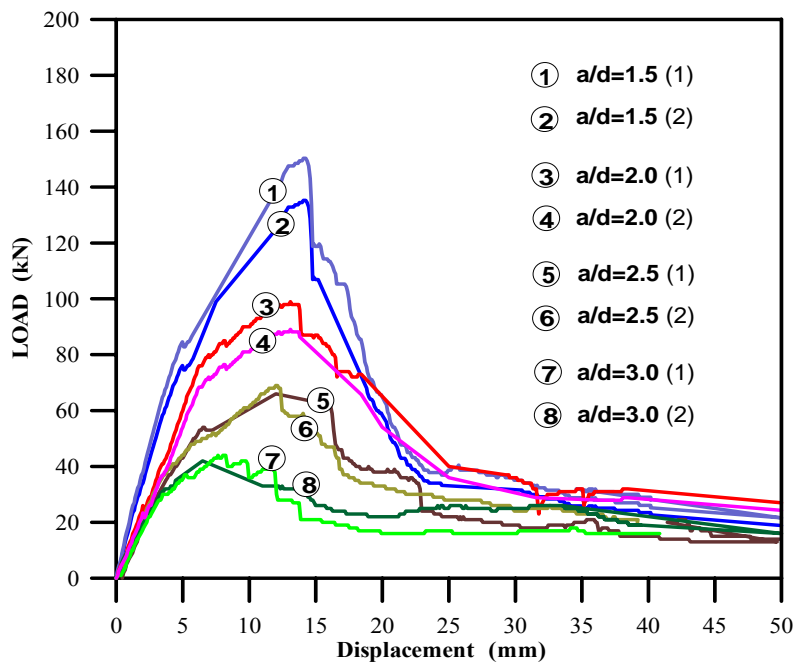


圖 4-9 L40 試體載重-樑中央位移

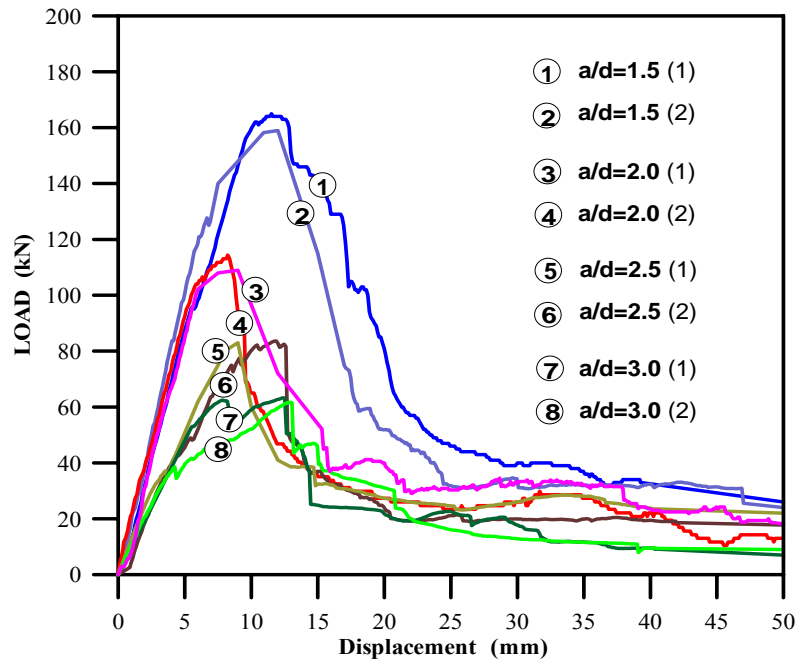


圖 4-10 L60 試體載重-樑中央位移圖

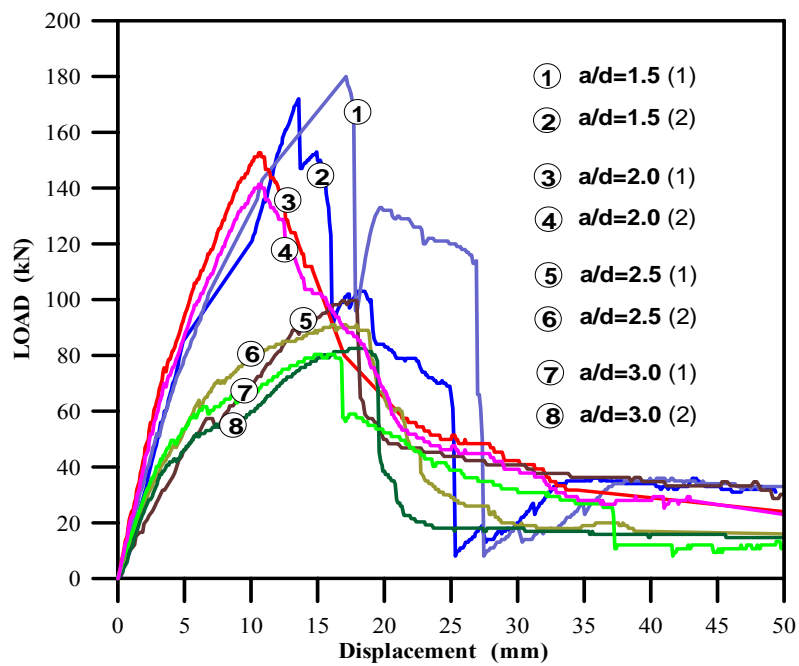


圖 4-11 N20 試體載重-樑中央位移圖

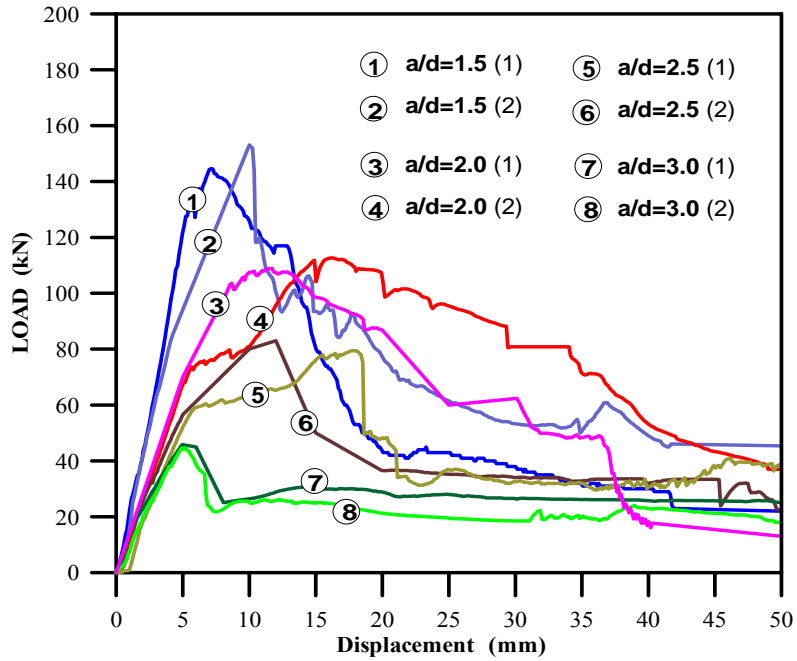


圖 4-12 N40 試體載重-樑中央位移圖

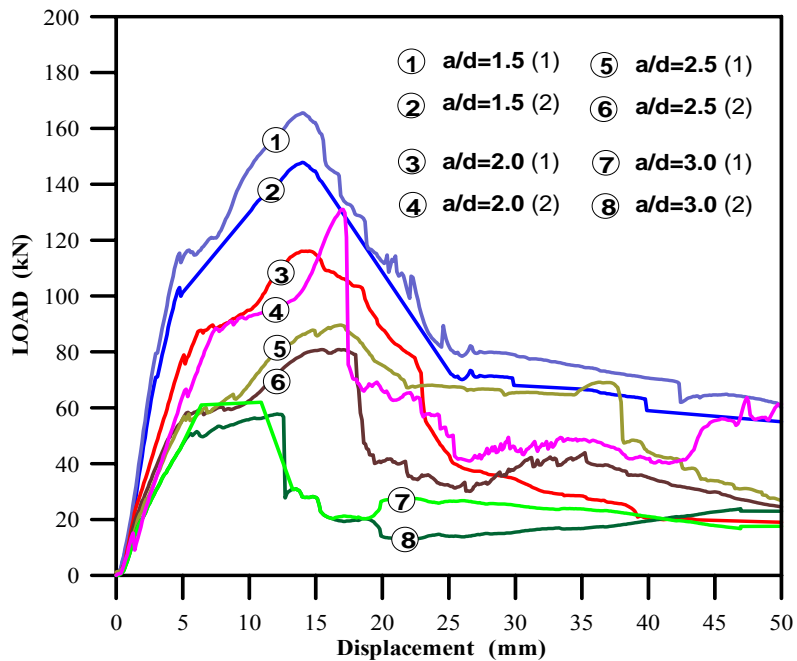


圖 4-13 N20 試體載重-樑中央位移圖

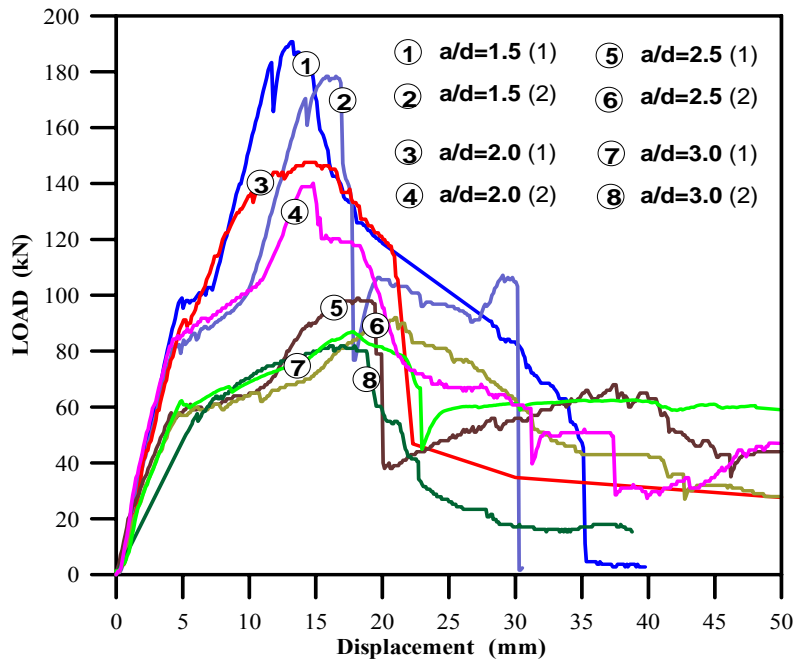


圖 4-14 剪跨比對輕質混凝土樑極限剪力強度之影響

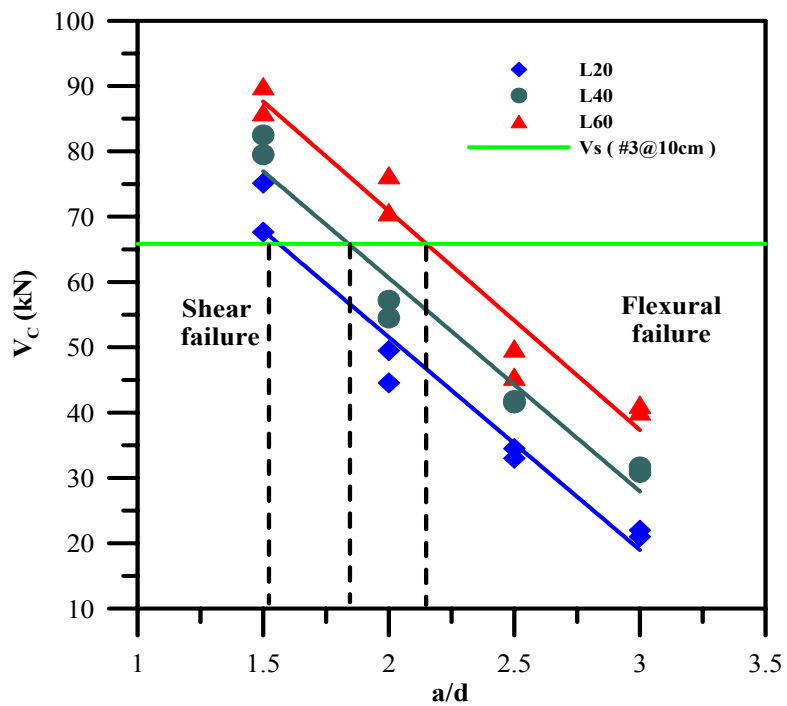


圖 4-15 剪跨比對常重混凝土樑極限剪力強度之影響

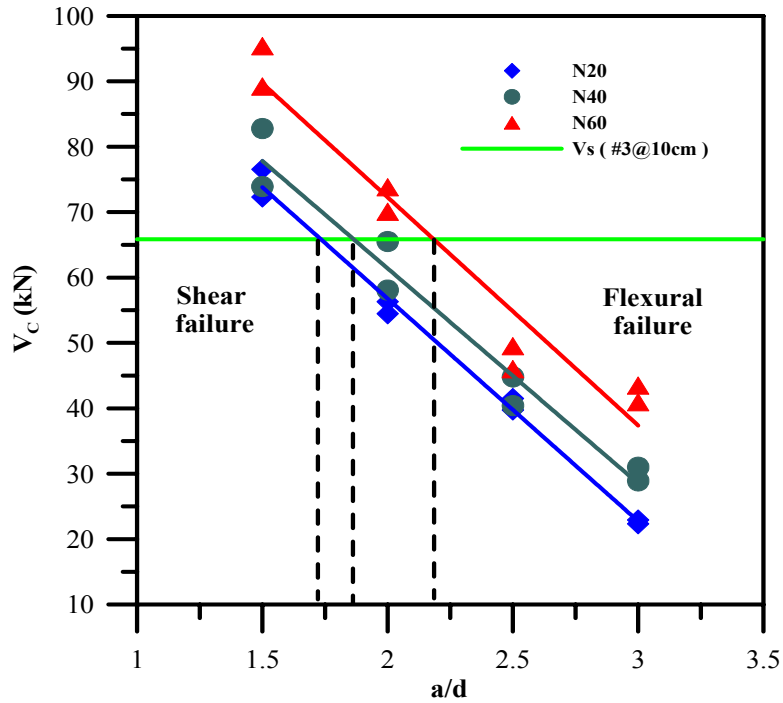


圖 4-16 混凝土抗壓強度對輕質混凝土樑極限剪力強度之影響

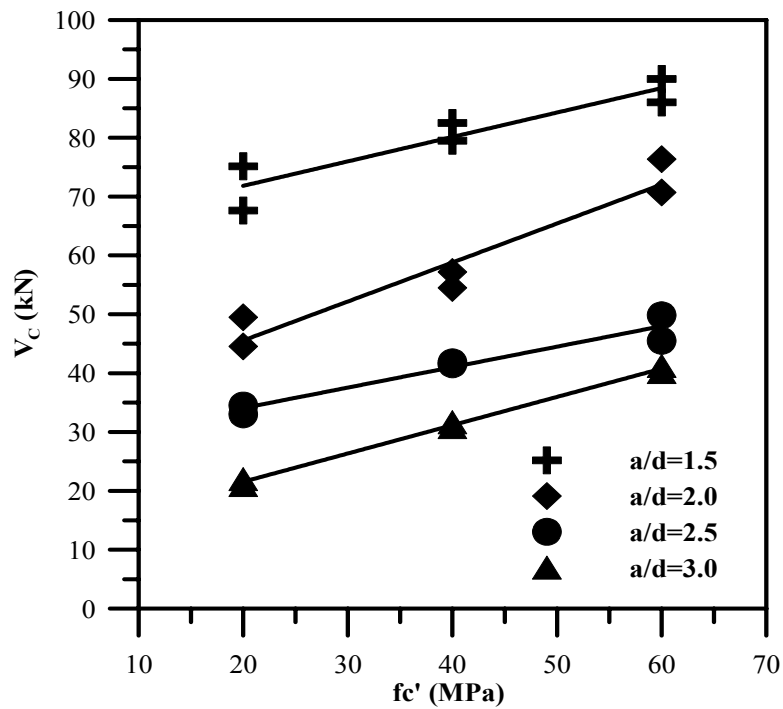


圖 4-17 混凝土抗壓強度對常重混凝土樑極限剪力強度之影響

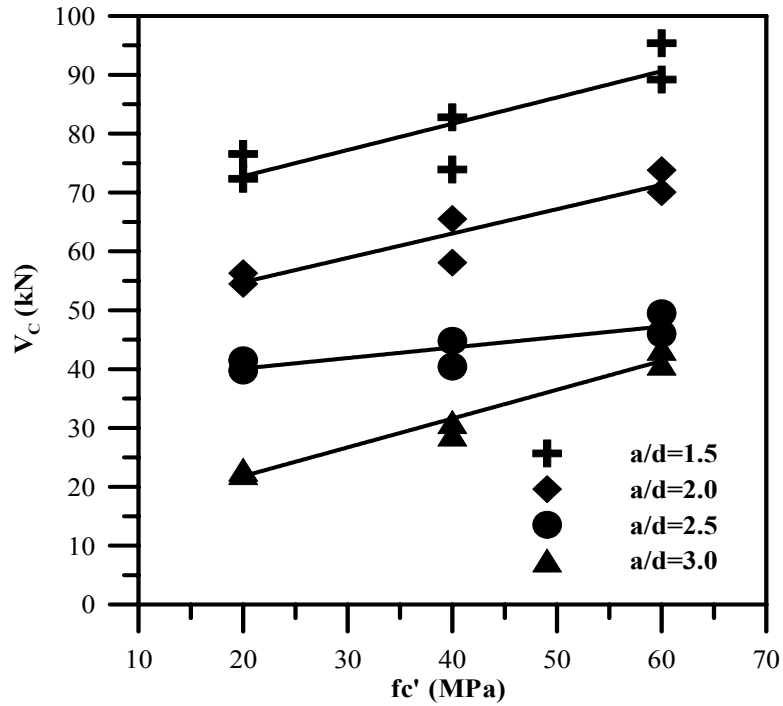
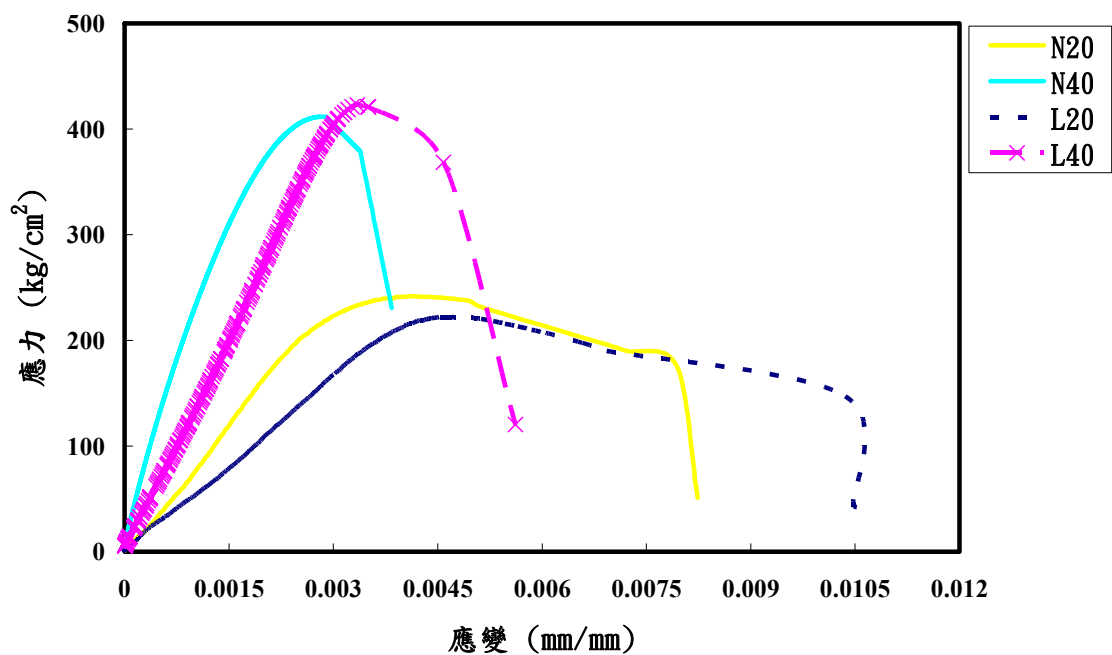


圖 4-18 混凝土應力應變關係圖

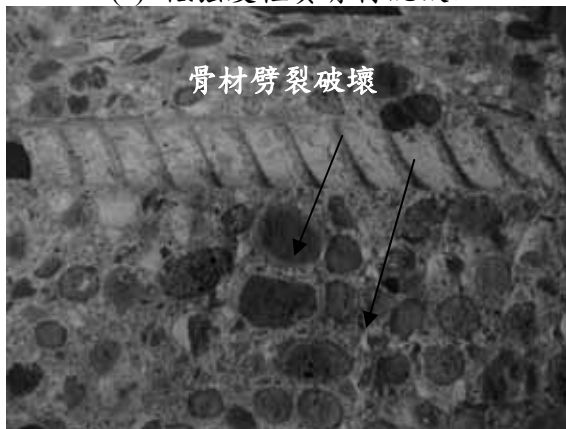


照片 4-1 側向劈裂破壞與滑動握裹破壞



照片 4-2 輕質與常重混凝土之握裹破壞照片

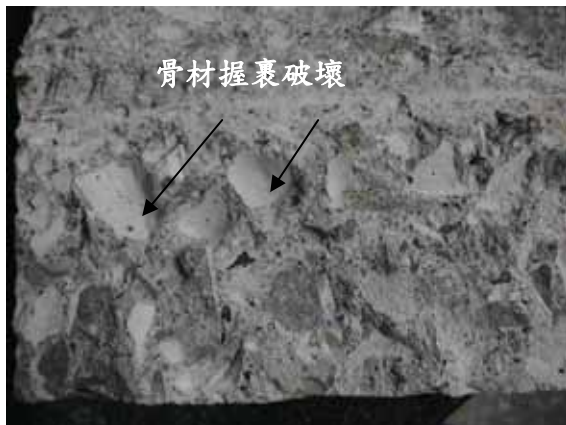
(a) 低強度輕質骨材混凝土



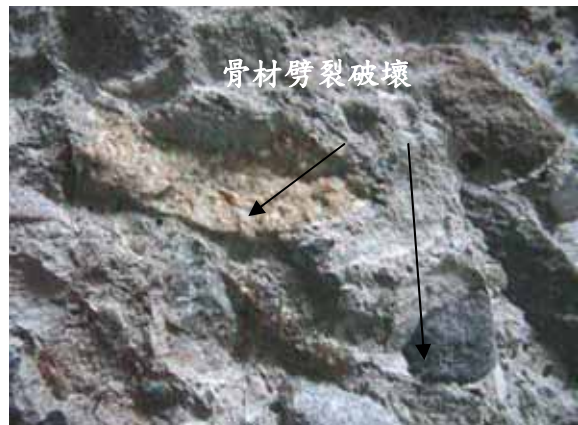
(b) 高強度輕質骨材混凝土



(c) 低強度常重骨材混凝土



(d) 高強度常重骨材混凝土



照片 4-3 輕質混凝土樑試體破壞情形(a/d=1.5)



照片 4-4 常重混凝土樑試體破壞情形(a/d=1.5)



照片 4-5 輕質混凝土樑試體破壞情形(a/d=3.0)



照片 4-6 常重混凝土樑試體破壞情形(a/d=3.0)



第五章 輕質骨材混凝土之防火隔熱性質探討

本章將針對輕質骨材混凝土之防火隔熱性質進行探討，包含熱傳導係數、輕質骨材混凝土樑及版的防火試驗，以及輕質骨材混凝土牆體密閉空間之日曬試驗等，各試驗之結果分析與討論如下。

第一節 混凝土之熱傳導係數

輕質混凝土之熱傳導係數試驗結果如表 5-1 所示。由試驗結果可以發現，中低強度輕質骨材混凝土的平均熱傳導係數介於 $0.690 \text{ kcal/m.hr.}^{\circ}\text{C} \sim 0.750 \text{ kcal/m.hr.}^{\circ}\text{C}$ 之間，而常重混凝土則介於 $1.330 \text{ kcal/m.hr.}^{\circ}\text{C} \sim 1.425 \text{ kcal/m.hr.}^{\circ}\text{C}$ 之間，當混凝土強度由 20 MPa 等級提高至 40 MPa 等級時，混凝土熱傳導係數大約增加有 7~8%。比較輕質混凝土與常重混凝土，輕質混凝土熱傳導係數僅佔常重混凝土者的 53% 左右，顯示輕質骨材混凝土有較佳的熱阻隔能力，主要原因為輕質骨材呈現多孔性、高吸水率以及低比重，因而使混凝土具有質輕、不燃、多孔的特性，展現出良好的隔熱性。

第二節 輕質骨材混凝土隔熱節能數值模擬分析

本研究在得到前節之輕質與常重混凝土熱傳導係數試驗結果後，利用既有的有限元素分析軟體，以數值模擬分析混凝土牆體本身之熱傳導性能，進而比較輕質/常重混凝土隔熱性能上的差異。

牆體隔熱性能分析之模型，如圖 5-1 所示。假設牆厚度 10 cm，牆體一側(室外)施加固定溫度 45°C ，模擬建築受日照之情況，牆體另一側(室內)，給定初始溫度 20°C (室溫)，而分析所需牆體材料熱學性質則根據前一節之隔熱試驗結果，利用 ANSYS 軟體分析室內牆面溫度隨時間之變化情形，分析元素採用一維 LINK 32 熱傳導元素，如圖 5-2 所示。

牆體隔熱性能分析之結果，如圖 5-3 所示。室外牆面固定溫度 45°C ，

室內牆面初始溫度 20 °C，隨著時間之增加，室內牆面溫度會逐漸趨近於室外牆面溫度，直到內外牆面溫度皆相同時，則熱量之傳遞達到平衡狀態。由圖中可看出，經過 5 ~ 10 小時的日照時數下，普通混凝土牆體的室內牆面溫度幾乎已與室外牆面溫度相同，而輕質混凝土牆室內牆面溫度則較低。在 5 小時日曬下，使用輕質混凝土牆之內牆面較普通混凝土內牆面溫度低 3~4°C，直到 10 小時的日曬，使用輕質混凝土牆之內牆面才會接近於普通混凝土內牆面溫度，顯示出輕質混凝土牆體具有較普通混凝土者更優越之隔熱性能。若考量混凝土強度的影響時，由模擬的結果中可知，不論輕質混凝土或常重混凝土，當其混凝土強度由 20 MPa 提升至 40 MPa 時，兩者的升溫曲線相當接近，主要的原因是中強度混凝土之熱傳導係數僅比低強度者高約 7~8%，導致其升溫曲線沒有明顯的變化。

第三節 輕質骨材混凝土牆體密閉空間的日曬試驗

『台中市規劃過程報告』指出，台中市日照時數以七月份最高，全月日照時數達 243.9 小時，二月份日照時數最短，平均亦達 156.1 小時，平均全年日照時數約為 2422.3 小時，平均每天日照約 6 小時，因此本計畫乃保守採用 6 小時的日照時數當作混凝土房屋受日曬的時間，並將 20 MPa 混凝土強度等級之輕質/常重混凝土房屋安置台中中興大學無遮蔽的空曠校地上，在 6 小時（10 月 8 日早上 7:00 至當日中午 12:00）太陽曝曬下，記錄密閉混凝土房屋內外之溫度變化，以評估比較輕質/常重混凝土房屋之隔熱性能。

受日照後之混凝土房屋升溫曲線如圖 5-4 所示。由試驗結果可以得知，相同日照環境條件下，輕質/常重混凝土房屋有相近的表面溫度；在 5 個小時的日照下，混凝土表面溫度大致上由 26.1 °C 提升到 43.4 °C，提高了約 18 °C 左右。輕質骨材混凝土屋內的溫度由 21.5 °C 提升到 34.3 °C，相較於外表面溫度平均要低 8.2 °C 左右，溫升速率每小時溫度約為 2.6 °C，常重混凝土者則為 22.8~36.8 °C，比表面溫度平均降低了約 5.7 °C，每小時溫

度提升約 2.8 °C。輕質與常重混凝土房屋內的溫差(如圖 5-5)大致介於 1.3 ~3.7 °C 之間, 平均的溫差為 3.1°C, 因此在 20 MPa 強度等級、混凝土牆版厚度 50 mm 等條件下, 輕質混凝土要達到與常重混凝土有相同屋內溫度, 大致上需要多出 1.2 小時的日照時間, 由此可知, 採用輕質骨材建造之混凝土房屋相較於常重混凝土房屋則可獲得較佳的保溫取涼效能, 顯示輕質骨材混凝土房屋對太陽照射的熱阻隔性能要優於常重混凝土者。

第四節 輕質骨材混凝土樑之火害行為

混凝土樑試體於澆置完成後, 置於養護室中養護 7 天後, 取出置於空氣中氣乾約一個月, 接著進行火害試驗, 試驗的裝置如照片 5-1 所示。將輕質與常重混凝土樑試體各分別分成 20、40 MPa 兩等級, 每一組配比有 1 根樑試體與 3 顆圓柱試體, 試體的裝置如照片 5-2 所示。試體安裝進高溫爐後, 先以約 150°C 的溫度將試體烘乾 1.5 小時, 再根據 CNS 12514 的標準升溫曲線對試體加熱, 經過 30 分鐘後將試體取出, 觀察試體表面之破壞情形。

高溫爐內共有 12 個出火點, 火舌在試驗過程中並不會接觸到混凝土試體。在加熱過程中, 高溫爐內有 2 根溫度感測計, 分別裝在爐內上方與下方, 用來量測實際的升溫曲線, 實測結果如圖 5-6 所示, 圖中顯示, 高溫爐內的升溫曲線無法達到 CNS 標準升溫曲線, 肇因於試體內仍有水分存在, 這些水分在急速升溫過程中, 轉化成水蒸汽造成蒸汽壓力, 造成混凝土表面剝落。剝落的試體落在高溫爐內的出火口上方, 擋住了火舌並改變燃燒方向, 導致爐內上方的溫度比下方的溫度高約 150°C, 惟混凝土試體擺置於高溫爐下半部位置(如照片 5-2)所受到的溫度較接近於下溫升溫曲線(如圖 5-6)。

經過 30 分鐘的火害試驗後, 輕質骨材混凝土樑與圓柱試體的破壞較為嚴重, 如照片 5-3 所示, 樑的上層幾乎都已剝落, L20 組的側邊也剝落的甚為嚴重; 至於常重混凝土樑與圓柱試體表面幾乎沒有剝落情形, 如照片 5-4 所示, 但表面仍有許多微裂縫存在。造成這種現象的原因乃在於輕質骨材

內部含有較多的水分，雖然已經氣乾一個月，且試驗前又烘乾 1.5 小時，仍無法將輕質混凝土試體內部的水分完全去除，導致試驗過程中的蒸汽壓力造成混凝土表面的剝落。除了蒸汽壓力外，輕質骨材本身的強度較差也是造成破壞的原因之一，由剝落的試體看來，輕質骨材幾乎都已破裂。

第五節 輕質骨材混凝土版之火害行為

混凝土版試體於澆置完成後，置於養護室中養護 7 天，再取出置於空氣中，氣乾約 21 天後，進行火害試驗，試驗的裝置如照片 5-5 所示。7 組混凝土版（0.3×0.1×1.0 m）分別為 LC20、LC40、NC20 與 NC40，將之安裝於防火試驗框架上，各試體間以石膏密封，以防止火苗竄出，如照片 5-6 所示。在防火試驗爐內裝有 9 根的溫度感測計，量測爐內溫度變化，其溫度上升曲線如圖 5-7 所示，其上升曲線與 CNS 12514 的標準升溫曲線相似，且爐內的 9 根溫度感測計的量測結果差異不大，各塊混凝土版所受到的溫度可視為相同。在每塊混凝土版的背面中心點並裝設溫度感測計，量測在試驗過程中，版背部溫度變化的情形。以下針對防火試驗過程中，混凝土版試體表面的變化，與背溫上升情形進行分析比較。

1、混凝土版試體於防火試驗過程中的觀察

照片 5-7 為防火試驗過程中，各塊版試體背部表面的變化情形，在經過 10 分鐘後，輕質混凝土版試體 L20 與 L40 即開始有水分液出；在 15 分鐘至 30 分鐘間，水分散失的情形愈趨嚴重，尤其是輕質混凝土版試體。經過 45 分鐘的燃燒之後，版試體內部水分幾乎都已消散，試體表面已不見水分流出。可見的在同樣的養護條件下，輕質混凝土版試體的含水量比常重混凝土高，因此在防火試驗過程中，較高的含水量所產生的蒸汽壓力會導致混凝土內微裂縫的產生。

在經過 1 小時的防火試驗後，L20 的背熱面有裂縫產生，如照片 5-8 所示，此為蒸汽壓力所導致的微裂縫。而在版試體受熱面部分，L40 版試體的

混凝土保護層發生剝落現象，而使得鋼筋外露，如照片 5-9 所示，此現象顯示當輕質骨材混凝土強度愈高時，因混凝土較為緻密，蒸汽壓力較不易疏解而易導致混凝土爆裂，在受到火害作用時，表面較容易發生剝落現象。至於常重混凝土版試體則幾乎沒有剝落現象，顯示常重混凝土體內水份含量較低，蒸汽壓力較小所致，此情況與樑試體的防火試驗相似。

2、輕質與常重混凝土背溫的比較

圖 5-8 為輕質與常重混凝土在防火試驗過程中，其背部溫度上升的情形。由圖中可知，輕質混凝土版背部溫度的上升曲率，比常重混凝土來的緩慢，在 30 分鐘時，L20 的溫度最低，而 N20 的溫度最高，輕質混凝土版試體的背溫約比常重混凝土版背溫低 30°C ，由於輕質混凝土的熱傳導係數較低，其導熱性較慢，因此輕質混凝土背溫的上升速度較為緩慢；然而，經過 1 小時的防火試驗後，輕質與常重混凝土試體的溫度則已接近，溫差縮小至約 10°C ，仍以 L20 的溫度最低，而 L40 的溫度最高，可能是因為 L40 版試體的受熱面已剝落，導致其有效的厚度減少，造成熱傳導的速率較快，使得溫度持續上升。各塊版試體經過 1 小時的防火試驗後，其背溫的最大溫度僅約 110°C ，並沒有超過 CNS 規定之 210°C ，可見其防火時效均可達 1 小時以上。

表 5-1 混凝土熱傳導係數試驗結果

強度等級	輕質混凝土		常重混凝土		比較值
20 MPa	0.719	(0.690)	1.289	(1.330)	52%
	0.695		1.345		
	0.655		1.355		
40 MPa	0.764	(0.750)	1.403	(1.425)	53%
	0.738		1.493		
	0.747		1.378		

括弧中數字表示為平均值

表 5-2 混凝土試體受火害前後之抗壓強度

試體 編號	未烘乾試體				烘乾後試體			
	氣乾強度 kgf/cm ²	含水率 %	火害後之抗 壓強度	強度 折減	絕乾強度 kgf/cm ²	含水率 %	火害後之抗 壓強度	強度 折減
N20	280	3.81	75	73%	267	0.04	87	67%
N40	446	4.60	110	75%	431	0.22	127	71%
L20	267	5.01	—	—	244	0.14	121	50%
L40	477	5.58	—	—	432	0.58	191	56%

圖 5-1 牆體隔熱分析模型

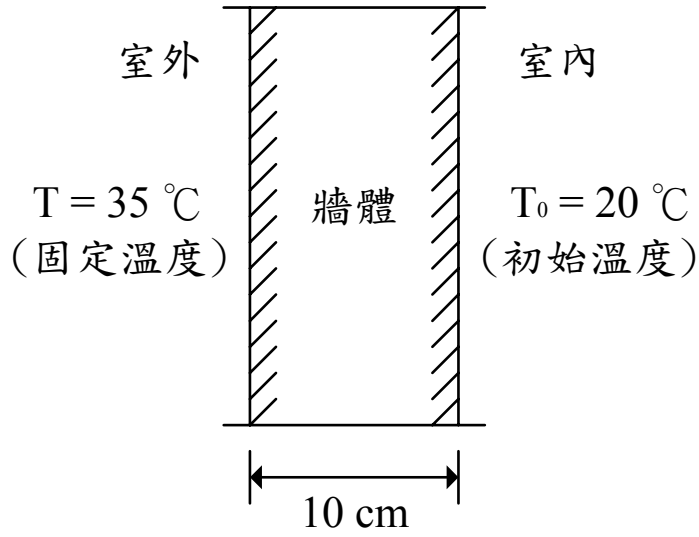


圖 5-2 LINK 32 熱傳導元素

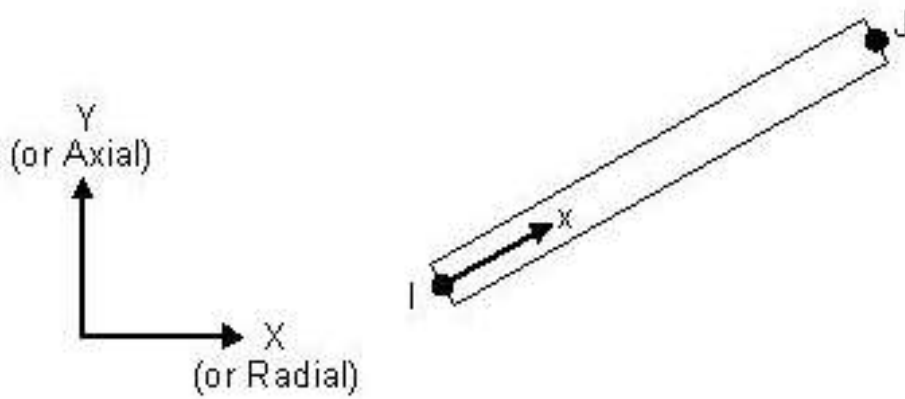


圖 5-3 混凝土牆版隔熱數值模擬分析結果

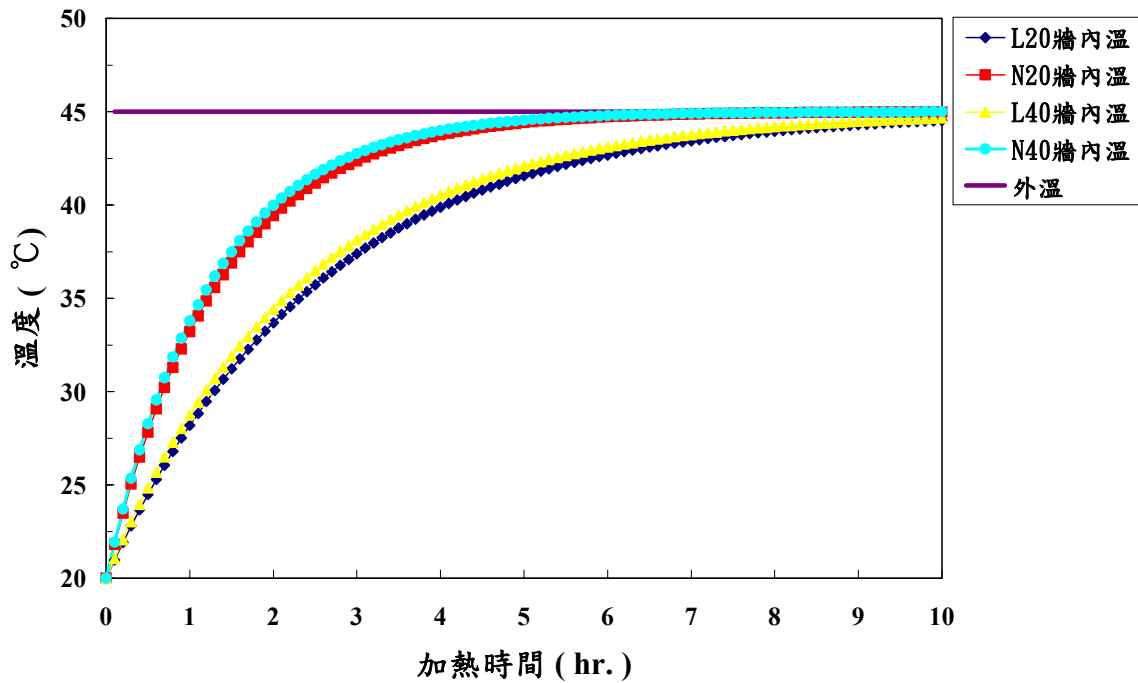


圖 5-4 混凝土房屋受日曬之升溫曲線

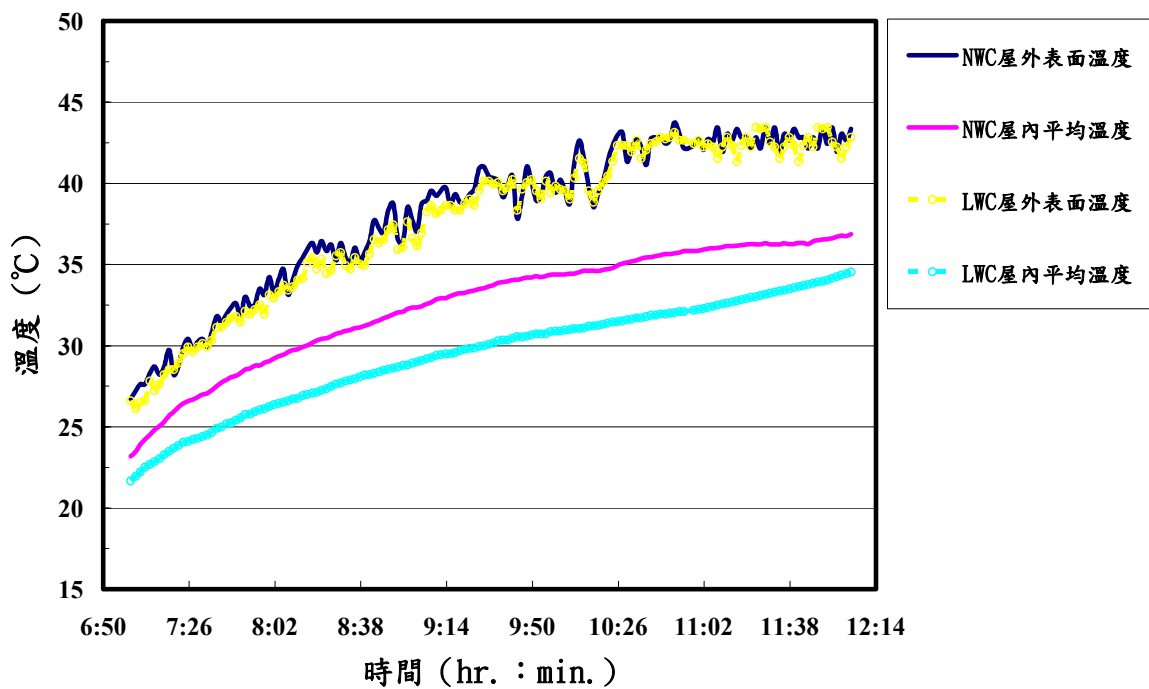


圖 5-5 常重與輕質混凝土房屋受日曬之溫差曲線

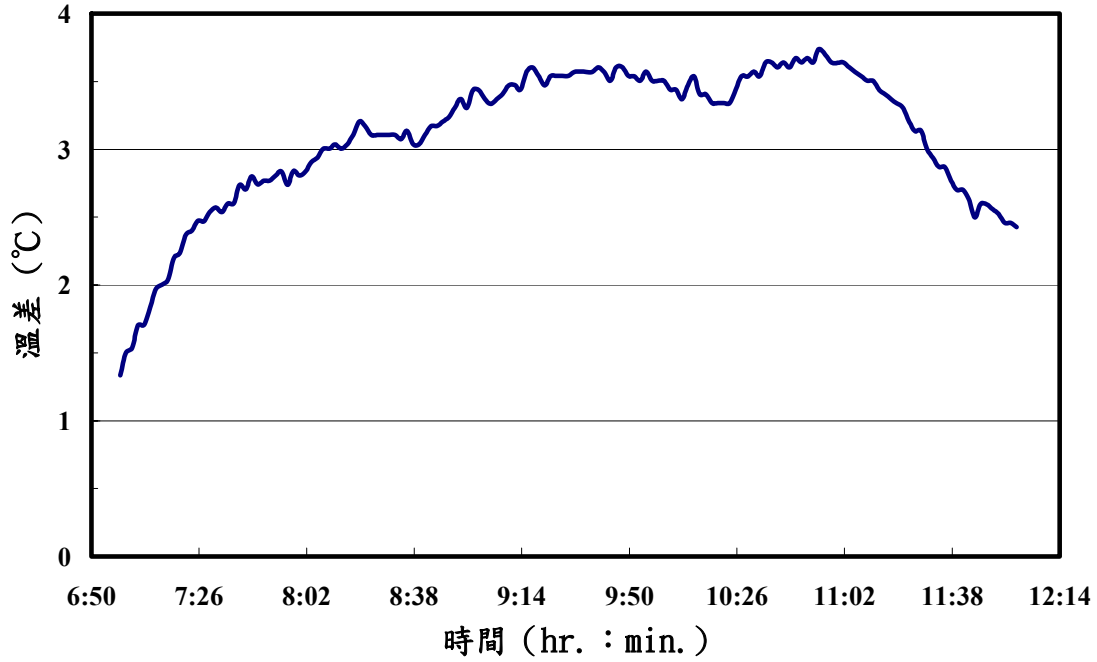


圖 5-6 混凝土樑於高溫爐內的升溫曲線

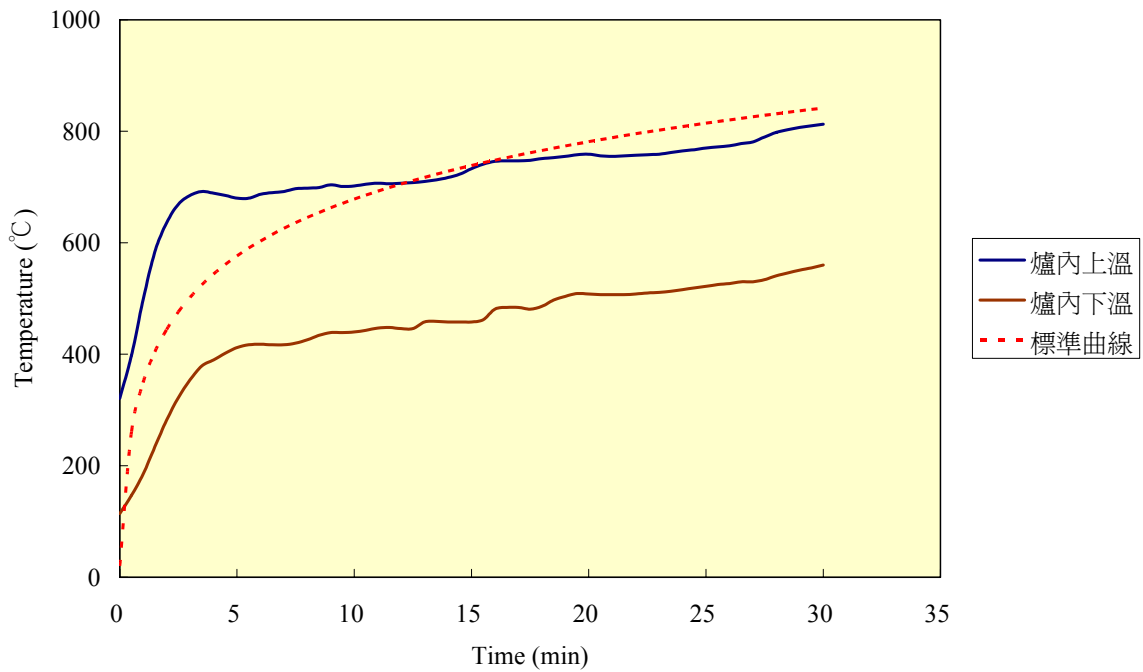


圖 5-7 混凝土版的升溫曲線

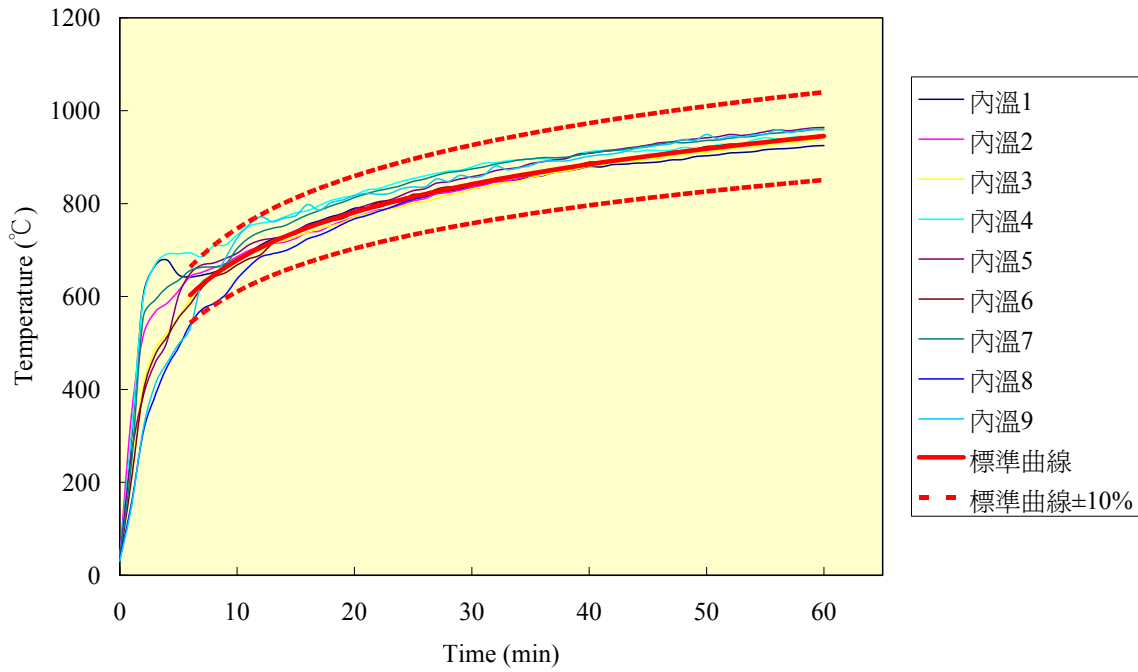
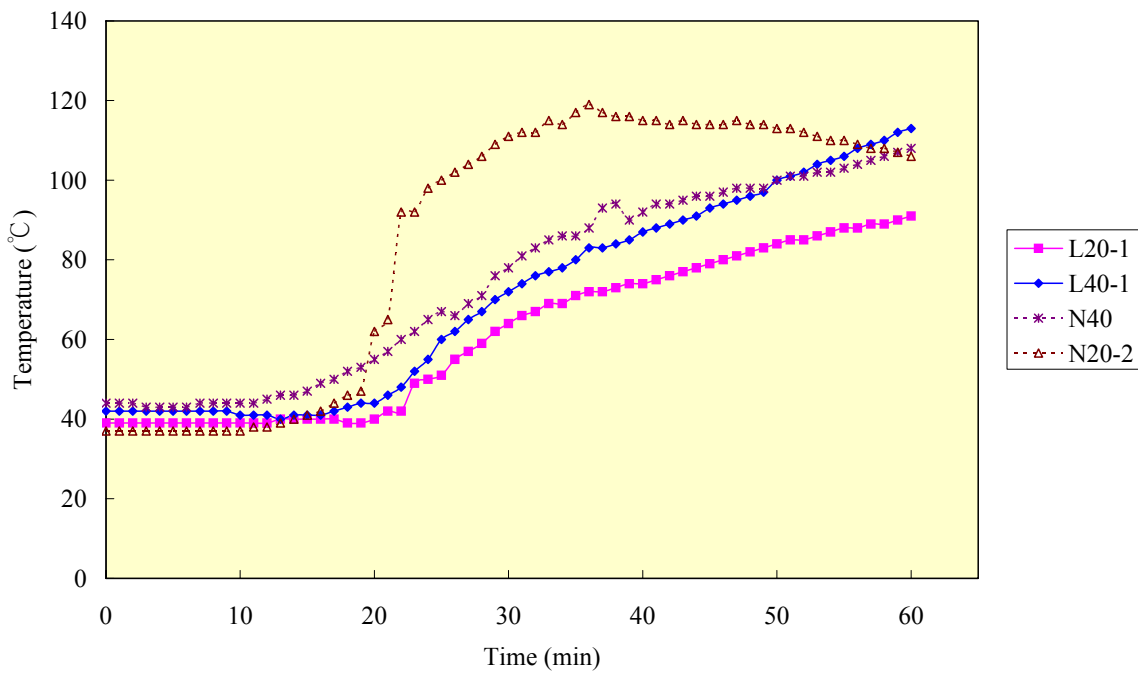


圖 5-8 混凝土版的背溫變化曲線



照片 5-1 混凝土樑之防火試驗裝置



照片 5-2 混凝土樑防火試體之裝置情形



照片 5-3 防火試驗後，輕質骨材混凝土樑之破壞情形

L20



L40



照片 5-4 防火試驗後，常重骨材混凝土樑之破壞情形

N20



N40



照片 5-5 混凝土版之防火試驗裝置



照片 5-6 混凝土版防火試體之裝置情形



照片 5-7 混凝土版防火試驗過程中之觀察

(a) 5 分鐘後 (T=587°C)



(b) 10 分鐘後 (T=690°C)



(c) 15 分鐘後 (T=744°C)



(d) 30 分鐘後 (T=851°C)



(e) 45 分鐘後 (T=908°C)



(f) 60 分鐘後 (T=948°C)



照片 5-8 混凝土版背熱面之破壞情形



L20-2

L20-1



L40-2

L40-1



N40

N20-2

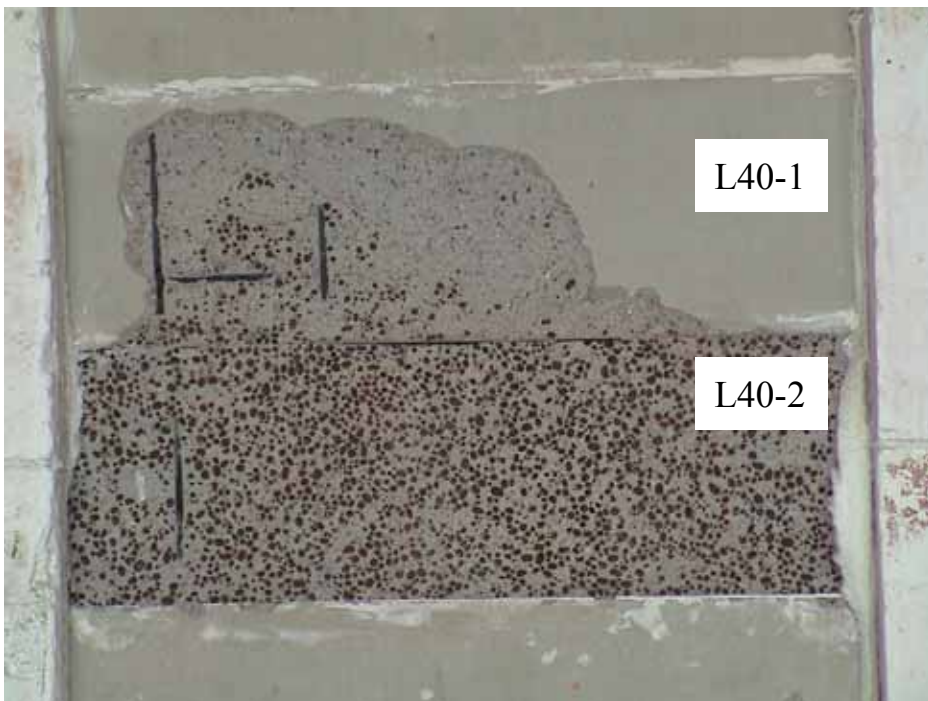
N20-1

照片 5-9 混凝土版受熱面之破壞情形

(a) 混凝土版試體



(b) 輕質骨材混凝土 (L40)



第六章 結論

本研究利用水庫淤泥輕質骨材混凝土，進行其構件行為與隔熱防火性能研究，並與常重混凝土進行比較。由目前的試驗結果，可初步得到以下幾點結論：

- 1、 本研究採用以石門水庫淤泥為原料所燒製成的造粒型輕質骨材拌製輕質骨材混凝土，所燒製而得之三個骨材粒群（ $3/4''\sim 1/2''$ 、 $1/2''\sim 3/8''$ 和 $3/8''\sim \#4$ ），其單位重介於 $1300\sim 1460\text{ kg/m}^3$ 間，三十分鐘吸水率均小於 9%，可作為結構與非結構用之輕質混凝土粒料。
- 2、 輕質與常重混凝土的標稱握裹強度，在添加箍筋後約可提升 20%，而添加箍筋的握裹試體，其破壞型式將由側向劈裂破壞，趨向為滑動握裹破壞。
- 3、 當混凝土強度在 40 MPa 等級以上時，輕質骨材混凝土的握裹強度將比常重混凝土高，此乃由於同強度輕質混凝土中的水泥漿，其水灰比較低而使得握裹強度較高。20 MPa 等級輕質骨材混凝土之握裹力則略低於常重混凝土約 15% 以內。
- 4、 輕質樑試體極限剪力強度隨剪力比變化之範圍介於 21.00~90.00 kN，常重樑試體介於 22.35~95.37 kN。相較於 ACI code 理論值， $V_{C,LC}/V_{C,ACI}$ 介於 1.49~5.25， $V_{C,NC}/V_{C,ACI}$ 介於 1.46~5.35。結果顯示輕質樑與常重樑之剪力表現相當，ACI code 對於剪跨比較小之構件剪力預估值則明顯趨於保守。
- 5、 ACI 規範以 $f_{ct}/6.7$ 取代 $\sqrt{f_c'}$ 計算剪力，而輕質混凝土 $f_{ct}/6.7$ 約為 $0.75\sqrt{f_c'}$ ，輕質樑較常重樑更形保守。
- 6、 輕質混凝土樑之 P- Δ 曲線與常重混凝土樑相似，惟輕質混凝土較低之彈性模數，使輕質混凝土樑試體之勁度較低，使加載初期之斜率略低於常重混凝土樑。
- 7、 輕質混凝土樑與常重混凝土樑之極限剪力強度皆會隨剪跨比之降低而大幅增加。剪跨比對極限剪力強度之曲線斜率幾乎相同($\cong -33$)，表示

- 剪跨比對極限剪力強度之曲線斜率，主要來自於樑本身之試體尺寸，而與混凝土之種類及強度等特性並無明顯之關聯。
- 8、輕質混凝土樑與常重混凝土樑之極限剪力強度皆會隨混凝土抗壓強度之增加而提升。但是輕質混凝土剪力破壞之模式由骨材劈裂，與常重混凝土並不相同，故對於相同強度等級之混凝土，試驗結果大部分輕質混凝土樑之極限剪力強度會略低於常重混凝土樑。
 - 9、20 MPa 強度等級輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β 約為 0.77，高於 PCA 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 $\beta = 0.76$ ，當輕質混凝土強度高達 40MPa 時，計算所得之輕質混凝土等值應力塊深度參數 β 約為 0.73，乃高於 PCA 對輕質混凝土建議值 0.70，因此 PCA 對輕質混凝土之等值應力塊深度參數 β 尚屬保守可行，不需對輕質混凝土做特別的修正。
 - 10、中低強度輕質骨材混凝土的熱傳導係數介於 0.690 kcal/m.hr.°C ~ 0.750 kcal/m.hr.°C 之間，而常重混凝土則介於 1.330 kcal/m.hr.°C ~ 1.425 kcal/m.hr.°C 之間，當混凝土強度由 20MPa 等級提高至 40MPa 等級時，混凝土熱傳導係數增加有 7~8%，且輕質混凝土熱傳導係數僅佔常重混凝土者的 53% 左右，相當有利於混凝土節約隔熱的性能。
 - 11、由日曬試驗與數值模擬分析可以發現，在台灣地區九月平均溫度、6 小時日曬條件下，輕質混凝土房屋相較同條件下之常重混凝土房屋的內溫降低約 3~5°C，比常重混凝土更有利於混凝土房屋保溫取涼的功能。
 - 12、輕質混凝土版試體與樑試體在進行防火試驗時，若試體未進行完全烘乾，將會因蒸汽壓力而發生表面剝落的情形，甚至導致樑或版的破壞。常重混凝土樑或版試體則較不會發生表面剝落的情形。若為乾燥試體，則輕質骨材混凝土防火性能優於常重混凝土。
 - 13、由於輕質混凝土的熱傳導係數較低，在進行混凝土版試體的防火試驗時，其背部溫度上升的速率較慢，此為其優勢之一。輕質與常重混凝土版試體的防火時效均可達 1 小時以上。

參考書目

1. C.C. Carlson, "Lightweight aggregates for concrete masonry units," *Journal of the American Concrete Institute* 5(28), pp. 491-508(1956).
2. 黃兆龍、洪盟峰、潘誠平、陳宗鵠、黃博全，「淤泥輕質骨材鋼筋混凝土之經濟效益分析」，輕質骨材與輕質骨材混凝土應用研討會論文集，第 27-39 頁，民國 92 年 4 月 18 日。
3. 湯兆緯、顏聰，「鋼結構輕質混凝土結構之隔熱節能評估」，輕質骨材與輕質骨材混凝土應用研討會論文集，第 117-135 頁，民國 92 年 4 月 18 日。
4. 顏聰、黃玉麟、湯兆緯，「鋼結構輕質骨材混凝土建築之經濟性評估」，內政部建築研究所專題研究計畫報告，民國 91 年 12 月。
5. 湯兆緯，「輕質骨材混凝土構造之經濟性評估」，水庫淤泥輕質骨材混凝土研討會論文集，第 G1-G33 頁，民國 92 年 6 月 19 日。
6. G.C. Hoff, *Guide for the Use of Low-Density Concrete in Civil Works Projects*, ERDC/SL TR-00-3, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.(2002).
7. T.A. Holm and T.W. Bremner, *State-of-the-Art Report on High-Strength—High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments*, ERDC/SL TR-02-13, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.(2000).
8. T.A. Holm, "lightweight concrete and aggregates," *Standard Technical Publication* 196C(1994).
9. S. Mindness and J.F. Young, *Concrete*, Prince-Hill Inc.(1981).
10. T.W. Bremner, T.A. Holm, and V.F. Stepanova, "Lightweight concrete—a proven material for two millennia." *Proceedings of Advances in Cement and Concrete*. University of New Hampshire, Durham. S. L. Sarkar and M. W. Grutzeck, ed., pp. 37-41(1994).
11. Federal Highway Administration, "Criteria for designing lightweight concrete bridges," Report No. FHWA/RD-85/045, McLean, VA.(1985).
12. 顏聰，「輕質混凝土之工程性質及工程特性」，混凝土工程技術研討會，台灣營建研究院，台北(1975)。
13. 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)。
14. 王櫻茂，人造輕質骨材混凝土，豐生出版社(1976)。
 15. 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)。
 16. 顏聰，陳豪吉等，「輕質混凝土配比設計及拌製技術研究」，內政部建研所八十三年度研究計畫聯合研討會(6)，第 6-1 頁至 6-31 頁(1994)。
 17. 林維明，「結構用輕質混凝土性質」，結構工程，第七卷，第二期，第 89 頁至 119 頁(1992)。
 18. 陳豪吉，「以台灣地區生產之輕質骨材探討輕質混凝土之配比、製作及強度性質」，博士論文，中興大學土木工程系(1998)。
 19. 顏聰等，「混凝土輕質骨材技術發展及應用」，內政部建研所(1996)。
 20. 陳豪吉，「水庫淤泥輕質骨材之產製」，輕質骨材及輕質骨材混凝土應用研討會論文集，台中，台灣，pp. 5-24，2003。
 21. 顏聰，「向水庫採礦，化腐朽為神奇—以水庫淤泥燒製輕質骨材」，輕質骨材與輕質骨材混凝土應用研討會論文集，第 3-4 頁，民國 92 年 4 月 18 日。
 22. How-Ji Chen, Yu-Wen Liu and Chao-Wei Tang, "Thermal Insulation of Lightweight Concrete," Journal of Engineering, National Chung Hsing University, Vol. 14, No. 1, pp. 1-7(2003).
 23. 王和源，「水庫淤泥應用在輕質混凝土之評估」，輕質骨材與輕質骨材混凝土應用研討會論文集，第 101-113 頁，民國 92 年 4 月 18 日。
 24. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局(1997)。
 25. ACI Committee 211, "Recommended practice for selecting proportions for structural lightweight concrete," ACI 211, pp. 2-69(1997).
 26. R.W. Kluge, "Structural Lightweight Aggregate Concrete," J., Amer. Concr. Inst.(1956).
 27. J.J. Shideler, "Recommended Proctics for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete," ACI Journal No.55-18(1958).
 28. G.H. Nelson and O.C. Frei, "Lightweight Structural Concrete Proportioning and Control," J. Amer. Concr. Inst., Vol. 54, pp. 605-21(1958).
 29. M.N. Haque, H. Al-Khaiat, "Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions," Mater. Struc. 32 (4), pp. 533-538(1999).

30. M.H. Zhang, O.E. Gjrv, Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *ACI Mater. J.* 88 (3), pp. 240-247(1991).
31. J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, J.J. Chang, "Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 197-205(2003).
32. J.A. Rossignolo, M.V.C. Agnesini, J.A. Morais, "Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 363-371(2003).
33. M.N. Haque and H. Al-Khaiat, "Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions," *Mater. Struct.*, Vol. 32, pp.533-8(1999).
34. ACI 211.2 Selecting proportions for structural lightweight concrete. American Concrete Institute. Manual of Concrete Practice. Farmington Hills, MI.
35. ACI 304.5R Batching, mixing, and job control of lightweight concrete. American Concrete Institute. Manual of Concrete Practice. Farmington Hills, MI.
36. A. Mor, "Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete", *ACI Materials Journal*, Jan.-Feb. 1992, pp. 76-82.
37. P.J. Robins and S.A. Austin, "Bond of Lightweight Aggregate Concrete Incorporating Condensed Silica Fume, Fly Ash, Silica Fume, slag and Natural Pozzolans", *ACI*, Detroit, pp. 941-958, 1986.
38. V.V. Bertero, E.P. Popov and B. Forzani, "Seismic Behavior of Lightweight Concrete Beam-Column Subassemblages", *ACI Journal*, pp. 44-52. Jan.-Feb. 1980.
39. H.S. Wilson and M.Malhotra, "Development of high strength lightweight Concrete for Structural application *International Journal of Cement Composites and lightweight Concrete*, May 1988, pp. 79-90.
40. H. Marzouk, M. Osman and S. Helmy, "Behavior of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete slabs under Column Load and Unbalanced Moment", *ACI Structural Journal*, Nov.-Dec. 2000, pp. 860-866.
41. M. Osman, H. Marzouk and S. Helmy, "Behavior of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete slabs under Punching Loads", *ACI Structural Journal*, May-June 2000, pp. 492-498.
42. M.J. Kowalsky, M.J. Nigel Priestley and F. Seible, "Dynamic Behavior of Lightweight Concrete Bridges", *ACI Structural Journal*, July-Aug. 2000, pp. 602-618.

43. 陳豪吉，2000，“以水庫淤泥製造輕質骨材及輕質混凝土之研究”國科會計畫期末報告。
44. 顏聰、黃兆龍、高健章等，2003，“水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣”，內政部建築研究所計畫成果報告。
45. 陳豪吉、林建國，「無細輕質骨材混凝土性質之研究」，第五屆結構工程研討會，南投，台灣，pp.531-539，2000。
46. 劉玉雯、陳豪吉、湯兆緯，「輕質骨材混凝土之隔熱性質」，輕質骨材及輕質骨材混凝土應用研討會論文集，嘉義，台灣，pp. 83-98，2003。
47. A. Short and W. Kinniburgh, “Lightweight Concrete”, Formerly Building Research Establishment, Garston, Watford, U.K. 1976.
48. 陳豪吉，「輕質骨材混凝土之產製技術」，水庫淤泥輕質骨材混凝土產製及規範研討會論文集，台北，台灣，pp. 51-67，2003。
49. H.J. Chen, T. Yen, T. P. Lai, and Y. L. Huang, ”Determination of the dividing strength and its relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete”, Cement & Concrete Composites, Vol.21, pp.29-37, 1999.
50. How-Ji Chen, Tsong Yen, and Kuan-Hung Chen, “Evaluating Elastic Modulus of Lightweight Aggregate”, ACI Materials Journal, Vol.100, No.2, pp.108-113, 2003.
51. J. Lindgard, and T. A. Hammer, “Fire Resistance of Structural Lightweight Aggregate Concrete – A Literature Survey with Focus on Spalling”,
52. T. A. Hammer, “Marine Concrete Structures Exposed to Hydrocarbon Fires – Spalling Resistance of LWA Concrete”, SINTEF-report no STF65 A88064, Trondheim, pp. 8, 1990.
53. H. L. Malhotra, “Spalling of Concrete in Fires”, CIRIA technical note 118, pp. 34, London, 1984.
54. G. Fabritz, “Method for the Manufacture of Lightweight Fire-resistant Concrete”, Tysk patent DE 3704014 A1, pp. 2, 1987. (in German)
55. J. J. Jensen, T. A. Hammer, E. Opheim, and P. A. Hansen, “Fire Resistance of Lightweight Aggregate Concrete”, Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, pp. 192-203, 1995.
56. P. A. Hansen, and J. J. Jensen, “Fire Resistance and Spalling Behavior of LWA Beams”, Report 6.3, High Strength Concrete phase 3, SINTEF-report no STF70 A95004, Trondheim, pp. 13, 1995.

57. FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete, Second Edition, Surrey University Press, London, 1983.
58. Guides for Good Practice, FIP/CEB Recommendations for Design of Reinforced and Prestressed Concrete Structural members for Fire Resistance, 1st Edition, Wexham Spring, 1975.
59. A. Bilodeau, V. K. R. Kodur, and G. C. Hoff, "Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 163-174, 2004.
60. T. A. Hammer, "Compressive Strength and E-modulus at Elevated Temperatures", Report 6.1, High Strength Concrete phase 3, SINTEF-report no STF70 A95023, Trondheim, pp. 16, 1995.
61. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318R-99), American Concrete Institution, Farmington Hills, Mich., 391pp. (1999).
62. E. Hognestad, N.W. Hanson, and D. McHenry, "concrete stress distribution in ultimate strength design," *ACI Journal*, Vol. 52, Dec., 1955, pp. 455-479.
63. C.S. Whitney and E. Cohen, "guide for ultimate strength design of reinforced concrete," *ACI Journal*, Vol. 53, Nov., 1956, pp. 455-475.
64. Malhotra, H.L., 1956. The effect of temperature on the compressive strength of concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 8, No. 23, pp. 85-94.
65. G. T. G. Mohamedbhai, "Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete", *Magazine of Concrete Research*(1986).
66. Supplement to the National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23178, 278 p.
67. Lie, T.T. and D.E. Allen, 1972. Calculation of the fire resistance of reinforced concrete columns, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Technical Paper No. 378, Ottawa, NRCC 12797, 25 p.
68. Design of Concrete Structures for Buildings, 1984. Canadian Standards Association, CSA Standard CAN3-A23.3, Rexdale, Ontario, 281 p.
69. J.P. Holman, *Heat Transfer*, 8/E, McGraw-Hill, Inc.(1997).
70. I. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4/E, John Wiley & Sons

Inc.(1981).

71. Mathey, R.G. and D. Watstein, "Investigation of Bond in Beam and Pull-out Specimens with High-Yield strength Deformed Bars, "ACI Journal, Vol. 62,p1071-1090, March 1961.

附件一 期初簡報會議記錄及處理情形

審查委員	審查意見	回覆說明
高教授健章	1、輕質骨材之密度範圍甚大，從 0.1g/cm^3 至 1.0g/cm^3 之間，是否分成結構輕質混凝土與非結構輕質混凝土（隔間用）來研擬其相關規範，且依本研究有限經費下，選擇較重要且典型之密度與強度之輕質混凝土範圍，訂定其可用規範與相關物理性質。	謝謝委員意見。本計畫的輕質骨材密度約為 $1.2\sim 1.4\text{g/cm}^3$ ，目前僅針對此種最常使用等級之輕質骨材進行測試。
張教授大鵬	1、設計規範之研擬在本階段研究過程中宜集中國內現有或可製作的輕質骨材為主（如國內目前正極力推展之水庫淤泥製作之輕質骨材），並與以區分成不同用途及力學需求之不同等級輕質混凝土。	本計畫即以石門水庫之淤泥製成的輕質骨材進行相關試驗，其強度等級共考慮三種，20 MPa、40 MPa 及 60 MPa。
	2、設計規範中經常必須加以引用的數據，如彈性模數、柏松比、抗壓強度、抗張強度、剪力強度等設計值或公式之建立宜在研究期間予以確定，並在期末列入規範中。	謝謝委員意見，本計畫中已探討抗壓強度、握裹強度、抗剪強度、彈性模數、抗張強度等力學性質，並與現行之設計規範進行比對。
	3、設計規範中所需的各項乾縮、潛變等工程性質之估算方式、公式等亦宜在規範中加以釐定。	本計畫不包含時間性變形探討。
黃教授然	1、提案書完整詳備。	謝謝委員意見。
	2、有關 LWAC 設計規範研擬，建議先行訂定輕質粒料之範圍，並探討尺寸效應對於樑行為影響之程度。	謝謝委員意見。輕質粒料之分類及範圍，已訂定於 CNS 規範中，粒料尺寸效應並未包含於本文研究範圍中。
	3、防火試驗建議選定結構輕質混凝土及非結構輕質混凝土各一種進行研究。	謝謝委員意見。本研究針對結構混凝土樑及非結構性隔間牆版進行防火試驗。

<p>詹教授</p>	<p>1、建議朝「標準設計斷面」、「標準跨度」的選定入手，進行深入的結構性能測試，「標準輕質樑」之選定以不超過三種為限，設計強度一種，如此應可在期末獲致可立即應用之研究成果。</p>	<p>謝謝委員意見。本文針對輕質混凝土材料行為進行研究，未涉及斷面尺寸形狀等因子。</p>
<p>穎雯</p>	<p>2、關於握裹力之量測另有束制條件與上筋效應未納入探討範圍，建議考慮朝向「標準設計斷面」、「標準跨度」之握裹力驗證，此可保證標準斷面與跨度樑之安全。</p>	<p>謝謝委員意見。本研究探討輕質混凝土材料之握裹力行為，未涉及斷面尺寸因子。</p>

附件二 期中簡報會議記錄及處理情形

審查委員	審查意見	回覆說明
高教授 健章	1、輕質 RC 混凝土，可能較具競爭優勢在於鋼構造之 Deck 樓板之應用，因其傳熱性質低較能耐火災，故有些國家有免做防火被覆之規定，因此建議本案期末段可做 Deck 樓板輕質混凝土之火燒試驗後，做其結構行為試驗。	本計畫中尚未將輕質骨材 Deck 樓板納入試驗，在未來的計畫中，可考慮予以納入。
	2、抗壓強度大於 50 MPa 時，輕質混凝土之握裹應力會大於常重混凝土，其理由為何，請試解釋說明。	輕質混凝土之抗壓強度若欲與常重混凝土相同，則需提高其水泥砂漿之強度，尤其高強度混凝土，因此而造成輕質混凝土之握裹力會大於常重混凝土。
張教授 大鵬	1、「設計規範」影響日後國內使用輕質骨材混凝土之安全性及耐久性甚巨，研究案之期中報告中指出有四項：(1)破裂模數；(2)抗剪強度；(3)鋼筋延展長度；(4)彈性模數。目前的研究項目主要著重於(1)握裹長度(p. 25)；(2)樑剪力強度(p. 25)；(3)等值矩形應力塊參數(p. 27)；(4)防火性質(p. 28)；(5)隔熱性質(p. 30)。其中部分試驗結果(如高強度 LWC 之握裹強度高於 NC 者)宜與國外相關研究結果再作比較印證，以確保其重現性，同時亦考慮第(1)、(4)項之探討。	謝謝委員意見，已與相關國外文獻比較並討論之。
	2、乾燥試體耐火性質優於常重者，但含水量較高者則相反，如何訂出達到乾燥程度之策略，可考慮在期末報告中加入。	謝謝委員意見。本文未納入混凝土乾燥時程之研究。
	3、(p. 19) 圖 2-2 結果較特殊，請再查核或予以說明。	輕質骨材的粒徑愈大，其骨材內部的孔隙愈多，所以呈現出的點壓強度就會隨著骨材粒徑愈大而降低。

蘇 教 授 南	1、本研究到目前於力學性質與隔熱性質已有不錯之成果，建議後續研究中，對設計規範可參考 ACI Committee 211, ACI 211.2, ACI304.5R，或中國土木工程學會混凝土工程設計規範，施工規範等之格式編撰，以增可讀性。	謝謝委員意見。
	2、由於輕質骨材之單價成本比河川骨材超出數倍（約 3 至 5 倍之多），故在推廣使用及報告撰寫上，除結構力學性質外，宜多著墨隔熱、輕隔間、省能、資源再利用（水庫淤泥）、乾式或預鑄施工法之開發，節省施工人力等面向。	謝謝委員意見，已於完整期末報告中補述。
	3、建議建研所及中華民國節能輕質混凝土推廣協會，在推廣國人使用本材料，宜加入從顧客導向來看此新產品，針對其特色、優點及業界疑點（耐震、漏水、成本、使用壽命等）再增著墨。	謝謝委員意見。
王 建 築 師 立 信	1、第二十九頁第二行 CNS 12514 請修正為 CNS 12514。	謝謝委員意見，已於報告書中修正。
	2、建議加入輕質及常重混凝土國外使用情形與比例。	謝謝委員意見，已於報告書中增列。
	3、建議增加輕質骨材化學性質試驗（因水庫淤泥有太多有害化學物質）。	已於期末報告中補述。
	4、建議應將其缺點或不利點，在此報告中列入，應平衡撰寫（如價格等）。	謝謝委員意見，已於報告書中補述。
	5、建議增加常溫戶外或雨天多日之輕質混凝土含水率試驗。	謝謝委員意見。本文未納入此項研究。

附件三 期末簡報會議記錄及處理情形

審查委員	審查意見	回覆說明
蘇 總 務 長 南	1. 本案研究架構嚴謹，成果豐碩，值得肯定。 2. 輕質骨材混凝土構件（樑、版）等之耐久性，對臺灣鹽害環境之設計參數、材料配比因素宜再進行後續研究。 3. 有關設計規範部分似非能於本案之短短期間內可完成，建議擬訂多年期計畫，建立團隊分年執行。	謝謝委員意見。
	4. 對破裂韌性、耐震等特性，建議可在文獻探討中加強；又輕質骨材用於非結構性隔間牆之防火性，建議在文獻探討中討論，或未來另案研究。	已說明於成果報告 P.11 之第 7 點及 P.13 第三段。
張 教 授 大 鵬	1. 本案研究內容充實，實驗結果有助於日後實際使用上之參考。	謝謝委員意見。
	2. 據本研究報告之圖 2-2 顯示，顆粒 point loading 隨其直徑增加而減小，其原因可能因為大顆粒內體積較鬆散之故，而表 3-11 所顯示之顆粒單位重則無此現象，建議能稍加說明，以利日後工程人員之參考依據。	已補充說明於成果報告 P.29。
	3. 建議另列章節，將研究案名稱所列「設計規範」相關研究成果（已完成之實驗結果）整理列出，以符合研究案日後參考使用。	已另列章節於 P.58~P.60。
高 教 授 建 章	1. 有關輕質骨材混凝土之規範，重點均在靜態範圍，適合重力為主之垂直力構架分析設計。至於耐震構架之分析設計，例如反覆荷重行為抗彎性能，以及梁柱接頭區之抗剪能力，尚需探討。	非本研究範圍，但國科會已有類似研究案。
	2. 在國外，鋼構樓板使用 deck 板，若配合使用輕質骨材混凝土，可享不施作防火被覆之優惠。對此若能加以探討，不失為廣用輕質骨材混凝土之誘因。	謝謝委員意見，將列為往後研究參考。

黃 教 授	1. 本研究結果已具體顯示輕質骨材混凝土構件力學特性、防火及耐熱特性，具有相當之實務價值。相關實驗結果可作為使用相關設計規範之修正參數。	謝謝委員意見。
然	2. 建議於結論中，能較清楚地說明本研究所使用之輕質骨材來源及特性，俾供工程界能適當應用本研究之成果。	已補充說明於成果報告 P.97。