

內政部建築研究所



研究計畫成果報告

鋼結構輕質骨材混凝土建築
之經濟性評估

計畫主持人：蕭江碧

共同主持人：顏聰

黃玉麟

湯兆緯

研究單位：內政部建築研究所

計畫編號：MOIS 912036

執行期程：九十一年八月至九十一年十二月

中華民國九十一年十二月

內政部建築研究所研究計畫成果報告

鋼結構輕質骨材混凝土建築 之經濟性評估

計畫主持人：蕭江碧

共同主持人：顏聰、黃玉麟、湯兆緯

研究助理：賴坤毅、卓玉娟、張智淵

研究單位：內政部建築研究所

計畫編號：MOIS 912036

執行期程：九十一年八月至九十一年十二月

ARCHITECTURE & BUILDING RESEARCH INSTITUTE

MINISTRY OF INTERIOR

RESEARCH PROJECT REPORT

Economy Assessment for Steel-structure
Buildings Using Lightweight Aggregate
Concrete

BY

SHIAO, JING PI

YEN, TSONG

HUANG, YUE-LIN

Tan, Drau Wei

Lai, Kwin Yi

Draw, Yue Dran

Chan, Dru Yuan

December, 2002

目 錄

	頁碼
摘 要 -----	I
ABSTRACT -----	II
目 錄 -----	III
表 目 錄 -----	IV
圖 目 錄 -----	V
第一章 緒 論 -----	1
第一節 研究緣起 -----	1
第二節 國內外相關研究情況 -----	3
第三節 研究方法 -----	4
第二章 鋼結構輕質混凝土建築之建造成本分析 -----	9
第一節 前 言 -----	9
第二節 研究方法 -----	9
第三節 建築物之基本資料及分析結果 -----	10
第四節 建造成本經濟效益評估 -----	17
第五節 小 結 -----	20
第三章 鋼結構輕質混凝土建築之能源成本分析 -----	48
第一節 緣起與目的 -----	48
第二節 理論與方法 -----	49
第三節 研究過程與結果 -----	52
第四節 小 結 -----	57
第四章 結 論 -----	71
參 考 文 獻 -----	73

表目錄

	頁碼
表 1-1 -----	6
表 2-1 -----	21
表 2-2 -----	21
表 2-3 -----	22
表 2-4 -----	23
表 2-5 -----	24
表 2-6 -----	26
表 2-7 -----	28
表 2-8 -----	30
表 2-9 -----	32
表 2-10-----	33
表 2-11-----	34
表 2-12-----	35
表 3-1 -----	59
表 3-2 -----	60
表 3-3 -----	61
表 3-4 -----	62
表 3-5 -----	62
表 3-6 -----	63

圖目錄

	頁碼
圖 1-1 -----	8
圖 2-1 -----	36
圖 2-2 -----	36
圖 2-3 -----	35
圖 2-4 -----	38
圖 2-5 -----	39
圖 2-6 -----	39
圖 2-7 -----	40
圖 2-8 -----	41
圖 2-9 -----	42
圖 2-10 -----	43
圖 2-11 -----	44
圖 2-12 -----	45
圖 2-13 -----	45
圖 2-14 -----	46
圖 2-15 -----	46
圖 2-16 -----	47
圖 3-1 -----	64
圖 3-2 -----	65
圖 3-3 -----	66
圖 3-4 -----	66
圖 3-5 -----	67

圖 3-6	-----	67
圖 3-7	-----	68
圖 3-8	-----	68
圖 3-9	-----	69
圖 3-10	-----	69
圖 3-11	-----	70
圖 3-12	-----	70

摘 要

關鍵詞：水庫淤泥、輕質骨材、輕質骨材混凝土、鋼結構建築

水庫淤泥燒結輕質骨材在全世界尚無先例，台灣目前已有廠商成功開發此項技術，此舉可使水庫淤泥資源化，本研究目的在評估此資源使用於鋼結構建築之經濟效益問題，本研究分兩個方面予以評估，其一為建造成本之評估，根據目前已有廠商燒製成功之水庫淤泥輕質骨材之材料性質、混凝土性質及成本等資料，計算鋼結構輕質骨材混凝土建築物之建造成本，並與鋼結構常重混凝土建築物作比較，合計針對虛擬之 7 層、20 層及 60 層鋼結構建築進行分析，並以一棟實際案例予以驗證。其二為能源成本評估，由於輕質混凝土之隔熱效果比常重混凝土為佳，根據以往研究之輕質骨材混凝土熱傳性質，計算使用輕質骨材混凝土作為外牆建築物之長期能源成本，並與常重混凝土建築物作比較。研究結果顯示，輕質骨材混凝土雖較常重混凝土昂貴約 50%，但由於其重量較輕，鋼結構斷面可以減小，因為鋼結構甚為昂貴，使用輕質骨材混凝土之合計建造成本在較高樓層以後反而較為便宜，不過其變化會與總靜載重之大小有關，在本研究虛擬之結構系統下，總靜載重為 $370\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，從第 42 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；總靜載重為 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，從第 26 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；總靜載重為 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，從第 13 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜。另外，不同結構系統也會影響變化趨勢。在能源成本評估方面，使用輕質骨材混凝土作為外牆建築物亦顯示明顯之隔熱效應，在能源方面可節省大量能源經費，產生長期連續之經濟效益，因此雖然較低樓層使用輕質骨材混凝土之建造成本較為昂貴，但若合併考慮能源成本時，長期之經濟效益仍具優勢。

ABSTRACT

Keywords: sediment, lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete, steel structure

There is no previous case in lightweight aggregate burned from reservoir sediment all over the world. But in Taiwan one factory has successfully developed this technology recently. This technology can change the sediment into resource. The purpose of this project is to assess the economy of the steel structure built using the lightweight aggregate concrete (LWAC). The assessment is divided into two aspects. One is the construction cost. The other is energy cost. In the aspect of construction cost, three simulated buildings of 7, 20 and 60 floors were analyzed and one real building of 26 floors was used to verify the analysis. In the aspect of energy cost, the LWAC's better property in heat insulation was evaluated and compared with the normal weight aggregate concrete (NWAC). The analyzed results in the aspect of construction cost indicate that although the cost of the LWAC is 50% higher than NWAC, the high-rise building made by LWAC can be cheaper than that made by NWAC after some turning-point floor. But the turning points will be influenced by the total dead load. In the structure system used in this project, the turning point will be at 42nd floor if the total dead load is 370kg/cm², 26th floor if the total dead load is 700kg/cm² and 13th floor if the total dead load is 1000kg/cm². In addition, the analyzed results also show that the turning point will be affected by different structure systems. The analyzed results in the aspect of energy cost indicate that using LWAC to form the outer walls of buildings have obvious effect of heat insulation. The LWAC can create a great deal of economic benefit in the long term. Therefore, although using LWAC to construct the lower level buildings is more expensive, it still has an advantageous position if the long term energy factor was taken into consideration.

第一章 緒論

第一節 研究緣起

輕質骨材混凝土(Lightweight Aggregate Concrete- LWAC)係由輕質骨材取代傳統骨材所製成之混凝土材料，具有質輕、可隔熱、耐火性強、耐震性佳且強度夠之優點；歐美先進國家於二十世紀初即開始生產輕質骨材，並使用於結構工程與非結構性用途上。近年來，北歐國家更引用高性能輕質骨材混凝土之概念將之應用於大跨度預力橋樑之興建，亦獲得良好之評價。位於地震帶上的台灣地區，近年來高樓及大型公共工程遽增，且因屬於亞熱帶，能源節約需求日益迫切，發展輕質混凝土取代傳統之混凝土建材，就整體經濟效益而言，具有十足之重要性與需求性。尤以歷年來政府推動公共工程建設，導致台灣地區骨材來源日益缺乏；另一方面又因重視水土保持而逐步禁止河川砂石之開採，在砂石取得日益困難的情況下，可供燒製輕質骨材的料源蘊藏豐富的台灣地區，今後開發輕質骨材應是可以預期的。

台灣主要 46 個水庫目前淤泥沉積問題非常嚴重，1993 年以前之淤積情形如表 1-1(參考文獻中部分[1])所示，總淤積量約為五億立方公尺，平均淤積率約 20%，且每年仍以 2 千萬立方公尺之淤積量持續淤積中，相當於每年損失一座明德水庫。水庫淤泥之浚挖沒有問題，問題在於挖出之淤泥如何處理，水庫淤泥含有有機物質，根據環保規定，必須先行處理才能於他處堆放，而處理費用非常昂貴，堆放地點也是無處可放，因此水庫淤泥不但是水庫容量日益變小之問題，若要處理它又變成環保問題。水庫淤泥係從陸地沖刷而來，大部分為可燒結成輕質骨材之成分，若能有效益地自水庫淤泥燒結輕質骨材，則不但可以降低目前日益嚴重之骨材來源缺乏問題，更可以將水庫淤泥資源化，將原來水庫淤泥衍生之水庫容量問題及環保問題一併解決。

水庫淤泥燒結成輕質骨材之大方向是正確無誤的，然而燒結完成之輕質骨材之去化問題如何？是否會因為品質不良或成本昂貴造成去化不良變成整個方向之失敗？在歐美日本輕質骨材已有使用 30 年以上之歷史，代表輕

質骨材與混凝土有其存在之空間，在台灣應該也不會例外，且台灣只要骨材來源日益缺乏，輕質骨材與混凝土之存在空間將日益擴大，加上歐美日本是陸採型輕質骨材，雜質較多品牌較差，製作步驟較多（採礦、擊碎、研磨、過濾、造粒、烘乾、燒結等），台灣若以水庫淤泥製造輕質骨材，將可省略研磨以前之工作，會有效降低製造成本。本研究探討之主題為一使用輕質骨材混凝土於鋼結構建築物上，即為輕質骨材去化方式之一。

使用輕質骨材混凝土於建築結構上有許多優點，在耐震方面之優點，最明顯的就是結構物之自重降低，較小自重意味著在地震中會產生較小地震力，因而可減小結構件之斷面積，即可降低建造成本；若從另一角度比較，如果結構件斷面積一樣，輕質骨材混凝土結構可以增加柱間跨度，增加使用淨空，創造經濟價值。另外，根據以往研究成果，輕質骨材混凝土之阻尼比常重混凝土大，因而可降低建築物之動態反應行為(參考文獻外文部分[1]~[5])，增加建築物之耐震能力。在能源及舒適度方面之優點，輕質骨材混凝土之隔熱及隔音效果均較常重混凝土為佳(參考文獻中文部分[2][3]、外文部分[6])，就較佳之隔熱性而言，若建築物之樓板及外牆使用輕質骨材混凝土，則整棟建築物之能源費用將較為低廉，經過長久時間後，建築物愈大所節省之能源經費將愈可觀；同理，在節省隔音成本方面，也具有同樣效益。此外，LAC亦有較佳之耐火性，可提高 LAC 建築物在火災中之安全性，就經濟效益而言可降低火險費率及降低火災損失。然而，輕質骨材混凝土亦有其缺點，例如在同樣配比條件下，各項指標強度(抗壓強度、抗彎強度、及抗剪強度等)均較常重混凝土差；輕質骨材之燒結過程緩慢且細節繁雜，相對於一般常重骨材，輕質骨材之製造成本較高；另外，燒結輕質骨材之品質穩定性不佳，仍有待學術界與企業界之研發改善等。

目前已有廠商成功地將水庫淤泥燒結成輕質骨材，本研究擬越過其基本性質之研究，先直接探討以之使用於鋼結構輕質骨材混凝土建築物之成本效益問題。本研究所探討建築物之結構系統為混凝土填充鋼管(Concrete Filled Tube- CFT)柱、鋼結構樑、混凝土樓板及混凝土外牆，所有研究課題均針對

常重混凝土(Normalweight Aggregate Concrete-NWAC)與輕質混凝土加以比較。本研究將分為兩個方向進行研究，其一為在同樣耐震能力條件下之建造成本分析比較，其二為在同樣室內外溫差條件下之能源成本分析比較。

第二節 國內外相關研究情況

輕質骨材可大要的分成天然和人造兩大類；天然的輕質骨材大都為含有孔隙組織的火山噴出岩，是由火山岩漿自不同的深度噴出火山口後，冷卻成形狀、性質各異的多孔隙材料。較為重要也被人們實際應用過的天然輕質骨材有浮石、泡沫火山岩等，其中又以浮石較為普遍。由於天然輕質骨材的產量有限，品質穩定性上也較差，經過一段時間的採掘使用後，即趨於枯竭，並非理想可信賴的骨材來源。因此在人造輕質骨材成功生產後，此類骨材的實用性就逐漸被取代而趨於沒落。

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、火山玻璃石、生雲母等燒製而成的膨脹粘土、膨脹頁岩、真珠石、蛭石等，以及由工業廢料如爐石、飛灰等製作成的膨脹爐石、燒結飛灰及冷結飛灰等，其外形、顆粒結構、顏色等各異，顆粒密度的分佈範圍甚廣，由 100kg/m^3 到 2000kg/m^3 之間，故性質的差異度甚大(參考文獻中文部分[4]、外文部分[7][8])。

輕質骨材的發展，以歐美國家較早；美國於 1917 年即著手以旋窯生產膨脹頁岩與膨脹黏土的輕質骨材(參考文獻外文部分[9])。第一次世界大戰期間(1919~1927)，美國大量使用輕質骨材建造混凝土貨船隊(約 100 艘)，及高層樓如 Park Plaza Hotel(聖路易斯)和 Bell Telephone Building(堪薩斯市)。二次世界大戰前後，美國國家房屋署大力推動輕質混凝土(Lightweight Aggregate Concrete，簡寫 LWAC)之使用，並提供龐大基金釐定廣泛的研究。1950 年代房屋構架、橋面版及預鑄構件等普遍使用輕質混凝土，芝加哥的 42 層高樓(Prudential Life Building)就是以 LWAC 建造的(參考文獻中文部分

[5])。英國於 1954 年起即陸續利用倫敦粘土燒製而成之輕質骨材應用於建築物及橋樑上(參考文獻英文部分[11])，最典型的實例為 Australia Square Tower，樓高總計 184 公尺、半徑 41 公尺，50 層之辦公大樓幾乎全由輕質骨材混凝土建造而成。挪威更於 1989 年起陸續應用高達 75MPa 之高強度輕質骨材(膨脹粘土)混凝土於大型橋樑建築上(參考文獻英文部分[12])。日本由於經濟之高度發展、天然骨材之枯竭等原因，早期即積極探求以人造輕質骨材補充應用。其平均年生產量達到 100 萬立方公尺(參考文獻英文部分[13])，強度也由 9MPa、15~18MPa 提高到 22~30MPa，普遍使用於土木及建築工程中。

第三節 研究方法

本研究主要在探討鋼結構建築物使用輕質骨材混凝土之經濟效益問題，將分為兩個方向進行研究，其一為在同樣耐震能力條件下之建造成本分析比較，其二為在同樣室內外溫差條件下之能源成本分析。此兩項工作內容均須與鋼結構常重混凝土建築作比較。兩項研究工作之研究方法敘述如下：

1. 鋼結構輕質混凝土建築之建造成本分析

本研究將虛擬 7、20、60 層及一棟真實存在之 26 層鋼結構建築物進行結構分析及成本分析，挑選不同層數大樓之原因，是因為使用輕質混凝土之經濟效益可能隨樓層數之不同而不同。對於上述虛擬之每一種樓層數，在相同結構系統、結構平面、結構立面情況下，分別使用常重混凝土及輕質混凝土進行分析，建築物均配置合理之樓層面積、柱間跨度及樓層高度，建築物之結構形狀均為正方形，結構件型態為鋼筋輕質或常重混凝土樓版、鋼樑、輕質或常重混凝土填充鋼管柱(CFT)、及輕質或常重混凝土外牆，所有建築物均假設無地下層，均假設在地面處為固定端，換言之只進行地面層以上建造成本之分析比較，未來在實際應用上也應是地面層或地面數層以上才開始使用輕質混凝土。

首先對大樓進行結構分析及設計工作，在相同之耐震能力要求下(例如

0.33g 之加速度), 依據設計規範分別先對三種樓層數之 NWAC 大樓作結構分析及設計工作, 在鋼構斷面選定之後, LWAC 大樓也使用完全一樣之鋼構進行結構分析工作, 然後以斷面之內力比當作所需之斷面比。以此作為二棟大樓在耐震能力相同情況下之成本比較。

2. 鋼結構輕質混凝土建築之能源成本分析

由於輕質混凝土之隔音及隔熱效果較常重混凝土為佳, 使用輕質混凝土作為外牆之建築物, 其能源成本會較為節省, 本計畫擬進行能源成本之分析及比較, 分析方法為假設都是中央空調情況、僅有外牆(無內部隔間牆)、參考台灣之氣候條件、及室內均須維持 25°C 溫度等條件, 分析比較其能源成本, 此項比較預估會隨時間之長久顯現較大之差異。

本研究計畫主要在作常重及輕質混凝土大樓之成本分析及比較工作, 成本分析分為建造成本分析及能源成本分析, 最後再加以綜合比較, 整體研究之程序與步驟如圖 1-1 之流程圖所示。

表 1-1 台灣現有水庫淤積量統計表[1]

完工年	水庫名稱	原蓄水量 (萬立方公尺)	淤積量 (萬立方公尺)	淤積率 (%)	統計 淤積年
1748	中正湖	54.00	14.85	27.50	1989
1841	虎頭埤	135.80	45.60	33.58	1990
1908	粗坑壩	24.00	12.00	50.00	不詳
1920	觀音湖	64.48	18.08	28.04	1963
1926	西勢	65.17	25.63	39.33	1992
1930	烏山頭	15415.80	7039.90	45.67	1986
1934	武界調整池	1400.00	1381.20	98.66	1969
1934	日月潭	17162.10	3294.60	19.20	1988
1937	銃櫃調整池	12.05	1.75	14.52	1993
1938	尖山埤	360.00	52.60	14.60	1986
1939	鹿寮溪	378.33	250.03	66.09	1988
1941	桂山壩	15.25	6.05	39.67	不詳
1942	內埔子	9.57	21.57	23.82	1988
1944	蘭潭	970.30	21.70	2.24	1990
1952	天輪調整池	59.00	19.00	32.20	1973
1952	阿公店	2050.00	1459.00	71.17	1991
1952	澄清湖	500.00	64.30	12.86	1993
1954	阿玉壩	13.30	4.60	34.59	不詳
1954	羅好壩	30.40	3.80	12.50	不詳
1954	溪畔調整池	35.40	1.40	3.95	1989
1955	鹽水埤	75.58	52.08	68.91	1991
1955	水簾壩	20.98	0.18	0.85	1989
1956	德元埤	385.30	148.30	38.49	1987
1958	龍鑾潭	379.00	16.10	4.25	1978
1959	霧社	14860.00	4280.00	28.80	1991
1959	龍溪調整池	21.21	0.70	3.30	1989
1960	大埔	900.00	461.30	51.26	1989
1961	谷關	1320.00	615.50	46.63	1975
1964	石門	30912.00	7345.10	23.76	1988
1964	石門後池堰	320.00	102.10	31.91	1986
1965	白河	2509.34	912.84	36.38	1992

表 1-1(續) 台灣現有水庫淤積量統計表[1]

完工年	水庫名稱	原蓄水量 (萬立方公尺)	淤積量 (萬立方公尺)	淤積率 (%)	統計 淤積年
1970	明德	1770.00	345.00	19.49	1989
1970	青山調整池	60.00	19.00	31.67	1978
1973	成功	108.40	0.80	0.74	1991
1973	曾文	70800.00	7372.80	10.41	1991
1974	德基	23200.00	5566.90	24.00	1986
1977	石岡	338.00	134.40	39.76	1989
1978	直潭	420.00	95.20	22.67	1994
1979	頭社	30.37	4.34	14.29	1991
1980	鏡西	115.00	10.90	9.48	1988
1984	榮華壩	1240.00	441.00	35.56	1988
1984	永和山	2958.00	74.00	2.50	1987
1984	鳳山	920.00	133.10	14.47	1993
1985	寶山	556.90	9.80	1.76	1988
1987	翡翠	40600.00	5239.70	12.91	1992
1987	仁義潭	2911.30	129.20	4.44	1990
合計		236567.73	47248.00	19.97	

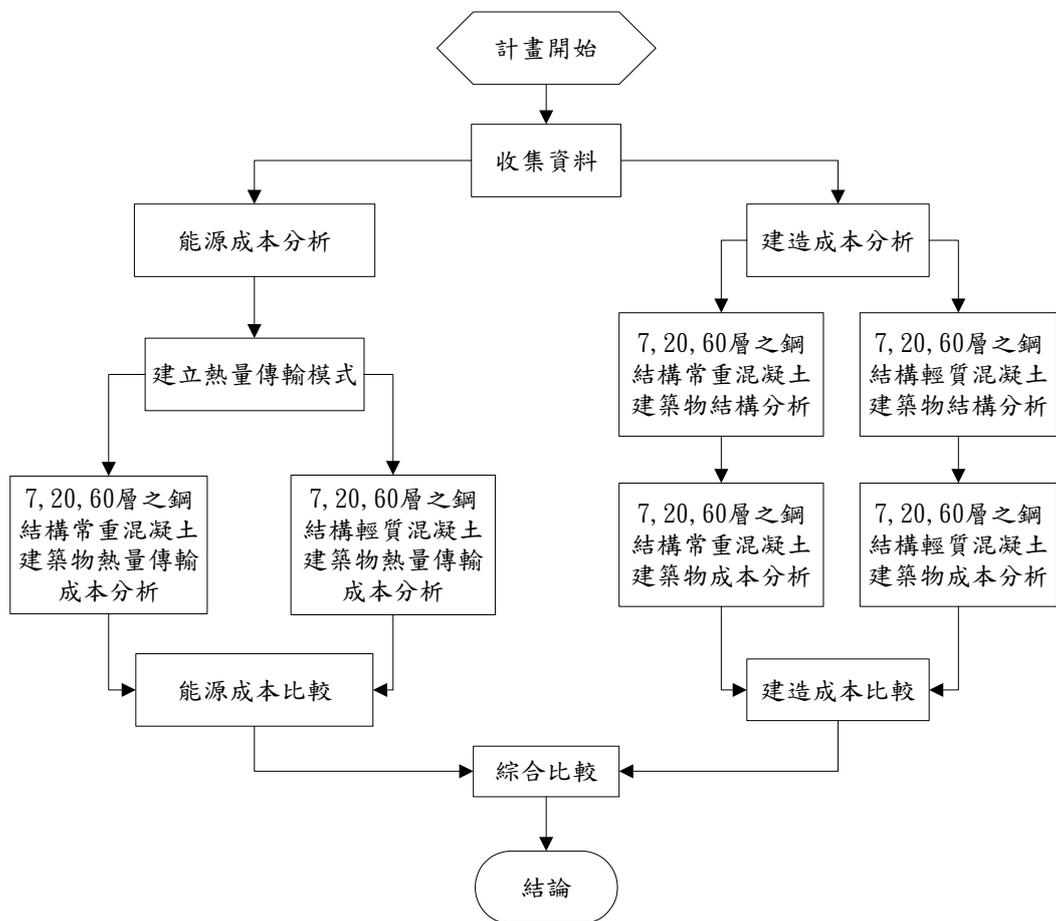


圖 1-1 本研究計畫之研究方法與步驟流程圖

第二章 鋼結構輕質混凝土建築之建造成本分析

第一節 前言

輕質骨材混凝土(Lightweight Aggregate Concrete-LWAC)甚至已經可以製成高強度產品，使用在結構件上沒有強度不足之問題，但因結構用輕質骨材較常重骨材貴，導致輕質骨材混凝土較常重混凝土(Normalweight Aggregate Concrete-NWAC)貴，其比值大約為 1.5 倍，使得輕質骨材混凝土表面上似乎不具經濟效益而失去競爭力。本研究之研究對象為鋼結構建築，由於鋼結構之單價很貴，輕質骨材混凝土之質輕特性，可使整棟建築物之總重量變輕，當地震來臨時也使得建築物承受較低之地震力，因而可使鋼結構之斷面變小，造成降低程成本之效應，合計前述輕質骨材混凝土較貴之效應，LWAC 鋼結構建築物之建造成本效益為何？建造成本效益與樓層數之關係如何？為本章之主要研究課題。

第二節 研究方法

本研究將針對虛擬之 7、20 及 60 層之鋼結構建築物及一棟真實存在之鋼結構建築物，對它們進行結構分析及建造材料成本分析，挑選不同層數大樓之原因，是因為使用輕質混凝土之經濟效益可能隨樓層數目之不同而不同，本研究將探討經濟效益與樓層數目之關係；挑選一棟真實存在之鋼結構建築物之原因，係因虛擬建築物可能過於簡化，與一棟真實存在之鋼結構建築物一起分析比較，可以校核虛擬建築物之代表性。將上述之每一種樓層數建築物，在相同結構系統、結構平面、結構立面情況下，分別配備常重混凝土及輕質混凝土進行分析，建築物均配置合理之樓層面積、柱間跨度及樓層高度，建築物之結構形狀均為正方形，結構件型態為鋼筋輕質或常重混凝土樓版、鋼樑、輕質或常重混凝土填充鋼管柱(TFC)、輕質或常重混凝土外牆，

所有建築物均假設無地下層，均假設在地面處為固定端，換言之只進行地面層以上建造成本之分析比較，未來在實際應用上，地下層使用輕質混凝土之機會很小，主要因為地下層結構之重量引發之地震力較小，輕質之特性並無明顯優勢，且下部結構具有較大重量反而較為穩定，因而下部結構使用常重混凝土反而較為合理。

本章之研究步驟將先對大樓進行結構分析及設計工作，然後才進行成本分析比較工作。在進行結構分析及設計工作時，選定三種靜載重進行分析：約為 370kg/m^2 、 700kg/m^2 及 1000kg/m^2 ，在相同之耐震能力要求下(例如 $0.33g$ 之加速度)，依據設計規範分別先對三種樓層數之 NWAC 大樓作結構分析及設計工作，在鋼構斷面選定之後，LWAC 大樓也使用斷面完全一樣之鋼構進行結構分析工作，然後以內力比當作鋼結構所需之斷面比，然後分別乘以 LWAC、NWAC、鋼結構之單價，進行 LWAC 及 NWAC 二棟大樓在耐震能力相同情況下之建造成本比較。

分析軟體採用 ETABS，依照建築物耐震設計規範進行結構分析，地震加速度採用 $0.33g$ ，動力分析部分執行振態、基本週期分析、動態反應譜分析；鋼結構樑柱之設計方法採用 ASD 規範。

第三節 建築物之基本資料及分析結果

一、虛擬之 7 樓鋼結構建築物

1. 建築物之基本資料

(1)結構系統：虛擬 7 樓鋼結構建築物之平面如圖 2-1 所示，兩方向各有三跨，每跨為 6 公尺，為正方形之鋼骨韌性立體剛構架系統，鋼柱採用 TFC(Tube-filled Concrete)柱，鋼樑均採用寬翼樑(H-beam)。本大樓無地下室，一樓底部均假設為固定端(Fixed Ends)；大樓三面為混凝土外牆，一面為帷幕牆。每層樓高 3 公尺。

(2)結構尺寸：參考圖 2-1，柱為 70 公分之 TFC 正方形柱，厚度為 0.4 公分

；樑採用 W12×22 鋼樑；R.C.外牆厚度為 15 公分；混凝土樓版厚度為 12 公分。

(3)材料強度：鋼骨採用 A50 Steel，混凝土強度為 210 kg/cm^2 。

(4)材料性質： $E_s=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ；常重混凝土之單位重量為 2.3 ton/m^3 ，輕質混凝土之單位重量為 1.8 ton/m^3 。

(5)樓版載重：樓版之活載重頂樓採用 250 kg/m^2 ，其他樓層為 300 kg/m^2 。靜載重方面常重混凝土結構頂樓為 410 kg/m^2 ，其他樓層為 370 kg/m^2 ；輕質混凝土結構頂樓為 350 kg/m^2 ，其他樓層為 310 kg/m^2 。

2. 結構分析結果

(1)分析模式：分析模式之平面如圖 2-2 所示，立體如圖 2-3 所示。

(2)自然週期：常重 1.37 秒；輕質 1.22 秒。

(3)輕質混凝土鋼骨結構與常重混凝土鋼骨結構之內力比：

本研究以相同之鋼骨結構系統與斷面去承受常重混凝土及輕質混凝土之垂直載重及地震力，然後以內力比當成需要之斷面比，以此方式進行經濟效益評估。

虛擬 7 樓各樑之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均值來顯示其代表之內力比，如表 2-1 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構樑斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構樑斷面之內力小，輕質/常重之比值各樓層幾乎全部相同，都為 0.89，全棟之平均值亦為 0.89，根據本研究之研究方法，在類似本研究虛擬 7 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構樑之斷面可約節省 11%。

虛擬 7 樓各柱之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均質值來顯示其代表之內力比，如表 2-2 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構柱斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構柱斷面之內力小，輕質比常重之比值各樓層相差不大，分布在 0.87 與 0.91 之間，且大都在 0.89

附近，全棟之平均值為 0.89，根據本研究之研究方法，在類似本研究虛擬 7 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土時，鋼骨結構柱之斷面約可節省 11%。

二、虛擬之 20 樓鋼結構建築物

1. 建築物之基本資料

(1)結構系統：虛擬 20 樓鋼結構建築物之平面如圖 2-4 所示，兩方向各有五跨，每跨為 10 公尺，為正方形之鋼骨韌性立體剛構架系統，鋼柱採用 TFC(Tube-filled Concrete)柱，鋼樑均採用寬翼樑(H-beam)。本大樓無地下室，一樓底部均假設為固定端(Fixed Ends)；大樓三面為混凝土外牆，一面為帷幕牆。每層樓高 3 公尺。

(2)結構尺寸：

17F~RF：柱—130 公分之 TFC 柱， $t=0.6$ 公分；樑—W21×55 鋼樑

12F~16F：柱—130 公分之 TFC 柱， $t=1.1$ 公分；樑—W21×55 鋼樑

7F~11F：柱—130 公分之 TFC 柱， $t=1.8$ 公分；樑—W21×55 鋼樑

2F~6F：柱—130 公分之 TFC 柱， $t=2.5$ 公分；樑—W21×55 鋼樑

R.C.外牆厚度為 15 公分；混凝土樓版厚度為 12 公分。

(3)材料強度：鋼骨採用 A50 Steel，混凝土強度為 210 kg/cm^2 。

(4)材料性質： $E_s=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ；常重混凝土之單位重量為 2.3 ton/m^3 ，輕質混凝土之單位重量為 1.8 ton/m^3 。

(5)樓版載重：樓版之活載重頂樓採用 250 kg/m^2 ，其他樓層為 300 kg/m^2 。靜載重方面常重混凝土結構頂樓)為 410 kg/m^2 ，其他樓層為 370 kg/m^2 ；輕質混凝土結構頂樓為 350 kg/m^2 ，其他樓層為 310 kg/m^2 。

2. 結構分析結果

(1)分析模式：分析模式之平面如圖 2-5 所示，立體如圖 2-6 所示。

(2)自然週期：常重 4.33 秒；輕質 3.90 秒。

(3)輕質混凝土鋼骨結構與常重混凝土鋼骨結構之內力比：

本研究以相同之鋼骨結構系統與斷面去承受常重混凝土及輕質混凝土之垂直載重及地震力，然後以內力比當成需要之斷面比，以此方式進行經濟效益評估。

虛擬 20 樓各樑之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均值來顯示其代表之內力比，如表 2-3 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構樑斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構樑斷面之內力小，各樓層輕質/常重之比值非常接近，分布在 0.86 與 0.92 之間，全棟之平均值為 0.877，根據本研究之研究方法，在類似本研究虛擬 20 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構樑之斷面可節省 12.3%。

虛擬 20 樓各柱之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均質值來顯示其代表之內力比，如表 2-4 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構柱斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構柱斷面之內力小，輕質/常重之比值各樓層相差不大，分布在 0.63 與 1.0 之間，全棟之平均值為 0.815 據本研究之研究方法，在類似本研究虛擬 20 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構柱之斷面可節省 18%。

三、虛擬之 60 樓鋼結構建築物

1. 建築物之基本資料

(1) 結構系統：虛擬 60 樓鋼結構建築物之平面如圖 2-7 所示，兩方向各有五跨，每跨為 10 公尺，為正方形之鋼骨韌性立體剛構架系統，鋼柱採用 TFC(Tube-filled Concrete)柱，鋼樑均採用寬翼樑(H-beam)。本大樓無地下室，一樓底部均假設為固定端(Fixed Ends)；大樓三面為混凝土外牆，一面為帷幕牆。每層樓高 3 公尺。

(2) 結構尺寸：

57F~RF：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=0.6$ 公分；樑—W24×84 鋼樑

52F~56F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=1.2$ 公分；樑—W24×84 鋼樑

47F~51F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=1.8$ 公分；樑—W24×84 鋼樑。

42F~46F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=2.4$ 公分；樑—W24×94 鋼樑。

37F~41F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=3.0$ 公分；樑—W24×94 鋼樑。

32F~36F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=4.0$ 公分；樑—W24×103 鋼樑。

27F~31F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=4.4$ 公分；樑—W24×103 鋼樑。

22F~26F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=5.1$ 公分；樑—W24×103 鋼樑。

17F~21F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=5.8$ 公分；樑—W24×103 鋼樑。

12F~16F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=6.8$ 公分；樑—W24×84 鋼樑。

7F~11F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=7.8$ 公分；樑—W24×94 鋼樑。

2F~6F：柱—170 公分之 TFC 柱， $t=9.0$ 公分；樑—W24×84 鋼樑。

R.C.外牆厚度為 15 公分；混凝土樓版厚度為 12 公分。

(3) 材料強度：鋼骨採用 A50 Steel，混凝土強度為 210 kg/cm^2 。

(4) 材料性質： $E_s=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ；常重混凝土之單位重量為 2.3 ton/m^3 ，輕質混凝土之單位重量為 1.8 ton/m^3 。

(5) 樓版載重：樓版之活載重頂樓採用 250 kg/m^2 ，其他樓層為 300 kg/m^2 。靜載重方面常重混凝土結構頂樓)為 410 kg/m^2 ，其他樓層為 370 kg/m^2 ；輕質混凝土結構頂樓為 350 kg/m^2 ，其他樓層為 310 kg/m^2 。

2. 結構分析結果

(1) 分析模式：分析模式之平面如圖 2-8 所示，立體如圖 2-9 所示。

(2) 自然週期：常重 11.02 秒；輕質 10.15 秒。

(3) 輕質混凝土鋼骨結構與常重混凝土鋼骨結構之內力比：

本研究以相同之鋼骨結構系統與斷面去承受常重混凝土及輕質混凝土之垂直載重及地震力，然後以內力比當成需要之斷面比，以此方式進行經濟效益評估。

虛擬 60 樓各樑之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均值來顯示其代表之內力比，如表 2-5 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構樑斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構樑斷面之內力小，各樓層輕質/常重之比值基本上都小於 1，絕大多數分布在 0.85 與 0.88 之間，全棟之平均值為 0.869，根據本研究之研究方法，在類似本研究虛擬 60 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構樑之斷面可節省 13%。

虛擬 60 樓各柱之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均質值來顯示其代表之內力比，如表 2-6 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構柱斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構柱斷面之內力小，輕質/常重之比值都比 1 小，絕大多數分布在 0.82 與 0.87 之間，全棟之平均值為 0.837，根據本研究之研究方法，在類似本研究虛擬 60 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構柱之斷面可節省 16%。

三、實際之 26 樓鋼結構建築物

1. 建築物之基本資料

(1) 用途：地上 26 層、地下 5 層之辦公及集合住宅大樓。

(2) 結構系統：鋼骨鋼筋混凝土韌性立體剛構架系統，地下室外牆為 55 及 45 公分之 R.C. 牆，基礎為筏式基礎。外牆為 R.C. 牆。主要結構平面如圖 2-10 及 2-11 所示。建築物之立面如圖 2-12 圖 2-14 所示。樓高為 3 公尺。

(3) 材料強度：鋼骨採用 A50 Steel，混凝土強度為 420(柱內灌漿)、280(2FL

以下)、210(其他) kg/cm^2 。

(4)材料性質： $E_s=2.04\times 10^6\text{kg}/\text{cm}^2$ ；常重混凝土之單位重量為 $2.3\text{ ton}/\text{m}^3$ ，輕質混凝土之單位重量為 $1.8\text{ ton}/\text{m}^3$ 。

(5)樓版載重：樓版之活載重及靜載重均根據規範規定及該大樓原設計用途核實計算。

2. 結構分析結果

(1) 自然週期：輕質 3.08 秒。

(2) 輕質混凝土鋼骨結構與常重混凝土鋼骨結構之內力比：

本研究以相同之鋼骨結構系統與斷面去承受常重混凝土及輕質混凝土之垂直載重及地震力，然後以內力比當成需要之斷面比，以此方式進行經濟效益評估。

實際 26 樓各樑之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均值來顯示其代表之內力比，如表 2-7 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構樑斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構樑斷面之內力小，各樓層輕質/常重之比值都小於 1，分布在 0.85 與 0.98 之間，全棟之平均值為 0.87，根據本研究之研究方法，實際 26 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構樑之斷面可節省 13%。

實際 26 樓各柱之內力比皆不相同，本研究以各樓層之平均值、全棟之平均質值來顯示其代表之內力比，如表 2-8 所示。此表顯示輕質混凝土鋼骨結構柱斷面之內力較常重混凝土鋼骨結構柱斷面之內力小，輕質/常重之比值都比 1 小，分布在 0.80 與 0.92 之間，全棟之平均值為 0.87，根據本研究之研究方法，在類似實際 26 樓結構系統之鋼骨結構建築物，使用輕質骨材混凝土，鋼骨結構柱之斷面可節省 13%。

第四節 建造成本經濟效益評估

根據前節之分析結果，再參考各項材料之單價，本節將評估常重混凝土鋼骨結構及輕質混凝土鋼骨結構之建造成本經濟效益。

1. 材料單價：

輕質骨材單價：1800 元/立方

常重骨材單價：800 元/立方

輕質混凝土單價：2100 元/立方

常重混凝土單價：1400 元/立方

鋼骨結構單價：14000 元/公噸

2. 使用材料之數量：

虛擬 7 樓(常重)：混凝土 598 立方，鋼骨樑 33 公噸，鋼骨柱 29 公噸。

虛擬 7 樓(輕質)：混凝土 598 立方，鋼骨樑 29 公噸，鋼骨柱 26 公噸。

虛擬 20 樓(常重)：混凝土 10893 立方，鋼骨樑 987 公噸，鋼骨柱 1296 公噸。

虛擬 20 樓(輕質)：混凝土 12893 立方，鋼骨樑 866 公噸，鋼骨柱 1,056 公噸。

虛擬 60 樓(常重)：混凝土 38,940 立方，鋼骨樑 4,949 公噸，鋼骨柱 14,355 公噸。

虛擬 60 樓(輕質)：混凝土 38,940 立方，鋼骨樑 4,301 公噸，鋼骨柱 12,015 公噸。

實際 26 樓(常重)：混凝土 16,335 立方，鋼骨樑 4,353 公噸，鋼骨柱 2,920 公噸。

實際 26 樓(輕質)：混凝土 16,335 立方，鋼骨樑 3,744 公噸，鋼骨柱 2,482 公噸。

公噸。

3. 經濟效益評估

將前述之單價乘以使用之數量，得到常重混凝土與輕質混凝土之建造成本，建造成本計算及比較結果如表 2-9 所示。該表顯示虛擬 7 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴 19%，虛擬 20 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴約 5.4%，虛擬 60 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 4.45%，實際 26 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 2.6%。

上述經濟效益與樓層數目之關係繪如圖 2-10 所示，根據此圖結果，大約從第四十層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比常重混凝土鋼骨結構便宜，且隨著樓層數目之增加，經濟效益更加明顯。

然而圖 2-10 也顯示幾點不合理之處，例如該圖呈現大幅度之轉折現象及與實際 26 樓案例之結果相差太多。探討其原因可能是，虛擬 7 樓之結構系統為 3x6 公尺之正方形結構系統，而虛擬 20 樓與虛擬 60 樓為 5x10 公尺之結構系統，其跨數及各跨之長度都不一樣，此可能為造成曲線轉折太大之因素之一。另外，本研究之靜載重只考慮混凝土及鋼骨之重量，使得靜載重總共只有 $370\text{kg}/\text{cm}^2$ ，而實際 26 樓案例中，尚考慮其他功能之靜載重，使得各樓層之靜載重達到 $800\sim 1000\text{ kg}/\text{cm}^2$ 之間，此可能為造成圖 2-10 曲線與實際 26 樓案例相差甚多之因素之一。

為探討結構系統因素造成之影響，本研究再新建虛擬 7 樓之結構系統如圖 2-11 所示，如此即與虛擬 20 樓、虛擬 60 樓之結構系統一致，而且材料性質、載重資料等都完全一樣，則系統完全一樣之虛擬 7 樓、虛擬 20 樓、虛擬 60 樓及實際 26 樓之建造成本計算及比較結果如表 2-10 所示。該表顯示虛擬 7 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴約 10%，虛擬

20 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴約 5.4%，虛擬 60 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 4.45%，實際 26 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 2.6%。經濟效益與樓層數目之關係繪如圖 2-12 所示，根據此圖結果，大約從第四十二層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比常重混凝土鋼骨結構便宜，此圖由於虛擬 7 樓之結構系統與 20 樓、70 樓都一樣，圖 2-10 之大幅度轉折現象已經消失，此點說明經濟效益與樓層數目之關係會受到結構系統之影響。

為探討總靜載重造成之影響，本研究除了鋼骨及混凝土之靜載重 $370\text{kg}/\text{cm}^2$ 外，再加入其他功能之靜載重，使總靜載重達到 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 及 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ ，分析探討不同靜載重情況下使用輕質混凝土之經濟效益問題。將靜載重為 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ ，結構系統完全一樣如圖 2-11 之虛擬 7 樓、虛擬 20 樓、虛擬 60 樓及實際 26 樓之建造成本計算及比較結果如表 2-11 所示。該表顯示虛擬 7 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴約 4.9%，虛擬 20 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴約 1.6%，虛擬 60 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 10.2%，實際 26 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 2.6%。經濟效益與樓層數目之關係繪如圖 2-13 所示，根據此圖結果，大約從第 26 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比常重混凝土鋼骨結構便宜。若將靜載重改為 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ ，則建造成本計算及比較結果如表 2-12 所示。該表顯示虛擬 7 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構貴約 2.8%，虛擬 20 樓之輕質混凝土結構已較常重混凝土結構便宜約 2.2%，虛擬 60 樓之輕質混凝土結構較常重混凝土結構便宜約 10.3%。經濟效益與樓層數目之關係繪如圖 2-14 所示，根據此圖結果，大約從第 13 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比常重混凝土鋼骨結構便宜。將結構系統一樣但總靜載重為 370 、 700 、 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 之經濟效益圖畫在一起比較如圖 2-15 所示，發現總靜載重愈大時其經濟效益愈

大，即使在輕質混凝土取代常重混凝土之量一樣多之情況下也是如此，其原因為當總靜載重愈大時，衍生之地震力將愈大，此時輕質混凝土之減重效應就更為明顯，表現之經濟效益也就愈大。

圖 2-15 係以帶狀之關係表示經濟效益與樓層數目之關係，此帶狀之上緣為靜載重 370 kg/cm^2 ，下緣為靜載重 1000 kg/cm^2 ，根據靜載重大小及樓層數目可查得建造成本之經濟效益。例如實際 26 樓案例，其靜載重約為 800 kg/cm^2 ，即落於此帶狀區域之合理位置，此驗證了帶狀區域之可靠性。

第五節 小結

根據本章之分析討論，可先行得到下列幾點結論。

1. 使用輕質骨材混凝土時，樑柱結構之斷面可以變小，此種現象隨樓層數目增加更為明顯。
2. 鋼骨結構建築使用輕質混凝土之經濟效益會隨結構系統之不同而變化。
3. 鋼骨結構建築使用輕質混凝土之經濟效益會隨總靜載重之不同而變化。
4. 鋼骨結構建築使用輕質混凝土在低樓層情況較常重混凝土貴，在高樓層情況較常重混凝土便宜。
5. 對本研究虛擬之結構系統而言，本研究建議一帶狀區域，此區域為鋼骨結構之總靜載重、樓層數目及經濟效益之關係。例如總靜載重為 370 kg/cm^2 時，從第 42 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；總靜載重為 700 kg/cm^2 時，從第 26 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；總靜載重為 1000 kg/cm^2 時，從第 13 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；此帶狀區域被一棟實際 26 樓之案例驗證為合理。

表 2-1 虛擬 7 樓之樑內力比

	M (END-I) RATE (L/N)	V (END-I) RATE (L/N)	M (END-J) RATE (L/N)	V (END-J) RATE (L/N)	AVERAGE
RF	0.890	0.894	0.891	0.895	0.893
7F	0.889	0.890	0.888	0.891	0.890
6F	0.889	0.890	0.888	0.892	0.890
5F	0.889	0.890	0.888	0.892	0.890
4F	0.888	0.890	0.889	0.892	0.890
3F	0.890	0.890	0.890	0.892	0.890
2F	0.890	0.890	0.890	0.891	0.890
AVERAGE	0.889	0.891	0.889	0.892	0.890

表 2-2 虛擬 7 樓之柱內力比

	MAJOR M RATE(L/R)	MAJOR V RATE(L/R)	AXIAL F RATE(L/R)	MAJOR T RATE(L/R)	AVERAGE RATE(L/R)
RF	0.951	0.986	0.902	0.840	0.920
7F	1.133	0.887	0.900	0.840	0.940
6F	0.691	0.867	0.903	0.850	0.828
5F	0.996	0.875	0.900	0.850	0.905
4F	0.968	0.877	0.900	0.850	0.899
3F	0.948	0.868	0.900	0.850	0.891
2F	0.906	0.878	0.900	0.848	0.883
AVERAGE	0.942	0.891	0.901	0.847	0.895

表 2-3 虛擬 20 樓之樑內力比

	M (END-I) RATE (L/N)	V (END-I) RATE (L/N)	M (END-J) RATE (L/N)	V (END-J) RATE (L/N)	AVERAGE
RF	0.881	0.885	0.882	0.887	0.884
20F	0.867	0.869	0.866	0.871	0.868
19F	0.866	0.869	0.865	0.871	0.868
18F	0.866	0.868	0.865	0.872	0.868
17F	0.864	0.867	0.864	0.872	0.867
16F	0.862	0.866	0.863	0.873	0.866
15F	0.861	0.866	0.862	0.873	0.865
14F	0.860	0.866	0.862	0.873	0.865
13F	0.861	0.865	0.861	0.873	0.865
12F	0.860	0.866	0.861	0.874	0.865
11F	0.860	0.865	0.860	0.874	0.865
10F	0.903	0.919	0.903	0.932	0.914
9F	0.899	0.914	0.898	0.926	0.909
8F	0.903	0.919	0.903	0.932	0.914
7F	0.899	0.914	0.899	0.926	0.909
6F	0.862	0.867	0.862	0.876	0.867
5F	0.864	0.867	0.864	0.876	0.868
4F	0.866	0.868	0.866	0.875	0.869
3F	0.867	0.869	0.867	0.873	0.869
2F	0.868	0.869	0.868	0.871	0.869
AVERAGE	0.872	0.878	0.872	0.885	0.877

表 2-4 虛擬 20 樓之柱內力比

	MAJOR M RATE(L/R)	MAJOR V RATE(L/R)	AXIAL F RATE(L/R)	MAJOR T RATE(L/R)	AVERAGE RATE(L/R)
RF	1.053	1.465	0.889	0.770	1.044
20F	0.570	0.788	0.853	0.770	0.745
19F	0.083	0.839	0.844	0.770	0.634
18F	0.726	0.841	0.843	0.760	0.793
17F	0.756	0.835	0.842	0.760	0.798
16F	0.585	0.832	0.840	0.760	0.754
15F	0.809	0.836	0.841	0.760	0.812
14F	0.816	0.836	0.840	0.750	0.811
13F	0.786	0.836	0.840	0.750	0.803
12F	0.768	0.838	0.840	0.750	0.799
11F	0.547	0.834	0.840	0.750	0.743
10F	0.661	0.839	0.842	0.750	0.773
9F	1.854	0.841	0.844	0.750	1.072
8F	0.689	0.844	0.847	0.750	0.783
7F	0.756	0.956	0.848	0.750	0.827
6F	0.781	0.848	0.848	0.750	0.807
5F	0.798	0.971	0.848	0.750	0.842
4F	0.804	0.806	0.848	0.760	0.804
3F	0.808	0.834	0.848	0.760	0.813
2F	0.813	0.949	0.848	0.760	0.843
AVERAGE	0.773	0.883	0.847	0.757	0.815

表 2-5 虛擬 60 樓之樑內力比

	M (END-I) RATE (L/N)	V (END-I) RATE (L/N)	M (END-J) RATE (L/N)	V (END-J) RATE (L/N)	AVERAGE
RF	0.819	0.893	0.878	0.868	0.865
60F	0.877	0.865	0.842	0.856	0.860
59F	0.866	0.865	0.892	0.833	0.864
58F	0.861	0.865	0.868	0.840	0.859
57F	0.870	0.865	0.871	0.869	0.869
56F	0.836	0.864	0.875	0.899	0.869
55F	0.848	0.865	0.884	3.464	1.515
54F	0.847	0.864	0.821	0.734	0.816
53F	0.847	0.865	0.846	0.781	0.835
52F	0.816	0.864	0.850	0.863	0.848
51F	0.959	0.865	0.853	0.763	0.860
50F	0.300	0.865	0.854	0.845	0.716
49F	0.913	0.864	0.853	0.849	0.870
48F	0.884	0.864	0.853	0.852	0.863
47F	0.879	0.864	0.851	0.851	0.861
46F	0.995	0.864	0.854	0.855	0.892
45F	0.827	0.864	0.854	0.865	0.852
44F	0.901	0.864	0.853	0.859	0.869
43F	0.882	0.864	0.853	0.858	0.864
42F	0.856	0.864	0.852	0.897	0.867
41F	0.861	0.864	0.850	0.848	0.856
40F	0.880	0.863	0.847	0.858	0.862
39F	0.876	0.863	0.821	0.867	0.857
38F	0.876	0.863	0.868	0.868	0.869
37F	0.878	0.863	0.939	0.822	0.875
36F	0.875	0.862	0.806	0.848	0.848
35F	0.875	0.861	0.857	0.848	0.860
34F	0.880	0.861	0.932	0.849	0.881
33F	0.871	0.861	0.870	0.849	0.863
32F	0.836	0.862	0.869	0.850	0.854
31F	0.886	0.863	0.872	0.851	0.868

30F	0.849	0.863	0.877	0.851	0.860
29F	0.857	0.863	0.821	0.851	0.848
28F	0.858	0.863	0.849	0.851	0.855
27F	0.859	0.862	0.870	0.850	0.861
26F	0.860	0.862	0.826	0.845	0.848
25F	0.861	0.862	0.886	0.854	0.866
24F	0.861	0.863	0.836	0.877	0.859
23F	0.861	0.863	0.845	0.864	0.858
22F	0.861	0.862	0.848	0.879	0.863
21F	0.861	0.863	0.850	0.893	0.867
20F	0.862	0.863	0.852	0.871	0.862
19F	0.861	0.863	0.852	0.836	0.853
18F	0.862	0.863	0.853	0.847	0.856
17F	0.862	0.863	0.854	0.851	0.857
16F	0.862	0.862	0.856	0.851	0.858
15F	0.862	0.862	0.857	0.851	0.858
14F	0.862	0.862	0.859	0.852	0.859
13F	0.863	0.863	0.860	0.852	0.860
12F	0.864	0.864	0.861	0.850	0.860
11F	0.866	0.865	0.862	0.851	0.861
10F	0.866	0.865	0.862	0.847	0.860
9F	0.866	0.865	0.862	0.828	0.855
8F	0.866	0.865	0.862	0.875	0.867
7F	0.866	0.864	0.863	0.938	0.883
6F	0.868	0.867	0.866	0.731	0.833
5F	0.869	0.867	0.866	0.837	0.860
4F	0.869	0.867	0.867	0.866	0.867
3F	0.869	0.867	0.867	0.858	0.865
2F	0.868	0.867	0.869	0.862	0.867
AVERAGE	0.858	0.864	0.859	0.894	0.869

表 2-6 虛擬 60 樓之柱內力比

	MAJOR M RATE(L/R)	MAJOR V RATE(L/R)	AXIAL F RATE(L/R)	MAJOR T RATE(L/R)	AVERAGE RATE(L/R)
RF	0.989	0.875	0.891	0.800	0.889
60F	0.865	0.860	0.841	0.800	0.841
59F	0.824	0.860	0.834	0.800	0.830
58F	0.819	0.859	0.832	0.790	0.825
57F	0.851	0.861	0.830	0.790	0.833
56F	0.848	0.862	0.831	0.790	0.833
55F	0.857	0.827	0.830	0.790	0.826
54F	0.855	0.918	0.831	0.790	0.848
53F	0.856	0.841	0.830	0.790	0.829
52F	0.862	0.852	0.831	0.790	0.834
51F	0.864	0.865	0.831	0.790	0.838
50F	0.859	0.864	0.832	0.790	0.836
49F	0.857	0.861	0.833	0.790	0.835
48F	0.857	0.859	0.833	0.790	0.835
47F	0.861	0.861	0.834	0.790	0.836
46F	0.862	0.864	0.834	0.790	0.838
45F	0.858	0.862	0.834	0.780	0.834
44F	0.855	0.861	0.834	0.780	0.833
43F	0.854	0.862	0.834	0.780	0.833
42F	0.857	0.853	0.834	0.780	0.831
41F	0.858	0.862	0.834	0.780	0.834
40F	0.856	0.863	0.834	0.780	0.833
39F	0.854	0.865	0.834	0.780	0.834
38F	0.856	0.870	0.835	0.770	0.833
37F	0.862	0.828	0.836	0.770	0.824
36F	0.859	0.909	0.836	0.770	0.843
35F	0.854	0.901	0.837	0.770	0.840
34F	0.849	1.471	0.837	0.770	0.981
33F	0.848	0.283	0.837	0.770	0.684
32F	0.848	0.818	0.837	0.770	0.818
31F	0.851	0.827	0.838	0.770	0.821

30F	0.851	0.838	0.839	0.780	0.827
29F	0.854	0.839	0.841	0.780	0.828
28F	0.858	0.839	0.843	0.780	0.830
27F	0.868	0.841	0.844	0.780	0.833
26F	0.877	0.843	0.844	0.780	0.836
25F	0.882	0.844	0.844	0.780	0.838
24F	0.890	0.845	0.844	0.780	0.840
23F	0.890	0.845	0.844	0.780	0.840
22F	0.877	0.845	0.844	0.780	0.837
21F	0.860	0.847	0.844	0.790	0.835
20F	0.848	0.849	0.844	0.790	0.833
19F	0.843	0.849	0.844	0.790	0.832
18F	0.842	0.849	0.844	0.790	0.831
17F	0.843	0.850	0.844	0.790	0.832
16F	0.844	0.852	0.845	0.790	0.833
15F	0.845	0.854	0.846	0.790	0.834
14F	0.848	0.857	0.847	0.790	0.835
13F	0.849	0.860	0.847	0.790	0.837
12F	0.851	0.863	0.848	0.790	0.838
11F	0.854	0.865	0.848	0.800	0.842
10F	0.855	0.866	0.848	0.800	0.842
9F	0.857	0.870	0.850	0.800	0.844
8F	0.859	0.871	0.853	0.800	0.846
7F	0.860	0.873	0.854	0.800	0.847
6F	0.861	0.876	0.854	0.800	0.848
5F	0.863	0.881	0.854	0.800	0.849
4F	0.864	0.882	0.854	0.800	0.850
3F	0.866	0.886	0.854	0.800	0.852
2F	0.868	0.889	0.854	0.800	0.853
AVERAGE	0.859	0.860	0.841	0.787	0.837

表 2-7 實際 26 樓(A 棟)之樑內力比

樓層別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	平均值
RF	0.863	0.869	0.877	0.832	0.842	0.851	0.855	0.858	0.929	0.861	0.860	0.884	0.837	0.842	0.868	0.861	0.862
25F	0.857	0.858	0.861	0.861	0.859	0.836	0.849	0.852	0.853	0.853	0.854	0.861	0.842	0.860	0.858	0.856	0.854
24F	0.856	0.858	0.858	0.848	0.857	0.840	0.849	0.856	0.851	0.848	0.853	0.859	0.843	0.858	0.854	0.856	0.853
23F	0.855	0.857	0.857	0.857	0.857	0.842	0.847	0.851	0.856	0.847	0.854	0.857	0.843	0.857	0.854	0.855	0.853
22F	0.856	0.853	0.855	0.845	0.856	0.843	0.849	0.852	0.852	0.850	0.854	0.857	0.843	0.856	0.852	0.855	0.852
21F	0.856	0.854	0.856	0.844	0.855	0.843	0.848	0.854	0.853	0.850	0.853	0.856	0.845	0.856	0.853	0.854	0.852
20F	0.855	0.854	0.855	0.845	0.855	0.843	0.849	0.851	0.851	0.847	0.852	0.857	0.844	0.855	0.852	0.853	0.851
19F	0.854	0.854	0.855	0.845	0.854	0.845	0.849	0.853	0.853	0.849	0.853	0.855	0.844	0.853	0.853	0.853	0.851
18F	0.854	0.854	0.854	0.845	0.853	0.845	0.847	0.854	0.851	0.847	0.852	0.854	0.845	0.855	0.852	0.853	0.851
17F	0.853	0.854	0.854	0.846	0.854	0.844	0.848	0.853	0.852	0.850	0.852	0.854	0.845	0.854	0.852	0.853	0.851
16F	0.853	0.852	0.854	0.846	0.854	0.848	0.848	0.853	0.854	0.846	0.851	0.853	0.844	0.854	0.852	0.854	0.851
15F	0.853	0.854	0.855	0.845	0.855	0.851	0.848	0.853	0.850	0.848	0.851	0.853	0.844	0.853	0.852	0.853	0.851
14F	0.853	0.852	0.853	0.845	0.855	0.844	0.863	0.863	0.882	0.874	0.869	0.855	0.845	0.856	0.853	0.853	0.857
13F	0.853	0.853	0.853	0.847	0.853	0.850	0.849	0.853	0.853	0.849	0.853	0.854	0.846	0.853	0.852	0.853	0.851
12F	0.855	0.853	0.854	0.845	0.855	0.846	0.852	0.855	0.861	0.853	0.855	0.855	0.847	0.855	0.852	0.854	0.853
11F	0.854	0.853	0.855	0.845	0.856	0.848	0.852	0.855	0.860	0.852	0.855	0.855	0.847	0.856	0.853	0.854	0.853
10F	0.855	0.855	0.856	0.847	0.856	0.848	0.852	0.854	0.860	0.852	0.854	0.855	0.847	0.855	0.852	0.855	0.853
9F	0.855	0.855	0.854	0.848	0.856	0.848	0.853	0.856	0.860	0.850	0.855	0.855	0.848	0.855	0.852	0.855	0.853
8F	0.855	0.854	0.856	0.847	0.856	0.848	0.853	0.856	0.860	0.853	0.855	0.855	0.849	0.856	0.853	0.855	0.854
7F	0.856	0.854	0.856	0.848	0.856	0.849	0.853	0.854	0.858	0.855	0.856	0.857	0.850	0.857	0.854	0.855	0.854
6F	0.856	0.855	0.856	0.850	0.857	0.852	0.853	0.856	0.861	0.855	0.855	0.856	0.850	0.857	0.854	0.856	0.855
5F	0.857	0.856	0.857	0.850	0.858	0.855	0.855	0.858	0.860	0.855	0.857	0.856	0.851	0.857	0.855	0.856	0.856
4F	0.858	0.858	0.858	0.851	0.859	0.859	0.857	0.860	0.861	0.854	0.859	0.858	0.852	0.860	0.856	0.857	0.857
3F	0.857	0.859	0.862	0.853	0.858	0.864	0.860	0.934	0.934	0.885	0.862	0.861	0.854	0.858	0.856	0.856	0.869
2F	0.892	0.889	0.908	0.854	0.917		0.929	1.000	1.000	1.000	0.933	0.920	0.902	0.915	0.891	0.899	0.923
1F	0.992	0.947	0.905	0.887	1.011	0.903	0.996	1.000	1.000	1.000	1.003	0.901	0.876	1.009	0.891	0.942	0.954
																	0.861

表 2-7(續) 實際 26 樓(B 棟)之樑內力比

樓層別	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	平均值
RF	0.874	0.873	0.873	0.877	0.877	0.873	0.934	0.875	0.872	0.877	0.874	0.876	0.876	0.880	0.930	0.877	0.873	0.874	0.874	0.881
26F	0.862	0.865	0.863	0.868	0.872	0.863	0.862	0.870	0.869	0.879	0.869	0.867	0.872	0.864	0.864	0.867	0.863	0.863	0.864	0.867
25F	0.867	0.868	0.867	0.872	0.873	0.870	0.872	0.873	0.872	0.877	0.873	0.871	0.873	0.868	0.867	0.873	0.866	0.869	0.868	0.871
24F	0.868	0.868	0.869	0.873	0.874	0.871	0.873	0.874	0.873	0.877	0.874	0.872	0.874	0.871	0.869	0.874	0.869	0.868	0.868	0.872
23F	0.868	0.869	0.869	0.873	0.874	0.871	0.872	0.874	0.874	0.877	0.874	0.874	0.873	0.871	0.868	0.873	0.869	0.868	0.869	0.872
22F	0.868	0.870	0.870	0.873	0.874	0.870	0.872	0.875	0.875	0.877	0.874	0.874	0.874	0.872	0.872	0.873	0.870	0.870	0.870	0.872
21F	0.870	0.870	0.871	0.873	0.873	0.872	0.867	0.874	0.875	0.875	0.875	0.874	0.874	0.873	0.867	0.875	0.869	0.869	0.871	0.872
20F	0.871	0.871	0.870	0.875	0.875	0.870	0.870	0.874	0.875	0.875	0.876	0.874	0.873	0.871	0.870	0.874	0.871	0.871	0.871	0.872
19F	0.869	0.871	0.871	0.874	0.874	0.870	0.868	0.874	0.876	0.877	0.875	0.874	0.875	0.870	0.868	0.875	0.871	0.871	0.871	0.872
18F	0.870	0.872	0.870	0.874	0.873	0.870	0.869	0.875	0.874	0.875	0.875	0.874	0.874	0.870	0.869	0.875	0.871	0.870	0.868	0.872
17F	0.871	0.871	0.871	0.875	0.875	0.872	0.871	0.875	0.875	0.874	0.875	0.874	0.875	0.870	0.871	0.874	0.871	0.870	0.871	0.873
16F	0.871	0.872	0.872	0.875	0.873	0.871	0.869	0.876	0.877	0.876	0.876	0.876	0.874	0.870	0.869	0.875	0.871	0.872	0.872	0.873
15F	0.872	0.872	0.872	0.874	0.875	0.870	0.869	0.876	0.875	0.877	0.876	0.876	0.874	0.869	0.869	0.875	0.871	0.872	0.871	0.873
14F	0.871	0.872	0.872	0.875	0.874	0.870	0.871	0.876	0.876	0.877	0.893	0.875	0.875	0.870	0.871	0.875	0.872	0.872	0.871	0.874
13F	0.873	0.873	0.873	0.877	0.876	0.874	0.873	0.878	0.877	0.877	0.878	0.877	0.876	0.873	0.873	0.877	0.874	0.874	0.873	0.875
12F	0.873	0.874	0.875	0.877	0.876	0.874	0.874	0.877	0.878	0.877	0.877	0.878	0.877	0.872	0.874	0.878	0.874	0.874	0.874	0.875
11F	0.874	0.875	0.874	0.879	0.878	0.874	0.875	0.878	0.878	0.877	0.878	0.878	0.876	0.873	0.871	0.878	0.875	0.874	0.875	0.876
10F	0.875	0.875	0.875	0.878	0.877	0.874	0.873	0.878	0.879	0.878	0.879	0.879	0.878	0.873	0.873	0.879	0.875	0.875	0.875	0.876
9F	0.875	0.876	0.876	0.878	0.878	0.874	0.874	0.880	0.878	0.879	0.879	0.879	0.878	0.875	0.874	0.879	0.875	0.875	0.876	0.877
8F	0.876	0.876	0.876	0.878	0.878	0.875	0.875	0.879	0.879	0.878	0.879	0.879	0.878	0.875	0.875	0.879	0.875	0.875	0.875	0.877
7F	0.876	0.875	0.877	0.879	0.878	0.876	0.876	0.879	0.879	0.878	0.880	0.879	0.878	0.875	0.876	0.879	0.877	0.876	0.876	0.877
6F	0.876	0.876	0.876	0.880	0.878	0.877	0.873	0.880	0.879	0.880	0.880	0.879	0.878	0.876	0.877	0.879	0.877	0.875	0.877	0.878
5F	0.877	0.876	0.877	0.881	0.880	0.876	0.878	0.880	0.881	0.879	0.881	0.880	0.879	0.877	0.878	0.880	0.877	0.876	0.877	0.878
4F	0.877	0.876	0.878	0.880	0.880	0.878	0.880	0.881	0.882	0.880	0.882	0.881	0.879	0.877	0.877	0.880	0.876	0.876	0.877	0.879
3F	0.877	0.876	0.876	0.881	0.881	0.879	0.881	0.882	0.882	0.882	0.883	0.881	0.880	0.876	0.880	0.881	0.877	0.877	0.878	0.879
2F	0.914	0.911	0.909	0.912	0.905	0.906	0.913	0.916	0.904	0.894	0.909	0.910	0.904	0.905	0.912	0.861	0.912	0.910	0.921	0.907
1F	0.991	0.921	0.976	0.988	0.952	0.984	1.000	0.981	0.979	0.941		0.984	0.943				0.947	0.963		0.968
B1F	0.995	0.980	0.971	0.986	1.000	0.906	1.000	0.996	0.985	0.928	0.992	0.985	0.944	1.026	0.992	0.993	0.922	0.994	0.991	0.978
B2F	0.994	0.984	0.396	0.989	0.993	0.913	0.988	0.989	0.989	0.923	0.988	0.989	0.958	0.898	0.988	0.989	0.994	0.994		0.942
																				0.885

表 2-8 實際 26 樓(A 棟)之柱內力比

樓層別	1	2	3	4	6	7	8	9	14	15	17	18	19	20	21	平均值
25F	0.913	0.900	0.867	0.874	0.849	0.851	0.878	0.873	0.856	0.883	0.848	0.850	0.895	0.922	0.865	0.875
24F	0.857	0.846	0.877	0.890	0.715	0.863	0.910	0.857	0.870	0.897	0.737	0.832	0.886	0.855	0.869	0.851
23F	0.854	0.853	0.876	0.884	0.853	0.847	0.896	0.856	0.863	0.891	0.702	0.850	0.860	0.854	0.851	0.853
22F	0.854	0.851	0.864	0.862	0.853	0.848	0.872	0.856	0.851	0.871	0.853	0.849	0.853	0.854	0.852	0.856
21F	0.855	0.853	0.863	0.666	0.854	0.849	0.652	0.698	0.850	0.861	0.853	0.849	0.674	0.741	0.852	0.798
20F	0.774	0.853	0.658	0.861	0.853	0.849	0.862	0.840	0.853	0.861	0.854	0.850	0.858	0.732	0.852	0.827
19F	0.855	0.851	0.861	0.860	0.856	0.849	0.861	0.857	0.853	0.859	0.855	0.849	0.855	0.856	0.853	0.855
18F	0.854	0.851	0.858	0.857	0.855	0.850	0.860	0.859	0.854	0.857	0.855	0.850	0.856	0.856	0.851	0.855
17F	0.856	0.852	0.857	0.857	0.856	0.850	0.857	0.859	0.853	0.858	0.856	0.851	0.856	0.856	0.851	0.855
16F	0.854	0.851	0.858	0.858	0.855	0.850	0.858	0.857	0.852	0.857	0.856	0.850	0.856	0.855	0.852	0.855
15F	0.855	0.852	0.857	0.856	0.854	0.851	0.857	0.857	0.853	0.857	0.855	0.852	0.855	0.856	0.851	0.855
14F	0.856	0.852	0.858	0.857	0.855	0.851	0.857	0.859	0.857	0.857	0.857	0.851	0.856	0.856	0.853	0.856
13F	0.856	0.852	0.859	0.856	0.857	0.852	0.857	0.862	0.859	0.857	0.857	0.851	0.856	0.856	0.853	0.856
12F	0.856	0.853	0.858	0.857	0.857	0.852	0.856	0.859	0.856	0.856	0.857	0.853	0.856	0.856	0.853	0.856
11F	0.859	0.854	0.858	0.857	0.858	0.853	0.857	0.860	0.858	0.856	0.858	0.853	0.857	0.857	0.854	0.857
10F	0.859	0.853	0.858	0.857	0.859	0.853	0.857	0.860	0.857	0.858	0.859	0.855	0.857	0.857	0.855	0.857
9F	0.860	0.855	0.858	0.858	0.860	0.855	0.857	0.862	0.858	0.857	0.860	0.855	0.858	0.858	0.854	0.858
8F	0.860	0.855	0.859	0.857	0.861	0.855	0.858	0.862	0.860	0.858	0.860	0.855	0.858	0.859	0.856	0.858
7F	0.862	0.856	0.860	0.857	0.862	0.855	0.858	0.864	0.859	0.859	0.861	0.856	0.860	0.860	0.856	0.859
6F	0.862	0.856	0.860	0.858	0.863	0.855	0.859	0.866	0.861	0.859	0.863	0.857	0.858	0.862	0.856	0.860
5F	0.864	0.856	0.861	0.859	0.875	0.856	0.859	0.866	0.861	0.860	0.865	0.856	0.860	0.864	0.857	0.861
4F	0.901	0.856	0.859	0.857	0.906	0.856	0.858	0.895	0.860	0.857	0.887	0.856	0.859	0.867	0.856	0.869
3F	0.863	0.857	0.858	0.858	0.896	0.856	0.858	0.867	0.861	0.858	0.863	0.856	0.858	0.873	0.857	0.863
2F	0.864	0.860	0.858	0.858	0.864	0.858	0.859	0.865	0.860	0.861	0.864	0.859	0.858	0.863	0.858	0.861
1F	0.873	0.868	0.863	0.859	0.878	0.866	0.861	0.873	0.866	0.864	0.875	0.863	0.863	0.874	0.868	0.868
B1F	0.922	0.877	0.873	0.873	0.927	0.881	0.870	0.923	0.879	0.873	0.927	0.879	0.873	0.920	0.877	0.892
B2F	0.929	0.882	0.877	0.874	0.932	0.901	0.873	0.928	0.885	0.874	0.929	0.882	0.879	0.926	0.884	0.897
B3F	0.932	0.887	0.890	0.881	0.936	0.908	0.877	0.932	0.889	0.882	0.934	0.888	0.882	0.929	0.887	0.902
																0.859

表 2-8(續) 實際 26 樓(B 棟)之柱內力比

樓層別	22	23	24	25	26	27	28	31	32	33	34	35	36	37	38	41	42	43	44	45	平均值
26F	0.890	0.894	0.877	0.886	0.876	0.851	0.853	0.875	0.876	0.873	0.873	0.877	0.878	0.850	0.851	1.045	0.887	0.881	0.878	0.878	0.883
25F	0.862	0.869	0.870	0.861	0.870	0.872	0.873	0.872	0.873	0.791	0.782	0.872	0.871	0.876	0.876	1.091	0.860	0.867	0.870	0.862	0.872
24F	0.863	0.869	0.870	0.864	0.872	0.702	0.706	0.874	0.873	0.689	0.690	0.871	0.870	0.701	0.706	1.080	0.863	0.874	0.872	0.865	0.829
23F	0.865	0.873	0.870	0.863	0.871	0.849	0.710	0.871	0.873	0.695	0.697	0.872	0.871	0.862	0.710	1.059	0.866	0.869	0.871	0.864	0.844
22F	0.867	0.875	0.697	0.863	0.872	0.863	0.862	0.872	0.873	0.858	0.858	0.871	0.871	0.862	0.863	0.864	0.863	0.869	0.870	0.864	0.858
21F	0.866	0.867	0.866	0.862	0.748	0.863	0.863	0.752	0.794	0.859	0.859	0.872	0.749	0.864	0.864	0.846	0.862	0.866	0.865	0.862	0.842
20F	0.696	0.867	0.867	0.693	0.749	0.863	0.864	0.750	0.753	0.860	0.860	0.754	0.750	0.863	0.864	0.831	0.696	0.867	0.867	0.692	0.800
19F	0.864	0.867	0.866	0.864	0.868	0.863	0.864	0.867	0.867	0.861	0.860	0.867	0.867	0.864	0.865	0.944	0.865	0.867	0.866	0.865	0.869
18F	0.863	0.865	0.867	0.863	0.866	0.865	0.865	0.868	0.867	0.862	0.862	0.868	0.867	0.864	0.864	0.920	0.864	0.867	0.867	0.862	0.868
17F	0.863	0.866	0.867	0.864	0.865	0.865	0.865	0.866	0.866	0.862	0.862	0.866	0.865	0.865	0.866	0.906	0.864	0.867	0.867	0.864	0.867
16F	0.864	0.866	0.866	0.864	0.866	0.865	0.866	0.866	0.866	0.862	0.861	0.868	0.865	0.864	0.865	0.877	0.864	0.866	0.865	0.864	0.865
15F	0.864	0.865	0.866	0.865	0.865	0.865	0.865	0.867	0.864	0.862	0.862	0.866	0.865	0.864	0.865	0.859	0.865	0.866	0.867	0.865	0.865
14F	0.865	0.863	0.867	0.866	0.864	0.864	0.866	0.866	0.866	0.863	0.864	0.868	0.865	0.865	0.866	0.840	0.864	0.864	0.866	0.865	0.864
13F	0.864	0.863	0.867	0.866	0.864	0.864	0.867	0.867	0.866	0.863	0.870	0.873	0.865	0.865	0.867	0.815	0.867	0.866	0.866	0.866	0.864
12F	0.867	0.866	0.868	0.868	0.866	0.868	0.869	0.868	0.866	0.865	0.866	0.870	0.866	0.866	0.867	0.794	0.868	0.867	0.867	0.866	0.863
11F	0.867	0.866	0.868	0.868	0.866	0.868	0.869	0.868	0.866	0.865	0.868	0.870	0.866	0.866	0.867	0.794	0.868	0.867	0.868	0.866	0.864
10F	0.867	0.866	0.870	0.868	0.867	0.868	0.870	0.868	0.867	0.867	0.869	0.869	0.866	0.868	0.869	0.782	0.868	0.869	0.868	0.868	0.864
9F	0.868	0.867	0.869	0.867	0.867	0.870	0.870	0.868	0.863	0.868	0.869	0.871	0.868	0.869	0.870	0.767	0.869	0.869	0.870	0.868	0.863
8F	0.869	0.869	0.870	0.869	0.868	0.870	0.872	0.869	0.865	0.869	0.869	0.871	0.867	0.869	0.870	0.752	0.870	0.870	0.869	0.868	0.863
7F	0.869	0.871	0.870	0.870	0.868	0.870	0.871	0.867	0.865	0.868	0.872	0.869	0.866	0.871	0.871	0.732	0.870	0.869	0.869	0.868	0.862
6F	0.871	0.870	0.871	0.870	0.869	0.871	0.871	0.866	0.868	0.868	0.871	0.870	0.865	0.870	0.871	0.724	0.870	0.870	0.870	0.869	0.862
5F	0.871	0.870	0.870	0.870	0.869	0.871	0.872	0.869	0.868	0.892	0.893	0.872	0.867	0.871	0.872	0.713	0.872	0.871	0.871	0.870	0.865
4F	0.871	0.871	0.872	0.872	0.879	0.908	0.909	0.884	0.898	0.907	0.907	0.898	0.893	0.908	0.908	0.709	0.871	0.873	0.871	0.871	0.879
3F	0.872	0.872	0.873	0.874	0.872	0.909	0.908	0.869	0.876	0.907	0.910	0.873	0.865	0.909	0.909	0.687	0.872	0.872	0.873	0.873	0.874
2F	0.876	0.876	0.876	0.877	0.875	0.876	0.877	0.871	0.869	0.873	0.875	0.877	0.867	0.876	0.876	0.733	0.876	0.876	0.875	0.877	0.868
1F	0.874	0.876	0.872	0.876	0.881	0.915	0.918	0.912	0.888	0.915	0.916	0.880	0.894	0.918	0.920	0.839	0.880	0.880	0.881	0.880	0.891
B1F	0.872	0.880	0.924	0.887	0.913	0.921	0.920	0.913	0.912	0.920	0.920	0.910	0.911	0.922	0.918	0.709	0.882	0.888	0.878	0.874	0.894
B2F	0.884	0.887	0.891	0.887	0.886	0.926	0.928	0.920	0.915	0.926	0.927	0.920	0.898	0.926	0.928	0.790	0.878	0.881	0.886	0.886	0.898
B3F	0.887	0.890	0.935	0.890	0.925	0.931	0.931	0.922	0.922	0.931	0.932	0.923	0.923	0.931	0.932	0.829	0.877	0.884	0.888	0.888	0.909
B4F	0.898	0.902	0.940	0.901	0.928	0.934	0.933	0.927	0.928	0.936	0.937	0.929	0.927	0.937	0.936	0.841	0.890	0.898	0.899	0.897	0.916
B5F	0.901	0.904	0.943	0.904	0.932	0.936	0.937	0.932	0.932	0.940	0.940	0.932	0.930	0.938	0.939	0.837	0.895	0.901	0.902	0.903	0.919
																					0.869

表 2-9 虛擬 7 樓結構系統不同時之建造成本計算表

虛擬 7 層(18M*18M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	598	1,400	837,200	1,705,200	325,150
樑鋼骨(噸)	33	14,000	462,000		
柱鋼骨(噸)	29	14,000	406,000		
輕質混凝土	598	2,100	1,255,800	2,030,350	(+19.1%)
樑鋼骨(噸)	29	14,000	411,180		
柱鋼骨(噸)	26	14,000	363,370		
虛擬 20 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	10,893	1,400	15,250,200	47,212,200	2,568,846
樑鋼骨(噸)	987	14,000	13,818,000		
柱鋼骨(噸)	1,296	14,000	18,144,000		
輕質混凝土	10,893	2,100	22,875,300	49,781,046	(+5.4%)
樑鋼骨(噸)	866	14,000	12,118,386		
柱鋼骨(噸)	1,056	14,000	14,787,360		
虛擬 60 層(50M*50m)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	38,940	1,400	54,516,000	324,772,000	-14,576,576
樑鋼骨(噸)	4,949	14,000	69,286,000		
柱鋼骨(噸)	14,355	14,000	200,970,000		
輕質混凝土	38,940	2,100	81,774,000	310,195,424	(-4.5%)
樑鋼骨(噸)	4,301	14,000	60,209,534		
柱鋼骨(噸)	12,015	14,000	168,211,890		
實際 26 層					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	16,335	1,400	22,869,000	124,691,000	-3,229,380
樑鋼骨(噸)	4,353	14,000	60,942,000		
柱鋼骨(噸)	2,920	14,000	40,880,000		
輕質混凝土	16,335	2,100	34,303,500	121,461,620	(-2.6%)
樑鋼骨(噸)	3,744	14,000	52,410,120		
柱鋼骨(噸)	2,482	14,000	34,748,000		

表 2-10 靜載重為 370 kg/m² 虛擬結構系統為一致時之建造成本計算表

虛擬 7 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	2,905	1,400	4,067,000	11,361,000	1,165,024
樑鋼骨(噸)	342	14,000	4,788,000		
柱鋼骨(噸)	179	14,000	2,506,000		
輕質混凝土	2,905	2,100	6,100,500	12,526,024	(+10.3%)
樑鋼骨(噸)	298	14,000	4,175,136		
柱鋼骨(噸)	161	14,000	2,250,388		
虛擬 20 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	10,893	1,400	15,250,200	47,212,200	2,568,846
樑鋼骨(噸)	987	14,000	13,818,000		
柱鋼骨(噸)	1,296	14,000	18,144,000		
輕質混凝土	10,893	2,100	22,875,300	49,781,046	(+5.4%)
樑鋼骨(噸)	866	14,000	12,118,386		
柱鋼骨(噸)	1,056	14,000	14,787,360		
虛擬 60 層(50M*50m)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	38,940	1,400	54,516,000	324,772,000	-14,576,576
樑鋼骨(噸)	4,949	14,000	69,286,000		
柱鋼骨(噸)	14,355	14,000	200,970,000		
輕質混凝土	38,940	2,100	81,774,000	310,195,424	(-4.5%)
樑鋼骨(噸)	4,301	14,000	60,209,534		
柱鋼骨(噸)	12,015	14,000	168,211,890		
實際 26 層					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	16,335	1,400	22,869,000	124,691,000	-3,229,380
樑鋼骨(噸)	4,353	14,000	60,942,000		
柱鋼骨(噸)	2,920	14,000	40,880,000		
輕質混凝土	16,335	2,100	34,303,500	121,461,620	(-2.6%)
樑鋼骨(噸)	3,744	14,000	52,410,120		
柱鋼骨(噸)	2,482	14,000	34,748,000		

表 2-11 靜載重為 700 kg/m² 虛擬結構系統為一致時之建造成本計算表

虛擬 7 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	2,896	1,400	4,054,400	13,616,400	670,236
樑鋼骨(噸)	425	14,000	5,950,000		
柱鋼骨(噸)	258	14,000	3,612,000		
輕質混凝土	2,896	2,100	6,081,600	14,286,636	(+4.9%)
樑鋼骨(噸)	360	14,000	5,033,700		
柱鋼骨(噸)	227	14,000	3,171,336		
虛擬 20 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	10,847	1,400	15,185,800	55,365,800	898,268
樑鋼骨(噸)	1,214	14,000	16,996,000		
柱鋼骨(噸)	1,656	14,000	23,184,000		
輕質混凝土	10,847	2,100	22,778,700	56,264,068	(+1.6%)
樑鋼骨(噸)	1,017	14,000	14,242,648		
柱鋼骨(噸)	1,374	14,000	19,242,720		
虛擬 60 層(50M*50m)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	38,591	1,400	54,027,400	380,087,400	-38,893,484
樑鋼骨(噸)	6,212	14,000	86,968,000		
柱鋼骨(噸)	17,078	14,000	239,092,000		
輕質混凝土	38,591	2,100	81,041,100	341,193,916	(-10.2%)
樑鋼骨(噸)	5,057	14,000	70,791,952		
柱鋼骨(噸)	13,526	14,000	189,360,864		
實際 26 層					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	16,335	1,400	22,869,000	124,691,000	-3,229,380
樑鋼骨(噸)	4,353	14,000	60,942,000		
柱鋼骨(噸)	2,920	14,000	40,880,000		
輕質混凝土	16,335	2,100	34,303,500	121,461,620	(-2.6%)
樑鋼骨(噸)	3,744	14,000	52,410,120		
柱鋼骨(噸)	2,482	14,000	34,748,000		

表 2-12 靜載重為 1000 kg/m² 虛擬結構系統為一致時之建造成本計算表

虛擬 7 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	2,887	1,400	4,041,800	15,843,800	442,078
樑鋼骨(噸)	522	14,000	7,308,000		
柱鋼骨(噸)	321	14,000	4,494,000		
輕質混凝土	2,887	2,100	6,062,700	16,285,878	(+2.8%)
樑鋼骨(噸)	436	14,000	6,102,180		
柱鋼骨(噸)	294	14,000	4,120,998		
虛擬 20 層(50M*50M)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	10,806	1,400	15,128,400	63,638,400	-1,394,624
樑鋼骨(噸)	1,492	14,000	20,888,000		
柱鋼骨(噸)	1,973	14,000	27,622,000		
輕質混凝土	10,806	2,100	22,692,600	62,243,776	(-2.2%)
樑鋼骨(噸)	1,231	14,000	17,232,600		
柱鋼骨(噸)	1,594	14,000	22,318,576		
虛擬 60 層(50M*50m)					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	38,245	1,400	53,543,000	429,401,000	-44,225,426
樑鋼骨(噸)	7,071	14,000	98,994,000		
柱鋼骨(噸)	19,776	14,000	276,864,000		
輕質混凝土	38,245	2,100	80,314,500	385,175,574	(-10.3%)
樑鋼骨(噸)	5,777	14,000	80,878,098		
柱鋼骨(噸)	15,999	14,000	223,982,976		
實際 26 層					
	數量	單價	小計	總價	總價差
常重混凝土(方)	16,335	1,400	22,869,000	124,691,000	-3,229,380
樑鋼骨(噸)	4,353	14,000	60,942,000		
柱鋼骨(噸)	2,920	14,000	40,880,000		
輕質混凝土	16,335	2,100	34,303,500	121,461,620	(-2.6%)
樑鋼骨(噸)	3,744	14,000	52,410,120		
柱鋼骨(噸)	2,482	14,000	34,748,000		

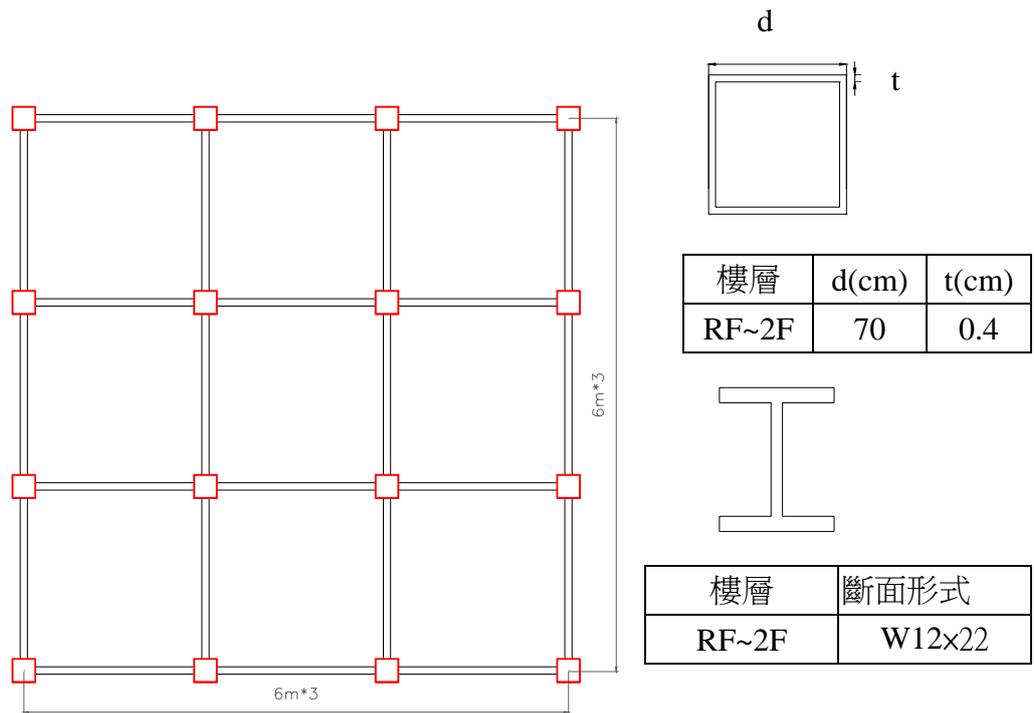


圖 2-1 虛擬 7 樓之結構平面圖

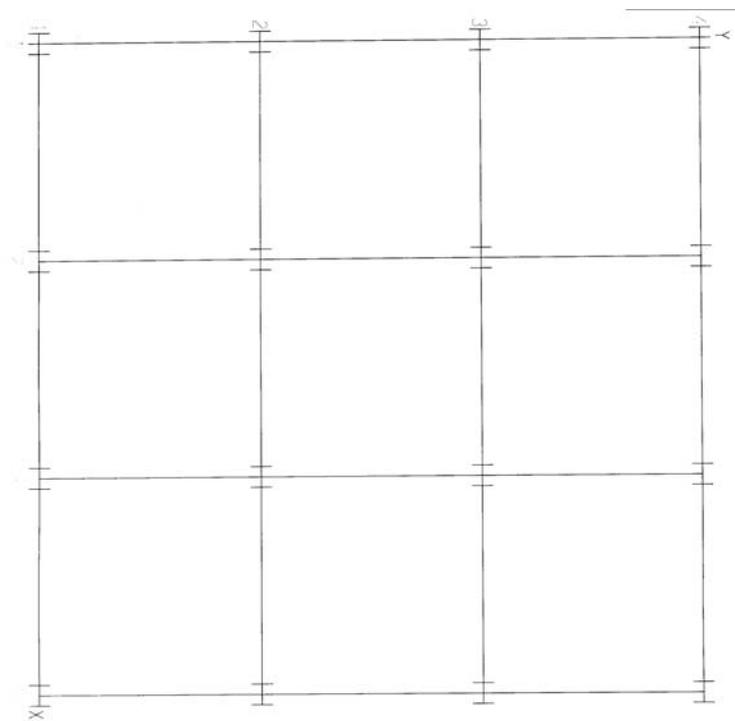


圖 2-2 虛擬 7 樓結構分析模式平面圖

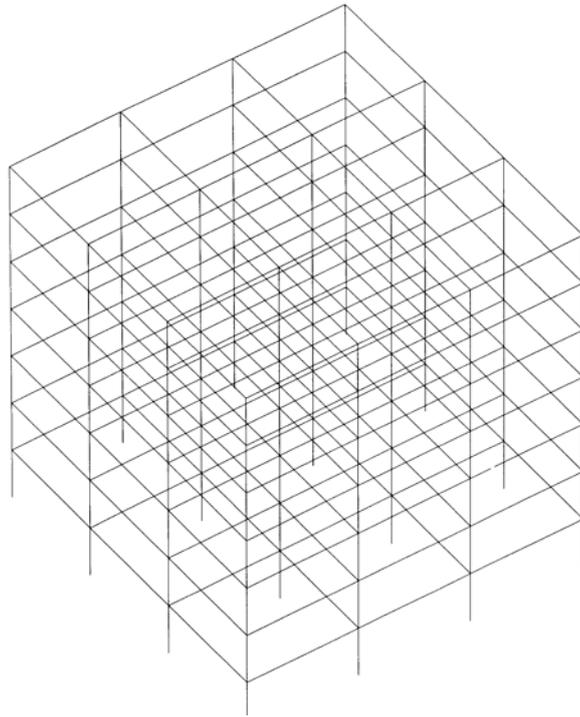
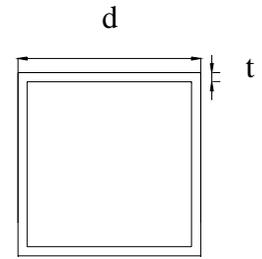
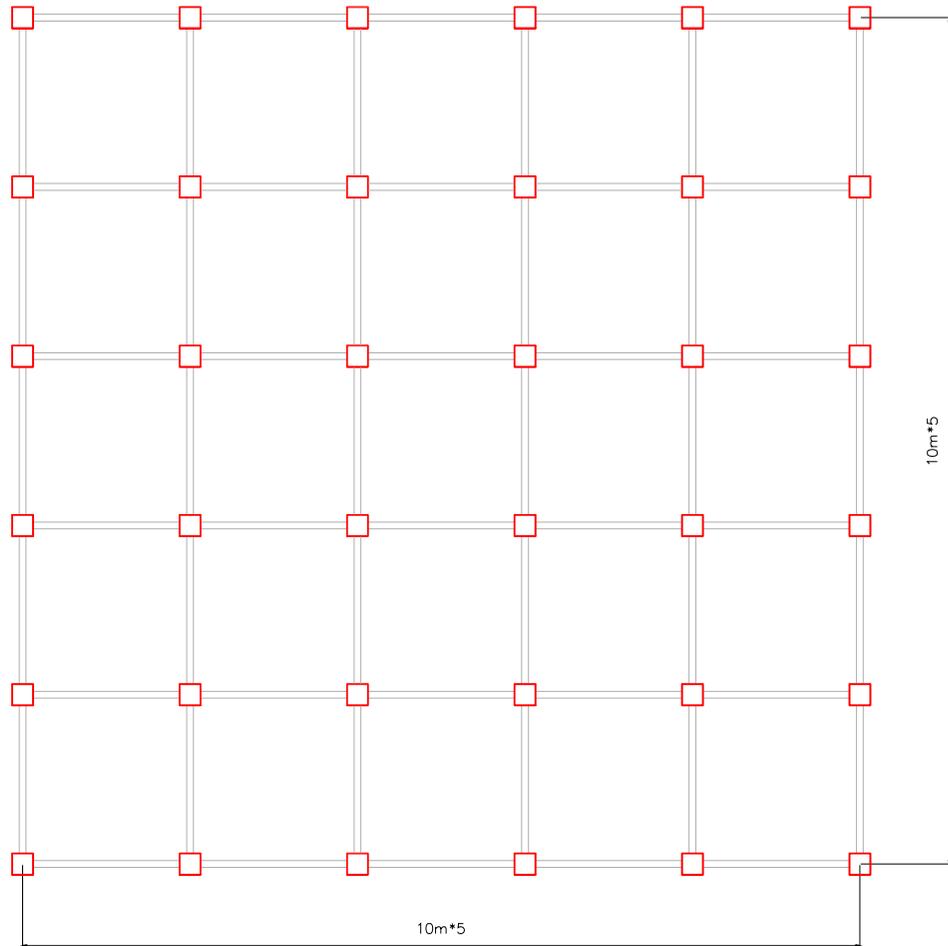
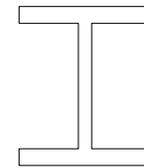


圖 2-3 虛擬 7 樓結構分析模式立體圖

20F



樓層	d(cm)	t(cm)
RF~17R	130	0.6
16F~12F	130	1.1
11F~7F	130	1.8
6F~2F	130	2.5



樓層	斷面形式
RF~17R	W21x55
16F~12F	W21x55
11F~7F	W21x55
6F~2F	W21x55

圖 2-4 虛擬 20 樓之結構平面圖

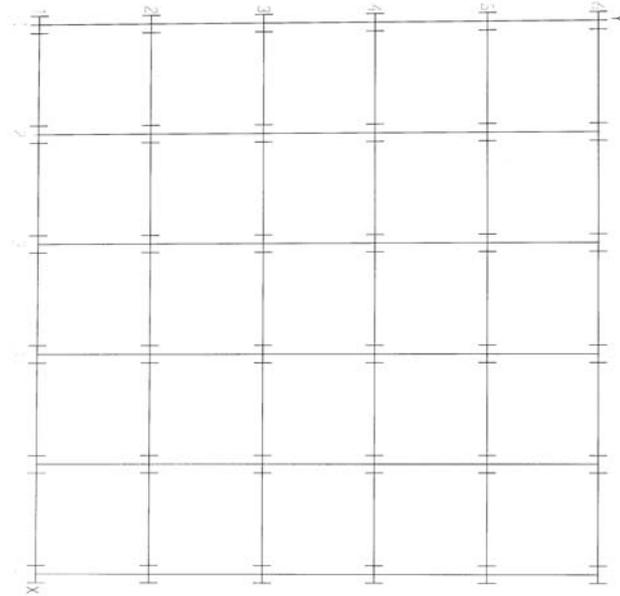


圖 2-5 虛擬 20 樓結構分析模式平面圖

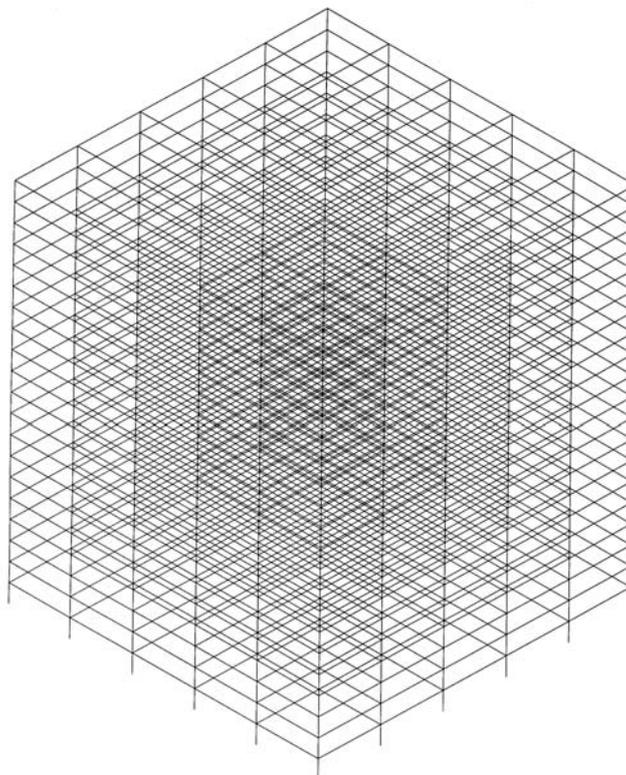


圖 2-6 虛擬 20 樓結構分析模式立體圖

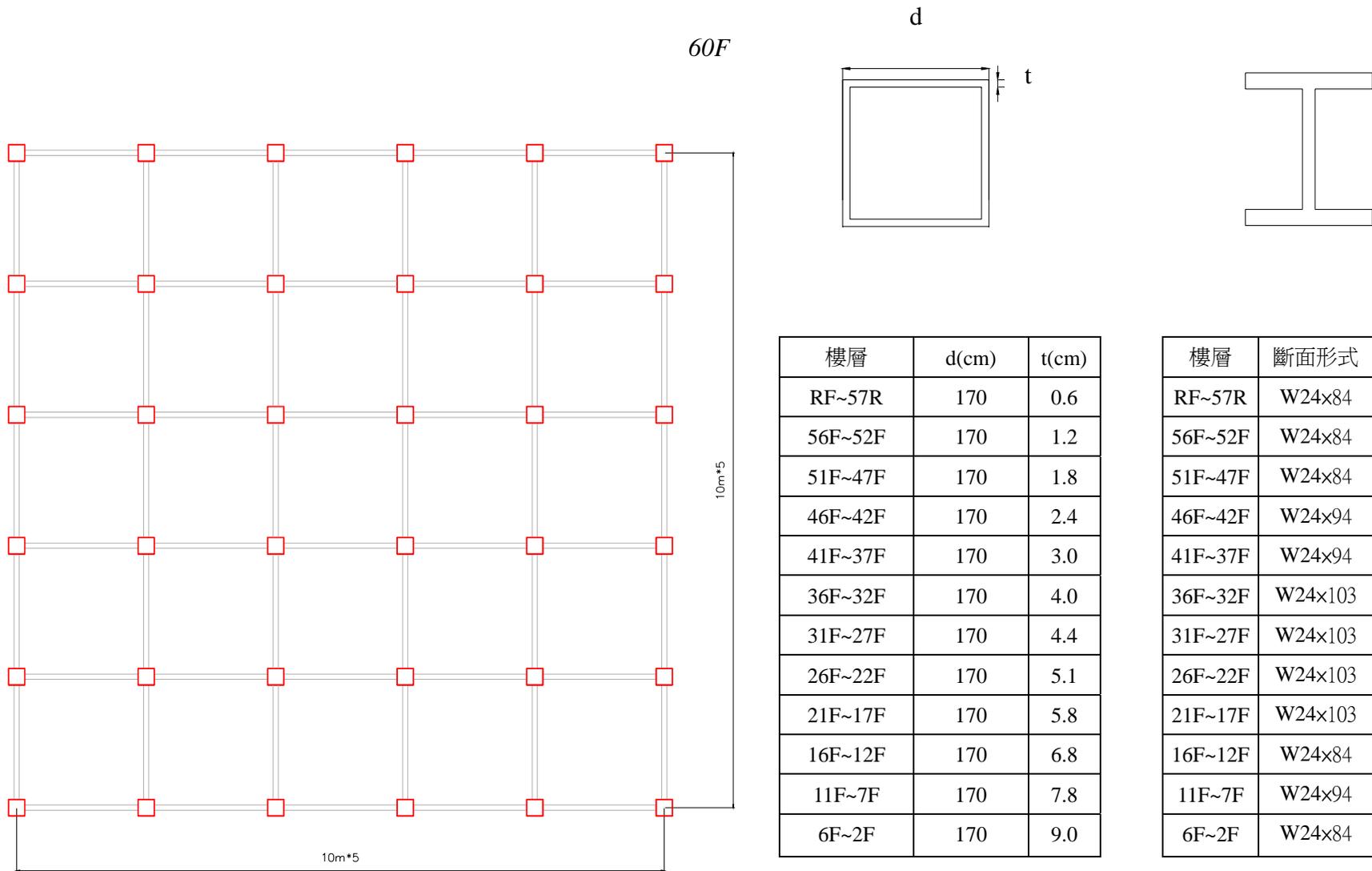


圖 2-7 虛擬 60 樓之結構平面圖

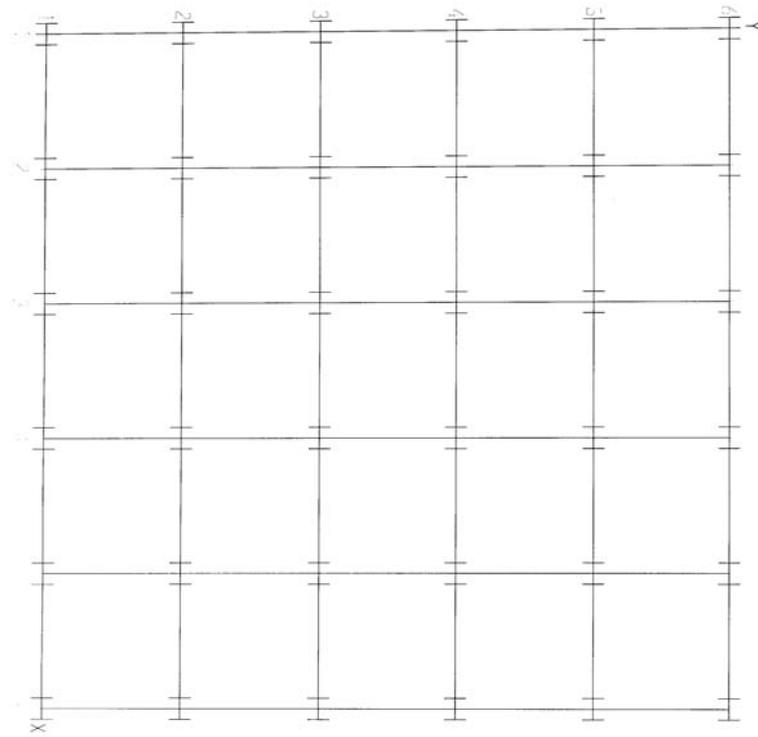


圖 2-8 虛擬 60 樓結構分析模式平面圖

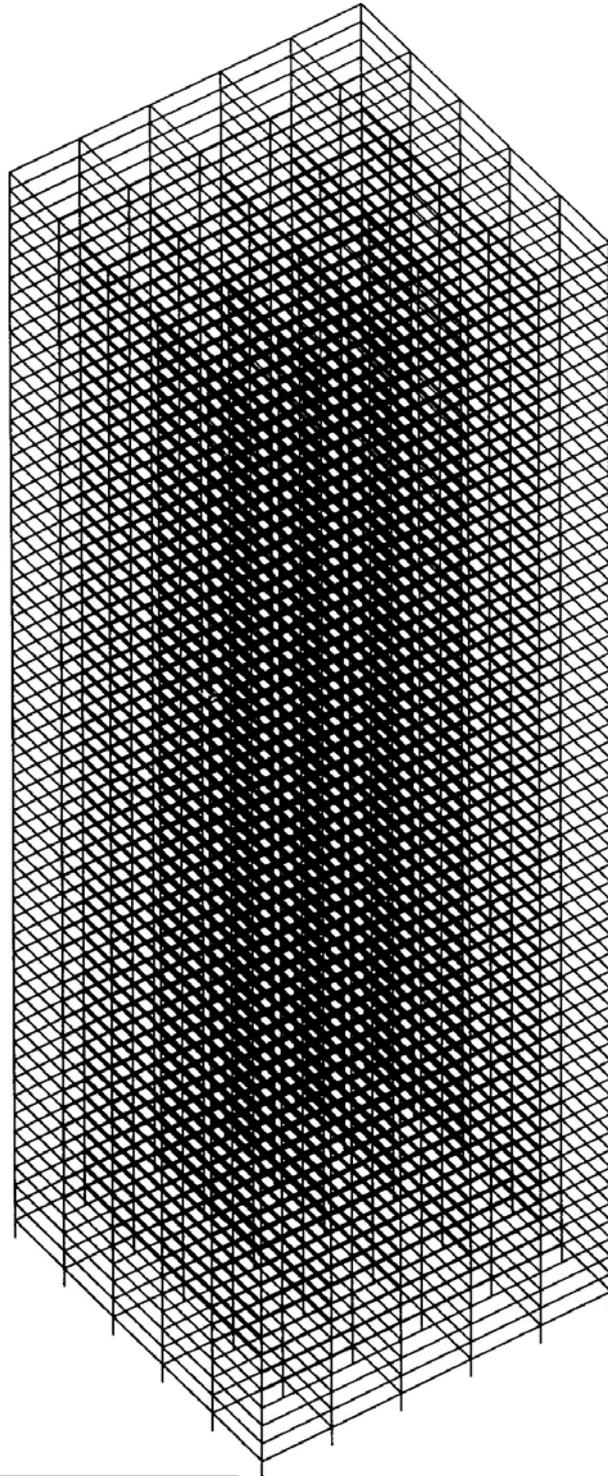


圖 2-9 虛擬 60 樓結構分析模式立體圖

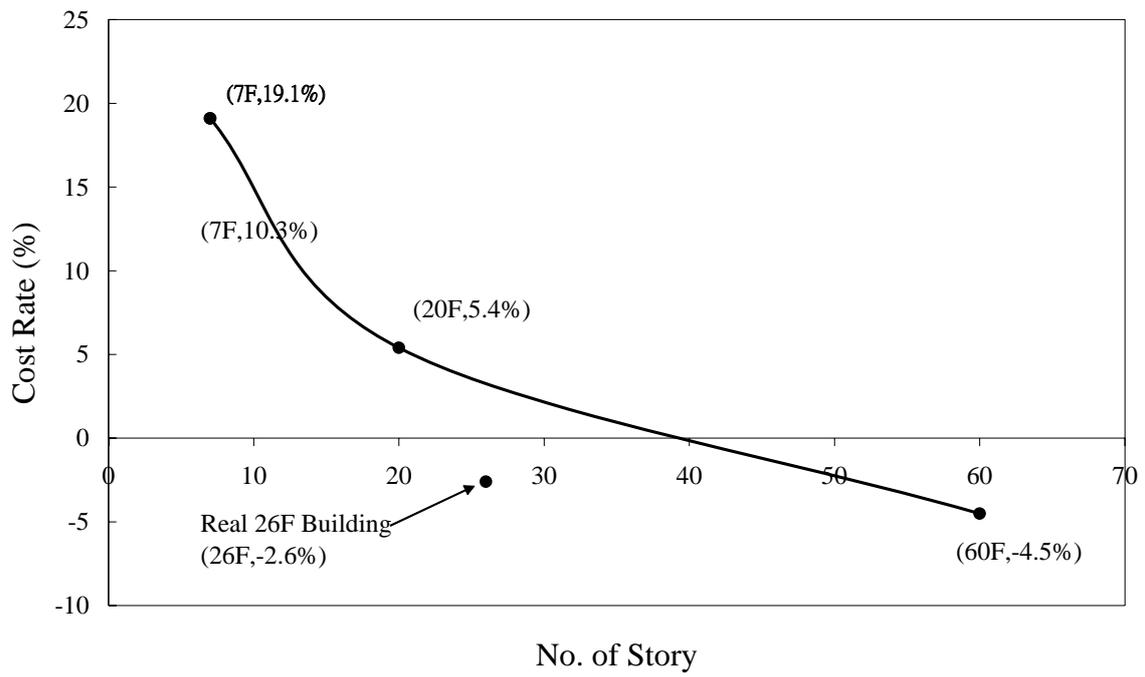


圖 2-10 經濟效益與樓層數目之關係

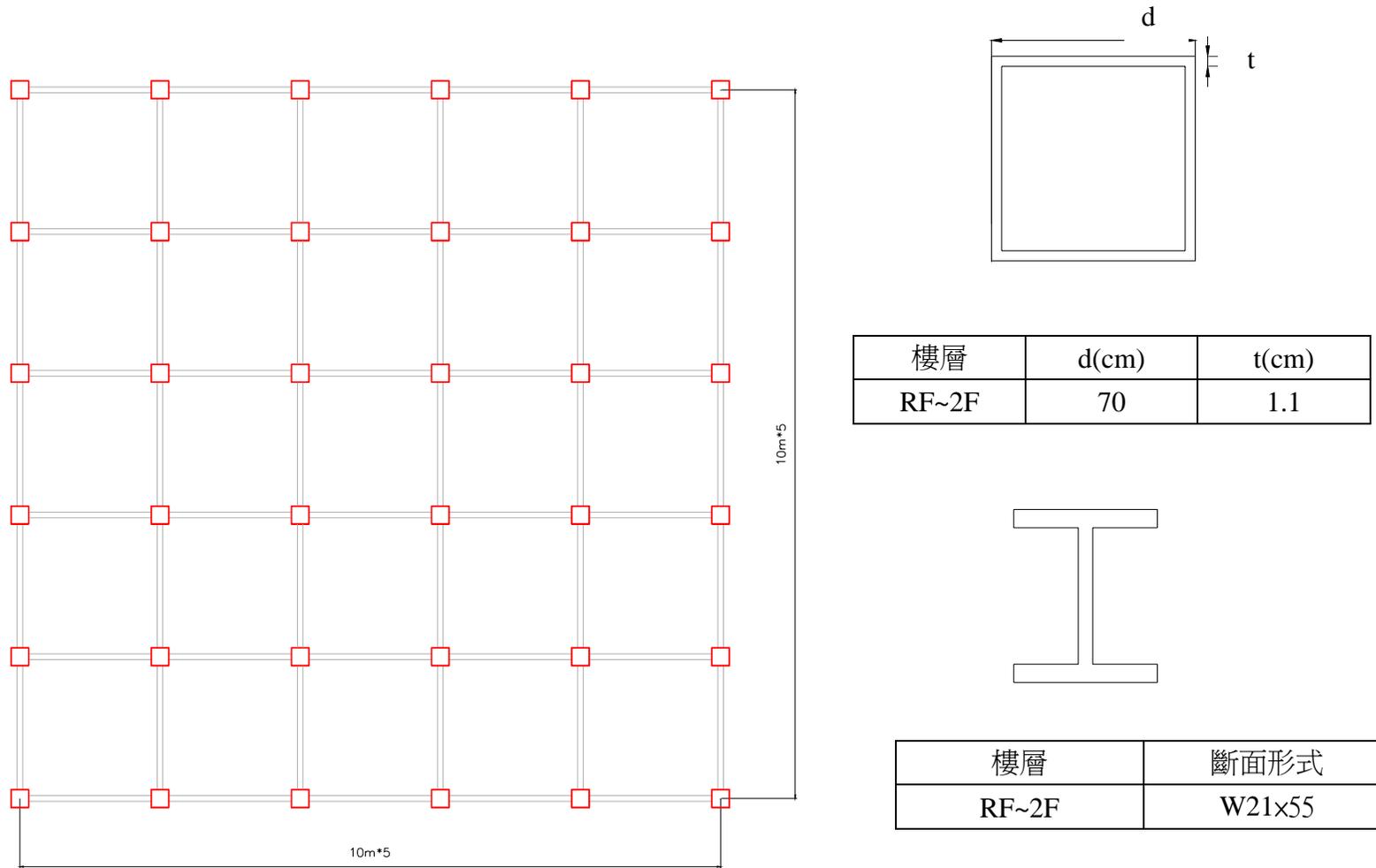


圖 2-11 虛擬 7 樓 5 跨正方形結構分析模式

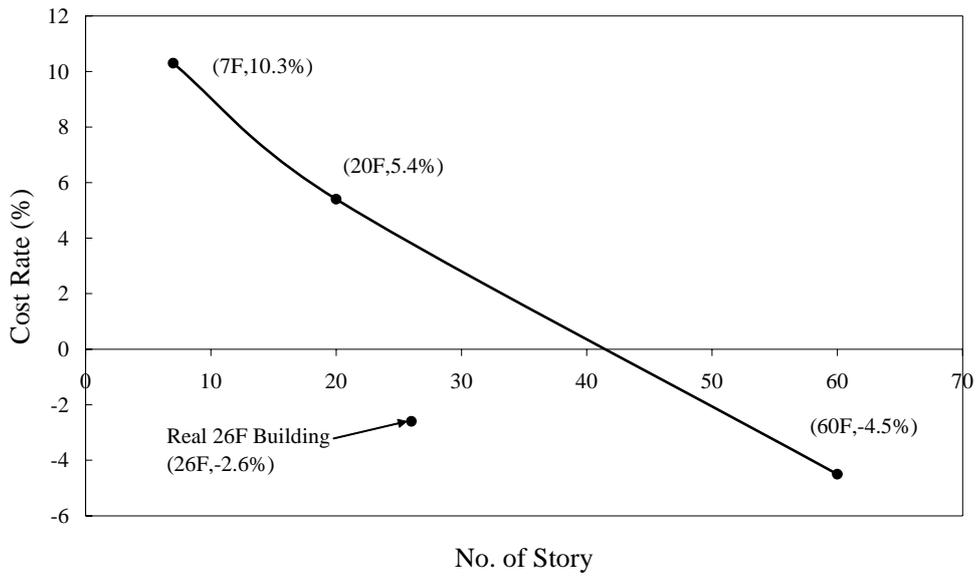


圖 2-12 靜載重為 370 kg/m^2 同一虛擬結構系統之建造經濟效益
與樓層數目之關係

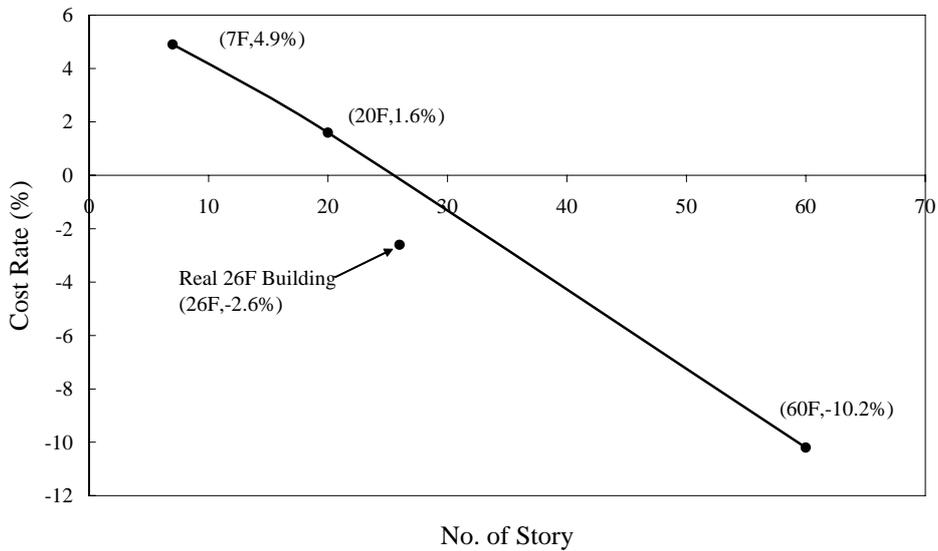


圖 2-13 靜載重為 700 kg/m^2 同一虛擬結構系統之建造經濟效益
與樓層數目之關係

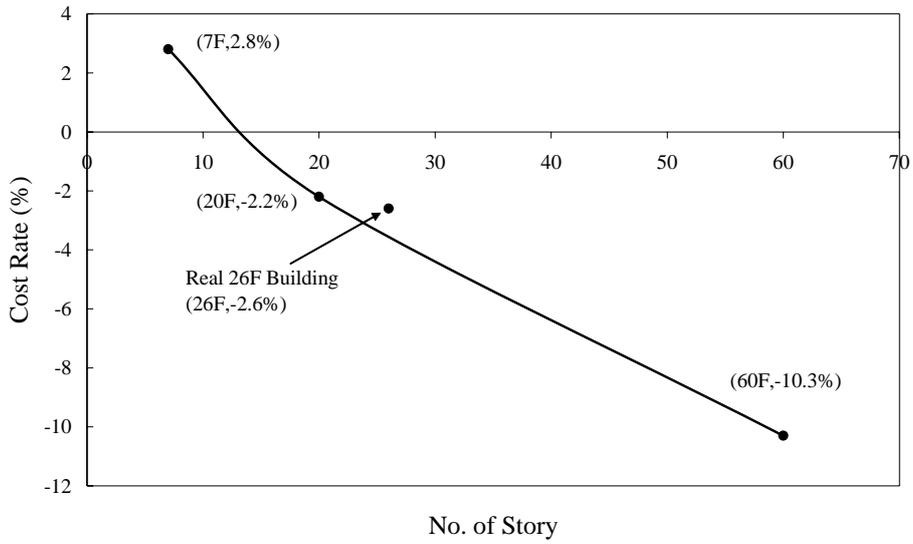


圖 2-14 靜載重為 1000 kg/m^2 同一虛擬結構系統之建造經濟效益
與樓層數目之關係

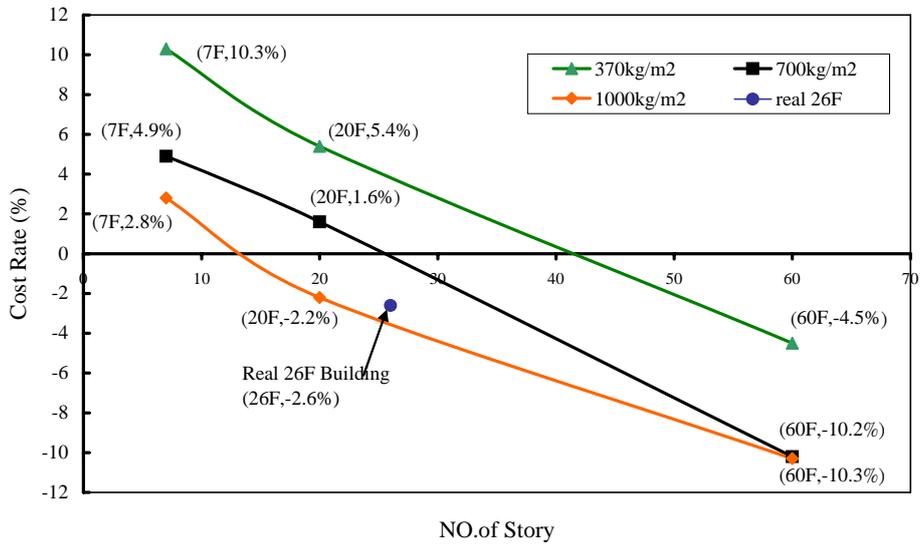


圖 2-15 靜載重為 370、700、 1000 kg/m^2 同一虛擬結構系統之建造經濟效益
與樓層數目之綜合關係

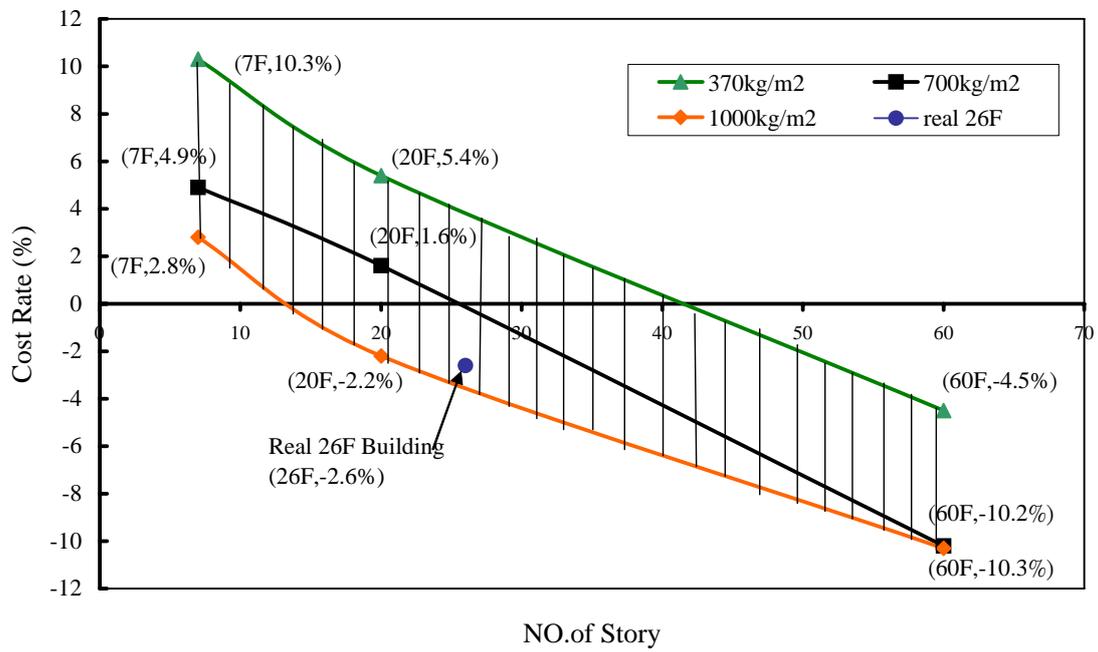


圖 2-16 輕質混凝土經濟效益帶狀圖

第三章 鋼結構輕質混凝土建築之能源成本分析

第一節 緣起與目的

台灣位處亞熱帶氣候區，夏季日照充足，使得氣溫居高不下，大多數建築物必須依賴空調設備來降低室內溫度，以增加舒適度。再者，近數十年來，隨著經濟發展及生活水準的提高，國內大型建築物不斷興建，導致建築產業之能源消耗量不斷增加，建築能源管理因而顯得十分重要。台灣地區近年來的電力系統負載資料亦顯示，耗電量越來越高，而電力備轉率則越來越低。綜上所述，改善建築外殼隔熱性對建築節約能源管理實乃刻不容緩的要務。

廣義而言，建築節約能源管理的範圍包括所有建築物為提供生活、生產與工作的環境所消耗能源之管理(參考文獻中文部分[6])。準此，吾人探討建築節約能源議題時，須考慮自然環境、建築外殼、室內環境三個層面(如圖3-1所示)，方能綜觀其全貌，以收事半功倍之效。其中，建築外殼係指外牆、門窗、屋頂、遮陽等部件，其建材的隔熱性(泛指阻隔熱量流傳的能力)對能源節約實有重大的影響。而土木營建材料中，輕質骨材(Lightweight Aggregate)大都呈現多孔性、高吸水率以及低比重，也因其具有質輕、不燃、多孔的特性而得以展現出良好的隔熱性。許多文獻資料已證實，輕質混凝土(Lightweight Aggregate Concrete，簡稱 LWAC)應用於製作輕質圬工磚、輕質樓版或屋頂，可有效改善建物的隔熱性(參考文獻中文部分[7-9]；外文部分[17-18])。

目前，國內已有許多學者嘗試以水庫淤泥製造性質優良的輕質骨材，並將輕質骨材混凝土推廣應用於建築物，除具有資源回收再利用之環保效益外，尚兼具增強水庫儲水功能及延長水庫使用壽命之功效。本研究即根據目前既有廠商燒製成功的水庫淤泥輕質骨材之材料性質、混凝土性質及成本等資料，直接探討鋼結構輕質骨材混凝土建築物之成本效益問題，並與鋼結構常重混凝土建築物作比較。所探討之建築物包括鋼結構輕質混凝土建築與鋼結

構常重混凝土建築，其結構型態分別為鋼筋輕質/常重混凝土樓版、鋼樑、輕質/常重混凝土填充鋼管柱(Concrete Filled Tube，簡稱 CFT)、及輕質/常重混凝土外牆，在相同的室內外溫差條件下，分析兩者能源成本間的差異。換言之，本研究之目的旨在探討鋼結構輕質混凝土建築之長期能源成本分析，並與鋼結構常重混凝土建築作比較。蓋因根據此項成本效益之研究，可約略看出輕質骨材混凝土使用在結構體之經濟效益規模，故可作為是否全面研究發展及推廣應用結構用途輕質骨材混凝土之參考。

第二節 理論與方法

熱傳遞係由於溫差所引起的能量輸送現象。換言之，只要物體中或物體間有溫度差存在，熱傳遞(heat transfer)便會發生。基本上，熱傳遞的方式可分為熱傳導(thermal conduction)、熱對流(thermal convection)及熱輻射(thermal radiation)三種，如圖 3-2 所示(參考文獻外文部分[19-20])。熱傳導是在緊鄰的固定實體部分做熱的輸送，由微觀的角度來看，就是能量由一個原子或分子傳遞到下一個的過程；熱對流是因液體或氣體的運動及混合，而把熱由一個地方傳送到另一個地方(如：烤箱的對流)；熱輻射是以看不見的波來傳送熱，類似光的傳播(如：太陽的輻射)。

熱傳遞問題的分析係用以計算一個系統或部件的溫度分佈及其它熱物理參數，如熱量的獲取或損失、熱梯度、熱流密度(熱流通量)等。在許多工程應用中，例如：內燃機與渦輪機推進系統的性能；換熱器、管路系統、電子元件等的散熱問題；冷藏室及空調設備等的設計，其熱分析都扮演著重要的角色。本研究旨在分析房屋建築外殼(外牆與屋頂)建材的熱傳透率或熱散發量，並據以比較評估建材的隔熱效率、能源消耗率與經濟效益。此問題可透過平面壁的一維、穩態且無熱源的熱傳遞方式來探討，也就是將房屋建築外殼視為一維的平面壁，其溫度分佈只為 x 的函數且僅在此方向發生熱傳遞。如圖 3-3 所示，平面壁兩側有不同溫度的流體，由 $T_{\infty,1}$ 到 $T_{s,1}$ 為熱對流，

平面壁內部為熱傳導，而 $T_{s,2}$ 到 $T_{\infty,2}$ 為熱對流。從平面壁內部著手，首先決定溫度分佈，然後便可得到熱傳遞率。因此，對於自屋外傳入屋內的熱量估算，可基於建材的熱傳導係數，如下求之。

1. 外殼建材的熱傳透率與熱散發量

假設房屋建築外殼為一平面狀的均勻材料，則此平面壁因熱傳導作用所造成的熱流通量可視為外殼的熱傳透率(或熱穿透率)。換言之，建築物的外殼平均熱傳透率係指當室內外溫差在絕對溫度一度時，外殼單位面積在單位時間內之平均傳透熱量，可表示如下(參考文獻外文部分[19])：

$$q'' = \frac{t_{s,1} - t_{s,2}}{d/k} \quad (3-1)$$

式中：

q'' = 外殼的熱傳透率(W/m²)

$t_{s,1}$ = 外殼建材高溫表面的溫度(°C)

$t_{s,2}$ = 外殼建材低溫表面的溫度(°C)

k = 外殼建材的熱傳導係數(W/m·K)

d = 外殼建材的厚度(m)

若忽略大氣與外殼表面的熱對流效應，並假設外殼建材於室內側的表面係暴露在溫度等於 t_a 的靜止狀態空氣中，也就是說視 $T_{\infty,2} = t_a$ 。依據傳導的熱阻抗與對流的熱阻抗是串聯的觀念，則外殼的熱傳透率改以下式求之：

$$q'' = \frac{t_{s,1} - t_a}{d/k + 1/h} \quad (3-2)$$

式中， h 為空氣膜傳熱係數(W/m²·K)，其值依熱流方向與溫度而定，如表3-1所列。此時，外殼建材於室內側的表面溫度 $t_{s,2}$ (°C) 可利用下式求得：

$$t_{s,2} = \frac{q''}{h} + t_a \quad (3-3)$$

若需推求 T 小時內從外殼建材每單位面積散發的熱量 $Q(\text{Whr}/\text{m}^2)$ ，其計算式為(參考文獻中文部分[9])：

$$Q = q''T \quad (3-4)$$

2. 冷凍負荷之計算

利用式(3-4)可進一步分析建材隔熱性與冷氣能源消耗率的關係。假設建築外殼的總面積等於 A ，則由外殼傳入室內的總熱量為 $Q_T = QA$ ，其中 Q 係利用式(3-4)計算，如此則在 T 小時內傳入的室內顯熱負荷(即冷房負荷)將由冷氣平衡之，即可由 Q_T 導出所需的冷凍負荷，通常以冷凍噸(refrigeration tons，簡寫為R.T.)表示之。而1 R.T.係指一公斤 0°C 的純水於24小時內冷卻成為 0°C 的冰所釋放出之熱量(參考文獻中文部分[10])：

$$\text{冷凍噸} = \frac{\text{水的潛熱}(\text{Kcal}/\text{kg}) \times \text{水的質量}(\text{kg})}{24(\text{hr})}$$

$$1\text{R.T.} = \frac{80(\text{Kcal}/\text{kg}) \times 1000(\text{kg})}{24(\text{hr})} = 3320(\text{Kcal}/\text{hr}) \quad (3-5)$$

因此，冷房空調所需供給的冷凍噸可表示如下：

$$\text{所需冷凍噸} = \frac{Q_T(\text{Kcal})}{3320} \quad (3-6)$$

從式(3-2)與式(3-6)中可看出，當 k 值(熱傳導係數)愈大時， q'' 值也愈大，相對造成冷房空調所需供給的冷凍噸增加。

第三節 研究過程與結果

為能分析及比較常重/輕質混凝土大樓的能源成本，研究上係分別針對 7、20 及 60 層的建築物進行長期能源成本分析。對於上述的每一種樓層數，均分別設計一棟鋼結構常重混凝土大樓及鋼結構輕質混凝土大樓，建築物均配置合理的樓層面積($50\text{m}\times 50\text{m}=2500\text{m}^2$)、柱間跨度(10m)及樓層高度(3m)，建築物的結構形狀均為正方形(每邊 5 跨，每邊長=50m)，結構件型態為鋼筋輕質/常重混凝土樓版、鋼樑、輕質/常重混凝土填充鋼管柱、及輕質/常重混凝土外殼，所有建築物均假設無地下層，均假設在地面處為固定端。換言之，只進行地面層以上之長期能源成本分析與比較。整個研究的過程與結果，茲分述如后。

1. 外殼建材之熱傳透率與熱散發量分析

首先假設在相同的室內外溫差條件下，利用先前介紹的相關式，以分析輕質/常重混凝土外殼的熱傳透率與熱散發量。為簡化探討課題的複雜性，建築物的門窗、遮陽等部件暫且不予考慮，僅在外殼建材(輕質/常重混凝土)與厚度變化條件下來進行分析。至於外氣膜、磁磚、水泥砂漿等因素所造成的影響也予以忽略，因為這並不會影響輕質/常重混凝土建築間所散發熱量與耗能量的比較。本研究所探討的參數包括外殼建材高溫表面的溫度($t_{s,1}$)、室內空氣膜溫度(t_a)、室內外溫度差(Δt)、外殼建材的熱傳導係數(k)以及外殼建材的厚度(d)等 5 項，假設其變化範圍如下：

- $t_{s,1} = 36^\circ\text{C}$ 、 34°C 、 32°C
- $t_a = 24^\circ\text{C}$
- $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ 、 10°C 、 8°C
- $k = 0.05$ 、 0.10 、 0.50 、 1.00 、 1.50 (單位： $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
- $d = 0.23\text{ m}$ 、 0.15 m 、 0.12 m

利用式(3-2)至式(3-4)，可在外殼建材與厚度、室內外溫差變化條件下

，進行外殼熱傳透率(q'')、外殼內側表面溫度($t_{s,2}$)與外殼每單位面積散發熱量(Q)之分析。外牆與屋頂的計算結果分別列於表 3-2 與表 3-3，由表中可看出，不同的外殼建材，因其 k 值不同，故其 q'' 亦不相同。此外，在任一特定條件下， q'' 均隨 k 值之增加而增大，也就是說熱傳導係數愈大的材料具有較高的熱傳透率。圖 3-4 顯示，在特定的外牆厚度條件下，不同 k 值的建材，其 q'' 均隨著 Δt 的增加而增大；尤其 Δt 愈大時，熱傳透率愈多，此時建材的隔熱特性更形重要。而在特定的室內外溫度差條件下，不同 k 值的建材，其 q'' 也都隨著外牆厚度的增加而減少，如圖 3-5 所示。

另一方面，由表 3-2 與表 3-3 的分析結果中，以外殼建材厚度 $d = 0.15$ m、室內外溫差 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ 的條件為例，繪製出外殼 k 值與 $t_{s,2}$ 及 Q 的相互關係。由圖 3-6 的關係曲線可看出， k 值介於 $0.3 \sim 0.8$ W/m·K 的輕質混凝土外牆，其 $t_{s,2}$ 介於 $26.5^\circ\text{C} \sim 29.0^\circ\text{C}$ ，比常重混凝土外牆(其 k 值介於 $1.0 \sim 1.5$ W/m·K)低上 $0.7^\circ\text{C} \sim 4.4^\circ\text{C}$ ，而其 24 小時的 Q 值僅為常重混凝土外牆之 $37\% \sim 88\%$ ；由圖 3-7 則可看出，輕質混凝土屋頂的 $t_{s,2}$ 介於 $26.5^\circ\text{C} \sim 29.0^\circ\text{C}$ ，比常重混凝土屋頂低上 $0.7^\circ\text{C} \sim 4.5^\circ\text{C}$ ，而其 24 小時的 Q 值僅為常重混凝土屋頂之 $38\% \sim 89\%$ 。此外，由圖 3-6 與圖 3-7 的關係曲線也可約略看出， k 值小於 0.5 W/m·K 時，外殼之 $t_{s,2}$ 和 Q 都與 k 值成接近線性的關係；一旦 k 值大於 0.5 W/m·K，曲線的走勢則變得較為平緩。此顯示建材 k 值小於 0.5 W/m·K 者，可獲得較顯著的隔熱效果，從而有效降低耗費的能源。

2. 輕質混凝土作為外殼建材之能源節約率

利用式(3-4)，可進一步分析不同樓層建築物的外殼散發總熱量。假設建築物外牆與屋頂的總面積分別為 A_w 與 A_r ，則 T 小時內由外殼散發的總熱量(Q_T)可表示為：

$$Q_T = Q_w A_w + Q_r A_r = q_w'' T A_w + q_r'' T A_r \quad (3-7)$$

式中：

$Q_w =$ 每單位面積外牆每小時散發的熱量(KW/hr/m²)

$Q_r =$ 每單位面積屋頂每小時散發的熱量(KW/hr/m²)

$q_w'' =$ 外牆的熱傳透率(KW/m²)

$q_r'' =$ 屋頂的熱傳透率(KW/m²)

在外殼建材厚度 $d = 0.15$ m、室內空氣膜溫度 $t_a = 24^\circ\text{C}$ 、室內外溫差 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ 、 10°C 與 8°C 的條件下，將 3 種(7 層、20 層及 60 層)大樓的外牆與屋頂面積代入式(3-7)，則可計算出不同樓層建築物於 24 小時內的外殼散發總熱量，如表 3-4 所示。舉例來說，假設 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ ，若取常重混凝土的 k 值為 1.5 W/m·K，則以常重混凝土為外殼建材的 7 層、20 層及 60 層大樓於 24 小時內的外殼散發總熱量可由表 3-4 查得，分別為 8064.28、17647.54 及 47134.52 KW/hr；同樣假設 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ ，若取輕質混凝土的 k 值為 0.5 W/m·K，則以輕質混凝土為外殼建材的 7 層、20 層及 60 層大樓於 24 小時內的外殼散發總熱量也可由表 3-4 查得，分別為 4391.87、9563.04 及 25474.33 KW/hr。比較相同樓層高度之輕質/常重混凝土大樓於 24 小時內的外殼散發總熱量，可發現輕質混凝土大樓的外殼散發總熱量約為常重混凝土大樓的 54%，且其值與樓層高度的改變無關。

若採用不同 k 值的輕質混凝土取代 k 值為 1.5 W/m·K 的常重混凝土作為外殼建材，以 7 層的輕質/常重混凝土大樓為例，其外殼散發總熱量的比值隨輕質混凝土 k 值的減少而降低；或以外殼建材的能源節約率來評估，則其值隨 k 值的減少而增加，如圖 3-8 所示。由圖 3-8 中亦可看出，輕質混凝土 k 值小於 0.5 W/m·K 時，其外殼散發總熱量與常重混凝土的比值愈小，此結果印證先前所述的建材 k 值小於 0.5 W/m·K 可獲得較顯著的隔熱效果。尤其甚者，若以 k 值介於 $0.05\sim 0.1$ W/m·K 的輕質混凝土取代 k 值為 1.5 W/m·K 的常重混凝土作為外殼建材，則輕質混凝土外殼散發總熱量可進一步降低為常重混凝土大樓的 7.6%~14.6%，即其散發總熱量可減少 92.4%~85.4%。換言之，以具有優良隔熱性的輕質混凝土為外殼建材者，其能源消耗率僅為常重混凝土外殼的 7.6%~14.6%，亦即其能源節約率

高達 92.4%~85.4%。

3. 輕質混凝土作為外殼建材之經濟效益

由先前的分析可知，利用輕質混凝土的隔熱特性來達到隔熱節能之目的，理論上是可行的。然而，相對於一般常重骨材，輕質骨材之製造成本較高，其實際面則應分析輕質混凝土作為外殼建材是否具有經濟效益。因此，須先探討出輕質/常重混凝土作為外殼建材的長期能源成本差異，再與外殼建材的成本比較，俾供全面研究發展及推廣應用結構用途輕質骨材混凝土之參考。如前所述，利用經由外殼傳入室內的熱量可推算出溫度平衡上所需的冷房空調冷凍噸。如此，則依冷凍噸需求量的多寡計算其耗電量與用電成本，即可進行外殼建材的長期能源成本分析，並據以比較其經濟效益。而在冷房負荷的計算過程中，僅考慮外殼建材的顯熱負荷，其他室內顯熱負荷、室內潛熱負荷、換氣負荷、配管負荷等因素則不予考慮，以簡化分析的過程。

在外殼建材厚度 $d = 0.15 \text{ m}$ 、室內空氣膜溫度 $t_a = 24^\circ\text{C}$ 、室內外溫差 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ 、 10°C 與 8°C 的條件下，假設電費每度為 3.5 元，可計算出不同樓層輕質/常重混凝土建築物之冷房每小時運轉所需電費，如表 3-5 所示。以 7 層樓建築物為例，其冷房空調每小時運轉所需電費隨外殼 k 值與 Δt 的增加而增加，如圖 3-9 所示。此外，以外殼建材厚度 $d = 0.15 \text{ m}$ 、室內外溫差 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ 的條件為例，由圖 3-10 可知，不同樓層建築物冷房空調每小時運轉所需電費均隨外殼 k 值的增加而增加。同樣條件下，若以 k 值為 $0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的輕質混凝土取代 k 值為 $1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的常重混凝土，則由圖 3-11 可看出，輕質/常重混凝土建築物之冷房空調用電成本間的差異隨空調運轉時間的增加而明顯增加；若以輕質混凝土取代常重混凝土所節省的用電成本來評估，則其經濟效益將隨輕質/常重混凝土建築物樓層的增加而急遽擴增，如圖 3-12 所示。

由上述分析可知，以輕質混凝土取代常重混凝土可節省冷房空調的用電成本。但另一方面，在未來的使用年限內，是否能藉由輕質混凝土外殼

建材長期的能源節約效益來彌補外殼建材成本與建築物建造成本的差異，仍有賴完整的評估技術——工程經濟。在外殼建材厚度 $d = 0.15 \text{ m}$ 、室內外溫差 $\Delta t = 12^\circ\text{C}$ 的條件下，以 k 值為 $0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的輕質混凝土取代 k 值為 $1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的常重混凝土，則可進行不同樓層高度輕質/常重混凝土建築物之經濟評估。研究上，對於輕質/常重混凝土建築物投資方案的經濟評估準係採用現值法(present worth method)。換言之，對任一投資方案，將其預估的現金流量，按其最低可接受報酬率(MARR)折現至現在的價值(PW)，此即為該方案的現值或經濟價值。假設該方案的現金流量僅發生在期末，亦即間斷的現金流量，故其計息次數及資金出入均為間斷，因此複利之計息公式可採間斷資金間斷複利的方式。因而該方案的現值可表示如下：

$$PW(i) = \sum_{j=0}^N A_j (1+i)^{-j} \quad (3-8)$$

式中：

$PW(i)$ = 在 i 下所算出來的淨現值

A_j = 第 j 期期末所發生的淨現金流量

i = 折現率或最低可接受報酬率

N = 專案的經濟期限

在現值法的評估分析過程中，係假設輕質混凝土為 2100 元/m^3 、常重混凝土為 1400 元/m^3 、最低投資報酬率為 10% 、服務年限為 50 年、冷房空調運轉時間為 1500 小時/年、靜載重為 370 kg/m^2 且虛擬結構系統為一致時之建造成本，評估結果列於表 3-6。依現值法的評估準則，決策應採用現值較大的方案。而由表 3-6 中可清楚看出，不論樓層高度為何，輕質混凝土建築物之現值均大於常重混凝土建築物者；換言之，輕質混凝土建築物之經濟效益均優於常重混凝土建築物者。

第四節 小結

建築外殼之節能特性主要與壁體的熱傳透率即隔熱性有關，因此增加外殼隔熱性能是其節能之道。換言之，外殼構造應以能減少外界熱量侵入為必要條件。就住宿類建築物而言，其不透光部位屋頂與外牆構造之平均熱傳透率應分別低於 1.5 W/m^2 與 3.5 W/m^2 。而一般 12 cm 厚的常重混凝土外殼之平均熱傳透率均高於前述限制，故必須選用其他具有良好隔熱能力的建材，或加裝隔熱材、加強中間空氣層及隔熱處理，以符合規範的要求。本研究在改變外殼建材與其厚度、室內外溫差的條件下，進行不同樓層輕質/常重混凝土建築的熱傳透率與熱散發量分析，再依據熱平衡原理推算冷房空調的耗電量與用電成本，以探討輕質混凝土作為建築外殼的經濟效益。綜合以上析論，可獲致以下幾點結論：

1. 熱傳導係數愈大的材料對周圍環境變化的反應較快，以致熱能通過時，只有少數能量被吸收以提升其溫度，因而有較多的能量被傳遞過去，故其熱傳透率與熱散發量也相對增加。在特定的外牆厚度條件下，不同熱傳導係數的建材，其熱傳透率均隨著室內外溫差的增加而增大；尤其室內外溫差愈大時，熱傳透率愈多，此時建材的隔熱特性更形重要。而在特定的室內外溫度差條件下，不同熱傳導係數的建材，其熱傳透率均隨著外牆厚度的增加而減少。在特定的外殼厚度、室內空氣膜溫度與室內外溫差條件下，以輕質混凝土取代常重混凝土作為外殼建材時，輕質/常重混凝土大樓間外殼散發總熱量的比值維持一定，與樓層高度的改變無關。建築物外殼散發總熱量和能源節約率均與其熱傳導係數有關，若熱傳導係數愈小，則散發總熱量愈少，能源節約率相對增加。由此觀之，建築物外殼建材的熱傳導係數與空調設備的能源消耗率之間具有正比的關係。輕質/常重混凝土建築物之冷房空調用電成本間的差異隨空調運轉時間的增加而明顯增加；若以輕質混凝土取代常重混凝土所節省的用電成本來評估，則其經濟效益將隨輕質/常重混凝土建築物樓層的增加而急遽擴增。經由現值法綜合考量外殼建材長期的能源費用、外殼建材成本

與建築物出租收益的經濟評估結果可知，不論樓層高度為何，輕質混凝土建築物之經濟效益均優於常重混凝土建築物者。

表 3-1 空氣膜表面之傳熱係數

膜面方向	熱流方向	各種膜面溫度之 h 值($W/m^2 \cdot K$)			
		24°C	43°C	55°C	66°C
水平	向上	8.18	11.24	12.49	13.57
水平	向上	6.76	8.69	9.42	10.16
垂直	水平	7.44	9.94	10.96	11.87

表 3-2 外牆建材之熱傳導係數對牆體散發熱量與內牆表面溫度之影響

外牆面溫度 $t_{s,1}$ (°C)	室內空氣膜 溫度 t_a (°C)	牆體厚度 d (m)	外牆熱傳導 係數 k (W/m·K)	空氣膜傳熱 係數 h (W/m ² ·K)	外牆熱傳透 率 q'' (W/m ²)	內牆面溫度 $t_{s,2}$ (°C)	24hr 牆散發 的熱量 Q (KW hr/m ²)
36	24	0.23	0.05	7.44	2.53	24.3	0.061
			0.10		4.93	24.7	0.118
			0.50		20.19	26.7	0.485
			1.00		32.93	28.4	0.790
			1.50		41.70	29.6	1.001
34			0.05		2.11	24.3	0.051
			0.10		4.11	24.6	0.099
			0.50		16.82	26.3	0.404
			1.00		27.44	27.7	0.659
			1.50		34.75	28.7	0.834
32		0.05	1.69		24.2	0.041	
		0.10	3.29		24.4	0.079	
		0.50	13.46		25.8	0.323	
		1.00	21.95		27.0	0.527	
		1.50	27.80		27.7	0.667	
36		0.15	0.05		3.83	24.5	0.092
			0.10		7.34	25.0	0.176
			0.50		27.62	27.7	0.663
			1.00		42.19	29.7	1.013
			1.50		51.19	30.9	1.229
34	0.05		3.19	24.4	0.077		
	0.10		6.12	24.8	0.147		
	0.50		23.02	27.1	0.552		
	1.00		35.16	28.7	0.844		
	1.50		42.66	29.7	1.024		
32	0.05	2.55	24.3	0.061			
	0.10	4.89	24.7	0.117			
	0.50	18.42	26.5	0.442			
	1.00	28.13	27.8	0.675			
	1.50	34.13	28.6	0.819			
36	0.12	0.05	4.73	24.6	0.114		
		0.10	8.99	25.2	0.216		
		0.50	32.05	28.3	0.769		
		1.00	47.17	30.3	1.132		
		1.50	55.97	31.5	1.343		
34		0.05	3.95	24.5	0.095		
		0.10	7.49	25.0	0.180		
		0.50	26.71	27.6	0.641		
		1.00	39.31	29.3	0.943		
		1.50	46.64	30.3	1.119		
32	0.05	3.16	24.4	0.076			
	0.10	6.00	24.8	0.144			
	0.50	21.37	26.9	0.513			
	1.00	31.45	28.2	0.755			
	1.50	37.31	29.0	0.895			

表 3-3 屋頂建材之熱傳導係數對樓版散發熱量與樓版內表面溫度之影響

屋頂面溫度 $t_{s,1}$ (°C)	室內空氣膜 溫度 t_a (°C)	屋頂厚度 d (m)	屋頂熱傳導 係數 k (W/m·K)	空氣膜傳熱 係數 h (W/m ² ·K)	屋頂熱傳透 率 q'' (W/m ²)	屋頂內面 溫度 $t_{s,2}$ (°C)	24hr 屋頂散 發的熱量 Q (KW hr/m ²)
36	24	0.23	0.05	6.76	2.53	24.4	0.061
			0.10		4.90	24.7	0.118
			0.50		19.74	26.9	0.474
			1.00		31.75	28.7	0.762
			1.50		39.83	29.9	0.956
34			0.05		2.11	24.3	0.051
			0.10		4.09	24.6	0.098
			0.50		16.45	26.4	0.395
			1.00		26.46	27.9	0.635
			1.50		33.19	28.9	0.797
32		0.05	1.68		24.2	0.040	
		0.10	3.27		24.5	0.078	
		0.50	13.16		25.9	0.316	
		1.00	21.17		27.1	0.508	
		1.50	26.55		27.9	0.637	
36		0.15	0.05		3.81	24.6	0.091
			0.10		7.28	25.1	0.175
			0.50		26.79	28.0	0.643
			1.00		40.28	30.0	0.967
			1.50		48.40	31.2	1.162
34	0.05		3.18	24.5	0.076		
	0.10		6.07	24.9	0.146		
	0.50		22.32	27.3	0.536		
	1.00		33.57	29.0	0.806		
	1.50		40.33	30.0	0.968		
32	0.05	2.54	24.4	0.061			
	0.10	4.85	24.7	0.117			
	0.50	17.86	26.6	0.429			
	1.00	26.85	28.0	0.644			
	1.50	32.27	28.8	0.774			
36	0.12	0.05	4.71	24.7	0.113		
		0.10	8.90	25.3	0.214		
		0.50	30.93	28.6	0.742		
		1.00	44.79	30.6	1.075		
		1.50	52.65	31.8	1.264		
34		0.05	3.92	24.6	0.094		
		0.10	7.42	25.1	0.178		
		0.50	25.78	27.8	0.619		
		1.00	37.32	29.5	0.896		
		1.50	43.87	30.5	1.053		
32	0.05	3.14	24.5	0.075			
	0.10	5.94	24.9	0.142			
	0.50	20.62	27.1	0.495			
	1.00	29.86	28.4	0.717			
	1.50	35.10	29.2	0.842			

表 3-4 外殼建材之熱傳導係數對不同樓層高度建築物外殼散發總熱量之影響

外殼面溫度 $t_{s,1}$ (°C)	室內空氣膜溫度 t_a (°C)	外殼厚度 d (m)	外殼熱傳導係數 k (W/m·K)	空氣膜傳熱係數 h (W/m ² ·K)		24hr 外殼散發的總熱量 Q_T (KWhr)		
				垂直	水平	7 層樓	20 層樓	60 層樓
36	24	0.15	0.05	7.44	6.76	614.63	1331.32	3536.52
			0.10			1177.00	2551.44	6780.49
			0.50			4391.87	9563.04	25474.33
			1.00			6669.72	14568.21	38871.28
			1.50			8064.28	17647.54	47134.52
34			0.05			512.19	1109.44	2947.10
			0.10			980.83	2126.20	5650.41
			0.50			3659.89	7969.20	21228.61
			1.00			5558.10	12140.18	32392.73
32			1.50			6720.23	14706.29	39278.76
			0.05			409.75	887.55	2357.68
			0.10			784.66	1700.96	4520.33
			0.50			2927.92	6375.36	16982.89
			1.00			4446.48	9712.14	25914.18
			1.50			5376.18	11765.03	31423.01

表 3-5 外殼熱傳導係數對不同樓層高度建築物冷房運轉所需電費之影響

外殼面溫度 $t_{s,1}$ (°C)	室內空氣膜溫度 t_a (°C)	外殼厚度 d (m)	外殼熱傳導係數 k (W/m·K)	空氣膜傳熱係數 h (W/m ² ·K)		冷房運轉所需電費 (元/小時)		
				垂直	水平	7 層樓	20 層樓	60 層樓
36	24	0.15	0.05	7.44	6.76	89.63	194.15	515.74
			0.10			171.65	372.08	988.82
			0.50			640.48	1394.61	3715.01
			1.00			972.67	2124.53	5668.73
			1.50			1176.04	2573.60	6873.78
34			0.05			74.69	161.79	429.79
			0.10			143.04	310.07	824.02
			0.50			533.73	1162.18	3095.84
			1.00			810.56	1770.44	4723.94
32			1.50			980.03	2144.67	5728.15
			0.05			59.76	129.43	343.83
			0.10			114.43	248.06	659.21
			0.50			426.99	929.74	2476.67
			1.00			648.45	1416.35	3779.15
			1.50			784.03	1715.73	4582.52

表 3-6 不同樓層高度輕質/常重混凝土建築物之經濟評估

	7 層樓建築物		20 層樓建築物		60 層樓建築物	
	輕質混凝土	常重混凝土	輕質混凝土	常重混凝土	輕質混凝土	常重混凝土
建造成本(萬元)	1252.6	1136.1	4978.1	4721.2	31019.5	32477.2
服務年限	50	50	50	50	50	50
每年冷房空調運轉費用(萬元)	96.1	176.4	209.2	386.0	557.3	1031.1
最低投資報酬率(MARR)	10%	10%	10%	10%	10%	10%
現值(萬元)	-2205.4	-2285.1	-7052.3	-8548.3	-36545.0	-42700.4

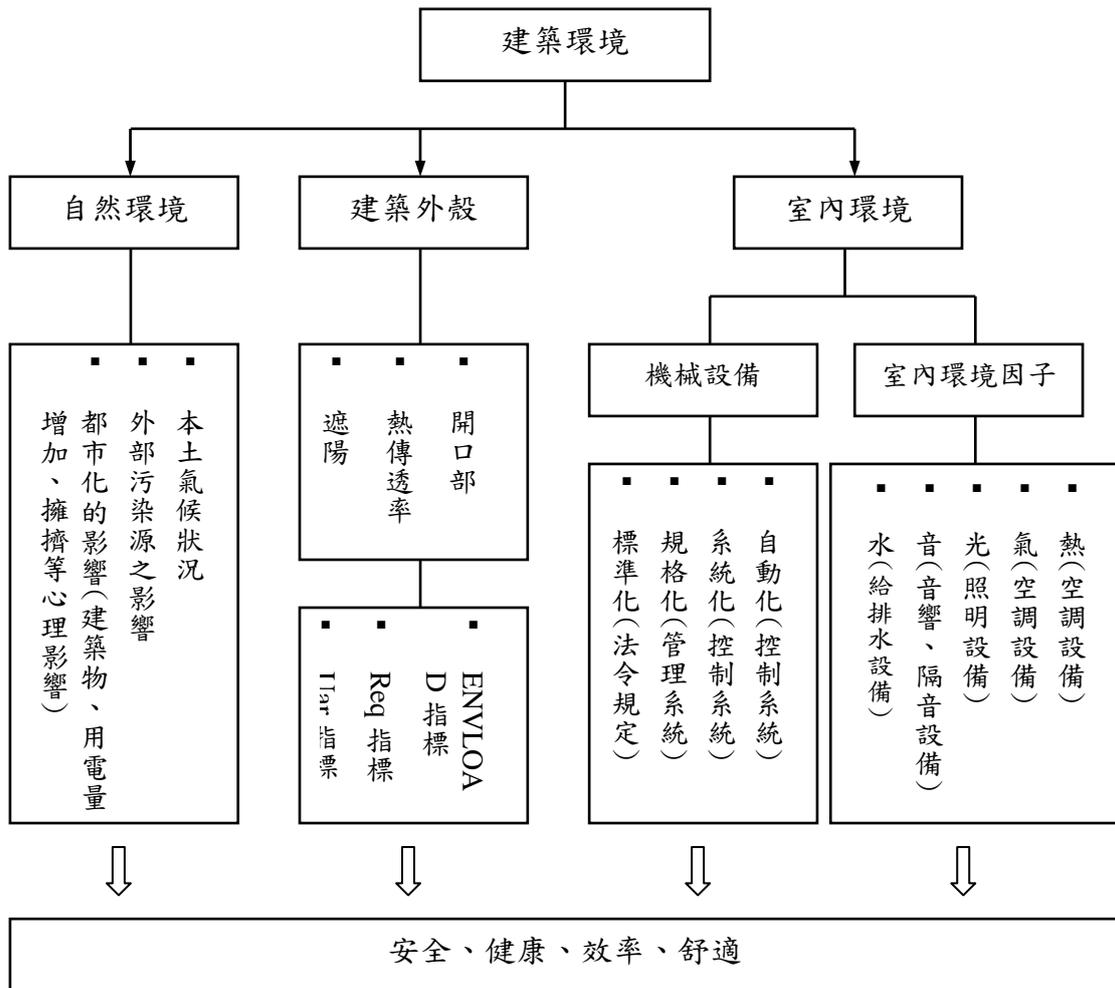
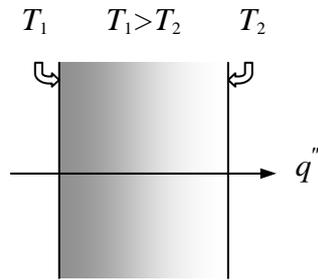
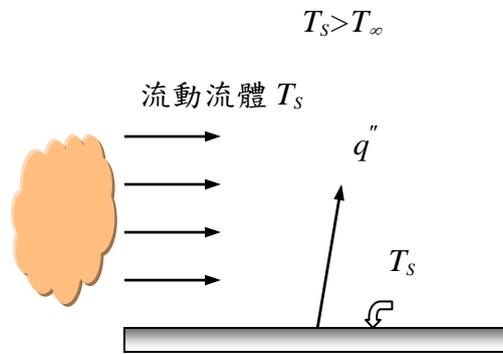


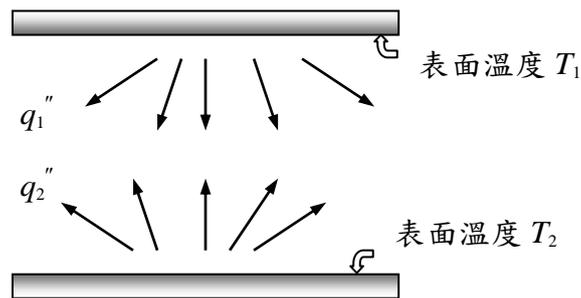
圖 3-1 建築節約能源體系架構圖



(a) 經固體或靜止液體之熱傳導



(b) 由表面流動流體之熱對流



(c) 兩表面間之淨輻射熱交換

圖 3-2 熱傳遞之方式(a)傳導 (b)對流 (c)幅射

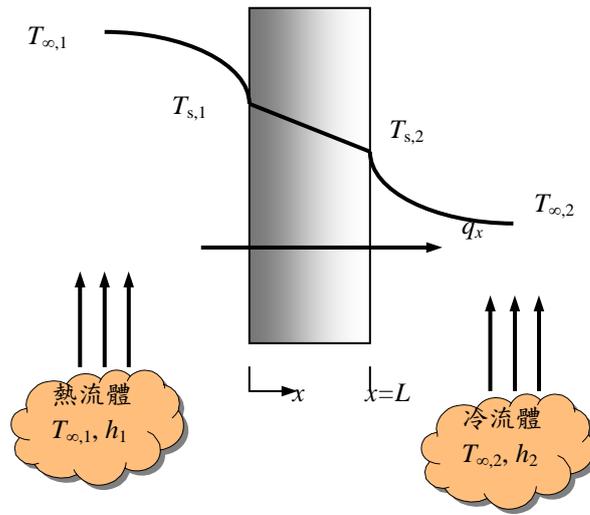


圖 3-3 通過平面壁的热傳遞

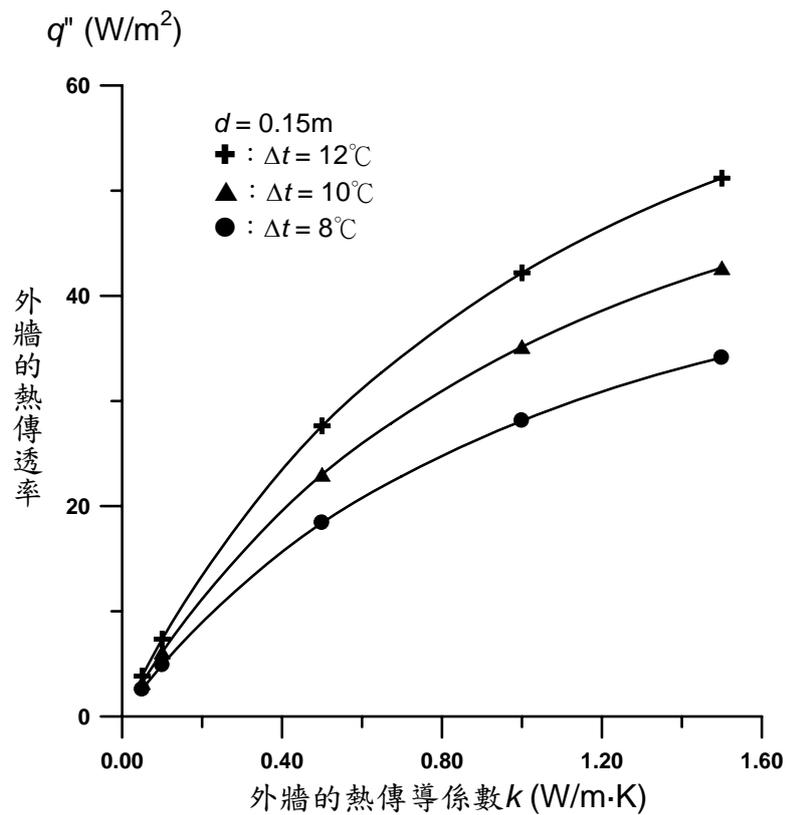


圖 3-4 室內外溫差對外牆热傳透率之影響

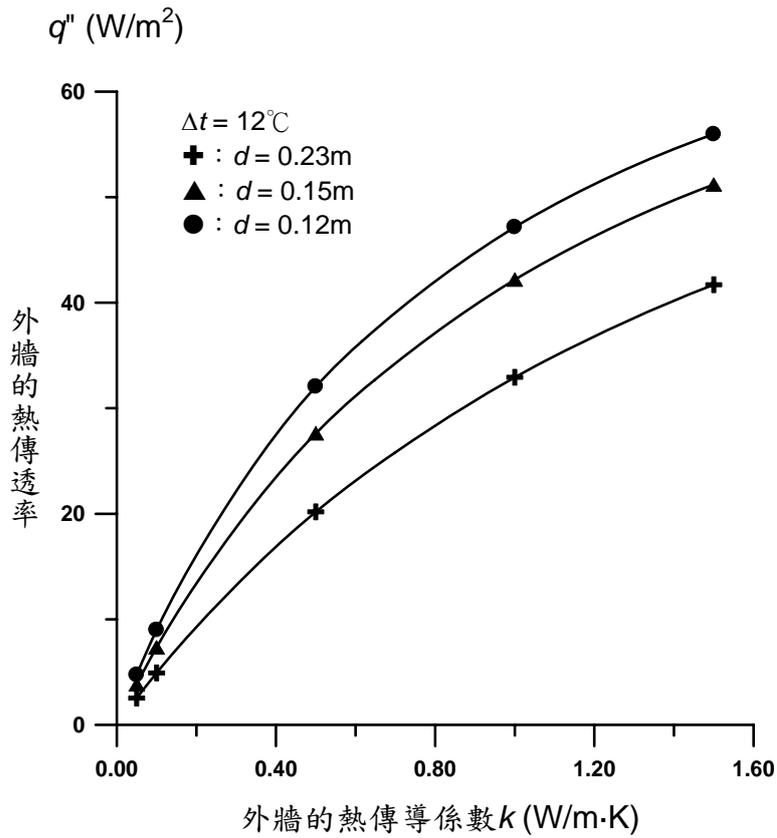


圖 3-5 外牆厚度對其熱傳透率之影響

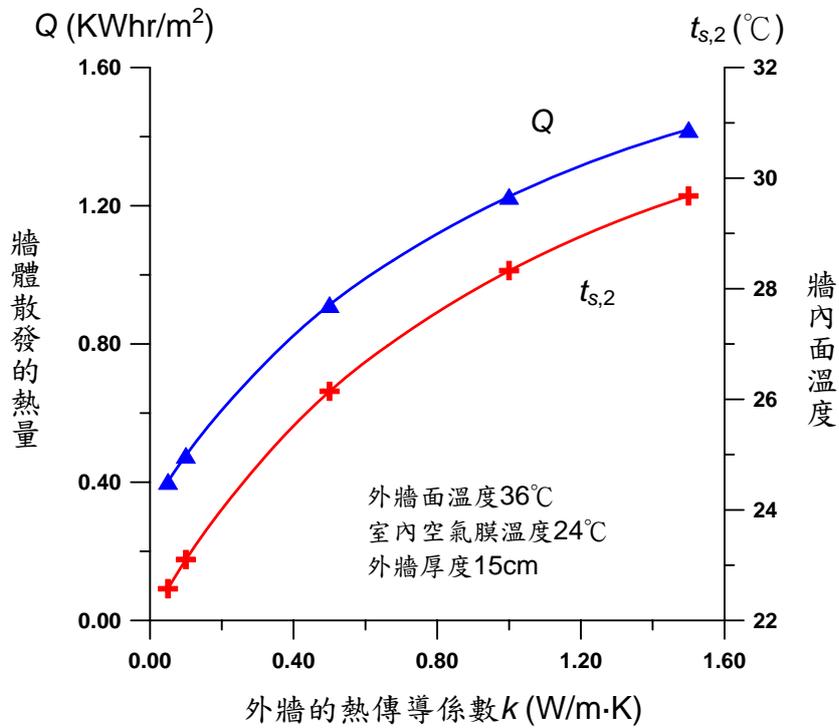


圖 3-6 外牆建材 k 值對 Q 與 $t_{s,2}$ 之影響

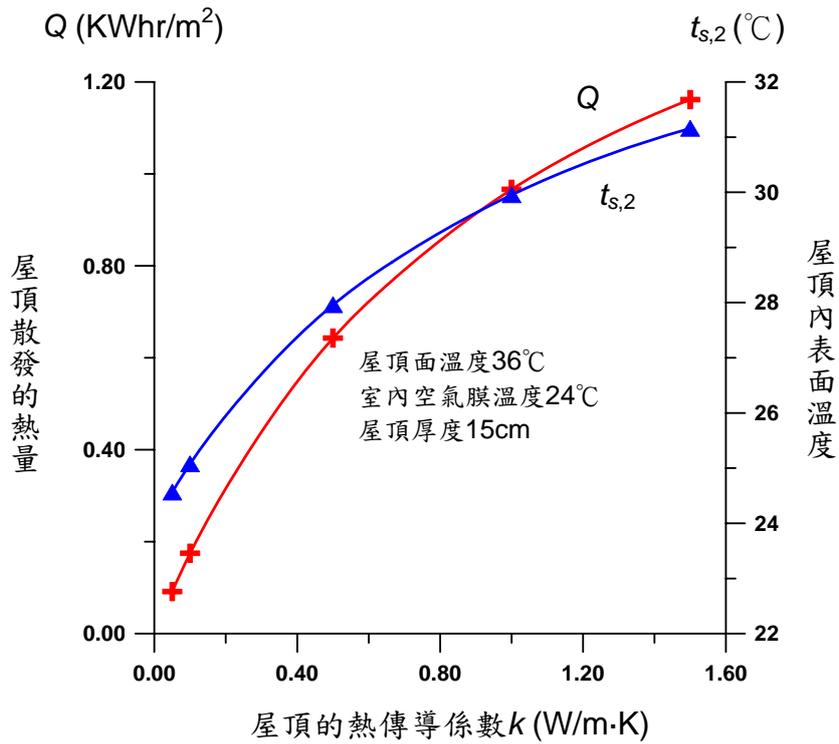


圖 3-7 屋頂建材 k 值對 Q 與 $t_{s,2}$ 之影響

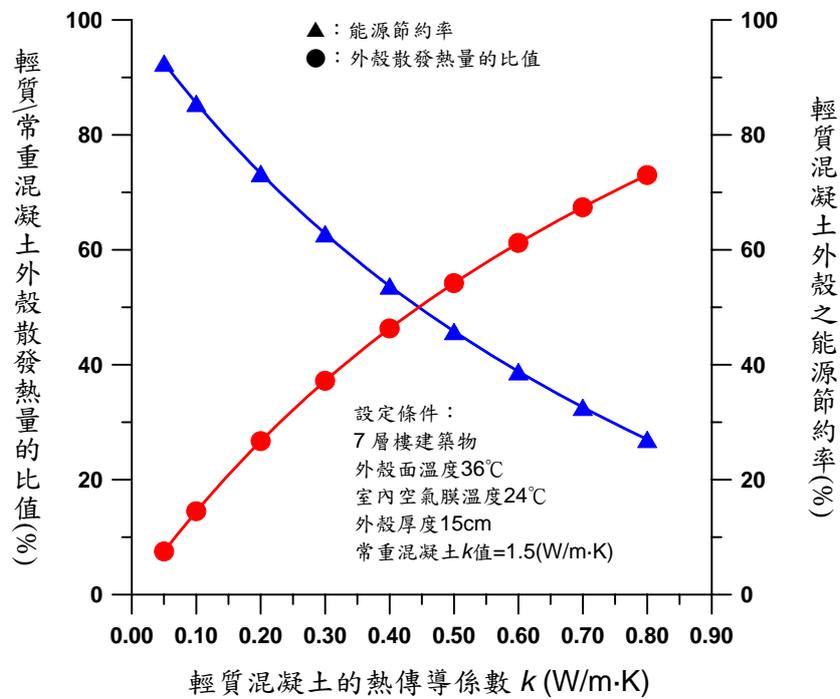


圖 3-8 輕質/常重混凝土外殼散發熱量的比較與能源節約率

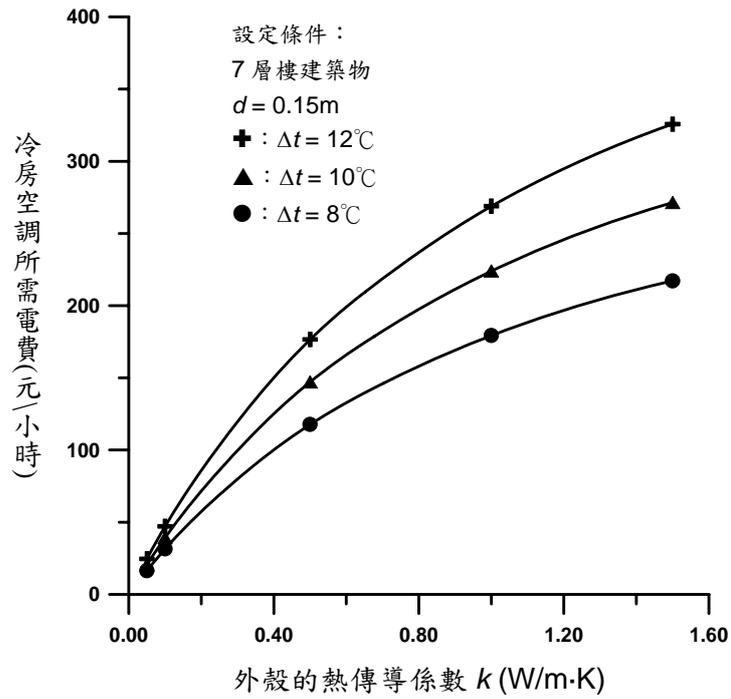


圖 3-9 外殼建材之熱傳導係數對建築物冷房空調所需電費之影響

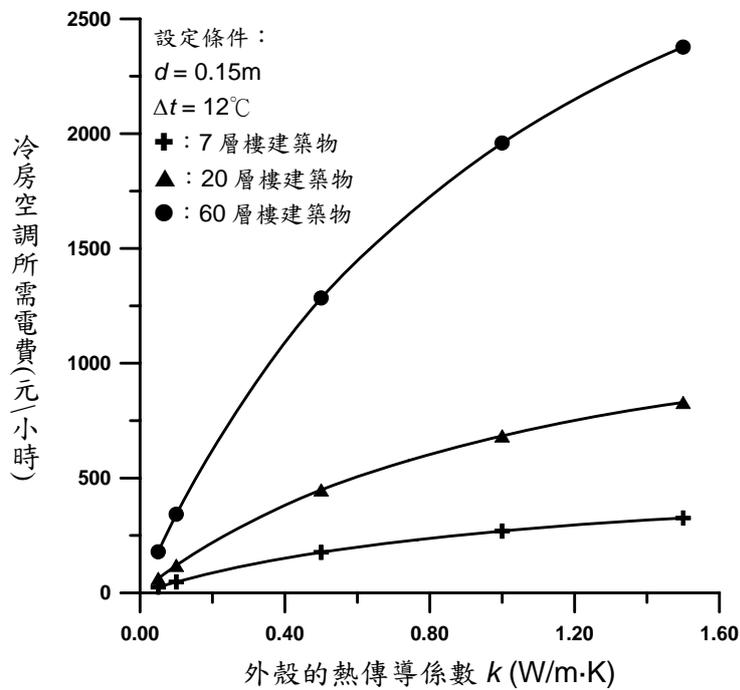


圖 3-10 不同樓層高度建築物冷房空調所需電費之比較

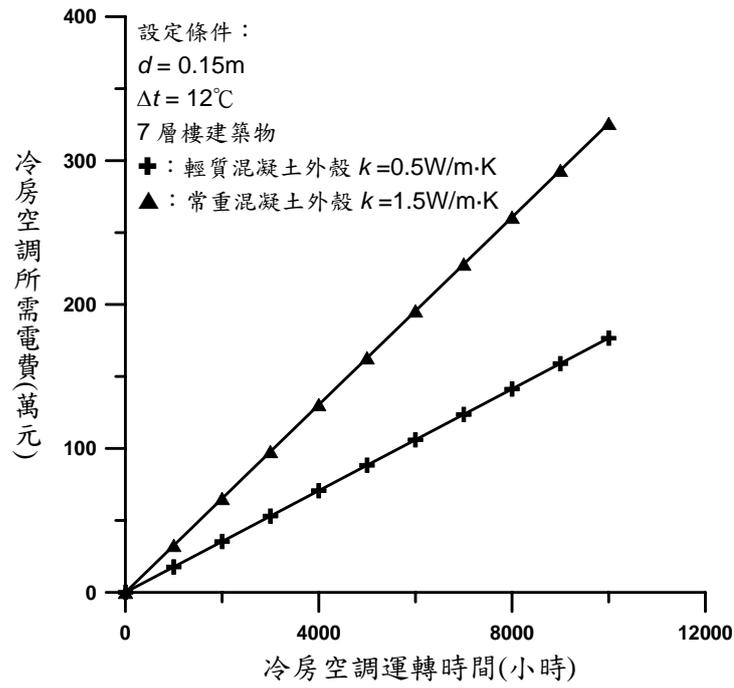


圖 3-11 輕質/常重混凝土建築長期冷房空調費用之比較

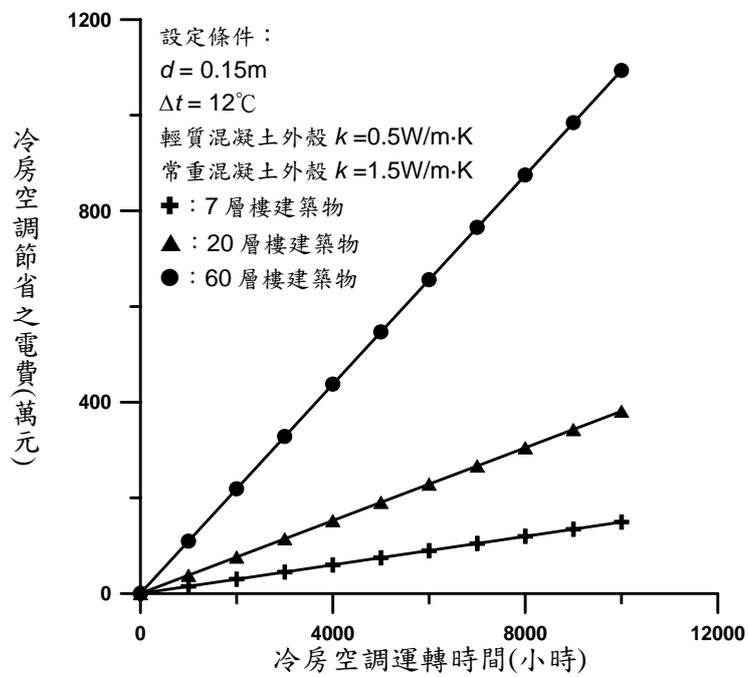


圖 3-12 輕質/常重混凝土建築長期冷房空調費用之比較

第四章 結論

1. 使用輕質骨材混凝土時，樑柱結構之斷面可以變小，此種現象隨樓層數目增加更為明顯。
2. 鋼骨結構建築使用輕質混凝土之經濟效益會隨結構系統之不同而變化。
3. 鋼骨結構建築使用輕質混凝土之經濟效益會隨總靜載重之不同而變化。
4. 鋼骨結構建築使用輕質混凝土在低樓層情況較常重混凝土貴，在高樓層情況較常重混凝土便宜。
5. 對本研究虛擬之結構系統而言，本研究建議一帶狀區域，此帶狀區域為鋼骨結構之總靜載重、樓層數目及經濟效益之關係。例如總靜載重為 $370\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，從第 42 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；總靜載重為 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，從第 26 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；總靜載重為 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，從第 13 層以後，輕質混凝土鋼骨結構開始比較便宜；此帶狀區域被一棟實際 26 樓之案例驗證為合理。
6. 熱傳導係數愈大的材料對周圍環境變化的反應較快，以致熱能通過時，只有少數能量被吸收以提升其溫度，因而有較多的能量被傳遞過去，故其熱傳透率與熱散發量也相對增加。在特定的外牆厚度條件下，不同熱傳導係數的建材，其熱傳透率均隨著室內外溫差的增加而增大；尤其室內外溫差愈大時，熱傳透率愈多，此時建材的隔熱特性更形重要。而在特定的室內外溫度差條件下，不同熱傳導係數的建材，其熱傳透率均隨著外牆厚度的增加而減少。在特定的外殼厚度、室內空氣膜溫度與室內外溫差條件下，以輕質混凝土取代常重混凝土作為外殼建材時，輕質/常重混凝土大樓間外殼散發總熱量的比值維持一定，與樓層高度的改變無關。建築物外殼散發總熱量和能源節約率均與其熱傳導係數有關，若熱傳導係數愈小，則散發總熱量愈少，能源節約率相對增加。由此觀之，建築物外殼建材的熱傳導係數與空調設備的能源消耗率之間具有正比的關係。輕質/常重混凝土建築物之冷房空調用電成本間的差異隨空調運轉時間的增加而明顯增加

；若以輕質混凝土取代常重混凝土所節省的用電成本來評估，則其經濟效益將隨輕質/常重混凝土建築物樓層的增加而急遽擴增。

11. 經由現值法綜合考量外殼建材長期的能源費用、外殼建材成本與建築物出租收益的經濟評估結果可知，不論樓層高度為何，輕質混凝土建築物之經濟效益均優於常重混凝土建築物者。
12. 雖然較低樓層使用輕質骨材混凝土之建造成本較為昂貴，但若合併考慮能源成本時，長期之經濟效益仍具優勢。
13. 基於大環境環保能源問題之整體考量，政府單位已經考慮對於有益於環保及節約能源之建築方式予以補償及獎勵，因此使用輕質骨材混凝土之經濟效益將更明顯。

參考文獻

中文部分

1. 楊錦釗，謝進南，「水庫淤砂研究課題之規劃」，水庫永續經營研究計劃成果研討會論文集，pp.36~52，台北（1998）。
2. 顏聰，”房屋建材之隔熱性工學”，興大土木第十期，1983.6， PP.6-11.
3. 顏聰，”輕質混凝土的隔熱性能與能源節約”，營建知訊 120，台灣營建研究中心，台北，1992.
4. 顏聰，“輕質混凝土之工學性質及工程特性”，混凝土工程技術研習會，台灣營建研究中心，台北，1975。
5. 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.
6. 張世典、陳錦賜、蔡必超、余凌昌、林偉志，“建築節約能源綜合指標之探討”，中華民國建築學會第十三屆建築研究成果發表會論文集，pp.663-668(2001)。
7. 湯兆緯、陳冠宏、張朝順編譯，「土木材料」，高立圖書公司，民國 91 年 9 月出版。
8. 顏聰，「房屋建材之隔熱性工學」，興大土木第十期，PP. 6-11(1983)。
9. 顏聰，「輕質混凝土的隔熱性能與能源節約」，營建知訊 120，台灣營建研究中心，台北(1992)。
10. 陳春錦編譯，「空氣調節」，東華書局，民國 77 年 5 月九版。

外文部分

1. V.V. Bertero, E. P. Popov and B. Forzani, "Seismic Behavior of Lightweight Concrete Beam-Column Subassemblages," ACI Journal, Jan.-Feb. 1980, PP.44-52.
2. Sekhniakshvile, E.A., "On the Effective Use of Light Concrete and Reinforced Concrete in Construction in Seismic Regions," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering (New Delhi, Jan. 1997), V.3,

PP.2034-2024.

3. Paramzim, A.M., and Gorovitz, I. G., "Analysis of Light-weight Concrete Use in Seismic-Resistant Multistory Buildings," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering (New Delhi, Jan. 1997), V.3, PP.2124-2125.
4. Bertero, V. V., and Popov, E. P., "Seismic Behavior of Ductile Moment-Resisting Reinforced Concrete Frames," Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones, SP-53, American Concrete Institute, Detroit, 1977, PP.247-291.
5. Forzani, B., Popov, E. P., and Bertero, V. V., "Hysteretic Behavior of Lightweight Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages," EER Report No. UCB/EERC 79/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Jan. 1979.
6. H. C. Chen, Ann-Win Liou, and Tsong Yen, "Improvement of the Thermal Insulation of Lightweight Aggregate Concrete", Proceedings of Cement and Concrete Technology in the 2000s, Second International Symposium. 6-10 September, 2000. Istanbul, Turkey, PP. 154-162.
11. Short and Kinniburgh, "Light-Weight Concrete", MCMLX III, London, 1963.
12. Aurish, K, "Kleine Leichtbetonkunde", Bauverlag GMBH, Wiesbadenund Berlin, PP.21-44, 1971.
13. Sidney Mindness and J. Francis Young, "Concrete", Prentice-Hall, Inc, 1981.
14. Bardhan-Roy, B. K., "Lightweight Aggregate Concrete in UK", International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 1995.
15. Helgesen, Kjell Hakon, "Lightweight Aggregate Concrete in Norway", International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 1995.
16. Ikeda, Shoji, "Development of Lightweight Aggregate Concrete in Japan", International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June 1995.

17. S. Mindess & J. f. Young, Concrete, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 521-532(1981).
18. P. K. Mehta and Paulo J. M. Monteiro, “Concrete: Structure, Properties, and Materials”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.(1993).
19. J. P. Holman, Heat Transfer, 8/E, McGraw-Hill, Inc.(1997).
20. I. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4/E, John Wiley & Sons Inc.(1981).