

【AS】

建築結構系列

(II)

- ☐ 緒論
- ☐ 建築物的載重
- ☐ 基本應力
- ☐ 結構材料性質
- ☐ 纜索及拱系統
- ☐ 桁架系統
- ☐ 樑柱及構架系統
- ☐ 格子樑及版系統
- ☐ 膜及薄殼系統
- ☐ 高層結構系統
- ☐ 隔震消能系統
- ☐ 結構修復補強
- ☐ 新建築結構

建築結構系統

陳啟中編著

詹氏書局

【AS】

建築結構系列

(II)

- ☐ 緒論
- ☐ 建築物的載重
- ☐ 基本應力
- ☐ 結構材料性質
- ☐ 纜索及拱系統
- ☐ 桁架系統
- ☐ 樑柱及構架系統
- ☐ 格子樑及版系統
- ☐ 膜及薄殼系統
- ☐ 高層結構系統
- ☐ 隔震消能系統
- ☐ 結構修復補強
- ☐ 新建築結構

建築結構系統

陳啟中編著

詹氏書局

國家圖書館出版品預行編目資料

建築結構系統

陳啟中 編著 —初版— 臺北市：詹氏

2009 [民 98]，面；公分，參考書目：面

ISBN 978-957-705-383-1

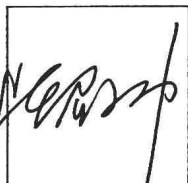
1. 結構工程 2. 結構力學

441.21

97020217

本書享有著作權，受到中華民國著作權法及國際著作權公約之保護。未經著作權人事先授權，任何人不得以印刷、影印、描掃、上載網路或其他任何方式重製、散布本書之一部或全部，違者須負侵害著作權之民刑事責任。

建築結構系列（Ⅱ）建築結構系統



版權所有
翻印必究

作 者	陳 啟 中
發 行 人	詹 文 才
發 行 所	詹氏書局
總 經 銷	詹氏書局
登 記 證	局版台業字第 3205 號
法律顧問	北辰著作權事務所 蕭雄淋律師
郵政劃撥	0591120-1（戶名：詹氏書局）
地 址	台北市和平東路一段 177 號 9 樓之 5
電 話	(02)23918058 • 23412856 • 77121688 • 77121689
傳 真	(02)23964653 • 77128989
網 站	http://archbook.com.tw
E-mail	chansbook@gmail.com

初版一刷 2009 年元月

定 價 新台幣 480 元

ISBN 978-957-705-383-1

自序

一般建築科系學生所必須研讀的「建築結構系統」學科，其內容幾乎涵蓋土木建築之所有領域，但因為相關土木學的結構理論過於艱澀，而且都是以數學的模式來呈現，為了與土木學做必要的區隔，本學科係以其結構理論為基礎，利用簡單清晰的觀念並結合實際的應用，以及建築美學的方式來闡述，此種闡述方式，除了提供較簡易的學習途徑外，還可使土木學與建築學互相結合印證，使建築習者日後得以將此學科充分落實在建築設計上。

本書之前身為筆者於1987年所編著之《結構系統概論》，該書迄今（2008年）已銷售17刷達2萬冊，因原書之內容已陳舊且不合時宜，而且原書名已不能涵蓋所有相關建築結構之範圍，因此除了配合新資料加以修正改編外，另外再將本書易名為《建築結構系統》，以符實際。本書亦大多引用數十本中、英、日文及網路之書籍、文獻及資料，再配合台灣本土法令及工程慣例將其做局部修正，並以筆者任教本學科二十餘年，以及開業建築師之執業經驗加以改編而成。本書之編寫亦採循序漸進之方式，條理簡潔分明並避免繁雜之贅述，倘若習者欲更進一步了解本書之相關內容，則可自行參閱本書所附之參考書目及文獻。另外，本書的最大特色為結合「理論」、「實務」、「現代」以及「本土」四者間之基本教材，又目前許多專有名詞因台灣尚無統一之翻譯，因此編寫時均以中英文互相對照，而且為了與國際接軌，所有的記年均以西元來表示之。

本書共分十三章，第一章為「緒論」，第二章為「建築物的載重」，第三章為「基本應力」，第四章為「結構材料性質」，第五章為「纜索及拱系統」，第六章為「桁架系統」，第七章為「樑柱及構架系統」，第八章為「格子樑及版系統」，第九章為「膜及

薄殼系統」，第十章為「高層結構系統」第十一章為「隔震消能系統」，第十二章為「結構修復補強」，第十三章為「新建築結構」。其中第一章至第十章為原有之章節，此部分除將原有不合時宜之內容修正或刪除外，另外還增加新的論述。第十一章係為因應新一代隔減震結構設計觀念所增加的章節；第十二章係因台灣 921 大地震所增列之修復補強章節；第十三章則為因應全球新一代建築物所增加的章節。

筆者於就讀大二時（1976 年）開始接觸本學科並受教於成功大學許茂雄恩師，自 1976 年開始至 1982 年研究所畢業為止，所有的結構觀念包括碩士論文等均由許茂雄恩師啟蒙開導，就學期間並跨系修讀了土木系所相關的主要學科；爾後，筆者於 1984 年自行開業建築師後，亦同時從事相關結構設計及特殊案件之鑑定工作。自 1983 年起迄今，筆者均鑽研於此學科之資料收集及做整理研究之工作，於 1987 年出版《結構系統概論》一書後，再於 2008 年一整年之時間重新改寫成本書，而且本書之所有圖表均經本事務所員工全部重新修正繪製，但因筆者並非學者，因此書中之所有資料大多引用他人文獻，在此謹向所引用資料之學者致謝。另外，對於本書之改編出版，希望能對台灣這塊土地略盡薄力，若書中有疏漏錯誤之處，尚請各位先進不吝來電或來信指教，不勝感激！

陳啟中謹識 2008 年 11 月

後記：就在本書即將付梓之際，突然傳來恩師許茂雄教授不幸於 2008 年 10 月 26 日仙逝，謹以本書獻上筆者最誠摯的感恩與懷念。

目 錄

第一章 緒論

1-1 結構系統目的	1
1-2 結構系統要求	1
1.2.1 基本要求.....	1
1.2.2 耐震設計要求.....	4
1.2.3 耐風設計要求.....	5
1-3 結構設計方法	5
1.3.1 彈性設計與塑性設計.....	5
1.3.2 鋼筋混凝土結構物.....	7
1.3.3 鋼骨結構物.....	9
1-4 結構分析設計程序	11
1-5 結構系統分類.....	14
1.5.1 使用材料不同之分類	14
1.5.2 力量傳遞不同之分類	15
1.5.3 高層結構系統之分類	16
1.5.4 構築方式不同之分類	17

第二章 建築物的載重

2-1 載重分類	19
2-2 靜載重	19
2.2.1 材料重量.....	20
2.2.2 屋面重量.....	20
2.2.3 天花板重量.....	21
2.2.4 地版面重量.....	21
2.2.5 牆壁重量.....	21
2-3 活載重	22
2.3.1 最低活載重	22
2.3.2 斜屋頂之活載重.....	23
2.3.3 其他活載重.....	23

2.3.4 活載重之折減.....	24
2-4 風力載重	25
2.4.1 風力特性.....	25
2.4.2 風力階級.....	26
2.4.3 風力計算.....	28
2.4.4 風力之相關規定.....	36
2-5 地震力	38
2.5.1 地震的起因.....	38
2.5.2 地震波與地震紀錄.....	42
2.5.3 地震規模與地震階級.....	45
2.5.4 台灣的地震活動.....	50
2.5.5 建築物對地震的反應.....	53
2.5.6 地震力計算.....	61
2.5.7 地震力之相關規定.....	65
2-6 其他載重.....	69
2.6.1 土壓力與水壓力載重.....	69
2.6.2 基礎不均勻沈陷載重.....	72
2.6.3 溫度載重.....	73
2.6.4 動力載重與共振載重.....	74
2.6.5 火載重.....	75

第三章 基本應力

3-1 基本應力	77
3.1.1 張應力.....	77
3.1.2 壓應力.....	79
3.1.3 撓曲應力.....	82
3.1.4 剪應力.....	84
3.1.5 扭應力.....	90
3.1.6 溫度應力.....	92
3-2 應力的作用	93
3.2.1 直接應力與撓曲應力.....	93
3.2.2 二次應力.....	94

3.2.3 主應力線.....	96
3-3 應力破壞行為.....	98
3.3.1 張應力破壞.....	98
3.3.2 壓應力破壞.....	99
3.3.3 撓曲應力破壞	100
3.3.4 剪應力破壞	101
3.3.5 扭應力破壞	102

第四章 結構材料性質

4-1 材料基本性質	105
4.1.1 材料基本行為	105
4.1.2 應變硬化與應變軟化	107
4.1.3 安全係數	108
4.1.4 載重速率與強度	110
4.1.5 脆裂及疲乏	111
4.1.6 殘留應力	113
4.1.7 包辛吉效應	114
4.1.8 等向性材料與非等向性材料	115
4.1.9 乾縮與潛變	115
4.1.10 鬆弛.....	117
4-2 材料的韌性.....	118
4.2.1 延展比與韌度	118
4.2.2 韌性表示法	118
4.2.3 恢復力環之性質	120
4.2.4 韌性的意義	121
4-3 構架的韌性行為.....	122
4.3.1 塑性鉸	122
4.3.2 塑性流變	122
4.3.3 崩塌機構	126
4.3.4 樑柱的韌性	130
4.3.5 鋼筋比與韌性	131
4.3.6 韌性與耐震行為	133

第五章 纜索及拱系統

5-1 纜索系統.....	135
5.1.1 纜索行爲	135
5.1.2 纜索應力分析	136
5.1.3 纜所不穩定原因及安定方法	138
5.1.4 纜索系統之應用空間	140
5-2 拱系統.....	145
5.2.1 拱行爲	145
5.2.2 拱之分類	147
5.2.3 拱應力分析	149
5.2.4 三種拱之力學行爲	150
5.2.5 拱抵抗水平推力方法	154
5.2.6 拱系統之應用空間	155

第六章 桁架系統

6-1 桁架行爲.....	157
6.1.1 桁架基本構成	157
6.1.2 桁架應力分析	157
6.1.3 桁架種類	160
6-2 桁架接合.....	164
6.2.1 節點接合	164
6.2.2 支承處接合	166
6-3 桁架系統之應用空間	167
6.3.1 平面桁架系統	167
6.3.2 曲面桁架系統	168
6.3.3 空間桁架系統	172

第七章 樑柱及構架系統

7-1 樑柱及構架行爲	175
7.1.1 樑柱及構架之基本構成	175
7.1.2 樑之力學行爲	176
7.1.3 柱之力學行爲	178

7-2 樑系統	181
7.2.1 懸臂樑	181
7.2.2 簡支樑	183
7.2.3 固定樑	186
7.2.4 外伸樑	189
7.2.5 連續樑	191
7-3 構架系統	193
7.3.1 連樑柱構架	193
7.3.2 簡單剛構架	194
7.3.3 多層及多間構架	197
7.3.4 超構架	202

第八章 格子樑及版系統

8-1 格子樑系統.....	205
8.1.1 載重傳遞方式	205
8.1.2 格子樑之力學行爲	205
8.1.3 格子樑設計原則	208
8.1.4 格子樑系統之種類及應用	209
8-2 平版系統.....	210
8.2.1 平版基本構成	210
8.2.2 平版之力學行爲	210
8.2.3 鋼筋混凝土版之應力與配筋	213
8.2.4 平版系統之種類與應用	215
8-3 摺版系統.....	219
8.3.1 摺版基本構成	219
8.3.2 摺版之力學行爲	221
8.3.3 摺版系統之種類與應用	223

第九章 膜及薄殼系統

9-1 膜系統	227
9.1.1 膜基本構成	227
9.1.2 膜之力學行爲	227

9.1.3 膜系統之種類及應用	230
9-2 薄殼系統.....	233
9.2.1 薄殼之行爲	233
9.2.2 薄殼之基本形態	234
9.2.3 圓筒殼	239
9.2.4 圓頂殼	243
9.2.5 雙曲拋物面殼.....	246

第十章 高層結構系統

10-1 載重傳遞.....	249
10.1.1 垂直載重傳遞.....	249
10.1.2 水平載重傳遞.....	251
10-2 剪力牆.....	253
10.2.1 剪力牆型式.....	253
10.2.2 剪力牆配置.....	254
10.2.3 鋼筋混凝土剪力牆.....	259
10.2.4 鋼骨斜撐.....	261
10-3 高層結構立面型式	264
10.3.1 剪力牆立面設計.....	264
10.3.2 地面層設計.....	266
10-4 高層結構系統之種類	267
10.4.1 高層建築之結構型式.....	267
10.4.2 承重牆系統.....	268
10.4.3 箱匣式系統.....	268
10.4.4 無樑版系統.....	268
10.4.5 核心式系統.....	269
10.4.6 錯列桁架系統.....	271
10.4.7 樑柱剛構架系統.....	272
10.4.8 剪力牆剛構架系統.....	273
10.4.9 核心共用系統.....	273
10.4.10 管式結構系統	275
10.4.11 高層結構系統之比較	280

第十一章 隔震消能系統

11-1 結構設計觀念之演變.....	283
11-2 制振裝置.....	285
11.2.1 主動控制	285
11.2.2 被動控制	286
11-3 隔震消能系統之相關規定	292

第十二章 結構修復補強

12-1 結構破壞及評估.....	295
12.1.1 結構破壞原因.....	295
12.1.2 結構安全評估.....	297
12-2 修復補強.....	307
12.2.1 修復補強之定義.....	307
12.2.2 修復補強實施程序.....	307
12.2.3 修復補強材料.....	308
12.2.4 修復補強工法.....	309
12-3 修復補強之相關規定.....	320

第十三章 新建築結構

13-1 超高層建築.....	323
13.1.1 超高層建築之發展.....	323
13.1.2 全世界超高層建築.....	324
13.1.3 未來的超高層建築.....	328
13-2 特殊建築結構.....	333
13-3 建築發展趨勢之隱.....	351

附錄 A 圖目錄	379
----------------	-----

附錄 B 表目錄	395
----------------	-----

附錄 C 參考書目及文獻	397
--------------------	-----

編著者簡介

版權頁

第一章 緒論

1-1 結構系統目的

無論是土木或建築工程從開始規劃、設計到竣工使用，必須要考慮到相當多的項目及因素，而結構系統即為其中最主要的項目之一。當工程開始規劃設計時，就應該以人使用的最佳空間為出發點，對該工程的結構系統做一最合理的評估及選擇，而且還應符合經濟、安全、美觀、機能等各項要求；除此之外，結構系統所必須達成的目的，還應包括下列各項：

一、空間的包圍

一棟建築物可界定出一個實體空間，人可以在其中活動、使用及居住，而不必受到外界氣候變化的影響。

二、兩點之間的聯繫

一座道路、橋樑的興建，不但促進了交通及行的方便，而且可使不同用途建築物之間互相獲得交流。

三、象徵意義的表達

興建一座有紀念性或特殊意義的結構物，除可做為對偉大人物或事件的紀念外，亦可做為都市象徵意義的表達。

四、設計理念的創新

近年來，由於結構理論及施工技術的創新及進步，一些前衛或概念性建築物的陸續興建，不但美化了都市景觀，而且還可豐富人視覺及生活上的享受。

1-2 結構系統要求

1.2.1 基本要求

通常在進行結構系統規劃、設計或施工時，應考量下列各項的基本要求：

一、機能的要求

一棟建築物在草案規劃階段，最主要考慮因素就是建築物的使用機能（functionality），例如跨度（span）、撓度（deflection）或材料性質等，這些因素都會影響到所選擇的結構系統。

二、安全的要求

（一）結構物必須平衡

在不同載重作用下，結構物全部或任何一部分都必須要維持平衡（equilibrium）；否則一旦失去平衡時，會造成建築物的破壞而影響到使用者的安全。

（二）結構物必須穩定

結構物在做構件安排時，必須要符合穩定（stability）、靜定（static determinate）或靜不定（static indeterminate）的基本要求；否則很可能在本身自重作用下，就會造成不穩定而破壞。一般而言，造成結構物不穩定的原因主要有下列兩項：

（1）內力不穩定

由於結構系統本身構件安排不適當，或是桿件組合不合理等兩種情況所造成。

（2）外力不穩定

由於結構系統無法抵抗不同變化的載重所造成；雖然某些結構物在特定載重作用下仍能維持穩定，但實際上結構物所承受的載重是隨時在變動，爲了能長期、穩定及安全的使用，因此也應避免此類結構物的設計。

三、材料強度的要求

材料強度（strength）的要求，可藉由材料選擇、材料形狀改變及安全係數等三項因素來達成。

（一）材料選擇

台灣通常會使用 $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ 及 $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ 等兩種屈服應力的鋼筋，前者稱爲普通鋼筋，後者稱爲高拉力鋼筋。28 天抗壓強度的混凝土則常使用 $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$ 、 245 kg/cm^2 、 280 kg/cm^2 ，或甚至更高強度的混凝土。另外，若依台灣公布《結構混凝土設計規範》之規定，結構混凝土 28 天抗壓強度及鋼筋強度應符合下列之規定：

（1）結構混凝土之 $f_c' \geq 175 \text{ kg/cm}^2$ 。

（2）預力混凝土之 $f_c' \geq 280 \text{ kg/cm}^2$ 。

（3）鋼筋屈服強度 $f_y \leq 5600 \text{ kg/cm}^2$ 。

（二）材料形狀改變

一般而言，若材料斷面的慣性矩（moment of inertia） I 值愈大時，則會有更佳抵抗外力的能力，例如在相同斷面積的條件下，工形樑就會優於方形樑，因此若能將斷面的形狀稍加改變加大 I 值時，就可以間接獲得材料強度的提升。

（三）安全係數

若是使用多種材料組合的結構物，或是無法估計出正確的載重時，為因應此種狀況，在設計時可先將外力載重提高，或者是將材料的設計強度折減，由此取得一個安全係數值（safety factor）。此安全係數可用來抵抗結構物所發生非預期的額外超載，並可用來確保結構物的安全。

四、結構行為的要求

（一）優良的結構材料

優良的結構材料不只強度要高，而且還應具有良好的韌性，因為具有良好韌性的材料，當外力載重作用時，可吸取大量的外力能量，使建築物不至於突然崩塌破壞。

（二）優良的結構桿件

結構材料經過加工後形成結構桿件，因此優良的結構桿件也應具有良好的均質性及接合性。

（三）優良的結構系統

結構桿件經過組合後形成結構系統，因此優良的結構系統也應具有優良的穩定性、安全性以及優良的韌性行為。

五、經濟性的要求

一般建築物結構體的費用大約佔總工程費的 20~40%，若採用某些特殊的結構系統時，其比例可能會更高，因此可參考下列方法來控制結構體費用，以達成經濟性（economy）的要求。

（一）最佳設計方法

可利用電子計算機大量快速運算功能，以最佳設計方法使材料發揮最大的抵抗能力，並由最佳的設計方案中，找出最佳的斷面形狀、組合方式及結構系統等，以獲得最佳的經濟效益。

（二）選擇適合建築物用途之結構系統

結構系統之選擇必須配合建築物的用途，以避免造成不必要的浪費及不適用的情形發生。

（三）施工期之回饋

在結構物施工期間，工期、成本、預算、人事等費用之控制，應利用最佳營建管理方式，隨時回饋檢討修正，以達成節約成本的要求。

六、美學上的要求

結構物在規劃及設計階段時，就必須要考慮到造型及內部平面空間的美學（aesthetics）要求，否則建出來的建築物就會造成視覺或感官上的障礙。

1.2.2 耐震設計要求

依據台灣於 2007 年修訂公布《建築物耐震設計規範》所規定之內容：耐震設計基本原則應使建築物結構體在中小度地震時保持在彈性限度內。設計地震時可容許產生塑性變形，但韌性需求不得超過容許韌性容量。最大考量地震時，使用的韌性可以達到規定的韌性容量。

另外，對建築物結構體、部分結構體、非結構構材及設備、非建築結構物、隔震建築物及含被動消能系統建築物等，應設計成能抵禦至少為本規範所規定的最小地震力。

對於本規範所主要考量三種地震水準及耐震目標的設計原則，分別說明如下：

一、中小度地震

此為回歸期約30年之地震，其50年超越機率約80%左右，所以在建築物使用年限中，會發生此種地震的機率相當高，因此要求在此中小度地震下結構體應保持在彈性限度內，而地震過後，建築物結構體不會造成任何損壞，以避免建築物在中小度地震過後，需時常修補的麻煩。一般而言，對高韌性容量的建築物之耐震設計目標，通常都是由此項來控制其耐震設計。

二、設計地震

此為回歸期475年之地震，其50年超越機率約10%左右。在發生此地震水準下，建築物不得產生嚴重損壞，以避免造成嚴重的人命及財產損失；對重要建築物而言，其對應的回歸期更長。但於設計地震下，若限制建築物仍須保持在彈性範圍內，會很不經濟，因此通常會容許建築物在一些特定位置，如樑之端部產生塑性鉸（plastic hinge），藉以消耗部分地震能量，並降低建築物所受之地震反應，此乃對付地震比較經濟的做法。另外，規範也規定建築物產生的韌性不得超過容許韌性容量，以防止地震過大而造成建築物不可修復的遺憾。

三、最大考量地震

此為回歸期2500年之地震，其50年超越機率約2%左右。設計目標在使建築物於此相當罕見的烈震下不會崩塌，以避免造成嚴重損失或造成二次災害。另外，因為設計時已經考量為最大地震，若還限制其韌性容量之使用，會顯得更不經濟，所以規範允許結構物使用的韌性可以達到其韌性容量值。

1.2.3 耐風設計要求

一般而言，在台灣地區低於30層的建築物，設計地震力會大於設計風力，亦即建築物是由地震力來控制；高於50層的建築物，設計風力則會大於設計地震力，亦即建築物是由風力所控制；至於介於30層至50層的建築物，則視其建築平面、立面形狀、高度、阻風狀況、基地之強風以及地況等而會有所不同。

一般建築物對於結構耐風設計的要求，則如下之說明：

- 一、在半年回歸期之一般輕度颱風作用下，不得有不舒適的感覺，仍可照常居住或辦公，而不會受到風力的影響。建築物最高居室樓層角隅之側向振動尖峰加速度值不得超過 0.05m/s^2 。
- 二、在50年回歸期之強烈颱風作用下，會有不舒適的感覺，但主結構材及非結構材不得破壞，以避免造成日後須常補修的困擾。建築物層間變位角亦不得超過 $5/1000$ 。
- 三、在100年回歸期之超級颱風作用下，結構體仍很安全，不得有任何結構桿件產生塑性鉸或被剪斷、拉斷或壓壞的情形發生。

1-3 結構設計方法

一般結構的設計方法，主要可分為「彈性設計（elastic design）」及「塑性設計（plastic design）」等兩種。對部材的設計方法，可分為鋼筋混凝土結構物（reinforced concrete structure, RC）及鋼骨結構物（steel construction structure, SC）等兩大類。對 RC 部材的設計方法，則有「工作應力法（working stress design method, WSD）」及「強度設計法（ultimate strength design method, USD）」等兩種。對 SC 部材的設計方法，亦有「容許應力設計法（allowable stress design, ASD）」以及「載重與強度設計法（load and resistance factor design, LRFD）」等兩種。以下就是這幾種不同設計方法的概要說明：

1.3.1 彈性設計與塑性設計

一、彈性及塑性設計方法

（一）彈性設計

彈性設計法亦稱為容許應力設計法（allowable stress design），係指承受各種外力及工作載重（service load）的結構物，經彈性理論計算出各構材斷面如彎矩、剪力等內應力，使這些應力以不達到屈服強度為原則的設計方法。