

結構學基本原理

謝元裕 著
王明雄 譯

曉園出版社
世界圖書出版公司

結構學基本原理

謝元裕 著
王明雄 譯

曉園出版社
世界圖書出版公司

41.41-4981A

结构学基本原理

Y.Y. 谢 著

王明雄 译

*

晓园出版社出版

世界图书出版公司北京公司重印

北京朝阳门内大街 137 号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994 年 10 月第 一 版 开本: 711 × 1245 1/24

1994 年 10 月第一次印刷 印张: 20.75

印数: 0001—270 字数: 40 万字

ISBN: 7-5062-1933-6/TU·7

定价: 32.90 元 (WB9403/14)

世界图书出版公司已向台湾晓园出版社购得重印权
限国内发行

譯 序

結構學為土木工程或其它相關學科中，相當重要的一門知識，坊間現有討論該門之書籍相當的多，其涵蓋之範圍從傳統結構力學理論到現代電子計算機之應用均有。但是對於有志從事專業結構工程之讀者而言，譯者認為在涉獵相關書籍之順序上，選擇一本除了能夠涵蓋既有各種結構理論與方法，且又能以平實而有系統的介紹方式呈現給讀者的好書，實為重要但又很容易被忽略的一項重要考慮，而本書即能滿足此項要求。

本書初版問世以來因內容充實曾暢銷數十年，目前業已發行至第三版，本版內容的安排，除了保持原有之優點外，又增加了討論結構穩定、結構動力等章節，而更形完整。譯者在此衷心希望翻譯本能夠對各位讀者在學習的過程中有所幫助。

79/2

原 序

本書曾經發行過二版，其內容主要係介紹線性結構的靜力分析，而篇幅則是平均分配於古典方法以及矩陣方法的介紹上。此次第三版與前面二版之主要不同處在於我們除了增加探討結構體非線性以及動力行為的章節之外，並將重點放在矩陣法的介紹，由於此，在新版所增列的三章；亦即直接勁度法、彈性穩定以及結構動力學均借用矩陣之觀念來加以說明。其中直接勁度法一章所介紹之內容與如何利用電子計算機於結構之分析上有著極重要的關係，而彈性穩定一章則係說明如何利用矩陣式之直接勁度法來解決挫屈問題，至於安排結構動力學一章的目的，則是想在地震工程逐漸重要的現在，做一入門性的介紹。

爲了能夠在維持與前二版一樣篇幅的前提下，增列前述之內容，因此在第三版中，我們在不破壞原有內容連貫性或是整體性的原則下，已將前二版一些舊有的內容加以重新安排或是適度的刪除。雖然第三版經過這些變動，同時全書的頁數稍微增加而致超過 400 頁，但是我們仍然相信，本書無論做爲學生學習或是教師講授結構學教材的用途上，均仍符合原書的二個宗旨；亦即簡單但內容完整。

如同第二版發行時一樣，在此作者願對曾經讀過、用過或是支持本書之某些大學的教授以及學生表達誠摯的謝意。其中特別感謝加州 San Diego 大學的 Y.C.Fung 教授以及 Prentice Hall 資深工程師 D.Humphrey 先生的鼓勵以及他們對於本書在編輯過程中的各項指正。同時 Toledo 大學的 B.Koo 教授，Wyoming 大學的 K.P.Chong 教授，加州 Berkeley 大學的 Z.A.Lu 教授對於本書所提供的各項建議，以及 Washington State Highway Department 的 S.N.Yao 先生提供本書第 11 至 13 章的習題解答在此均一併致謝，最後並感激內人 Nelly 繕打原稿的細心與辛勞。

Y.Y.Hsieh

Monterey Park, California

III

目 錄

第一章 緒 論

- 1 工程上之結構 1 / 2 結構之規劃原理 2 / 3
- 結構學理論之分類 4 / 4. 實際與理想化結構 6 / 5
- 本書之討論範圍 6

第二章 穩定度與靜定度

- 1 共面力系之平衡方程式 9 / 2 支承反力 12 / 3
- 結構切斷面上之內力 16 / 4. 條件或構造方程式 17
- 5. 結構穩定度以及靜定度與支承之關係 18 / 6. 結構之穩定度與靜定度的一般性討論 22 / 問題 34

第三章 結構靜力學

- 1 通論 35 / 2 靜定樑之分析 39 / 3 荷重、剪力、彎矩三者之關係 49 / 4. 靜定桁架之分析 56
- 5. 靜定桁架分析之通用法 63 / 6. 橋樑與屋頂桁架之構架介紹 65 / 7. 靜定剛架之分析 69 / 8. 超靜定剛架之近似分析法 76 / 問題 80

第四章 影響線

- 1 影響線的觀念 85 / 2 影響線之應用 88 / 3
- 靜定樑之影響線 89 / 4. 靜定橋樑類桁架之影響線 97
- 5. 影響線與集中荷重系統 101 / 問題 104

第五章 彈性變形

- 1 緒論 109 / 2 彈性變形於某直線方向之曲率 109
3 外功與內功 113 / 4 虛功法(單位力法) 116
5 卡氏定理 132 / 6 共軛樑法 139 / 7 馬克斯威爾之變位互易定理 148 / 問題 149

第六章 諧合變位法

- 1 緒論 153 / 2 諧合變位法與超靜定樑之分析 157
3 超靜定剛架結構之分析與諧合變位法 168 / 4 超靜定桁架之分析與諧合變位法 170 / 5 卡氏之諧合方程式(最小功法) 176 / 6 MÜLLER-BRESLAU原理與超靜定結構之影響線繪製 187 / 問題 199

第七章 傾角變位法

- 1 緒論 205 / 2 傾角變位法的基本式 205 / 3 傾角變位法之分析程序 211 / 4 超靜定樑之分析與傾角變位法 216 / 5 節點不具有側向位移之超靜定剛架分析與傾角變位法 220 / 6 節點具有單側向位移自由度之超靜定剛架分析與傾角變位法 224 / 7 具有二個節點側向位移自由度之超靜定剛架分析與傾角變位法 229 / 8 具有多個節點側向位移自由度之超靜定剛架分析與傾角變位法 237 / 9 傾角變位法改寫成矩陣式之程序 238 / 問題 242

第八章 彎矩分配法

- 1 緒論 247 / 2 固定端彎矩 248 / 3 勁度、分配係數以及外在節點彎矩之分配 248 / 4 傳遞係數與

傳遞彎矩 251 / 5. 單節點之上鎖與解鎖程序 254
6. 節點數超過 2 個以上之上鎖與解鎖程序 258 / 7. 修正勁度 263 / 8. 節點產生位移時之處理 267 / 9. 節點具有單自由度側向位移之超靜定剛架分析與彎矩分配法 272 / 10. 節點具有雙自由度側向位移之超靜定剛架分析與彎矩分配法 275 / 11. 具有多節點側向位移自由度之超靜定結構分析與彎矩分配法 283 / 12. 彎矩分配法之矩陣式 285 / 問題 288

第九章 矩陣力法

1 緒論 293 / 2 有關結構的一些基本觀念 293
3 平衡及力量之轉換矩陣 297 / 4. 諧合條件 298
5. 力量 - 變位關係；柔度係數與柔度矩陣 298 / 6. 靜定結構之分析與矩陣力法 305 / 7. 超靜定結構之分析與矩陣力法 311 / 8. 有關基元結構的幾點說明 325 / 問題 329

第十章 矩陣位移法

1 緒論 333 / 2 諧合條件及變位轉換矩陣 333
3 力量與變位之關係；勁度係數以及勁度矩陣 336 / 4. 平衡 340 / 5. 結構分析與矩陣位移法 341 / 6. 使用元件之修正勁度矩陣 354 / 7. 矩陣位移法之一般式 361 / 8. 力法與位移法之比較 365 / 問題 366

第十一章 直接勁度法

1 緒論 369 / 2 在局部座標系統下之元件勁度矩陣 370 / 3 座標系統之旋轉 371 / 4. 整體座標下之元件勁度矩陣 375 / 5. 特殊例：桁架桿件之勁度矩陣

377	/ 6. 結構勁度矩陣	379	/ 7. 剛架結構利用直接勁度法之分析程序	382	/ 8. 實做範例	383	/ 9. 剛架結構之分析與電子計算機程式	394	/ 問題	395
-----	-------------	-----	-----------------------	-----	-----------	-----	----------------------	-----	------	-----

第十二章 非均勻斷面元件之處理

1 緒論	399	/ 2 固定端反力	399	/ 3 樑元件對應於轉角變位之柔度矩陣	402	/ 4 樑元件對應於轉角變位之勁度矩陣	404	/ 5 傾角變位方程式的一般式	405	/ 6 彎矩分配法中的勁度與傳遞係數	407	/ 7 節點側向位移與固定端彎矩	409	/ 8 彎矩分配法與修正勁度	411	/ 9 一個數值計算例	414	/ 問題	418
------	-----	-----------	-----	---------------------	-----	---------------------	-----	-----------------	-----	--------------------	-----	------------------	-----	----------------	-----	-------------	-----	------	-----

第十三章 彈性穩定問題的矩陣分析法

1 緒論	421	/ 2 樑元件在軸力作用下的勁度矩陣	425	/ 3 均勻柱元件之彈性穩定問題	430	/ 4 剛架結構之彈性穩定問題	438	/ 問題	445
------	-----	--------------------	-----	------------------	-----	-----------------	-----	------	-----

第十四章 結構動力學

1 緒論	449	/ 2 堆積質量	450	/ 3 建立運動方程式	452	/ 4 單自由度堆積質量系統之無阻尼自由振動	453	/ 5 多自由度堆積質量系統之無阻尼自由振動	458	/ 6 有阻尼之自由振動	465	/ 7 強迫振動：穩態解	569	/ 8 正規座標	472	/ 9 系統受力後之動態反應與運動方程式之分解	475	/ 10 淺談系統在地震力作用下之動力分析	481	/ 問題	483
------	-----	----------	-----	-------------	-----	------------------------	-----	------------------------	-----	--------------	-----	--------------	-----	----------	-----	-------------------------	-----	-----------------------	-----	------	-----

部分問題之解答 485

索引 493

第一章

緒論

1-1 工程上之結構

結構 (structure) 一詞用途甚廣，在工程上所討論之結構，常簡略的限定於經過施工後之構造體而言。一般而言，我們在土木工程方面所較關心之結構體有橋樑、房屋、擋土牆、水壩、塔、殼以及纜結構等。這類結構體；基本上是由一些實體結構元件經過適當的配置後所組成，而能達到除承載及卸載後能保持平衡外，且不致整體結構產生超量之變形而影響其機能。

結構體之設計考慮因素甚多，然而一般而言，它們起碼必須能夠符合以下四項主要目標：

1. 結構體必須滿足機能上之需求。
2. 結構體必須能夠安全地承載設計上所考慮之可能荷重。
3. 結構體之設計必須能滿足用料、施工以及整體成本之經濟性要求。
4. 結構體必須能達到建築美學之要求。

以圖 1-1 跨在二側承重柱之屋頂桁架為例，屋頂桁架及承重柱之設計考慮除了須能滿足承載面重、屋面板之重量、風力以及雪重而保持平衡外

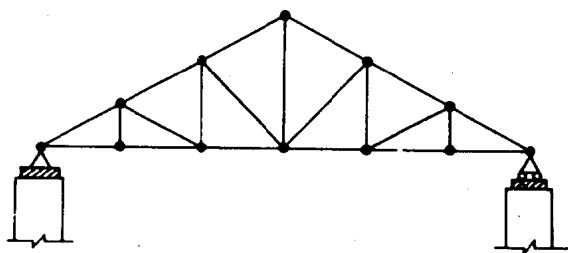


圖 1-1

2 第一章 緒 論

，尚須能提供居家、製造工廠等機能上之需求。雖然一般結構於規劃設計階段所著眼之考慮因素，多著重於如何能使材料之使用及施工之成本可減至最低為主要之著眼點，而較少能將該結構之實用性列為優先之考慮；但是本書仍不擬著重於這方面之討論，而仍偏重於探討結構體承載機能之各種方法介紹。

1-2 結構之規劃原理

一般而言，結構之規劃設計程序可區分成以下步驟：

1. 研擬結構配置 (layout)

通常任何結構之配置選擇，多由衆多選擇方案中所決定，其間主要之考慮之因素為建造該結構之原始動機。本階段之作業含結構型態、使用材料之選擇及經由合理之初步結構設計方法所得之成本效益分析等，除此之外，尚有相關法律、財務、社會性、文化層面、美學以及環境衝擊等方面之考慮。因為如此；我們可想像到，工程師在本階段之作業除了須具備專業知識外，尚須有豐富之經驗、成熟之技巧、廣博之知識以及適量之想像力方能圓滿完成。

2. 荷重之評估

在較正確之結構分析能夠進行之前，結構體所可能承受之荷重必須先加以分析決定，雖然在設計規範裡已有荷重之一般規定，但是對於規範結構承受荷重之各類情況以及某些可能之例外狀況的考慮，仍為工程師設計結構時之責任。

結構體所承受之荷重之一，為本身的自重，其大小及作用點固定，一般稱之為呆荷重 (dead load)；通常當結構體之尺寸大小尚未真正決定前，呆荷重之大小我們只能粗略估計，等到結構體之尺寸大小較為確定後再加以修正。

除了呆荷重外，其它結構體所可能承受之其它荷重，我們稱之為活荷重 (live load)，基本上；活荷重可歸類成可移動及移動性二類，可移動之活荷重當施力點改變並不會對結構體產生額外之動態衝擊 (dynamic impact)，例如人、家具、貨物、以及屋頂上之積雪等。至於移動性之活

荷重則為施力位置為連續性變動之荷重，例如鐵軌上之火車、橋樑上行駛之貨車、屋頂及牆上之風力以及橋基上之流水壓力等，除此之外，諸如汽車加速行駛時所產生之離心力以及突然發生之地震力等亦屬此類荷重。

在一般的結構設計中，為了簡化分析起見，除了靜荷重之外，對於移動性荷重而言通常事先將其所產生之動態衝擊影響轉化成某個百分比之活荷重來考慮，至於地震力則換算成大小為結構自重之相當比例的水平力來考慮。除了以上所討論之各類常見荷重外，因高溫或是震波所引致之動態荷重亦均為結構體可能承受之荷重之一。

3. 應力分析

一旦結構體之幾何形狀及外在荷重確定後，我們即可利用適當之結構理論進行應力分析，以決定各桿件所承受之內應力或是某些控制點所可能產生之變位，其中當我們考慮活荷重時，如何正確的計算在何種組合下，結構元件所可能產生之最大應力則為本階段之重點。

4. 元件之選擇

適當形狀、尺寸之元件的選擇以及接頭尺寸規格之決定，取決於應力分析之結果以及規範之規定及數據，通常在選擇過程中除了利用試誤法之外，對於材料力學以及製程之了解深入與否，也為是否能得到經濟又合乎要求之結構元件的重要因素。

5. 繪圖與細部設計

一旦我們決定好結構元件之細部資料，即可進行最後階段之設計工作，這其中包括與合約有關之各項設計圖、施工圖以及最終之成本估算等，當本階段之工作完成後，正式之施工作業即可開始進行。

以上我們所說明的五個步驟只為一般性之概念介紹，事實上，當實際工作在進行時，不但可再細分、修正，同時有些工作也可視情況並行作業，由於本書之主要目的在於介紹結構受力分析之相關理論，因此各位除了結構分析方法之研究外，如對以上所說明之其它方面有興趣，不妨再參考其它有相關說明之書籍。

1-3 結構學理論之分類

雖然我們可用各種不同的觀點來對各種結構學理論加以分類，但是為了能方便說明起見，我們將以下列幾項重點對其加以說明：

1. 靜力 (statics) 與動力 (dynamics) 結構

普通一般的結構在設計時所考慮的荷重類型，多僅為不對結構體產生動態影響之靜荷重 (static load) 而已，例如結構體自身之呆荷重或是積雪荷重等均是。除此之外，有些活荷重；如橋樑上移動之車輛等，雖然對於結構體會因移動而產生動態或衝擊之影響，但是為了簡化設計，通常僅將其簡化成靜態之集中荷重，並將可能造成之動態影響考慮成相當比例之靜荷重大小加以考慮而已。

至於真正要嚴謹的考慮移動性之荷重、地震力、風力以及炸彈產生之震力等對於結構體產生之影響，則屬於結構動力學 (structural dynamics) 一門所討論之範疇了。

2. 平面 (plane) 與空間 (space) 結構

現實環境中，並沒有真正所謂平面；也就是二度空間之結構，但是在經濟以及準確度要求能夠接受之情況下，樑、桁架式橋樑以及剛性構架之房屋結構等，在進行結構分析時，多將其視為平面結構處理。反之；例如高塔、圓頂式以及結構元件交錯相連而不共平面等結構，在進行結構分析時則須將其以承受不共平面之荷重下的空間構架來加以考慮。

3. 線性 (linear) 與非線性 (nonlinear) 結構

所謂線性結構是說當結構承載時，結構變位 (displacement) 與荷重大小成線性關係。其中滿足以上條件之基本前提為：

- (a) 結構體所用之材料於承受荷重期間之行爲均必須為彈性 (elastic) 且遵守虎克定律 (Hooke's law)。
- (b) 結構體之變位對於幾何形狀之影響甚微，因此不影響應力之計算。

各位須記得，當我們使用疊加原理 (principle of superposition) 時；也就是一組外力 (變位) 對於結構體某點所產生淨影響等於單獨每個

外力（變位）對此點所產生之個別影響之和。必須（或假設）先要求結構體之變位與外力成線性關係。

至於會產生結構體之變位與外力成非線性關係之情況有：

- (a) 結構體所使用之材料本身即為非線性之材質。
- (b) 材料受力變形雖仍在彈性範圍內，但是卻使得結構體產生過大之變位，而使得外力之作用方向明顯的改變。

其中屬於結構非線性行為分析的例子有結構之塑性分析（plastic analysis）以及結構之挫屈（buckling）分析。

4. 靜定（statically determinate）與超靜定（statically indeterminate）結構

簡而言之，如果利用靜力平衡即可完成結構之分析，我們即稱此結構為靜定結構，反之則為超靜定結構。

至於超靜定結構在進行線性分析時，除了必須利用靜力平衡條件外，尚須考慮結構受力後之彈性變形。原因是此類結構體所產生之內力除了與荷重之大小有關外，材料本身之特性（例如彈性模數 E ）以及結構元件之斷面特性（如斷面積 A 及慣性矩 I 等）也會影響，因此荷重、材料特性以及幾何性質均會影響超靜定結構之分析結果，而不像靜定結構之分析則只須考慮一項！

5. 力量（force）與變位（displacement）

我們知道，力量與變位為影響結構體之二大主要事件，而結構分析最主要之目標，也就是要決定結構體所可能產生之力量與變位，並進而了解元件幾何形狀及材料性質對於力量與變位之間關係的影響。廣義來說，結構分析方法可簡單歸納成力法（force method）以及變位法（displacement method）二大類；在力法中，基本的出發點是先將力量假設為未知量，然後再將變位用力量來表示，以進行各項計算，而變位法則剛好相反，也就是將變位視為基本未知數以及將力量用變位表示為基礎的分析方法。在矩陣法中，我們另將力法稱之為柔度法（flexibility method），變位法則另稱之為勁度法（stiffness method）。

1-4 實際與理想化結構

各位想必都了解，由於實際結構之構築，無論是材料性質、元件尺寸等均不可能完全符合原有理想化環境下之要求，以及爲了簡化問題之複雜性，通常在進行結構分析時，我們多會引入相當程度之假設，以求理論與實際能夠兼顧。

例如，通常在設計矩形斷面之鋼筋混凝土樑時，均假設 E 以及 I 值爲常數，但是事實上確未必如此，因爲通常我們在設計斷面上之鋼筋量時，基本上是根據該斷面之應力大小所計算而得，因此嚴格說起來，由於各斷面處應力之變化，而使得所配置之鋼筋量並不相同，接著各斷面所計算得到之 I 值也不相同。除此之外，就算不考慮實際結構之支撐、接頭、尺寸等無法準確控制之可變因素外，我們常發現，實際結構之行爲常與我們經由理想化結構所分析而得之預測行爲相差甚大。雖然有以上諸多事實，但是那並不表示分析結果就毫無一點用處，相反的，如何能夠尋得一些技巧，在有限之花費下，使得理想化之分析結果能夠在某種誤差範圍內接近實際，而發揮其應有功效，乃爲學習結構分析方法之最大目的所在。

1-5 本書之討論範圍

以下三類結構，在本書各章節中將會有詳細的討論，它們是：

1. 樑 (beam)
2. 桁架 (truss)
3. 剛架 (rigid frame)

狹義而言，我們可將樑想成一根平直且用來承載橫向荷重之結構元件，對樑而言，只要我們求得彎矩 (bending moment) 以及剪力 (shear) 即可完全了解其力學行爲。

至於桁架，我們給它的定義爲：它是由一些只承受軸向力 (axial force) 之二力桿件 (two-force member) 經由無摩擦之鉸接頭 (hinge) 或是梢接頭 (pin) 所組成之結構。

剛架基本上是以能夠傳遞彎矩之剛性接點 (rigid joint) 連接結構元

件而成之結構，通常此類結構上之元件所能承受之力量分別有彎矩、剪力以及軸力 (axial force)。

本書在內容之安排上，基本上只限定在平面結構之討論。其中前面四章將著重於結構學之基本觀念以及靜定結構之分析方法介紹，第5章的內容則是與彈性變形 (elastic deformation) 有關之分析方法的介紹，第6章則對可用來分析超靜定結構之典型力法 (force method)，也就是符合變形法 (method of consistent deformation) 加以介紹，第7、8章則分別討論傾角變位法 (slope-deflection method) 以及彎矩分配法 (moment distribution method)，此二法為變位法 (displacement method) 中用來分析超靜定結構最常用的二個方法。之後，在剩餘的幾章 (9到14)，我們將對有關結構分析中常用的幾個矩陣法，例如：矩陣力法 (matrix force method)、矩陣位移法 (matrix displacement method)、直接勁度法 (direct stiffness method)、結構元件之彈性穩定 (elastic stability) 以及結構動力學 (structural dynamics) 等加以介紹。

第二章

穩定度與靜定度

2-1 共面力系之平衡方程式

我們知道，結構的最主要功能乃是用來承載外來之各類可能荷重。雖然不管是樑、桁架以及剛架等各類結構在承受荷重之過程中，必然會產生些許之變形而連帶的改變外力原來的作用方向，但是由於變形量甚微，因此通常在進行結構分析時，我們常將此項變形因素所可能產生之影響忽略不計，當然這其中也包含一項基本的觀念：在這些常見結構的設計中，元件之變形量通常都有合理的規範，這也就是說，當結構受力後並不會產生過大之變形。

當結構體在承受外力作用下，不管是整個結構體或是我們想像中將結構體切開後，拿出來看之部分，如果其相對於未受力（如係指被切開後之部份結構體，則此力除了外力外，尚含斷面切開處之內力）前之靜止位置並未改變時，我們即稱該結構在受力後仍然保持平衡（equilibrium），換句話說，在此力系下之所有力量也同時保持平衡，也就是所有外力對此結構（切開後之部分結構體）之合力（及合力矩）必然為0。

由於本書只限定於承受共面力系之平面結構的討論，因此基本上，所有共平面之力量在平衡條件下，必須能滿足下列三條聯立方程式

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum M_a = 0 \quad (2-1)$$

其中 $\sum F_x$ = 力系中，各力在 x 方向之分量和

$\sum F_y$ = 力系中，各力在 y 方向之分量和

$\sum M_a$ = 力系中，各力對平面上任意點 a 之力矩（moment）和

上式中，足標 x 和 y 分別代表卡式直角座標系中互相垂直的二個不同方向，除了以上的說明外，各位尚須了解 $\sum F_x$ 及 $\sum F_y$ 分別代表力系中諸力之