

結構學

石朝雄 著

前達甲大學水利系副教授
博士班肄業
比利時魯汶大學營建工程

目 錄

《上 冊》

第一篇 總 論

第 一 章 緒 論 3

- 1 - 1 結構定義 / 3
- 1 - 2 結構設計 / 4
- 1 - 3 結構型式 / 6
- 1 - 4 結構之簡化 / 14
- 1 - 5 單位制 / 18
- 1 - 6 荷重 / 21
- 1 - 7 支座及其簡化 / 32

第 二 章 基本概念 37

- 2 - 1 力及其合成分解 / 37
- 2 - 2 力的平衡條件 / 48
- 2 - 3 變位 / 51
- 2 - 4 柔度與勁度 / 53
- 2 - 5 功能原理 / 59
- 2 - 6 疊加原理 / 81

第二篇 靜定結構應力分析

第三章 反力	87
3-1 支座與反力 /	87
3-2 反力之穩定性與靜定性 /	89
3-3 反力之數解法 /	95
3-4 反力之圖解法 /	101
第四章 靜定桁架應力分析	119
4-1 桁架及其理想化 /	119
4-2 桁架的分類 /	124
4-3 桁架的穩定性及靜定性 /	128
4-4 代數法 /	131
4-5 圖解法 /	146
4-6 矩陣法 /	155
第五章 靜定樑及鋼架之應力分析	179
5-1 樑與鋼架結構 /	179
5-2 抗撓桿件之應力 /	181
5-3 樑與鋼架的穩定性和靜定性 /	185
5-4 荷重、剪力和彎矩之關係 /	195
5-5 剪力圖和彎矩圖 /	201
5-6 剪力圖與彎矩圖的結構矩陣分析 /	205
第六章 橋樑	229
6-1 橋樑之型式 /	229
6-2 橋面系統 /	232
6-3 鐵路橋載重 /	234

6-4	公路橋載重 / 237	
第七章	感應線	245
7-1	感應線之定義 / 245	
7-2	樑之感應線 / 247	
7-3	剛架樑之感應線 / 262	
7-4	橋面系統 / 264	
7-5	桁架之感應線 / 273	
第八章	橋樑最大感應值之決定與應力的分析	287
8-1	集中車輛載重下最大感應值的決定 / 287	
8-2	車道載重下最大感應值之決定 / 289	
第三篇 靜定結構之變形分析		
第九章	幾何法	309
9-1	曲率面積法求梁及剛架之撓角及變位 / 310	
9-2	威氏圖 / 329	
第十章	彈性荷重法	347
10-1	共軛梁法求梁之變位及撓角 / 349	
10-2	桿鏈法求桁架之節點變位 / 367	
第十一章	虛功法	381
11-1	虛功法之推衍 / 383	
11-2	虛功法解析梁及剛架的撓角變位 / 396	
11-3	虛功法求桁架之節點變位法 / 407	
第十二章	矩陣法	415
12-1	肢桿柔度矩陣 / 415	
12-2	肢桿剛度 / 424	

4 結構學

12-3 柔度和剛度的關係 / 434

12-4 柔度法求結構變位 / 435

12-5 剛度法 / 451

《下 冊》

第四篇 力法分析超靜定結構應力

第十三章 超靜定桁架傳統力法 465

13-1 概說 / 465

13-2 最小功法 / 467

13-3 變位法 / 482

13-4 貝帝定律法 / 498

13-5 綜論 / 503

第十四章 超定桁架力矩陣 509

14-1 力矩陣法概述 / 509

14-2 威應矩陣 / 512

14-3 柔度矩陣 $[f]$ / 517

14-4 力矩陣法方法之推衍 / 519

14-5 舉例 / 521

第十五章 梁及剛架傳統力法 541

15-1 符合變形法 / 542

15-2 三力矩方程式 / 551

15-3 最小功法 / 560

15-4 柱比法 / 579

15-5 綜論 / 598

第十六章 超定梁及剛架矩陣力法 611

16-1 前言 / 611

16-2 方法簡述 / 611

16-3 固端力矩 / 613

16-4 超定梁及剛架之贅餘力 / 168

16-5 感應矩陣 / 621

16-6 實例說明 / 627

第五篇 變位法分析超靜定結構應力

第十七章 超靜定桁架矩陣位移法 641

17-1 前言 / 641

17-2 矩陣位移法 / 642

17-3 靜力矩陣法 / 644

17-4 單位位移法 / 656

17-5 直接元素法 / 664

17-6 三種方法的比較 / 677

第十八章 超定梁與剛架矩陣變位法 683

18-1 靜定矩陣 / 683

18-2 肢桿勁度矩陣 / 694

18-3 結構勁度矩陣 / 696

18-4 分析過程 / 698

18-5 連續梁或剛架中 $[k]$ 矩陣為最普遍的問題 / 699

18-6 在 $[k]$ 矩陣中有較特殊的問題 / 703

第十九章 超定梁與剛架傳統變位法(一)——撓角變位法 735

	19-1 撓角變位法之概述 / 735	
	19-2 撓角變位方程式的另一形式 / 742	
	19-3 撓角變位法分析梁及剛架之程序 / 743	
	19-4 撓角變位法求環境變遷下的剛架應力 / 745	
第二十章	超定梁與剛架傳統變位法(二)——彎矩分配法.....	765
	20-1 無側移之梁及剛架 / 766	
	20-2 有特殊桿之梁及剛架 / 774	
	20-3 有側移之梁及剛架 / 781	
	20-4 代替剛架 / 787	

第六篇 特 論

第廿一章	有限元素法.....	797
	21-1 撓角變位法矩陣式 / 797	
	21-2 有限元素法之推衍 / 801	
	21-3 梁元素及剛架應用 / 809	
第廿二章	超定結構之感應線	841
	22-1 貝帝律法 / 841	
	22-2 力矩分配法 / 847	
	22-3 撓角變位法 / 861	
	22-4 米勒——布雷斯勞定律法 / 865	
	22-5 連續單位荷重解靜不定結構之感應線 / 874	
第廿三章	塑性分析	883
	23-1 緒論 / 883	
	23-2 極限彎矩與塑性鉸 / 885	
	23-3 虛功法求梁與門架的極限應力 / 888	

23-4	平衡法作塑性分析 / 901
23-5	機械構架 / 910
23-6	軸向力和剪力對塑性彎矩的影響 / 922
23-7	剛架的塑性矩陣分析 / 925

附 錄

A、矩陣代數.....	939
B、面積及形心位置.....	964
C、 $\int \mu M dI$ 之積分值.....	971
D、柱比法之對比柱幾何性質.....	972
E、固端力矩.....	975
F、簡支梁之變位值.....	977
G、電腦程式.....	979
1.反矩陣及聯立方程求解程式 / 979	
2.靜定桁架應力程式 / 984	
3.柔度法求變位程式 / 987	
4.勁度法求變位程式 / 990	
5.矩陣力法分析超定結構程式 / 995	
6.有限元素法分析結構程式 / 1003	
H、膨脹係數.....	1011

第一篇

總

論

本篇共有兩章，目的在使讀者認知結構學的範疇及基本理論。在第一章的緒論中，說明了結構學，其研究對象的結構物與環境（荷重及支座）之簡化，及其於結構工程中的地位。在第二章的基本觀念中，說明了力及變位的定義，互相間的關係等基本理論，以為此後各章的基石。

第一章

緒論

1-1 結構定義

“結構”(structure)含義至廣，簡言之：凡物體能承受其它外來的力量，且能將此力量傳達於另一物體者皆可稱為“結構”，大如摩天大廈，小如一草一石皆可謂之。當力量，如風力吹襲作用於摩天大廈和小草上，大廈利用大廈內部的結構物與穩固的地基，將此力量傳至地表上，而使大廈不被風所吹毀。小草因為有根散佈附着於土壤中，當風吹襲時，小草借根、莖、葉的傳播而使作用於其上的風力散於土壤中，才不致使小草被連根拔起。

但就“工程結構”(engineering structure)而言，結構通常指的是某種非自然或人造的結構物或營造物。在土木工程範圍內常見的結構物有橋樑、房屋、牆、堤、壩、剛架以及一些殼結構(shell structure)等不勝枚舉。此等結構物由基本的元件或桿件組合，使在加載時保持穩固和平衡不致發生顯著的變形與破壞。

一門研究結構物體受力情形以及其受力時內外部之反應情形的學

間稱之“結構學”。其研究對象乃根據已知的外力，再予以分析出結構物各部份受力變形與變位與變形，並預測出破壞的情形。有些結構物所受之力為靜態力，則屬於靜力學範圍，如作用於擋土牆上的靜水壓力。又有些所受的力量為動態力，則屬於動力學範圍，如車子行駛於橋樑上。動力學的分析計算較為麻煩、困難，但近代的結構理論已趨於動力學的研究分析，使結構學研究的範圍更廣。就以圖 1-1 中所示置於柱頂上之屋架為例，該屋架與屋面載重、自重、風載重及雪載重達穩定平衡狀態外，另外還可提供空間使人類活動或其他用途之用，而結構學僅以討論結構物負荷載重之功能，一個工程師必須認識結構、了解結構進一步運用結構以達經濟美觀並配合實際需要和安全載重的要求。

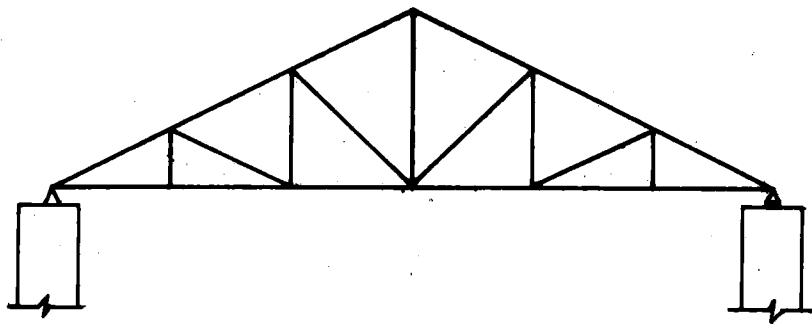


圖 1-1 置於兩柱上的屋架

1-2 結構設計

一般完整的結構設計包括下列諸步驟進行：

1. 規劃設計 此步驟在整個結構工程中最為重要；所以工程師於

此必須有充分的經驗與學識，以為蒐集各種資料，再加以決定所設計之形式，所採用之材料、所預測受力載重的可能以及大概的尺寸等能力。不論其為居住或用來支承他物，此步驟最主要的事項乃是結構任務的要求，再則才考慮經濟、美觀等問題。

2. 結構應力分析 當第一步驟規劃完成後，所採用的型式、材料、尺寸也決定下來。一旦自身和外載重的力量加上時，其結構內部受力反應的情形就必須靠此步驟加以分析預測，如有涉及活載重時得考慮如何安置以產生最大應力和應變。此步驟就是本書所要研究的範圍，學者必須了解各種結構以及基本的數學計算方法和應力分析的基本原理方可從事分析計算。最近資訊發達，可配合電腦來從事繁雜的計算，因而省下許多寶貴的時間。

3. 結構設計 當第二步驟分析計算完畢後，此步驟即根據前面所分析的應力，配合型式，加以選材，再進行細部的設計，如各部的斷面大小、型式、各部聯接的方法、電銲種類、鉚釘的安排等問題，在此步驟中尤須符合法定規範與規格，此設計有專書討論設計，本書不加以討論。

4. 工程圖與細節 以上三個步驟完成時即有各部份的詳細資料，借此資料繪成詳細明瞭的圖表，以便於施工的根據與進度的藍本。

結構工程是將結構由需求概念產生到結構建造完成的工作。整個結構工程包括規劃、設計、與施工三大連貫且交互影響的作業。規劃者必具有設計與施工的知識背景；同理，設計者或施工者亦必具有另兩種知識背景、方能使整個結構工程之進行臻於完美。

由上述結構工程可知，結構學似乎僅用於設計中的第二步。其實，結構學內涵包括了應力分析與變位分析；因此，在第三步中依法規決定肢桿截面時也必須計算變位，施工時也必須使用應力分析及變位

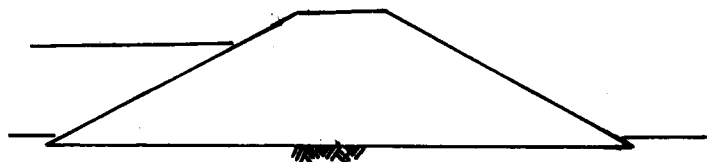
分析以爲鷹架形式、模板基位、施工程序的決定的利器。結構學在結構工程中具有靈魂、主導的地位。

1-3 結構型式

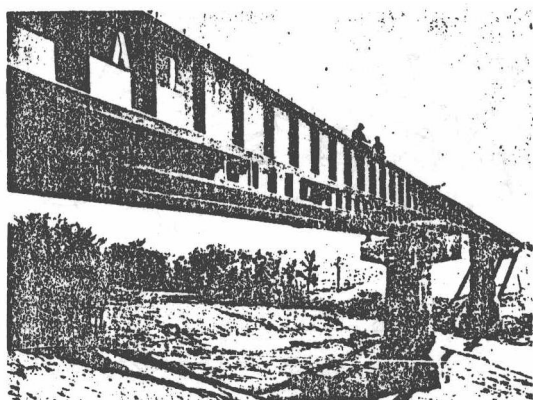
結構的分類如以材料來講可分爲(1)木材結構(如松木、柳安木等)，(2)金屬結構(如鋼鐵、合金等)，(3)土石結構(如混凝土、磚、石砌等)，(4)各種材料的混合結構(如鋼筋混凝土)。但實際上除了全部金屬結構以外，都是混合材料所構成。例如木材結構免不了用鐵釘固着，土石結構不免用鋼筋來強化抗張強度。材料的混合選用可達到經濟的原則。

如果依照結構的元件型式來分，大略可分爲：(1)實體結構(2)架成結構(3)面結構。

1. 實體結構 顧名思義結構體本身充滿實物的結構。如圖 1—2 (a)之土石填是由石、砂、土所組成的重力蓄水壩。(b)圖橋墩是鋼筋混凝土所構成，用來支撐橋架。因爲結構體是一塊實體，經過仔細的分析，每種結構物體將都是實體結構。但結構學並不能對一砂、一石、一栓、一樁的分析。所以我們必須對“實體結構”劃分界綫。所謂“實體結構”乃在結構分析時不能以面或綫的觀念或原則來分析者。再看柱是否爲實體結構或以綫的觀念來分析呢？關於這種問題待下節“結構的簡化”再視歸屬何類。



(a) 土石重力壩

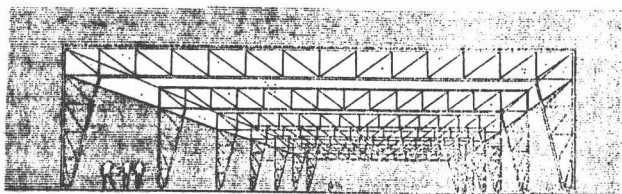
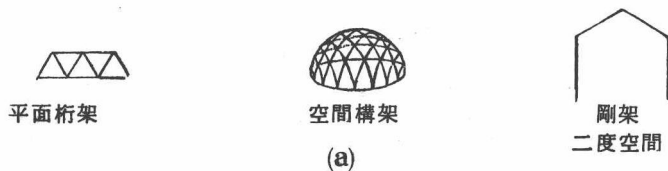


(b) 橋墩

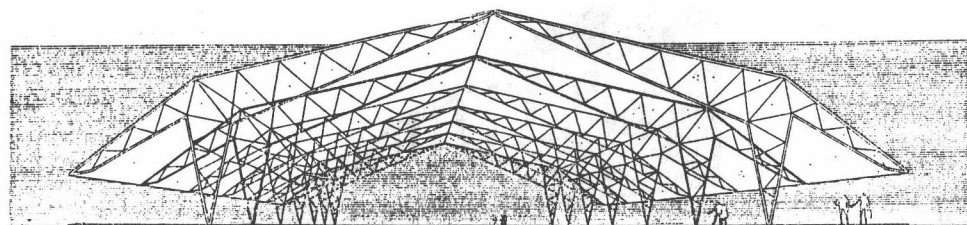
圖 1 — 2

2. 架成結構 以若干肢桿組合而成。巨觀之一肢桿可以一綫來表達分析者稱之。如桁架，剛架皆是架成結構。在架成結構中有兩度與三度空間的架成結構。

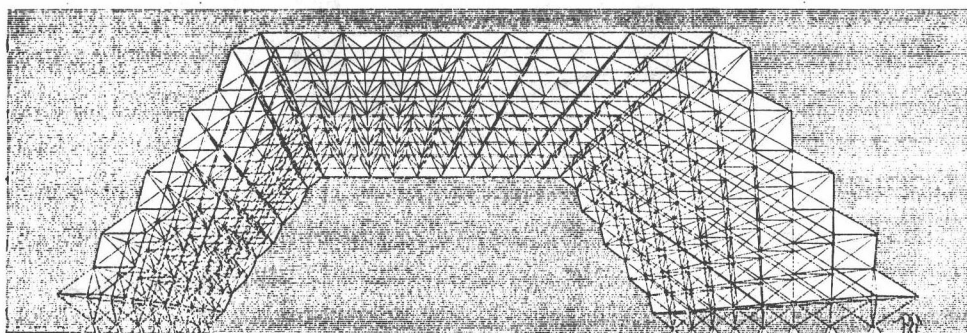
以下圖 1—3 中(a)爲桁架與剛架，二度與三度空間最簡單的比較。(b)、(c)是以平面桁架爲主所構成的屋架，(d)是三度空間的桁架構造物。



(b)



(c)

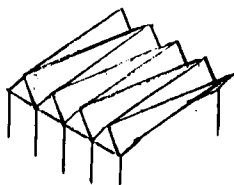


連續屋頂或
牆結構的平空間桁架

(d)

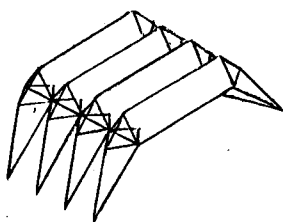
圖 1-3 各種的架成結構

3. 面結構 以面（或平面，或曲面）為單元組成之結構均屬之，如摺版、薄殼等結構，面結構通常以架成結構為支架。



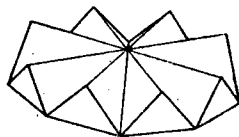
由三角摺板構成的屋頂

(a)



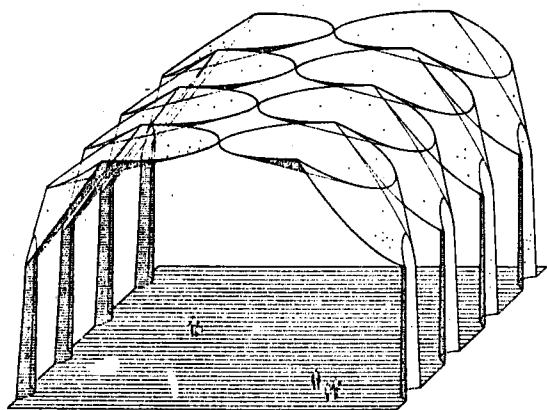
由摺板構成的剛架

(b)

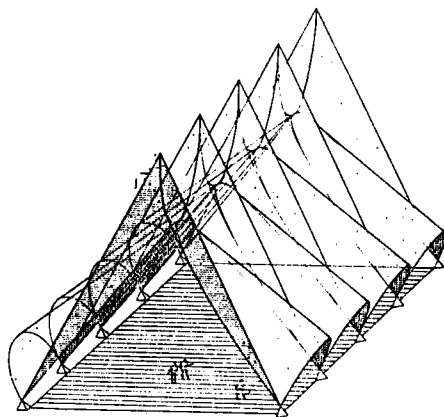


由摺板構成的圓頂

(c)



(d)



(e)

圖 1—4 摺板結構與薄殼的面結構

圖 1—4 中(a)、(b)、(c)皆屬摺板的面結構，(d)(e)則是薄殼的面結構。