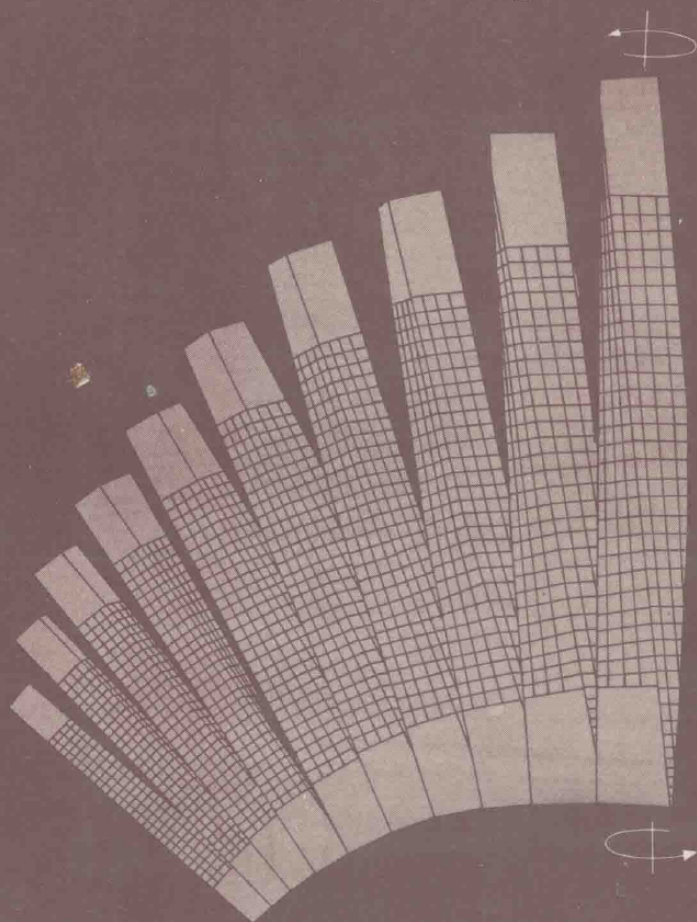


材料力學

Ferdinand P. Beer
E. Russell Johnston, Jr.

簡來成 譯



南宏圖書公司 印行

大專用書

材 料 力 學

簡來成教授 編譯

1982

南宏圖書公司 印行

版權所有
不准翻印

材 料 力 學

譯 者：簡 來 成
發行人：陳 炳 楠
發行所：南宏圖書有限公司

台北市汀州路七五一之三號

電話：3 4 1 8 1 3 2

3 9 2 1 8 8 9

郵政劃撥 1 0 6 8 5 8 號

印刷者：實踐印刷有限公司
登記證：局版台業字第1379號

中華民國七十一年十一月初版

定價320元

原 序

基本力學課程的主要目的是培養工科學生能依照一種簡單且合邏輯的方式分析問題，並且訓練利用基本的原理解決問題的能力。本書是為初等材料力學課程而寫的。作者企望本書能夠助於講授者達成上述之目標。

使用此書的同學應該先修靜力學課程。第一章複習靜力學；在 7-2 及 7-3 節介紹剪力及彎曲力矩圖。附錄 A 中列出力矩性質以及面積形心；這些內容可以用來加強樑中垂直應力及剪應力的探討（第 4 及 5 章）。

在第一章中介紹了在某一點的應力概念，其中顯示出軸向負荷依據所考慮的截面而產生剪應力以及垂直應力。在第三、四、五章中藉著扭轉、純彎、以及橫向負荷等情況，而再次地強調了計算表面的方位以定出應力的此一事實。但是必須等到同學們能解出包含了基本負荷的組合之問題，並且亦須用利用諸如莫氏圓等計算方法的時候，才在第六章中討論到的某一點的應力轉換。基於類似的理由而僅在第七章中論及剪力以及彎曲力矩圖，並在該章中立即地應用在樑與軸的設計。

第二章中首先研討靜不定問題，並且在整本書中的各種負荷條件下討論之。所以同學們起先利用了變形及靜力學的組合分析方法求出此類問題的解答。依照此種方式而得以在課程結束的時候能夠充分地了解此種基本方法。除此之外，此種方式有助於同學們體會到應力靜不定性，並且僅可由考慮到相對應的應變分佈時才能計算求解。

在第二章中介紹塑性變形應用在軸向負荷下的元件分析的觀念。在第二及四章的加星號章節中分別論及圓軸及柱形樑的塑性彎曲之間

題。雖然這些內容可依講授者的選擇而省略之，但是在本書中提及者可讓同學們了解到線性應力與應變關係的限制性，並且使用彈性扭轉及撓性公式時須要小心從事之。

同學們一般都認為靜力學及動力學是二學科可以嚴謹及合邏輯的定律求出工程問題的確實解答，因而認為材料力學是半經驗的定律，僅能得出近似的解答。這種概念大部份可能因為靜力學及動力學的研討是將其化簡為簡單的數學模式來分析，以基本公式用質點及剛體模式；而材料力學的研討則太依賴著許多公式，而其有效性則取決於學生較不了解或較記不住的一些假設。本書希望透過作用在結構上的力量平衡條件、已知材料的應力與應變關係、以及支點與結構的負荷所加諸的條件等基本概念的了解，進行材料力學的研討。此種方式再加上簡化模式的應用就得比較合理及合邏輯地推導出所須要的公式，同時也可以清晰地指明這些公式可以信賴地應用在實際的工程結構以及機器另件的設計與分析方面。

本書中廣泛地用到自由體圖以求出未知的外力或內力。圖解方程式亦可幫助同學們了解到負荷的重疊，以及所造成的應力與變形。

利用積分及力矩一面積求出樑變形的的方法各成一章，俾讓教授能夠僅採用其中的一種方法，或是接連地講授之。

本書亦包括了譬如殘留應力、非圓形及薄壁元件的扭轉、曲形樑的彎曲、非對稱元件中的剪應力、以及破壞標準等較深入的主題，以適應某些需用到者。為了維持主題的完整性，將這些章節依較合邏輯的順序編排之。所以即使材料力學課程並不講授，但是在往後修習的課程或工程實用上用得著的時候，可以很快的查閱參考之。這些節都冠以星號以資識別。

本書以單元方式排列之，每一單元都是先敘述理論的幾節，然、列舉例題，再指定作業。每一單元都有一個主題，可以涵蓋一節課內容。陳述理論的各節中並舉出一些例題以說明其含義，並助於了

。而範例則在於顯示出這些理論應用在解題的方法。由於這些範例樹立了可建立於解出習題的觀念，所以它就具有了加強本書的內容以及示範了學生在解題時的有條理及簡潔的模式等雙重功用。惟其主要的目的是說明書中的內容，讓同學們能夠了解到用於材料力學的基本原理。習題則依據說明內容的段落而分組並且依困難程度的次序排列之。必須特別留意的習題並冠以星號。偶數習題的解答並列在附錄中。

因為基礎科學及工程課程通常都比較強調 SI 公制單位，所以在本書的理論章節的大部份例題都用 SI 單位闡述之。然而為了顧及目前由一個單位系統過渡到另一系統之中，同學們能夠有效率地運用 SI 公制及美國習用單位，所以例題及習題就都各居其半。因為習題的數目很多，教授可依其上課需要而指定合適習題。

作者： Ferdinand P. Beer.

E. Russel Johnston, Jr.

譯 序

材料力學一課，數十年來已成為大學、獨立學院及專科學校有關工程科系的主要課程之一。在土木、機械、航空等科系，材料力學已為教育部列為必修科目。只是過去數十年來，國內有關這一課程大多採用英文教本，即使有少數中譯本，有些已日久沒修訂，內容嫌太舊。採用英文本，誠有其方便之處；但初學者，難免限於語文隔閡，揣摩英文字句，浪費寶貴的時間，有買棺還珠之弊；不若採用中文本，使讀者一目瞭然，立刻建立觀念，而後能融會貫通，運用自如，以收事半功倍之效。

本書作者 Beer 與 Johnston 所著應用力學一書，(Vector Mechanics for Engineering, 3rd ed., 1977, 淡江書局印行)，取材充備，敷陳平易，深入淺出，條析分明，近年來為國內各大專院校普遍採用之教本。作者於 1981 年又推出材料力學一書，其特點與應用力學一樣，相信將來亦能取代舊教本，風行各大專院校。

近年來，力學發展一日千里，材料力學也不例外。因此有些較深入的內容，諸如殘留應力、破壞標準及非圓形、非對稱與薄壁元件應力分析等，基於讀者將來進修或工作的需要，在本書也包含了。這些內容在目錄上都冠以星號，限於上課時間不足，可不講授，讀者以後須用時，可以查閱。

本書取材完備，結構完美，是難得一見之好教本。我們幾位在各大專院校執教的同仁，咸認為值得費點心力，將之譯為中文。用淺顯的文字將其精義敘述，期讀者免浪費時間於英文字句上，能建立觀念，進而能將書上的方法運用自如以解題，這是我們的願望，也是讀者期獲得的理想。

本書譯述，爲我們幾位同仁利用公畢課餘之暇所完成，希望以簡明的文字譯述，對讀者有所助益。惜因才疏學淺，錯誤之處在所難免，尙祈先進賢達，不吝指正爲幸。

簡 來 成 僅識於民國七十一年五月
國立臺灣大學 機械系

目次

序

第一章 應力概念的簡介.....	1
1-1 簡介.....	1
1-2 軸向負荷；垂直應力.....	5
1-3 剪應力.....	8
1-4 支承應力.....	10
1-5 應用到簡單結構的分析.....	10
1-6 傾斜平面在軸向負荷之下的應力.....	22
1-7 一般負荷條件下的應力；應力分力.....	25
1-8 極限及容許應力；安全係數.....	29
第二章 應力與應變——軸向負荷.....	42
2-1 變形；應變概念.....	42
2-2 軸向負荷下的垂直應變.....	43
2-3 應力——應變圖形.....	45
*2-4 真實應力與真實應變.....	50
2-5 虎克定律；彈性係數.....	51
2-6 材料的彈性與塑性行為.....	52
2-7 重複負荷；疲勞.....	55
2-8 軸向負荷下的元件變形.....	57
2-9 靜力不定問題.....	66
2-10 包含溫度變化的問題.....	71

2 材料力學

2-11 卜易生比.....	86
2-12 多軸負荷；一般化虎克定律.....	88
*2-13 膨脹；體膨脹係數.....	91
2-14 剪應變.....	94
2-15 進一步討論軸向負荷下的變形； E ， ν 及 G 之間的關係	98
2-16 軸向負荷下的應力及應變分佈；聖特——魏納特原理...	107
2-17 應力集中.....	111
2-18 塑性變形.....	113
*2-19 殘留應力.....	118

第三章 扭 轉..... 131

3-1 簡介.....	131
3-2 軸中應力的初步探討.....	132
3-3 圓軸中的變形.....	134
3-4 彈性範圍中的應力.....	138
3-5 彈性範圍中的扭轉角.....	151
3-6 靜力不定軸.....	157
3-7 傳動軸的設計.....	171
3-8 圓軸的應力集中.....	174
*3-9 圓軸中的塑性變形.....	180
*3-10 彈塑性材料製成的圓軸.....	182
*3-11 圓軸中的殘留應力.....	187
*3-12 非圓形件的扭轉.....	197
*3-13 薄壁中空軸.....	201

第四章 純彎曲..... 214

4-1 簡介.....	214
-------------	-----

4-2	純彎曲應力的基本討論	216
4-3	對稱元件在純彎曲中的變形	217
4-4	彈性範圍中的應力及變形	221
4-5	橫截面中的變形	227
4-6	幾種材料造成元件的彎曲	238
4-7	集中應力	244
*4-8	塑性變形	254
*4-9	彈塑性材料製成的元件	257
*4-10	單對稱平面元件之塑性變形	263
*4-11	殘留應力	264
4-12	對稱平面中的偏心軸向負荷	276
4-13	不對稱彎曲	287
4-14	偏心軸向負荷的一般情況	295
*4-15	曲形元件的彎曲	309
第五章	橫向負荷	329
5-1	簡介	329
5-2	垂直應力分佈的基本假設	331
5-3	定出水平面上的剪力	332
5-4	定出樑中的剪應力 τ_{xy}	338
5-5	常用樑中的剪應力	340
5-6	窄長方形樑中應力分佈的進一步討論	342
5-7	任意縱向切割上的剪力	351
5-8	薄壁元件中的剪應力	354
*5-9	塑性變形	357
5-10	組合負荷下的應力	370
*5-11	薄壁件的非對稱負荷；剪力中心	386

第六章 應力與應變的轉換..... 409

- 6-1 簡介..... 409
- 6-2 平面應力的轉換..... 410
- 6-3 主應力；最大剪應力..... 412
- 6-4 平面應力的莫氏圓..... 424
- 6-5 一般的應力狀態..... 438
- 6-6 莫氏圓應用於分析三維應力..... 440
- 6-7 韌性材料在平面應力下的降伏標準..... 445
- *6-8 脆性材料在平面應力下的破壞標準..... 448
- 6-9 薄壁壓力容器中的應力..... 459
- *6-10 平面應變的轉換..... 469
- *6-11 平面應變的莫氏圓..... 473
- *6-12 三維應變分析..... 477
- *6-13 應變的量測；應變座..... 482

第七章 樑與軸的強度設計..... 495

- 7-1 引言..... 495
- 7-2 剪力圖與彎矩圖..... 498
- 7-3 負荷，剪力與彎矩間的關係..... 509
- 7-4 樑中的主應力..... 520
- 7-5 柱形樑的設計..... 524
- *7-6 等強度樑..... 538
- *7-7 傳動軸的設計..... 541
- *7-8 作用負荷下的應力..... 543

第八章 積分法求樑的撓度..... 559

8-1 引言..... 559

8-2 彈性曲線方程式..... 561

8-3 靜不定樑..... 569

*8-4 使用奇異函數..... 582

*8-5 由負荷分佈直接求彈性曲線..... 589

8-6 重疊法..... 607

8-7 應用重疊法於靜不定樑..... 609

第九章 力矩-面積方法求出樑的變形..... 625

*9-1 簡介..... 625

*9-2 力矩-面積定理..... 625

*9-3 應用於懸壁樑及對稱負荷樑..... 629

*9-4 另件的彎曲力矩圖..... 631

*9-5 不對稱負荷的樑..... 643

*9-6 最大變形..... 646

*9-7 靜力不定樑..... 655

第十章 能量方法..... 672

10-1 簡介；應變能..... 672

10-2 應變能密度..... 674

10-3 垂直應力的彈性應變能..... 676

10-4 剪應力的彈性應變能..... 680

*10-5 一般應力狀態的應變能..... 684

10-6 衝擊負荷..... 699

10-7 衝擊負荷的設計..... 702

10-8	單負荷下的功與能	703
10-9	功—能方法求出單負荷下的變形	706
10-10	一些負荷下的功與能	718
*10-11	卡氏理論	722
*10-12	利用卡氏理論求出變形	723
*10-13	靜力不定結構	729
第十一章	柱	745
11-1	簡介；結構的穩定性	745
11-2	銷端柱的奧依勒公式	748
11-3	奧依勒公式延伸到其它端部條件的柱子	753
*11-4	偏心負荷；正割公式	766
11-5	中心負荷下的柱子設計	776
11-6	設計偏心負荷下的柱子	793
附錄A	面積之力矩	809
A-1	面積之第一力矩；面積之中心	809
A-2	求組合面積之第一力矩及其形心	812
A-3	面積之第二力矩，轉動慣量，迴轉中心	815
A-4	平行軸原理	819
A-5	求組合面積之轉慣量	820

第一章 應力概念的簡介

1-1 簡 介

研討材料力學的主要目的是提供工程師們分析及設計方法，研究各種機器及負荷承載結構。

茲以一根構架 AB 及一根桿子 BC 所構成的結構為例，如圖 1-1 所示。我們的目的是判斷出此一結構在 B 是否可以安全地支持著一個 30 -KW 的負荷。

根據靜力學的知識得知 AB 及 BC 是二力元件，且有下列的大小相等但是方向相反的軸向力作用在它們的每一個端點：大小為 F_{AB} 的 F_{AB} 及 F'_{AB} ，大小為 F_{BC} 的 F_{BC} 及 F'_{BC} （圖 1.2）。畫出 C 插肖 B 的

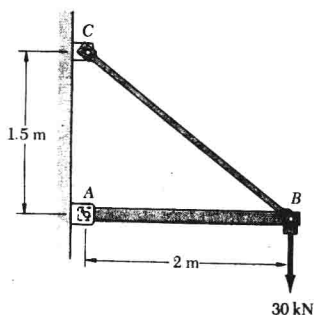


圖 1.1

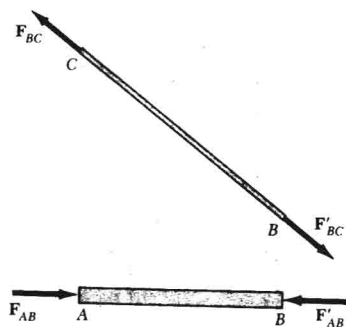


圖 1.2

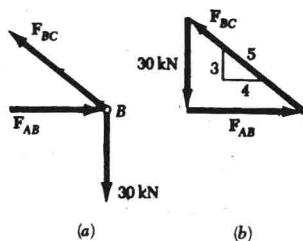


圖 1.3

自由體圖以及其相對應的力量三角形（圖 1.3），則可由相似三角形的關係得出

$$\frac{F_{AB}}{4\text{ m}} = \frac{F_{BC}}{5\text{ m}} = \frac{30\text{ kN}}{3\text{ m}}$$

則可求得

$$F_{AB} = 40\text{ kN} \quad F_{BC} = 50\text{ kN}$$

在桿子 BC 的某一任意點 D 截取一個截面，則得兩部份 BD 及 CD （圖 1.4）。由於 50 kN 的力量必須施加在前述二個部份的 D 點以維持著平衡狀態，因而得知若在 B 施加了一個 30 kN 的負荷，就會在桿子 BC 之中產生一個 50 kN 的內力，且可以進一步地看出桿子 BC 所承受的是張力。同理可得出構架 AB 中的力量是 40 kN ，且是壓力。

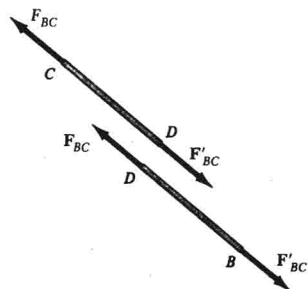


圖 1.4

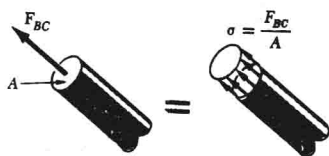


圖 1.5

雖然所得到的結果是分析此一結構的最先也是必須的步驟，但是並無法得知該已知的負荷是否可以安全地承受。例如桿子 BC 在此負荷之下是否會折斷，不但取決於所求出的內力 F_{BC} ，同時也決定於桿子的截面積以及製造桿子的材料。事實上，內力 F_{BC} 實際上代表著分佈在斷面的整個面積 A 的基本力量的合力（圖 1.5），而這些分佈力的強度恰等於該截面中的每單位面

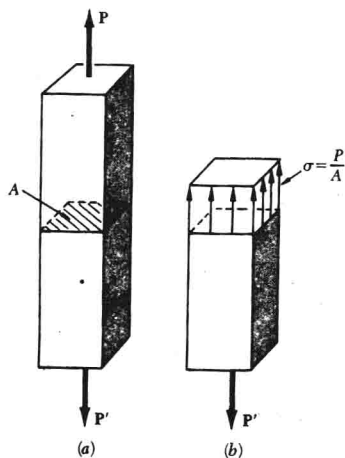


圖 1.6

積的力量 F_{BC}/A 。該桿子在已知負荷之下是否會斷，就很明顯地但看該材料承受住分佈內力的強度值 F_{BC}/A 的能力而定。因此須看力量 F_{BC} ，截面積 A ，以及桿子的材料。

單位面積的力量，或是分佈在一個已知截面的力量強度就稱為在該截面的應力(stress)，並且以希臘字母 σ (sigma) 表示之。在承受到軸向負荷 P 截面積 A 的元件，其應力為負荷的大小 P 除以面積 A 之後即可求得（圖 1.6）：

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

正號用以表示張應力（元件受到引張），而負號用以表示壓應力（元件受到壓縮）。

由於本討論使用 SI 公制單位， P 以牛頓 (N) 表示， A 為平方米 (m^2)，所以應力 σ 為 N/m^2 。此一單位稱為一巴斯卡 (Pascal Pa)。因為 Pa 是一相當小的量度單位，所以實際上多使用其乘數，例如千巴斯卡 (kilopascal Kpa)，百萬巴斯卡 (MPa)，以及十億巴斯卡 (GPa)。

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} = 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10^9 \text{ N/m}^2$$

美國通用單位通常將力量 P 表示為磅 (lb) 或千磅 (kip)，而截面積 A 則表示成平方吋 (in^2)。應力 (σ) 為每平方吋的磅 (psi) 或每平方吋的千磅 (ksi)*。

回頭過來，再看我們剛才所探討的題目一桿子 BC ，且假設它是由鋼料製成，直徑為 20 mm。可得

* 應用在力學上的主要 SI 公制及美國通用單位，都列在本書的封面內頁。由該表的右端得知 1 psi 大約等於 7 kpa，而 1 ksi 大約等於 7 Mpa。