

495084

岩石力學概論

Introduction to
Rock Mechanics

原著者：Richard E. Goodman

譯述者：劉 錫 蘭

複校者：趙 國 華



科技圖書股份有限公司

岩石力學概論

Introduction to
Rock Mechanics

原著者：Richard E. Goodman
譯述者：劉錫蘭
複校者：趙藏書章

科技圖書股份有限公司

由於土木工程之規模愈來愈大，與結構互相扶持之基礎工程亦愈形重要。因之僅憑土壤力學已不足應付日後大型土木工程之要求，而岩石力學之研究益形迫切。本書為美國加州大學教授 Goodman 之力作。將適合日後本國基本建設向前邁進不可缺少之基本書，特為譯介以供同好。

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：岩石力學概論
原著者：Richard E. Goodman
譯述者：劉錫蘭
發行人：趙國華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市復興南路一段360號7樓之三
電話：7056781・7073231
郵政劃撥帳號 15691

七十二年一月初版

特價新台幣150元

原 序

岩石力學，就其對地質與地球物理、開礦、石油開採，以及土木工程各方面的應用而言，確為一項需要瞭解的學問。其與能源的開發，與交通建設、水資源與國防設施、地震預測，以及許多其他方面非常重要的活動，均發生關係。本書所介紹的，大部份為土木工程可立即應用的有關這方面的知識。土木工程學生，或正在研究所就學，或行將畢業就職的人們，均可從本書中找到有關其工作或學識範疇內所需的觀念、技術、以及應用。例如：如何評核防止隧道中粘土岩擠壓所需的支承壓力；如何評估通過一個具有節理的巨積岩盤，作為岩石開挖的最適當的角度；以及如何決定一個具有岩石承受墩柱的承載量等。主修其他方面的學生，亦可發現對這方面的學識頗多助益，因為教育的目的是一致的，一本教科書的主要目的，就是為解決實際問題而提供經驗與技術。一本優良參考書所包含的內容，要能在其本身範圍內提供有關的基本知識。其中若缺少某一部份，相對的，可能在應用到實際工作的岩石力學的基本知識中，缺乏解釋的工具。

本書共分為三部份，第一部份包括前面的六章，對說明岩石性質的方法提供一個總綱。其中包括用於工程方面的分類指數性質，岩石強度與變形性質，節理的行為與特性，以及說明初始應力狀態的方法等。現代的破裂力學 (fracture mechanics) 已予略去，但其中將異方性與有關時間性部份，仍摘要介紹。第二部份包括第七、八、與九章，討論有關岩石力學在地面與地下開挖，以及基礎等方面的應用。第三部份為一系列附錄。附錄的一部份係各種公式的求證，各章中僅對各公式用法作重點式介紹，其證明部份多略去未敘，其中亦附有平面應力與空間應力的徹底討論，以及應變量度的說明，附錄 3 為岩石與材料鑑定大綱。假設讀者在地質學方面已略具基本知識，本節係從礦物學與岩石學中精選出來的專有名詞，提供岩石力學在各方面應用時，足敷實用的名詞概要。第三部份尚包括所有習題答案；其中包含一些精巧的解法。各章末後均附有習題，答案中的求解亦為本書重要部份。大多數習題不單是用來套上本書中所列的公式求其答數

而已，並試圖探討發掘新題材。本人總是樂意在實用的體系中去學習新的題材。因之，採用這種方式來介紹新觀念。

本書大部份雖屬雜誌與刊物上已發表的資料，但在本書中的各部份，仍能散見有關本題材中尚未發表的材料。幾乎所有此種情形，附錄中均作詳盡的求證。

本書係在伯克來市加州大學土木工程學系對尚未畢業與行將畢業學生所撰的，供一學季三個學分課程之用。因為時間緊湊，除了專心作習題外，很少有時間來求證公式。附錄 1 與 2 以及所有與時間發生關係的教材均予刪除。該校另外尚開一門課程，時間較充裕，可解釋公式的求證，本書的材料，係作為作者原先另一著作“不連續岩石中地質工程方法論”（西方出版公司出版）的補充材料，並作為指定的參考讀物。

本人深切感激皇家學院 John Bray 博士，對這方面所作的努力與貢獻的有關資料，均可隨意抽取應用。甚多私人，均慷慨出借圖片與示例，其中包括：K.C. Den Dooven, Ben Kelly, Wolfgang Wawersik 博士，Tor Brekke 教授，Dougall MacCreath 博士，Alfonso Alvarez 教授，Tom Doe 博士，Duncan Wyllie, H.R. Wenk 教授等，以及 A.J. Hendron Jr. 教授。許多同僚幫助本人選取材料。並校訂手稿。計有：E.T. Brown, Fred Kulhawy, Tor Brekke, Gregory Korbin, Bezalel Haimson, P.N. Sundaram, William Boyle, K. Jeyapalan, Bernard Amadei, J. David Rogers 與 Richard Nolting 等。本人尤其要感謝 Kulhawy 教授，從彼處得到不少有關岩石基礎方面的資料。同時，本人亦深為感謝 Cindy Steen 對本書原稿在打字方面所作的奉獻。

Richard E. Goodman 古 德 門 謹識

符 號 說 明

本書採用各種符號的意義，係按當時採用的意義而訂的。向量係用粗體字母表示，例如 **B**，粗體小字則保留來專用在表示單位向量。總和的符號未採用傳統形式。矩陣符號不論單向排列，或雙向排列，均採用 ()。在表示一個列向量時，偶爾亦採用 { } 符號。 $B(u)$ 符號表示 B 為 u 的函數。有時量因次，用一括弧來表示，其中 F = 力， L = 長度， T = 時間；例如，應力的單位係用 (FL^{-2}) 表示。在字母或符號上加上一個小點（例如： $\dot{\sigma}$ ）通常均表示對時間的微分。本書中常用的符號如下：

$\hat{D}_i$	與傾度 (dip) 平行的單位向量
Δd	一隧道或一鑽探孔直徑的改變。
dev	鑑定偏差應力分力的註腳字。
E	楊氏模數 (FL^{-2})
g	落體加速度
G	剪力模數；又表示比重
GPa	10 MPa
i	表示節理粗糙程度，具有代表性邊的角度
I_1, I_2, I_3	不變應力
$\hat{i}_i$	平行的單位向量與平面 i 與平面 j 交線

k	其用法視當時的情形而定，其中包括透水性 (LT^{-1}) 與動性係數
K	有各種不同的用法，計有：容積模數，Fisher 分佈參數，透水性 (L^2)， $\sigma_{\text{horiz}}/\sigma_{\text{vert}}$ ，與 σ_3/σ_1
l, m, n	直線的方向餘弦
$\ln$	自然對數
MPa	百萬巴斯葛 (MN/m^2)； $1 \text{ MPa} \approx 145 \text{ psi}$
n, s, t	與層面成垂直及平行（走向平面）的座標
n	孔隙率
N_i	與層面垂直或一組節理的單位向量
p, p_w	壓力，水壓力
p_1, p_2	次要主應力
P	力；第九章中亦用於表示線荷重 (FL^{-1})
q_f	承載量 (FL^{-2})
q_∞	無側限壓力強度
RMR	根據地球力學分類的巨積岩盤分級
S	已知一組節理的間距
S_i	根據 Mohr Coulomb 關係而得的剪力強度截值（“內聚力”）
S_j	節理的剪力強度截值
T_{MR}	彎曲拉力強度大小（破壞模數）
T_0	拉力強度大小；除另有註明者外，均為單軸拉力強度
u, v	與 x, y 平行的位移；座標軸的正方向為正
u_r, v_θ	與 r, θ 平行的位移
Δu	沿一節理的剪力位移；又表示徑向位移
Δv	通過一節理的正位移
V_l, V_t	棒中的縱向與橫向應力聲波速度
V_p, V_s	無限大介質中壓縮與剪力聲波速度
$\Delta V/V$	體積應變
w	按乾重計的含水量
w_L, w_f	液性限度與塑性限度
W	重量向量
x, y, z	右手法則的正座標

Z	距地面以下的深度
ν	單位體積的重量 (FL^{-3})
ν_w	水的單位重
ϵ, ν	正應變與剪力應變
η	粘滯度 ($FL^{-2}T$)
λ	Lame 常數；又用於表示波長
μ	摩擦係數 ($= \tan \phi$)；有時表示的意義與 η 相同
ν	卜桑比
ρ	質量密度 ($FL^{-3}T^2$)
σ	正應力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主應力； $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (壓力為正)
$\sigma_{\pm, B}$	巴西式 (Brazilian) 強度 (劈裂拉力) 的大小
σ_r, σ_θ	徑向與切線方向的正應力
σ'	有效應力
τ	剪應力
τ_p, τ_r	高峯與殘餘剪強度
ϕ	摩擦角；用於內摩擦角與表面摩擦角，視當時情形而定
ϕ_μ	光面滑動的摩擦角 ($i = 0$)
ϕ_j	節理的摩擦角
ϕ	σ_1 方向與節理面間的夾角
$\bar{w}$	圓鈹試驗的平均位移

目 錄

原序

符號說明

第一章 概論

- 1.1 岩石力學應用範圍 2
- 1.2 岩石性質 12

第二章 岩石分類與指數性質

- 2.1 岩石的地質分類 18
- 2.2 岩石的指數性質 23
- 2.3 孔隙率 24
- 2.4 密度 29
- 2.5 透水性 32
- 2.6 強度 35
- 2.7 消化與耐久性 36
- 2.8 表示裂紋程度指數值用的音速 38
- 2.9 其他物理性質 41
- 2.10 爲工程目的所作的巨積岩盤分類 41
- 習題 48

第三章 岩石強度與破壞準則

- 3.1 岩石破壞的模式 50
- 3.2 一般試驗室強度試驗 53
- 3.3 受壓時的應力 - 應變行爲 61
- 3.4 岩石強度的意義 71
- 3.5 完整的應力 - 應變曲線的應用 74

3.6	Mohr-Coulomb 破壞準則	75
3.7	水的影響	79
3.8	主應力比對破壞的影響	82
3.9	破壞的經驗準則	82
3.10	尺寸大小對強度的影響	85
3.11	異方性岩石	88
	習題	93

第四章 岩石中的初始應力與其量度

4.1	初始應力的影響	96
4.2	初始應力的估算	99
4.3	工地應力量度的技術	109
	習題	132

第五章 岩石中的軟弱平面

5.1	引言	135
5.2	節理方位	144
5.3	節理試驗	150
5.4	節理糙度	158
5.5	位移與強度間的相互關係	163
5.6	水壓力的影響	165
	習題	168

第六章 岩石的變形

6.1	引言	170
6.2	彈性常數	172
6.3	量度變形性質的靜態試驗	175
6.4	動態量度	184
6.5	具裂縫的岩石	186
6.6	時間對岩石變形的影響	193
	習題	209

第七章 岩石力學對地下開挖工程的應用

7.1	引言	211
7.2	能勝任的岩石中挖坑穴	215
7.3	水平層的岩石	223
7.4	具傾斜層的岩石	227
7.5	圍繞隧道的塑性行爲	232
7.6	大地力學分類的應用	239
7.7	與時間有關的隧道行爲	240
	習題	248

第八章 岩石力學對岩石邊坡工程的應用

8.1	引言	254
8.2	硬岩的邊坡破壞方式	255
8.3	邊坡的運動分析	261
8.4	平面滑動分析	271
8.5	應用立體圖投影分析平面滑動	273
8.6	用立體圖投影分析楔塊滑動	280
8.7	由石塊組合而成的滑動分析	281
	習題	284

第九章 岩石力學對基礎工程的應用

9.1	岩石基礎	288
9.2	規範規定的容許承載力：行爲模式	295
9.3	基腳下方岩石的應力與撓度	299
9.4	置在岩石基腳的容許承載力	308
9.5	岩石中的深基礎	317
9.6	岩石的沉落與膨脹	325
	習題	332

附錄一 應力

1.1	一點的應力狀態 - 兩維空間	335
-----	----------------------	-----

1.2	作用在通過O點一平面上的正應力與剪應力 - 兩維空間	336
1.3	Mohr 圓的應用	338
1.4	主應力	338
1.5	三維空間中一點的應力狀態	340
1.6	通過O點某一平面上的正應力與剪應力 - 三維空間	342
1.7	一已知平面的方向餘弦	346
1.8	主應力	348
1.9	轉移到另一新座標系統	349
1.10	八面體應力	350
	習題	353

附錄二 應變與薔薇形應變計

2.1	概說	355
2.2	薔薇型應變計的應用	357
2.3	主應變	358
2.4	軸差應變與無軸差應變	358
	習題	359

附錄三 岩石與礦物的鑑定

3.1	對工程方面應瞭解的岩石與礦物	360
3.2	造岩礦物	360
3.3	其他重要礦物	363
3.4	一般岩石鑑定	364

附錄四 公式的演導

附錄五 立體圖投影的應用

5.1	簡介	417
5.2	線投影	421
5.3	兩線的交角	425
5.4	已知走向與傾度的平面的投影	425
5.5	與一已知線等距離的軌跡	433

5.6 向量	433
--------------	-----

習題	434
----------	-----

附錄六 習題解答

1

Introduction

第一章 概 論

岩石力學 (rock mechanics) 的發展係工程界近年來的盛事。1960年已被認為岩石力學是工程教育中的一項專門課程。現在，岩石力學中某些學識更成為土木工程方面的重要一環。此乃由於新的工程，不斷向岩石方面發展而導致的結果，其中包括：頗為複雜的地下設施；開挖頗深的洩洪道；以及無數礦區的開採。岩石力學係討論有關岩石的特性，以及在工程方面涉及岩石部份所需的設計方法。岩石與土壤一樣，與其他工程材料完全不同。有關岩石方面的工程設計，乃屬一項專門學問。例如：關於鋼筋混凝土結構設計，首先計算其承受的外部荷重，根據所需強度決定採用的材料（實施管制以確保所需強度），並據此推求結構的大小尺寸與形狀。另一方面，在岩石結構中，其承受的荷重，常較由初始應力發生再分配而導得的力為小。於是，有如地下開挖的情形，岩石結構具有許多可能的破壞情況，需要觀測與判斷，以求材料的強度。最後，結構的大小尺寸與形狀，至少有一部份是受到地質結構的限制，不能完全自由的由設計者自行擬訂。因此，岩石力學中所包含的某些部份，不能認為是應用力學的一旁枝——諸如，不能應用對材料性質加以管制，僅能就地質條件對工程位置加以選定，並採用初始應力的量度，以及採用繪圖與模式研究方式，對頗為複雜的破壞情形，予以分析。因之，岩石力學的主題遂與地質學及地質工程學具有密切關係。

1.1 岩石力學應用範圍

遠溯史前人類早與岩石發生密切關係。箭矢的頭、一般工具、盛裝物品的器皿、防禦工事、房屋、甚至坑穴，或用岩石築成；或建在岩石中。例如埃及的金字塔及 Abu Simbel 神廟，在在證明在工程施工與雕刻方面。遠古人類對岩石的挑選、開採、切割等，均具頗為精細的技巧。至十八與十九世紀，爲了礦坑的通風與排水、導引水源、開闢運河、敷設鐵道，曾經興建了甚多頗爲浩大的隧道工程。

本世紀中，Rushmore 山的大雕刻（圖 1-1）對全世界顯露出人類對花崗石採擇的能力，以及對一龐大圖形加以分解的技巧，在此同時，工程

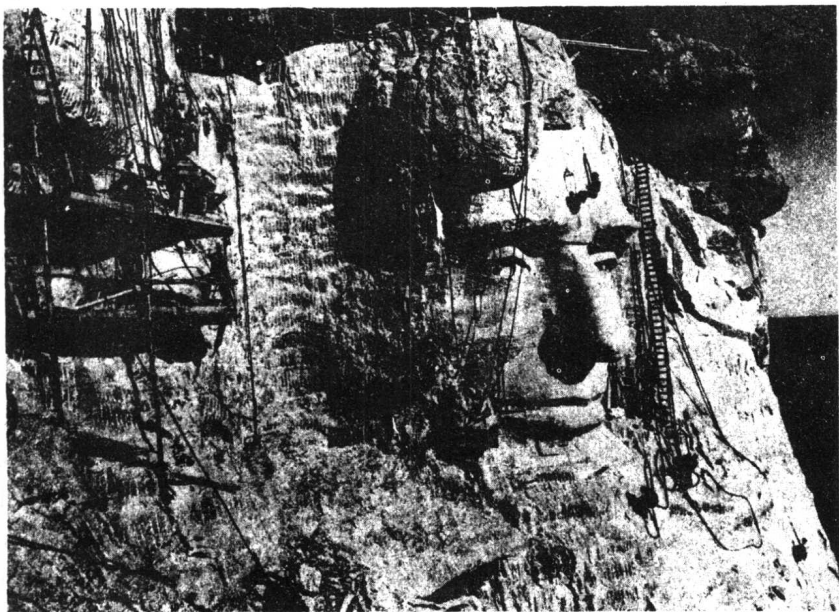


圖 1-1 Rushmore 山的羅斯福與林肯大雕像。經 Gutzon Borglum 選定該山，並按山勢將雕像予以調整，即使小至一吋大小的細微處均細加校核推敲。採用炸藥在嚴格管制下，將表面風化層先予除去，開鑿孔洞逐步減小並予加密，使用炸藥亦逐漸減少，以先得雕像的雛形，最後一吋仍用非常細膩的鑽孔與開鑿，終底於成。

界又在岩石以外，不斷的發掘其他新的工程材料。在這些年代中，一方面材料工程師能導得各種合金與塑膠材料，具有各種特性，以適應各種特殊需要，另一方面岩石在工業中，與在工程師的心目中，仍佔有相當地位；由於岩石所具的特質，故在結構工程、道路工程、防禦工事、以及能源供應諸方面均有突出的表現。

表 1-1 所示，為工程方面包含某種程度岩石力學的某些情形。表中挑出九種關於工程方面的規畫，設計以及工程施工涉及岩石力學的情形。其中顯然相互發生關係，如：評估因地質發生危害的程度，岩石材料的採擇與準備，評核岩石可予切割與鑽孔情形，並設計切割及鑽孔的工具，結構類型的採擇與放樣，岩石變形的分析，岩石穩定的分析，爆破程序的管制與監督，支撐系統設計，以及水力裂縫。這些作業依據工程性質的類型的不同，以各種不同方式出現。

除非結構物頗為龐大，或岩石的性質殊不尋常，在正常情形下，置在地面上的工程結構，可不必研究岩石特性。當然，工程師仍需注意到地質的危害情形，其中如：可能影響工地活動的斷層與坍方。工程地質專家負有責任發現這些危害情形。用岩石力學知識，有時能減輕這些危害。例如：Rio de Janeiro 懸岩腳，鬆脫的花崗岩薄層可能對附近建築物發生危害。依工程師岩石力學可設計一錨碇設施加以維護，或採用管制的爆破方法，予以修整。對私人住宅的輕型結構情形，在岩石力學方面可能僅涉及對頁岩具有潛在的膨脹情形加以試驗。不過，對一個非常龐大的建築物、橋樑，工廠等情形，可能需要對所承載的荷重作岩石的彈性，以及隨後發生下陷等試驗。在 karastic 型石灰岩（含洞穴的石灰岩），或地層下方已被開挖的煤層時，則應酌情予以調查，可能需要對基礎作特殊設計，以確保結構的穩定。

對高樓建築物方面涉及岩石力學者，計有如何管制爆破，使其發生的振盪不致損害鄰近結構物，同時，對當地居民不會發生驚擾（圖 1-2）。在城市中，新建築物的基礎可能與舊建築非常靠近，在暫時的開挖，可能需要一種往回拉的設施，以防止坍塌，或岩塊的鬆脫。

在岩石力學方面最富挑戰性的地面結構為大型水壩，尤其是加在岩石基礎上或岩墩上受到高應力的拱型與扶壁型高壩，同時尚受到水的作用與其發生的力。除基礎應注意活動的斷層情形外，對坍方可能損害到貯水的質量，亦應予以評估。令人記憶猶新的是，意大利的 Vajont 壩的巨變，當

表 1.1 岩石力學應用的範圍
包含岩石力學實際應用的作業

計 畫	地 質 危 害 的 評 估	材 料 的 採 擇	可切割與鑽孔 情 形 的 評 估	工 作 類 型 的 採 擇 與 放 樣
地面結構 房屋建築區域	(2)坍方、斷層			
橋梁、高建築物、發電廠房	(2)坍方、斷層	(2)牆面用石塊， 混凝土用粒料	(1)墩基礎鑽取坑 洞	(2)工地中的穩定位 置
水壩	(1)對貯水池之坍 方；斷層	(1)填石，亂砌塊 石，混凝土用 粒料		(1)拱、重力或築堤 類型的採擇
運輸路線 公路，鐵路	(1)坍方	(2)路堤填方，底 層，粒料，亂 砌，塊石		(1)路塹的方向與邊 坡
運河，管道	(1)坍方	(2)填方，底層， 粒料，亂砌塊 石		(1)挖方的方向與邊 坡
水閘門	(1)坍方			(1)用於有襯砌或無 襯砌隧道的地面 水門
地面開挖及其他 採石場與礦坑	(2)坍方		(1)沉積的 燧鐵岩以及其 他岩石	(1)坡度，運輸帶， 房屋
洩洪道	(1)坍方			(1)旁邊小山與隧道 對照情形；坡度

(1)非常適用

(2)有時適用