

86.8361054
TZY

153910

高等学校教材

高坝岩石的试验研究

陶振宇 陆士强 编



中国工业出版社

高等学校教材

高坝岩石的试验研究

陶振宇 陆士强 编

中国工业出版社

本书共分七章。第一章緒論；随后五章对室内岩块試驗，現場岩体試驗及其成果整理，室內模型試驗和原型观测成果作了比較系統的論述；最后一章介紹了高坝岩基研究的一些实际例子。

本书是按照水利电力部高等学校水利电力类专业教材編审委员会地基、地质及測量教材編审小組的計劃而編写出版的。本书不仅可作为高等学校教学参考书；也可供有关工程技术人员工作之参考。

高坝岩基的試驗研究

陶振宇 陆士强 編

水利电力部办公厅图书編輯部編輯（北京阜外月坛南街）

中国工业出版社出版（北京修羅園路10号）

北京市书刊出版业营业许可出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $5^{3/16}$ ·插頁3·字数118,000

1965年12月北京第一版·1965年12月北京第一次印刷

印数0001—2,310·定价(科五)0.80元

統一书号：K15165·4229(水电-578)

前 言

我們知道，在本世紀五十年代初期以來獲得迅速發展的岩石力學，與水工建設的關係極為密切，這在最近幾屆國際大壩會議上已明顯地反映出來。由於這方面內容豐富而我們的篇幅有限，又因為本書只限於論述岩基試驗研究方面，所以關於岩石力學及其在水工建設中的應用，當然不可能得到詳盡的論述。對這方面的論述，讀者可參閱有關專著。

根據我國水工建設實踐的經驗，對岩石力學進行新的總結和探索，這不僅是必要的，而且也是可能的。因為我國建國十五年來特別是1958年以來，在岩石力學方面做了不少的工作。

考慮到目前國內外雖然已經積累了岩石試驗方面的比較豐富的經驗，但是，還有許多問題需要進一步探索和闡明。因此還缺乏統一的操作規程來進行試驗工作，這是一個缺陷，但這也與岩石試驗技術的發展情況有關。

鑑於上述，在本書中我們沒有對具體試驗方法步驟和操作技術一一詳細地加以說明，僅對岩石試驗的某些主要問題尽可能地作了比較系統的論述。

在本書的編寫工作中，鑑於當前發展的趨勢是以現場試驗為主，所以這方面寫的詳細些；因為本書是介紹性的綜述，因此寫的全面些，與高壩岩基的試驗研究有關的方面，都詳略不同地提及了；又考慮到大學生對岩基試驗研究的實踐經驗較缺乏，所以特別着重地介紹了一些實例。最後還應當指出，本書只是入門性質的，為了能夠掌握岩石試驗技術，當然還需要參考某些專著，尤其重要的是必需親自參加岩石試驗的實踐。

本書的部分內容，在1964年春曾對我們教研室的進修教師講述過。

在編寫過程中，我們雖然力圖貫徹少而精的教學原則，力圖

IV

符合水利电力部对编写教学参考书的各项基本要求,但限于水平,遗漏和錯誤之处,希望讀者大力指正。特别是我們自己对岩石力学及岩石試驗技术还处在进一步摸索和学习阶段,因此在本书中或多或少地叙述了一些自己的意見,很不成熟,尤其希望讀者提出宝贵意見。有关本书的任何意見,我們都是欢迎的,并請按下列地址投寄:武昌珞珈山武汉水利电力学院土力学教研室轉交。

在编写过程中,得到我院领导的亲切关怀,教研室全体同志的大力支持;长江水利水电科学研究院岩基研究室杜时敏主任在百忙之中,拨冗审查原稿,提出了許多宝贵的意見,又承供給图片(照片3-1, 3-3, 3-5, 3-6),我們在这里向他們表示衷心的感謝。

陶振宇

陆士強

十五周年国庆节,武昌

目 录

前 言	
第一章 緒論	1
§ 1-1 岩石与岩石力学	1
§ 1-2 現代坝工建設中提出的課題	2
§ 1-3 岩石試驗研究工作的基本步驟	5
第二章 岩块試驗	7
§ 2-1 岩石的靜力特性試驗	7
§ 2-2 岩石的动力特性試驗	27
第三章 岩体試驗	31
§ 3-1 概述	31
§ 3-2 岩体的变形特性試驗	34
§ 3-3 岩体的抗剪强度試驗	55
§ 3-4 岩体中的应力測量	68
第四章 試驗資料的統計整理	81
§ 4-1 概述	81
§ 4-2 偏差系数	82
§ 4-3 关于平行試驗結果的比較	88
§ 4-4 因子分析	94
§ 4-5 相关分析	96
第五章 模型試驗	100
§ 5-1 相似材料模型試驗	100
§ 5-2 光彈性試驗	107
第六章 岩基的观测	118
§ 6-1 岩基观测工作概要	118
§ 6-2 岩基观测成果綜述	120
§ 6-3 岩基观测实例	126
第七章 高坝岩基研究实例	131
§ 7-1 高坝岩基研究实例	131
§ 7-2 簡單的結論	151
附录 岩石的物理性质指标	155

第一章 緒 論

§ 1-1 岩石与岩石力学

岩石是由一种或几种矿物组成的自然历史的产物，它是构成地壳的基本材料之一。就岩石的成因来说，岩石可以分为三大类，即岩浆岩，沉积岩和变质岩。不同成因类型的岩石，其物理-力学性质是不同的。

具有结晶构造是几乎所有的岩浆岩的一个重要特点，这些结晶构造多半可以用肉眼便能辨认出来，例如花岗岩，闪长岩以及其他深成岩的结晶构造便是这样的。但是沉积岩具有结晶构造是不常见的，只在部分的碳酸盐类岩石和某些化学沉积物中，例如岩盐、石膏中可以看到。

岩浆岩的另一特点是沒有层理，通常呈块状。恰正相反，沉积岩的主要特征是它在形成过程中产生的层理。并且天然岩体还有片理这样的构造特征（注意，不要把岩石的层理和片理相混淆），片理能使岩石沿平行平面分裂为薄片，它是变质岩的主要特征之一。

在岩浆冷却时，随着其中成分及挥发组份含量不同，由于冷却造成的体积收缩，形成了有规则排列的节理裂隙，例如玄武岩通常形成彼此排列成约 60° 角的裂隙，这种裂隙沿一个方向延伸，通常垂直于冷却面。

上述结晶，层理，片理，裂隙，裂纹以及孔隙，空洞等情况，对岩石的物理-力学性质具有重要的影响。

当然，这些因素不仅与岩石的生成条件有关，而且也与岩石的存在历史的整个过程中的条件有关。在这里不详细讨论了。

岩石在工程建设中的用途有三，一是作为建筑物的地基，我们称之为岩基，以别于土质地基（粘土，砂等）；二是作为隧洞

及地下建築物的圍岩；三是作為建築材料，堆石壩便是一例。

在水工建設中，對岩石力學試驗和研究，應該明確以天然岩體作為研究對象，是没有什么疑義的。但是在岩石力學發展的現階段中，恐怕還不能完全撇開室內岩塊試驗。在本世紀初卡曼（Von Karman）所完成的大理岩的著名的室內試驗結果，不是使得“脆性岩石”這個傳統的觀念的使用變成有條件性的了嗎！

在本世紀五十年代初獲得迅速發展的一門新的技術科學——岩石力學，它是固體力學的一個分支。岩石力學是研究岩石在荷重作用下的變形和破壞規律，在這個基礎上通過數力學的分析 and 計算，以及科學實驗（室內的及現場的試驗研究和原型觀測）的途徑，來解決因興建各種工程建築物而在岩體內部和岩體表面上所引起的物理-力學現象的課題（如岩基穩定問題、岩坡穩定問題、地下工程穩定問題以及岩體的加固問題等）的科學。

由此可知，發展岩石力學的基本途徑有三：即理論分析方法，試驗方法及原型觀測方法，後兩者也可總稱為科學實驗途徑。它們是以科學實驗為主體而互相聯繫着。

在以後的敘述中，我們對“岩塊”、“岩體”和“岩石”這三個術語作如下的規定：“岩塊”是指從地殼岩層中切取的岩石小塊，例如由鑽探獲得的岩心，或者用爆破或其他方法獲得的岩石碎塊或石料等；“岩體”是天然埋藏條件下的整體性岩石；而“岩石”則是用來概括“岩塊”與“岩體”的總稱。

§ 1-2 現代壩工建設中提出的課題

現代壩工的發展趨勢，有幾個重要的特點：壩高增加了，數量增多了，逐漸向輕型結構發展。同時地下工程日益增多。由於這種發展趨勢，促使岩體地基的研究提到日程上來，並且日見重視。這在第六次國際大壩會議上（1958年）已見端倪。第七次及第八次國際大壩會議（1961年及1964年）的第25及第28個問題，都涉及岩石力學；1962年國際岩石力學協會的建立，更是這種趨

勢的明証。

对于現代坝工的上述发展趋势，可以用某些統計数字來說明。

根据搜集的截至 1960 年的某些大坝資料⁽¹⁾，我們列举在表 1-1 內，該表統計了已經建成及正在建設的高于 50 米的土坝、堆石坝、混凝土重力坝、大头坝、拱坝、重力拱坝和連拱坝的数目。当然这个資料是很不完全的。但是，却可以看出一个趋势，即高坝的数目大为增加。本世紀五十年代建設的高坝，几乎等于現有高坝总和之半。

表 1-1 世界上坝高大于或等于 50 米的大坝統計表

(截至 1960 年止)

建成期間	1899年 以 前	1900~ 1909年	1910~ 1919年	1920~ 1929年	1930~ 1939年	1940~ 1949年	1950~ 1959年	正 在 施工的	合 計
数 目	6	13	43	102	122	114	343	69	812

在表 1-2 中，統計了坝高大于或等于 30 米的拱坝和重力拱坝的数目⁽²⁾，同样可以看出，在本世紀五十年代所建設的也几乎占了总数的一半，而且坝高也增加了。

还要指出，已建設的大坝中，絕大多数是混凝土坝。并且几乎全部建造在坚硬岩石及半坚硬岩石上，表 1-3 列举了这方面的資料⁽³⁾。

应该指出，虽然建設了大量的岩基上的高坝，积累了不少經驗，但是岩基的研究还远不能完全回答生产中提出的問題。这与岩石力学还处在发展初期阶段这一事实有关。

在高坝建設的过程中，发生了許多事故，考其原因，不少是与岩基研究不足有关。曾經統計过⁽⁴⁾，美国在 1959 年以前建成的有 1764 座坝，其中有 33 座坝于 1918~1958 年期间失事，其中 5 座被列为严重事故，共死亡 1680 人。事后查明失事的坝中的三分之二是由于地质和技术上的原因。

表 1-2 世界上拱坝及重力拱坝($H \geq 30$ 米)的统计表
(截至1960年为止)

坝 高 (米)	建 设 时 期					合 计
	1920年以前	1921~ 1930年	1931~ 1940年	1941~ 1950年	1950年以后	
30~40	15	25	10	8	13	71
40~60	7	20	9	18	26	80
60~80	2	13	6	10	26	57
80~100	2	2	5	3	22	34
100~150	—	2	3	6	32	43
150~200	—	—	—	1	11	12
200~250	—	—	—	—	2	2
>250	—	—	—	—	1	1
合 计	26	62	33	46	133	300
%	8.7	20.7	11.0	15.3	44.3	100%

表 1-3 世界上大坝($H \geq 60$ 米)的岩石地基情况
(截至1960年止)

岩 基 情 况	坝 型										合 计	其中混 凝土坝 的数量
	重力坝		拱 坝 及 重力拱坝		连拱坝及 大头 坝		堆石坝		土 坝			
	数量	%	数量	%	数量	%	数量	%	数量	%		
I、岩浆岩 (35%)	133	51	58	22	18	7	28	11	24	9	261	209 (80%)
II、变质岩 (24%)	100	58	46	27	6	4	7	4	13	7	172	152 (88%)
III、沉积岩类的 坚硬及半坚 硬岩石 (38%)	138	50	67	24	16	6	20	7	37	13	278	221 (80%)
IV、沉积岩类的 松散岩石 (3%)	2	7	—	—	—	—	8	30	17	63	27	2 (7%)
合 计 (100%)	373	50	171	24	40	6	63	8	91	12	738	584 (80%)

法国的馬尔巴赛特 (Malpasset) 坝在 1959 年失事, 許多专家认为这是与岩石地基的問題有关⁽⁵⁾。意大利的瓦依昂 (Vaiiont) 拱坝由于水庫岸坡发生山崩而造成巨灾, 使得3000多人死亡, 也是与岩石力学問題有关⁽⁶⁾。

从以上簡短的叙述中, 可以看出, 岩石力学的发展与水利建設的发展是密切相关的。

現代水利建設給岩石力学提出的課題, 可大致归納如下:

1. 荷載作用下岩石的变形規律及其机理的研究;
2. 岩石的强度理論及其机理的研究;
3. 关于岩基及岩坡稳定性的研究;
4. 岩体中应力分布及岩体与水利建筑物的相互作用的研究;
5. 岩石的动力特性及岩体爆破理論;
6. 岩石試驗技术的研究;
7. 关于岩基及隧洞围岩的原型观测技术的研究;
8. 关于岩基、岩坡及围岩的加固处理的研究。

全面論述上述基本課題, 不是本书的任务。在这里, 我們只是从岩石的試驗及观测研究这个角度来探討某些課題。

§ 1-3 岩石試驗研究工作的基本步驟

我們对于岩石的特性的了解和掌握, 需要經過一个过程后, 才能达到对岩石有一个規律性的認識。因此, 在进行岩石試驗研究工作时, 应该, 而且可能有准备、有計劃、有步驟地进行, 并使之与水利建設的程序相适应。这就是說, 岩石試驗研究工作應該分阶段地来安排。

大体說来, 岩石試驗研究工作可以分为四个阶段来做。

第一阶段可以与坝址的选择阶段相适应, 主要是配合工程地质勘察, 确定岩石的有关特性指标, 例如容重、单軸抗压强度指标等。

岩石研究的第二阶段是与水利樞紐的初步設計相适应。就岩石試驗研究工作本身來說, 則是預备性試驗阶段, 其任务有二:

一是为水工建筑物的初步設計提供試驗数据；二是为进一步闡明岩石特性作一些探索性工作。这种探索性工作之所以必要，特殊地說，是由于目前岩石試驗研究的技术方面还很不完善，需要积累实际經驗来逐步改进；普遍地說，每一次岩石試驗研究工作，都必需从实际出发，都具有一定的探索性的因素。

这一阶段不仅有室內試驗，而且有現場試驗，是以了解岩石性能的量的方面作为基本任务的。这一阶段工作完成之后，除了得到一批試驗数据供初步設計之用外，更重要的是根据具体情况拟出岩石試驗研究的工作規程或詳尽的試驗大綱。这个規程或大綱实际上是这一阶段工作的基本总结。

第三阶段是与水工建筑物的技术設計阶段相适应。这是一个关键性的基本試驗的阶段，是在前两个阶段工作的基础上进行的。这一阶段的工作成果是为水工建筑物設計提供“最終的”原始資料，所謂“最終的”，是指在技术設計中实际采用的数据。这一阶段試驗工作有一个重要的特点，就是岩石研究工作必須結合岩基处理方案，提供处理方案的可能效果的試驗資料。

最后一个阶段是进行現場观测工作。一方面是檢驗岩石試驗研究工作成果的正确性；另一方面也是为了保证建筑物的更加安全，一旦发现某种意外情况，使其还来得及补救。当然，观测工作还有更重要的意义，就是通过現場观测将可能发现某些新的物理現象，为岩石力学的理論和实践提出新的課題和解决途径。

是否所有水工建設中的岩石試驗研究工作都要按上述步骤进行呢？这需要根据水工建筑物的等級、地质条件等情况来决定。重要的是，通过大量的資料和工作經驗的积累，能够又多又快又好又省地来完成必要的岩石試驗研究任务。

参 考 資 料

- [1] М. П. Семенов, О. В. Ильина, П. П. Костин, Справочно-библиографический каталог по геологии оснований высоких плотин, 1959.
- [2] Справочные данные по зарубежным арочным и аро-

чно-гравитационным плотинам. Арочные плотины труды научно-технического совещания по арочным плотинам, Госэнергоиздат, 1961.

- [3] М.П.Семенов и др, Геология оснований высоких плотин. Гостройиздат, 1962.
- [4] Е.格伦納, 大坝失事概况, 水利工程快报 № 23, 1963.
- [5] С. 叶格尔, 馬尔巴赛特薄拱坝失事的原因, 水利工程快报, № 17, 1963.
- [6] G.A.Kiersch, Vaiont Reservoir disaster Civil Engineering, Vol. 34, № 3, 1964.

第二章 岩 块 試 驗

§ 2-1 岩石的靜力特性試驗

1. 岩石单軸抗压强度試驗

岩石单軸抗压强度試驗, 是在压力机上进行的。試件多为直径与高度相等的圆柱体或立方体, 尺寸为 $\phi 5 \times 5$ 厘米或 $5 \times 5 \times 5$ 厘米 (也有用 $7 \times 7 \times 7$ 厘米的)。看来这些尺寸是了些^①。因为試件绝对尺寸的增大, 其抗压强度有所降低。因此, 有人建議, 小于20厘米的立方試件得出的单軸抗压强度, 要乘以某一修正系数 (表2-1) ⁽¹⁾, 这就是說, 与混凝土一样, 采用一个20厘米的立方試件的标准强度。

試驗表明⁽²⁻³⁾, 压板与試件之間的摩擦, 对試驗結果很有影响。图2-1所示的两支曲线: 实线表示有摩擦的情况, 虚线是沒有摩擦的情况 (压板与試件接触面上涂有潤滑油)。前者的抗压强度随 h/d 的增加而降低, 后者則相反。其所以如此, 是由于

● К.В.魯賓涅依特(Руппнейт)根据Ф.С.雅新斯基(Ясянский)的公式探討过試件尺寸問題, 他在1954、1956及1960年写的著作中重复地叙述过。有关这方面的資料我們曾經作过介紹(請參閱“土力学地基与基础”, 武汉水利电力学院土力学教研組編, 中国工业出版社, 1961)。

接触面的摩擦的影响,这可以由图2-2看出。由于摩擦的存在,試件的破坏取决于剪应力;沒有摩擦时,試件的破坏方式不同,是沿力的作用方向的平面而断裂。

表 2-1 岩石单軸抗压强度的修正系数

立方試件边长(厘米)	修正系数
10	0.85
15	0.90
20	1.00

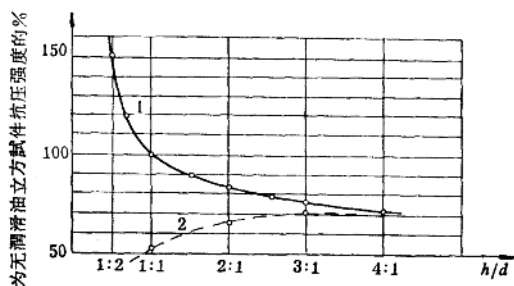


图 2-1 岩盐試件的抗压强度与 h/d 的关系
1—沒有潤滑油; 2—有潤滑油

岩石抗压强度試驗是按下式整理資料的;

$$\sigma_c = \frac{P}{F} \quad (2-1)$$

式中 σ_c ——单軸抗压强度, 公斤/厘米²;

P ——試件破坏时的总荷载, 公斤;

F ——試件的横截面积, 厘米²。

这意味着, 在試驗时应力的分布应该是均匀的。经过試驗和理論的研究表明, 应力的分布很不均匀, 而且具有复杂的应力

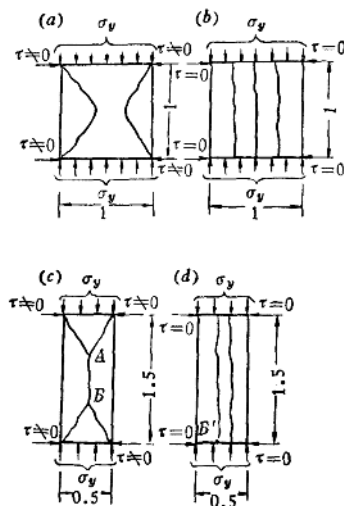


图 2-2 受压试件的破坏

(a)(c)试件与压板之间具有摩擦力；(b)(d)试件与压板之间没有摩擦力

場。这就是說，整理資料的理論前提与实际情况是不相吻合的。

很多岩石的单軸抗压强度因其受力方向不同而有差異。具有层理的沉积岩特別明显（表2-2）。

在单軸抗压强度試驗时，加荷速率也有影响。因为大的加荷速率具有动力特性。在室內試驗中，一般按每秒钟施加5~10公斤/厘米²或12~15公斤/厘米²的荷載速度进行。加荷速度增大，其抗压强度增加（表2-3）。

試驗还确定：岩石的湿度也对其抗压强度有影响。这可用岩石飽水状态的单軸抗压强度与干燥状态的单軸抗压强度的比值（叫做軟化系数）来表示。軟化系数总是小于或等于1（表2-4）。

資料表明：随着岩石容重的变大，其抗压强度也增大（表2-5），这說明孔隙和裂隙的影响。

表 2-2 岩石层理对单轴抗压强度的影响

岩石名称	孔隙度 (%)	σ_1 (公斤/厘米 ²)		σ_{11} (公斤/厘米 ²)	
		变化范围	平均	变化范围	平均
粘土质頁岩①	0.4~4.47	264~414	341	142~327	236
粘土质頁岩②	—	552~633	608	341~585	457
微晶质石灰岩	0.8~5.2	1300~2025	1800	1140~1710	1510

① 粘土胶結，間有次生石英；

② 碳酸盐类胶結。

表 2-3 花 崗 岩 試 驗 结 果
(加荷速率与抗压强度的关系)

試件编号	加 荷 速 率 (公斤/厘米 ² ·秒)	σ_c (公斤/厘米 ²)	加 荷 速 率 (公斤/厘米 ² ·秒)	σ_c (公斤/厘米 ²)
1	19	1544	40	1745
2	19	1588	40	1804
3	19	2188	53	2450

表 2-4 某些岩石的软化系数

编 号	岩 石 名 称	σ_c (公斤/厘米 ²)		软 化 系 数
		干 燥 状 态	饱 水 状 态	
1	細粒砂质砂岩	1186	763	0.66
2	中粒石英砂岩	620	437	0.70
3	粘土质砂岩	540	360	0.70
4	坚硬石灰岩	1170	580	0.50
5	泥灰岩	460	210	0.46
6	花崗斑岩	2560	2300	0.89
7	粗粒花崗岩:			
	新鮮的	2390	2080	0.87
	风化的	1880	1570	0.84
8	細粒花崗岩:			
	新鮮的	2650	2410	0.90
	风化的	1930	1800	0.85

表 2-5 岩石单轴抗压强度与其容重变化的关系

石 灰 岩				砂 岩			
容 重		抗 压 强 度		容 重		抗 压 强 度	
吨/米 ³	%	公斤/厘米 ²	%	吨/米 ³	%	公斤/厘米 ²	%
2.10	100	200	100	1.87	100	150	100
2.25	107	300	150	1.95	104	200	133
2.35	112	400	200	2.05	109	300	200
2.45	116	600	300	2.10	112	400	266
2.60	124	1000	500	2.20	118	600	400
2.67	127	1400	700	2.30	123	700	467
2.70	128	1800	900	2.57	137	900	600

岩石試驗結果的穩定性，可以用偏差系数来表示（參看 § 4-2）。曾經確定，偏差系数随抗压試件的横截面积 F 的增大而变小；并且，圆柱形試件在 $h/d=1$ 时，其偏差系数值最小（图 2-3 及 2-4）。

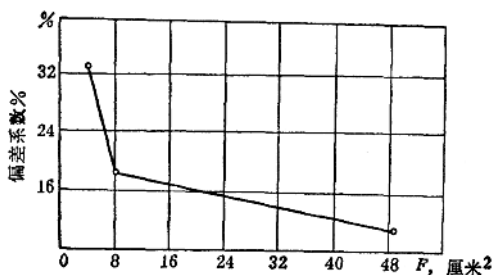


图 2-3 抗压强度的偏差系数与試件面积的关系

2. 岩石的抗拉强度試驗

与岩石单轴抗压强度的研究相比較，抗拉强度的研究工作要少的多。推其原因可能有二，一是用石料做的建筑結構物的計算中，总是假定在石料中不允許产生拉应力，因而研究的迫切性不