

土坝设计

上 册

顾淦臣 陈明致著



土 坝 设 计

上 册

顾淦臣 陈明致著

中国工业出版社

本書系統地介紹了土壩設計的理論與方法。書中收集了近年來國內外
在土壩設計的理論與實踐方面的一些新資料。

在本書中，對於一些重要的公式都作了詳細的推導，以方便設計者在
遇到特殊情況時能推導更合適的公式。對於土壩建設的實踐經驗，也作了
較多的介紹，因為土壩設計在一定程度上要依靠過去的經驗。

本書分上下兩冊，上冊着重介紹土壩址址的地質條件，壩型選擇，筑
壩材料，壩體構造，滲透計算，穩定計算，沉陷計算，以及防滲措施等。

本書主要供水利工程設計和施工人員參考，也可供水利院校的教師和
學生參考。

土 壩 設 計

上 冊

顧淦臣 陳明政著

*

水利電力部辦公廳圖書編輯部編輯(北京阜外月坛南書房)

中國工業出版社出版(北京後驢園路丙10號)

(北京市書刊出版事業許可證出字第110號)

中國工業出版社第二印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行·各地新華書店經售

*

開本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $24^{2/9}$ ·字數512,000

1963年7月北京第一版·1963年7月北京第一次印刷

印數0001—1,680·定價(10-6)3.10元

*

統一書號: 15165·1729(水電-295)

序

建造土坝，虽然已有悠久的历史，但把土力学应用到土坝的设计和施工上来还是近四十年间的事。不过，这些理论还是很不完美的。所以无论在坝的轮廓上、坝的结构上，都还大部分是根据已成坝的一些经验采用的。因此，以前土坝失事很多。1932年，美国J.D. 杰斯汀编著了“土坝工程”一书，其中绝大部分是叙述一些已建成的土坝，很少论述设计的理论。1936年，苏联A.A. 尼契波罗维奇及B.C. 伊斯托明娜编著了“碾压式土坝的设计和施工”一书，比J.D. 杰斯汀的著作进了一步，但设计的理论还是不完美的。1944年，美国W.P. 克来格、J.D. 杰斯汀和J. 黑英斯编著了“坝工”一书，对杰斯汀的1932年的著作做了一些补充。1954年，德意志民主共和国C.H. 马立脱与J. 派孔脱编著了“土坝”一书，引进了一些新的研究成果。但这些书的资料，当设计工程师在解决实际问题时，都极感不足。

近二十年来，各国学者和工程师在土坝工程上做了许多研究，发表了很多论文，尤其是苏联的学者和工程师们，对土坝设计作出了极有价值的贡献。

中华人民共和国成立以来，在土坝的建设上取得了巨大的成就。在实践中，对土坝设计、施工获得了很多经验，发展了土坝设计理论，丰富了设计、施工的科学的宝库。把这些实践和研究的成果，总结到书上来，以便于设计者应用，是很有必要的。

作者从事土坝设计工作以来，在实践中对土坝设计中的某些问题，例如土坝的孔隙压力、无粘性土的坝坡稳定、坝基防渗结构等问题，都提出过自己的解决办法。这些方法以及我国水利水电科学研究院和各有关设计院在土坝方面的研究和实践的成果（例如黄文熙教授的有块石护坡的坝坡稳定计算，潘家铮工程师的刚性心墙应力计算等），也扼要地收集在本书中。

书中对一部分重要的计算公式进行了推导，以便设计者了解公式的来源，当遇到具体的特殊的工程问题时，可以自己灵活地推导设计方法，而不限于书上所列的公式。这对于设计者可能是有益的。

作者希望本书能够帮助设计者解决具体问题，能够对我国社会主义建设起到一点微小的作用，也希望通过本书对我国水利水电建设成就作部分介绍。

作者虽然大胆地写出了这本书，但由于经验和知识都有限，书中一定有許多错误和缺点，因此，作者诚恳地希望各地的专家和广大的读者给以批评和指正，以便将来作进一步的修改和补充。

顧 淦 臣
陈 明 致

目 录

緒論	7
第一章 坝址的工程地质条件	10
第一节 坝址的选择	10
第二节 土坝对地基的要求	11
第三节 在各种岩层上筑坝的地质条件评价	12
第四节 坝址的地质构造	23
第二章 土坝的类型及坝型选择	31
第一节 坝的分类及坝型初选	31
第二节 土坝的选择	33
第三节 碾压式土坝坝型的初选	74
第四节 碾压式土坝坝型的终选	82
第五节 坝型选择实例	82
第六节 坝基防渗结构型式的选择	85
第七节 土坝坝型的新趋势	89
第三章 筑坝材料的勘探、选择及设计	92
第一节 土的分类	92
第二节 筑坝材料的勘探	95
第三节 筑坝材料的试验	97
第四节 试验成果的整理和设计指标的采取	99
第五节 碾压式土坝土料的选择	105
第六节 水力冲填坝土料的选择	112
第七节 水中填土坝土料的选择	115
第八节 对土坝所用的石料及反滤料的质量要求	116
第九节 土料设计	118
第四章 土坝的渗透	127
第一节 渗透的基本理论	127
第二节 在不透水地基上土坝渗透的水力学解法	136
第三节 在透水地基上土坝渗透的水力学解法	145
第四节 坝基有压渗流的流体力学解法	149
第五节 在不透水地基上土坝渗流的流体力学解法	156
第六节 在透水地基上土坝渗流的流体力学解法	163
第七节 在不透水层上土坝与混凝土建筑物连接处的渗流计算	167

第八节 岸坡繞流	172
第九节 流网的繪制	173
第十节 电拟法	179
第十一节 縫隙槽中的試驗	182
第十二节 土槽中的試驗	183
第十三节 膜喻法	183
第十四节 水庫放空时坝身的浸潤綫	185
第五章 土坝的稳定	192
第一节 土坝稳定的破坏	192
第二节 土坝的滑裂面	193
第三节 作用于土坝的力	195
第四节 土坝孔隙压力计算方法	204
第五节 力的組合及要求的安全系数	221
第六节 非粘性土坝坡的稳定計算	223
第七节 斜墙及保护层的稳定計算	227
第八节 粘性土坝坡的稳定計算	233
第九节 寻找最危險滑裂圓弧的方法	245
第十节 改良圓弧法	247
第十一节 壅流稳定計算	251
第十二节 用数值法求土坝及坝基的孔隙压力	274
第六章 土坝的构造	287
第一节 土坝的外形輪廓	287
第二节 护坡	301
第三节 块石护坡的设计	308
第四节 混凝土板护坡的设计	316
第五节 土坝的防滲結構	319
第六节 刚性心墙的計算方法	336
第七节 刚性斜牆的計算方法	344
第八节 排水設備	352
第九节 反滤层的设计	358
第十节 穿越土坝的泄水管道	366
第十一节 土坝与坝基、岸坡及混凝土建筑物的接合	371
第七章 坝基防滲措施	377
第一节 坝基防滲措施的种类	377
第二节 截水槽	377
第三节 板桩	379
第四节 鋪盖	381

第五节	混凝土防渗墙和連續混凝土柱	386
第六节	連鎖管柱	391
第七节	砂砾石地基的水泥粘土灌浆	392
第八节	其他加固地基的方法	396
第九节	坝基和坝体土的渗透变形	403
第十节	岩基处理	412
第八章	土坝的沉陷	420
第一节	坝身最終沉陷量的計算	421
第二节	坝基最終沉陷量的計算	422
第三节	坝体沉陷与時間的关系的計算	424
第四节	坝基沉陷与時間的关系的計算	433
第五节	不均匀沉陷	434

緒 論

中国是建筑土坝最早的国家之一。春秋时代，淮河流域已出现了一些小型塘坝工程，都是利用土的建筑。如：公元前613年—前590年（楚庄王时），在楚相孙叔敖的倡导下，在今安徽寿县西南，利用天然地形，兴修堤堰，建成一座蓄水库，这便是后世著名的灌溉工程——芍陂，又名安丰塘。

公元514年（梁天监13年），在淮中游兴建了“南起浮山，北抵巉石”的拦河大土坝——浮山堰。它的规模据《梁书·康绚传》说：“其长九里，下阔一百四十丈，上广四十五丈，高二十丈，深十九丈五尺^①”，并建有溢洪用的“湫”。这座大土坝经历了建成复溃，再度兴建的艰巨过程。最后，由于建坝目的——蓄水淹没寿阳（今安徽寿县），夺取对方城市——已经实现，不再继续维修，终于废坏。但是，这一历史事实充分证明我国土坝工程技术，早在六世纪二十年代即已取得卓越的成就，具有高度的水平。

黄河堤防，早在春秋以前即已兴筑，战国时代有了较大的发展，其后经过历代不断整修，在土工建筑方面也积累了许多有用的经验。

洪泽湖大堤，原名高家堰。其修筑相传起始于东汉广陵太守陈登，约在公元200年（建安5年）以后。公元1415年（明永乐13年）、1572年（隆庆6年）、1578年（万历6年）三次大修，确立了大堤的规模。1580年（万历8年），开始在土堤中段大小涧一带改建石工，嗣后继续有增建。1595年（万历23年），在武家墩等处兴建三座减水闸，其后历有改建，至1751年（清乾隆16年），终于建成仁义礼智信五座滚水坝。大堤又经1678年（康熙17年）、1700年（康熙39年）、1730年（雍正8年）三次大修，临湖堤段基本上都用条石砌筑，形成了世界闻名、长达百里的洪泽湖大堤。其中土堤面宽50米，边坡1:2.5，底宽75米，高约10米。

近百年来，虽然也修了一些农田水利工程和船闸等，但在封建王朝和国民党反动统治下，水利技术得不到应有的发展，劳动人民的创造也得不到总结和支持，我国的水利水电事业和所有其他经济建设一样，处于落后状态。在解放前，全国灌溉面积只有2.4亿亩。

中国共产党领导中国人民进行革命，打倒了国民党反动派，取得了政权，在1949年建立了中华人民共和国，随即着手经济恢复工作。在建国初期，对消灭洪水灾害及兴修水利，已经予以很大重视。1950年毛泽东主席发出了“一定要把淮

① 按梁代丈尺换算制为小，据1957年3期“文物参考资料”载高“古尺考”：梁代阔尺（现藏中国历史博物馆）1尺=今制0.2495米。

河修好”的偉大号召，我国人民在很短時間內，以惊人的建設速度，在淮河上建成了許多水庫，例如，板桥、白沙、薄山、南湾、佛子岭、梅山、响洪甸等較大的水庫就是在短短几年的时间內建成的。与此同时，在其他河流上也建成和开始兴建了一些水庫，例如，在永定河上建成了官厅水庫。除此以外，还在淮河、长江、永定河等河流上建成了許多大型水閘和水力发电站。这些工程，对防洪、治涝、灌溉、发电起了很大的作用。

1958年，党提出了鼓足干劲、力爭上游、多快好省地建設社会主义的总路綫，我国各項建設都获得了飞跃的发展，水利建設也象脱繯的駿馬一般，飞速前进。在1958年及以后的几年中，又有許多大型水利水电工程开工或建成。

建国以来所兴建的这許多水利水电工程，已使我国一些主要河流的防洪标准有了很大的提高，全国灌溉面积和水电站装机容量也較解放前大大增加。

在建設这許多大、中、小型水利水电工程的过程中，我国的水利技术得到了巨大的发展，我們已經解决了許多水利工程設計和施工中遇到的問題，并已能够自己設計巨型的水利水电工程。

筑坝是水利水电工程中重要的一环，土坝又是坝工中最普遍的一种坝型。因为建筑土坝各地都有較多的經驗，便于就地取材，不需要很多水泥鋼筋，对地质要求較低，便于发动羣众修建，所以土坝在我国发展很快。中型水庫，大部分是采用土坝，大型水庫有不少也采用了土坝。

土坝的設計以往大部分是凭經驗，随着土力学、土质学的发展，才逐渐地提高到理論上来，許多基本理論都是近百余年来发展的。1776年庫倫发表了土的应力公式，1868年摩尔发表了土的破坏理論，1856年达塞发表了水在土中渗透的理論以及斯篤克发表了顆粒在水中沉降速度的理論。这些是现代設計土坝的基本理論。

把这些理論应用到实际中去还是近四十年的事。E. K. 貝得逊的圓弧滑动理論后来被費倫紐斯、克来等人发展了，現在一般叫作瑞典法。勃萊的渗透理論，泰沙奇的固結理論，普洛克脫的压实现論，福希海滿的通过坝的渗透流网法以及卡薩格蘭德所作的发展，和美国垦务局的孔隙压力初步理論是现代設計土坝理論的开端。但这些理論是很不完善的，而且有許多是不合理的。例如勃萊的渗透理論是很片面的，泰沙奇的理論也有很多錯誤。

苏联的学者們正确地解决了許多土力学的問題，完整地发展了土力学中的松散体靜力学問題、土的强度問題、土的压缩和固結問題、地下水运动学問題。例如B. B. 索科洛夫斯基用土的极限平衡理論，解决了土坡和擋土墙的穩定等方面的理論問題。H. M. 格爾謝凡諾夫研究了在連續荷重下饱和土体的压缩和固結問題，B. A. 弗洛林和Я. A. 馬契列特、C. A. 罗查、B. II. 波波夫等使土体的压缩和

固結理論得到了更进一步的发展。对于土的物理性質方面的研究，A.Φ. 列別节夫、Г.И. 帕克罗夫斯基和 H.A. 崔托維奇作了巨大的貢獻。H.H. 巴甫洛夫斯基、П.Я. 波魯巴林諾娃-柯琴娜研究了地下水运动理論和地下水在建筑物下的渗透及建筑物周边的繞流理論；在这方面得到了很大的发展。这些研究的成就，都給土坝的設計和施工提供了日益完善的理論基础。

我国在工程建設的实践中，劳动羣众創造了許多先进的施工方法；水利水电設計部門在生产实践中，对坝基沉陷的計算，加固坝基的預压密法，施工期和水庫水位降落时坝体中孔隙压力的計算，透水坝基上用鋪盖防渗的設計方法等，有了很有价值的发展和創造。科学研究机关为了帮助生产单位解决生产中的实际問題，对土坝压实的研究，对考虑土的側向膨脹的地基沉降計算問題等都作出了貢獻。

虽然土坝的設計随着土力学的发展而漸趋完善，但土的工程科学到今天还处在形成和发展的过程中，土力学在工程建筑科学系統中仍是比較薄弱的一环。所以土力学和土坝設計方法还有待于我們努力去研究和发展，本书的部分章节中还有着不成熟的地方。

我国水利建設所以能取得輝煌成就，土坝技术所以能得到不断的提高和发展，是由于党的正确領導，由于劳动人民的冲天干劲和无穷智慧。随着社会主义建設的发展，我国的水利水电技术必将有更进一步的发展。

参 考 文 献

1. 張含英：中国古代水利事业的成就，科学普及出版社，1957年。
2. H.A. 崔托維奇：土力学，地质出版社，1954年。
3. 顾淦臣：十年来我国土坝建筑技术的发展，“水利水电建設”，1959年第18期。

第一章 坝址的工程地质条件

第一节 坝址的选择

坝址的选择在很大程度上取决于地形和地质条件，但是往往有人单纯地从地质条件好坏的观点出发去选择坝址，这是不正确的。选择坝址必须结合水利枢纽的布置和经济条件来考虑。

首先，应尽量选择最短的坝轴线，因为坝越短，工程造价也就越少。只有在坝地质情况过分恶劣，对可能的处理方案作出了技术经济比较，并考虑了施工条件以后，才能决定放弃。

没有疑问，坝址的地质条件是影响坝址选择的最重要因素之一，必须将可能筑坝的地段分成若干地质特征差别较大的比较坝段，进行详细的地质勘探和研究。同时还要对各可能坝址分别进行水利枢纽的布置，以备最后作技术经济比较。不仅仅只研究坝址的地质条件，尚需研究水库区范围内的地质条件，才能全面地进行评价。

坝址附近的建筑材料分布情况，往往也影响到坝址的选择，因为建筑材料的种类、储量、质量和分布情况，影响到坝的类型和造价。

施工条件也是选择坝址的因素之一，它往往迫使我们去考虑较宽的坝址，因为较宽的坝址易于布置分期围堰，在施工期泄放洪水较易，在流冰时因冰块拥塞而造成的壅水较小。但是宽的坝址，其工程造价往往增加，以此去换取较好的施工条件是否值得，必须对比较方案作出技术经济比较后才能决定。为了施工便利，放弃狭窄坝址而选择较宽的坝址，往往是因为过高地估计了在狭窄坝址施工困难。实践证明，在很多峡谷中修建了高大的坝，姑且不谈世界上已有数百个在狭窄坝址上修建拱坝的事例，即使对于土坝，这种实例也是屡见不鲜的。例如阿尔可瓦土坝，高78米，修建在坝顶宽仅213米的峡谷中，宽高比仅为2.7。这些实例说明了在最狭窄的坝址，只要合理地选择施工机械和组织施工，也能顺利地建造高土坝。

有时，由于坝址位于山区中，对外交通不方便，往往被迫放弃在各方面都很良好的坝址。但对于用当地材料建造起来的土坝来说，这种困难并不是主要的，因为它所需的对外交通运输量并非很大。

水库及水利枢纽的管理条件也应在选择坝址时予以应有的注意。对于冰凌或泥沙多的河流，更应考虑到冰凌和泥沙对枢纽建筑物施工及将来运用条件的影

响。

施工工期的长短也大大地影响着坝址的选择。选择工程量少、坝基处理简单的坝址将能缩短工期，这对加速我国社会主义建设有重大的意义。

所有以上因素必须结合工程造价来评价坝址的优劣。只有经过全面衡量，才能选定最合理的坝址。

我国解放后，在建设初期(1949~1952年)，个别技术人员因为缺乏经验，往往忽略地质条件，单纯从地形条件选择坝址，以致开工以后发现地质条件恶劣而停工，或增加许多工程投资。由于这些教训，某些技术人员对恶劣的地质条件又产生了过分的恐惧，因而过分地强调了地质因素，以致牺牲了优越的地形条件。这两种做法都是值得商榷的，因为两者都缺乏全面观点。个别技术人员的这些缺点很快便改正了，在我国现在已正确地选择了千百处合理的坝址。

第二节 土坝对地基的要求

在所有的坝型中，土坝对地基的要求最低。因为钢筋混凝土坝、混凝土坝及堆石坝的地基应力比土坝要大很多，故它们要求地基具有充分的坚固性；而土坝由于基础面积较大，承担的应力较小，所以对坝基的要求可以稍低。但是绝不可因此而忽视对坝基详细勘察研究和采取正确的工程措施的必要性。由于很多土坝是建造在软基上(粘土、壤土和砂土)，对这种坝基的研究便更加重要了。

1.对岩基的要求 除非是在有天然露头的地方，一般情况下并不需要将土坝全部建筑在岩基上。但对于高土坝或者为阻止冲积层的渗漏而在条件许可时，多半将土坝的阻水部分延伸到岩基面上。如果岩基地质条件不良，也会造成坝的毁坏。对岩基提出的一般要求如下：

(1)足够的岩石强度 单从岩石的抗压强度来论，对现今已建成的最高土坝(脱林涅台坝，高164米)来说，都是足够的。风化了的坚硬岩石，强度虽然稍低，但作为土坝的坝基，一般地都可满意。頁岩和粘土岩应当作为软基来研究。

(2)岩石的整体性 应当避免活断层，岩层中不应有大的缝隙和裂口。对严重的风化带和破碎软化的岩层，也应仔细研究加以处理。

(3)没有造成坝滑动的夹层 当坝基由不同的岩层构成时，要没有造成坝滑动的条件，尤其应当避免有可能造成坝基滑动的软弱夹层，或自上游至下游容易形成渗漏的夹层。

(4)岩石有足够的抗水性 岩石浸水后应不至溶解和软化。在坝基中有石膏、酸酐、含石膏很多的岩石及岩盐层时对筑坝非常不利，应当避免在这类岩石上筑坝。石灰岩和白云岩也易为水溶解，产生喀斯特溶洞，应仔细研究加以处理。粘土质岩石遇水容易软化，引起土坝滑动，也应注意。

2. 对软基的要求 在软基上筑坝时, 要求具有下列条件:

(1) 足够的地基承载力。在细砂、软粘土、淤泥和泥炭上修筑土坝时应考虑到这些土层的承载力很弱, 必须加以处理甚或挖除。同时, 研究坝基的承载力时应判断出坝修成后地基的沉陷数量。

(2) 坝基土应有较大的均匀性, 没有被渗透水冲刷的夹层或土层。

(3) 坝基中没有造成坝滑动的条件的软弱层。

(4) 坝基的压缩性应当尽可能地小和均匀。

(5) 坝基土应具有足够的抗水性, 在水中不溶解, 不软化, 没有显著的体积和密度的变化等。

(6) 坝基中的渗透水的水力坡降不应超过危险极限, 坝基中部分土体不应不致因水压力作用而浮起。

第三节 在各种岩层上筑坝的地质条件评价

一、火成岩及坚硬的变质岩

火成岩包括花岗岩、辉绿岩、玢岩、玄武岩、閃长岩、安山岩和正长岩等。土坝建筑在火成岩上是最简单和最有利情况。坚硬的变质岩如花岗片麻岩等也是最理想的坝基。

火成岩和坚硬的变质岩本身虽有垂直和水平的节理, 但间距很宽, 渗漏很小, 可以认为是不透水的岩石。石英岩性质较脆, 经过动力作用易致破碎或产生错动, 裂开面或节理擦痕往往甚多, 方向紊乱, 因此会造成严重的渗漏, 不可不注意。

火成岩的产状如为岩盖, 则土坝位于其上是不安全的, 甚至是不允许的。

岩石的节理及裂隙与坝轴方向一致时, 将比与轴线垂直时要好一些, 因为在这种情况下, 沿裂缝的渗径要长一些。倾斜较陡的裂隙比倾斜平缓的裂隙有利。如倾斜平缓的裂隙向着下游方向, 则更为不利。

花岗岩中往往有各种性质不同的岩脉, 如辉绿岩等, 含有基性矿物较多, 容易风化, 致使部分坝基破碎。岩脉侵入时, 沿周边发生挤压破碎带, 需要根据具体情况施以灌浆。

火成岩及坚硬的变质岩如处在气候温暖、雨量充沛的地区, 则常常表面风化达相当的深度。风化带或渗透性较大, 或岩质软弱, 特别是当进行截水工程时, 要增加开挖工程量, 尤以含有长石和云母较多的岩石, 如花岗岩、花岗片麻岩等为甚。例如意大利的阿伏河坝, 坝基为花岗岩, 其风化深达35米; 法国萨兰斯坝的坝基也是花岗岩, 风化深达20米。阿联的阿斯旺坝, 坝基也为花岗岩, 因河水很急, 无法钻探, 设计时假定所有的风化花岗岩均已被水流冲去, 待开挖时才发

現与原推想的情况不符，使开挖量增大了5倍。北美有一座坝，截水墙建在安山岩上，为了要使它建在坚固岩石上，不得不向下延伸，比預定深度深了12米。

花崗片麻岩如夾有少量花崗片岩或角閃石片麻岩，則因云母和角閃石的成分增多且有明显片理，使岩层抗压强度降低。花崗片麻岩与花崗岩一样，如有基性或中性侵入岩时，則风化較多。

自然，应当指出，风化层很深的情况在其他种类岩石中(变质岩和沉积岩)也很常見。美国乔治亚州的石灰岩风化深度达61米，巴西頁岩的风化深度达120米。

坚硬岩层受震动后易发生破裂，以致有崩坍現象，使坡积层厚度增大。我国某河上有一坝址，由于石英岩的崩坍，坡积层厚达30米以上。

噴发的火成岩，透水性往往很大，故土坝建于其上容易滲漏，甚至会引起危險。特別值得提出的是玄武岩。玄武岩岩盖普通在表面区域中有許多裂縫和孔洞，甚至有洞穴。由于玄武岩有許多孔隙，以致所有地面水都能很快地被吸收，造成水庫及坝基下的大量漏水。斯爾克河上的哲罗姆水庫所以被廢弃，就是因为所有的水都从玄武岩的裂縫中流失了。如果玄武岩岩盖下是透水岩层如砾岩层和火山碎屑岩层时，玄武岩和这些岩层接触处的孔隙将更多，透水情况将更为严重。如果玄武岩岩盖很厚，則随着深度增大，其紧密度也显著增大，渗透性随之减小。

酸性的噴发岩，如流紋岩、石英粗面岩和黑曜岩等，其透水性和含水量都要小得多，因其大孔隙一般要少得多。在这种情况下，渗透性也取决于裂隙度，对于复盖层則取决于风化程度。

二、火山碎屑岩

火山碎屑岩也是由火山噴出物(火山灰，砂土等)形成的岩石，这些火山碎屑在重量影响下以及在水化学起源的物质的胶結作用下漸漸紧实。这类岩石包括碎屑凝灰岩、凝灰岩、角砾岩及块集岩。

这类岩石的稳定性变化很大。一般說来，这类岩石属于抗水的半坚硬的岩石，但有的几乎可承受任何种类的坝的荷重。例如波尔德混凝土拱形重力坝，坝高223米，坝基为凝灰角砾岩，抗压强度为770~1,540公斤/平方厘米。

凝灰岩通常占有很大的面积，尤其是細薄組織的凝灰岩。在水下噴发时，較粗的碎屑将被搬运到远处。在这种起源的凝灰岩上修坝时，可以认为基础十分均匀。但是，有时情况却并非如此单纯，如凝灰岩是水流带来的沉积产物时，則岩性不一，层次很多，并且还夹有很薄的軟弱夹层，将影响坝基的稳定。有些凝灰岩或块集岩中夹有次生矿物，作者曾見到某坝基块集岩中夹有綠泥石，用脚一碰，岩心即如酥糖一般沿綠泥石节理面掉下。

凝灰岩的层厚是个重要问题。尤其当凝灰岩与岩浆岩或其他沉积岩交夹时，应充分考虑下垫、包裹或交夹着凝灰岩的那些岩石的工程地质性质。

凝灰岩、块集岩及角砾岩的透水性一般并不大。

火山碎屑岩中原始节理比较发达，二组相互直交，且张开的节理使岩石裂为板状。地下水沿节理渗透，使岩石风化成泥土及高岭土，导致滑动；由于风化作用也可能产生洞穴。含水量很大时，易使岩石崩塌。造山运动及地震也造成或促进节理裂隙的开展，加剧风化，使岩石抗压强度降低。

凝灰岩为不透水岩石，如在其上有透水岩石将水渗至凝灰岩面上停积，页岩受水浸润也会引起上部岩层的滑动。例如我国某水电站坝址左岸，在花岗岩之下有紫色凝灰岩一层，厚50厘米到6米，其河床下坝基及右岸则为块集岩及流纹岩（图1-1）。地下水自斑岩渗入，页岩为隔水层，受浸润后成为松软的泥，

抗剪强度很低；页岩又被洪水冲刷坍塌，使在其上的斑岩随之坍塌，依岩层倾向（北偏东 40° ，倾角 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ）逐段滑落，使山坡成明显的阶梯地形。大小不同的破碎岩块与泥土夹杂着堆积坡上，斑岩底部与页岩接触处，破碎成骨牌状碎块，滑坡现象严重。滑动部分深入山中达70余米，沿河上下宽200~300米。施工之先，没有给予应有的注意，待开挖坝的岸坡时才发现岩石破碎，经过补充地质勘探后，才发现上述的地质情况。如将此等已滑动与风化的岩石挖除，则将使坝身增长，且新露出的岩石一经风化，难保其不再滑动。该处有六级地震，

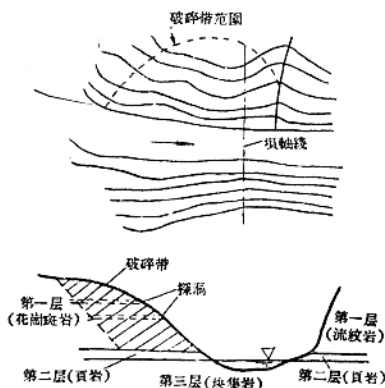


图 1-1

也可能引起岩层坍塌或滑动。所以不得不变更计划，将坝沿河边向上游转弯，筑成侧坝，长250余米，与完整的流纹岩相接；再将岸坡削平，铺盖粘土于其上，使滑动破碎的岩层完全被拦在水库下游，不与水接触，以防其再滑动。这样改变，使工程费增加了数倍。

三、一般的片麻岩、片岩、千枚岩、板岩等

片麻岩、片岩、千枚岩及板岩大部属于震旦纪变质岩系，由于矿物成分及其

变质程度不同，故抗压强度有所不同，甚至相差很大，但是都属于不透水岩层，仍不失为优良的筑坝地区。不过应当注意，含石英较多者，岩石较坚硬，而含云母、角闪石和绿泥石较多者，则强度减弱，且易引起滑动。片麻岩、片岩及千枚岩皆有片理，板岩则呈板状劈理。片理成水平状态者较坚硬，直立或倾斜者则相差甚巨，且易崩塌。变质岩层时代较古，经过造山运动次数亦多，构造复杂，褶皱、断裂及节理均甚发育，沿节理发生的风化较深，坡积物也较厚。

片岩的最大特点是有次生片理或劈理，甚至能成很薄的层。在某些片岩中，例如千枚岩中，原生层理及与之成夹角的劈理常易看出。岩石在这两个方向上的抗剪强度都较小。片岩的岩层是单独剥离的，常常在两个层面之间仅呈光滑接触，如岩石倾向山坡，则易滑坡，尤其当水库蓄水时更易滑动。

如果变质作用较微弱，那么变质岩在工程地质方面可能与非抗水性的原来岩石相近，不可不加以注意。

片岩等的裂隙和节理比火成岩要少，其中又以粘土质板岩最不含水，因为这种岩石相对地较柔软，其裂缝一般在不深之处即已闭合。

四、红色砾岩、砂岩、頁岩及粘土岩

红色岩层自中生代至第三纪均有，主要包括砾岩、砂岩、頁岩及粘土岩，某些地区尚有泥灰岩或夹有薄层石灰岩。红色岩层的颜色以红色为主，包含有红、紫、赭红、褐、黄、灰、绿等色。其所以呈红色的原因，有各种推断，莫衷一是。或云由于粘粘土为红色，或云因所含铁质经风化作用成为氧化铁，或云因含红色正长石所致。

红色砾岩和红色砂岩的胶结物为钙质、铁质或粘土质。钙质或铁质胶结的砾岩，抗压强度约为400~800公斤/平方厘米。为粘土质所胶结的砾岩，浸水后抗压强度大减，长期浸水，可能瓦解。由钙质或铁质胶结的砂岩，抗压强度为300~600公斤/平方厘米；为粘土质所胶结者，强度更低，浸水时间过长时，亦能自行瓦解。

红色岩层中的頁岩，绝大部分呈紫色或红色，也有成为灰色或绿色薄层者，均含钙质。垂直于层理的抗压强度约为200~400公斤/平方厘米。

粘土岩不具层理，因其成因系粘土受压固结而非胶结，故浸水后也易瓦解。粘土岩富有孔隙，但非肉眼可见。浸水膨胀后，表面生成泥浆薄层，如再干燥，则又收缩，表面泥浆干成鳞片状而剥落。经多次干湿交替则产生大量裂隙，易受压破碎。其次，粘土岩易受水冲刷，如湖北的丹江和江苏溧阳的赤水河，即因流经红色粘土岩，携其碎屑而流，以致江水变红，因而得名。粘土岩还易受风化，

粘土顆粒常为地表水带下，充填于砂岩、砾岩及頁岩之节理、裂隙或层面中，成为夹泥层。这种夹泥层可深达地表下10米，厚約数毫米至数厘米，近于液态或塑态，手摸之感到膩滑。

紅色岩层中的砾岩、砂岩、頁岩及粘土岩等常交互成层，各种岩石成层均不規則，岩性与厚度也不均匀，不但水平方向逐渐互变，上下层次之間的岩性也常逐渐变换。

砂岩或砾岩中所包含的頁岩或粘土岩块，抵抗风化侵蚀的能力較弱，常先被侵蚀出去而留下空穴。

在紅色岩层上筑坝时，应对岩层有充分的調查和了解。如处理不当，会使坝遭受危害甚至潰决。首先，由于紅色岩层中的胶結物质有的是碳酸鈣、石膏等易溶于水溶蚀的物质，或因含有易溶盐、石膏等物质而为本所溶解，或因粘土质胶結物为本浸后使岩石崩解，这样即使建于其上的坝遭受危害。

組成紅色岩层的岩石，特别是其中的砾岩与砂岩，相当普遍地存在着交錯层构造，并常夹有粘土薄层或夹泥层，这些夹层抗风化能力薄弱。靠近地表部分，交錯层中所夹的粘土薄层或夹泥层常較砂岩或砾岩先被侵蚀，因而沿着交錯层面理遺留下許多縫隙，造成水流渗漏的通道。例如四川某水电站开挖基坑时，有部分渗水即从边坡上紅色砂岩的交錯层理中渗出。紅色岩层如为碳酸盐类(碳酸鈣，碳酸鎂)所胶結，則可能有喀斯特現象发育。

其次，組成粘土岩或粘土质頁岩的顆粒細小，抗剪强度低，浸水后，表面泥漿化，易使坝基滑动。尤其是在其上复层为有裂縫的砂岩和砾岩时，水由裂縫渗下，到达粘土岩或頁岩面时水流受阻，沿岩层面流动，使粘土岩或頁岩逐渐泥漿化，会引起上部岩层滑动(图1-2)。

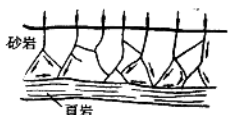


图 1-2

化，会引起上部岩层滑动(图1-2)。印度太加拉堆石坝，坝长约1,610米，高約26米，坝基为层厚1米的砂岩与頁岩互层，傾角小，傾向下游，节理发育，該坝1919年因岩层滑动而潰决。

第三，粘土岩由于上部荷重，可能发生若干沉降，有时还因种种原因，会有不均匀沉降，必須事先考虑周密。为了估算地基的不均匀沉降，应查明粘土岩的分布情况、厚度及物理力学技术指标。如果粘土岩只是成为规模不大的透鏡体，而为坚硬的砂岩或砾岩所包裹时，因为后者的拱作用，可能不至产生沉降。

最后，粘土岩及粘土质頁岩浸水时泥漿化，浸水后再干燥又会破裂。这都会使建筑物基础难于与新鮮的粘土岩或粘土质頁岩紧密接合。为了保证工程质量，只有設法使基坑中所遇到的这类岩石避免浸水，不直接或不长期与日光接触。