

水工建设中岩石力学的国外应用实例与经验数据

水工建设中岩石力学的 国外应用实例与经验数据

水利电力出版社

IV223/144

出版社

TV123

744

水工建设中岩石力学的 国外应用实例与经验数据

陶 振 宇 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要叙述了国外若干水利水电工程建设中岩石力学试验研究的成果和工程应用实例；汇编了岩石力学的某些经验数据，有助于从多方面认识岩石的基本特性。

本书可供水利水电工程建设者和水利水电院、系工农兵学员和教师参考。

100/26

水工建设中岩石力学的国外应用实例与经验数据

陶 振 宇 编

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂排版

北京印刷三厂印刷

1976年11月北京第一版

1976年11月长春第一次印刷

印数 00001—6,270册 每册 0.78元

书号 15143·3217

毛主席语录

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒

详细地占有材料，加以科学的分析和综合的研究。

继承和借鉴决不可以变成替代自己的创造，这是决不能替代的。

前 言

当我们从事任何一项工作时，总是需要了解它的历史、现状和发展趋势，就是说要了解它的全过程及其规律性。而要做到这一点，首先就要求“详细地占有材料，加以科学的分析和综合的研究。”对于岩石力学来说，也是这样。我们本着这种精神，遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，结合我国工程实际，在编写本书时，有选择地介绍了一些具有代表性的国外工程应用实例；但对岩石性质的试验数据，则尽量使其具有综合性，以便从多方面反映其特性，这将有助于加深对其规律性的认识。由于缺少经验，在编写内容上必然会有这样或那样的缺点和错误，敬希读者批评指正。

在编写本书过程中，得到我院党委和工宣队的亲切关怀和鼓励，并在长江水利水电科学研究院岩基室，原水利电力部科学研究所，长春地质学院和我院土力学及地质教研室等单位的有关同志的大力支持下，对初稿进行了认真审阅，提供了许多宝贵的意见。在这里谨向这些同志表示衷心的感谢。

陶振宇

一九七五年一月二十五日

目 录

前言

第一章 绪论	1
第二章 工程实例	6
§ 2-1 概述	6
§ 2-2 工程实例	7
一、谢尔·庞桑坝	7
二、鲍尔坝、马尔帕塞坝和乌格朗坝	10
三、卡斯狄龙坝、沙丹尼坝、琴尼坝和格奇坝	25
四、黑部川第四号坝、川俣坝和奈川渡坝	28
五、留米意坝、派夫·狄·卡多尔坝、瓦尔·加令那坝和瓦依昂坝	36
六、帕拉维坝、苏沃尔斯坝和莫纳尔坝	42
七、英古里坝和奥布恩坝	47
八、鲁列克坝和恰尔瓦克坝	53
九、谢尔法斯坝和来利奇坝	62
十、巴克拉坝、克拉斯诺雅尔斯克坝和梅基南萨坝	65
十一、英·富特隧洞和格尤姆希隧洞	77
十二、伊泽尔-阿尔克隧洞和毕可托地下水电站	79
十三、伏尔卡卡瓦和邱吉尔瀑布地下水电站	86
第三章 岩石力学的经验数据	90
§ 3-1 概述	90
§ 3-2 经验数据	91
一、岩石的组成	91
二、岩石的孔隙、裂隙及重率	93
三、岩体的初始应力	97
四、岩石的变形特性及抗力系数	100
五、岩石的强度特性	107
六、岩石的水理性质	120
七、岩石的热学特性	122
八、岩石的电学、磁学特性及放射性	125
九、岩石的动力特性	126
十、某些工程岩体软弱夹层的特性	132
参考文献	137

第一章 绪 论

岩石力学的发展与水工建设具有极为密切的关系。这是因为水利水电工程中的主要建筑物(如大坝及地下水电站建设)经常会遇到这样或那样的岩体地质条件,需要进行试验研究和力学分析,才能正确地进行设计,使水利水电工程的建设适合于具体岩体地质条件。这是涉及工程的安全性和经济性的基本问题,因而日益引起人们的注意。

大家知道,岩石力学中还存在着许多不明确的问题;许多岩石力学问题,也存在不同的探索途径;虽然进行了大量的岩体测试工作,但材料还是零散的,工作还不是很完整;至于岩石力学理论的不尽完善,见解的分歧,更是众所周知的事实。岩石力学的这些情况,对于解决工程建设中所提出的问题,当然会带来这样或那样的困难。因此,为了获得对于工程建设中的岩石力学问题的规律性的理解和认识,不应当简单地引用个别的工程实例或个别材料。这是因为,天然岩体特性所表现出来的物理-力学现象多样而复杂,随时都可以找到个别的例子或个别的材料来证实这种或那种意见。应遵照毛主席教导我们的那样,“详细地占有材料,加以科学的分析和综合的研究。”^①一般说来,在岩石力学方面,我们还缺少系统的周密的收集材料和加以研究的工作。这里辑集了若干材料,便是想在这一方面作一个初步的尝试。

从水工建设的实践来看,在开头,是不大进行或仅简单地进行一些岩石力学研究,后来逐步发展到现在能比较全面的研究和评价工程地质条件及岩体力学性状,这是经过一个相当长的过程的。这里有两个主要原因。

第一,与历史条件有关。岩石力学开始是在资本主义国家中发展起来的。以美国为例,在1920年以前,只有私人资本和地方政府修建水电站。到1927年,国会通过了水电开发计划法案之后,美国政府才大规模地进行水利水电建设。但是,以追求利润为最高目标的垄断资本集团之间,矛盾丛生,经常争吵。其结果,不仅造成水利资源开发的极不合理,而且造成坝的失事或损坏的情况时有所闻。据统计,在本世纪50年代以前约140年间,主要由于岩体地质和技术上的原因,共有200多个坝遭到破坏。其中就有144个坝是美国的^[21]。这个统计表明,按时间上来说,在1912年最多,有20个坝发生灾祸性的破坏,以后逐渐减少。这个数字是统计了除中国、日本和苏联以外的世界各国的不完全统计的情况。

第二,人类的认识必须通过实践才能获得发展这一客观的辩证规律,对于岩石力学来说,当然也不会例外。因此,各个国家在水利水电建设过程中,由于缺乏经验,或对岩体性状和地质条件研究的重要性认识不足,注意不够,因而吃了苦头的例子不少。法国1935年建成的尚邦(Chambon)坝,仅根据四个不深的钻孔,便进行设计和施工,造成很大的困难,便是典型的例子之一^[28]。在50年代以来,岩石力学获得了很大的发展,值得注意

①《毛泽东选集》,757页,人民出版社,1969年。

的是，正是在这时，却发生了法国的马尔帕塞坝和意大利的瓦依昂水库的失事。事后查明，这些事故主要是与工程地质和岩石力学问题的研究存在着重大缺陷有关。这充分说明：人们对于岩体地质特性的认识还远远不足，亟待通过实践经验的积累和理论的提高，进一步加以解决。

在我国，由于社会主义制度的优越性，对于水工建设中遇到的工程地质和岩石力学问题的重要性，是比较注意的。我国水工建设实践的经验表明：地质勘测与岩体试验工作是水利水电建设的基础，是关系到施工能否顺利进行，建筑物能否安全运转的大问题。岩体地质情况复杂并不可怕，可怕的倒是我们没有预见到问题的所在，没有预先采取措施。

因此，在水工建设中要破唯心论的先验论，立唯物论的反映论；破形而上学，立辩证法。在国外，这方面的经验教训是很不少的。法国的谢尔·庞桑坝的建设过程是一个典型的例子。由于从事这个坝的勘测试验工作的人们，在唯心论和形而上学思想的指导下，只是在混凝土坝这个框框内打圈子，前后花了几十年时间，结果还是以失败告终，最后改变了坝型才得以建成。恩格斯说：“蔑视辩证法是不能不受惩罚的。”●我们应当永远记住这个真理。所以，在我国的水工建设实践中，参考国外的某些经验和教训，以资借鉴、比较和分析研究，是有益的。在本书中，我们收集某些材料并略加整理，这对于“学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验”●，也许是有用的。当然，“继承和借鉴决不可以变成替代自己的创造，这是决不能替代的。”●

在这里，我们将叙述若干国外的工程实例和某些经验数据。但也是很不完全的，特别是亚洲、非洲、拉丁美洲方面的材料，几乎是空白点，这些地区的各国人民虽然拥有丰富的水利资源亟待开发，可是由于长期受到帝国主义的掠夺压迫和统治，还处在几乎没有开发的状态，因此，在以往的资料中所占的比重是极端不相称的。我们坚信这种状况一定会随着第三世界各国人民革命的发展而被扭转过来。

从国外工程实例材料中，可以看出：要把一个具体的水利水电工程建设中的岩石力学研究工作，作为一个过程来看待。这样有利于从具体的工程建设入手，解剖麻雀，从特殊到一般，有利于理论与实际相结合。否则，许多岩石力学问题是不大容易解决的。

例如，在岩石试验中，一个重要的问题是成果的代表性和可靠性问题。在国外，最近还有人以拱坝为例^[12]说：“从高度发展的混凝土工艺和现代的薄壳计算方法看来，拱坝的压应力最终会达到150公斤/厘米²。但是，地质勘探靠几个极小的钻孔，或在平洞中作相应的岩石力学试验，而坝肩地质常很复杂，受力范围往往超出坝体好几倍，可见勘探地质知识是何等肤浅贫乏。因此，关于工程的安全，所做勘探工作是否足够，是首先要解决的问题。”其实问题还不只是数量方面，而且主要的还在于：试验成果是否反映了整个工程建筑地点天然岩体所固有的性质，而不是由于试验技术、试验方法和试验设备的局限性所引起的这样或那样的对岩体性质的歪曲和变化。当然，一般说来，试验条件的影响是

①恩格斯，《自然辩证法》，43页，人民出版社，1971年8月第一版，北京第一次印刷。

②《毛主席的五篇哲学著作》，190页，人民出版社，1970年10月第一版，北京第一次印刷。

③《毛泽东选集》，817页，人民出版社，1967年11月改横排袖珍本，1969年6月天津第10次印刷。

肯定存在的，只是希望少一些，尽可能限制在一定量的变化范围内，而不致带来质的变化，这是一个极为重要的问题。在这方面进行过不少的工作，从理论上和实践上都作过探索。比如，试验面积的大小的选定，加荷方法的研究，试验成果误差的估计，试验设备的率定和改进，等等。其目的都在于使试验条件尽可能符合客观实际情况。这些工作是必要的，也是有益的。但这只是问题的一个方面。还有另一方面的问题。拿剪力试验面积大小的选定来说，虽然现有经验证明，只要试验面积不是太小，一般说来，现场剪力试验面积大小的影响是可以忽略的。但是，现有的经验又是有一定局限性的。因为得出这一结论的试验面积，最大也不过十几平方米，相对于实际水工建筑物的面积来说，相差的太大了。当然，也许还可以使试验面积再大一些，但总是受到试验设备和条件的限制。因此，拿这样比较小的试验面积进行比较试验所得的结果，推广及于相对很大的建筑物面积的情况，实际上还是一个没有被完全证明的问题。当然，根据这些试验成果建造的大坝安全运行，是这个问题的一个直接证明。但在这方面可供比较的具体经验材料甚少。拿马尔帕塞拱坝来说，现场岩基的静力弹性模量为 $4\sim 28\times 10^3$ 公斤/厘米²，平均为 12×10^3 公斤/厘米²，而静力变形模量为 $0.7\sim 10\times 10^3$ 公斤/厘米²，平均为 6×10^3 公斤/厘米²。该坝溃毁后，对该坝进行了长达12年之久的详细研究，其中，也进行了该坝观测到的变形与理论计算的比较研究，结果表明：在混凝土弹性模量为 100×10^3 公斤/厘米²，和基岩弹性模量为 10×10^3 公斤/厘米²（即大体相当于野外静力弹性模量平均值的80%）的情况下，对于大坝的中部和上部来说，两者很一致。在各拱冠悬臂梁，观测到的变形和计算变形之间，在54米及102米高程也获得良好的一致性。但基岩顶板处的一致性不好。估计这是由于各拱冠悬臂梁基础内岩体的弹性模量小于 10×10^3 公斤/厘米²。而正是这里的软弱基岩的移动，成为该坝失事的起因。这个事实启示我们，如果加强观测工作，从理论与实践的结合上狠下工夫，将会为岩石力学试验成果的检验，以及岩石力学试验资料的正确应用等问题的解决，提供一个有效的途径。

还必须看到，由于现在的水工设计及岩石力学课题中，广泛采用有限单元法和电子计算机进行的，这种计算技术是快速而有效的，但却给岩石力学的试验研究工作提出了一个亟待解决的任务，就是如何有效地反映全部岩体地质条件对岩石物理-力学参数的影响的取值方法，往往是决定计算成果精度的基本方面。这是因为，在复杂的岩体地质条件下，即使每一个试验的成果是足够精确的和可靠的，但有限数量的试验不一定能代表整个坝区岩体的性状，因此需要采取一定的相关方法将有限数量的试验成果推广到整个岩体条件中去，并配合进行岩体结构的模型试验，以供检验，这是一方面。另一方面，即使是同一岩层，我们从试验成果得知，它的物理-力学特性，例如弹性模量和波桑比等等，也不是单值的，而是按一定规律分布的，如果试验数据的分散性是岩体结构自身变化的属性，而不是试验方法、试验条件的缺点造成的，那末在求解应力时，就必须考虑这个变化。而有限单元法是把一个连续体理想化为若干个“单元”的集合体，各单元由有限个结点相联接，它能够按照需要对各个单元采用不同的材料特性，例如弹性模量和波桑比从一个单元到另一个单元按某一确定的频率分布而变化，而这个频率分布状态，也要求岩石力学的科学实验来提供。还要指出，有限单元法和电子计算技术的应用，还要求带有综合性的岩石

试验成果。拿坝基稳定分析来说,过去多按一般材料力学方法进行的,所要求的岩石力学参数也比较简单,主要是岩体结构的各种可能破坏面(如层面、软弱夹层、岩体本身以及岩体与混凝土的胶结面等)的摩擦系数和凝聚力。长期以来,在这方面进行了大量的试验研究,积累了丰富的资料数据。但是,采用有限单元法来分析坝基的稳定性问题时,不仅需要这些摩擦系数和凝聚力表示的强度特性参数,还需要剪应力-剪应变曲线的资料,还需要变形特性如弹性模量和波桑比以及岩体初始应力状态等多方面的资料。这样,一个工程的岩石力学的科学实验工作的布署和安排也就不一样了。在本书中虽然也想在这方面作一点搜集资料的工作,但还很不够,而且,也受到当前这方面的研究状况的限制,因为这方面的资料似乎并不多见。

又如,怎样保证岩石基础不出事故,或者虽然出一些小的事故但能及时予以补救而不造成巨灾,也是一个需要解决但还没有很好解决的问题。

大家知道,坝的基础不良往往是各种坝型失事的重要原因,这对于重力坝尤为突出。据统计,国外重力坝失事中,有45%是由于基础岩体地质条件所造成的。据有关部门1973年的统计:近十五年(1959~1973)来国外坝高大于30米的八个溃坝事故中,就有4个是与基础岩体地质条件有关的,而且首次有了拱坝失事的记录(表1-1)。

国外坝高大于30米的大坝失事情况(1959~1973)

表 1-1

坝 名	国 家	坝 型	坝高(米)	建成年份	失事时间	失 事 原 因
佛台特拉(Vegdetera)	西班牙	支墩坝	33.5	1956	1959.1.9	材料不均,支墩基础高差大,发生不均匀沉陷,引起应力集中。第一次蓄水时失事
马尔帕塞(Malpasset)	法 国	拱 坝	66.5	1954	1959.12.2	左岸拱座岩石软弱,发生变形滑动,全部崩溃
奥罗斯(Oros)	巴 西	土 坝	53.5	1959	1960.3.25	施工时出现非常洪水,当时坝高30米
巴尔德温·希尔(Baldwin Hill)	美 国	土 坝	70.0	1951	1963.12.14	基础沉陷
瓦依昂(Vajont)	意大利	拱 坝	265.5	1960	1963.10.9	库岸大滑坡2.7~3.0亿立方米,但坝体未垮
潘歇特(Panshet)	印 度	土 坝	56.5	1961	1961.7	闸门强烈震动,砌石拱破坏,闸体下沉,4小时后破坏
梅菲尔特(Mayfield)	美 国	重力坝	71.5	1965	1965	滑坡
三宝(Sempor)	印 尼	土 坝	53.5	1967	1967.11	雨中崩溃

当然,水利水电建设是人类改造自然的一个重要方面,还有许多事物还未被人们所认识,还需要在实践的过程中发展。例如,最近报导过的芳塔纳(Fontana)坝的裂缝就是一个例子。这是一个重力坝,高146.3米,总体积215万立方米,于1942年元月建成。坝基为石英岩,左岸有千枚岩和页岩夹层。但是,在30年后的今天,却在大坝上发现了裂缝,有人认为是因余热膨胀而产生的,正在进行研究,是否与岩基的情况有关,还不清楚。还有一个例子,是美国田纳西流域工程局(T.V.A)宣布放弃哈尔斯·巴尔(Hales Bar)坝,而代之以下游的一座枢纽。因为最近的研究表明:“该坝的改善工程,将比以往指出的更加艰巨,且不能确保大坝的完全防渗和绝对稳定。”这座高34米的混凝土重力坝,建

造在非常破碎和裂隙岩溶非常发育的石灰岩上。在1905年设计大坝时，对岩体地质条件了解的很少，对其裂隙和溶洞分布的广泛性和复杂性更不认识，盲目地认为坝基岩石是完整良好的。1909年开始施工后，在岩面以下10米，即有大量的水从岩体裂隙中涌出，达到1.1立方米/秒。但技术人员仍未真正认识到基础问题的严重性。1911年进行了基础灌浆的初步尝试。由于基岩表层密布着许多孔隙和溶洞，采用明挖方法施工已不可能，于是改用沉箱法，并在沉箱下部灌浆加固。该坝于1913年建成。投入运行不久，便发现坝基漏水，曾试用各种方法防水，但始终无效，未得到改善。1925年用热沥青灌浆后，才暂时减轻坝基的水流和渗漏。1941年又在该坝上游基岩内浇筑一道混凝土截水墙，深28米，这个深度为坝高34米的80%，形成一个地下大坝，堵住了坝下48立方米/秒的漏水量。当时认为已达到止水的目的。1950年完成了上游挡水面的升高工程，使坝增高1.52米，还在原溢洪道上安装了闸门，又完成了广泛的灌浆工作。但近几年来漏水仍在逐渐增加。经过仔细研究，认为该坝基础处理工程量远较以前所能设想的情况为大，且能否完全防止坝基渗漏，还没有把握，而原有船闸又较T.V.A其他枢纽的 33.5×183 米的闸箱小一半，因此决定放弃该坝，另在下游修建一座新坝。

但是，这并不意味着大坝失事是不能认识和预防的。应该指出，在人类对自然的认识上，也是有一个过程的，不会一下子就能获得完全的认识。但重要的应是坚持实践第一的观点，坚持理论与实际的统一，坚持唯物辩证法。国外水工建设的实践经验表明：基础失事最普遍的现象是渗漏，管涌，沉陷和滑动，而且基础破坏往往需要经历一段相当长的时间，通过量的积累才会引起质的飞跃，即可能在很短的时间内崩溃。美国的圣·弗兰西斯坝、巴尔德温·希尔坝、法国的马尔帕塞坝和意大利的瓦依昂水库的破坏都是如此。这种情况为我们提供了认识和预防大坝失事的一个重要的途径，这就是：把地质勘探和岩石力学研究工作的时间放长一些，认真对待；在设计和施工期间考虑的周详一些，保证质量；在运转期间把工程的管理，特别是工程观测及其分析工作搞的过细一些，加强监督；并在唯物辩证法的思想指导下，努力把这三方面有机的结合起来，以确保水利水电工程建设安全、经济、合理地为社会主义服务。

第二章 工 程 实 例

§ 2-1 概 述

在研究岩石力学与水工建设的关系到, 我们曾注意到现代坝工建设的几个重要特点^[6]: 坝高增加了, 数量增多了, 逐渐向轻型结构发展; 同时地下工程日益增多。这种发展趋势, 是与混凝土工艺水平的提高, 高度的机械化施工, 模型试验技术和设计计算技术特别是电子计算机和有限单元法的发展, 有着极为密切的关系; 而且普遍认为, 岩石力学的发展也是促成上述发展趋势的重要因素之一。这种情况现在更为明显。

根据有关部门在1971年进行的统计: 从1925年以来, 国外兴建高于120米的176座大坝中, 土石坝有44座, 占25%; 混凝土坝132座, 占75%。因为混凝土坝对岩体地基的要求比土石坝高得多, 这种生产建设的迫切需要, 就进一步推动了岩石力学的发展。这个统计还表明: 在这132座混凝土坝中, 拱坝占87座(66%); 重力坝只有40座(30.2%); 其他类型的混凝土坝(如连拱坝等)仅有5座(3.8%)。而拱坝对岩体地基的要求, 一般认为要比重力坝高。这个论点对不对, 在这里姑且不去讨论, 但它确实对加强岩石力学的研究工作, 起了十分重要的作用, 则是不容置疑的。

考虑到这种情况, 我们在介绍国外工程实例时, 拱坝的材料较多, 特别对于失事的马尔帕塞拱坝的情况, 尽可能地作了详细的介绍。而土石坝对岩体地基几乎不进行什么研究, 所以基本上不作介绍。虽然也介绍了几个土石坝, 但只是介绍在选坝阶段时, 为选混凝土坝方案而进行的工作。此外, 也介绍了若干隧洞和地下水电站建设的工程实例。这些实例的一般情况见表2-1。

国 外 工 程 实 例

表 2-1

工 程 名 称	国 家	类 型	坝 高 (米)	岩 体 情 况	建成年份	附 注
谢尔庞桑 (Serre-Poncon)	法 国	土 坝	122	坝基为砂卵石 层, 泥质石灰岩	1959	1959年12月2日溃毁
鲍 尔(Bort)	法 国	拱 坝	120	片麻岩及云母页岩	1952	
马尔帕塞(Malpasset)	法 国	拱 坝	66.5	片麻岩	1954	
乌 格 朗(Vouglans)	法 国	拱 坝	130	白云岩化石灰岩	1968	
卡斯狄龙(Castillon)	法 国	拱 坝	100	石灰岩	1949	
沙丹尼(Chaudanne)	法 国	拱 坝	74	石灰岩	1952	
琴尼(Tignes)	法 国	拱 坝	182	石灰岩	1952	
格奇(Gage)	法 国	拱 坝	38	花岗岩及片麻岩	1954	
黑部川第四号	日 本	拱 坝	186	花岗岩	1962	
川 俣	日 本	拱 坝	120	流纹岩	1965	
奈 川 渡	日 本	拱 坝	155	黑云母花岗岩	1969	
留米意(Lumiei)	意大利	拱 坝	134	三叠纪石灰岩	1947	

续表 2-1

工 程 名 称	国 家	类 型	坝 高 (米)	岩 体 情 况	建成年份	附 注
派夫·狄·卡多尔 (Pieve di Cadore)	意大利	重力拱坝	110	白云岩化石灰岩	1949	1963年10月9日因水库 岸坡滑坡而湮废
瓦尔·加令那 (Val Gallina)	意大利	拱 坝	69	白云岩	1951	
瓦依昂(Vajont)	意大利	拱 坝	261.6	石灰岩	1960	
帕拉维(Pahlavi)	伊 朗	拱 坝	197	砾 岩	1962	
苏沃尔斯(Sufers)	瑞 士	拱 坝	58	片麻岩	1961	
莫纳尔(Monar)	英 国	拱 坝	134	矽质白粒岩	1963	
英古里(Ингур)	苏 联	拱 坝	271.5	石灰岩, 白云岩	正建	
奥布恩(Auburn)	美 国	拱 坝	208.5	角闪岩, 两岸地质条 件复杂而不均匀	正建	
鲁列克(Хулек)	苏 联	土 坝	300	砂岩, 粉砂岩	正建	1885年被洪水局部破坏, 1892年修复, 1933年采 用锚拉加固
恰尔瓦克(Чарвак)	苏 联	堆石坝	174	薄层石灰岩	1970	
谢尔法斯 (Les Cheurfas)	阿尔及利亚	砌石重 力 坝	30	石灰岩, 泥灰岩	1882	
来利奇 (Allt-na-lairige)	苏 格 兰	预应力混 凝土重 力坝	22	花岗岩	1956	
巴克拉(Bahkra)	印 度	重力坝	226	砂 岩	1966	
克拉斯诺雅尔斯克 (Красноярск)	苏 联	重力坝	128	花岗岩	1968	
梅基南萨 (Mequinzenza)	西班牙	重力坝	77.4	薄层石灰岩, 夹有 褐煤	1966	
英·富特(d'ImFout)	摩洛哥	隧 洞	—	石英岩, 石英砂岩 页岩等	1953	
格尤姆希(Гюмш)	苏 联	隧 洞	—	安山玄武岩	1953	
伊泽尔-阿尔克 (Isere-Arc)	法 国	隧 洞	—	变质片岩	1954	
毕可托(Picote)	葡萄牙	地下水 电站	—	花岗岩	1957	隧洞长达11公里多
伏尔卡卡瓦 (Forcacava)	巴 西	地下水 电站	—	片麻岩, 多为断层 所切割	1953	
邱吉尔瀑布 (Churchill Falls)	加 拿 大	地下水 电站	—	花岗-片麻岩	1972	

关于国内的工程实例, 在这里没有叙述。

但是, 我国岩石力学的发展是很迅速的, 特别是无产阶级文化大革命和批林批孔运动以来, 更为突出、明显。例如, 在一九七四年, 工农兵学员发表的关于岩石力学的研究成果, 打破了资产阶级知识分子对科学领域的垄断, 显示出了岩石力学的发展具有深厚的群众基础。这表明: 伟大的无产阶级文化大革命和批林批孔运动, 是推动科学实验发展的强大动力。

§ 2-2 工 程 实 例

一、谢尔·庞桑坝^[10]

法国为了要在久兰斯(Durance)河上建造谢尔·庞桑坝, 曾经进行了多次地质查勘工

作，前后花了几十年时间。由于唯心论和形而上学的宇宙观作怪，资产阶级的工程技术人员只是在混凝土坝型上绕圈子。直到1947年，再一次对此坝进行勘测工作时，仍然只考虑混凝土坝型，因而仍然走着弯路。像过去一样，他们希望能在某一适当的深度上找到岩体地基。因此，曾决定不在过去勘探过的峡谷处，甚至不在靠近该处的下游附近进行勘探，因为估计此处有受冰川侵蚀割切的古代河谷；而在较宽阔的地段中去寻求合适的坝址，据认为：这一新的坝址虽然宽度较大，但两岸的岩石似乎是坚硬的。当进行河中第一个钻孔时，在76米的深度上遇到岩石，当时被认为提供了有希望的资料。因此，在此坝址进行了广泛的勘探工作。这一坝址被称为47~48坝址（图2-1）。

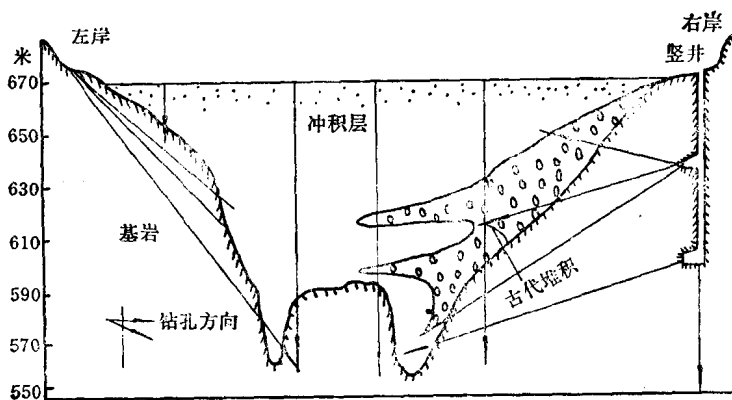


图 2-1 谢尔·庞桑47~48坝址

接着在该坝址右岸竖井中打斜钻孔，斜钻孔打得相当深，其目的在于使这些钻孔穿透冲积层以下，借以查明岩体情况。竖井通过的岩体是良好的。竖井进行的钻孔中发现有压力水涌出，其涌水压力为7公斤/厘米²。

根据所进行的钻探，发现河谷有二次下切。第一次是沿右岸发生的，深度约110米，沿这一下切有大量的矿化度很高的且很热的水流，其水温高达60°C。第二次下切发生在左岸，深度至少100米（图2-2）

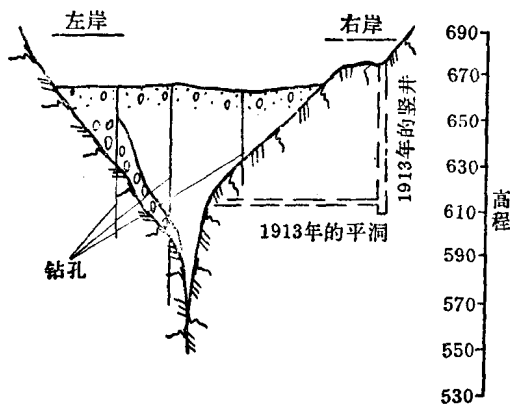


图 2-2 谢尔·庞桑A坝址

根据这些不良的勘探结果，因此决定放弃这个坝址，而在下游较窄处选择了坝址 A（图2-2）进行勘探工作。结果查明：此处冲积层断面的面积仅 4200 平方米，而在 47~48 坝址处则为 12000 平方米。但在坝址 A 处有热水通过冲积层，正是由于这些热水，在 1912 年就冲进过探洞，使得勘探工作不能继续进行。用地球物理方法进行过研究，查明了热水水流形态呈拱形，拱顶与 47~48 坝址处相符合，热水是由下面的三叠纪岩层中渗流出来的。地质研究还查明，在三叠纪岩层中也有河谷再次很深的下切。

进一步研究还表明，河床中的冲积层是久兰斯河古代河床改变时所形成的。虽然颗粒组成不同，但能承受很大的垂直荷重而不发生大的沉陷。该冲积层的渗透系数在 $1 \sim 10 \times 10^{-2}$ 厘米/秒。但在冲积层与基岩接触地带的渗漏量往往较大，其流量约为 200 公升/秒左右。

很显然，如果建筑混凝土坝的话，则必须开挖约 100 米厚的冲积层，加上风化岩体的开挖，这是有很大的困难的；此外，还要对混凝土采取防止热水作用的复杂措施。则坝的造价便是很高的。因此才转而研究利用河床冲积层来筑土石坝的方案，最后实现了这个方案。这个方案有一个重要问题需要解决，即坝基渗漏问题，最后采用在冲积层内进行灌浆的方法，来建造帷幕防渗。

谢尔·庞桑土坝，坝高 122 米，顶宽 10 米，底宽 650 米。心墙工程量为 200 万立方米，心墙两侧的坝体为 1200 万立方米，保护层 10 万立方米。并建成一个地下水电站，厂房宽 17.9 米，高 39.3 米，装机容量为 4×8 万千瓦。

为了建设这个地下水电站，曾进行了岩石力学试验。1954 年进行了水压法试验，其目的是测定石灰岩的变形特性。试洞直径 $d = 3.0$ 米，长 $l = 12$ 米，最大水压力为 10 公斤/厘米²，是在有衬砌的情况下进行试验的。结果表明：坚硬泥灰质石灰岩的弹性模量为 $870 \sim 1300 \times 10^3$ 公斤/厘米²。

同时，在地下厂房顶拱座处进行了应力测量，采用中心钻孔法作部分应力解除。此法是将三个长 200 毫米的指针式引伸仪组成等边三角形而安装于岩壁上的。然后用直径为 56 毫米的金钢钻头在三角形中心钻孔，部分地且逐渐地解除应力，当测点岩体处于弹性阶段时，现场的弹性模量很接近于室内试件的弹性模量值；但当岩体应力几乎全部解除时，这种变化便很显著且不规则。又因为应力是逐渐解除的，就有可能连续地进行应力解除过程的观测。

为了计算岩体的初始应力，需要在试验室作岩石的弹性模量试验。这就推迟了最终成果的取得。因此，曾利用一个小型油压千斤顶（直径为 56 毫米），插入中央钻孔内进行现场试验，但结果不佳。

被试验的岩石为坚硬的黑色泥灰质石灰岩，但被三组主要的裂隙面所切割。室内岩块测定弹性模量为 1000×10^3 公斤/厘米²。

共进行 7 个试点，其中四个试点在地下厂房的顶拱（两点在拱座，两点在拱冠）。由于测得的变形小，岩石对压力及振动敏感，所以几乎所有引伸仪的读数都受到裂隙张开的严重影响。裂隙的存在，在很大程度上混淆了岩体的弹性性能。总的说来，所得的成果变化很大。岩壁测得压应力大于 100 公斤/厘米²，拱顶测得的应力是小于 40 公斤/厘米²的拉应

力——这只能表示裂隙张开，没有实际意义。

还用动力法测得隧洞围岩的扰动破坏区的厚度为 3 米，并且得到不同深度处的纵波速度值如表2-2所示。

表 2-2

距隧洞围岩周边的深度(米)	纵波速度(米/秒)	附 注
0	1000	
1	3000	扰动破坏区
2	4000	扰动破坏区
3	6000	扰动破坏区的边缘

注：平均动力弹性模量为 $475\sim 535\times 10^3$ 公斤/厘米²，且随不同方向而有差异。

二、鲍尔坝、马尔帕塞坝和乌格朗坝^[7, 10, 26, 37]

这是法国的三个拱坝，前两个都是五十年代初期建成的。鲍尔拱坝位于两种不同性质的基岩上，由于认真对待，因而获得成功；而马尔帕塞拱坝的岩基情况，相对地说要简单得多，但由于坝型改变（由重力坝改为拱坝），坝轴线作了改变，却没有进行相应的认真的地质勘探和岩石试验工作，造成失事。这再一次表明：必须尊重唯物论，必须尊重辩证法。

鲍尔拱坝是1952年建成的，位于朵尔顿河上。坝高120米，长390米。坝体体积为66万立方米。坝基为片麻岩及云母页岩，其分布情况如图 2-3 所示。按照试验室研究的结果，采用 $10\times 10\times 10$ 厘米的立方体试件，得到未风化的云母页岩的变形模量 $E_0=23\sim 132\times 10^3$ 公斤/厘米²，片麻岩的 $E_0=90\sim 200\times 10^3$ 公斤/厘米²。

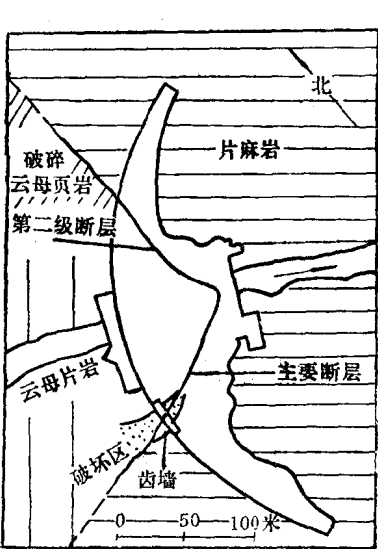


图 2-3 鲍尔坝的布置

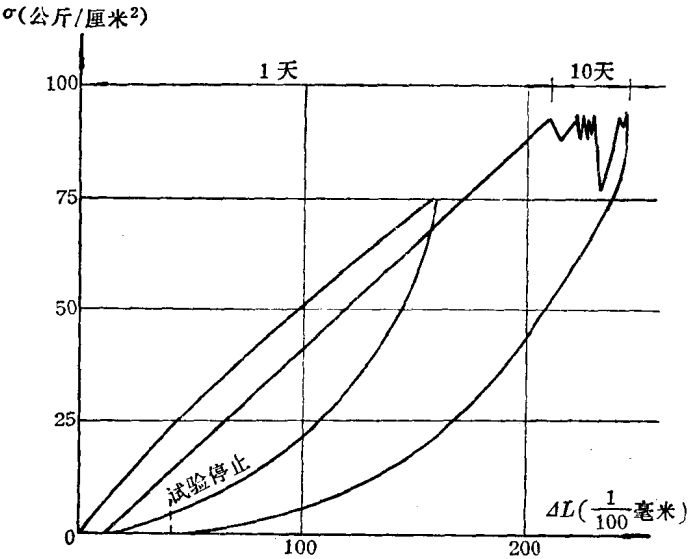


图 2-4 片麻岩的变形曲线

还进行了野外试验，平洞尺寸为 2×2 米，采用四个300吨的活塞式千斤顶进行试验，最大荷载达 100 公斤/厘米²，试验结果如图2-4~2-5所示。可以看出，云母页岩与片麻岩的力学性质具有很大的差别。在荷载为 30 公斤/厘米²时，云母页岩的变形为片麻岩的6.5倍。在野外还可以观察到：开挖出来的云母页岩放在空气中，很快就破坏了。

由于坝体座落在两种力学性质相差很大的岩体上，曾经采取了防止不均匀沉陷的若干措施：限制岩体上的荷载；混凝土的浇筑和岩基清理、开挖等工作平行进行以减少基岩风化；将建筑物分成若干区段，而每一区段放在匀质的岩体上；断层裂隙用钢梁加固等等。图2-6是处理措施之一。

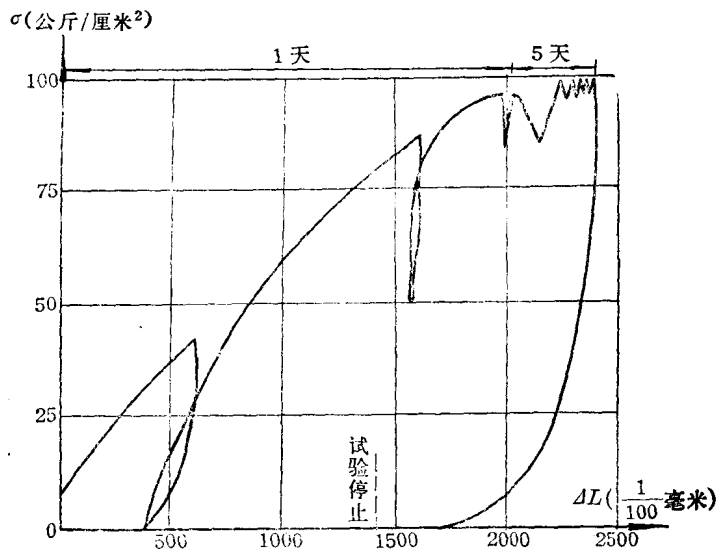


图 2-5 云母页岩的变形曲线

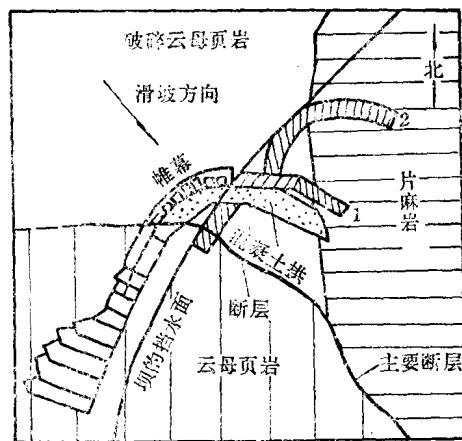


图 2-6 鲍尔坝坝肩的处理

1、2—加固的拱