

《水利水电译文》专题资料之五

土石坝

设计和施工发展趋势

水利电力部水利水电规划设计院

土石坝设计和 施工发展趋势

美 S.D. 威尔逊 著
墨西哥 R.J. 马萨尔

水利电力部水利水电规划设计院

一九八四年五月

计算单位换算系数表

本文中所有的美国通用单位(即英制单位)可以换算成公制, 如下:

英寸	2.54 厘米
英尺	0.3048 米
英里(美国法定)	1.609344 公里
磅(力)	4.448222 牛顿
千磅(力)	4448.222 牛顿
磅(力)/英寸 ²	6894.757 帕斯卡
英尺/秒	0.3048 米/秒
磅/英尺 ³	16.0185 公斤/米 ³
码 ³ (立方码)	0.76454 米 ³
公斤	2.2046 磅
公斤	0.00098 英(长)吨
公斤	0.0011 美(短)吨
公斤/厘米 ²	14.223 磅/英寸 ²
公斤/米 ²	0.2048 磅/英尺 ²
英尺 ³ /秒	0.0283 米 ³ /秒
米 ³ /秒	35.31 英尺 ³ /秒
加仑(美)	3.785 公升
加仑/分	0.063 公升/秒

绪 言

1976年作者应国际大坝委员会国际联络委员会的要求，编写了一篇有关岩土工程技术应用于土石坝规划、设计、仪器观测和运行管理方面目前发展状况的文章。该文实际是对威尔逊(Wilson)及斯奎尔(Squier)1969年在第七届国际土力学和基础工程学会议上有关“土石坝设计和施工技术发展状况”这一报告的更新，以期反映自那时以来在土石坝设计和施工的实践当中所取得的进步和变革。

最初，国际大坝委员会同意发表此文，但后来，主要是由于经费所限，董事会决定不予出版。因此，美国大坝委员会要求美国土木工程师协会用单行本发表，并已由该协会的土工分会的执委会审查批准后在此正式问世。

尽管坝基和坝肩的处理被认为是土石坝工程的主要组成部分，但本报告象其原稿一样，主要涉及土石坝本身的问题。在叙述过去十年中的失事和事故的简短一章后面，安排了关于野外勘测、室内试验、坝体设计、施工以及原型观测与仪表设置等几章；最后一章论述了一些带特殊性的问题。

虽然两位作者来自北美洲，但他们广泛吸取了在世界各地的一些工程实践中亲自取得的经验；此外，还参考利用了在与其它顾问工程师和设计公司接触中得到的资料以及已出版的文献。

对于土石坝设计来说，同行们还未能创立完善的“现代化水平的技术”作为大坝设计的可靠依据，还不能最终保证建筑物肯定是安全的。在土石坝设计中，不能盲目地把一些

简单的设计先例应用到仅仅是地质条件相似的坝址；因为同人工建材相反，天然建材具有多变性，包括其“地质细部构造”（引用众所周知的泰沙基(Terzaghi)的说法)所引起的变化。这对大坝安全是极为重要的，也是容易被忽视的。一定要考虑每一个这种地质细部构造的影响，并且要在设计中考虑适当的预防措施。此外，不存在所谓的“最佳”设计，一定会有很多可供选择的设计方案同样地能够保证大坝的安全。如果请几位第一流的土坝技术顾问分别地研究同一个具体问题，很可能得到有很大分歧的各种不同的建议。

目 录

绪 言	(1)
第一章 过去十年中土石坝的失事和事故	(1)
§1 失事的原因	(1)
§2 坝的检查	(4)
第二章 野外勘探和现场试验	(6)
§1 概述	(6)
§2 地质和地基勘察	(6)
§3 地震危险性的调查	(9)
§4 库区地质调查	(10)
§5 地下水的勘察	(13)
§6 料场勘探	(13)
§7 野外试验	(14)
第三章 室内试验	(23)
§1 概述	(23)
§2 粘性土	(24)
§3 粗粒料	(26)
第四章 土石坝设计	(40)
§1 坝体基本断面的选择	(40)
§2 设计的基本要求	(42)
§3 稳定分析	(43)
§4 渗流控制	(51)
§5 设计中需专门研究的问题	(75)
第五章 施工	(84)

§1	河流的控制	(84)
§2	基础开挖	(87)
§3	坝体材料的填筑和压实	(93)
§4	水下填筑	(100)
§5	块石护坡	(102)
§6	现场质量控制	(103)
第六章	仪表设置、应力-应变分析和坝体原型运行特性	(108)
§1	仪表设置	(108)
§2	应力-应变分析	(112)
§3	地基问题	(118)
§4	坝体运行状态	(122)
第七章	几个专门问题	(134)
§1	分散性粘土	(134)
§2	水库岸坡的稳定性	(135)
§3	尾矿坝	(136)
§4	岩溶灰岩地基	(140)
§5	水库诱发地震	(141)
§6	坝基隐伏活断层	(143)
§7	反滤层设计	(145)
§8	混凝土面板堆石坝	(150)
参考文献		(155)

第一章 过去十年中土石坝的 失事和事故

§1 失事的原因

坝的最重要作用是使水库蓄水，以供防洪、旅游或有计划地放水为发电或灌溉之用。溃坝时，水库中的蓄水失去控制而下泄，这会造成下游生命财产的严重损失。1976年6月5日美国爱达荷州提堂(Teton)坝的失事，造成下游财产的损失约为原工程造价的十倍。

大坝溃决最常见的原因似乎是(美国土木工程师协会/美国大坝委员会 1975年)：

✓ 1. 坝体本身、坝基或坝肩内部细颗粒土壤的侵蚀，以及由于孔隙水压力和水力梯度过大而引起的稳定问题，尤其在坝体下游部位；

2. 由于特大暴雨，溢洪道闸门的不合理操作或设计泄洪能力不足，引起大坝或溢洪道漫顶。

一个较为少见的但却令人极其关心的问题，是在地震时坝体或坝基中饱和的松散颗粒料内将会产生过高的孔隙水压力，而且可能产生液化；其结果是坝体的过度沉降或变形。此外，沿着活断层的地层运动也是一种潜在的危险。

一、由于管涌或内部侵蚀而引起失事的实例

提堂坝是一座高90米具有碾压式风积粉土宽心墙的填筑坝，其心墙填筑含水量小于最优含水量0.5~1.5%。在两坝肩开挖了21米深的截水槽，槽底宽10米，用心墙土

料回填。灌浆盖板位于截水槽底部中心线上；在发生事故的那个断面处，当假定水库水压力通过岩石裂缝而达到盖板上游边缘时，横跨盖板的水力梯度大约为25。一个专门调查组把该坝的失事归咎于沿整个盖板接触面并紧靠盖板附近的极易受侵蚀的土壤的内部侵蚀(见 Chadwick 等人的文章*，1976年)。该小组报告的结论是：

“失事的基本原因可以认为是地质因素和设计因素两者结合造成的；这两者共同起作用，导致了失事的发生。其主要的地质因素是：(1)在坝肩岩体中有大量张开节理；(2)比易受侵蚀的风积土更适合于做防渗体的土料数量不足。设计因素有：(1)渗流控制完全依靠用风积土回填的深截水槽和灌浆帷幕的组合；(2)所选定的坝基截水墙的形状助长了易受侵蚀的回填料发生起拱、开裂和水力劈裂；(3)除了位于截水墙下游的岸坡表面某些张开的大节理用混凝土回填之外，仅仅依靠对防渗材料采取专门压实措施，来防止这些材料沿着张开节理和向张开节理内发生管涌和侵蚀；(4)对于必然要通过基岩和截水墙系统的渗漏，所取的集水措施和安全排泄措施不力。”

不管该坝破坏的机理如何，该调查小组进而阐明：“……本应采取措施，使之无论什么水果真通过时都不会产生危害”。

美国怀俄明州的方顿奈尔(Fontenelle)坝是一座高50米的分区填土坝；当水库蓄水达到设计库容时，右坝肩发生了渗漏。为此，对该区域进行了灌浆和仔细观测。几个月后，渗漏量发展到10~12百万加仑/每天，而且在下游坝面冲出了一个宽80英尺、高150英尺、深60英尺的洞穴。为

* 指书后所列参考文献，下同。

此，将库水迅速通过溢洪道和灌溉渠道泄放，才免于大坝溃决(见《工程新闻记录》1965)。

位于墨西哥圣路易斯波特西(San Luis Potosi)的埃斯康迪特(La Escondide)坝是一座高10米的均质土坝。1972年6月9日，在水库初次蓄水时，该坝由于土层内部严重侵蚀(管涌)而遭到了破坏(见 Benassini 和 Casales 1972年的报告)。大约在12小时内，就有几个坝段溃决，而且贯穿坝体出现约50处大的管涌；未报道有严重的生命和财产损失。对事故的原因虽然指出了可能是由于分散性粘土所致，但这还不是最后的研究结论。

二、漫顶失事的实例

1977年1月19日巴西的帕尔多(Pardo)河上的两座土坝(Euclides da Cunha坝和Armando Salles de Oliveira坝)遭到漫顶失事(《水力发电》1977年报导)；坝下游250平方公里的地区被淹没，受到相当大的财产损失。据报导，该流域发生了万年一遇的洪水。

1972年2月26日美国西弗吉尼亚州巴法罗溪(Buffalo Creek)坝，因溢洪道泄洪能力不够而造成漫坝失事，118人因此丧生。该坝是利用废矿碴筑成的。

三、由于地震活动而几乎失事的实例

1971年2月9日，加利福尼亚州发生了一次强烈地震(里氏6.6级)，震中位于圣费尔南杜(San Fernando)坝下游东北方向约8英里处。该坝高142英尺，是1921年用半水力冲填法建成的。在地震震动将要结束时，在坝基附近以及粘土心墙上游区的水力冲填体的很大区域内，产生了很高的孔隙水压力，致使大量的填土处于液化和低强度状态。西特等人于1975年曾对此次失事作过全面的动力分析。

幸好事故发生时水库只蓄了比一半库容稍多一点的水量，因此未发生漫坝和渗漏的情况。如果该水库蓄水再高几英尺的话，就会在下游人口稠密的居民区造成重大损失。

§2 坝的检查

1972年内若干大坝的一系列失事和几乎失事的事例，引起了公众对蓄水坝失事危险性的关注。因此，美国国会于1972年8月8日颁布了92-367号公法，为了保护人民生命和财产安全，授权陆军工程师团的团部制订一个全国大坝检查计划。根据这一授权，汇编了《全国大坝清册》，包括全美国将近49000座大坝的资料（见Willis 1976年的文章）。由于资金所限，这一法令中关于大坝检查的规定还没有全部实行。

1970年，美国大坝委员会公布了一项“由州监督坝和水库的安全的标准法”。这项法令被认为是向州当局提供了对坝和水库进行适当立法的极好榜样。这项标准法令还为坝和水库在设计、施工、运行、维护、扩建、改建、拆除或报废等各阶段，规定了安全监督措施。

1972年巴法罗溪坝的失事，常常被引用作为例子来说明：如果对大坝进行过详细的检查并且纠正了一些缺陷，或者是放弃使用此坝，那么失事是很可能避免的。

在堤堂坝失事之后，国家科学研究委员会工程技术协会，曾授权大坝安全委员会，审查美国垦务局的大坝安全计划（见参考文献 Safety of Dams, 1977年版）。他们的具体建议看来对大多数从事于大坝设计、施工和监测的机构都能适用。其内容概括如下：

(1) 由单独一个机关负起制订有关大坝安全计划的责任；

(2) 为大坝安全工作提供充足的基金；尤其是有关对滑坡的监视，对坝上危险性较大部位的检查，应急准备，以及收集地质、地震和水力等方面的资料；

(3) 安装监测仪器，监视所有重要大坝的工况；

(4) 聘用有独立身份的工程顾问。

第二章 野外勘探和现场试验

§1 概述

对于土坝和堆石坝设计来说，广泛的野外调查、实验室试验和内业研究都是必需的。最初，这些研究是属于一般性质的，以后则根据研究过程中产生的一些具体问题再进行比较详细的研究。

在准备设计阶段，为在一个或几个坝址上做工程可行性研究并估算工程造价而积累资料。准备设计阶段一旦结束，坝型、坝址、及附属工程选定以后，为了完成设计就需要进一步的详细调研。这些调研为的是弥补已有的地下勘探资料中的某些空缺，并在更大程度上是确定建议采用的土石坝材料的工程性质。

§2 地质和地基勘察

作为这个阶段的第一步，应该取得关于已经建议的一个或几个坝址的所有可以获得的资料，如地质、土壤和地形图等。这些资料通常有航空照片作为补充，从航空照片上可得到更详细的地形资料。航空照片，尤其是立体象对，能提供广阔范围的地面轮廓，其中包括滑坡、地表水系、岩石和土壤露头、以及主要的地质构造现象(例如褶皱和断层)等。经验表明，许多这样的地质构造现象从航空照片上要比从地面上更易于识别出来。侧向扫描声纳照片和陆地卫星照片以及彩色照相和一些专门技术，如红外线的和其它的滤光器，都

得到了日益广泛的使用。

对现有的资料进行研究之后，即制订野外作业计划，以便扩大或增加对坝址条件的了解。这样的野外作业计划包括由工程师和工程地质专家们进行全面踏勘，以及通常由一系列钻孔组成的地下勘探工作。钻孔大部分是布置在坝体范围内和溢洪道、厂房及其它主要工程建筑物地区。然而，也经常布置一些位于其它地点的钻孔，以便能提供关于地下水条件、断层带、古河道等地质特征以及类似性质的其它特征的专门资料。贯入试验（静力的或动力的）可以（取决于土壤的性质）提供有用的资料，其试验费用便宜，且能迅速完成。

有时，把各种装置，例如光学的、摄影的或电视的探测器，放入钻孔内，就地检查基岩的内部特性，用以判定各种破碎带和软弱夹层、岩层接触面和孔洞的方向。1976年巴里博（Baribeau）描述了加拿大的马尼夸根（Manicouagan）5号工程采用钻孔电视装置的有趣实例。这些装置被用来检查位于主坝下面岩石中的许多砂层和广泛分布的冰川回弹裂隙的范围及特性。伦德格林（Lundgren）等人于1968年总结了钻孔摄影机和电视装置的当代技术水平。

在设计的过程中，还可以开挖竖井、平洞和沟槽，以便较详细地检查地下的地质现象。墨西哥的英菲尔尼罗（Infiernillo）坝，在河道下面开挖的探洞后来用作灌浆，最后用作排水。坝肩平洞后来改造成排水廊道。大孔径的萼状钻孔可供人们用肉眼检查地下地层。

可以使用地球物理探测，以补充取自钻孔、探洞和竖井的资料。这些探测有助于描述覆盖层的厚度和风化岩层，有时还可描述岩石的质量，即岩石的节理、破碎带和层理等的发育程度。物探可包括折射波法及地面电法、电测井法

和声测井法。往往是横波和纵波两种波速都进行测定。关于现场岩石特性的地球物理探测，在1963年已由汪特兰德(Wantland)作过叙述。

为了得到天然土壤在较大应变情况下的剪切模量，研究出两种方法(见Wilson等人1977年的文章)。一种方法是脉冲试验，它是用密集的波形量测，来确定剪切波速的变化；这种波形和剪切波速都是地层深度和应变两者的函数。另一种方法是回归运算法，这种方法是逐步校正假定的模拟参数直到计算的与野外实测的结果相一致为止。将剪切换向和信号增强技术与常规的地面物探结合使用，有助于更明确地鉴别剪切波的初至时间。

美国华盛顿州的莫西洛克坝(Mossyrock)，在开挖前对许多钻孔进行了声波探测；在浇筑混凝土和水库蓄水的过程中也进行了几次探测。钻孔位于坝的底下，穿过混凝土延伸至基础廊道。

在莫西洛克坝的物探中，最有趣的一个情况可能是从一个观测时段到另一个观测时段时，微震记录上信号幅度的变化。波幅的加大表明了岩石中节理和破碎带的闭合。通过肉眼比较波幅的变化，就可以定性地确定施工开挖的影响，以及后来坝的自重荷载和水库荷载作用的影响。不出所料，通过对探测资料的分析表明，在开挖期间岩石中节理和裂隙一般是张开的，在以后承受荷载期间则是闭合的；但显示的变形随着岩石的种类不同而不同。在某些情况下，所观测到的振幅变化与所予料的结果相反。到目前为止，对于在水库蓄水期间所收集到的许多资料还没有作出评价，而观测结果一项也未公布(见Fucik 1969年的文章)。

所有地质勘查中最重要的最终成果是地质填图，此图表

明工程区域内暴露的地表材料的特性和分布情况，其中包括岩石露头和土壤覆盖层，以及各种岩石的构造特征，例如断层、褶皱和地层特征等。泉水和沼泽地区，连同其它重要项目，例如在水库岸边、溢洪道和厂房区域内现有的或潜在的不稳定因素等，也被详细标明位置。在地质剖面上，还标出基岩面的轮廓以及覆盖层和岩石的有关特性。

§3 地震危险性的调查

下圣弗尔南德(Lower San Fernando)坝在1971年2月9日地震中发生的滑坡，使人们将注意力集中在地震时与地层运动有关的大坝安全问题。这些问题可分为两类：①沿与坝轴线相交断层发生的地面运动；②坝体及坝基对地震所引起的地面活动的反应。

为估算地震危险性所需野外调查的要点，将在以下几节叙述。

一、对区域地质的评价

所需的区域地质研究在上节中已有叙述。

二、断层位置的确定和对断层的评价

断层的位置系通过查阅文献、踏勘和遥测分析来确定。在世界上大部份地区，通常都能应用航空摄影、陆地卫星影像和空间试验室照片。这些照片由侧向扫描声纳照片和航空目测来加以补充。路堑和岩石露头常可提供肉眼能见的断层证据。

根据收集到的全部资料，进行野外绘图来确定可识别的和可疑的线性构造位置，重点是可能对坝址本身造成影响的断层。为了证实断层的存在、它们的性质和最新的位移(如

果有的话), 需要开挖探槽。断层发生的年代需要在专门的实验室内通过专门技术来测定。

三、对地震活动性的评价

对历史地震的分类和制图, 可根据当地可收集的资料以及设于科罗拉多州博尔德市的美国国家地理和太阳-地球资料中心的近期地震资料。

水库诱发地震可能性的预测方法将在第八章第五节中讨论。这种预测可能需要专门顾问的帮助。

四、监测计划

为了探测在工程区域内正在发生的地壳变形和(或)地震活动, 可能最好是设置一套监测计划, 并使它真正生效。在微震活动情况不详的地区, 微震监测网站的设置工作, 需要协调一致而有计划。它应考虑到网站的工作基地、仪器选择、和计算技术方面的保证。在某些情况下, 在某一特定位置上可安装一、两台仪器, 运行譬如三个月后, 再转移到新的位置。

特别注重垂直量值的大地测量监测, 只能被看作长期监测计划的一个部份。这就需要在坝址周围和水库区域内布置一等三角网; 同时由横跨活断层布设的应变仪和大量的测斜仪予以补充。

§4 库区地质调查

意大利瓦依昂特(Vaiont)水库(见克尔希 1964 年文章)和其它水库的失事, 如美国加利福尼亚州巴尔德温山(Baldwin Hills)水库的失事(见Jessup 1964年文章和Casagrande、Wilson 和 Schwantes 1972 年文章), 使人们更多地注库岸坡和库底不稳定所具有的危险性。目前人们已清楚地