

土石坝设计与 施工的新趋势

[美]S.D.威尔森著 谭艾幸译
[墨]R.J.马赛尔著 戴耀本校

水利电力出版社

S.D. Wilson R.J. Marsal
Current Trends in Design and Construction
of Embankment Dams
New York, 1979.

土石坝设计与施工的新趋势

[美]S.D. 威尔森 著 谭艾幸译
[墨]R.J. 马赛尔 著 戴耀本校

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

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印刷

*

787×1092毫米 32开本 5.75印张 122千字
1986年9月第一版 1986年9月北京第一次印刷

印数0001—3280册 定价1.05元

书号 15143·6000

目 录

1. 引言	1
2. 过去十年中的失事和事故	3
2.1 失事原因	3
2.2 坝的检查	6
3. 野外勘探和现场试验	8
3.1 概述	8
3.2 地质及基础勘察	8
3.3 震害调查	11
3.4 水库研究	12
3.5 地下水勘察	14
3.6 料场的勘探	15
3.7 野外试验	16
4. 试验室试验	24
4.1 概述	24
4.2 粘性土壤	25
4.3 颗粒材料	27
5. 坝体设计	42
5.1 坝体的基本断面选择	42
5.2 设计基本要求	44
5.3 稳定分析	45
5.4 渗流控制	53
5.5 设计上特殊考虑的问题	77
6. 施工	85
6.1 施工导流	85

6.2	基础开挖	88
6.3	土石料的填筑和压实	94
6.4	水下填方	100
6.5	抛石护坡	102
6.6	现场质量控制	103
7.	观测仪器、应力-应变分析及现场操作	108
7.1	观测仪器	108
7.2	应力-应变分析	112
7.3	基础问题	117
7.4	填筑坝的特性	121
8.	特殊问题	133
8.1	分散性粘土	133
8.2	水库边坡稳定	134
8.3	矿尾坝	135
8.4	岩溶型灰岩基础	138
8.5	水库诱发地震	140
8.6	地基内的潜在活动性断层	142
8.7	反滤层设计	143
8.8	混凝土面板堆石坝	148
9.	致谢	153
	参考文献	154

1.引 言

一九七六年，国际大坝委员会（ICOLD）国际关系分委员会要求作者编写一本介绍把岩土工程学的最新发展应用于堆石坝和土坝的规划、设计、观测仪器布置、监测及运行等方面的书。实际上，该文是对Wilson和Squier两人于1969年在第七届国际土力学和基础工程会议上有关“土坝和堆石坝设计与施工的技术现状报告”所作的刷新，意在反映从那个时候以来设计和施工实践中的改进和变化情况。

这篇文章原已被国际大坝委员会批准出版，但后来董事会决定不予出版，主要是由于经费所限。后来美国大坝委员会要求美国土木工程师学会作为分卷予以出版，经岩土工程部执行委员会审核和批准后，这篇文章才得以出版问世。

和原来的那篇文章一样，这份报告主要是讲坝体本身，虽然基础和坝肩的处理也看作是坝体的重要组成部分。在用一章的篇幅简述过去十年中的失事和事故之后，接着用几章讲述野外勘探、试验室试验、坝体设计、施工、现场作业及观测仪器布置等。最后一章谈了一些特殊问题。

虽然两位作者都来自北美，但他们主要还是根据自己从全世界的工程中所获得的经验。此外，他们还利用了通过个人与其他咨询工程师和设计公司接触所获得已出版的有关文献。

在土坝和堆石坝设计方面，设计界尚未很好地建立起把现代最新技术作为设计大坝的可靠基础，也不敢保证由此而设计出来的结果就是一个安全的建筑物。不能盲目地在具有

类似地质条件的坝址上简单地使用“先例”，因为，千差万别的天然材料与人造建筑材料大不相同，具有“细微地质特征”，从坝体安全角度来看，可能是极为重要的，有时却被轻易地放过了。所以，每个细微特征的影响都必须加以考虑并应在设计中采取适当的防护措施。另外，并不存在什么“最好的”设计之类的事物，有许多不同的设计比较方案都可能同样起到保证大坝安全的作用。如果有人聘请几位权威土坝咨询人士，分别独自审查某一特定问题，那么他可能得到各种不同的、差距很大的建议。

2. 过去十年中的失事和事故

2.1 失事原因

坝的最重要作用是把水蓄在水库里，为防洪、娱乐或为发电、灌溉、供水之用。这种贮蓄起来的水，由于坝体一旦溃决，就可以使下游的财产遭灾难性的毁坏。一九七六年六月五日美国爱达荷州Teton坝的失事，使下游财产蒙受的破坏和损失十倍于这座工程的造价。

坝体遭到破坏的最普遍的原因可认为是（据1975年美国土木工程师协会/美国大坝委员会）：

1) 坝体本身、基础或坝肩发生的细粒土壤的内部侵蚀，及由于过大的孔隙压力和水力坡降，特别是在坝体下游部位的底部所引起的稳定问题。

2) 由于非常暴雨、溢洪道闸门操作运用不当或溢洪道设计泄流量不够等所引起的坝顶或溢洪道的漫溢。

一个不太普遍，但非常值得关心的原因是：当发生地震时，不论是基础中或坝体内，由于饱和松散粒料组成的层次中产生的大孔隙压力或可能发生的液化，其后果可能是坝体的过度沉陷或变形。此外，沿活动断层的地动也是一个潜在的危害。

2.1.1 管涌和内部侵蚀引起失事的例子

提磨坝是一座90m高的土坝，有一个宽风积土碾压心墙，上坝时含水量比最优含水量低0.5~1.5%。两坝肩各开

挖了一个21m深的截水槽，其底宽为10m，接着用心墙料回填。在齿槽底中央部位设置了一道灌浆承压盖板，假定库水压力通过岩石裂缝能够传递到盖板的上游前沿，那么，溃决处断面上横跨盖板的水力坡降大致为25。此坝的失事原因已由一个独立的工作组归结为紧邻灌浆盖板并横跨整个接触面宽度的易碎的和极易侵蚀的土壤内冲刷所致（见 Chadwick 等人于1976年发表的文章）。工作组的报告总结出：

“失事的基本原因可以看作是地质因素与设计所作的决定的结合，这两者的结合便发展成失事。主要的地质因素是：（1）坝肩岩石有大量的裂缝；（2）除极易受冲蚀的易碎的风积土外，缺乏更为合适修筑坝体不透水土料。设计的主要决定包括：（1）渗漏控制完全依赖于回填风积土的深切齿槽与一道灌浆帷幕的联合作用；（2）所选择的齿槽几何形状助长了在易碎的和易遭冲蚀的回填土中产生架空、开裂和水力破坏；（3）依赖于不透水材料的特殊碾压，作为仅有的、防止沿张开节理和深入到张开节理内部的材料发生管涌和侵蚀的保护措施（除了齿槽下游坝肩面上某些最宽的节理之外，齿槽的这一部位是用混凝土填筑的）；（4）有关通过基岩和截水墙系统所必然产生的渗漏水的水汇集与安全排放的规定是不力的。”

不管失事的实际机理如何，专家组进一步指出：“理应在不论宣泄多大流量时，均应具备保证安全无恙的措施。”

位于怀俄明州的Fontenelle坝是一座50m高的分区土坝。当水库达到某设计蓄水库容时，在右坝肩产生了渗漏。对此部位进行了灌浆并仔细观察，几个月之后，渗漏已发展到了每天达1000万至1200万加伦，并在坝的下游面冲出一个80英尺宽、150英尺高和60英尺深的洞穴。于是通过溢洪道和灌

溉渠道，将水库迅速放空。这样，坝就没有溃决（1985年“工程新闻记录”杂志）。

位于墨西哥 San Luis Potosi 的 Escondida 坝是一座 10 m 高的均质土坝。1972 年 6 月 9 日，第一次蓄水时，由于严重的内部侵蚀（管涌），使它遭到了破坏（见 Benassini 和 Casales 两人 1972 年的文章）。约在 12 小时内，有几段发生了决口，产生了 50 条大型管涌道，但未见有关严重损失和伤亡的报道。尽管他们指出有分散性粘土存在的这一事实，但确定失事起因的研究尚未得出结论。

2.1.2 漫顶失事的实例

在巴西圣保罗州 Pardo 河上有两座土坝（Euclides da Cunha 坝和 Armando Salles de Oliveira 坝）于 1977 年 1 月 19 日遭漫顶冲毁（“水电”杂志，1977 年）。该坝下游 250 (km)² 面积被淹，造成了相当严重的财产损失。据报导，这是该流域内发生的万年一遇洪水。

美国佛吉尼亚州西部的 Buffalo Creek 坝由于溢洪道过水能力不够，于 1972 年 2 月 26 日，因漫顶而失事。造成 118 人死亡。这座坝是用矿山废渣修建的。

2.1.3 由于地震活动险遭失事的实例

1971 年 2 月 9 日，发生了一次强烈地震（里氏 6.6 级），震中位于美国加利福尼亚州的 Lower San Fernando 坝东北 8 英里处。坝高 142 英尺，原建于 1921 年，系为一座半水力冲填坝。在地震振动快要结束时，地震导致靠近坝体底部的大片水力冲填区和粘土心墙的上游侧产生非常高的孔隙压力，因而这种材料的大部分都处于液化或强度非常低的状态。Seed 等人，于 1975 年曾对这次失事做过综合动力分析。幸好失事时水库的蓄水量只有满库容的一半多一点，因此，水

没有漫过坝顶，亦未产生漏水。如果当时水库水位再多蓄几英尺，就可能在人口稠密的下游村镇造成一场大灾难。

2.2 坝 的 检 查

1972年发生的一系列垮坝及接近于垮坝的事件引起了公众对蓄水坝带来的危害的关切。结果，美国国会于1972年8月8日颁布了第92-367号公共法，授权陆军工程师团司令执行检查大坝的全国计划，目的在于保护人们的生命和财产。根据此法令授权编纂的“全国大坝编录”包括了美国约49000座坝的数据（Wills, 1976年），但由于资金所限，法令规定的检查条款并未全面实施。

美国大坝委员会（USCOLD）于1970年出版了“各州对大坝及水库安全监督的典型法律”。这部法律被看作为州政府过问大坝及水库提供充分法律根据的极好实例。美国大坝委员会的这部典型法律集为大坝和水库的设计、施工、运行、维修、扩建、改建、拆除或废弃等各个阶段都提供了安全监督条例。

1972年Buffalo Creek坝的失事常被引为只要有详细检查并把大坝存在的问题加以纠正或索性放弃使用该坝，就很有可能避免失事的实例。

提唐坝失事后，全国研究委员会的工程会议指定了一个大坝安全委员会审查美国垦务局的大坝安全计划（见“大坝的安全，1977”）。看来他们的具体建议适用于大多数从事大坝设计、施工及监视的机构。其内容概要如下：

- 1) 建立由一个单独的单位对大坝安全工作负责的责任制。

2) 为大坝的安全所采取的措施, 特别是滑坡监视、检查处于高度危险地点的大坝、抢险准备及地质、地震、水力学数据的收集, 提供充足的资金。

3) 设置仪器, 监视大坝的所有主要性能。

4) 使用独立的咨询人。

3. 野外勘探和现场试验

3.1 概 述

为设计土坝和堆石坝，需要做广泛的野外调查、试验室研究和室内研究。这些问题开始都是一般性的，但随着研究过程中具体问题的出现，这些工作于是变得更为深入。

在初设阶段，为了分析工程的可行性及估算工程造价，在一个或几个坝址积累数据。一俟这个阶段结束，并且选定了坝型和坝址以及附属建筑物的位置之后，便需要深入进行更详细的研究来完成设计。进行这些研究的目的在于弥补已有反映地下情况资料的不足和更为广泛地确定所建议的填筑材料的工程特性。

3.2 地质及基础勘察

作为这个阶段开始的一步，要获得全部关于拟议中的一个或几个坝址的现有资料，如地质、土壤及地形图等，一般都使用能提供更详细地形资料的航空照片来补充这些资料的不足。航空照片，特别是立体双像照片（Stereo-Pairs），能提供广阔范围的地形，包括滑坡、地表水、岩石和土壤露头及主要构造特征，诸如褶皱或断层。经验表明，这些特征中，有许多在航空照片上比在陆地上更加容易识别。目前，侧向扫描声纳照片、陆地卫星影像及彩色照片、特种技术，如红外线和其它滤波器的应用正在增加。

通过对现有资料的研究，制定出野外作业方案，这样做

可以扩大和增加对现有坝址条件的认识。这种野外工作方案包括由工程师和工程地质学家们进行的综合野外踏勘以及一个通常包括一系列钻孔的地下钻探计划。大部分钻孔均布置在坝体和溢洪道、电站，以及其他主要建筑物范围以内。然而，也常常选择其它部位，以便提供专门的资料，如地下水情况、断层带、地下暗河等特征以及其它类似的自然特征。圆锥贯入试验（静态或动态均可）可以根据土壤的性质，提供有用的资料，这种试验既省钱而又能迅速的完成任务。

有时也把各种装置，如光学的、摄影或电视探头下到钻孔内，用来检查原状基岩的特性，如断裂组及夹层的方位、软弱带、岩石接触面和孔隙。Baribeau于1967年曾描述了在加拿大 Manicouagan 第五级工程中使用钻孔和电视装置的有趣例子。这些装置是用来检查主坝基础岩中的许多沙夹层、广泛分布的冰川回弹断裂的范围及特性的。Lundgren 等人于1968年概括地介绍了钻孔照相机和电视装置的最新发展状况。

在设计向前进展的同时，可以开挖竖井、平洞和探槽，以便更详细地检查地表以下的特征。在墨西哥 El Infiernillo 坝开挖的河底探洞后来用于灌浆，最后又用来排水。坝肩上的平洞后来改成了排水廊道。通过大口径十字板钻孔，可以对地下材料进行直观检查。

地球物理勘探可用以扩大从钻孔、探洞及竖井所获资料的范围。这种勘探有助于判断覆盖层的厚度、风化岩石带，在某些情况下，还可以判断岩石的质量，即节理、裂隙及层理。物探计划可包括反射法以及电阻率、孔内、孔口和声波测井勘探。此外，还经常做P波和S波速度的确定。Wantlan于1963年曾介绍了野外岩石特性的地球物理勘探方法。

Wilson等人于1977年已研究出两种用于取得原状土在大应变情况下的剪切模量的方法。一种方法是脉冲试验，它以间距很小的波形测量来确定剪切波速的变化，两者都是深度和应变的函数。另一种方法是反算法，它可以改正假设的模型性质，直计算到与现场测量的频率特性一致时为止。利用反复剪切及信号增强技术与常规孔口物探，能够更主动地识别出第一个波至时间。

在华盛顿州的Mossyrock坝，开挖前及开挖之后，在许多钻孔中都做过物理勘探，在浇注混凝土及水库蓄水期间也做过几次物理勘探。这些钻孔都位于坝底并穿过混凝土一直延伸到基础廊道。

在毛西若克坝的地球物理勘探中，也许最关心的是微震计信号的振幅从一个读数周期到另一个读数周期之间的变化。波的振幅增大表示岩石节理和裂隙的闭合。通过直观比较上述振幅的变化，就有可能从定性方面确定开挖、坝的死荷载及水库荷载带来的影响。如所预料的那样，分析的结果表明：一般来说，在开挖时，节理和裂隙张开，而在随后的加荷时闭合。但是，所指示的变形并不均匀，而随岩石种类不同而异。在某些情况下，观测到的振幅变化所表示的与所预料的结果刚好相反。水库蓄水期间所收集的数据大部分尚未进行分析，也未公布过任何结果（见Fucik于1969年发表的文章）。

所有物探最重要的最后结果是绘制一张地质图，上面示有工程区域范围内出露地表的材料的特性及其分布，包括岩石露头、覆盖层及岩石的各种结构特性，如断层、褶皱及地层岩性。泉眼及沼泽区亦应与其它有意义的项目如水库边缘、溢洪道和厂房地区现有的或潜在的不稳定性等一起仔细

地标绘在图中。在地质横剖面图上，基岩埋藏深度及覆盖层和岩石有关的特性均应加以描述。

3.3 震 害 调 查

1971年2月9日地震期间，Lower San Fernando坝发生的滑动引起了对地震时地壳运动对大坝安全影响的注意。这些问题可以分为两类：1)沿穿过坝轴线断层的地壳运动；2)由于地震，大坝及其基础对地壳运动的反应。

以下几节概述判断震害所需要的野外调查的基本要点：

3.3.1 区域地质的评价

对区域地质需要进行的研究已在第3.2节内做了说明。

3.3.2 断层的位置及评价

断层的位置可以通过查阅文献、踏勘及遥感分析来确定。目前，在世界的大部分地区通常均可获得航摄照片、陆地卫星图象及航天站照片。上述资料还可用测向扫描相片和航测加以补充。从道路开挖和岩石露头中经常可以直接看到断层。

根据全部已有的资料，进行野外填图，以便判明所有能够识别出的和悬而未决的断层位置，重点是对坝址本身可能具有潜在影响的那些断层。为确定断层的存在、它们的特性以及近期位移量（假如有的话），还需挖探槽。年代测定可在专业试验室内使用专门技术来进行。

3.3.3 地震的鉴定

历史地震事件的编目和绘图可以根据当地已有的资料 and 从美国科罗拉多州鲍尔德市美国国家地理和太空-地球数据中心发布的近期地震资料来进行。

预测水库诱发地震可能性的方法将在第8.5节中讨论。

这种鉴定可能需要专门咨询人员的帮助。

3.3.4 监测计划

最好能够制定并执行一项监测计划，用来探测工程地区范围内正在进行的地壳变形（或）地震活动。在对微地震一无所知的地区设立微震监测网需要做一番协调和计划部署，它应包括监测网的工作基地、仪器选择及后勤支援。在某些情况下，可在特定的地点安装一两台仪器，比如说使用三个月后再移到其它新的地点。

大地监测，特别是着重于垂直向的测量，只能被认为是长期监测计划的一部分。这需要在坝址和库区周围建立一个一等三角网，辅以跨越活动断层的应变计及一些测斜仪。

3.4 水 库 研 究

意大利Vaiont坝的重大事故（见Kiersch1964年的文章）及其它一些坝的失事，如美国加利福尼亚州的Baldwin Hill坝（见Iessup1964的文章和Casagrande等三人1972年的文章），业已引起人们加深对水库边坡和坡脚的不稳定性造成灾害的注意。现在人们已经注意到必须把地质调查加上岩土力学研究用于估计在水库库岸观察到的地质特征以及水库蓄水后这些特征会引起怎样的反应和变化。

自从发生Vaiont坝大滑坡后，又发生了一些由库水触发的水库边坡大规模滑动的事例。Breth(1967)和Lauffer等人(1967)等都曾描述过Gepatsch坝在其水库初次及以后各次蓄水时大体积边坡滑入库中的运动情况。在大约1000米的范围内，约有2000万 m^3 的冰碛和坡积物参与滑动。如Lauffer等所指出的那样，曾进行过广泛的勘探工作，包括钻孔、地震测量和开挖探洞。也做过分析和模型试验，后者

的目的是估计在水库内滑坡产生涌浪造成迅速失事的影响。研究表明，滑动是由静水扬压力触发的，如果没有灾难性的滑动是不太可能出事的，因为朝库内方向的滑动有助于恢复平衡。

Mizukosh等人(1967)讨论了在日本某些库岸所进行的广泛地质研究。它们把许多现有的不稳定现象归结为由早期的结构运动和在坡脚形成深冲蚀谷造成的底部基岩大面积开裂和继之而来的松动。所有这些特点又伴随以大雨、地震及浸水，从而助长了产生边坡移动。

老的滑坡很有可能被水库蓄水和泄降所复活。沿墨西哥Santa Rosa坝的水库上游为比较平缓的火山凝灰岩和流纹岩岸坡，那里就有许多像这样的事例发生。跨过上部悬崖陡壁设置精密水平应变计，可以连续地监视移动的速度。随着水库不断蓄水，移动逐渐地减少(见Marsal1969年的文章)，目前也不打算做任何处理。

美国的各级政府机构已经采取了积极步骤防止类似Vaiont坝的那样灾难。美国加利福尼亚州1965年的法律中强调要求对水库的库岸给予特别的注意(见Jansen1967年的文章)。垦务局已采用了一项旨在减少水库内可能发生破坏性滑坡的计划。对现有的水库，这项计划要求驻现场官员检查位于有可能发生滑动区域的水库库岸，如果这些地方过去曾经出现过一些非常情况，诸如反常的大雨或非常长的雨季、春季特大径流、水库水位骤降或长时间持续的波浪作用等。对于新建的水库，当水库开始蓄水时，要做定期检查，至少要在蓄水和泄降的头几个季节内继续下去，至少直到经历过最高水位和最大泄降的情况为止(见Dominy1967年的文章)。

在美国蒙大拿州的利比坝，施工期间曾在左坝肩上部发