

基于变形安全防控的 高土石坝抗震安全评价

李红军 严祖文 杨正权◎著



科学出版社

基于变形安全防控的高土石坝 抗震安全评价

李红军 严祖文 杨正权 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕我国西部大开发、西电东送及南水北调等战略需求,对坐落于西部地震高发地区一大批正在或即将兴建高土石坝水电项目的抗震安全性进行深入研究。对高土石坝地震动力变形分析方法、抗震加固措施及安全评价等关键问题开展了系统的研究工作,进一步发展了高土石坝地震永久变形分析方法,为高土石坝基于变形安全防控的抗震设计奠定了基础。

本书可以作为土木工程、水利水电工程、交通工程,特别是岩土工程专业学生的教材或参考书,也可以供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于变形安全防控的高土石坝抗震安全评价/李红军,严祖文,杨正权著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043957-4

I. ①基… II. ①李…②严…③杨… III. ①高坝-土石坝-抗震-安全评价
IV. ①TV641.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 056492 号

责任编辑:钱 俊 周 涵 / 责任校对:彭 涛

责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:244 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国是世界上水能资源最丰富的国家,水电开发总量还余约 4.2 亿千瓦,规划到 2020 年开发 1.7 亿千瓦。而我国的水能资源 80% 以上都分布在西部地区,且开发利用率不足 10%,这对于推进“西部大开发”战略决策,实现“西电东送”,推动西部社会经济发展是重要的优势资源。目前,西部地区金沙江、雅砻江、澜沧江以及大渡河等流域一批超高土石坝工程正在规划建设中,如 245m 古水堆石坝、265m 虎跳峡堆石坝、295m 两河口堆石坝、314m 双江口堆石坝等。这些高坝大库工程对合理开发利用水资源,保证国民经济的可持续发展有着极其重要的意义。然而一旦这些工程失事所造成的生命财产损失和生态环境破坏也将是灾难性的。我国是一个多地震国家,西部地区断层发育多,地震环境复杂,地震的强度和发震频度都很高。据中国地震局统计,我国近代 82% 的强震都发生在该地区。从 20 世纪以来,在该地区就发生过 17 起 7 级以上的大地震,其中最为典型的为 2008 年 5 月 12 日发生的汶川大地震和 2010 年 4 月 14 日发生的玉树大地震。在如此复杂地震区修建超高土石坝,既缺乏先例,也少有国外经验可借鉴。而超高土石坝一旦遭受强震溃决,将给下游地区的人民生命财产安全和环境带来极其严重的危害。在 5·12 汶川大地震中,据统计全国共计有 2385 座水库受损,其中以紫坪铺面板堆石坝最为典型,坝高 156m,距汶川地震震中仅 13km,在超设计地震荷载作用下受损较为严重,其主要震害表现在坝顶震陷(73cm)和开裂,分期面板错台和防渗体拉压破坏。因此,对强震区域修建超高坝的抗震安全问题必须给予足够的重视,采取合理有效的分析方法,进行针对性的抗震安全性验算和必要的抗震加固措施,以预防或降低未来可能遭受破坏性地震时发生的损害或溃坝风险。

迄今为止,在传统的土石坝抗震安全评价中,工程师们多基于现行的《水工建筑物抗震设计规范》给出的最小允许安全系数衡量其抗震安全性。事实证明,这类评价方法无法反映坝体的动力响应特性及地震输入特性,得到的安全系数也不能充分反映坝体的抗震安全度,基于地震变形控制的高土石坝抗震设计代表着未来的发展方向。振动台模型试验结果和震害实测资料表明,地震引起的变形与高土石坝的抗震安全性息息相关,积极发展基于变形安全防控的高土石坝抗震稳定分析具有重大的工程意义和社会意义。

本书围绕着我国西部大开发、西电东送及南水北调等战略需求,结合我国西部地区正在或即将兴建一大批位于地震高发地区的高土石坝水电项目关于抗震安全性的工程需求。在国家自然科学基金重点项目“高土石坝变形分析与安全控制”(50639060),国家自然科学基金青年基金“高土石坝加筋坝体安全评价与极限抗震能力研究”(51009021)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室的资助下,对高土石坝筑坝堆石料动力变形特性、地震动力变形分析方法、抗震加固措施及安全评价等关键问题开展了系统的研究工作,完善了高土石坝地震永久变形分析方法,为基于变形安全防控的高土石坝抗震设计奠定了基础。

全书共8章。第1章简要回顾了当前国内外高土石坝抗震安全评价的研究现状。第2章讲述了目前常用的几种高土石坝动力响应分析方法,重点探讨了坝料动力特性的围压依赖性对高土石坝动力响应的影响。第3章阐述了高土石坝整体地震变形计算方法,在传统方法的基础上提出了考虑模量逐步软化的拟静力变形分析法。第4章介绍了高土石坝坝坡地震滑动位移计算方法,包括“解耦型”“耦合型”和“薄层单元型”Newmark 滑块位移法。第5章重点介绍了土工格栅等新型加筋材料在高土石坝抗震设计中的应用。第6章建立了基于塑性滑移变形安全控制的高土石坝抗震加固措施安全评价方法。第7章探讨了高土石坝的极限抗震能力和地震变形安全控制标准。第8章详细介绍了基于变形安全防控的抗震安全评价方法在在建和拟建的高土石坝工程中的应用。

本书在编写过程中,得到迟世春教授、赵剑明教授以及中国水利水电科学研究院岩土工程研究所全体同仁的支持和帮助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,本书难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

李红军

2015年3月17日

目 录

前言

第 1 章 土石坝抗震安全	1
1.1 抗震安全评价内容	3
1.1.1 典型震害	3
1.1.2 抗震防护措施	4
1.1.3 抗震分析方法	4
1.1.4 地震变形分析	5
1.1.5 拟静力分析	6
1.2 土石坝抗震性能评价	6
1.2.1 稳定分析	6
1.2.2 变形分析	7
1.3 土石坝抗震安全评价的发展现状	7
1.3.1 土石坝震害	7
1.3.2 土石坝抗震安全评价标准	14
1.3.3 土石坝抗震工程措施	15
参考文献	16
第 2 章 高土石坝动力响应分析理论研究	18
2.1 动力分析本构模型	18
2.1.1 等价线性动力分析模型	19
2.1.2 动力方程的建立	21
2.1.3 量化记忆动力分析模型	25
2.1.4 真非线性动力分析模型	30
2.2 动力特性参数的围压依赖性	31
2.2.1 动剪切模量的围压依赖性	33
2.2.2 等效阻尼比的围压依赖性	35
2.3 改进的动力分析模型	37
2.4 围压依赖性与动力响应的相关性	38
2.4.1 动剪切模量和等效阻尼比	40
2.4.2 最大绝对加速度	40
2.4.3 永久变形	42
2.4.4 液化	42

参考文献	43
第3章 高土石坝地震变形分析	45
3.1 残余应变速势	45
3.1.1 紫坪铺坝料动应力和残余应变的关系	46
3.1.2 吉林台坝料动应力和残余应变关系	47
3.1.3 关门山和瀑布沟坝料动应力和残余应变关系	47
3.1.4 糯扎渡坝料动应力和残余应变关系	48
3.1.5 长河坝坝料动应力和残余应变关系	49
3.2 地震变形分析方法	51
3.2.1 简化分析法	51
3.2.2 软化模量法	51
3.2.3 等效节点力法	52
3.2.4 等价惯性力法	52
3.3 基于模量软化的地震变形分析	53
3.3.1 残余应变计算模式	53
3.3.2 残余振动孔压计算模式	54
3.3.3 残余变形计算模式	54
3.4 验证与分析	55
3.4.1 计算模型和参数	55
3.4.2 计算结果与分析	56
参考文献	60
第4章 高土石坝地震滑移量分析	62
4.1 “解耦型”地震滑移量分析	63
4.1.1 潜在滑动体的位置及其平均屈服加速度的确定	64
4.1.2 “解耦型”Newmark 滑块位移法	73
4.1.3 验证与分析	81
4.2 “耦合型”地震滑移量分析	88
4.2.1 基于摩擦滑移机理的“耦合型”滑块分析	90
4.2.2 引入“薄层单元”的耦合滑移分析	103
参考文献	109
第5章 土工格栅的性能及其工程应用	112
5.1 土工格栅简介和特点	112
5.1.1 土工格栅简介	112
5.1.2 土工格栅特点	112
5.2 土工格栅的分类	113
5.2.1 塑料土工格栅(冲孔拉伸一体格栅)	113

5.2.2 钢塑土工格栅	114
5.2.3 玻纤土工格栅	115
5.2.4 聚酯经编土工格栅	115
5.3 土工格栅的性能指标	116
5.3.1 性能测试	116
5.3.2 几种强度指标的含义	116
5.3.3 蠕变强度	116
5.3.4 土工格栅的连接和节点强度	119
5.3.5 指标测试标准	120
5.4 土工格栅的工程特性	120
5.4.1 土工格栅的物理特性	120
5.4.2 土工格栅的力学特性	121
5.4.3 土工格栅的强度劣化	122
5.5 土工格栅的工作机理	124
5.6 土工格栅的选型	127
5.7 土工格栅的施工	127
5.7.1 土工格栅的施工要求	127
5.7.2 土工格栅的施工工艺	128
5.7.3 施工中的注意事项	129
5.8 土工格栅的工程应用	129
5.8.1 挡土墙和加筋土工程	129
5.8.2 陡坡工程	130
5.8.3 软土地基处理	130
5.8.4 道路工程	130
5.8.5 大坝工程	130
参考文献	131
第 6 章 加筋土石坝地震变形安全防护	133
6.1 加筋土石坝抗震稳定分析	134
6.1.1 加筋的必要性	134
6.1.2 土工格栅	135
6.1.3 拟静力抗震稳定分析	135
6.1.4 筋材-堆石体相互作用机理	136
6.1.5 土工格栅的极限抗拉强度	138
6.1.6 拟静力极限平衡分析法	140
6.2 加筋土石坝 Newmark 滑块位移分析	141
6.2.1 加筋土石坝数值计算与分析	141

6.2.2	加筋土石坝潜在滑动体屈服加速度	143
6.2.3	加筋坝坡永久滑动位移	143
6.3	验证和分析	144
6.3.1	加筋坝坡拟静力抗震稳定分析结果	145
6.3.2	加筋滑动体平均屈服角加速度	146
6.3.3	加筋滑动体滑动位移结果	146
	参考文献	148
第 7 章	高土石坝地震变形安全控制标准	149
7.1	地震永久变形安全控制标准	149
7.2	基于变形安全控制的高坝抗震设计	150
7.2.1	标准计算剖面	150
7.2.2	基于坝坡最小允许安全系数的高土石坝变形安全评价	151
7.3	高土石坝极限抗震能力分析	153
7.3.1	基于滑动变形的高土石坝极限抗震能力分析	154
7.3.2	基于整体地震变形的高土石坝极限抗震能力分析	158
	参考文献	160
第 8 章	实际工程应用	161
8.1	工程 1——黏土心墙堆石坝工程	161
8.1.1	工程概况	161
8.1.2	计算方法简介	161
8.1.3	整体地震变形分析	163
8.1.4	滑动变形分析	169
8.2	工程 2——黏土心墙堆石坝工程	176
8.2.1	工程概况	176
8.2.2	计算方法简介	176
8.2.3	整体地震变形分析	178
8.2.4	滑动变形分析	181
8.3	工程 3——加筋心墙堆石坝工程	188
8.3.1	工程概况	188
8.3.2	设计剖面	188
8.3.3	加筋方案计算与分析	189
8.3.4	加筋坝体地震滑移分析	189
	参考文献	193

第 1 章 土石坝抗震安全

土石坝是当今坝工建设中最常见的一种坝型,也是发展最快的一种坝型。在水利工程的诸多坝型中,土石坝具有可利用当地材料筑坝、对地形地质条件适应性较好、造价较低、施工方法简单、抗震性能好等优点,在国内外水利水电资源开发过程中占有重要的地位。心墙堆石坝是在 20 世纪 40 年代以后才有所发展的,其背景是土力学理论和实践的发展,以及大型施工机具的出现,使得在合理工期内完成大量土石方成为可能。近几十年来,土质心墙堆石坝已逐渐成为世界上高坝建设的主流坝型之一。据 20 世纪 90 年代初统计,世界上已建和在建的坝高 230m 以上的高坝中,土质心墙堆石坝约占 55.5%。全世界坝高超过 15m 的土石坝有 29000 多座,而在我国,各种坝高的拦河坝有 86000 多座,其中土石坝占 95% 以上。土石坝主要包括均质土坝、心墙坝和混凝土面板堆石坝等。据统计,1940 年以前,很少有坝高超过 100m 的心墙堆石坝;1960~1990 年是全世界心墙堆石坝快速发展时期,兴建的土石坝坝高、数量都有很大的增加;1990 年后,兴建的心墙土石坝有减少的趋势,但兴建的土石坝多是 150m 以上的高心墙土石坝,建坝的高度和水库的规模越来越大。水坝关系着下游广大地区人民生命财产的安全,随着水库规模的增大,水坝带来的风险也随之增大。大坝安全为公共安全的重大问题,受到世界各国的普遍关注。据不完全估计,从 12 世纪以来,全世界约发生了 2000 余起的水坝事故,比较显著的大坝失事就有 200 多起,造成了灾难性的后果。引起水坝事故的原因多种多样,地震是对水坝安全构成威胁的重要因素之一,多次大地震中产生的大坝震害使大坝的抗震安全成为关注的重点之一。另外,根据我国能源发展的需要,一大批 200~300m 级的高土石坝和大型水库将在金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河、怒江和黄河上游等大江大河上进行建筑,这些大坝的高度和规模不少将接近和超过国外已建同类工程的水平。特别值得重视的是,这些大坝的设防地震加速度将远超过我国历史上的最高水平。20 世纪 90 年代建设的小浪底心墙堆石坝(高 160m),设计地震加速度为 $0.15g$ 。但目前在建和将建的高土石坝的设计地震加速度将分别达到:糯扎渡心墙堆石坝(高 261.5m) $0.283g$;两河口心墙堆石坝(高 293.5m) $0.288g$;双河口心墙堆石坝(高 314m) $0.205g$;猴子岩面板堆石坝(高 219.5m) $0.297g$;吉林台面板堆石坝(高 157m)高达 $0.462g$ 。200~300m 级土石坝的抗震安全成为设计中需要解决的关键技术问题之一^[1-6]。

从国内外关于土石坝抗震安全评价的发展来看,在 20 世纪 60 年代以前,主要是采用以地震系数为代表的拟静力法来核算坝坡稳定。1964 年日本新潟地震和美国

阿拉斯加地震后,特别是1971年美国San Fernando地震中Lower San Fernando水力冲填坝的大规模坍滑事故引起了土石坝抗震安全评价方法的变革,发现传统方法在评价土石坝抗震性能方面所出现的矛盾日益增多,难以预测土石坝可能出现的多种震害。地震变形逐渐引起了人们的重视,对地震变形引起的土石坝震害开展了深入的研究。经过多年的发展,以地震变形安全防控为代表的土石坝抗震研究的水平取得了较大的进步,包括土石坝的动力材料特性、地震动力响应分析、地震变形、地震灾变机理等^[5,7,8]。

在土石坝筑坝材料性质的研究方面,经过国内外学者多年的研究工作,已经取得了较多成果,积累了较为丰富的资料^[9-13]。特别是随着高坝建设的发展,尤其是强震区高土石坝建设的发展,人们对高应力水平下堆石料、过渡料、风化料、砾石土等粗粒料的动力特性开展了深入的研究工作,尤其是通过“七五”“八五”及“九五”科技攻关,在高土石坝坝料的动力特性和测试方法方面取得了一系列研究成果^[9,13]。随着工程建设的需要,还需进行更深入的研究工作,如复杂应力及大应变条件下的动力本构模型和残余变形特性等都需要做进一步的研究工作。

在土石坝震害方面,科技工作者对近几十年的强震中的震害进行过详细调查,对土石坝的震害资料有较细致的收集和分析。在唐山、海城、通海和汶川等地震中,土石坝震害资料较为丰富。国内学者对土石坝震害的特点、类型、影响因素和经验教训等都进行了较为深入的调查、分析和总结,为土石坝抗震研究提供了基础资料。有关高土石坝动力特性和动力模型试验研究也取得了较大进展,获得了有关结构反应特性及破坏特征的资料数据。要进行高土石坝震害机理的研究,还需要更为丰富的、定量的资料以及强震区高土石坝的实际震害资料和地震反应记录等。

从国内外的研究现状来看,土石坝动力反应分析方法逐渐由二维的、等效线性的、总应力分析方法向三维的、真非线性的、考虑孔压扩散和消散的有效应力分析方法发展,而在库水、坝体、地基等的耦合非线性分析、复杂应力条件下的非线性本构模型、孔压计算模式、地震残余变形计算方法、接触面模拟及边界条件处理、地震动输入、高精度数值模拟和非线性计算方法等方面还需要进行深入的研究。工程上惯用拟静力法进行抗滑稳定分析来进行土石坝及地基的抗震安全评价,然而,传统的拟静力法不能很好地考虑与地震动特性密切相关的土体内部应力—应变关系和实际工作状态,求出的安全系数只是所假定的潜在滑裂面上的所谓安全度,无法得到实际内力分布和确定土体变形,也就无法预测土体失稳的发生和发展过程,更不能考虑局部变形对坝体稳定的影响。所以,近年来逐步发展了进行土石坝及地基的地震安全评价的动力法。在动力法中,为了进行抗震安全评价,首先对土石坝及地基进行地震反应分析,求出在地震作用下土体内部的应力和变形分布等,然后按照相应的破坏标准来评价大坝的安全性。动力法中的关键问题包括土石料动力特性的确定、土石坝及地基地震反应的分析、安全评价标准和理论方法等。

在非线性地震反应分析的基础上,研究高土石坝地震作用下的灾害机理、抗震安全性及防灾对策是高土石坝抗震研究中的关键问题,而研究地震破坏机理必须深入研究地震作用下结构的非线性问题,包括非线性材料性质、非线性破坏参数、非线性地震反应特征、非线性求解理论和实验方法。根据结构的破坏特征和工程的破坏机理提出合理的高土石坝抗震设计方法和抗震措施,并研究相应措施的作用机理,以解除地震灾害之虞,在研究中应重视它们的针对性、可靠性、实用性和经济性。

1.1 抗震安全评价内容

土石坝抗震设计中首先要考虑的问题是地震作用可能引起的坝的破坏方式,有以下几种情况值得重视。

1.1.1 典型震害

1. 库水漫顶

评价土石坝的抗震安全性取决于通过直接或间接方法所确定的预期变形的大小。如果地震变形导致坝顶低于水库水位,坝顶溢流造成的侵蚀可使坝发生破坏。直接方法是通过建立地震、坝体和坝基的计算模型预测坝的变形;间接方法则基于经验判断坝和地基的地震响应。震后稳定分析也是对变形的一种间接预测,如果震后稳定安全系数高,变形将局限于很小的范围(几英尺(1英尺=0.3048m)或1m以内),除非作用的荷载十分剧烈。

变形大小取决于材料的强度。强震时由于动应力瞬时超过材料强度可产生永久变形,不过量值一般不大。对于饱和土,由于振动产生的孔隙水压力将使抗剪强度降低,也使动力变形比没有强度损失时大。对于十分松散的可压缩性土,由于过量的孔隙水压力增长,剩余的抗剪强度可能只占静力排水剪强度很小的一部分,这一过程通常称为“液化”。如果抗剪强度下降到低于维持静力稳定所需要的数值,即使振动已经停止,在重力作用下,仍将产生很大的变形。液化评价将在下面阐述。有一种中间状态,称为“循环流动性”(cyclic mobility),由于过量的超静孔隙水压力作用,初期的抗剪强度非常低,但随着大的剪应变发生,强度会逐渐增长。这种情况有助于防止整体稳定的丧失,但仍然产生较大的变形。

导致坝发生破坏的库水漫顶现象,还可能是以下原因引起的:①穿过水库或穿过坝基的断层活动,引起水库水位上升,超过坝顶(或使坝顶沉降低于水库水位);②地震引起的滑块排挤出很大容量的水体;③地震引起的涌浪。

2. 裂缝和内部侵蚀

如果坝由于地震激励或断层错动而产生变形,可能出现裂缝或内部反滤被切断,两者都将使坝由于侵蚀而破坏。裂缝多半发生在坝与混凝土结构(如溢洪道)相结合

的界面处或在土石坝断面剧烈变化之处。也有迹象表明,如果坝已处于管涌边缘,即使不出现裂缝,振动也可能引起管涌破坏。坝所能承受的变形大小,即不会发生裂缝被侵蚀而引起坝的破坏,取决于坝和地基的土料特性、坝的内部分区和构造(滤层、排水和截水墙等)、地震时的水库水位,以及附属结构的性质和位置。如果存在穿过土石坝的管道,坝的变形可使管道破裂,或使缝的接头分离,两者都可能产生不通过滤层的渗流出口或使坝或地基暴露在未曾预计的水库全水头作用下而引起侵蚀破坏。沿着完好管道发生的侵蚀也会引起坝的破坏。

1.1.2 抗震防护措施

如果设计不当,许多情况可使坝处于安全危急状态或使坝发生破坏。不必进行大量的分析评价,只需简单地采取一些防护措施,即使在比较恶劣的情况下,也可使结构满意地运行。反之,防护措施设计不当,则可使其变为无效。有关的防护措施包含以下方面。

- (1)对有问题的地基土料予以挖除。
- (2)加宽用塑性土料建造的心墙能增强抵抗侵蚀的能力。
- (3)在心墙上游敷设良好级配的过滤层,使有可能张开的裂缝得以封闭,同时敷设心墙下游的过滤层以防止心墙中被侵蚀的颗粒外逸。
- (4)在土石坝心墙下游建造烟囱形竖井排水以减少饱和度。
- (5)在坝肩与岸坡接触面处,扩展土石坝心墙的断面。
- (6)调整心墙的位置,使土石坝体中的浸润线位置最低。
- (7)加强水库周边土坡的稳定性,防止滑坡塌方。
- (8)如果坝基中存在潜在滑动断层的危险,坝和地基接触面处应进行专门处理。
- (9)建立高质量的排水通畅的堆石坝壳。
- (10)设立比较富裕的坝顶超高,以适应坝体沉降、坍塌或断层滑动的需要。
- (11)规划好坝与地基接触面的形状,避免断面突变、倒悬或较大的“台阶”。
- (12)填筑土料充分压实,尽量减小超静孔隙水压力的发生。
- (13)设置过滤层或采取其他有效措施,防止埋设于土坝中的管道或其他结构出口处发生水流侵蚀。

1.1.3 抗震分析方法

如果坝和地基不发生液化,在满足下列条件的情况下,微小变形是可能发生的,但不会引起坝的整体破坏。

- (1)坝和地基土料为非液化土料,也不含松散土料和灵敏黏土。
- (2)坝体良好施工,并压实到实验室最大干容重的95%以上,或相对密实度的80%以上。

(3)坝坡率 $H:V=3:1$ 或更缓,浸润线在下游坝坡线以内足够深度。

(4)土坝坝基水平峰值地震加速度不大于 $0.2g$ 。

(5)地震发生前在相关荷载和预期孔压作用下,所有可能的危险滑动面(坝坡表面浅层滑动面除外)的静力安全系数大于 1.5。

(6)地震时坝顶超高至少为坝高的 $3\% \sim 5\%$,并且不小于 3 英尺(约 0.9m),地震引起的水库涌浪或地震引起的坝基或水库中的断层活动所要求的坝顶超高应另行考虑。

(7)坝内不存在重要的构造部件,在坝体的微小变形下容易受到损害或产生裂缝,引起内部侵蚀的潜在危险性。

如果这些条件无法满足,需要进行更详细的研究,包括评价液化的危险性、进行震后稳定和变形分析。如果不存在液化危险的土料,一般可采用简化的 Newmark 滑块法进行分析。在有可能产生超静孔隙水压力的情况下,则需要进行更严密的有限元或有限差分法分析。进行变形分析的目的在于确定可能发生的变形是否足够大到发生库水漫顶,或是在关键部位产生裂缝,使土坝由于内部侵蚀而发生破坏。根据分析结果,并参照土石坝在地震中表现的历史经验,设计者必须做出全面判断,坝和地基是否能安全承受这些荷载。

1.1.4 地震变形分析

如果预期失稳不会发生,液化也不可能,可应用下述两种方法之一,或两者并用来进行变形估计。

1. Newmark 滑动变形分析

Newmark 滑动变形分析^[14]为最普通的求解土石坝动力表现的方法。该方法假定坝和地基土料的地震变形模态可看成刚性块的滑动。当坝基加速度超过屈服加速度后,变形开始发生。屈服加速度为按常规坝坡稳定分析得出的安全系数刚好等于 1.0 时所对应的水平地震加速度。在地震作用的整个过程中,随着安全系数上升至大于 1.0,滑动开始下降至低于 1.0 时,滑动停止^[15]。

进行这类分析需要潜在滑动面上有代表性的地震动时程曲线,可由坝的动力响应分析得出。

Makdisi 和 Seed^[16]应用 Newmark 方法对若干土坝进行了一些地震波作用的分析,在此基础上归纳成了简化方法结果所获得的诺莫图,通常称为 Makdisi-Seed 法。该方法可提供预测的净变形,表示为以下因素的函数:①潜在滑动体的水平向拟静力屈服系数;②滑动体的水平有效峰值加速度;③强震历时,可按震级大小进行经验估计。Makdisi 和 Seed 也提出了求解滑动体峰值加速度响应的简化分析方法,将土石坝化为弹性三角形棱柱体,则其振动响应可由 Bessel 级数近似。

基于 Newmark 概念发展了其他近似方法。最基本的是 Sarma 方法,将地震作

用以水平加速度表示,计算了滑动体的水平位移。下一步的工作是根据危险滑动面的形状,计算坝顶的超高损失。更为严格的分析应包括地震作用过程中的水平和竖向加速度,以及孔隙水压力和抗剪强度的变化。详细实例可参见加利福尼亚州 Riverside 县 Eastside 水库工程的变形分析。另一研究则是根据一序列的 Newmark 分析,得出结论认为只要水平峰值加速度小于屈服加速度的 3 倍,土石坝的变形将很小(只要振动不引起超静孔隙水压力,同时适当地考虑了不排水剪强度),这和观测到的土石坝在地震中的表现相符。

一旦得出按 Newmark 方法(或其他方法)估计的地震变形,则土石坝在地震中的预期表现即可根据变形的严重程度(包括坝顶超高的损失以及可能产生的裂缝和裂缝对坝体或地基诱发内部侵蚀引起破坏的潜在危害性)加以判断。有些单位将临界滑动面的容许变形限定在 2 英尺(约 0.6m)以内作为是否安全的衡量标准。

2. 整体变形分析

地震作用除了对土石坝引起滑移变形,还可能由于土单元中增加的应力而产生沉降,这一广义沉降变形可根据土力学的固结理论、经验方法和(或)有限元分析加以估计。在土石坝和地基不发生液化的条件下,许多现有的经验关系式可用来估计土石坝的地震沉降。

1.1.5 拟静力分析

拟静力分析方法(有时称为地震系数法)只在不产生振动孔隙水压力的情况下,作为对结构地震抗力分析的一个指标。不可能根据拟静力分析结果来预测坝的破坏,一般还需要依靠其他方法提供更可靠的基础资料来了解坝在地震中的现场表现。然而,如果土石坝中不含振动引发超静孔隙水压力的土料,并且必要时考虑了土料的不排水抗剪强度,计算出的拟静力安全系数大于 1.0,便是十分有力的证明,表明坝在地震中将只有微小的震害或没有震害。

1.2 土石坝抗震性能评价

某些情况下,分析计算结果足以表明坝是安全的或不安全的,但通常对坝的安全的判断不仅要考虑分析的结果,还要考虑到所进行的分析和所采用的基本假定的可信度水平,以及在某种程度上对不确定性水平进行误判所带来的后果。

1.2.1 稳定分析

如果按震后预期强度分析的破坏面震后的抗滑移稳定安全系数大于 1.0 (如 1.25 或更大),过去震害经验表明,坝的变形将很小,并且坝会有良好的表现。对于可液化土,如果抗液化安全系数等于或小于 1.0,并且按震后残余抗剪强度计算的

震后抗滑安全系数小于或接近 1.0, 坝安全的可信度降低。许多分析表明, 当一楔形体或圆弧滑动面的震后抗滑安全系数较低时, 沿滑动面的变形将十分大; 如果这一滑动面对坝的整体性起关键作用, 变形可以引起坝顶溢流或内部侵蚀, 造成坝的破坏。

1.2.2 变形分析

不管是按 Newmark 法分析, 还是按有限元或有限差分分析预测的坝的变形都不应大于坝所能安全承受的限度, 不应造成水库灾难性的下泄, 进行评价时需要考虑的重要因素说明如下。变形分析可以针对以下三种情况进行: ①液化不会发生; ②液化可能发生, 但不影响稳定; ③液化可能发生, 并导致稳定丧失。对于前两种情况, 需要做出的判断是预测的临界滑动面的变形是否足够小, 不会在坝体和坝基中发生可引起坝管涌破坏的裂缝; 还需要判断震后的抗滑安全系数和现有坝顶超高是否足够, 不会发生坝顶溢流并能安全支承水库。注意到预测的变形对分析中采用的震后强度值十分敏感, 重要的问题是液化常容易被激发, 以及如果发生液化, 在分析中应当选取何种适当的残余抗压强度。对评价变形分析结果需要考虑的重要因素是分析中采用的抗剪强度的可信度, 这代表预测变形的可信度。当预测的变形很大或震后抗滑安全系数较低时, 通常要考虑的问题是降低水库水位能否安全保护水库, 而不会发生水库破坏的危险。

1.3 土石坝抗震安全评价的发展现状

1.3.1 土石坝震害

大坝的地震观测受到世界各国的普遍重视。到目前为止, 所取得的强震作用下土石坝的实际观测资料仍十分缺乏, 且不够完整。汶川大地震中紫坪铺面板堆石坝的表现为我们对强地震时土石坝抗震性能的认识提供了一定的技术依据。按照现代方法设计建造的土石坝强震时的震害, 一般不会出现危及大坝安全的震害。

根据文献报导, 有以下一些不完整的资料^[17]。

1. 紫坪铺混凝土面板堆石坝主要震害

坝高 156m, 汶川大地震时距震中 17km, 至主断裂的最短距离为 7~8km。原设计地震加速度为 0.260g, 实测坝顶水平向加速度达到 1.6g 左右, 估计坝基加速度超过 0.5g。大坝按烈度 8 度进行设计, 但经受了 9 度以上地震的考验, 而没有出现对大坝安全发生重要威胁的震害。大坝震害已有众多文献介绍, 主要值得指出的有以下几种。

(1) 坝体震害。大坝出现明显震陷, 最大沉降量为 744.3mm, 最大永久水平位移在河流方向达到 270.8mm, 坝轴线方向达到 226.1mm(图 1.1 和图 1.2)。坝体内部

水管式沉降仪观测到的震陷量随坝高而增大,2008年5月17日测得850.00m高程坝体中部最大沉降量为810.3mm,余震影响略有波动,6月22日为812.5mm,后趋于稳定。由于中坝段坝顶与路面存在150~200mm脱空现象,按对应部位推算堆石填筑体顶部最大沉降量可达900mm。图1.3为坝0+251.0断面地震后坝体内部沉降量沿高程分布。

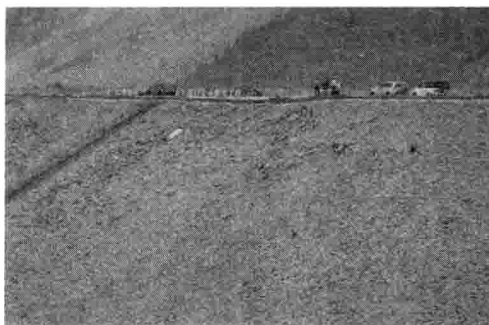


图 1.1 大坝坝顶中部震后变形

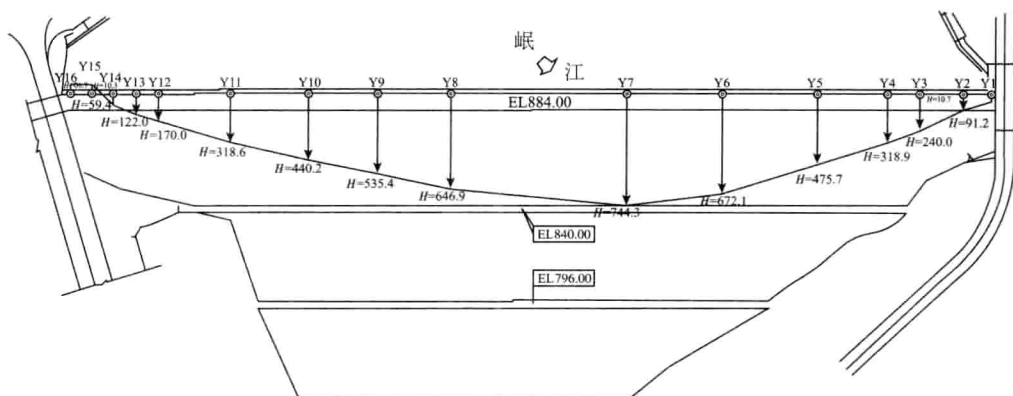
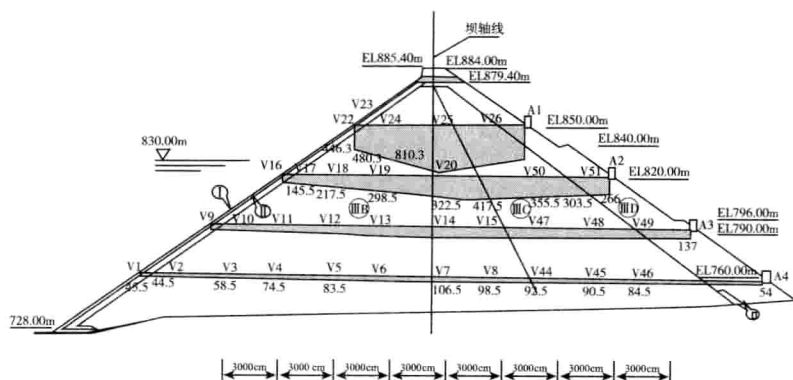


图 1.2 大坝坝顶震陷分布



(a) 大坝地震沉降沿高程的分布