

混凝土面板堆石坝 抗震性能

SEISMIC PERFORMANCE
OF CONCRETE-FACED
ROCKFILL DAM

孔宪京 著



科学出版社

混凝土面板堆石坝抗震性能

Seismic Performance of Concrete-Faced Rockfill Dam

孔宪京 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍作者在面板堆石坝抗震性能研究方面的成果,共6章,内容包括绪论、面板堆石坝的动力特性、面板堆石坝的地震响应、面板堆石坝的坝坡地震稳定、面板堆石坝地震破坏现象及其特征、面板堆石坝抗震对策。

本书可作为水利水电工程、土木工程及相关专业设计、施工和科研的参考用书,也可作为水工结构工程、防灾减灾工程、岩土工程专业的研究生教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝抗震性能 = Seismic Performance of Concrete-Faced Rockfill Dam/孔宪京著. —北京:科学出版社,2015
ISBN 978-7-03-043231-5

I. ①混… II. ①孔… III. ①堆石坝-混凝土面板坝-抗震性能
IV. ①TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 022585 号

责任编辑:吴凡洁 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:302 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

混凝土面板堆石坝是年轻而富有竞争力的坝型。由于这种坝型的安全性和经济性良好,特别能适应不良的气候条件、地形条件和地质条件。这种坝型的优势还在于软岩、特硬岩和砂砾石都可以作为坝体填筑料,还可以充分利用枢纽中各种建筑物的开挖料来填筑坝体,尽量做到挖填平衡,可大大节省投资,利于环境保护。而且,混凝土面板堆石坝工程量相对较小、建设速度快、易于维修,经常成为坝工界的首选坝型。20世纪60年代末,随着现代施工技术的发展和重型振动碾的出现,面板堆石坝便以惊人的速度在数量和高度上得以长足的发展。

我国的水能资源80%以上分布在西部地区,而我国西部地区断层发育多,地震环境复杂,是我国主要强地震区,地震的强度和发震频度都很高。在如此复杂地震区修建面板堆石坝,需要对面板堆石坝的抗震性能有充分认识。

自“七五”以来,混凝土面板堆石坝的关键技术就连续列入国家科技攻关计划和国家自然科学基金课题。作者在博士学位论文《混凝土面板堆石坝抗震性能研究》的撰写过程中,以国家“七五”建设项目——天生桥一级水电站面板坝工程和关门山面板坝为典型实例,在面板坝筑坝材料动力变形特性、地震作用下面板坝破坏性状及面板坝动力计算方法和抗震措施等方面进行了研究。1984~1992年先后三次(约3年)获得日本学术振兴会(JSPS)、日本东京大学生产技术研究所奖励基金资助,受聘为客座研究员、博士研究生,在日本东京大学生产技术研究所主要从事土石填筑坝地震破坏机理研究。回国后主持完成了国内第一台三自由度水下振动台和采用先进测试技术的高精度大型三轴仪,指导研究生在面板堆石坝动力分析方法、动力反应特性和抗震措施方面开展了一系列研究工作。

本书总结了作者在面板堆石坝抗震性能方面的研究成果,主要包括绪论、面板堆石坝的动力特性、面板堆石坝的地震响应、面板堆石坝的坝坡地震稳定、面板堆石坝地震破坏现象及其特征、面板堆石坝抗震对策。希望本书能够抛砖引玉,对国内同行的教学、科研和面板堆石坝的抗震设计起到借鉴和帮助作用。

在编写过程中,大连理工大学工程抗震研究所邹德高教授、刘君教授、徐斌副教授、周晨光工程师、周扬博士、刘福海博士以及博士研究生刘京茂、张宇、余翔等在这方面给予了大力支持和帮助。在此,作者对他们深表感谢!

本书的研究工作得到国家自然科学基金重点项目(编号:51138001)、国家自然科学基金创新研究群体项目(编号:51421064)、国家自然科学基金重大计划集成项目(编号:91215301)、国家自然科学基金面上项目(编号:51379028,51279025)的资助,在此表示感谢!

由于作者水平和经验所限,书中难免存在不足之处,敬请同行和读者批评指正。

孔宪京
2014年11月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土面板堆石坝简介	1
1.2 国内外高混凝土面板堆石坝现状	2
1.2.1 国外情况	2
1.2.2 国内情况	3
1.3 地震中面板堆石坝的表现及其震害	3
参考文献	7
第 2 章 面板堆石坝的动力特性	8
2.1 面板堆石坝振动台模型试验方法	8
2.1.1 模型相似技巧	8
2.1.2 模型设计原则	10
2.1.3 模型材料选择和研制	10
2.1.4 模型试验的新测试技术	10
2.1.5 模型制作和试验方法	12
2.2 面板堆石坝的动力特性试验	13
2.2.1 关门山面板堆石坝现场弹性波试验	13
2.2.2 微振时面板堆石坝的动力特性	29
参考文献	45
第 3 章 面板堆石坝的地震响应	46
3.1 面板堆石坝动力分析方法	46
3.1.1 动力反应控制方程及求解	46
3.1.2 面板堆石坝分析中的单元类型	54
3.1.3 面板堆石坝分析中的本构模型	60
3.1.4 动力反应分析方法	63
3.1.5 永久变形分析方法	65
3.2 面板堆石坝的地震响应特性分析	68
3.2.1 模型及参数	69
3.2.2 堆石体加速度分布规律及坝坡稳定加固范围划定	74
3.2.3 防渗面板应力分布特性及高应力区划定	80

3.2.4	面板动力损伤分析	86
	参考文献	97
第4章	面板堆石坝的坝坡地震稳定	101
4.1	拟静力地震稳定分析方法	102
4.1.1	瑞典法	102
4.1.2	简化毕肖普法	104
4.1.3	通用条分法	104
4.2	有限元动力稳定分析	105
4.2.1	计算方法	105
4.2.2	有限元动力稳定和滑移变形分析	107
4.2.3	基于块体滑移法的紫坪铺大坝面板错台分析	115
4.2.4	考虑堆石料软化特性的坝坡动力稳定滑移变形分析	121
	参考文献	130
第5章	面板堆石坝地震破坏现象及其特征	132
5.1	面板堆石坝模型破坏性态及破坏机理	132
5.1.1	强震时面板堆石坝的破坏性态	132
5.1.2	典型面板堆石坝三维振动台试验	144
5.1.3	面板错台	161
5.2	面板堆石坝模型破坏试验数值仿真分析	168
5.2.1	DDA方法的基本原理及其改进	169
5.2.2	数值仿真分析	181
	参考文献	184
第6章	面板堆石坝抗震对策	186
6.1	引言	186
6.2	土石坝抗震措施模型试验	186
6.2.1	模型设计	186
6.2.2	坝料粒径对坡面临界加速度的影响	190
6.2.3	合理减缓坝坡	190
6.2.4	坝顶宽与上游面板稳定	193
6.2.5	建议的一种断面形式	196
6.2.6	加筋土和钉结护面板技术以及材料改性技术	198
6.3	土工格栅抗震措施分析	213
6.3.1	计算模型及参数	213
6.3.2	地震动输入	216
6.3.3	计算结果与分析	216

6.4 钉结护面板抗震措施分析	218
6.4.1 考虑钢筋作用的坝坡稳定和滑移计算方法	219
6.4.2 计算模型与参数	219
6.4.3 地震动输入	220
6.4.4 计算结果与分析	221
6.5 面板高地震应力降低措施分析	223
6.5.1 面板坝轴向抗挤压措施研究	223
6.5.2 面板顺坡向地震高拉应力降低措施	232
6.6 高面板堆石坝工程抗震措施应用	237
6.6.1 卡基娃面板堆石坝	237
6.6.2 茨哈峡砂砾石面板坝	238
6.6.3 古水面板堆石坝	239
参考文献	239

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土面板堆石坝简介

混凝土面板堆石坝是以堆石体为支承,并在其上游表面设置混凝土面板为防渗结构的一种堆石坝,常简称“面板堆石坝”或“面板坝”。它仍属土石坝范畴(傅志安和凤家骥,1992),其典型的结构形式如图 1.1 所示。

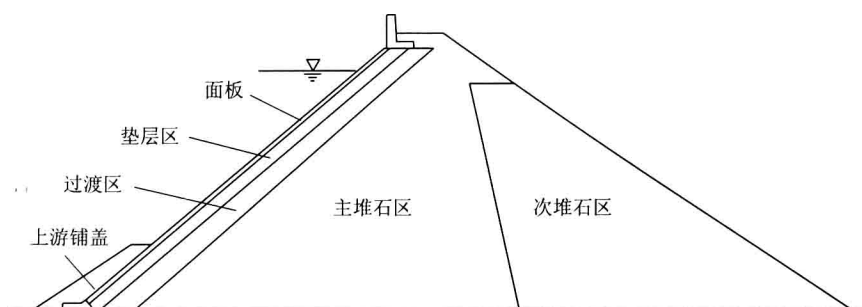


图 1.1 典型的面板堆石坝结构形式

早期修建的面板坝,由于采用的是较古老的施工方法,堆石难以达到较高的密实度,蓄水后往往引起坝体的沉陷变形,导致面板及接缝的开裂,渗漏严重,这一难题使面板坝的发展一度处于停顿状态。20 世纪 60 年代末,随着现代施工技术的发展和重型振动碾的出现,面板坝的潜在优势越来越为人们所认识。由于这种坝型具有造价低、工期短、施工方便、导流简便、运行可靠等优点,国内外坝工专家都肯定了它的良好发展前景。事实也正是如此,70 年代后,面板坝便以惊人的速度在数量和高度上得以长足的发展。如 1971 年澳大利亚建成的 Cathana 坝(110m),1974 年哥伦比亚建成的 Alto Anchieaya 坝(140m),1980 年巴西的 Foz Do Areia 坝(160m)等,都是当时相当成功的范例。在我国,面板坝的研究虽然起步较晚,但发展速度却是空前的,目前我国的水布垭面板堆石坝最大坝高达到 233m,为世界已建最高面板堆石坝。

1.2 国内外高混凝土面板堆石坝现状

1.2.1 国外情况

从 1895 年美国建成世界上第一座混凝土面板堆石坝——54m 高的莫尔那 (Morena) 坝, 至今已有 100 多年的历史。据有关资料, 到 2008 年年底, 国外已建坝高 30m 以上的面板堆石坝约 275 座, 坝高 150m 以上的约 10 座, 最高的是马来西亚巴贡 (Bakun) 坝, 高 203.5m。拟建最高的是菲律宾阿格布鲁 (Agbulu) 坝, 高 234m。已建、在建和拟建 150~200m 级高面板堆石坝的初步统计情况见表 1.1。

表 1.1 国外部分已建、在建和拟建高面板堆石坝统计表

工程名称	所在国家	建设情况	完建时间/年	坝高/m	坝长/m	坝体方量/ 10^4 m^3
新国库 (New Exchequer)	美国	已建	1966	150	427	400
阿里亚 (Foz Do Areia)	巴西	已建	1980	160	828	1400
阿瓜米尔巴 (Aguamilpa)	墨西哥	已建	1993	186	660	1270
亚肯布 (Yacambu)	委内瑞拉	已建	1996	162	150	300
米苏可拉 (Messochora)	希腊	已建	1996	150	—	1400
巴拉格兰德 (Barra Grande)	巴西	已建	2005	185	665	1186
坎普斯诺沃斯 (Campos Novos)	巴西	已建	2006	202	590	1211
埃尔卡洪 (El Cajón)	墨西哥	已建	2007	186	550	1030
卡拉纽卡 (Kárahnjúkar)	冰岛	已建	2007	198	730	960
巴贡 (Bakun)	马来西亚	已建	2008	203.5	750	1650
马扎尔 (Mazar)	厄瓜多尔	在建	—	166	340	480
南怒河 2 (Nam Ngum 2)	老挝	在建	—	182	—	—
索加莫索 (Sogamoso)	哥伦比亚	在建	—	190	—	—
西塞蒂 (West Seti)	尼泊尔	在建	—	195	—	—
拉耶什卡 (La Yesca)	墨西哥	拟建	—	205	—	—
波尔塞 III (Porce III)	哥伦比亚	拟建	—	151	400	410
拉帕洛塔 (La Parota)	墨西哥	拟建	—	163	—	1200
派克罗 (Pai Quere)	巴西	拟建	—	150	—	1400
锡安米德尔 (Siang Middle)	印度	拟建	—	190	500	1600
阿格布鲁 (Agbulu)	菲律宾	拟建	—	234	—	2100

1.2.2 国内情况

1985 年国家启动坝高 95m 的西北口面板堆石坝工程,以此作为试点,中国开始修建现代面板堆石坝。据不完全统计,截至 2009 年年底,国内已建坝高 30m 以上面板堆石坝约 170 座,其中坝高 150m 以上的约 7 座。已建、在建和拟建 150~200m 级高面板堆石坝的初步统计情况见表 1.2。

表 1.2 国内已建、在建和拟建 150~200m 级高面板堆石坝统计表

工程名称	所在位置	建设情况	完建时间/年	坝高/m	坝长/m	坝体方量/10 ⁴ m ³
天生桥一级	贵州/广西南盘江	已建	2000	178	1104	1800
洪家渡	贵州六冲河	已建	2005	179.5	427.79	909
紫坪铺	四川岷江	已建	2006	158	663.77	1117
吉林台一级	新疆喀什河	已建	2006	157	445	836
三板溪	贵州清水江	已建	2007	185.5	423.75	830
水布垭	湖北清江	已建	2008	233	660	1526
滩坑	浙江瓯江支流小溪	已建	2008	162	507	955
巴山	重庆任河	在建	—	155	477	—
董箐	贵州北盘江	在建	—	150	678.63	1016
马鹿塘二期	云南盘龙河	在建	—	154	493.4	700
江坪河	湖北淩水	在建	—	219	414	704
卡基娃	四川木里河	在建	—	171	321	586
梨园	金沙江中游	在建	—	155	525	778
猴子岩	四川大渡河	拟建	—	223	283	980
姚家坪	湖北清江	拟建	—	179.5	382	640
阿尔特什	新疆叶尔羌河	拟建	—	163	—	—
溧阳蓄能上库	江苏溧阳	拟建	—	165	1112	1580
龙背湾	湖北官渡河	拟建	—	158.3	465	695
牛牛坝	四川美姑河	拟建	—	155	333	456

我国已建面板堆石坝几乎遍布全国各地,涉及各种不利的地形、地质条件和气候条件,工程设计建设总体是成功的,积累了应对各种困难情况的经验和教训。中国面板堆石坝,无论在数量上,还是在坝高和规模上,都处于世界前列。

1.3 地震中面板堆石坝的表现及其震害

与其他土石坝坝型(如心墙坝)相比,面板坝数量较少,且运行时间短,遭遇地

震考验和震害的实例较罕见,目前,世界上也只有几座面板坝经受过较强地震作用,其中紫坪铺坝、智利的 Cogoti 坝、日本的皆赖(Minase)坝、秘鲁的 Malpasse 坝及美国的 Cogswell 坝比较典型。

1. 紫坪铺面板坝(陈厚群等,2008;陈生水等,2008;孔宪京等,2009;孔宪京和邹德高,2014)

紫坪铺面板堆石坝,坝高 156m,汶川地震时距震中 17km,至主断裂 8km。设计地震加速度为 $0.26g$,但汶川地震时估计坝基加速度在 $0.55g$ 左右,即大坝按 8 度设防,但经受了 10~11 度地震的考验。地震时的水库水位在 830m 高程左右,位于正常蓄水位以下 47m。大坝的主要震害表现为:①较大的地震变形。地震后坝顶瞬间沉降 683.9mm,5 天后增至 744.3mm,850m 高程处测得的最大沉降量达 810.3mm。地震产生的向下游方向的水平位移在 854m 高程处达到 270.8mm。坝顶指向河谷方向的最大水平位移达 226.1mm。大坝震陷现象如图 1.2 所示。②面板的局部开裂、脱空与破损。紫坪铺大坝 845m 高程二、三期混凝土面板施工缝处错开,最大错台达 17cm,涉及 26 块面板,总错台长度达 340m。陡峭左岸坝肩处 5#~6# 面板与河谷中部 23#~24# 面板结构缝严重挤压破碎,不少面板发生局部挤压破碎。面板破坏现象如图 1.3 所示。③面板与河岸相接的周边缝发生错位,最明显的是右坝肩靠近河床底部 745m 高程处的三向测缝计测得的接缝沉降、张开与剪切位移分别从震前的 10.82mm、6.03mm 和 9.08mm 增至震后的 53.86mm、34.89mm 和 58.39mm。大坝的渗流量无明显变化。

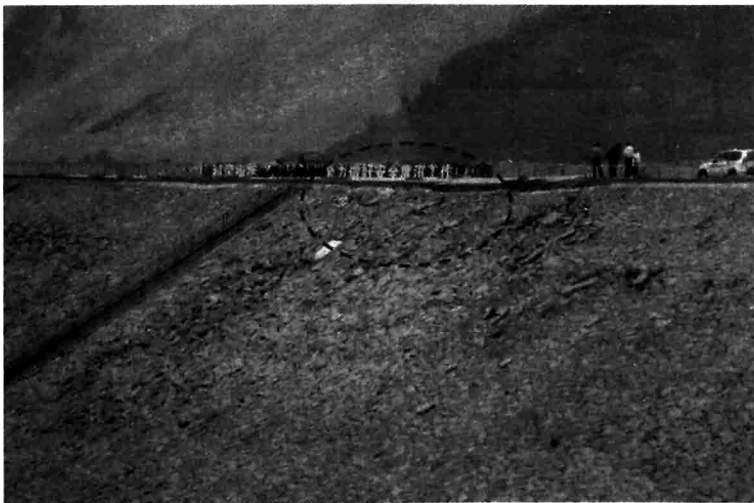


图 1.2 紫坪铺大坝地震后的震陷现象

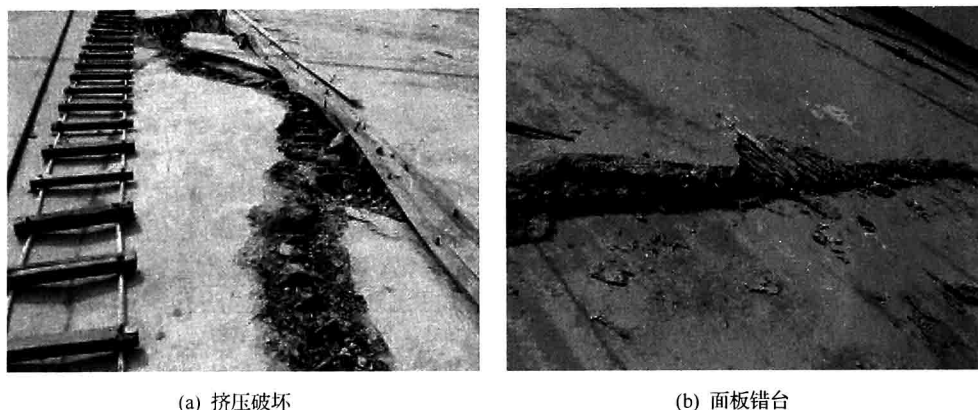


图 1.3 紫坪铺大坝混凝土面板破坏现象

2. Cogoti 面板坝(Luis et al., 1985; 韩国城和孔宪京, 1996)

智利的 Cogoti 面板堆石坝建成于 1938 年, 位于智利圣地亚哥北部约 275km。该坝采用早期的抛投式, 堆石料由安山角砾岩定向爆破堆后抛填完成。坝高 85m, 坝顶长 160m, 坝顶宽 8m, 上游坝坡平均 1:1.4, 下游坝坡 1:1.5。上游面采用不透水的混凝土面板进行防水, 面板被分成多块 10m×10m 的平板, 接头处采用 60cm 宽的铜止水并用铆钉连接。工程于 1938 年建成, 运行期曾经历四次大地震。其中以 1943 年的 7.9 级地震影响最大。地震后分析, 坝基地表最大加速度为 0.15g~0.30g, 当地表最大加速度为 0.19g 时, 坝上部 1/3 的坝体的最大加速度为 0.37g。1943 年的地震使坝顶产生 38.1cm 的沉降, 约相当于震前 4.5 年沉降量之和, 并在沉降曲线上形成突变(图 1.4)。以后几次地震基本没有影响。而且这次地震引起的瞬时沉降, 使长期沉降曲线产生了突变, 以后 3 次地震坝顶没有明显的瞬时变形。抛填式堆石变形较大, 导致横缝、竖缝和周边缝漏水; 地震时坝顶和下游坡块石有错动和滚落现象, 震后下游边坡由原来的 1:1.5 变成 1:1.65, 且中间坝段的坝顶发现纵向裂缝; 坝顶附近面板的下游面因其沉降而造成悬空外露, 面板上部的纵缝由于挤压使接缝处混凝土出现了一些破碎现象, 缝中沥青填料被挤出, 但水面以上面板的接缝还是完整的。

3. 皆濑面板坝(韩国城和孔宪京, 1996)

日本的皆濑坝采用抛填水冲法填筑, 坝高 66.5m, 1963 年建成, 上游坝坡 1:1.35, 下游坝坡 1:2.0, 至 1983 年共经历过 6 次地震。在 1964 年男鹿地震中坝体沉降为 0.7cm, 新潟地震使面板接缝轻微损伤, 坝顶路面开裂, 坝体沉降 6.1cm, 水平变位 4cm, 渗漏量由地震前的 90L/s 增加到 220L/s; 在此之后的几次

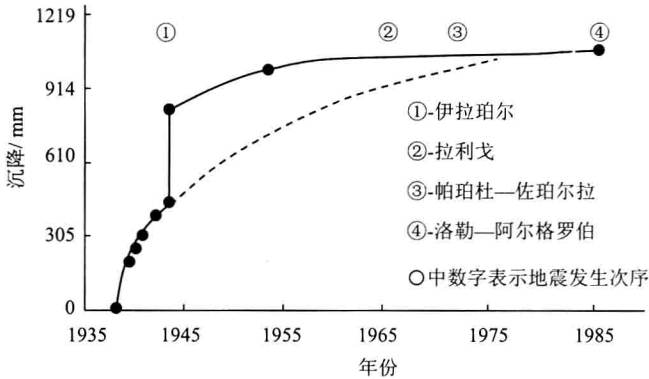


图 1.4 Cogoti 坝顶沉降曲线

地震中,均未发生明显的破坏。

4. Malpasse 坝(韩国城和孔宪京,1996)

秘鲁的 Malpasse 坝为抛填式面板坝,坝高 78m,上游面板下方用人工或起重机干砌堆石,坝坡为 1 : 1.5,面板最大厚度为 0.61m。1938 年遭遇地震,估计坝址处最大地面加速度为 0.1g。地震使坝体沉降 7.6cm,向下游水平位移 5.1cm。1958 年又一次受到地震的影响,坝体产生 3.2cm 的沉降并向下游变形 5.8cm。

5. Cogswell 面板堆石坝(Boulanger et al., 1993, 1995)

Cogswell 面板堆石坝建于 1935 年,位于加利福尼亚州 Whittier 市北部 32km,坝高约 85m。抛填堆石是级配良好的花岗片麻岩。上游坝坡是 1 : 1.25。下游坝坡是 1 : 1.3、1 : 1.5 与 1 : 1.6。

Cogswell 坝经历了 1987 年的 Whittier Narows 地震和 1991 年的 Sierra Madre 地震,震级分别为 5.9 和 5.8,震中分别位于坝西南方向 28.8km 和西北方向 3.7km。Cogswell 坝在 Whittier Narows 地震中未见明显震害。在 Sierra Madre 地震中,不仅在坝顶路面出现了轻微的横向细微裂缝和胸墙上三个接缝位置处的竖向裂缝,而且混凝土面板沿两侧坝肩靠近混凝土防渗墙部位发生裂缝,最大裂缝宽度 12.7mm。

Whittier Narows 地震中,右侧坝肩、右侧坝顶和中央坝顶的顺河向最大地震动加速度分别为 0.06g、0.1g 和 0.15g,加速度放大倍数约为 2.4。Sierra Madre 地震中,右侧坝肩、右侧坝顶和中央坝顶的顺河向最大地震动加速度分别为 0.26g、0.32g 和 0.42g,加速度放大倍数约为 1.6。

参 考 文 献

- 陈厚群,徐泽平,李敏. 2008. 汶川地震与大坝安全. 水利学报,39(10):1158-1167
- 陈生水,霍家平,章为民. 2008. 汶川“5.12”地震对紫坪铺混凝土面板堆石坝的影响及原因分析. 岩土工程学报,30(6):795-801
- 傅志安,凤家骥. 1992. 混凝土面板堆石坝. 武汉:华中科技大学出版社
- 韩国城,孔宪京. 1996. 混凝土面板堆石坝抗震研究进展. 大连理工大学学报,(06):74-86
- 孔宪京,邹德高. 2014. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟. 北京:科学出版社
- 孔宪京,邹德高,周扬,等. 2009. 汶川地震中紫坪铺混凝土面板堆石坝震害分析. 大连理工大学学报,49(05):667-674
- Boulanger R W, Bray J D, Merry S M, et al. 1993. Dynamic response analyses of cogswell Dam during the 1991 Sierra Madre and 1987 Whittier//Proceedings of Seminar on Seismological and Engineering Implications of Recent Strong-motion Data,Sacramento
- Boulanger R W, Bray J D, Merry S M, et al. 1995. Three-dimensional dynamic response analysis of Cogswell Dam. Canadian Geotechnical Journal, (32): 452-464
- Luis A, Ismael I, Guillermo N. 1985. Performance of Cogoti Dam under seismic loading//Concrete Face Rockfill Dams—Design, Construction and Performance. ASCE, New York

第 2 章 面板堆石坝的动力特性

随着电子计算机与计算方法的发展,土石坝动力数值分析取得了重要进展,由最早的基于弹性变形分析的剪切梁法发展到能够考虑多种因素的非线性有限元法。利用这些方法进行土石坝动力分析,可以得到地震时坝体的加速度、动应力等动力反应,据此进一步估算坝体的地震稳定或永久变形。然而,由于土石填筑材料性质复杂,与计算模型有关的物理参数选定困难,计算成果往往存在许多不确定性,所以理论分析模型与成果需要得到原型观测(包括地震灾害调查)和模型试验的检验。由于通过原型地震观测取得比较完整的坝体动力反应资料并不容易,且原型观测设备及管理和维护费用昂贵,所以室内模型试验自然受到国内外许多学者的重视。面板堆石坝由大量散粒体材料堆筑的坝体和防渗体构成,结构尺寸和变形模量相差悬殊,而且土石材料呈现强非线性,因此,模型试验方法和测试技术水平是模型试验成败的关键。作者课题组从模型试验的相似理论入手,与信息技术和图像技术交叉融合,提出了面板堆石坝振动台模型试验方法,提高了面板堆石坝模型试验的测试水平。

2.1 面板堆石坝振动台模型试验方法

2.1.1 模型相似技巧

堆石料等散粒体材料在动荷载作用下的动剪切模量和阻尼比随剪应变幅呈非线性变化,所以建立完全满足相似条件的面板堆石坝振动台模型是十分困难的,只能放弃或部分放弃某些相似条件,用与原型相同的填筑材料,在几何相似的前提下,尽可能使被观测的主要物理量满足相似条件。结构动力模型试验有三种基本相似换算关系(林皋,1958;林皋和林蓓,2000),适用于不同的情况。

1. 弹性相似律

在研究结构的自振频率与振动模态等振动特性时,可以保持惯性力与弹性恢复力的相似,即

$$\lambda_p \lambda_l^3 \lambda_a = \lambda_F$$

又有

$$\lambda_a = \frac{\lambda_u}{\lambda_l^2}$$

$$\lambda_u = \lambda_\epsilon \lambda_l \text{ (几何相似条件)}$$

$$\lambda_\sigma = \lambda_\epsilon \lambda_E \text{ (物理相似条件)}$$

$$\lambda_F = \lambda_\sigma \lambda_l^2 \text{ (边界相似条件)}$$

式中, λ_ρ 为密度比尺; λ_l 为长度比尺; λ_a 为加速度比尺; λ_F 为外力比尺; λ_u 为变形比尺; λ_t 为时间比尺; λ_E 为弹性模量比尺; λ_σ 为应力比尺; λ_ϵ 为应变比尺。联合以上几式可得

$$\lambda_t = \lambda_l \sqrt{\frac{\lambda_\rho}{\lambda_E}} \quad (2.1)$$

这是弹性相似律的要求。

2. 重力相似律

若在模型设计中主要保持振动惯性力与重力的比例相同, 则结构加速度比尺

λ_a 与重力加速度比尺 λ_g 相同, 即 $\lambda_g = \frac{\lambda_a}{\lambda_l^2}$, 由 $\lambda_g = 1$ 和 $\lambda_\epsilon = 1$ 可得

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} \quad (2.2)$$

这是重力相似律的要求。

3. 弹性-重力相似律

许多情况下重力对结构的振动变形产生重要影响, 同时还要考虑弹性恢复力的作用, 这时模型相似条件要同时满足式(2.1)和式(2.2)。联合两式可得

$$\lambda_E = \lambda_\rho \lambda_l \quad (2.3)$$

这是弹性-重力相似律的要求。

由于土石料的强非线性性质, 土工建筑物动力模型的相似关系一直被认为是一个难以解决的问题。通过二十多年的土石坝动力模型试验的实践发现, 在微震情况下, 土石坝在宏观上具有连续弹性体的性质, 振动变形基本上可以恢复, 不可逆变形只占很小的比例。因此, 在微震试验中可以采用弹性相似关系进行模型和原型间的相似换算。但是, 随着激励加速度的增大, 土石料表现出强非线性性质, 使土工建筑物的加速度分布逐渐趋于均化, 在接近破坏阶段时, 土石坝坝顶与坝基加速度的比值趋近于 1.0, 即坝体各部分的剪切模量(或弹性模量)及其分布对接近破坏时坝体加速度分布的影响基本上可以忽略不计。土石坝原型观测的结果及地震响应分析的数值结果都证实了这一现象。因此, 为了研究土工建筑物在强震时的破坏形态或破坏程度, 从满足工程需要的精度出发, 可以采用重力相似关系。

作者课题组的研究不但关注面板堆石坝的自振特性和动力响应, 更关心坝体的地震破坏机理与抗震加固措施。因此, 采用相对严格的弹性-重力相似律来设计模型、选择和研制模型材料。