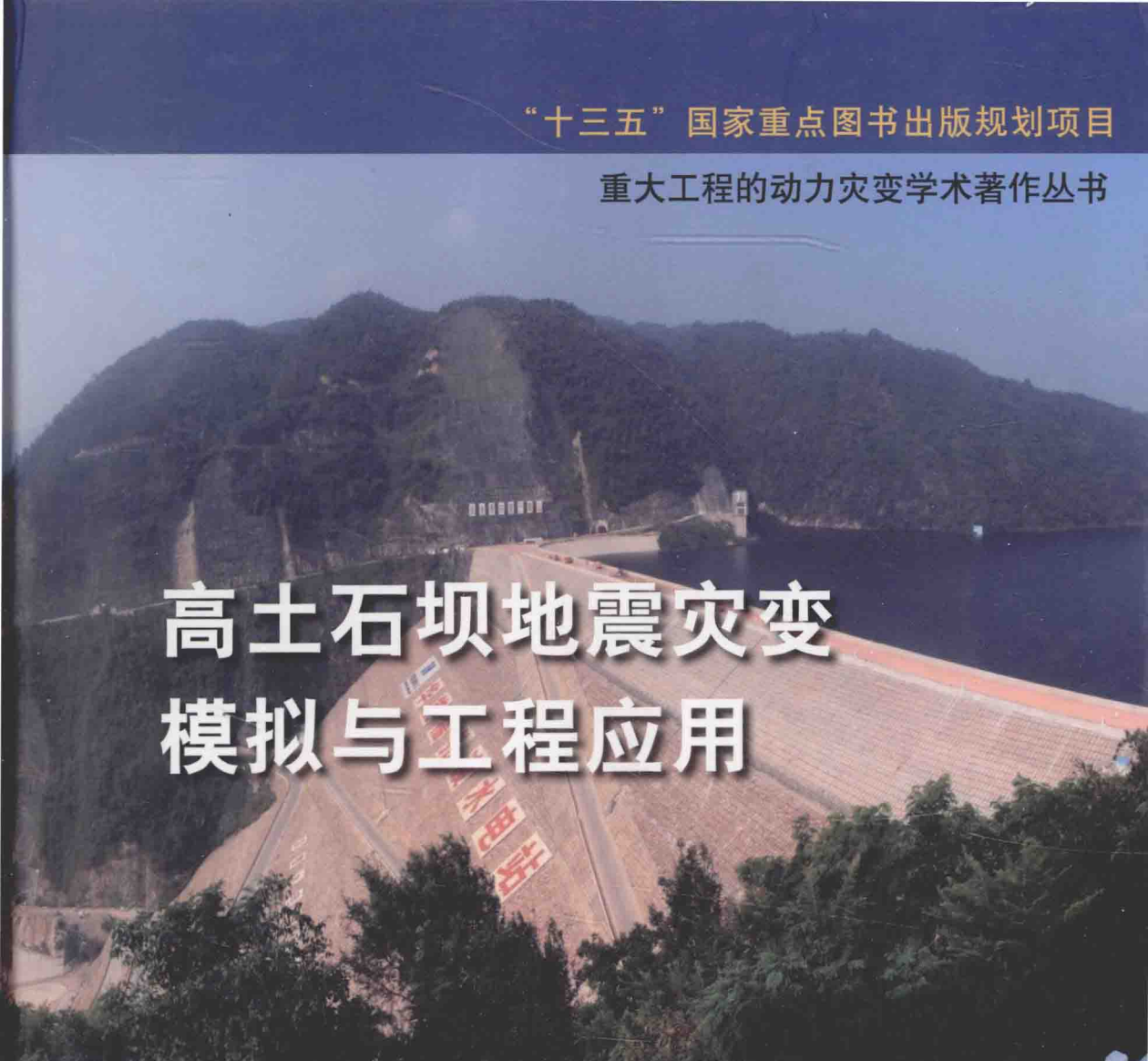


“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程的动力灾变学术著作丛书



高土石坝地震灾变 模拟与工程应用

孔宪京 邹德高 著



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目
重大工程的动力灾变学术著作丛书

高土石坝地震灾变模拟与工程应用

孔宪京 邹德高 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系高土石坝抗震研究方面的专著,主要介绍近十年来作者课题组在高土石坝地震灾变模拟与工程应用方面的研究成果。

本书共分9章。内容包括:绪论;筑坝堆石料剪胀特性和本构模型;三维广义塑性接触面本构模型及其应用;考虑库水及涌浪的流固耦合精细分析方法;混凝土面板破坏发展过程和加固措施分析方法;高土石坝-河谷-地基动力相互作用分析;高土石坝三维地震灾变模拟平台集成;紫坪铺面板堆石坝静、动力弹塑性有限元分析;高面板坝面板地震安全控制方法。

本书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,也可以作为水利水电工程、土木工程及相关专业的设计、施工和科研的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高土石坝地震灾变模拟与工程应用/孔宪京,邹德高著. —北京:科学出版社,2016.9

(重大工程的动力灾变学术著作丛书)

“十三五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-050034-2

I. ①高… II. ①孔…②邹… III. ①高坝-土石坝-地震模拟试验-研究 IV. ①TV641.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 231869 号

责任编辑:吴凡洁 冯其玲 / 责任校对:贾娜娜

责任印制:肖 兴 / 封面设计:左 讯

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

*

2016年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:314 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

土石坝的筑坝历史悠久,由于它具有对地形地质的良好适应性、能就地就近取材、施工简便且造价较低等优点,而成为世界坝工建设中应用最广泛、发展最快的一种坝型。我国在新一轮的水电大开发中,土石坝的高度已由过去几十米发展到100m级、200m级,乃至300m级,这些大坝多位于我国西部地区,而西部地区地震活动频繁、强度大,在如此复杂地震区修建高土石坝,少有国外经验可借鉴,已建的高坝也缺少实际震害的检验。2008年汶川大地震中,紫坪铺大坝经受了强烈地震的考验,但也出现了不同程度的损坏,表现出明显震后残余变形、面板中部出现挤压破坏、施工缝错台等破坏型式,这在以往设计和抗震复核时均没有充分考虑。需要指出,紫坪铺大坝坝高156m,其地震震害实例与在建和拟建的300m级高坝相比,抗震性能及其破坏性态还可能有着本质的差异。由于挡水建筑坝即使在超强震条件下也绝不允许发生库水失控下泄灾变,因此对高土石坝抗震分析提出了更高的要求,已有经验远不能满足强震条件下大坝的安全性评价要求。

为了解决高土石坝的抗震安全问题,我国科学家和工程师不断进行科技攻关,取得了显著的成就。孔宪京教授就是其中一位代表,30多年来,他结合我国水利水电工程建设,围绕土石坝振动台模型试验方法、地震破坏机理与抗震对策、筑坝粗粒土静动力特性及其本构模型、数值分析方法以及抗震安全评价等方面开展了系统的理论与工程实践,研究成果在我国吉林台、糯扎渡、天生桥、猴子岩、旁多等高土石坝工程中应用。

《高土石坝地震灾变模拟与工程应用》是作者团队近年来在高土石坝抗震安全性评价面临的关键技术的最新研究成果,体现了我国大坝抗震工作者从引进、消化、吸收、再创新向自主创新的跨越,书中绝大部分内容是国内外关于高土石坝抗震专著中所没有的创新性研究成果,包括了筑坝材料弹塑性本构模型、大坝-地基-水库体系动力相互作用、混凝土防渗体损伤和破坏分析方法、大坝地震破坏全过程模拟、高性能和精细化计算软件、面板抗震措施等内容。该书不仅是有特色的学术专著,还可供工程技术人员参考。

马洪琪

中国工程院院士

2016年7月

前 言

近年来,在世界范围内连续多次发生了近场大地震,重大工程遭到严重破坏。我国地处两大地震带(环太平洋地震带和欧亚地震带)的交汇处,是世界上地震灾害最严重的国家之一。

随着水电战略的实施,我国已建、在建或拟建一大批高坝。土石坝由于具有适应不同的坝址条件、就地取材、结构简单、便于施工等优点,已成为高坝建设中的主要坝型。土石坝的建设高度不断增加,其中双江口大坝高达 314m,两河口、古水、马吉、如美及茨哈峡水电站坝高都接近或超过 300m。

西部地区是我国水能资源丰富的地区,地质条件复杂、地震频发、强度大,这些高坝一旦因地震而溃决,不但会造成重大经济损失,而且对下游所形成的次生灾害将严重威胁人民生命和财产安全。正如陈厚群院士指出:高坝大库在我国重大基础设施建设中无可替代的重要作用、难以避让的抗震安全问题以及一旦发生严重灾变不堪设想的次生灾害,决定了确保高坝抗震安全的极端重要性。

然而,目前高土石坝动力分析方法仍在线性或等效线性范围内,对各种相互作用影响的研究大多被简化并孤立进行,难以对强震作用下高土石坝动力灾变过程、耦合效应及其影响进行深入研究和科学认识。因此,为满足国家重大工程需求,开展高土石坝地震灾变模拟与工程应用研究,重点突破筑坝材料强非线性、混凝土防渗体局部损伤与渐进破坏、大坝-地基-库水动力相互作用、地震破坏全过程模拟以及高性能、精细化计算软件等方面的科学问题和技术难题,对提升我国高坝抗震设计水平、保障能源安全和维持社会经济可持续发展具有十分重要的意义。

近十年来,作者在国家自然科学基金重大项目(90815024)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51421064)、国家自然科学基金重大项目集成项目(91215301)、国家自然科学基金项目(51379028 和 51279025)、中国水电工程顾问集团有限公司重大科技项目的资助下,依托我国紫坪铺面板堆石坝(156m)、双江口心墙堆石坝(314m)、两河口心墙堆石坝(295m)、猴子岩面板堆石坝(223m)、茨哈峡面板堆石坝(253m)、古水面板堆石坝(242m)等一批世界级高土石坝工程,开展了高土石坝地震灾变模拟与工程应用研究。本书的主要目的是介绍这些研究成果,希望能够抛砖引玉,对国内同行的教学、科研和高土石坝抗震设计起到借鉴和帮助的作用。

在编写过程中,大连理工大学工程抗震研究所徐斌副教授、周晨光工程师、周扬博士、刘京茂博士以及研究生张宇、余翔、许贺、屈永倩等在这方面给予了大力支持和帮助,在此对他们深表感谢。

受作者水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请同行和读者批评指正。

作 者

2016 年 3 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 本书的主要内容	3
参考文献	5
第 2 章 筑坝堆石料剪胀特性和本构模型	6
2.1 筑坝堆石料的剪胀特性	6
2.1.1 单调荷载下筑坝堆石料的剪胀特性	7
2.1.2 循环荷载下筑坝堆石料的剪胀特性	18
2.1.3 小结	29
2.2 堆石料弹塑性本构模型	30
2.2.1 考虑颗粒破碎的状态相关堆石料广义塑性模型	30
2.2.2 碾压颗粒破碎引起的级配变化对堆石坝计算变形的影响	41
参考文献	50
第 3 章 三维广义塑性接触面本构模型及其应用	55
3.1 三维广义塑性接触面模型	55
3.1.1 模型框架	56
3.1.2 接触面闭合和张开模拟	59
3.2 接触面模型对面板与垫层接触面变形及面板应力的影响	60
3.2.1 面板与垫层接触面模型应用现状	60
3.2.2 大坝有限元模型	60
3.2.3 材料本构模型及其参数	61
3.2.4 施工和蓄水分析	65
3.2.5 地震反应分析	68
3.2.6 小结	75
参考文献	76
第 4 章 考虑库水及涌浪的流固耦合精细分析方法	79
4.1 大坝-库水动力相互作用进展	79
4.2 基于有限体积法的流固耦合方法及精度验证	80

4.2.1	流固弱耦合分析方法	80
4.2.2	流体域离散——有限体积方法	82
4.2.3	算例验证	87
4.3	基于比例边界有限元法的流固耦合方法及精度验证	89
4.3.1	比例边界有限元方法简介	89
4.3.2	流体域离散——SBFEM	96
4.3.3	算例验证	102
4.3.4	三维面板堆石坝算例	105
4.4	考虑库水及涌浪的流固耦合精细分析方法	114
4.4.1	实现思路	114
4.4.2	高面板堆石坝地震涌浪分析	115
4.4.3	地震动峰值加速度和反应谱对涌浪高度的影响	118
4.5	结论	120
	参考文献	120
第5章	混凝土面板破坏发展过程和加固措施分析方法	122
5.1	普通混凝土塑性损伤模型实现	123
5.1.1	有效应力和损伤变量	123
5.1.2	混凝土弹塑性损伤本构积分的 Return-Mapping 算法	127
5.1.3	模型和程序数值验证	131
5.1.4	Koyna 大坝地震损伤分析	134
5.2	普通混凝土共轴旋转裂缝模型集成	135
5.2.1	共轴旋转应力应变概念	136
5.2.2	等效裂缝宽度计算	137
5.2.3	材料应力应变关系	138
5.2.4	模型和程序数值验证	142
5.3	发展钢纤维混凝土塑性损伤模型	143
5.3.1	模型改进	144
5.3.2	模型和程序数值验证	145
5.4	普通钢筋混凝土面板的动力开裂分析	146
5.4.1	有限元模型	146
5.4.2	材料参数	146
5.4.3	地震动输入	147
5.4.4	钢筋混凝土面板动力响应分析	147
5.5	面板损伤细观不均匀性分析	150
5.5.1	混凝土细观单元模型	151

5.5.2 考虑面板不均性动力损伤分析	155
5.6 结论	160
参考文献	160
第6章 高土石坝-河谷-地基动力相互作用分析	163
6.1 非一致地震波输入方法	163
6.1.1 黏弹性人工边界及黏弹性人工边界单元	164
6.1.2 等效节点荷载	165
6.1.3 算例验证	168
6.2 地震动输入方法对土石坝动力反应的影响分析	175
6.2.1 地震动输入方法对黏土心墙坝动力反应的影响	175
6.2.2 地震动输入方法对三维面板堆石坝动力反应的影响	182
6.2.3 地震波动类型及入射方向对面板堆石坝动力反应的影响	188
6.3 工程应用	199
6.3.1 工程概况	199
6.3.2 有限元模型及材料参数	200
6.3.3 地震加速度时程	201
6.3.4 计算结果分析	201
参考文献	203
第7章 高土石坝三维地震灾变模拟平台集成	205
7.1 传统土石坝计算软件的框架	205
7.2 高土石坝地震灾变模拟软件集成	207
7.2.1 高性能计算技术	207
7.2.2 高土石坝地震灾变模拟软件框架	209
参考文献	216
第8章 紫坪铺面板堆石坝静、动力弹塑性有限元分析	217
8.1 紫坪铺大坝工程概况	217
8.2 紫坪铺面板坝有限元计算模型和堆石料参数反演分析	219
8.2.1 大坝有限元网格	219
8.2.2 材料本构模型	220
8.2.3 填筑和蓄水过程	221
8.2.4 汶川地震过程	222
8.3 紫坪铺面板堆石坝填筑分析	224
8.4 汶川地震下紫坪铺面板堆石坝动力分析	225
8.4.1 加速度	225
8.4.2 大坝变形	227

8.4.3 面板与垫层间脱空	229
8.5 结论	235
参考文献	235
第9章 高面板坝面板地震安全控制方法	237
9.1 钢纤维混凝土面板堆石坝的抗震性能	237
9.1.1 有限元模型	238
9.1.2 材料参数	238
9.1.3 地震动输入	239
9.1.4 数值分析结果	239
9.1.5 地震动强度的影响	244
9.2 UHTCC-钢筋混凝土复合面板抗震性能分析	245
9.3 结论	248
参考文献	248

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

为满足国民经济建设对能源发展和节能减排的需求,水电开发已成为国家重要的新能源战略。我国水能资源的 80% 以上分布在西部地区,高坝大库的建设已进入高潮期。高土石坝(土心墙堆石坝、面板堆石坝)由于具有适应地形地质条件、充分利用当地材料、建设周期短等优点,已成为高坝建设中的主要坝型。土石坝的高度已由过去的几十米发展到 100m 级、200m 级,乃至 300m 级。初步统计,国内已建、在建及拟建在强震区且坝高在 200m 以上的高土石坝如表 1.1 所示。

表 1.1 国内高土石坝工程一览表

序号	工程名称	最大坝高/m	主坝坝型	设计加速度/ g	备注
1	如 美	315	心墙堆石坝	0.32	拟建
2	双江口	314	心墙堆石坝	0.21	在建
3	两河口	295	心墙堆石坝	0.288	在建
4	糯扎渡	261.5	心墙堆石坝	0.283	已建
5	茨哈峡	253	面板堆石坝	0.266	拟建
6	大石峡	251	面板堆石坝	0.286	拟建
7	拉 哇	244	面板堆石坝	0.37	拟建
8	古 水	242	面板堆石坝	0.286	拟建
9	长河坝	241	心墙堆石坝	0.359	在建
10	猴子岩	223.5	面板堆石坝	0.297	在建
11	玛尔挡	211	面板堆石坝	0.299	拟建

我国地震活动性和地震大趋势预测研究结果表明,未来百年内我国大陆地区可能发生 7 级以上大地震约 40 次,8 级以上特大地震 3~4 次。我国特别是西南、西北地区地震频度高且强度大,据中国地震局统计,我国近代 82% 的强震都发生在该地区。自 20 世纪以来,在该地区就发生过 17 起 7 级以上的大地震(表 1.2),其中最典型的为 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。地震具有突发性和不确定性,这对高土石坝的抗震安全构成了巨大威胁,高土石坝一旦遭遇地震,将产生严重的地震灾变。

从大坝安全控制的角度看,大坝填筑、蓄水过程乃至后期流变等危及大坝安全时,我们完全有时间采取有效措施消除隐患,大坝安全是可以控制的。然而,这些高坝一旦遭遇强烈地震,突如其来的地震荷载将引发坝坡的瞬间失稳和坝体的突发变形(坝体沉降、接缝与周边缝张开、施工缝错台、面板挤压破坏等),进而可能导致坝体严重破坏,大坝防渗功能丧失,其安全是难以控制的。

高度为 156m 的紫坪铺面板堆石坝在 2008 年汶川地震中发生了坝顶路面开裂、坝顶震陷、上游面板施工缝错台及面板挤压破坏、下游护坡块石松动乃至滚落等严重的地震灾变,严重影响了水库功能的正常发挥。基于我国国情,高坝大库无可替代的重要位置、难以避让的抗震安全问题及一旦发生严重灾变不堪设想的次生灾害后果,决定了确保高坝抗震安全的极端重要性(陈厚群,2009)。

表 1.2 我国西部地区历史大地震(震级 7 级以上)

序号	名称	日期	震级
1	宁夏海原大地震	1920. 12. 16	8. 5
2	西藏墨脱地震	1950. 8. 15	8. 5
3	云南通海地震	1970. 01. 05	7. 7
4	四川炉霍地震	1973. 02. 06	7. 9
5	云南昭通地震	1974. 05. 11	7. 1
6	云南大关地震	1974. 05. 11	7. 1
7	云南龙陵地震	1976. 05. 29	7. 4
8	四川松潘地震	1976. 08. 16	7. 2
9	云南省澜沧地震	1988. 11. 06	7. 6
10	云南省耿马地震	1988. 11. 06	7. 2
11	青海共和地震	1990. 04. 26	7. 0
12	云南孟连地震	1995. 7. 12	7. 3
13	云南丽江地震	1996. 02. 03	7. 0
14	青海昆仑山地震	2001. 11. 14	8. 1
15	新疆于田地震	2008. 3. 21	7. 3
16	四川汶川地震	2008. 05. 12	8. 0
17	青海玉树地震	2010. 04. 14	7. 1

2008 年,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部实施了“重大工程的动力灾变”的重大研究计划。其科学目标为:针对长大桥梁、大型建筑(包括超高建筑、大型空间建筑、城市大型地下建筑)和高坝三类重大工程,采用理论分析、模型试验、现场实测和数值模拟等研究手段,发挥工程与材料科学、地球科学、数理科学和信息科学等多学科交叉创新的优势,研究强地震动场和强/台风场及其动力作用

下重大工程的损伤破坏演化过程,揭示重大工程的损伤机理和破坏、倒塌机制,建立重大工程动力灾变模拟系统,实现对强地震动场和强/台风场的动力作用从统计推断到统计推断结合理论预测的重点跨越和理论升华,实现对重大工程的动力灾变过程从简单效应分析到多效应耦合的全过程分析的重点跨越和理论升华,提升我国对重大工程防灾减灾基础研究的原始创新能力,为保障我国重大工程(千米级大桥、500m级超高层建筑、300m级高坝等工程)的安全建设和运营提供科学支撑,为我国重大工程防灾减灾培养创新人才,使我国在成为重大工程建设大国的同时,成为认识和解决相关重大科学问题的强国。

2012年,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部又实施了“重大工程的动力灾变”研究计划的集成项目。其科学技术目标为:针对大型地下结构、重大建筑、桥梁结构及高坝等重大工程,在前期研究成果的基础上开展集成研究,面向目标、集中突破、做出特色、重点跨越,构建可持续平台与集成系统;重点突破强地震动场和强/台风场,重大工程结构构件、结构整体及其耦合介质的非线性动力损伤演化和灾变过程,以及重大工程结构动力灾变的失效机理、失效模式优化和灾变控制的模拟、集成与验证等关键科学问题,研发并集成具有自主知识产权的软件系统,形成重大工程动力灾变模拟集成系统。

作者课题组有幸参与了“重大工程的动力灾变”中的重点项目“高土石坝地震灾变模拟及安全控制方法研究(90815024)”和集成项目“高坝、地下结构及大型洞室群地震灾变集成研究”的专题——“高土石坝地震灾变过程模拟与集成研究(91215301)”。此外,2012年中国水电工程顾问集团有限公司、华能澜沧江水电有限公司、云南华电怒江水电开发有限公司、黄河上游水电开发有限责任公司联合组织启动了科技项目“300m级高面板堆石坝安全性及关键技术研究”,本书第一作者为第5专题“300m级高面板堆石坝抗震安全性及工程措施研究”的负责人。作者课题组在这些重大课题的资助下,依托我国一批世界级高土石坝工程,开展了高土石坝地震灾变模拟与工程应用研究。

1.2 本书的主要内容

本书第1章为绪论,第2章到第9章主要介绍高土石坝地震灾变模拟与工程应用。

目前土石坝动力分析广泛采用等效线性分析方法,该分析方法将堆石料视为黏弹性材料,仅能反映中、低强度地震的加速度反应,对大坝的地震永久变形则需要借助残余变形分析方法进一步计算,不能满足大坝在强震时可能出现的强非线性乃至破坏过程的分析要求。弹塑性分析方法能够较好地反映土体的实际状态,可以模拟静、动力全过程并直接计算坝体的永久变形,在理论上更为合理。因此,

从等效线性分析转向强非线性和弹塑性分析是十分必要的。本书第2章对不同初始密度和围压时的紫坪铺大坝筑坝堆石料的剪胀特性进行了系统研究,首先分析单调荷载下堆石料剪胀的基本规律,然后分析循环荷载下堆石料的剪胀规律。在颗粒破碎、临界状态和剪胀特性试验研究基础上,基于广义塑性模型的框架,吸取边界面理论和临界状态理论的优点,发展了一个单调和循环荷载下与颗粒破碎状态相关的堆石料广义塑性模型。

土与结构刚度的差异使两者界面处存在一定厚度的不同于一般土体的区域。面板堆石坝中面板与堆石之间、坝肩与堆石之间均存在这样的区域。这些接触面在大坝变形过程中伴随着滑移、张开和闭合等非连续变形,其变形特性对结构物的受力变形有重要影响,但目前常用的接触面本构模型大都假定两个剪切方向相互独立,而三维接触面试验表明这是不合理的。本书第3章采用边界面理论,提出了一个三维弹塑性接触面模型,并利用文献中的试验结果进行了验证。

地震时,库区的地面运动将会使面板堆石坝上游坝面承受附加的动水压力,充分认识坝面动水压力对坝体地震反应的影响,对于新建大坝抗震设计和已建大坝抗震安全评估具有重要的意义。目前,关于库水动水压力对坝体地震反应影响的问题仍然没有合理解决,工程计算中最常用的方法是按照 Westergaard(1933)建议的将库水附加质量计入,但没有考虑大坝的三维河谷效应、库水的可压缩性以及涌浪的影响。本书第4章综合有限元法、有限体积法和比例边界有限元分析方法,建立了面板坝-库水流固耦合精细分析模型,可以精确考虑库水可压缩性、涌浪、复杂河谷条件下的动水压力及其对面板应力的影响。

混凝土面板作为一种准脆性材料,强震时易发生损伤开裂,并表现出刚度退化和应变软化的特性。目前,分析面板堆石坝的面板应力时基本采用线弹性模型,导致计算的应力往往远超混凝土的强度,难以评价大坝的破坏模式和极限抗震能力。本书第5章实现了混凝土塑性损伤本构模型的数值方法,通过对高面板坝的弹塑性有限元动力反应分析,研究混凝土面板在地震荷载作用下损伤的发生和发展过程。此外,为了研究面板抗震措施及其效果,还实现了普通混凝土和超韧性混凝土的旋转裂缝模型,并发展了钢纤维混凝土塑性损伤模型,为定量评估面板抗震措施及其效果提供了理论和技术支撑。

地震动输入是大坝抗震安全性评价的重要前提,目前,土石坝动力有限元计算中采用的地震动输入方式主要是均匀一致的输入方式,即直接对坝体施加地震惯性力,能量系统是封闭的,不能反映坝体、河谷和地基之间的动力相互作用及无限地基的辐射阻尼。本书第6章通过集成黏弹性人工边界和等效节点荷载的方法,实现了对高土石坝-河谷-地基系统能量开放的动力相互作用分析,并系统地研究了地震动输入方法、地震波类型和入射方向对高土石坝动力响应的影响。

计算机数值模拟作为一种重要的科学研究手段,在土石坝抗震防灾方面得到

日益广泛的应用。但传统的土石坝抗震计算软件仅适合非线性弹性问题,难以对强震作用下高土石坝动力灾变过程、耦合效应及其影响进行深入研究和科学认识。本书第7章在自主开发的大型岩土工程静、动力分析软件 GEODYNA 的基础上,进一步综合筑坝材料强非线性、混凝土防渗体损伤分析方法、大坝-地基-库水动力相互作用,以及高性能、精细化计算等方面的最新研究成果,实现了高土石坝的地震灾变全过程模拟,为准确评价大坝抗震性能、优化安全控制方法等提供了有效的技术手段。

为了验证高土石坝地震灾变全过程模拟软件平台的合理性,本书第8章采用该软件平台对紫坪铺面板堆石坝在汶川地震中发生的震害现象进行弹塑性数值分析,并根据数值计算结果,对大坝沉降、面板挤压破坏、面板施工缝错台和面板脱空等实际地震破坏现象进行模拟及对比分析。

面板坝的抗震安全性主要依赖上游防渗面板的动力响应,对高面板坝面板应力特性的准确把握和预测,明确面板高应力区的分布情况,并提出有效的地震安全控制方法,是保证强震区高面板坝安全的重要基础。本书第9章建议了具有延性破坏特性的钢纤维混凝土面板和超高韧性水泥基复合材料-钢筋混凝土面板,并采用弹塑性动力有限元分析方法研究了上述两类面板材料对面板动力响应和损伤开裂过程的影响。

参 考 文 献

- 陈厚群. 2009. 汶川地震后对大坝抗震安全的思考. 中国工程科学, 11(6): 44-53.
Westergaard H M. 1933. Water pressures on dam during earthquake. Transactions-ASCE, 98: 418-433.

第 2 章 筑坝堆石料剪胀特性和本构模型

2.1 筑坝堆石料的剪胀特性

剪胀方程是弹塑性模型的重要组成部分,代表了塑性流动方向,同时也表明了剪切和压缩的耦合关系。剪胀方程也是联系颗粒材料微观行为和宏观反应的一个纽带 (Newland and Allely, 1957; Rowe, 1962; Matsuoka, 1974)。因此,合理的剪胀方程对正确认识颗粒材料的变形特性是十分重要的。Rowe(1962)通过分析不同排列形式的均匀球形颗粒,从理论和试验两方面系统地研究了剪胀与应力状态的关系,提出了著名的 Rowe 应力剪胀方程。Rowe 剪胀方程虽由不同的颗粒排列推导而来,但根据假定最小能量比推导一般式,忽略了颗粒排列和孔隙比等因素的影响。Rowe(1962)试验研究表明,相位变换时应力比 M_f 并非常数,与颗粒材料的状态和应力历史有关,其大小取决于颗粒材料的“重塑”程度。Li 和 Dafalias (2000)通过分析不同排列的均匀颗粒在剪切条件下的变形特性,认为剪胀关系与当前状态也有关,提出了与状态相关的剪胀方程。状态相关剪胀方程能够反映剪胀的状态变化,更合理地反映状态变化对剪胀的影响。表 2.1 汇总了一些剪胀方程的表达式。

表 2.1 剪胀方程汇总

文献出处	剪胀方程及参数意义
Rowe(1962)	$D^p = 9(M_f - \eta)/(9 + 3M_f - 2M_f\eta)$, 式中, M_f 一般取为临界状态应力比 M_g ; η 为应力比
Roscoe(1963)	$D^p = M_f - \eta$, 式中, M_f 一般取为 M_g ; η 为应力比
Roscoe 和 Burland(1968)	$D^p = (M_f^2 - \eta^2)/2\eta$, 式中,参数与 Roscoe(1963)参数一致
Nova 和 Wood (1979)	$D^p = (M_f - \eta)/(1 - N)$, 式中, M_f 一般取为 M_g ; η 为应力比; N 为斜率参数
Matsuoka (1974)	$D^p = (M_f - \eta)/D_\lambda$, 式中, M_f 一般取为 M_g ; D_λ 为斜率参数; η 为应力比

续表

文献出处	剪胀方程及参数意义
Lagioia 等 (1996)	$D^p = D_\mu (M_f - \eta) (D_a M_f / \eta + 1)$, 式中, M_f 一般取为 M_g ; η 为应力比; D_μ 、 D_a 为材料常数
Alonso 等 (2007)	$D^p = [D_a + D_\beta / (\eta W^p / p')^2] - D_\beta^2$, 式中, M_f 一般取为 M_g ; η 为应力比; p' 为有效平均主应力; D_β 、 D_a 为材料常数
Li 和 Dafalias (2000)	$D^p = d_0 (M_f - \eta) / M_g$, 式中, M_f 可取为 $M_f = M_g + k\psi$ (Manzari and Dafalias, 1997), $M_f = M_g \exp(k\psi)$ (Li and Dafalias, 2000), $M_f = M_g - \psi_i $, 其中 $\psi_i = \psi - \lambda(1 - \eta/M_g)$ (Jefferies and Shuttle, 2002), ψ 为状态参数 (Been and Jefferies, 1985); d_0 为材料常数

目前,剪胀特性的试验研究主要集中在砂土,有关堆石料剪胀特性的研究还较少,且未见循环荷载下的堆石料剪胀试验研究成果。作者课题组对不同初始密度和围压时的紫坪铺大坝筑坝堆石料的剪胀特性进行了系统研究,首先分析单调荷载下堆石料剪胀的基本规律(Liu et al., 2016),然后分析循环荷载下堆石料的剪胀规律(Kong et al., 2016)。

2.1.1 单调荷载下筑坝堆石料的剪胀特性

1. 剪胀比的定义

剪胀比 D^p 为塑性应变增量的比值,表示为

$$D^p = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_s^p} = \frac{d\epsilon_v - dp'/K}{d\epsilon_s - dq/3G} \quad (2.1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.3)$$

$$E = E_0 p_a F(e) \left(\frac{p'}{p_a} \right)^n \quad (2.4)$$

式中, $d\epsilon_v$ 为体变增量(以压为正); $d\epsilon_s = d\epsilon_1 - d\epsilon_v/3$ 为广义剪应变增量,其中, $d\epsilon_1$ 为轴向应变增量; $d\epsilon_v^p$ 、 $d\epsilon_s^p$ 分别为塑性体应变和剪应变增量; q 为广义偏应力; p' 为平均主应力; K 、 G 分别为体积和剪切弹性模量; ν 为泊松比; E_0 和 n 为材料常数; $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ 用来反映孔隙比对弹性模量的影响(Richart et al., 1970); e 为当前孔隙比; p_a 为标准大气压。