

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与
工程研究著作 丛书

高堆石坝变形宏观 机制与数值模拟

◎周 伟 常晓林 马 刚 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
岩石力学与工程研究著作丛书

高堆石坝变形宏细观机制 与数值模拟

周 伟 常晓林 马 刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以高堆石坝变形宏观机制与全过程控制为主题,重点阐述高堆石坝变形宏观机制与全过程控制理论与方法,提出堆石体材料细观结构特征的精细化描述方法、细观变形演化过程的组构分析方法、考虑细观劣化效应的堆石体材料宏观演化模型、堆石体细观随机颗粒不连续变形分析方法、基于连续-离散耦合的堆石颗粒体破碎和细观流变数值模拟技术、堆石料缩尺效应的细观机理以及基于流固耦合效应的心墙堆石料细观变形模拟方法,建立了高堆石坝结构变形分析的大型 FEM/DEM 耦合数值分析平台,依托高堆石坝工程,从堆石体材料的结构特征、力学性能和工程特性等多角度提出了高堆石坝全过程动态预测与反馈分析相结合的变形预测和控制方法。在论述高堆石坝变形宏观机制与全过程控制及数值模拟方面,既以作者及团队的研究成果为主,又力图兼顾国内外的研究现状与主要成果。

本书适用于水利、水电、岩土等行业从事水工结构和岩土力学的科研人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业的研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

高堆石坝变形宏观机制与数值模拟 / 周伟,常晓林,马刚著. —北京:科学出版社,2017

(岩石力学与工程研究著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-051036-5

I. 高… II. ①周… ②常… ③马… III. 高坝-堆石坝-变形-数值模拟
IV. TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 303870 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 1 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:392 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副主编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(以姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉东	刘汉龙	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

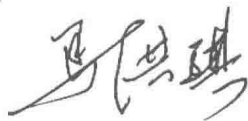
编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

序

高堆石坝变形机理与控制是高堆石坝工程设计施工和科学研究中的关键科学技术问题,其一为堆石体结构特征的组构描述与材料性能的宏细观演化机理,其二为堆石体细观结构特征的三维随机颗粒不连续变形分析方法,其三为高堆石坝工作性态与演化规律及变形控制方法。这三个坝工领域的科学问题虽然侧重点不同,但却相互影响、相辅相成、共成体系,课题组在理论方法、技术平台和工程应用三个层面取得了创新性成果。在理论方法上,研究了堆石体材料结构特性的精细化描述与力学性能的演化模型,提出堆石体材料细观结构特征的精细化描述方法,发展了细观变形演化过程的组构分析方法,建立了考虑细观劣化效应的堆石体材料宏观演化模型,深刻揭示了颗粒集合体的细观组构演化特性对宏观力学和变形响应的影响以及堆石料缩尺效应的细观机理。在技术平台上,开展了高堆石坝宏细观变形机理的数值模拟研究工作,首次提出堆石体细观随机颗粒不连续变形分析方法,研发了基于连续—离散耦合的堆石颗粒体破碎和细观流变数值模拟技术,提出基于流固耦合效应的心墙堆石料细观变形模拟方法,建立了高堆石坝结构变形分析的大型 FEM/DEM 耦合数值分析平台,为高堆石坝变形宏细观机制研究和应力变形分析提供了新的技术手段。在工程应用上,基于堆石体材料细观结构特征和宏细观变形演化规律,采用大型三轴试验和宏细观数值仿真试验手段,依托水布垭、糯扎渡、瀑布沟等高堆石坝工程,从堆石体材料的结构特征、力学性能和工程特性等多角度提出了解决堆石体缩尺效应的数值试验方法,以及高堆石坝全过程动态预测与反馈分析相结合的变形预测和控制方法。该书的研究成果不仅对于解决我国高堆石坝变形控制问题有直接的应用价值,而且对丰富水工结构计算力学理论和方法也具有重要的理论价值。

作者对这一课题的研究自 20 世纪 90 年代初开始,潜心科学研究,治学严谨,博学笃行,取得了丰富的研究成果。该书选编了其中的主要研究成果,相信一定可以推动我国高土石坝理论研究的不断创新。



中国工程院院士

前 言

我国是当今世界高坝建设的中心,堆石坝具有取材方便、地形适应性强等优点,是三大主流坝型之一。目前在建和拟建坝高超过 200m 的堆石坝已达数十座,超出了现行规范的适用范围。对筑坝颗粒材料的力学特性认识不足已成为制约堆石坝建设和颗粒力学发展的瓶颈。2009 年,美国科学院认为“颗粒力学”是未来 10 年力学面对的重大挑战,2014 年中国科学院将它列为力学学科的 6 个基础与前沿领域之一。因此,开展高堆石坝筑坝颗粒材料力学特性研究具有重要理论意义和应用价值。笔者所在的研究团队涉及高堆石坝筑坝颗粒材料宏观力学特性等基础研究问题多年,结合水布垭、双江口、茨哈峡等多个重大水电工程,以及国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“水工结构静动力性能分析与控制”,国家自然科学基金面上项目“考虑流变和 HM 耦合效应的高土石坝心墙细观破坏机理研究”、“高堆石坝流变的细观组构机理研究”,国家自然科学基金青年科学项目“高堆石坝流变模型理论及变形控制研究”,中国工程科技中长期发展战略研究联合基金项目“300m 级面板堆石坝适应性及对策研究”,中国水电顾问集团科技攻关项目“300m 级高面板堆石坝安全性及关键技术研究”,教育部新世纪优秀人才支持计划“复杂条件下堆石体细观变形机理及宏观变形调控方法研究”,高等学校博士学科点专项科研基金项目“堆石体宏观细观变形演化过程的多尺度力学模型及数值模拟”等十余项科研项目。采用理论研究与工程实践相结合、细观机理研究与宏观等效描述相结合、数值模拟与试验验证相结合、大坝施工期变形预测与运行期的工作性态评价相结合、从设计阶段和施工阶段到运行阶段多种坝体变形控制技术相结合以及多学科交叉的研究方法,围绕堆石体变形的宏观细观、非线性和全过程等特征,针对堆石体细观变形机理、堆石坝宏观变形预测以及变形控制等关键技术难题,系统开展了筑坝颗粒材料宏观力学特性、数值分析方法和全生命周期变形控制研究,建立了基于力学性能演化规律和宏观细观变形机制的堆石体变形控制理论。本书是对研究团队在这一领域系列研究成果的系统介绍和阶段总结。

本书分为 8 章,第 1 章介绍堆石坝筑坝颗粒材料的研究现状、发展趋势、研究内容及研究方法;第 2 章论述堆石体材料结构特性的精细化描述与组构分析方法;第 3 章论述堆石体材料的随机颗粒不连续变形分析方法;第 4、5 章论述堆石体应力变形细观数值模拟方法,包括考虑时间效应的堆石体流变数值模拟和考虑流固耦合效应的数值模拟;第 6 章论述基于细观数值试验的高堆石坝宏观细观变形机制研究;第 7 章论述高堆石坝瞬变-流变联合反演平台;第 8 章论述堆石料缩放尺效应

研究。

作者所在研究团队的刘杏红博士、程勇刚博士,以及博士研究生胡超、杨利福、李少林、袁薇、马幸等提供了部分素材和诸多帮助,并付出了辛勤劳动,在此一并表示衷心感谢。

最后还要感谢国家自然科学基金委员会、长江勘测规划设计研究院、中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、贵州省水利水电勘测设计研究院、中国水利水电建设工程咨询公司、湖北清江水电开发有限责任公司、国电大渡河流域水电开发有限公司、华能澜沧江水电有限公司等单位在本书的应用研究方面所给予的大力支持!

由于作者水平和经验有限,不足之处在所难免,敬请同行和读者批评指正。

周伟

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究对象及研究意义	1
1.2 研究现状及发展趋势	4
1.2.1 堆石体结构与细观组构模型研究	4
1.2.2 堆石体细观力学特性及细观变形机理研究	5
1.2.3 堆石体细观变形演化过程的数值模拟方法研究	6
1.2.4 堆石体流变变形机理研究	7
1.2.5 堆石体尺寸效应研究	8
1.3 研究内容、技术路线与研究方法	9
1.3.1 研究内容与技术路线	9
1.3.2 研究方法	11
参考文献	13
第2章 堆石体材料结构特性的精细化描述与组构分析方法	19
2.1 堆石体材料结构特性的精细化描述	19
2.2 堆石体材料颗粒集合体的组构分析方法	22
2.3 加载引起的细观组构演化规律	25
2.3.1 配位数	25
2.3.2 组构各向异性	32
2.3.3 颗粒空间排列	37
2.4 小结	40
参考文献	40
第3章 堆石体材料的随机颗粒不连续变形分析方法	42
3.1 三维随机多面体颗粒生成算法	42
3.2 三维颗粒的接触检索	44
3.2.1 遍历式接触检索算法	44
3.2.2 基于二叉树的颗粒接触检索算法	45

3.2.3 基于映射网格的颗粒接触检索算法	46
3.2.4 基于排序的颗粒接触检索算法	47
3.2.5 Munjiza-NBS 接触检索算法	49
3.2.6 公共面接触检索方法	52
3.3 连续-离散耦合分析方法	54
3.3.1 接触模型与接触力分析	54
3.3.2 可变形颗粒的本构模型与节点力	54
3.3.3 节点动力平衡方程	55
3.4 颗粒破碎的模拟	56
3.4.1 基于内聚力模型的颗粒破碎模拟方法	56
3.4.2 基于通用岩石劣化模型的颗粒破碎模拟方法	59
3.5 小结	61
参考文献	61
第4章 考虑时间效应的堆石体流变变形的细观数值模拟方法	65
4.1 堆石体流变机理与劣化效应	65
4.2 基于黏结损伤模型的堆石体流变在离散元中的实现	67
4.2.1 损伤度在离散元中的模拟方法	67
4.2.2 流变时间的模拟方法	71
4.2.3 堆石体双轴流变数值试验	73
4.3 基于颗粒劣化效应的堆石体流变在 SGDD 中的实现	79
4.3.1 强度劣化模型	79
4.3.2 流变在 SGDD 方法中的实现	81
4.3.3 堆石体三轴流变数值试验	82
4.4 双江口 300m 级心墙堆石坝工程实例应用	86
4.4.1 工程概况及研究内容	86
4.4.2 堆石体流变变形机理的组构研究成果	88
4.4.3 计算条件和三维有限元模型	88
4.4.4 考虑流变效应的双江口应力变形分析(E-B模型)	90
4.5 小结	97
参考文献	97
第5章 考虑流固耦合效应的堆石体应力变形细观数值模拟方法	99
5.1 水力劈裂	99
5.2 颗粒离散元流固耦合的计算方法	102
5.2.1 基本原理	102
5.2.2 流体计算	103

5.2.3 压力计算	103
5.2.4 流固耦合方式	103
5.2.5 求解方法	104
5.3 心墙水力劈裂的细观模拟	105
5.3.1 心墙水力劈裂的颗粒流计算模型	105
5.3.2 流体计算参数的敏感性分析	106
5.3.3 水力劈裂机理的细观分析	109
5.4 小结	112
参考文献	112
第6章 基于细观数值试验的高堆石坝宏细观变形机制研究	115
6.1 细观数值试验的参数敏感性分析	115
6.1.1 颗粒间摩擦系数	116
6.1.2 颗粒强度	121
6.1.3 接触模型参数	124
6.2 堆石体复杂应力路径下的力学特性	125
6.2.1 常规三轴试验	126
6.2.2 等应力比加载路径	133
6.2.3 真三轴试验	146
6.3 堆石体与结构物接触特性的数值试验	158
6.3.1 数值试验条件及实现过程	160
6.3.2 接触面宏观力学特性分析	162
6.3.3 接触面细观力学响应分析	168
6.4 考虑颗粒破碎的数值试验	176
6.4.1 数值试验条件及实现过程	176
6.4.2 基于 CZM 模型考虑颗粒破碎的堆石体三轴数值试验	178
6.5 堆石体的颗粒流模型及细观数值试验	190
6.5.1 随机多面体颗粒的生成方法研究	190
6.5.2 基于不规则颗粒形状的堆石体三轴数值试验研究	194
6.5.3 考虑颗粒破碎的堆石体三轴数值试验	204
6.6 小结	217
参考文献	220
第7章 高堆石坝瞬变-流变联合反演平台	226
7.1 堆石体本构模型参数的智能反演方法	226
7.2 基于粒子迁徙的粒群算法	227
7.3 参数敏感性分析	231

7.4	确定待反演参数及目标函数	232
7.5	高堆石坝瞬变-流变参数三维全过程联合反演优化算法	233
7.6	水布垭面板堆石坝变形参数的综合反演及变形预测	235
7.7	小结	240
	参考文献	240
第8章	堆石料缩尺效应研究	242
8.1	堆石料缩尺效应的细观机理	242
8.1.1	影响因素	242
8.1.2	颗粒强度的尺寸效应	245
8.2	堆石料数值剪切试验研究	281
8.2.1	细观参数率定	281
8.2.2	宏观力学特性分析	282
8.2.3	强度变形参数提取	285
8.3	基于堆石料数值试验的面板坝应力变形分析	290
8.3.1	计算参数	290
8.3.2	计算模型	291
8.3.3	计算结果及分析	291
8.4	小结	293
	参考文献	294

第 1 章 绪 论

1.1 研究对象及研究意义

随着社会经济的快速发展以及西部水电开发进程的加快,我国西南地区正在或即将建设一批调节性能好的高堆石坝,如其宗(356m)、苗尾(139.8m)、双江口(314m)、两河口(295m)、长河坝(240m)等心墙堆石坝,以及古水(242m)、梨园(185m)、马吉(270m)、茨哈峡(253m)、如美(315m)等高面板堆石坝。这些坝高大多在 200m 级以上,有些甚至超过 300m 以上,属超高堆石坝工程,因此高坝大库的安全建设成为水利水电建设中广泛关注的重点问题。

近几十年来,我国的堆石坝建设取得了举世瞩目的成绩。特别是进入 20 世纪以来,多座具有里程碑意义的堆石坝工程相继建成,2000 年天生桥一级面板堆石坝建成,2006 年建成洪家渡(179.5m)、紫坪铺(156m)和水布垭(233m)三座高面板堆石坝,其中水布垭面板堆石坝是当今世界上最高的面板堆石坝。2013 年建成的 261.5m 高的糯扎渡心墙堆石坝为心墙堆石坝坝型中世界第三,亚洲第一。

由于我国高堆石坝建设起步较晚,特别是已建的 200m 级以上的高堆石坝较少,运行时间也较短,因此关于 200m 级以上高堆石坝的建设及运行方面积累的经验较少,还有一些需进一步解决的问题。同时,近期建设的几座 200m 级高堆石坝在取得成功及宝贵经验的同时,部分工程出现坝体变形偏大、产生裂缝、防渗体系破损、渗漏量较大等问题。同时,现有监测资料表明,高堆石坝的坝体变形与设计阶段的预测值相比经常偏大很多,且稳定时间偏长。有些高堆石坝在经过十多年的挡水运行后,其变形(尤其是不均匀变形)的量值变化尚未稳定。在高堆石坝的运行期,坝体或面板结构破损的情况时有发生。图 1.1.1(a)为我国已建成的某高心墙堆石坝运行期发生坝顶大规模纵向裂缝的情况,裂缝长度沿坝轴线长达 627m。图 1.1.1(b)为我国已建成的某高面板堆石坝运行期发生面板挤压破坏的情况。虽然采用现代筑坝技术修建的高堆石坝还没有出现失稳、溃决等重大安全事故,但对于 200~300m 级超高堆石坝,由于坝高、库大,一旦溃决失事,相对于同规模的混凝土坝,不但会造成重大的经济损失,而且下游形成的次生灾害将造成难以估量的人民生命财产损失。因此,提高堆石坝工程的设计施工水平,保证其安全性是国家经济和公共安全保障的重大需求。

已建高堆石坝所表现出的问题表明,我国在高堆石坝坝料力学性能和演化机理、工作性态和破坏机制与安全控制等基础理论研究严重不足,现有的设计理论和

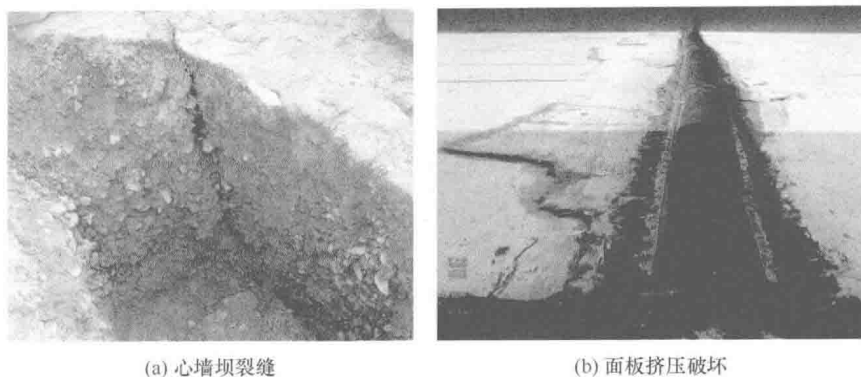


图 1.1.1 高土石坝结构破坏

分析方法还不足以支持设计者全面把握超高堆石坝的工程特性、关键技术问题和运行特点,使得专家、学者对 200m 级高坝的安全问题十分关注,对能否安全建设 300m 级高堆石坝表现出了质疑,严重限制了高堆石坝作为优势坝型的发挥,降低了水电站经济指标竞争力,因此迫切需要加强高堆石坝设计和运行安全可靠的基础问题研究。

高堆石坝变形宏细观机制与全过程控制及其应用以“九五”国家重点科技攻关项目“200m 级高混凝土面板堆石坝研究”、中国工程科技中长期发展战略研究联合基金项目“300m 级面板堆石坝适应性及对策研究”,国家自然科学基金项目“考虑流变和 HM 耦合效应的高土石坝心墙细观破坏机理研究”、“高堆石坝流变的细观组构机理研究”、“高堆石坝流变模型理论及变形控制研究”、“考虑结构性演化的粗粒土扰动状态概念本构模型及其试验验证”,中国水电顾问集团科技攻关项目“300m 级高面板堆石坝安全性及关键技术研究”、国家十五科技支撑计划项目课题“深厚覆盖层条件倒截流及围堰安全控制技术”,教育部新世纪优秀人才支持计划“复杂条件下堆石体细观变形机理及宏观变形调控方法研究”,高等学校博士学科点专项科研基金项目“堆石体宏细观变形演化过程的多尺度力学模型及数值模拟”,水利部公益性行业专项经费项目“超百 m 级覆盖层上高土石坝坝基变形控制技术”,“水布垭面板堆石坝变形控制研究”、“水布垭面板堆石坝运行期变形预测及工作形态评价”等一批科研项目为背景,围绕堆石体结构特征的细观演化机理与组构描述、随机颗粒不连续变形分析方法与堆石体变形的宏细观机制、高堆石坝全过程变形控制理论与方法等问题开展了室内试验、数值模拟、监测反演和相关理论研究。

高堆石坝变形宏细观机制与全过程控制及其应用主要涉及三个方面的问题:一是堆石体的细观结构特征和宏观力学性质;二是堆石体宏细观变形特性的数值模拟方法;三是堆石坝的工作性态及演变规律。

作为堆石坝的主要筑坝材料,堆石体是由块石、碎石、砂砾石颗粒集合而成的无黏性摩擦材料,具有不确定性、时空变异性和多相耦合特性。堆石体的级配、压实度、颗粒形状,以及颗粒的排列方式决定堆石体的结构特征。其爆破成料过程与后续的施工碾压过程,工后运行过程中长期物理力学特性演变等会极大地改变堆石体的级配特征和压实度,进而改变了堆石体的力学特性及大坝建成后的变形特性等。受试验手段的限制,在高围压、高应力水平和复杂应力路径下堆石体的力学特性很难通过室内试验准确把握,加上试件缩尺处理改变了堆石体的结构特征,进而改变堆石体的力学性质,其测得的参数并不能准确反映坝体中堆石体的变形和强度特性,影响设计者对堆石坝变形规律和量值的判断。

与此同时,基于连续介质力学和唯象的建模方法,学者提出众多的堆石体本构模型。已有的堆石体弹塑性模型多以传统弹塑性理论为基础,并结合堆石体的变形特性进行适当的修正。高堆石坝由于其应力水平较高,颗粒破碎的现象比较严重,对堆石体强度和变形特性的影响较为显著。颗粒滑移和颗粒破碎应变两者发生的机理不同,在现行的本构模型中,未将两种变形机理加以区分,一般采用统一的针对颗粒滑移变形的表述方法。因此,对高应力颗粒破碎严重的堆石体,现有本构模型具有局限性。此外,目前常用的本构模型主要是建立在常规三轴试验的基础上,对模型的合理性和适用性的验证工作至今仍不充分,尤其是针对超高堆石坝中高应力水平、复杂应力路径和真三轴条件的研究工作尚不多见。

传统的数值模拟方法以连续介质力学为基础,难以描述堆石体在细观(颗粒)尺度上的结构特征与演化过程,如颗粒破碎、滑移、运动等,导致它很难从机理上反映堆石体的非线性、弹塑性、剪胀性和各向异性,只能从宏观层面等效地得出堆石体的应力变形关系。对于如此复杂的颗粒系统,经典土力学和连续介质力学似乎到了解决问题的极限。以离散元方法为代表的非连续分析方法,以颗粒的运动和相互接触计算为核心,能从堆石颗粒尺度上描述堆石体的力学性质,从而避开复杂的本构关系。同时,数值试验不受试验尺寸的限制,能够区分影响堆石体力学性能的各种因素,易于监测堆石体内部结构的演化过程,一方面为研究堆石体的细观变形机理提供了新的途径,另一方面为完善堆石体的本构模型提供了依据。因此,有必要以离散元方法为手段,从宏细观角度深入研究堆石体的力学特性。

高堆石坝的工作性态及演变规律是设计和施工中的核心问题。大坝的工作性态非常复杂,受到填筑过程、坝料性质、材料分区、坝址环境、气候等众多因素的影响。高堆石坝的变形特性与低坝相比发生了很大的变化,在数值计算中普遍存在“低坝算大,高坝算小”的现象。在高堆石坝的应力变形数值仿真分析方面,现有的宏观本构模型与计算方法都存在不少问题。对于300m级的高堆石坝要求更高的计算精度和更完善的分析方法,继续应用这些方法能否得出合理的结果,很难进行评价。因此,针对300m级高堆石坝的特点,在深入研究堆石体材料的细观结构特