

HUNNINGTU MIANBAN DUISHIBA  
YINGLI BIANXING TEXING YANJIU

# 混凝土面板堆石坝 应力变形特性研究

徐泽平 著



黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书在总结作者长期从事混凝土面板堆石坝数值计算分析研究成果的基础上,结合国家科技攻关项目和重点科研项目研究,对混凝土面板堆石坝的应力变形特性进行了系统的研究,分析、探讨了混凝土面板堆石坝在各种情况下的应力变形规律及其相关影响因素。其中,涉及了面板堆石坝的数值计算分析方法、面板堆石坝的应力变形特性和面板堆石坝的离心模型试验等多方面的内容,既有理论分析和论述,也有具体工程的应用实例。本书可供从事水利、水电工程设计、施工、科研等部门的工程技术人员参考,亦可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝应力变形特性研究 / 徐泽平著.  
郑州:黄河水利出版社,2005.12  
ISBN 7-80621-983-8

I.混… II.徐… III.混凝土面板堆石坝-应力-  
变形-特性-研究 IV.TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 130741 号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码 450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真 0371-66022620

E-mail yrcp@public.zz.ha.cn

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:15.5

字数:355 千字

印数:1—1 500

版次:2005 年 12 月第 1 版

印次:2005 年 12 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 7-80621-983-8 / TV·430

定价:38.00 元

## 序

混凝土面板堆石坝是近几十年来发展起来的一种新的土石坝坝型,具有安全性好、适应性广、施工方便、就地取材、投资省、工期短等一系列优点,并为国内外坝工界同仁所公认,且在国内外水利水电工程中得到广泛应用,它正在成为一种极具竞争力的比较坝型,在很多情况下还会成为首选坝型。

中国自 1985 年开始用现代技术修建混凝土面板堆石坝,至今已经过 20 年历程。与国外相比,起步虽晚,但起点较高,发展很快。根据 2004 年底的不完全统计,已建成和在建的坝高大于 30m 的混凝土面板堆石坝有 150 座左右,其中坝高大于等于 100m 的有 37 座。已建成的天生桥一级面板堆石坝,坝高 178m,居世界第二,而其库容、坝体体积、面板面积、泄洪流量等指标均居世界同类工程之首。在建的水布垭面板堆石坝,坝高 233m,为目前世界第一。坝高 220m 的江坪河面板堆石坝也已开工建设。中国混凝土面板堆石坝的数量、规模、技术难度都已居于世界前列。

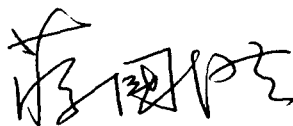
中国在混凝土面板堆石坝的建设过程中,一方面紧跟世界先进潮流,引进国外先进技术,另一方面也十分重视自主的科学研究和技术开发。多项国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金重点课题及水利水电行业重点科技课题,组织了全国的科技力量,对混凝土面板堆石坝建设中的关键问题,进行了大量和系统的科学研究,取得的成果应用于工程实践,推动了科技进步,使混凝土面板堆石坝的建设由经验和判断为主逐渐转向与理论分析和试验研究相结合的途径,开始迈出了坚实的步伐。

根据已建成的大量面板堆石坝的运行实态,由于坝体变形和不均匀变形引起的面板断裂、接缝张开、止水失效,并导致大量渗漏,影响工程的正常运行,甚至影响大坝安全或溃决,是其主要问题,对于高坝尤为严重。因此,大坝和面板的应力变形分析及其预测受到坝工界的普遍重视,成为研究的重点课题。本书作者针对混凝土面板堆石坝的应力变形特性问题,从分析方法、试验手段以及设计和施工等方面进行了系统、全面的分析,研究了混凝土面板堆石坝在各种情况下的应力变形规律及其相关影响因素,是这方面科研工作的重要代表之一。

本书作者在系统总结堆石材料工程特性的基础上,对其相关影响因素和分析模型进行了归纳和总结,并从工程实用的角度,对分析模型的应用进行了评述,同时还在试验资料的基础上,对堆石材料模型计算参数的统计分析进行了初步的探索。在面板堆石坝数值计算分析方法上,作者对面板堆石坝数值计算分析中接触面和接缝系统的模拟算法进行了较为系统的研究,提出了采用界面单元模拟面板与坝体堆石之间非连续接触界面的改进算法,并利用离心模拟试验对此计算方法进行了验证。对于涉及面板堆石坝应力变形特性的各方面影响因素(包括河谷形状、深厚覆盖层、堆石的压实标准、施工顺序及蓄水过程等)进行了系统的分析研究,从应力、变形分析的角度,对面板堆石坝,特别是高面板堆石坝设计、施工的基本准则提出了相关的建议。此外,作者还对面板堆石坝的离心模拟

试验技术进行了深入的研究,较为系统地研究了面板堆石坝离心模型试验的方法,并完成了百米级坝高、深厚覆盖层上面板砂砾石坝施工期和蓄水期的离心模型试验。同时,还对数值计算分析的结果与离心模型试验的结果进行了对比分析,体现了数值分析模型与物理模型相结合的研究思路。

在面板堆石坝的设计和施工中,大坝和面板结构的应力变形特性是关系到坝体安全和运行性状的一个重要问题。以往的面板堆石坝应力变形分析研究虽取得了一定的成果,但有关面板堆石坝应力变形特性方面的系统研究成果尚不多见。本书是作者20年来从事面板堆石坝工程科研工作的总结,其中不乏创新性的研究成果,不但具有重要的学术意义,同时也具有较大的工程实用价值。我相信本书的出版对混凝土面板堆石坝技术更为理性化,及其推广应用,将起到积极的作用。



2005年10月

## 前 言

混凝土面板堆石坝是目前坝工建设中最富竞争力和最具发展前景的坝型之一。从国内外面板堆石坝的研究来看,早期的面板堆石坝设计主要是以经验并结合工程师的判断为主,系统性的科研工作不多。近些年来,随着面板堆石坝技术的发展,面板堆石坝的设计正逐渐从经验判断转向以理论分析和试验研究为指导的阶段。

对面板堆石坝而言,坝体的应力变形特性是关系到坝体安全和运行性状的一个重要问题。在我国的面板堆石坝工程实践中,虽然取得了一定的成绩,但也有一些失败的教训。沟后面板砂砾石坝的垮坝事件、株树桥面板堆石坝面板的塌陷以及天生桥面板堆石坝的大量结构性裂缝等问题,都提示着我们切不可对面板堆石坝的应力变形问题掉以轻心。近些年来,随着面板堆石坝坝高的不断增加、坝址地形条件的日趋复杂,工程对面板堆石坝应力变形分析的理论和分析手段也提出了越来越高的要求。对于高面板堆石坝,如何正确预测坝体在各种工况条件下的变形趋势并在此基础上优化坝体的设计、确保面板受力的均匀,已成为面板堆石坝设计中的一个关键问题。

本书主要结合作者近些年来在面板堆石坝方面所做的一些研究工作和相关工程咨询的经验,阐述面板堆石坝应力变形分析的方法、原理,并分析、探讨混凝土面板堆石坝在各种情况下的应力变形规律及其相关影响因素。书中除介绍了数值分析的方法外,还介绍了大型土工离心模型试验的研究方法,同时在此基础上,对采用数值模型和物理模型相结合的方法解决混凝土面板堆石坝应力变形分析的思路进行了研究和探讨。作者力图从理论分析和工程实践两方面对混凝土面板堆石坝的应力变形特性进行系统的论述,从而为工程设计和施工提供有益的参考。

本书的部分研究工作得到国家电力公司重点科研项目的资助和国家科技攻关项目的支持。在编写过程中,得到了中国水利水电科学研究院岩土所同仁们的大力支持。作者特别感谢汪闻韶院士、杜延龄教授、张文正教授、蒋国澄教授、朱思哲教授等岩土所老前辈所给予的关心与指导。

书中不当之处,请读者给予批评和指正。

作 者

2005年8月

## 目 录

序	蒋国澄
前言	
第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 国内外研究现状综述	(2)
1.3 研究工作的主要内容	(3)
1.4 研究思路和组织结构	(3)
<b>上篇 面板堆石坝应力变形分析的数值分析方法研究</b>	
第 2 章 面板堆石坝数值分析的本构模型	(7)
2.1 概述	(7)
2.2 堆石的工程力学特性	(7)
2.3 堆石材料的本构模型	(11)
2.4 堆石本构模型的应用评价	(15)
2.5 邓肯模型运用中的处理及其讨论	(16)
2.6 堆石材料模型计算参数的统计分析	(20)
2.7 小结	(24)
第 3 章 面板堆石坝材料分区的优化设计	(26)
3.1 概述	(26)
3.2 面板堆石坝的分区原则	(27)
3.3 坝体材料分区的优化方法	(27)
3.4 利用软岩筑面板坝的断面分区优化	(30)
3.5 砂砾石面板坝的断面分区设计	(34)
3.6 小结	(35)
第 4 章 面板堆石坝接触面与接缝系统的计算模拟	(37)
4.1 概述	(37)
4.2 面板堆石坝接触面与接缝系统的工作特性	(37)
4.3 面板坝接触面与接缝系统的数值模拟	(39)
4.4 非连续介质界面单元法分析方法	(41)
4.5 界面元法在面板堆石坝计算分析中的应用	(52)
4.6 小结	(55)
第 5 章 面板堆石坝的反馈分析与仿真模拟	(57)
5.1 概述	(57)

5.2	反演计算方法	(57)
5.3	通过现场试验进行参数反演	(59)
5.4	根据观测资料进行参数反演	(60)
5.5	面板堆石坝的反馈分析	(62)
5.6	面板堆石坝施工运行的仿真模拟	(63)
5.7	小结	(66)

## 中篇 面板堆石坝的应力变形特性研究

<b>第6章</b>	<b>河谷形状对面板堆石坝应力变形的影响</b>	(70)
6.1	概述	(70)
6.2	河谷的形状参数及分析模型	(71)
6.3	计算方案	(72)
6.4	岸坡坡度的影响	(74)
6.5	河谷宽度的影响	(86)
6.6	非对称河谷的影响	(95)
6.7	工程实例分析	(98)
6.8	岸坡坡度与河谷宽度影响各计算工况的对比	(100)
6.9	小结	(105)
<b>第7章</b>	<b>深厚覆盖层上面板堆石坝的应力变形特性</b>	(107)
7.1	概述	(107)
7.2	深覆盖层上面板堆石坝的断面形式	(108)
7.3	察汗乌苏面板砂砾石坝的工程概况	(108)
7.4	数值分析方法	(109)
7.5	计算方案	(109)
7.6	计算成果	(112)
7.7	坝体的应力变形及其与深覆盖层的相互作用	(124)
7.8	坝体、覆盖层与面板、趾板和防渗墙的相互作用关系	(125)
7.9	连接板长度对防渗墙应力变形的影响	(126)
7.10	小结	(126)
<b>第8章</b>	<b>堆石压实标准和结构分区对面板堆石坝应力变形特性的影响</b>	(128)
8.1	概述	(128)
8.2	堆石体的结构分区设计和压实标准	(128)
8.3	压实标准对坝体应力变形的影响	(130)
8.4	次堆石区材料特性对面板应力变形的影响	(134)
8.5	特殊垫层区对周边缝位移的影响	(141)
8.6	冲碾压实技术在面板堆石坝中的应用	(141)
8.7	小结	(144)

<b>第 9 章 坝体分期施工及蓄水过程对面板堆石坝应力变形特性的影响</b> ·····	(146)
9.1 概述·····	(146)
9.2 临时度汛断面施工对坝体应力变形的影响·····	(146)
9.3 面板分期施工对面板应力的影响·····	(149)
9.4 施工期库水位升降变化对面板坝应力变形的影响·····	(153)
9.5 小结·····	(159)
<b>第 10 章 面板开裂机理分析及其防治措施</b> ·····	(160)
10.1 概述·····	(160)
10.2 面板的结构性裂缝·····	(160)
10.3 面板的温度及干缩裂缝·····	(165)
10.4 面板的抗裂措施·····	(169)
10.5 小结·····	(171)

### 下篇 面板堆石坝的离心模型试验研究

<b>第 11 章 离心模型试验综述</b> ·····	(174)
11.1 概述·····	(174)
11.2 国内外土工离心机发展现状·····	(174)
11.3 中国水利水电科学研究院的土工离心模型试验机——LXJ-4-450 ·····	(180)
11.4 土工离心机在土石坝工程中的应用·····	(183)
11.5 小结·····	(184)
<b>第 12 章 土工离心模型试验基本原理及若干基本模拟方法</b> ·····	(185)
12.1 概述·····	(185)
12.2 离心模型试验基本原理·····	(185)
12.3 离心模型试验中各物理量的相似关系·····	(190)
12.4 离心模型试验中堆石与混凝土结构的模拟·····	(191)
12.5 数值计算分析与离心模型试验的结合·····	(192)
12.6 小结·····	(193)
<b>第 13 章 深覆盖层上面板堆石坝的离心模型试验</b> ·····	(195)
13.1 概述·····	(195)
13.2 察汗乌苏面板坝的工程设计方案·····	(195)
13.3 离心模型试验方案的规划·····	(196)
13.4 离心模型试验过程·····	(202)
13.5 试验成果与分析·····	(206)
13.6 离心模型试验与数值计算的对比·····	(217)
13.7 小结·····	(221)
<b>第 14 章 总结与展望</b> ·····	(223)
14.1 研究内容总结·····	(223)



14.2 主要研究结论.....	(223)
14.3 进一步研究与展望.....	(226)
参考文献.....	(228)
Stress and Deformation Properties of CFRD .....	(230)
后记.....	(235)

# 第1章 绪论

## 1.1 引言

混凝土面板堆石坝(CFRD:Concrete Faced Rockfill Dam)是以堆石体为支承结构并在其上游表面设置混凝土面板作为防渗结构的一种堆石坝<sup>[1,2]</sup>。从1895年美国建成54m高的Morena坝至今,混凝土面板堆石坝的建设和发展经历了一个多世纪的发展历程。根据库克(J. B. Cooke)的观点<sup>[3,4]</sup>,堆石坝的发展进程可以划分为三个阶段:1850~1940年是以抛填堆石为特征的早期阶段;1940~1965年为从抛填堆石到碾压堆石的过渡阶段;1965年以后为推广碾压堆石的现代阶段。早期的面板堆石坝由于采用抛石填筑,坝体的填筑密实度不高,坝体的沉降变形较大,混凝土面板难以适应和承受较大的坝体变形,因而导致水库蓄水后严重的面板开裂和大量的库水泄漏,但坝体的运行是安全的。因此,一般认为,抛填式混凝土面板堆石坝的合理最大高度大致为60m<sup>[5]</sup>。由于抛填式面板堆石坝的上述问题,使得这一坝型的发展在20世纪40~50年代处于停滞状态。1960年美国土木工程师协会的论文集<sup>[6]</sup>,发表了美国一次堆石坝学术会议的论文和讨论文章。在C. M. Roberts的讨论文章<sup>[7]</sup>中,介绍了1958年完成的Quoich坝采用碾压式堆石筑坝的例子,这是最早采用薄层碾压堆石的工程实例。而在同一次会议上,Terzaghi也强调指出<sup>[8]</sup>:抛填堆石的压缩性远大于碾压堆石,随着坝高的增大,堆石高压缩性的有害影响随坝高的二次方而增加。因此,在修建高坝时,应优先采用分层碾压堆石代替抛填堆石。20世纪60年代后,面板堆石坝完成了从抛填堆石向碾压堆石的过渡。1971年澳大利亚建成高110m的Cethena面板堆石坝,奠定了现代混凝土面板堆石坝的技术基础。此后,1980年建成了巴西的Foz do Areia坝,坝高160m;1985年建成了哥伦比亚的Salvajina坝,坝高148m;巴西的Segredo坝,坝高145m;Xingo坝,坝高140m;1993年墨西哥建成的Aguamilpa坝,坝高187m,是当时世界最高的面板堆石坝。经过多年的发展和技术改进,面板堆石坝的设计和施工方法日趋成熟,在世界范围内的应用也日益广泛。从目前已建成坝的运行状况来看,大多数坝的运行性状良好,因而面板堆石坝正逐渐成为一种极富竞争力的土石坝坝型。

中国以现代技术修建混凝土面板堆石坝始于1985年<sup>[1]</sup>。第一座开工建设的是湖北西北口水库大坝,坝高为95m,而第一座完工的是辽宁关门山水库大坝,高度为58.5m。中国的现代混凝土面板堆石坝建设与国外相比,起步虽晚,但起点高、发展快。根据国际大坝委员会的统计,截至2001年,中国已建成或在建的面板堆石坝有105座<sup>[9]</sup>。1999年建成的天生桥一级水电站大坝,坝高为178m,在当时同类坝型中列居亚洲第一、世界第二;而目前正在建设中的清江水布垭面板堆石坝,则是目前世界上最高的混凝土面板堆石坝,坝高达到了233m;同时,还有坝高179.5m的贵州洪家渡面板堆石坝和坝高185m的贵州三板溪面板堆石坝等一批高混凝土面板堆石坝陆续开工建设。

## 1.2 国内外研究现状综述

综观现代面板堆石坝的发展历史,国内外坝工界普遍认为其经历了以下几个里程碑的发展过程。

(1)库克 1982 年在太沙基讲座上作了题为“堆石坝的进展”的报告<sup>[3]</sup>,报告中论述了混凝土面板堆石坝和心墙土石坝的发展过程,并以阿里亚坝为例介绍了混凝土面板堆石坝的最新工程实践,同时还列举了高混凝土面板堆石坝的主要设计特性。

(2)1985 年美国土木工程师学会(ASCE)在美国的底特律召开了混凝土面板堆石坝学术讨论会,会议的 37 篇论文介绍了当时国际上的大多数碾压式混凝土面板堆石坝,并讨论了其设计、施工及运行特性<sup>[11]</sup>。这次会议对推动面板坝的发展有着极其重要的意义,而该会议的论文集也成为了现代混凝土面板堆石坝的第一个系统性文件。

(3)1987 年,ASCE 期刊的岩土工程分册出版了面板堆石坝专辑<sup>[12]</sup>,专辑中发表了库克和谢腊德对 1985 年面板堆石坝会议的总结文章,以及 45 篇讨论文章和 25 篇总结讨论。文中介绍了会议上公开发表的各面板坝的运行资料,提出了设计和施工方面的意见,对现代面板堆石坝的实践经验和发展趋势给出了评价,同时还给出一些经验性的技术规定。

(4)在 1988 年的第 16 届国际大坝会议上(美国旧金山),特设了一个非土质防渗体堆石坝专题,主要讨论混凝土面板和沥青防渗体堆石坝的工程问题<sup>[13]</sup>。会议中发表了高兰(Khao Laem)、希拉塔(Cirata)和利斯(Reece)等面板堆石坝的工程资料,讨论了面板堆石坝变形分析和周边缝自愈性止水等问题,另外库克还提出了面板堆石坝的分区建议。

(5)1991 年至 1992 年,国际大坝委员会的“水力发电与坝工建设”期刊分别发表了两期混凝土面板堆石坝专辑<sup>[14,15]</sup>,主要介绍了塞格雷多、辛戈、阿瓜米尔巴、圣塔扬娜、克罗蒂、雅肯布等面板堆石坝的工程资料。

(6)1993 年在北京召开了国际高土石坝学术研讨会,此次会议以面板堆石坝为主,会议收录论文 103 篇,内容涉及了几乎当时国际上所有的面板堆石坝的资料<sup>[16]</sup>。这次会议被认为是继底特律 ASCE 面板堆石坝会议之后面板堆石坝工程界的第二次重要会议,在面板堆石坝的发展中具有重大的意义。

(7)2000 年 9 月,在第 20 届国际大坝会议期间召开了第 3 届混凝土面板堆石坝国际研讨会<sup>[17]</sup>,会议内容广泛,除介绍了中国的水布垭、天生桥、洪家渡和白溪等面板堆石坝的工程资料外,还介绍了巴西艾塔面板堆石坝施工中采用挤压式边墙的经验。

从国内外面板堆石坝的研究来看,在面板堆石坝的发展初期,国外混凝土面板堆石坝的设计主要以经验并结合工程师的判断为主,系统性的科研工作不多。近些年来,随着面板堆石坝技术的发展,巴西、墨西哥、澳大利亚等国家分别结合其工程建设的需要,在坝料试验、变形分析和止水结构等方面展开了一系列科研工作,面板堆石坝的设计正逐渐从经验判断转向以理论分析和试验研究为指导的阶段。从面板堆石坝应力变形分析的手段上看,国外的面板堆石坝数值计算分析相对较为简单,初期主要以线弹性分析和平面分析为主,近些年来也开始有部分工程采用了非线性计算分析,其计算方法主要为有限元法和有限差分法<sup>[17]</sup>。中国从 1985 年的第一座面板堆石坝开始,分别在“七五”、“八五”和“九五”

期间结合面板堆石坝工程的建设,就材料特性、数值分析和模型试验等课题进行了系列的科技攻关研究,在面板堆石坝的设计理论和工程实践中取得一系列的成果。

对面板堆石坝而言,坝体的应力变形特性是关系到坝体安全和运行性状的一个重要问题。在我国面板堆石坝的工程实践和分析理论研究中,虽然取得了一定的成果,但也有些失败的教训。沟后面板砂砾石坝的垮坝事件、株树桥面板堆石坝面板的塌陷以及天生桥面板堆石坝的大量结构性裂缝等问题都提示着我们切不可对面板堆石坝的应力变形问题掉以轻心。最近一些年来,随着面板堆石坝坝高的不断增加、坝址地形条件的日趋复杂,工程中对面板堆石坝应力变形分析的理论和分析手段也提出了越来越高的要求。对于高面板堆石坝,如何正确预测坝体在各种工况条件下的变形趋势,并在此基础上优化坝体的设计、确保面板受力的均匀已成为面板堆石坝设计中的一个关键问题。

### 1.3 研究工作的主要内容

本书在总结作者长期从事混凝土面板堆石坝数值计算分析研究成果的基础上,结合国家高混凝土面板堆石坝科技攻关项目,国家电力公司重点科研项目“峡谷地区高混凝土面板堆石坝关键技术应用研究”、“利用软岩筑混凝土面板堆石坝关键技术研究”和“深厚覆盖层筑坝关键技术研究”等科研项目,对混凝土面板堆石坝的应力变形特性进行了系统的分析研究,并由此分析探讨混凝土面板堆石坝在各种情况下的应力变形规律及其相关影响因素。在书中介绍的研究工作中,除采用数值分析的方法外,还采用了大型土工离心模型试验的研究方法。在此基础上,对采用数值模型和物理模型相结合的方法解决混凝土面板堆石坝应力变形分析的思路进行了研究和探讨。具体内容如下:

(1)在系统总结堆石材料工程特性的基础上,对其相关影响因素和分析模型进行了归纳和总结,并从工程实用的角度,对分析模型的应用进行了评述,同时还在试验资料的基础上,对堆石材料模型计算参数的统计分析进行了初步的探索。

(2)对面板堆石坝数值计算分析中接缝系统的模拟算法进行了较为系统的研究,提出了采用界面单元模拟面板与坝体堆石之间非连续接触界面的改进算法,并利用离心模型试验对此计算方法进行了验证。

(3)从数值计算的角度,对面板堆石坝坝体断面材料分区的优化设计以及坝料参数的反演计算进行了分析研究,在此基础上,提出了面板堆石坝参数反演计算和施工运行仿真分析的方法。

(4)对涉及面板堆石坝应力变形特性的各方面影响因素(包括河谷形状、深厚覆盖层、堆石的压实标准、施工顺序及蓄水过程等)进行了系统的分析研究,在此基础上,从应力变形分析的角度对面板堆石坝特别是高面板堆石坝的基本设计准则提出了相关的建议。

(5)对面板堆石坝的离心模型试验技术进行了较为深入的研究,完成了百米级坝高的深厚覆盖层上面板砂砾石坝的离心模型试验。同时,对数值计算分析的结果与离心模型试验的结果进行了对比分析,提出了数值分析模型与物理模型相结合的研究思路。

### 1.4 研究思路和组织结构

为系统地研究、论述面板堆石坝的应力变形特性,书中共划分了3篇,共14章。上篇

是“面板堆石坝应力变形分析的数值分析方法研究”。这一部分主要研究、论述面板堆石坝应力变形的计算方法,主要从数值方法上研究面板堆石坝应力变形的分析工具,同时,它也是对作者所提出并开发的面板堆石坝应力变形数值分析方法的系统总结。其中,第2章为堆石材料工程特性与计算分析模型的研究,主要介绍对堆石材料本构模型的评价和堆石材料模型参数的统计分析研究;第3章为坝体材料分区的优化研究,主要分析现代面板堆石坝的分区特点以及利用软岩堆石料筑坝的断面分区优化方法;第4章为面板堆石坝接缝系统的计算模拟研究,主要介绍在面板堆石坝计算分析中对面板接缝系统和接触面的数值模拟方法,其中重点研究界面单元法在处理面板与堆石接触面中的应用,以及在此基础上对面板脱空现象的计算分析;第5章主要介绍坝体堆石材料参数的反演分析研究,以及面板堆石坝施工和运行过程的仿真模拟计算。

中篇是“面板堆石坝的应力变形特性研究”。这一部分的内容是在第一部分的计算分析方法的基础上,利用数值分析的方法对面板堆石坝的各种影响因素进行系统的分析,由此从应力变形的角度,对面板堆石坝设计准则提出相关的建议。第6章主要研究河谷形状对面板堆石坝应力变形的影响;第7章主要研究深厚覆盖层上面板堆石坝的应力变形特性;第8章主要研究堆石压实标准和结构分区对面板堆石坝应力变形的影响;第9章主要研究坝体分期施工及蓄水过程对面板堆石坝应力变形的影响;第10章主要是面板开裂机理分析及预防措施。

下篇是“面板堆石坝的离心模型试验研究”。这一部分的主要内容是采用土工离心模型试验技术对面板堆石坝的应力变形特性进行系统的试验研究。第11章主要是离心模型试验技术的综述;第12章主要介绍了离心模型试验的基本原理和若干基本模拟方法;第13章则重点研究了深覆盖层上高面板堆石坝的离心模型试验过程,试验研究工作主要结合建造于深厚覆盖层上的新疆察汗乌苏面板砂砾石坝进行。通过试验分析研究,除对深厚覆盖层上面板堆石坝的应力变形特性进行进一步的深入研究外,还对利用数值分析模型与物理模型相结合的研究方法进行了研究探讨。书中的最后部分是总结与展望,在总结相关研究成果的基础上,提出了面板堆石坝应力变形分析今后的重点研究方向。

## 上篇 面板堆石坝应力变形分析的 数值分析方法研究

在面板堆石坝的数值分析中,堆石材料的本构模型以及数值计算的分析方法是决定分析成果正确与否的关键问题。本篇的内容主要针对面板堆石坝的计算分析方法进行分析研究。

对于面板堆石坝的应力变形计算分析,其本构模型必须充分反映堆石材料的基本工程力学特性。在本篇中,作者介绍了面板堆石坝数值分析中应用的主要本构模型,并结合计算实例对各类模型进行了系统的分析、评价。分析结果表明:由于堆石材料的应力应变关系具有明显的非线性,其本构模型必须真实反映这种非线性关系,线弹性模型对于堆石变形的计算是不适用的。在目前的面板堆石坝计算分析中,堆石材料采用的主要计算模型是 Duncan 模型和双屈服面弹塑性模型,而实践中尤以 Duncan 模型的应用更为广泛。邓肯模型的参数物理意义较为明确,由计算参数反算的应力应变关系与试验实测的应力应变关系曲线符合较好。更为重要的是,由于该模型的广泛应用,因此可以获得较为丰富的工程类比成果。

相应于各种计算模型,除了其模型本身的因素外,模型参数的确定也是影响面板堆石坝计算分析结果的重要因素。本篇中,作者结合 Duncan 模型的应用,以室内大型三轴试验为基础,对 Duncan 模型的计算参数进行了统计、分析,并整理了堆石干容重与模型弹性模量数和体积模量数的相关关系。

在面板堆石坝的计算分析中,对于面板接缝系统以及面板与堆石体接触面的合理模拟是保证计算成果正确性的重要因素。本篇中,作者根据其结构的受力特点和计算分析的经验,总结了面板堆石坝数值计算分析中接缝系统与接触面的常规处理方法,即:对于面板与堆石体的接触,宜采用薄层接触面单元;混凝土面板之间的接触,宜采用分离缝单元;而面板与趾板之间的接触,宜采用软单元。这样的模拟方式,基本上考虑了面板堆石坝界面接触中的主要因素,在大多数情况下均可得出较为满意的计算结果。

为实现对于面板堆石坝界面接触的更精确模拟,作者在计算分析中引入了界面单元方法。通过对界面单元法的应用研究,作者提出了在面板堆石坝计算分析中采用有限单元与界面单元混合模式的分析方法,并通过计算实例,分析了深覆盖层上面板堆石坝一期面板与坝体间的脱空现象。计算结果充分表明了这一方法的有效性和实用性。

对于面板堆石坝的数值分析,由于其影响因素较多,单纯的正分析方法尚存在一定的问题,而通过反演计算、反馈分析,将会有效地提高数值分析的精度和可靠性。针对面板堆石坝的参数反演计算分析,作者归纳、总结了利用现场试验和根据观测资料进行参数反演计算的思路,并给出了利用现场载荷试验进行参数反演的计算实例。与此同时,针对面板堆石坝计算分析中 Duncan 模型的参数反演,作者还提出了反演计算分析中模型参数间的协调问题,以及对于这一问题的具体解决方法。另外,在参数反演分析的基础上,作者

还给出了面板堆石坝数值仿真与计算模拟的流程。

在本篇的内容中,还针对软岩堆石料的应用,研究了面板堆石坝坝体断面分区优化设计的问题。给出了面板堆石坝断面分区优化的基本分析方法,并通过实际工程的计算分析,提出了面板堆石坝设计、施工中,软岩堆石料应用的基本原则。同时,作者还指出:面板堆石坝工程中,软岩堆石料的应用主要集中在中、低坝高的工程;对于高面板堆石坝,一般不宜在下游区采用软岩堆石。而且,在软岩材料的应用中,对于在次堆石区使用软岩材料的情况,应注意不使下游软岩堆石区的模量与坝体上游堆石区的模量差别过大。当坝体全断面利用软岩堆石料时,应注意对坝体总变形量的控制,同时要注意排水的设计。对于砂砾石面板坝,其断面分区的布置可以有多种形式,但最主要的问题是坝体的渗流控制。因此,对于砂砾石面板坝的分区布置,除需采用坝坡稳定分析和应力变形分析确定其范围和位置外,必要时还须进行渗流计算分析,以保证坝体的渗透稳定和排水通畅。

## 第2章 面板堆石坝数值分析的本构模型

### 2.1 概述

在面板堆石坝应力变形的数值分析研究中,坝体堆石材料的本构模型是计算分析的重要基础。在以往土力学理论中,一般总是将材料的强度问题与变形问题分开来加以研究,但事实上,对土石坝应力和变形的全面分析,需要综合考虑材料的应力应变关系、强度以及变形特性等各方面的因素。近几十年来,由于有限单元法的出现和计算机技术的迅速发展,土力学界对土的本构关系的研究日益深入,而且,随着一批能够施加复杂应力条件的大型室内试验设备的研制成功和现场试验设备及其相关试验技术的进展<sup>[18]</sup>,国内外的研究者对于堆石料等粗粒土的工程特性有了较为深入的了解,从而使得堆石材料的本构模型研究逐步由经验的简单模式向理论的复杂模式发展。

对于土的本构关系理论的系统研究,在国外已有40多年历史,而我国也对此进行了30多年的研究。目前,国内外研究者提出很多本构关系的数学模型,但真正能够用于工程实际、为工程界所接受的却相对较少。中国在面板坝的计算分析中,主要采用的是非线性弹性模型,其中尤以邓肯—张双曲线模型应用得最为广泛。此外,还有部分计算分析采用了弹塑性模型,其中,一般以双屈服面弹塑性模型较为多见。这些模型从不同的方面表征了堆石料的应力应变关系性质。

在面板堆石坝中,由于堆石材料应力应变关系的强烈非线性,因此其本构模型必须准确反映这种非线性关系。另外,堆石料的剪缩特性是影响面板应力的主要因素,对于堆石料剪缩特性的合理考虑,宜采用弹塑性模型。就理论分析而言,采用多屈服面、非关联流动法则的弹塑性模型在理论上具有较好的完备性,但这一类模型目前仍面临着试验方法特殊、计算参数类比性差以及计算复杂等问题。目前,采用邓肯的 $E-B$ 模型并结合一些适当的修正,其计算分析的结果基本上可以反映面板坝的实际变形特征,从工程实用的角度而言,其分析结果也较为可信。

在面板堆石坝中,通过将上述本构模型应用于平面及空间有限元分析,可以解决各种复杂的工程问题。通过有限元计算分析,可以估算在施工期、水库蓄水期的各种加载、卸载条件下堆石体和面板的应力与变形的大小及其分布,以及材料强度发挥的程度,从而为堆石坝的坝料分区、断面优化、施工进度安排、运行形态预测提供依据。

### 2.2 堆石的工程力学特性

就面板堆石坝的筑坝材料而言,实际工程中所采用的岩石类型非常广泛,基本上涉及了沉积岩、火成岩和变质岩这三大类岩石类型。在我国,面板堆石坝填筑堆石中主要采用的岩类有灰岩、砂岩、花岗岩和凝灰熔岩等,此外,随着面板堆石坝技术的不断发展,采用砂砾石作为面板堆石坝主体填筑材料的工程也日益增多,如乌鲁瓦提、黑泉、察汗乌苏等。



对于堆石材料母岩基本特性判断的指标主要有密度、容重、孔隙率、抗压强度、抗拉强度和软化系数等。而堆石材料的分类则可以根据母岩的单轴饱和抗压强度划分为硬岩、中硬岩和软岩三类。母岩单轴饱和抗压强度大于 80MPa 的堆石为硬岩堆石；单轴饱和抗压强度为 30~80MPa 的堆石为中硬岩堆石；单轴饱和抗压强度小于 30MPa 的堆石为软岩堆石。

从面板堆石坝的数值计算分析上看,其主要涉及的是堆石材料的本构模型,也就是材料的应力应变关系。但是,由于堆石材料的散粒体特点,在考虑其工程力学特性时,还需要对堆石材料的级配特征、压缩变形特性以及强度指标进行深入的研究。

### 2.2.1 堆石材料的级配特征

作为面板堆石坝筑坝材料的堆石,由于其材料的开采主要是通过爆破获得,因此堆石级配的好坏主要取决于爆破开采方法和岩体本身的结构以及裂隙的发育程度。一般而言,钻孔爆破的细粒含量较多,不均匀系数较大,级配较好。从堆石料的级配曲线上看,其级配基本上是呈连续分布,当不均匀系数  $C_u < 5$  时,为不良级配;当不均匀系数  $C_u > 15$  时,为良好级配。堆石材料颗粒级配的另一个重要特征在于其变异性,其中尤以筑坝压实过程中的颗粒破碎对堆石料级配的影响最大。堆石料颗粒破碎的程度主要取决于岩块的强度以及压实的功能等因素,而颗粒级配的变异,将会直接导致堆石料工程特性的变化<sup>[22,23]</sup>。对于软岩材料,严重的颗粒破碎将导致压实后的实际级配与原始级配的巨大差异,有可能使原来的堆石料变成性质迥异的另一种材料。在这种情况下,材料的级配应以压实后的实际级配为依据取用相应的设计计算指标。

在面板堆石坝工程中,表征堆石级配特性的相关指标主要有:最大粒径  $d_{\max}$ 、直径为 5mm 以上的颗粒含量  $P_5$ 、含泥量  $P_{0.1}$ 、 $d_{60}$ 、不均匀系数  $C_u$  等。堆石的破碎性一般采用破碎率(J. Marsal)  $B_g$  表示( $B_g$  为同一级配料在试验前后各粒径组含量差值的正值之和)。堆石的破碎主要与其所承受的应力有关<sup>[19]</sup>,图 2-1 所示为三轴试验中主应力比与颗粒破碎率的关系曲线,图 2-2 为单向压缩试验中变形模量与颗粒破碎率之间的关系曲线。由图中可以看出堆石颗粒破碎对堆石体变形与强度的影响。

一般而言,对于高面板堆石坝,堆石材料的母岩饱和单轴抗压强度应不小于 30MPa,软化系数大于 0.7~0.8,堆石级配中小于 5mm 粒径的颗粒含量宜保持在 10%~15%,最低不能小于 5%,相应的不均匀系数应大于 15。

### 2.2.2 堆石的压缩变形特性

堆石材料的颗粒形状为多面体,颗粒之间通常为点接触居多,其整体的压缩性主要取决于颗粒的重新排列,并同时受岩性、密度、级配等因素影响。作为一种有着坚固颗粒的散粒体材料,堆石体在经过碾压后,一般都具有较高的密度和较小的孔隙比,其压缩性一般较低。对于抛填的堆石,其变形历时较长,具有明显的蠕变特性,而对于碾压的堆石,其压缩变形的速度则很快(如图 2-3 所示),一般在面板堆石坝的施工期,坝体沉降变形的大部分即可完成<sup>[19]</sup>。不过对于高面板堆石坝,由于堆石体承受的应力水平较高,后续的颗粒破碎和颗粒重新调整将会使坝体堆石的蠕变特性重新变得突出起来。

堆石材料变形的另一个重要特征是其具有类似黄土的湿陷特性,堆石材料湿陷变形的机理主要是堆石颗粒的棱角遇水后发生软化、破碎,同时水的润滑作用促使了颗粒的迁