

高面板堆石坝的 应力变形特性

王瑞骏 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高面板堆石坝的 应力变形特性

王瑞骏 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是一部介绍关于高面板堆石坝应力变形特性研究成果的专著。全书共分 8 章,包括绪论、软岩料填筑高面板堆石坝的应力变形特性、高面板堆石坝的流变特性、深覆盖层地基高面板堆石坝的应力变形特性、施工期临时断面度汛对于高面板堆石坝应力变形的影响、坝体分期施工对于高面板堆石坝面板脱空的影响、狭窄河谷高面板堆石坝的应力变形特性、高面板堆石坝坝坡稳定的静动力有限元分析。

本书可供从事高面板堆石坝工程研究的专家学者及从事坝工设计、施工和运行管理的工程技术人员参考,也可作为有关高校和科研机构相关学科研究生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

高面板堆石坝的应力变形特性 / 王瑞骏编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.8
ISBN 978-7-5170-5903-5

I. ①高… II. ①王… III. ①混凝土面板坝—堆石坝—应力—变形—特性—研究 IV. ①TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第236354号

书 名	高面板堆石坝的应力变形特性 GAOMIANBAN DUISHIBA DE YINGLI BIANXING TEXING
作 者	王瑞骏 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 14.25 印张 338 千字
版 次	2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	55.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

混凝土面板堆石坝（以下简称“面板堆石坝”）是以堆石或砂砾石分层填筑成坝体，并用混凝土面板作为防渗体的坝的统称。经过数十年的发展，以薄型面板和趾板、级配垫层料、薄层碾压堆石及滑模浇筑面板混凝土等为基本特征的现代面板堆石坝筑坝技术已日趋成熟，并以其良好的安全性、经济性和对地形地质条件的适应性，而深受国内外坝工界的广泛青睐，已成为许多大中型水利水电工程的首选坝型。目前，面板堆石坝正面临着从200m级坝高进一步向300m级坝高发展的挑战，为此，深入开展高面板堆石坝应力变形特性这一关键技术问题的研究无疑具有重要的理论意义和工程实践意义。

本书是编者及研究团队长期进行高面板堆石坝应力变形特性研究所获部分研究成果的总结。本着抛砖引玉、相互交流与学习的目的，编者愿通过本书将相关的研究成果奉献给读者。

本书共分8章。第1章介绍了混凝土面板堆石坝发展概况，高面板堆石坝应力变形特性研究进展，高面板堆石坝的应力变形问题；第2章介绍了软岩料的工程特性，软岩料筑坝的工程实例，材料非线性问题分析的有限元法，堆石体湿化变形分析的有限元法，结合工程实例的软岩料填筑高面板堆石坝应力变形特性的分析成果；第3章介绍了堆石体的流变机理及其影响因素，堆石体的流变模型，面板堆石坝流变分析的有限元法，流变模型参数敏感性分析的正交试验法，结合工程实例的高面板堆石坝流变特性的分析成果；第4章介绍了深覆盖层的工程特性，应力变形静力有限元分析方法，应力变形动力有限元分析方法，结合工程实例的深覆盖层地基高面板堆石坝静动力应力变形特性的分析成果；第5章介绍了高面板堆石坝的施工度汛方式，临时断面度汛的有限元模拟，结合工程实例的临时断面挡水度汛及临时断面过水度汛对于高面板堆石坝应力变形影响的分析成果；第6章介绍了面板脱空的工程实例，面板脱空机理及其影响因素，面板脱空分析的有限元法，结合工程实例的关于堆石体与分期施工面板之间的高差及面板分期施工方案对于高面板堆石坝面板脱空变形影响的分析成果，面板脱空的处理措施；第7章介绍了狭窄河谷高面板堆石坝工程实例，狭窄河谷影响高面板堆石坝应力变形的主要途径，

结合工程实例的狭窄河谷高面板堆石坝的应力变形特征、河谷宽高比对大坝应力变形的影响及堆石料填筑标准对大坝应力变形影响的分析成果；第8章介绍了堆石料的动力特性，应力变形静动力有限元分析方法，基于有限元应力结果的坝坡稳定分析方法，结合工程实例的高面板堆石坝静动力坝坡稳定性的分析成果。

本书是在编者指导研究生王刚、苏桐麟、丁战峰、任亮、赵一新、崔自力、付国栋、薛一峰、刘伟及张葛等所完成的学位论文的基础上，由编者进一步修改、补充和完善以后编写而成的。编者研究生郭兰春、李阳、荆慧斌、牛文龙、孙阳、缙彦强、张帅、彭兆轩及贾飞等协助编者参与了部分书稿的整理和编排工作。在此，编者向上述其学位论文内容被本书所引用的研究生以及参与本书书稿整理和编排工作的研究生表示诚挚的谢意！

本书的编写得到了西安理工大学研究生院有关领导以及水利水电学院党委书记程文教授的大力支持，在此向他们表示诚挚的谢意！

本书所述研究成果主要得益于前人大量的辛勤工作，前人丰硕的相关研究成果是本书所述研究成果获得的坚实和有益的基础。因此，作者在此愿向所有其工作或研究成果被本书所引用的专家和学者一并表示诚挚的敬意和谢意！虽然本书在每章最后均列出了相应的主要参考文献，并按参考文献编号在文内做了相应夹注，但参考文献及文内夹注难免存在疏漏或不当之处，在此，恳望有关专家和学者予以谅解！

应该指出的是，高面板堆石坝的应力变形特性问题，是一个涉及面广、影响因素错综复杂的工程科学问题，其中所包含的许多理论和工程应用问题尚需作进一步的研究和探讨。虽然编者及研究团队投入大量精力在这方面开展了持续不断的研究工作，并希望通过本书较好地展示相应的研究成果，但由于水平所限，书中难免会存在一些不足或不妥之处，在此热诚欢迎各位读者批评指正！

编者

2016年11月于西安

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土面板堆石坝发展概况	1
1.2 高面板堆石坝应力变形特性研究进展	2
1.3 高面板堆石坝的应力变形问题	3
参考文献	4
第 2 章 软岩料填筑高面板堆石坝的应力变形特性	5
2.1 软岩料的工程特性	5
2.2 软岩料筑坝的工程实例	7
2.3 材料非线性问题分析的有限元法	9
2.4 堆石体湿化变形分析的有限元法	15
2.5 工程实例分析	20
参考文献	36
第 3 章 高面板堆石坝的流变特性	38
3.1 堆石体的流变机理及其影响因素	38
3.2 堆石体的流变模型	42
3.3 面板堆石坝流变分析的有限元法	46
3.4 流变模型参数敏感性分析的正交试验法	54
3.5 工程实例分析	58
参考文献	80
第 4 章 深覆盖层地基高面板堆石坝的应力变形特性	82
4.1 深覆盖层的工程特性	82
4.2 应力变形静力有限元分析方法	83
4.3 应力变形动力有限元分析方法	84
4.4 工程实例分析	89
参考文献	107
第 5 章 施工期临时断面度汛对于高面板堆石坝应力变形的影响	108
5.1 高面板堆石坝的施工度汛方式	108
5.2 临时断面度汛的有限元模拟	110

5.3 临时断面挡水度汛工程实例分析	112
5.4 临时断面过水度汛工程实例分析	121
参考文献	131
第 6 章 坝体分期施工对于高面板堆石坝面板脱空的影响	133
6.1 面板脱空的工程实例	133
6.2 面板脱空机理及其影响因素	136
6.3 面板脱空分析的有限元法	138
6.4 工程实例分析	140
6.5 面板脱空的处理措施	155
参考文献	156
第 7 章 狭窄河谷高面板堆石坝的应力变形特性	158
7.1 狭窄河谷高面板堆石坝工程实例	158
7.2 狭窄河谷影响高面板堆石坝应力变形的主要途径	164
7.3 狭窄河谷高面板堆石坝的应力变形特征分析	165
7.4 河谷宽高比对大坝应力变形的影响分析	171
7.5 堆石料填筑标准对大坝应力变形的影响分析	179
参考文献	182
第 8 章 高面板堆石坝坝坡稳定的静动力有限元分析	184
8.1 堆石料的动力特性	184
8.2 应力变形静动力有限元分析方法	185
8.3 基于有限元应力结果的坝坡稳定分析方法	190
8.4 工程实例分析	194
参考文献	221

第 1 章 绪 论

混凝土面板堆石坝是用堆石或砂砾石分层碾压填筑成坝体，并用混凝土面板作防渗体的坝的统称^[1]。其中，主要用砂砾石填筑坝体的也称为混凝土面板砂砾石坝（concrete face rockfill dam, CFRD）。

1.1 混凝土面板堆石坝发展概况

现代混凝土面板堆石坝筑坝技术诞生于 20 世纪 60 年代中期，是现代坝工建设领域中的一项具有重大意义的技术成就。与传统堆石坝相比，现代混凝土面板堆石坝具有安全性好、工程量小、施工方便、导流简化及工期短等优点，现已成为许多大中型水利水电工程的首选坝型^[2~5]。

混凝土面板堆石坝的发展历史大致可分为 3 个阶段^[3~5]：

- (1) 早期抛填堆石阶段（19 世纪 60 年代至 20 世纪 30 年代）。
- (2) 过渡阶段（20 世纪 30—60 年代中期）。
- (3) 以堆石薄层碾压为特征的现代混凝土面板堆石坝阶段（20 世纪 60 年代中期至今）。

最早的面板堆石坝出现在美国西部，如 1869 年建成的 12.50m 高的查托伍斯（Chattowarth）坝，1931 年建成的 100.00m 高的盐泉（Salt Spring）坝等。这些坝的出现与当时的采矿和淘金业有关，坝体采用抛填堆石、辅以高压水冲实的简单施工工艺，最初采用木板防渗，后来逐渐被混凝土面板取代，以承受更高的水压力。

采用抛填堆石，堆石体密实性较差，沉降和水平变位较大。正是由于这一原因，采用抛填方法施工的堆石坝仅适用于坝高较低的工程。随着坝高的增高，堆石体沉降变形随之增大，混凝土面板难以承受较大的变形，将会产生严重开裂，从而导致大量漏水。由于上述问题的出现，人们对混凝土面板堆石坝的安全性产生了怀疑，以至在这之后的较长时期内，这种坝型的发展几乎一直处于停滞状态。

进入 20 世纪 60 年代，随着大型土石方施工机械，尤其是大型振动碾的出现，为堆石坝筑坝技术的发展注入了新的活力。著名土力学家太沙基在 1960 年提出采用碾压堆石修筑面板坝的构想，他认为碾压堆石变形很小，可以改善面板堆石坝混凝土面板的工作状况，因而可以建更高的面板坝，堆石体也可以使用较软弱的岩石。太沙基的这些论述对于混凝土面板堆石坝的再次兴起起到了重要的作用。从此，面板堆石坝堆石体的填筑施工，均采用薄层碾压的施工方法。至 1965 年，基本完成了由抛填堆石向碾压堆石的过渡，面板堆石坝进入以堆石薄层碾压为特征的现代混凝土面板堆石坝发展阶段。

由于具有如上所述的技术和经济上的优越性，在此后的数十年里，混凝土面板堆石坝



这种新坝型在全世界范围内得到了广泛的应用,相应的设计理论和施工技术也得到了不断的发展和完善,从而使其成为一种颇具竞争力的坝型,并已成为许多大中型水利水电工程的首选坝型。

我国是于20世纪80年代初期开始从国外引进现代混凝土面板堆石坝筑坝技术的,虽然起步晚,但起点高、发展快^[2,6-11]。

1985年,我国开始建设第一座混凝土面板堆石坝——湖北西北口大坝(坝高95.00m);1988年,辽宁关门山混凝土面板堆石坝(坝高58.50m)首先建成挡水^[10]。据不完全统计,截止到2011年年底,国内外已建、在建和拟建的混凝土面板坝共计约570座;我国已建、在建和拟建的混凝土面板坝共计305座,其中坝高100.00m以上的高混凝土面板堆石坝有94座;我国已建的水布垭坝(坝高233.00m)为目前世界最高混凝土面板堆石坝^[2,11]。

随着混凝土面板堆石坝筑坝技术的发展,混凝土面板堆石坝越建越高、工程规模越来越大已成为现代混凝土面板堆石坝发展的基本趋势。我国西部有着丰富的水能资源,在金沙江、澜沧江、怒江、雅砻江、大渡河、黄河上游等江河上都要修建300.00m级的高坝,形成龙头水库,以提高梯级电站的补偿调节性能,提高电能质量;但这些电站都位于经济不发达、交通闭塞的高山区,受对外交通条件、地形地质条件和筑坝材料等因素的制约,使得混凝土面板堆石坝成为最具竞争力的坝型^[2]。目前,混凝土面板堆石坝的发展正面临着从200.00m级坝高进一步向300.00m级坝高发展的挑战^[2,11-14]。

1.2 高面板堆石坝应力变形特性研究进展

多年来,坝工界围绕高面板堆石坝的应力变形特性问题,运用计算分析及试验手段,着重开展了以下几个方面的研究,并获得了一批具有良好应用价值的研究成果^[2,9]:

(1) 堆石体本构模型的研究,建立了合理的筑坝材料的本构模型,其中南水双屈服面弹塑性模型、邓肯-张(Duncan - Chang)非线性弹性 $E-B$ 模型(以下简称“邓肯-张 $E-B$ 模型”)及 $K-G$ 模型应用较广。

(2) 研究筑坝材料试验参数的缩尺效应,提出用比较试验和反馈分析方法确定缩尺效应修正系数。

(3) 研究筑坝材料的流变特性,建立了流变模型,为实现面板堆石坝体的变形协调设计计算提供了基础。

(4) 采用原位测试(旁压试验、荷载试验)、室内大型试验和反演分析相结合的手段确定覆盖层及筑坝材料的力学特性和计算参数。

(5) 面板接缝及面板与垫层之间接触面的有限元计算模型及大坝应力变形有限元研究,提出了分离缝单元、软单元及Goodman无厚度单元等面板接缝计算模型和Goodman无厚度单元及Desai薄层单元等接触面计算模型,提出了迭代法、增量法及迭代增量法等模拟坝体非线性变形特性有限元计算方法,其中中点增量法应用较广。运用这些计算模型和计算方法所获得的计算结果能反映堆石坝体、面板和接缝的应力变形规律,为设计提供了依据。



(6) 采用土工离心模拟技术研究混凝土面板堆石坝的应力变形性状,为察汗乌苏、天生桥一级、九甸峡等高面板堆石坝工程解决复杂地形地质条件下的建坝技术难题提供了基础。

(7) 研制大型土工离心机上振动台,为研究地震时面板堆石坝的动力性状、采取抗震工程措施提供了手段。

(8) 采用大型足尺模型试验研究并开发了新型止水结构及止水材料。

(9) 开展面板混凝土改性研究和掺合成纤维等研究,为提高面板混凝土的抗裂性能提供了基础。

1.3 高面板堆石坝的应力变形问题

经过数十年的发展,国内外尤其是我国在混凝土面板堆石坝筑坝的设计技术、施工和监测技术、筑坝材料和防渗结构技术、不利自然条件下建坝技术及计算和试验技术等方面均取得了长足的进步,并积累了大量成功的经验^[2]。

研究表明^[14],2000年以前建成的200.00m级面板坝的设计与施工,基本上沿用的是100.00m级面板坝的成熟经验和设计理念,如1993年墨西哥建成的阿瓜米尔帕(Aguamilpa)坝(坝高187.00m)和2000年建成的我国天生桥一级面板坝(坝高178.00m)。这两座坝都出现了坝体沉降量大、面板水平向结构性裂缝多、面板与垫层料脱空、压缝面板混凝土挤压破坏、渗漏量较大等问题。究其原因,是人们的认识还停留在100.00m级面板坝的经验阶段,没有从变形控制的角度对坝体断面分区、坝料特性、压实度等方面提出更高的要求。

为此,不少学者结合高混凝土面板堆石坝工程建设及筑坝技术研究经验,提出为了更好更省地建设超高面板堆石坝,还有必要进行下列以应力变形特性及其控制为核心的关键问题研究^[2,11-14]:

(1) 高应力与应力路径对筑坝材料特性影响的研究,建立更符合面板坝实际的可以考虑颗粒破碎、流变变形、湿化变形的筑坝材料本构模型。

(2) 缩尺效应对筑坝材料影响的研究,建立筑坝材料真实特性及计算参数的确定方法。

(3) 面板与垫层之间接触面特性的试验研究,建立更为合理的接触面本构模型。

(4) 建立正确预测堆石坝体变形性状和面板应力变形性状的方法。

(5) 静力和地震条件下高面板堆石坝面板挤压破损机理分析研究,提出避免面板挤压破坏的工程措施。

(6) 面板堆石坝抗震安全标准和极限抗震能力的计算方法研究。

(7) 超高面板堆石坝、超长距离坝体内部变形监测设施及深厚覆盖层变形与渗漏量监测设施的开发与研制。

(8) 超高面板堆石坝的坝体分区、筑坝材料和填筑标准研究。

(9) 100m以上坝基深厚覆盖层的渗流控制方案和防渗工程措施研究。

(10) 强震区超高面板堆石坝抗震设计及抗震工程措施的作用机理研究。

(11) 深窄河谷、高陡岸坡条件下超高面板堆石坝的变形安全设计以及接缝和止水结构设计方法研究。

研究表明^[14],高面板堆石坝设计要更为重视变形控制。早期的经验设计认为“绝大部分水平荷载是通过坝轴线以上坝体传到地基中去的,而愈往下游堆石体对面板变形的影响愈小,故坝料变形模量可从上游到下游递减”的认识对150.00~200.00m级面板坝是不完全适用的。邝能惠提出^[15],“坝体分区设计应遵循4条原则:料源决定原则、水力过渡原则、开挖料利用原则和变形协调原则。重点是变形协调原则,既要做到坝体各区的变形协调,又要做到坝体变形和面板变形之间的同步协调”。

因此,深入开展高面板堆石坝应力变形特性这一关键技术问题的研究无疑具有重要的理论意义和工程实践意义。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国水利部. SL 228—2013 混凝土面板堆石坝设计规范 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 邝能惠, 杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (8): 1361-1368.
- [3] 蒋国澄, 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板坝工程 [M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 1997: 1-5, 11-18, 208-209, 215-216.
- [4] 郭城谦. 论混凝土面板堆石高坝的设计 [J]. 水利学报, 1993 (6): 19-25.
- [5] 麦家煊, 孙立勋. 西北口堆石坝裂缝成因的研究 [J]. 水利水电技术, 1999, 30 (5): 32-34.
- [6] 蒋国澄, 曹克明. 中国的混凝土面板堆石坝 [C] //国际高土坝学术研讨会论文集. 北京:中国水力发电工程学会, 1993: 67-82.
- [7] 蒋国澄. 中国的混凝土面板堆石坝 [J]. 水力发电学报, 1994 (3): 67-78.
- [8] 蒋国澄, 曹克明. 中国混凝土面板堆石坝十年回顾 [C] //中国混凝土面板堆石坝十年学术研讨会论文集. 北京:中国水力发电工程学会, 1995: 1-19.
- [9] 王瑞骏. 混凝土面板的温度应力与干缩应力及其渗流特性 [M]. 西安:西安地图出版社, 2007: 1-9, 85-86.
- [10] 蒋国澄, 赵增凯, 孙役, 等. 中国混凝土面板堆石坝20年综合·设计·施工·运行·科研1985—2005 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005: 91-93, 582-588.
- [11] 贾金生. 中国大坝建设60年 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013: 370-382.
- [12] 徐泽平. 超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题 [J]. 水力发电, 2010, 36 (1): 51-59.
- [13] 杨泽艳, 周建平, 苏丽群, 等. 300m级高面板堆石坝适应性及对策研究综述 [J]. 水力发电, 2012, 38 (6): 25-29.
- [14] 马洪琪. 300m级面板堆石坝适应性及对策研究 [J]. 中国工程科学, 2011, 13 (12): 4-8.
- [15] 邝能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (8): 1143-1150.

第 2 章 软岩料填筑高面板堆石坝的 应力变形特性

软岩料指母岩单轴无侧限饱和抗压强度小于 30MPa 的岩石料^[1]。目前在实际工程中,为提高当地材料利用率、缩短工期、减小投资,尽可能多地扩大软岩料的利用范围已成为混凝土面板堆石坝发展的一个新趋势^[2-3]。但由于软岩料固有的低强度、易变形、遇水易软化等特性,其填筑的高面板堆石坝具有与硬岩料填筑的高面板堆石坝截然不同的应力变形特性。本章拟在系统分析软岩料的工程特性、软岩料筑坝工程实例的基础上,对堆石体湿化变形的有限元模拟方法、软岩料填筑高面板堆石坝应力变形及坝坡稳定的有限元分析方法等进行系统地分析和研究,然后通过工程实例分析,全面探讨软岩料填筑高面板堆石坝的应力变形特性。

2.1 软岩料的工程特性

2.1.1 级配

软岩料级配的最大特点是可变性较大,其中以填筑期变化为最大。软岩单轴饱和抗压强度低,软化系数小,当气候环境发生变化以及填筑碾压后,表现出明显的颗粒破碎及级配细化趋势。蒋涛等人^[3-4]曾结合鱼跳和大坳两个工程,进行了在不同干湿循环条件下的软岩料颗粒级配变化研究,结果见表 2.1。

表 2.1 不同干湿循环条件下的软岩料颗粒级配变化^[4]

坝名	堆石料 岩性	岩石饱和 抗压强度 /MPa	状 态	颗粒级配/%				
				60~40mm	40~20mm	20~10mm	10~5mm	<5mm
鱼跳	泥岩	18.8	原级配	20	30	21	14	15
			干湿循环 2 次以后	17.8	27.7	16	17.9	20.7
			干湿循环 4 次以后	16	25.3	13.8	18.4	26.5
大坳	砂岩	28.3	原级配	26	23	22	10.5	18.5
			干湿循环 2 次以后	22.8	25.9	21.3	10.1	19.9
			干湿循环 4 次以后	22.6	25.4	20.6	10	21.4

不少工程实践证明,软岩料填筑碾压后的级配与原始级配也相差很大,其工程性质也随之而发生较大变化。根据国内经验,软岩料应以压实后的级配为准,进行各项设计指标的分析 and 确定。

2.1.2 压实性

软岩料对含水率比较敏感，近似于土的压实特性，它的压实性有 2 个特点^[4-5]：①软岩的压实特性不同于硬岩的压实特性，硬岩在压实过程中没有孔隙水的排出，仅仅是克服颗粒之间的摩擦阻力使颗粒更加紧密，而软岩料细粒含量较多，当含水率较低时，颗粒表面形成水薄膜，从而摩阻力较大，不易压实，当含水率逐渐增高后，颗粒表面水薄膜增厚，起到了润滑作用，使颗粒表面之间摩阻力减小，从而易于压实；②软岩堆石料在振动碾压过程中颗粒破碎较为剧烈，经压实后可达到较高的密度，从而获得较好的力学性能。

2.1.3 渗透性

软岩料的渗透性取决于其干密度和细粒料含量。软岩堆石料经碾压后，部分粗颗粒破碎，细粒增多，从而堵塞了粗颗粒间的孔隙，甚至在压实表面形成板结层，故渗透系数较小。蒋涛等人^[3-4]曾对鱼跳和大坳两个工程的软岩料进行渗透性试验研究，结果见表 2.2。

表 2.2 软岩料渗透试验结果^[4]

坝名	材料	级配	干密度 $\rho_d / (\text{g}/\text{cm}^3)$	水平渗透系数 k $/ (\text{cm}/\text{s})$	垂直渗透系数 k $/ (\text{cm}/\text{s})$
鱼跳	泥岩堆石料	平均级配	2.00	7.36×10^{-2}	2.59×10^{-2}
			2.11	2.07×10^{-2}	1.49×10^{-3}
大坳	砂岩堆石料	平均级配	2.04	6×10^{-1}	6.76×10^{-3}
			2.10	2.11×10^{-2}	4.39×10^{-3}

从表 2.2 可以看出，鱼跳和大坳两个工程的软岩料渗透系数为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm}/\text{s}$ 量级，属于中等透水性。

2.1.4 压缩性

软岩堆石料的压缩性质与硬岩堆石料差异很大。硬岩堆石料基本上是单粒结构，其压缩变形的大小与颗粒之间的摩阻力有关，级配越好、密度越高，则颗粒间的摩阻力越大，压缩变形就越小；软岩堆石料的压缩性与母岩岩性、初始颗粒级配、密度和饱和情况等有关^[5-7]。

根据鱼跳和大坳两个工程软岩料的压缩试验结果^[8-9]，鱼跳面板坝泥岩堆石料的压缩模量为 6.5~54.8MPa，大坳面板坝砂岩堆石料的压缩模量为 21.0~62.0MPa。与硬岩堆石料相比，软岩料的压缩模量明显偏低，如洪家渡面板坝堆石料为坚硬的灰岩，其压缩模量为 45.0~197.4MPa^[4]。因此，岩性对于软岩料的压缩性具有显著影响。

2.1.5 强度特性

虽然软岩料抗压强度比硬岩料低，而且在压实过程中粗颗粒破碎剧烈、细粒含量增加较多，但细黏粒含量所占比例仍然很少。因此，软岩料的强度特性与硬岩料基本相同，即在荷载作用下只有摩擦阻力，不存在黏聚力。但软岩料又不同于硬岩料，软岩料堆石体的



强度主要取决于其密度,而硬岩料堆石体的强度则主要取决于岩块之间的咬合程度^[6]。软岩料堆石体在剪胀和颗粒破碎的双重作用下,颗粒重排、调整并向孔隙填充,导致其强度增长缓慢,强度包线往往呈现向下弯曲性态,即抗剪强度与法向应力呈明显的非线性关系。我国现行面板堆石坝设计规范规定,确定包括软岩料在内的粗粒料抗剪强度时应计及这一非线性特性^[10]。国内部分工程关于软岩料与硬岩料的三轴试验结果对比表明,软岩料的非线性抗剪强度指标 φ_0 明显小于硬岩料的 φ_0 ,而二者的 $\Delta\varphi$ 则差别不大^[4,8,11]。

2.1.6 湿化变形特性

在水的浸润作用下,软岩料堆石体不仅其强度会产生明显的降低,而且由于颗粒间受到润滑进而在自重作用下重新调整其间位置,改变原来结构,使堆石体产生压缩下沉变形,即湿化变形。蒋涛等人^[3-4]曾对鱼跳和大坳两个工程的软岩料进行湿化变形试验研究,结果见表 2.3。

表 2.3 软岩料湿化变形试验结果^[4]

坝名	坝料	干密度 (g/cm ³)	应力水平	湿化变形/%		
				$\sigma_3=0.2\text{MPa}$	$\sigma_3=0.4\text{MPa}$	$\sigma_3=0.8\text{MPa}$
鱼跳	泥岩堆石料 (平均级配)	2.00	30		2.98	
			50	3.67	4.38	4.60
			70		6.22	
大坳	砂岩堆石料 (平均级配)	2.04	30		1.71	
			50	2.24	3.27	3.67
			70		4.40	
		2.10	50		1.22	

从表 2.3 可以看出,在同一应力水平下,随着小主应力 σ_3 的增大,软岩料的湿化变形呈增大趋势;在同一小主应力 σ_3 下,随着应力水平的提高,软岩料的湿化变形也呈增大趋势。

2.2 软岩料筑坝的工程实例

从目前已有的实际工程资料来看,国内外利用软岩料修筑面板堆石坝的工程相对较少。已有工程关于软岩料利用的基本型式大致可分为 3 种情况^[6-8]: ①软岩料用于次堆石区上部干燥区,如国外的温尼克、萨尔瓦兴娜、红树溪等坝,我国的寺平、天生桥一级等坝; ②软岩料用于坝体中间部位,如贝雷坝; ③软岩料用于主堆石区和下游堆石区,如国外的袋鼠溪坝、帕拉坝及我国的茄子山、大坳等坝。与上述 3 种软岩料利用情况相应的工程实例分述如下。

2.2.1 天生桥一级面板堆石坝(软岩料用于次堆石区上部干燥区)^[3-4]

天生桥一级水电站位于云南、贵州、广西三省(自治区)交界处,是红水河梯级开发

的龙头电站, 电站总装机容量为 1200MW, 水库总库容为 102.60 亿 m^3 , 属 I 等大 (1) 型工程。大坝为混凝土面板堆石坝, 最大坝高为 178.00m。大坝次堆石区上部 (660.00m 高程以上) III_C 区 (干燥区) 采用砂泥岩软岩料, 下部 III_D 区采用灰岩料。该大坝坝体填筑总量约为 1800 万 m^3 , 利用建筑物地基开挖料约为 1400 万 m^3 , 占总填筑量的 87%, 其中软岩料用量达 480 万 m^3 , 占坝体总填筑量的 1/4 左右。2000 年年底大坝竣工。在坝体中软岩料用量达 480 万 m^3 , 软岩料用量及其与坝体总填筑量的比例在当时同类工程都是少有的。大坝典型横剖面 (最大断面) 如图 2.1 所示。

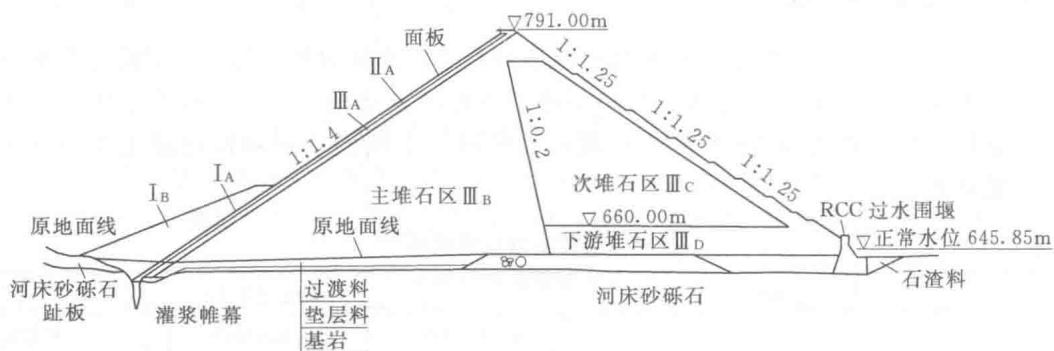


图 2.1 天生桥一级坝典型横剖面^[3]

I_A—粉质土; I_B—任意料; II_A—垫层料; III_A—过渡区; III_B—主堆石区;

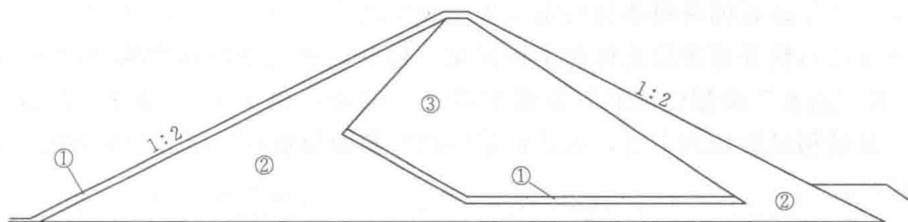
III_C—下游堆石区, 含大量泥岩 (软岩); III_D—大块石排水区

根据 2003 年 7 月实测资料^[3], 坝体最大垂直位移为 347.00cm, 接近于最大坝高的 2%, 发生在坝体最大断面附近、约 3/5 坝高处的坝轴线附近软岩料区内; 坝体向上游的最大水平位移为 42.90cm, 向下游的最大水平位移为 84.70cm, 均位于坝体中下部; 混凝土面板分 3 期于 1997 年、1998 年和 1999 年汛期前浇筑, 分别填筑至 725.00m 度汛断面、768.00m 度汛断面和 787.30m (坝顶高程), 面板挠度的最大值出现在分区浇筑的面板顶部, 2000 年 10 月库水位为 779.75m 时, 各期面板顶部测点的挠度峰值分别为 40.70cm、39.90cm、53.90cm, 2003 年 7 月库水位 764.34m 时, 上述测点的测值分别为 45.83cm、32.03cm、16.72cm。从十多年的运行情况来看, 大坝运行正常, 变形也在预期的范围内。

2.2.2 贝雷面板堆石坝 (软岩料用于坝体中间部位)^[12]

贝雷坝位于美国西弗吉尼亚的佳斯梯斯附近的戈杨多特河上, 为混凝土面板堆石坝。大坝上下游坡比均为 1:2, 坝顶长度为 426m, 最大坝高为 95.00m。坝体中间部位堆石区主要采用从溢洪道开挖出来的页岩和薄层砂岩等软岩料。坝底部铺设一层厚为 3.0~4.6m 的坚硬砂岩作为坝的自由排水通道, 压实采取振动平碾的方式, 铺设层厚在碾压时不超过 60cm。永久围堰和碾压堆石坝壳选用坚硬的砂岩, 用来支撑软岩料填筑的中心区, 同时作为渗流排水通道。垫层和过渡区均使用轧碎砂岩填筑。坝体堆石分区如图 2.2 所示。

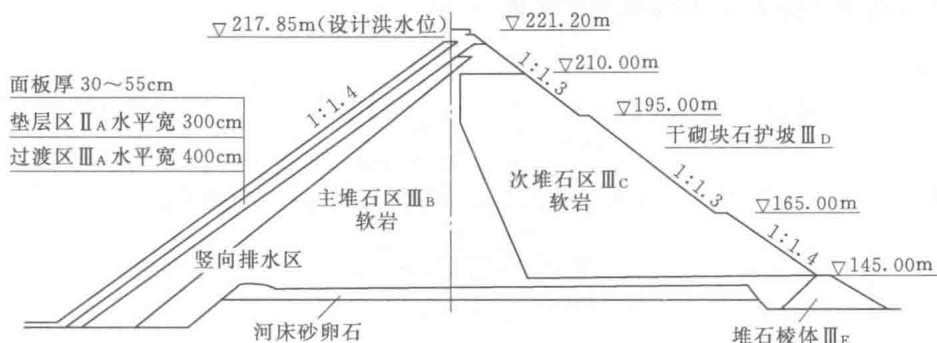
贝雷坝于 1980 年 2 月开始正式蓄水, 蓄水期初始阶段渗漏量较大, 最大渗透流量达 0.37 m^3/s , 经过处理后渗透流量逐渐减小至 0.11 m^3/s , 此后一直运行正常。

图 2.2 贝雷坝坝体分区^[12]

- ①—透水过度区, 最大粒径小于 10cm, 层厚 0.3m; ②—碾压坚硬砂岩区, 层厚 0.3m;
③—任意料 (软岩料区), 页岩, 层厚 0.3m

2.2.3 大拗面板堆石坝 (软岩料用于主堆石区和次堆石区)^[3]

大拗水利枢纽工程位于江西省信江一级支流石溪水上, 水库为多年调节水库, 正常蓄水位为 217.00m, 总库容为 2.757 亿 m^3 , 电站总装机容量为 4 万 kW, 属大 (2) 型水利枢纽工程。大拗水库于 1995 年开始兴建, 1999 年下闸蓄水, 2000 年正式投产发电。大坝为面板堆石坝, 最大坝高为 90.20m, 上游坝坡坡度为 1 : 1.4, 下游坝坡上设有两级马道, 坝坡坡度自上至下依次为 1 : 1.3、1 : 1.3、1 : 1.4。坝体主堆石和次堆石区均采用软岩料填筑, 软岩料填筑量约占坝体总填筑量的 73.4%, 软岩料利用率在我国同类坝中为最高。大坝典型横剖面 (最大断面) 如图 2.3 所示。

图 2.3 大拗坝典型横剖面^[3]

根据实际观测结果, 大拗面板堆石坝施工期和蓄水期的最大沉降分别为 0.920m 和 0.198m, 总沉降为 1.118m; 蓄水期面板最大挠度为 22.52cm; 竣工期和蓄水期的面板顺坡向最大拉应力分别为 0.18MPa、0.16MPa。坝体和面板的应力变形均在合理范围内, 目前大坝运行良好。

2.3 材料非线性问题分析的有限元法

2.3.1 材料本构模型

与硬岩料填筑面板堆石坝类似, 在进行软岩料填筑高面板堆石坝应力变形有限元分析

时,混凝土面板及趾板的材料本构模型可采用线弹性模型。

关于坝体堆石料及覆盖层土体的本构模型,目前具有代表性的本构模型有:邓肯-张 $E-B$ 模型及“南水”弹塑性双屈服面模型等^[13]。其中,由于邓肯-张 $E-B$ 模型的参数便于确定,且使用经验较为丰富,因此该模型在目前面板堆石坝应力变形有限元计算中使用的较为广泛。

邓肯-张 $E-B$ 模型的基本原理如下^[13-15]:

将应力应变关系写成下列增量型关系:

$$\{\Delta\sigma\}=[D]_t\{\Delta\epsilon\} \quad (2.1)$$

式中: $[D]_t$ 称为切线模量矩阵,一般可写为

$$[D]_t = \begin{bmatrix} d_1 & & & & & \\ d_2 & d_1 & & & & \\ d_2 & d_2 & d_1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & d_3 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_3 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \quad \text{对称} \quad (2.2)$$

各向同性材料的弹性常数只有两个。矩阵 $[D]_t$ 中参数 d_1 、 d_2 、 d_3 之间有下列关系:

$$d_3 = (d_1 - d_2)/2 \quad (2.3)$$

在三轴压缩试验条件下,邓肯和张建议用双曲函数拟合三轴试验的应力应变曲线,并分别定义切线弹性模量 E_t 和切线体积模量 B_t 如下:

$$E_t = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\epsilon_1} \quad (2.4)$$

$$B_t = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\epsilon_v} = \frac{\Delta\sigma_1/3}{\Delta\epsilon_1 + 2\Delta\epsilon_2} \quad (2.5)$$

将式 (2.2) ~ 式 (2.5) 代入式 (2.1),可得 $[D]_t$ 的 2 个参数:

$$d_1 = \frac{3B_t(3B_t + E_t)}{9B_t - E_t} \quad (2.6)$$

$$d_2 = \frac{3B_t(3B_t - E_t)}{9B_t - E_t} \quad (2.7)$$

材料的切线弹模按式 (2.8) 确定:

$$E_t = E_i(1 - R_f S)^2 \quad (2.8)$$

式中: S 为应力水平,定义为实际主应力差与破坏时主应力差的比值,即

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \frac{c \cos \phi + \sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (2.9)$$

R_f 为破坏比,其值小于 1.0,定义为破坏时的主应力差与主应力差渐近值的比值:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (2.10)$$

E_i 为初始切线模量,定义为

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (2.11)$$