

胶凝砂砾石材料力学特性、 耐久性及其坝型研究

孙明权 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

胶凝砂砾石材料力学特性、 耐久性及其坝型研究

孙明权 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书总结了胶凝砂砾石的发展歷程和研究现状；针对影响胶凝砂砾石材料力学特性的主要因素进行了试验研究，并分析了胶凝砂砾石材料强度随之变化的规律；研究了胶凝砂砾石材料在温度变化和冻融影响下的耐久性能；研究了胶凝砂砾石坝体剖面的变化形式和相应的控制标准；介绍了虚加弹簧法的邓肯-张模型、摩尔-库仑软化模型、弹塑性损伤模型和多线性随动强化模型及其在胶凝砂砾石坝中的应用；以线性和非线性有限元方法研究了不同坝高及边坡对胶凝砂砾石坝体应力与位移的影响；通过模型试验研究和验证了胶凝砂砾石坝体的应力分布规律；采用有限元数值分析手段研究了不同气候条件下胶凝砂砾石坝的抗冻融性能和工程措施。

本书可供从事胶凝砂砾石材料科研、设计与工程相关技术人员使用，也可供大专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目（C I P）数据

胶凝砂砾石材料力学特性、耐久性及坝型研究 / 孙明权等著. -- 北京：中国水利水电出版社，2016.9
ISBN 978-7-5170-4813-8

I. ①胶… II. ①孙… III. ①胶凝—砾石—材料力学—研究 IV. ①P619.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第253803号

书 名	胶凝砂砾石材料力学特性、耐久性及坝型研究 JIAONING SHALISHI CAILIAO LIXUE TEXING、 NAIJIUXING JI BAXING YANJIU
作 者	孙明权 等 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	170mm×240mm 16开本 14.25印张 271千字
版 次	2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	58.00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

| 前 言 |

胶凝砂砾石材料是近年来提出的一种环保型建筑材料，它是将少量胶凝材料添加到河床砂砾石材料或开挖废弃料等容易在坝址附近获取的岩石基材中，采用简易的设备和工艺进行拌和后得到的一种低强度的筑坝材料，具有经济、环保等显著优点。目前，国内外对胶凝砂砾石坝的研究仍处于起步阶段，其基础理论和工程实践仍需不断深入研究。

本书是在水利部公益性行业科研专项经费项目“胶凝砂砾石材料力学特性、耐久性及其坝型研究”基础上完成的。主要内容包括：第1章绪论，总结了胶凝砂砾石的发展历程和研究现状；第2章胶凝砂砾石材料力学性能研究，针对影响胶凝砂砾石材料力学特性的主要因素进行了试验研究，并分析了胶凝砂砾石材料强度随之变化的规律；第3章胶凝砂砾石材料耐久性试验研究，研究了胶凝砂砾石材料在温度变化和冻融影响下的耐久性能；第4章胶凝砂砾石坝剖面形式研究，研究了胶凝砂砾石坝体剖面的变化形式和相应的控制标准；第5章胶凝砂砾石材料本构模型，介绍了虚加弹簧法的邓肯-张模型、摩尔-库仑软化模型、弹塑性损伤模型和多线性随动强化模型及其在胶凝砂砾石坝中的应用；第6章胶凝砂砾石坝的有限元分析，以线性和非线性有限元方法研究了不同坝高及边坡对胶凝砂砾石坝体应力与位移的影响；第7章模型试验及评价，通过模型试验研究和验证了胶凝砂砾石坝体应力分布规律；第8章胶凝砂砾石结构冻融仿真及工程应用，采用有限元数值分析手段研究了不同气候条件下胶凝砂砾石坝抗冻融性能和工程措施。

本书由“胶凝砂砾石材料力学特性、耐久性及其坝型研究”项目负责人孙明权教授负责全面编写工作。其中，柴启辉、韩立炜负责第1章和第2章编写，郭磊、郭利霞负责第3章编写，杨世锋、田青

青负责第4章编写，杨世锋、许新勇、张建伟、黄虎负责第5章编写，杨世锋、彭成山负责第6章编写，丁泽霖负责第7章编写，陈守开、郭磊负责第8章编写。

在项目研究和本书编写过程中，项目组全体成员为项目研究及成果取得作出了应有的贡献。中国水利水电科学研究院、河海大学、郑州大学、河南省水利科学研究院、山西省水利水电勘测设计研究院等同行专家对项目研究提出了很多宝贵意见。我们将铭记胶凝砂砾石坝研究领域内专家对项目组的支持和鼓励；铭记中国水利水电出版社对本书的关怀和指导；铭记华北水利水电大学水利学院和水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心对本书付出的极大热情和帮助。在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

著 者

2016年6月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国外胶凝砂砾石坝发展状况	2
1.3 国内胶凝砂砾石坝发展状况	3
1.4 存在的问题与研究内容	6
第2章 胶凝砂砾石材料力学性能研究	9
2.1 试验材料选取及性能	9
2.2 配合比设计	14
2.3 试验标准及试件制备	16
2.4 立方体抗压强度试验方法及强度影响因素分析	26
2.5 劈裂抗拉强度、轴心抗压强度、抗弯强度影响因素分析	42
2.6 三轴抗剪试验研究	49
2.7 本章小结	58
第3章 胶凝砂砾石材料耐久性试验研究	62
3.1 试验目的及内容	62
3.2 胶凝砂砾石材料外观损伤分析	72
3.3 质量损失规律	74
3.4 相对动弹性模量变化规律	86
3.5 本章小结	95
第4章 胶凝砂砾石坝剖面形式研究	96
4.1 按土石坝设计理论分析	96
4.2 按重力坝设计理论分析	98
4.3 本章小结	105
第5章 胶凝砂砾石材料本构模型	106
5.1 胶凝砂砾石材料应力应变关系特性分析	106
5.2 邓肯-张模型	107

5.3	摩尔-库仑软化模型	111
5.4	弹塑性损伤模型	116
5.5	多线性随动强化模型	124
5.6	本构模型对比分析	131
5.7	本章小结	151
第 6 章	胶凝砂砾石坝的有限元分析	152
6.1	有限元分析理论	152
6.2	胶凝砂砾石坝的非线性计算	157
6.3	胶凝砂砾石坝的线性计算	163
6.4	本章小结	175
第 7 章	模型试验及评价	176
7.1	研究背景	176
7.2	模型相似关系	177
7.3	模型设计与制作	180
7.4	模型试验结果	189
7.5	本章小结	192
第 8 章	胶凝砂砾石结构冻融仿真及工程应用	193
8.1	计算原理	193
8.2	计算模型和假定	197
8.3	计算参数与设定	199
8.4	冻融仿真试验研究	202
8.5	工程应用	206
8.6	本章小结	215
参考文献		217

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景及意义

胶凝砂砾石材料是将胶凝材料、水、河床原状砂砾石或开挖废弃料等工程建材通过简易设备拌和后得到的一种新型筑坝材料。胶凝砂砾石坝兼具碾压混凝土坝和堆石坝的优点。与碾压混凝土坝相比,水泥用量少,骨料制备和拌和设施大为简化,温控措施可以取消,施工速度明显加快,工程造价显著降低;与堆石坝相比,工程量显著降低,抗渗透变形和抗冲刷能力增强,具有明显的优越性。此外,由于人工材料的减少,骨料标准的降低,弃渣料的利用,可有效地节约资源,最大限度地避免土地植被的破坏,减少对自然环境的影响。因此,胶凝砂砾石坝属于经济、安全、施工方便、低碳、环境友好的新坝型。

随着近些年来大坝与自然环境的关系越来越受到公众的关注,如何在追求高效施工和低成本建设的现代筑坝技术与减少对自然环境影响两者之间做出平衡,已经成为未来筑坝技术的发展趋势。水库大坝作为实现水利水电开发的基础和载体,在水与水能资源综合利用上具有不可替代的作用,在未来支撑中国社会经济可持续发展中的地位与作用将进一步得到巩固与加强。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》在“水和矿产资源”重点领域,把“水资源优化配置与综合开发利用”列为优先主题。为实现水资源优化配置与综合开发利用需要建设大量的中小型水库。2011年中央1号文件《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》中又明确提出“十二五”期间基本完成重点中小河流重要河段治理、全面完成小型水库除险加固的要求。2015年《国家重点研发计划重点专项方案》在水资源高效开发利用专项重大水资源工程建设与安全运行技术方面明确提出“十三五”期间完善环境友好的水工程建设技术,实现国内唯一自主知识产权的胶结颗粒料坝的关键技术突破。因此,推广经济、安全、施工方便、低碳、环境友好的新坝型,具有广阔的应用前景和重要的现实

意义。

1.2 国外胶凝砂砾石坝发展状况

胶凝砂砾石 (Cemented Sand and Gravel, CSG) 坝, 最早由 Raphael J M 和 Londe P 提出, 是基于碾压混凝土 (RCC) 坝、面板堆石坝而发展起来的。1970 年, 在混凝土快速施工会议上, 美国加利福尼亚大学 Raphael J M 教授发表了一篇名为《最优重力坝》的论文, 他首次提出用 CSG 材料来筑坝; 1972 年, 针对加利福尼亚州 Castaic 坝上游面掺土水泥护坡理论, Raphael J M 又提出了一种剖面形式为上下游对称的“土水泥坝”理论。1988 年, 在第 16 届国际大坝会议上, Londe P 提出了降低碾压混凝土中水泥的用量, 同时修建上下游对称的坝体剖面; 1992 年, Londe P 对这种坝型再次进行阐述, 他认为在保证坝体安全的同时降低对碾压混凝土的技术要求, 单纯地得到“硬填方”混凝土, 这样造价会降低很多, 同时具有较高的安全性能。Londe P 称这种筑坝材料为 Hardfill 材料, 并将这一新坝型称为 FSHD (Faced Symmetrical Hardfill Dam)。

近年土耳其在硬填料坝理论研究及工程应用方面也有较快进展, Cindere 坝 (坝高 107m) 和奥尤克坝 (坝高 100m) 已开工兴建, 其中 2002 年开工兴建的 Cindere 坝 (胶凝材料含量为 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 水泥和 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 粉煤灰), 坝体采用对称的梯形结构, 只在上游面设置防渗面板和排水系统, 坝体内部不做任何处理, 是迄今为止世界范围内最高的 Hardfill 坝。

日本坝工界自 20 世纪 90 年代开始投入大量的人力、物力、财力致力于 Hardfill 坝技术的研究与应用, 硬填料在日本称之为 CSG (Cemented Sand and Gravel)。1994 年, 日本建造了 Kubusugawa 坝和 Tyubetsu 坝, 这两座坝的上游围堰均采用 CSG 方式施工; 坝高 33m 的 Nagashima 水库拦沙坝和坝高 14m 的 Haizuka 水库拦沙坝分别于 1999 年和 2002 年建成; 2005 年, 坝高 39m 的 Okukubi 拦河坝在冲绳县开工兴建。1991—1995 年, 在长岛和久妇须川两座大坝的围堰施工中, 采用在河床砂砾料中加入少量水泥作为围堰筑材料来保证施工的快速进行。该筑坝技术不仅大幅降低成本, 做到高效快速施工, 而且建成的大坝具有较高的安全性。

根据统计资料, 从 20 世纪 80 年代开始胶凝砂砾石坝在国外已建成几十座, 其中日本、希腊、多米尼加、菲律宾、巴基斯坦、土耳其等国家均开展了相关的工程探索与实践。国外代表性胶凝砂砾石坝见表 1.2-1。

表 1.2 - 1 国外代表性胶凝砂砾石坝

所在国家	坝名	坝高/m
希腊	Marathia	28
	Anomera	32
多米尼加	Moncion	28
菲律宾	Can - Asujan	40
法国	St Martin de Londress	25
土耳其	Cindere	107
日本	Nagashima	33
	Haizuka	14
	Okukubi	39
	Sanru	50
	Honmyogawa	62

1.3 国内胶凝砂砾石坝发展状况

我国的胶凝砂砾石筑坝技术研究始于 20 世纪 90 年代，武汉大学、华北水利水电大学、中国水利水电科学研究院等单位相继开展了相关的研究，对筑坝材料的力学性能、耐久性、本构模型、坝体剖面形式等方面进行了广泛探讨。2004 年，中国水利水电科学研究院、福建省水利水电勘测设计院和中国水利水电第十六工程局等单位合作，建成了我国第一座胶凝砂砾石坝，即坝高 16.3m 的福建尤溪街面水电站下游围堰。经过全面的研发与实践，我国已经取得了不少实质性的筑坝经验。2014 年，《胶结颗粒料筑坝技术导则》（SL 678—2014）的正式发布实施，为胶凝砂砾石坝的研究与发展奠定了基础。国内代表性胶凝砂砾石坝见表 1.3 - 1。

表 1.3 - 1 国内代表性胶凝砂砾石坝

所在地区	坝名	坝高/m	建成年份
贵州	道塘水库上游围堰	7.0	2004
福建	街面水电站下游围堰	16.3	2005
福建	洪口水电站上游围堰	35.5	2006
云南	功果桥水电站上游围堰	50.0	2009
贵州	沙沱水电站左岸下游围堰	14.0	2009
山西	守口堡水库胶凝砂砾石坝	60.6	在建

1.3.1 胶凝砂砾石材料试验

20 世纪 90 年代, 武汉水利电力大学唐新军等在天然级配砂石料中掺入少量胶凝材料进行基本力学性能试验, 研究发现: 材料抗压强度受细骨料(粒径小于 5mm) 和胶凝掺量的影响较为显著; 胶凝砂砾石料的弹性模量远高于普通堆石料; 粉煤灰有利于改善其硬化后的力学性能, 可节省水泥的用量。

1995 年, 华北水利水电学院孙明权等结合水利部重点科研项目——超贫胶结材料坝研究, 通过试验得出: 水灰比是影响超贫胶结材料抗压强度和弹性模量的主要因素, 其最佳水灰比在 0.8~1.2 之间; 材料抗剪强度随胶凝材料含量的增加有明显的提高; 材料也存在剪胀性特征。

2003 年, 华北水利水电学院孙明权等试验分析了水灰比、砂率对固结砂砾料混凝土性能的影响, 试验得出: 在试验选取“最佳水灰比”与“合理砂率”的条件下, 其试样强度值达到最大; 在固结砂砾料混凝土内掺入粉煤灰, 可使材料的强度有一定的提高。

2006 年, 武汉大学何蕴龙等进行了关于 Hardfill 坝理论问题的研究, 通过进行各种配合比设计试验, 分析了影响 Hardfill 材料强度的各种因素, 试验表明: 水胶比、砂率、胶凝材料用量、粉煤灰掺量等对 Hardfill 材料抗压强度有明显影响, 其中水胶比对材料强度影响最明显, 存在“最佳水胶比”与“合理砂率”。

2007 年, 华北水利水电学院孙明权等在试验的基础上, 给出了超贫胶结材料配合比设计的基本参数以及最优水灰比数值、粉煤灰超代系数, 同时对不同胶凝掺量的胶凝砂砾石料进行了三轴剪切排水试验, 结果表明这种材料的应力应变曲线具有明显的非线性及软化特征。

2010 年, 河海大学蔡新等在完成材料的抗压、抗折试验之外, 进行了三轴试验, 研究了胶凝砂砾石材料的破坏强度、初始弹性模量与围压之间的关系以及材料泊松比与应力状态之间的关系。

2011 年, 中国科学院力学研究所吴梦喜等对不同龄期的胶凝砂砾石进行了三轴试验研究, 进一步揭示了材料的强度和应力应变特征。

2013 年, 中国水利水电科学研究院贾金生等系统研究了胶凝砂砾石材料配合比设计中水胶比、水泥用量、粉煤灰掺量、砂率、含泥量等参数对强度的影响, 并推荐了适用于胶凝砂砾石工程的配合比设计参数取值范围, 同时针对工程迫切关注的问题, 对长期水压力下这种材料的渗透溶蚀性能进行了试验研究。

1.3.2 胶凝砂砾石材料本构模型

在胶凝砂砾石材料本构关系方面, 国内学者多是参照日本的做法将胶凝砂

砾石材料看作混凝土材料,采用线弹性的本构关系来研究;也有将胶凝砂砾石材料视为堆石料,并采用邓肯-张本构关系(或修正后的邓肯-张本构关系)来研究。

2003年,华北水利水电学院孙明权在三轴试验成果的基础上,通过对三轴试验数据的分析,认为胶凝砂砾石的应力应变曲线经过适当的处理,其与堆石料的应力应变曲线比较接近,建议采用虚加刚性弹簧法建立该材料的本构模型,并给出了相关参数的确定方法。

2006年,武汉大学何蕴龙结合大量试验,采用弹性模型描述该材料的特性,从而建立了Hardfill材料9参数本构模型。模型共有9个参数,均可以通过三轴试验方便地确定。

2010年,河海大学蔡新等在胶凝砂砾石料基本材料试验和三轴试验的基础上,总结出一个可以反映胶凝砂砾石材料变形特性的非线性弹性应力应变关系,通过对试验数据的回归分析得出了反映胶凝砂砾石应力应变特性的本构模型。

2011年,中国科学院力学研究所吴梦喜等在对不同龄期的胶凝砂砾石进行三轴试验研究的基础上,提出了基于应变一致假定的二元并联概念模型,该模型既能描述胶凝砂砾石应力应变非线性特征又能描述模量随龄期增长的特征。

2013年,华北水利水电学院孙明权针对 $E-\nu$ 模型的缺点对胶凝砂砾石料进行了 $K-G$ 模型的适用性探讨,并对该模型的应力应变理论预测曲线和试验曲线进行了对比。

1.3.3 胶凝砂砾石坝剖面设计

国外在修建胶凝砂砾石坝中通常默认大坝断面为对称梯形断面,对胶凝砂砾石坝断面的优化和最优断面影响因素的研究较少。国内学者在胶凝砂砾石坝结构静动力分析的基础上,进行了一些断面优化设计研究。

2005年,武汉大学何蕴龙等研究了CSG不同断面的静力、动力特性,表明CSG坝结构安全度和稳定性高,抗震性能好,而对称断面或者上下游接近的断面具有良好的受力特性,是值得推荐的断面形式。

2007年,华北水利水电学院孙明权等系统地分析了不同胶结材料含量情况下超贫胶结材料的应力应变关系、抗剪强度指标和相应的残余强度,提出了针对不同胶凝含量的超贫胶结材料坝的“三段设计法”,阐述了坝体剖面的过渡形式。

2013年,中国水利水电科学研究院贾金生等对胶凝砂砾石坝最优断面进行了研究,探讨了胶凝砂砾石断面与材料设计允许强度、坝高及基岩条件等影

响因素的关系,提出了胶凝砂砾石坝最优对称断面的适用范围。

1.4 存在的问题与研究内容

基于胶凝砂砾石坝的优越性能,该坝型在国内外均具有十分广阔的应用前景,需将筑坝材料特性、坝体剖面尺寸、施工技术、坝体安全性与经济性等方面综合考虑,形成一套完整的设计理念。但由于胶凝砂砾石坝发展历时短,尤其对胶凝砂砾石材料的力学性能、耐久性及其坝型研究不够深入系统,剖面设计缺乏理论支撑,难以确定安全、经济的合理剖面。致使该坝型在国内应用多局限于临时工程或辅助工程。著者认为胶凝砂砾石坝的研究存在以下4方面的问题。

(1) 胶凝砂砾石材料力学性能研究大多采用常规单轴抗压试验,虽然也有部分抗拉和三轴试验成果,但是对同一配比的材料同时进行抗拉、抗压和抗剪系统试验研究不够。难以确定其系统的强度指标,急需同时对不同水泥用量、骨料级配、砂率、粉煤灰掺量等进行大量的常规单轴试验和大三轴试验研究,建立材料性能指标体系。

(2) 对胶凝砂砾石材料的本构特性认识还不够深入,多是将胶凝砂砾石材料看作混凝土材料,采用线弹性的本构关系来模拟。但通过现有研究成果,普遍认为胶凝砂砾石材料应力应变关系为明显的非线性软化曲线,线弹性本构关系不能准确地模拟胶凝砂砾石材料的实际应力应变状态,需要建立适合胶凝砂砾石材料自身特点的本构模型。

(3) 由于胶凝砂砾石材料中水泥用量较少,与常规混凝土相比,材料本身强度低,抗渗透性能差,易产生冻胀、渗透、溶蚀等影响工程耐久性的问题,其中温度变化和冻融破坏是影响胶凝砂砾石材料耐久性的重要因素,但目前这方面的研究工作还不够深入。

(4) 由于上述基础研究不够深入,无法对胶凝砂砾石坝进行合理的应力及变形分析,不能够准确掌握坝体实际应力应变分布状态,也难以确定合理的剖面设计原则和控制标准,从而也就难以确定合理的坝体型式和进行安全、经济、耐久的坝体剖面设计。

鉴于以上问题,反映出胶凝砂砾石坝的基础理论研究还不够充分,严重影响该优越坝型的发展。本书拟通过系统的试验研究,掌握胶凝砂砾石材料的力学特性;建立符合其材料特性的本构关系;经冻融试验,确定热学参数;通过仿真分析,确定胶凝砂砾石坝剖面设计原则和控制标准;从材料配比和工程结构措施两个方面提出增强胶凝砂砾石坝耐久性能的措施和方法。主要研究内容如下。

(1) 胶凝砂砾石材料力学特性试验与研究。针对影响胶凝砂砾石材料力学特性的主要因素,进行系统的试验与研究。选取天然河道的砂卵石作为骨料,通过筛分,取不同颗粒级配、水泥用量、粉煤灰掺量、含砂率、水灰比、龄期、试件尺寸等同时进行常规抗拉、抗压试验和大三轴剪切试验,得出相应的应力应变关系曲线,研究胶凝砂砾石材料强度随之变化的规律。

(2) 胶凝砂砾石材料耐久性研究。重点针对胶凝砂砾石材料在温度变化及冻融影响下的耐久性问题进行深入研究。

1) 采用混凝土快速冻融试验设备,对多个配合比的胶凝砂砾石进行室内抗冻性能试验,找出合适的测试方法,确定其相对耐久性指标;使用外加剂、粉煤灰、硅粉等对胶凝砂砾石材料进行改性试验研究,探讨提高材料抗冻耐久性的方法、途径和可行性。

2) 采用新型混凝土热物理参数测定仪,进行不同初始温度绝热温升试验,获得同龄期条件下自身不同配合比、不同初始温度的绝热温升过程的试验数据,同时测定导温和比热两项参数,为仿真分析提供计算基础数据。

(3) 胶凝砂砾石材料本构模型研究。前期著者本着尽量贴近工程实际、计算分析方便的原则,采用“虚加弹簧法”解决了材料的软化特性并建立了相应的本构模型。此次在分析和对比所得大量应力应变关系曲线的基础上,同时采用其他解决材料软化特性的方法,建立相应的本构模型,对比各模型的特点及适宜性,选择适合于胶凝砂砾石材料性能的本构模型,并根据试验成果确定相应的模型参数。

(4) 胶凝砂砾石坝剖面设计原则及坝型研究。胶凝砂砾石坝剖面设计,只有清楚了解胶凝砂砾石材料的力学特性,建立符合胶凝砂砾石材料特性的本构模型,并在此基础上对胶凝砂砾石坝进行合理的应力应变分析,掌握坝体实际应力应变分布状态,将坝体实际应力应变状态与筑坝材料的强度标准相结合,才能判断坝体上、下游边坡究竟是由抗拉、抗压强度控制还是由抗剪强度控制,进而确定合理的控制标准和剖面设计原则。

根据所确定的材料性能指标体系和本构模型,通过大量的仿真分析,制定胶凝砂砾石坝合理的控制标准和剖面设计原则;分析胶凝砂砾石坝上、下游边坡确定的控制条件;研究不同强度指标下应力、应变控制标准和坝体设计边坡及坝高等,拟定合理的胶凝砂砾石坝坝型和剖面形式,研究胶凝砂砾石坝上、下游边坡确定的理论依据和计算方法。

(5) 胶凝砂砾石坝耐久性仿真分析。完善温度场流固耦合有限元全过程仿真分析程序,建立胶凝砂砾石材料非线性控制微分方程和非线性边界热学特性的温度场基本理论模型,确定不同防冻防裂条件下复合材料边界热学特性,根据实测气温资料,拟定受冻和融化温度及持续时间;以抗冻试验中的冻融破坏

次数（试验结果）为标准进行长期仿真分析，从而确定在实际工程条件下，胶凝砂砾石坝的冻融破坏时间和冻融影响深度；拟定防冻裂工程和结构措施方案，并赋予基于数学优化算法的反分析研究，从而提出满足工程防冻防裂要求的结构措施或工程措施。

第2章

胶凝砂砾石材料力学性能研究

国内外学者对胶凝砂砾石材料力学性能进行试验研究时选取的主要影响因素通常有胶凝材料用量、砂率、水胶比，且大都采用常规单轴抗压试验方法。但是，对不同配合比下多影响因素，以及对同一配比下的材料同时进行抗拉、抗压和抗剪系统试验研究不够，难以确定其系统的强度指标。

本章以天然河道的砂砾石作为骨料，选取不同颗粒级配、水泥用量、粉煤灰掺量、砂率、水胶比、龄期、试件尺寸等变化因素同时进行常规抗拉、抗压试验和大三轴剪切试验，得出相应的应力应变关系曲线，研究胶凝砂砾石材料强度随之变化的规律。

2.1 试验材料选取及性能

混凝土由水泥、水、砂（细骨料）和石子（粗骨料）4种基本材料组成。为节约水泥或改善混凝土的某些性能，常掺入一些外加剂和掺合料。水泥和水构成水泥浆；水泥浆包裹在砂颗粒的周围并填充砂子颗粒间的空隙形成砂浆；砂浆包裹石子颗粒并填充石子间的空隙，组成混凝土。在混凝土拌和物中，水泥浆在砂、石颗粒之间起润滑作用，使拌和物具有和易性，易于施工。水泥浆硬化后形成水泥石，将砂、石胶结成整体。砂、石子一般不与水泥起化学反应，其作用是构成混凝土骨架。

胶凝砂砾石材料和混凝土性质相似，也由胶凝材料（主要指水泥和粉煤灰）、水、砂（细骨料）和石子（粗骨料）4种基本材料组成。

2.1.1 水泥

水泥呈粉末状，与水混合后，经过物理化学过程能由可塑性浆体变成坚硬的石状体，并能将散粒材料胶结成为整体，是一种良好的矿物胶凝材料。水泥不仅能在空气中硬化，还能更好地在水中硬化，保持并发展强度，属于水硬性胶凝材料。

在胶凝砂砾石材料中，水泥作为主要的胶凝材料，对胶凝砂砾石材料的力学特性有显著的影响，水泥等级越高，水泥石的强度会越高，与材料胶结强度也会越高，进而体现为胶凝砂砾石材料强度的提高，因此，水泥品种和标号的

选取变得极为重要。《胶结颗粒料筑坝技术导则》(SL 678—2014)对胶凝砂砾石材料中水泥的要求为:凡符合GB 175、GB 200的硅酸盐系列水泥均可用于胶结颗粒料筑坝;当胶结材料中掺入粉煤灰等矿物掺合料时,水泥宜优先选用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、中热或低热硅酸盐水泥。

参考国内多数混凝土工程多采用32.5MPa、42.5MPa或52.5MPa等级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,水利工程属大体积结构,有低水化热的要求,而且多利用后期强度,根据“超贫胶结材料坝研究”,推荐胶凝砂砾石材料使用425号水泥为好。因此,此次试验中的水泥,选用河南多样达水泥有限公司生产的425号普通硅酸盐水泥,其物理力学指标见表2.1-1。

表 2.1-1 水泥的物理力学指标

技术要求	标准值	检验值	技术要求	标准值	检验值
安定性	合格	合格	3d 抗折强度/MPa	≥3.5	5.2
三氧化硫含量/%	≤3.5	2.60	单块强度/MPa		
氧化镁含量/%	≤5.0	—	3d 抗压强度/MPa	≥17.0	28.3
烧失量/%	≤5.0	3.03	单块强度/MPa		
初凝时间/min	≥45	168	28d 抗折强度/MPa	≥6.5	—
终凝时间/min	≤600	230	单块强度/MPa		
氯离子含量/%	≤0.06	0.025	28d 压折强度/MPa	≥42.5	—
碱含量/%	—	—	单块强度/MPa		

注 1. 水泥品种为普通硅酸盐水泥,强度等级为42.5MPa。
2. 该水泥厂出具的检验报告单显示购买批次产品符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)规定的技术要求。

2.1.2 粉煤灰

粉煤灰是煤粉经高温燃烧后形成的一种似火山灰质的混合材料。它是燃烧煤的发电厂将煤磨成100μm以下的煤粉,用预热空气喷入炉膛成悬浮状态燃烧,产生混杂有大量不燃物的高温烟气,经集尘装置捕集就得到了粉煤灰。粉煤灰的化学组成与黏土相似,主要成分为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO和未燃尽碳。大量研究表明,粉煤灰属于活性材料,具有一定的胶凝性能。

通过以往的研究和工程经验得知,在混凝土中加入一定量的粉煤灰可以提高混凝土的强度,同时可以有效地改善混凝土的耐久性能。将粉煤灰作为胶凝材料加入胶凝砂砾石材料当中,粉煤灰不仅起到了胶结骨料、增加材料强度的作用,在一定条件下,粉煤灰自身也可以参与化学反应,与水泥水化后的产物Ca(OH)₂产生二次反应后会生成C-S-H及C-A-H凝胶物质,产生一定强度,对硬化浆体起增强作用,从而增强材料的强度,但是反应速度较慢,前期对材料强度提高程度不明显,但对材料后期强度提高效果显著。大量实践证