

动载下胶凝砂砾石材料的 非线性行为及损伤特性研究

张献才 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

动载下胶凝砂砾石材料的 非线性行为及损伤特性研究

张献才 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以循环动荷载作用下胶凝砂砾石材料的非线性特征为中心,以物理试验为基础,结合非线性损伤理论,重点研究了胶凝砂砾石材料在循环动荷载作用下的力学特性,对其动应力-应变关系、破坏规律、非线性滞回特征及损伤规律等问题展开研究,并建立了相关理论模型。全书共分6章,内容包括绪论、胶凝砂砾石材料的试验准备、胶凝砂砾石材料的动力学特性试验研究、胶凝砂砾石材料滞后效应研究、胶凝砂砾石材料的细观滞回模型研究、胶凝砂砾石材料的动损伤特性研究。其中,相关理论模型等内容可为胶凝砂砾石坝的抗震设计及研究提供相关的依据。

本书可供水利水电工程等专业规划、设计与科研人员参考,也可供高等院校研究生与科研院所相关专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

动载下胶凝砂砾石材料的非线性行为及损伤特性研究/
张献才著. — 北京:中国水利水电出版社,2020.11
ISBN 978-7-5170-8983-4

I. ①动… II. ①张… 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(2020)第207054号

书 名	动载下胶凝砂砾石材料的非线性行为及损伤特性研究 DONGZAI XIA JIAONING SHALISHI CAILIAO DE FEIXIANXING XINGWEI JI SUNSHANG TEXING YANJIU
作 者	张献才 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	清淞永业(天津)印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.5印张 202千字 6插页
版 次	2020年11月第1版 2020年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	49.00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

大坝抗震问题一直以来都是水利工程建设中的难点问题，不仅涉及地震荷载的复杂性，还与筑坝材料本身的动力学性能有很大的关系。从材料自身的动力学性能方面着手寻找大坝抗震设计的优化方法，为水利工程的抗震研究提供了有效的思路。鉴于地震荷载的复杂性，在循环荷载作用下研究筑坝材料的力学特性成为研究材料动力学问题的一个突破口，通过动力学性能研究，为胶凝砂砾石坝向永久性高坝工程发展奠定了理论基础。

本书以胶凝砂砾石材料的非线性特征为研究重点，对循环荷载作用下胶凝砂砾石材料的动应力-应变关系、破坏规律、非线性滞回特征及损伤规律等问题进行了研究；结合材料的动应力-应变滞回特征，建立了适合于胶凝砂砾石材料的细观滞回理论模型，在非线性的损伤力学理论的基础上讨论了胶凝砂砾石材料的动损伤模型，为胶凝砂砾石材料的基础理论研究提供了重要的参考依据。

本书在编写过程中，结合相关试验规范及国内外工程实例，总结了近年来相关研究成果，对胶凝砂砾石材料的试验数据进行详细的分析，并在此基础上，研究其动荷载作用下的有关理论分析模型。

本书在研究和编写过程中，借鉴参考了国内外相关资料，在此向所有参考和引用资料的作者表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者给予批评指正。

作者

2020 年 4 月 20 日

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 胶凝砂砾石材料简介	3
1.3 胶凝砂砾石材料的应用	4
1.4 胶凝砂砾石材料研究现状	6
1.4.1 胶凝砂砾石材料静力特性研究	6
1.4.2 胶凝砂砾石材料动力特性研究	11
1.5 主要研究内容	13
第 2 章 胶凝砂砾石材料的试验准备	15
2.1 试验材料	15
2.1.1 试验材料选取	15
2.1.2 试验内容及配合比设计	19
2.2 动力试验仪器简介	23
2.3 试样制备	25
2.3.1 试验标准	25
2.3.2 试样制作及养护	25
2.4 本章小结	28
第 3 章 胶凝砂砾石材料动力学特性的试验研究	29
3.1 变幅循环加载下的动力学特性	30
3.1.1 动强度特性	30

3.1.2	变形特性	32
3.1.3	动模量变化规律	39
3.2	等幅循环加载下的动力学特性	43
3.2.1	动强度特性	43
3.2.2	等幅加载下的变形特性	44
3.2.3	动模量变化规律	47
3.3	胶凝砂砾石材料全应力-应变曲线	49
3.4	本章小结	52
第4章	胶凝砂砾石材料滞后效应研究	54
4.1	非线性滞后分析	54
4.1.1	变幅循环加载下非线性滞后分析	55
4.1.2	等幅循环加载下非线性滞后分析	57
4.2	滞回环形态分析	62
4.2.1	变幅循环加载下的滞回环形态	63
4.2.2	等幅循环加载下的滞回环形态	65
4.2.3	滞回环的描述	66
4.3	胶凝砂砾石材料的能量演化特征	71
4.3.1	能量演化分析	72
4.3.2	破裂模式	76
4.4	胶凝砂砾石材料阻尼效应研究	80
4.5	本章小结	84
第5章	胶凝砂砾石材料的细观滞回模型研究	86
5.1	基于 P-M 空间理论的细观滞回模型	87
5.1.1	P-M 细观模型理论	87
5.1.2	细观滞回模型的建立	89
5.1.3	参数拟定及敏感性分析	90
5.2	胶凝砂砾石材料的细观滞回模型	101
5.2.1	胶凝砂砾石细观滞回模型的理论基础	102
5.2.2	胶凝砂砾石材料的细观滞回模型	105
5.3	本章小结	108

第 6 章 胶凝砂砾石材料的动损伤特性研究	110
6.1 疲劳累积损伤理论	110
6.1.1 累积损伤变量的计算方法	110
6.1.2 累积损伤理论	112
6.1.3 胶凝砂砾石疲劳累积损伤定义	114
6.2 胶凝砂砾石材料的损伤演化规律	119
6.2.1 损伤变量与循环次数的关系	119
6.2.2 损伤变量与累积应变的关系	121
6.2.3 上限应力比对损伤演化规律的影响	122
6.3 累积损伤模型	124
6.3.1 与应变相关的累积损伤模型	124
6.3.2 与循环相关的损伤模型	127
6.4 本章小结	133
参考文献	134

1.1 研究背景及意义

近年来,随着民众环境保护意识的提高,工程建设对自然环境的影响越来越受到人们的重视。对于大型水利工程而言,在追求高效施工与低成本建设的同时,最大限度地降低工程对生态环境的影响是现代筑坝技术的目标和发展趋势。水库大坝作为实现水利水电开发的基础,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,是实现水资源优化配置与综合开发利用的必然途径。为了加快推进社会主义现代化建设,全面建设小康社会,国家制定了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》,将“水和矿产资源”作为第二个重点领域,并将“水资源优化配置与综合开发利用”列为重点领域的第六个优先主题。根据《水利改革发展“十三五”规划》要求,优化水资源配置格局、加快水源工程建设等是我国全面实现小康社会的基础保障。为了贯彻“绿水青山就是金山银山”的理念,在水利水电行业推广应用经济、安全、施工方便、低碳、环境友好的新坝型,将成为我国水利水电行业发展的新目标。从材料特点和施工工艺等方面考虑,胶凝砂砾石(cemented sand and gravel, CSG)坝兼具碾压混凝土坝和堆石坝的优点,但其水泥用量相对于碾压混凝土坝较少,骨料制备和拌和设施简单,无须考虑温控措施,施工工期明显缩短,工程造价显著降低;相对于堆石坝而言,其抗渗透变形和抗冲刷能力增强,工程量显著降低。另外,CSG材料的应用节省了人工材料,降低了骨料的标准,

有效地利用了弃渣料,节约资源,避免了大范围骨料开挖对生态环境造成的影响。综上所述,胶凝砂砾石坝作为一种新型的经济、安全、施工方便、低碳、环境友好的坝型,在未来水利工程建设中具有广阔的应用前景和重要的现实意义。

随着2004年我国首例CSG过水围堰工程的建成,CSG材料在水利工程应用也逐渐推广开来。贾金生等^[1]于2009年提出了胶结颗粒料坝和“宜材适构”的新型筑坝理念,并推动国际大坝委员会设立了胶结颗粒料坝专业委员会,编制了胶结颗粒料坝水利行业技术标准。鉴于胶凝砂砾石坝的优越特点,越来越受到业主和施工单位的青睐。我国第一座永久性胶凝砂砾石坝工程——山西省守口堡水库大坝于2013年开工建设,这也标志着我国胶凝砂砾石坝进入了新阶段。随着胶凝砂砾石坝理论研究的深入,我国的CSG坝正由低坝向高坝、由临时性向永久性过渡。CSG材料作为一种新型的建筑材料,在工程投资和建设工期方面具有明显的优势,已建工程表明,投资可节约10%~20%,工期可缩短20%以上。由于骨料来源为天然河道中的砂卵石,在环境保护和水土保持方面具有很大的优势,结合我国河道分布特点,对于不少坝址具有优越性^[1]。但由于CSG坝发展历时短,国内外对其材料的力学性能及坝型研究尚不够全面、系统,特别是复杂环境荷载作用下高坝的动力学特性和破坏机理还比较模糊,尚未形成统一的理论认识。

我国水资源丰富,但时空分布不均,多集中在西南地区,然而,该区域也是我国主要的地震带分布区,这给水利工程的建设和安全运行提出了极大的挑战。为加快CSG这种新筑坝材料的推广应用,实现临时建筑物向永久建筑物、低坝向高坝的过渡,在掌握CSG材料基本力学性能的基础上,充分认识其动力学特性并进行地震作用下响应特征分析是CSG坝发展不可或缺的一项研究。针对水工结构受力诱因复杂的情况,结合动力学试验,研究复杂环境下CSG材料的动力学特性和损伤演化规律,探寻科学合理的动本构模型,从力学本质上研究CSG材料的损伤机理对CSG材料结构灾害预测至关重要,不仅为建立CSG坝的计算分析方法提供技术支撑,

同时也丰富了固体力学在材料损伤、破坏等方面的知识体系，对工程设计和建设十分必要。

1.2 胶凝砂砾石材料简介

CSG 材料是一种将胶凝材料、水和粗细骨料经常规设备和工艺拌和后得到的一种新型筑坝材料。其中，胶凝材料由水泥和粉煤灰组成，其总量一般控制在 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 以内；水可直接采用河道内水源或自来水；骨料由河床砂砾石、建筑物开挖废弃料等当地材料组成。从材料的组成、力学性能和施工方式等方面看，CSG 材料与碾压混凝土类似，故其配合比理论和性能规律等可参考碾压混凝土，但其强度、弹性模量等性能指标与碾压混凝土相比较低。

CSG 坝的理念最早由拉斐尔（Raphael）提出^[2-3]，其在 *The Optimum Gravity Dam*^[2]一文中提出了“掺土水泥理论及其应用的设计，即利用大型运输机械和压实机械施工的方法以达到缩短施工周期和降低施工成本”的构想。其基本思想是采用一种介于混凝土和堆石之间的筑坝材料进行筑坝，即采用碾压堆石坝的施工工艺进行水泥胶结堆石料坝施工，坝型设计有别于常规重力坝和土石坝。1988 年，法国人 Londe 在国际大坝会议上提出了使用少量水泥的碾压混凝土作为筑坝材料，大坝设计剖面为对称剖面，坝坡坡比为 $1:0.7\sim 1:0.75$ ，他指出采用对称剖面可降低应力值，且对材料的性能要求也低于常规混凝土坝，节省投资^[4]。1992 年，Londe^[5]对该坝型进行了更为细致的阐述，通过降低碾压混凝土性能和施工技术要求，采用一种“硬填方”（Hardfill）的筑坝方式，并将其称为 Hardfill 材料，该坝型称为 FSHD（Faced Symmetrical Hardfill Dam）。20 世纪 90 年代，一种被称为 CSG 坝的筑坝技术和理论在日本坝工界得到快速发展，其材料与硬填料相似。自 20 世纪末，华北水利水电大学孙明权团队在碾压混凝土坝的基础上，提出了一种超贫胶结材料坝，即将河道内的砂砾料通过少量胶凝材料（小于 $80\text{kg}/\text{m}^3$ ）胶结起来，使之成为超贫胶结材料，并用其作为大坝填筑料^[6]。2009 年，贾金生在国内外硬填料坝的基础上提出了胶结颗

粒料坝的概念, Hardfill 材料、超贫胶结材料作为胶结颗粒料的一种, 统称为 CSG 材料。

由于胶凝材料的存在, CSG 材料通常被看作是一种胶结体材料^[7]。从胶结体的角度出发, CSG 材料与砂砾石、混凝土的最大区别是胶凝材料含量的不同, 即材料中胶凝材料浆体的含量和浓度的不同, 胶凝材料的含量决定了骨料的包裹率, 而浓度则决定了胶结强度^[8]。对于砂砾石而言, 由于无胶凝材料浆体, 其包裹率为零; 对于混凝土, 胶凝材料浆体充分充填粗细骨料的空隙, 其包裹率往往大于 1; 而 CSG 材料的包裹率则介于 0~1 之间。

作为一种新型的筑坝材料, 工程实践表明: CSG 材料具有安全可靠、施工便捷、工期短、环境友好等特点。其优点主要有: ①所需骨料充分利用了就地取材的有利条件, 对骨料强度要求低, 可直接利用河道的砂卵石或建筑物开挖的石渣等, 减少了工程建设骨料的大面积开挖, 可减少对环境的影响; ②材料所用胶凝材料含量低, 并可采用粉煤灰替代一定数量的水泥, 极大程度地降低了大体积筑坝材料的水化热问题; ③与常规混凝土相比, 施工方式采用大型机械化碾压施工, 基本不需要设置横缝, 施工工期短、效率高; ④材料固结成形后具有一定的抗冲刷能力, CSG 材料坝可实现坝顶泄流, 可有效降低施工期导流工程成本; ⑤CSG 材料坝对地基适应能力强, 采用对称性剖面设计, 可降低坝体内的应力波动幅度, 增加坝体稳定性^[9-11]。

经过多年研究发现, CSG 材料在以下几个方面尚存在不足: ①由于胶凝材料含量低, 骨料胶凝材料包裹不足, 导致材料性质离散性较大; ②材料耐久性较差, 特别是其抵抗冰冻能力差, 需辅助一定的外加剂; ③不能直接作为坝体防渗体, 需设置专门的防渗体系。

1.3 胶凝砂砾石材料的应用

CSG 材料作为一种新型筑坝材料, 在国内外实际工程建设中已取得了一些显著效果, 目前国内外已建 CSG 坝达数十座。在

Raphael 的筑坝理念下,美国于 1982 年建成了世界上第一座全碾压混凝土重力坝——柳溪 (Willow Creek) 坝,其胶凝材料用量远远低于常规重力坝,仅为 $66\text{kg}/\text{m}^3$;大坝高 52m,长 543m,全段不设纵横缝,按 30cm 一层压实,并采用连续浇筑施工方式,大坝工程量 33.1 万 m^3 ,施工周期仅 5 个月,比常态混凝土坝工期缩短 1~1.5 年,工程造价比常态混凝土重力坝降低 60% 左右,充分显示了碾压混凝土坝的优势。

近年来,土耳其在 Hardfill 坝应用研究方面取得了较大的进展,建成了坝高 107m 的 Cindere 坝^[12]和坝高 100m 的 Oyuk 坝,两座大坝均采用对称剖面形式,仅在大坝上游坝面设置防渗面板和排水设施。其中, Cindere 坝仍为当今世界上最高的 Hardfill 坝。

20 世纪 90 年代初期,日本的 CSG 材料主要应用于施工围堰,如 Kubusugawa 坝和 Tyubetsu 坝的上游围堰;90 年代末以后,开始应用大坝主体工程,如 Nagashima 水库拦砂坝^[13]、Haizuka 水库拦砂坝^[14]以及 2005 年兴建的 Okukubi 拦河坝均采用了 CSG 材料,但坝高较低,均不超过 40m。已建工程表明,CSG 材料筑坝技术不仅施工效率高、工程成本低,而且具有较高的安全性。

根据统计资料,从 20 世纪 80 年代开始,国内外已建成的 CSG 坝达数十座,其中,日本、希腊、多米尼加、菲律宾、巴基斯坦、土耳其等均开展了相关的理论与工程实践研究。国外代表性胶凝砂砾石坝坝高及建成年份如表 1-1 所示。

表 1-1 国外代表性胶凝砂砾石坝坝高及建成年份

国家	坝 名	坝高/m	建成年份
法国	St Marrin de Londress	25	1992
希腊	Marathia	28	1993
希腊	Anomera	32	1997
日本	Nagashima	34	2000
多米尼加	Moncion	28	2001
日本	Haizuka	14	2002

续表

国家	坝 名	坝高/m	建成年份
菲律宾	Can - Asujian	44	2004
土耳其	Cindere	107	2008
日本	Sanru	52	2010
日本	Okukubi	39	2012
日本	Honmyogawa	64	—

采用 CSG 材料筑坝在我国起步较晚，且主要应用于施工围堰工程。我国第一座采用 CSG 材料的工程——道塘水库上游过水围堰于 2004 年建成，堰高 7m，虽然坝高较低且为临时性工程，但开启了我国 CSG 坝工程的应用先河。随后，福建街面水库、福建宁德洪口水库及云南澜沧江功果桥水库的围堰均采用了 CSG 坝方案，但堰高均不超过 50m。近年来，我国在 CSG 材料理论及筑坝技术方面取得了大量研究成果，并制定了相应的水利行业标准。2013 年，我国第一座永久工程的 CSG 坝——山西守口堡水库开工建设，最大坝高 61.6m，采用对称剖面，上下游坡比均为 1：0.7。我国已建及在建代表性胶凝砂砾石坝坝高及建成年份如表 1-2 所示。

表 1-2 我国已建及在建代表性胶凝砂砾石坝坝高及建成年份

所在省份	名 称	最大坝高/m	建成年份
贵州	道塘水库上游围堰	7	2004
福建	街面水库下游围堰	16.3	2005
福建	洪口水库上游围堰	35.5	2006
贵州	沙沱水库下游围堰	14	2009
云南	功果桥水库上游围堰	50	2009
山西	守口堡水库大坝	61.6	2020

1.4 胶凝砂砾石材料研究现状

1.4.1 胶凝砂砾石材料静力特性研究

在 CSG 材料的应用初期，由于坝工界尚未对 CSG 材料力学性

能形成统一完善的理论,国外学者大多将其看作一种类似混凝土的材料,并按照碾压混凝土的方法研究其力学性质,采用混凝土坝的设计方法进行坝体的设计。但是,随着实际工程的建成运行,研究人员发现 CSG 材料作为一种超贫胶凝材料,其力学特性与混凝土和砂砾石材料有本质的区别。进而国内外学者开展了一些力学性能研究,期望找到一种适合于 CSG 材料自身特点的理论基础和大坝设计理论。

CSG 材料由胶凝材料、水及粗细骨料按一定比例拌和而成,其力学性能与用水量、胶凝材料含量、砂率及骨料级配有密切关系^[15]。选择合理的配合比设计,可使 CSG 材料各项力学指标达到最优,从而充分发挥材料自身的优点。最早对 CSG 材料展开详细研究的是日本学者。在 Tokuyama 坝、Haizuka 水坝和 Nagashima 坝的建设时期,Hirose 等^[16-18]考虑不同水泥含量及用水量的影响,对材料的应力-应变关系、抗压强度等进行研究,结果表明:水泥含量与材料的弹性极限强度呈正比,通过分析用水量对材料抗压强度的影响,得出材料存在“最优用水量”;根据试验所得应力-应变曲线,当荷载较小时,材料表现为线弹性,随着荷载的增大,应变随之增加,当应力达到弹性极限强度后,材料又表现出非线性特征,接着达到峰值强度,此后,应力随着应变的增加不断减小,试件开始破坏,材料呈现典型的软化现象,说明 CSG 材料在单轴压缩荷载下表现出明显的弹塑性特征。虽然 CSG 材料的应力-应变关系曲线和常规混凝土较为相似,但是由于胶凝材料含量远低于混凝土,故两者力学特性存在较大差异。随后,一些学者开始采用常规岩土材料的试验方法,对 CSG 材料的影响因素及破坏形式展开进一步研究。

Kongsukprasert^[19-20]和 Lohani 等^[21]通过大量三轴剪切试验发现:影响材料应力-应变关系的因素还有用水量、击实功和水泥含量,在含水量最优时,可通过调整水泥含量使压实度达到最大值。Haeri 等^[22]通过三轴不排水试验,对水泥灰含量进行研究,研究发现:当水泥含量大于 1.5% 时,试件呈剪胀性;水泥含量较小时,

试样则为剪缩特征。Asghari 等^[23]在三轴试验的基础上分析了不同胶凝材料含量的试件的破坏形态及应力-应变特点,研究表明:材料的破坏包络线不是严格的直线,材料黏聚力、强度和刚度与胶凝材料含量呈正比,峰值强度后的应力-应变曲线表现出软化特征;同时提出试件在剪切过程中体积呈现膨胀特征,表现出剪胀性。通过与混凝土和堆石料的力学性质进行比较,Fujisawa^[24]认为 CSG 材料的力学性能介于混凝土和堆石料之间,材料受力后表现出一定的弹性和塑性,是一种典型的弹塑性材料;其应力-应变曲线存在明显的强度峰值和软化段;其强度和变形模量小于混凝土但高于堆石料。Adl^[25]对 CGS 材料进行不同围压下的三轴不排水试验,在高围压和低胶凝材料含量时试件出现明显的膨胀,并得出摩擦角随着胶凝材料含量的增加变化不大而黏聚力变化明显的结论。

虽然国外在 CSG 材料的研究和应用上起步较早,但有关材料的力学性能研究都是基于实际工程开展的,并未对该种材料做出整体系统性的研究,且 CSG 坝的设计也都是借鉴重力坝的相关理论开展的,限制了 CSG 材料相关理论的发展。

自 20 世纪末 CSG 材料引入国内以来,我国诸多学者开始致力于 CSG 材料的相关研究,对材料的组成、配合比设计、试验方法、力学性能、坝型设计理论以及相关施工工艺等一系列问题展开了研究。2007 年华北水利水电大学孙明权团队从水灰比、砂率、胶凝材料用量、围压等方面对超贫胶结材料开展了一系列试验研究,研究表明:选择“最佳水灰比”与“合理砂率”,可使该强度达到最大,同时掺入粉煤灰可提高该材料一定的强度^[26];当胶凝材料含量相同时,应力峰值与围压呈正比,围压越大,材料的峰值应力值越大,且围压对超贫胶结材料强度的影响显著^[27];在试验的基础上,给出了合理的胶结材料配合比设计方案,分析了不同胶结材料含量下的应力-应变曲线以及相应的抗剪强度指标^[28];当轴向应变较小时,应力-应变曲线基本符合双曲线模型特征^[29]。随后,华北水利水电大学孙明权团队依托水利部公益性行业科研专项经费项目,在前期研究的基础上,通过试验从不同配合比(水灰比、砂率)、不同围

压、不同加载方式等多方面对 CSG 材料的力学特性进行了系统的研究, 得出了影响 CSG 材料的力学特性的主要因素; 同时通过对立方体试件进行抗压强度和劈裂试验发现, 在静力荷载作用下, CSG 材料破坏主要是胶结面的破坏, 最终的破坏是由于胶结体的断裂导致材料成为散粒体, 在低围压下粗骨料本身并未发生任何形式的破坏, 从宏观整体上表现为试件的剪切断裂和压碎^[30]。除了华北水利水电大学以外, 国内其他学者对胶凝砂砾石材料也进行了大量研究。王永胜^[31]根据国内已建胶凝砂砾石坝相关资料, 在室内外试验的基础上, 对 CSG 材料的力学性能进行了研究。唐新军等^[32]通过试验对“胶结堆石料”进行了研究, 研究结果表明: 骨料级配、胶凝材料含量、用水量等因素是影响材料的抗压强度的主要控制因素, 胶结堆石料的弹性模量高于堆石料但低于一般碾压混凝土; 粉煤灰的掺入不仅有利于改善材料的力学性能, 还可以降低水泥的掺入量。李建成等^[33]通过不同配合比设计试验, 对影响材料强度的水胶比、砂率、胶凝含量、粉煤灰掺量等各种因素进行研究, 所得结论与其他学者相同。冯炜等^[34]对水胶比、水泥用量、粉煤灰掺量、砂率、含泥量等因素对材料强度的影响进行了研究, 并提出了合理的配合比设计参数取值范围。刘录录等^[35]以胶凝用量、细料含量、水胶比作为 CSG 材料抗压强度的影响因素, 得到了 CSG 材料抗压强度影响因素的主次顺序为胶凝用量、水胶比、细料含量; 最佳水胶比为 1.2, 细骨料含量介于 25%~30% 之间时, CSG 材料的抗压强度达到最大。祝小靓等^[36-37]从胶材种类、含气量、龄期及水胶比 4 个方面, 对 CSG 材料的弹性模量及抗压强度进行了研究, 并给出了相应的发展规律。杨杰等^[38]通过剪切固结排水试验, 得出了不同胶凝材料含量时的应力与应变关系、体应变与轴应变关系, 研究了不同围压、不同胶凝含量时胶凝堆石料的剪胀特性; 试验发现, CSG 材料剪胀性明显, 在不同围压下, 材料的破坏形式也存在不同, 围压越小, 剪胀越明显; 低围压下的胶凝堆石料的破坏主要是骨料间的胶结作用丧失, 骨料本身完好, 在剪切力的作用下发生滚动和翻转, 试件宏观上表现为先缩后胀; 当围压较高时, 在侧向力