

DOI: 10.11779/CJGE201910015

堆石料注浆技术及注浆后力学性质试验研究

邓成进^{1, 2}, 党发宁¹, 苗 喆², 陈兴周³

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;
3. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用自密实砂浆对砂岩堆石料进行现场注浆试验, 验证堆石料注浆扩散范围的可控性及注浆技术的可行性; 该注浆技术施工简单, 注浆后堆石料之间形成砂浆胶结结构, 减小了堆石料的孔隙率, 改善了堆石料的力学性质。同时开展了室内静力大三轴试验, 对比分析了注浆前后及不同级配特征情况下注浆堆石料的力学特性; 研究了围压、粗颗粒含量对注浆堆石料力学性质的影响, 讨论了不同围压、不同级配特征堆石料的强度参数和变形特征。试验表明, 注浆极大提高了堆石料抵抗变形的能力; 粗颗粒含量越高, 骨架作用越显著, 注浆后能形成相对稳定的胶结结构, 堆石料的强度参数越高, 抵抗变形的能力越好。

关键词: 自密实砂浆; 注浆堆石料; 粗颗粒; 胶结结构

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1907-07

作者简介: 邓成进(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝试验和数值模拟研究工作。E-mail: dengchengjin@nwh.cn。

Experimental study on grouting technology of rockfill and mechanical properties after grouting

DENG Cheng-jin^{1, 2}, DANG Fa-ning¹, MIAO Zhe², CHEN Xin-zhou³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710065, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The self-compacting mortar is used to carry out on-site grouting tests on sandstone rockfill materials to verify the controllability of the diffusion range of rockfill grouting and the feasibility of grouting technology. The tests show that the grouting reduces the porosity of the rockfill and has mortar cementing between the rockfill materials, which improves the mechanical properties of the rockfill materials, and the grouting construction technology is simple. The laboratory static triaxial tests are carried out to study the mechanical properties of rockfill, and they are compared before and after grouting owing to the characteristics of different grades of rockfill. The influences of confining pressure and fine particle content on the mechanical properties of grouted rockfill are studied. The strength parameters and deformation characteristics of different confining pressures and gradation characteristics are discussed. The experimental results show that the capability of the rockfill to resist deformation is greatly improved after grouting. And the higher the content of coarse particles, the more significant the skeleton effect. The relatively stable cementing structure can be formed after grouting, and the higher the strength parameters of rockfill, the better its resistance to deformation.

Key words: self-compacting mortar; grouting rockfill material; coarse particle; cementation structure

0 引言

堆石料变形控制是面板堆石坝设计的基础, 其力学和变形特性取决于堆石料岩石强度、颗粒级配组成和密实度^[1-2], 这方面研究成果早已成为面板堆石坝变形控制的理论基础。目前, 高面板堆石坝普遍采用了降低堆石孔隙率或增设增模碾压区等控制变形的措施^[3]。然而仍有多座混凝土面板因坝体变形不协调及变形过大, 导致不同程度的发生了如垫层裂缝、面板裂缝、

面板挤压破坏, 面板脱空、严重渗漏等问题^[4-5]。有学者研究拌和胶凝材料以改良堆石料的力学特性^[6], 但其作为一种类似混凝土的线弹性材料, 主要应用于围堰等临时建筑物; 而且胶凝堆石料的透水性将大幅降低^[7], 不能满足堆石坝坝料自由排水的要求。再者,

拌和胶凝材料工艺不及注浆方便,不能处理竣工后发现的因堆石料碾压密实度不够而发生的变形过大问题,这些都限制了其在堆石坝工程中的使用。

常规的注浆加固需要加压将浆液向岩土体的孔隙内充填,采用流动性好的稀浆,离析泌水严重。而堆石坝工程中堆石料孔隙大,常规注浆必然会出现跑浆、漏浆的现象,浆液扩散范围、充填效果以及工程量往往不可控制。因此,当前岩土体的注浆加固技术及加固后试验研究主要集中在裂隙岩体或黏土的加固^[8-9],堆石料注浆加固技术的应用和研究较少。

随着自流控制性技术的发展,自密实混凝土及自密实砂浆等在自重作用下即可填充全部的孔隙,形成完整的胶结体,相关技术已应用于堆石混凝土坝、大尺度溶洞回填等^[10]。堆石坝与堆石混凝土坝的设计理念有较大差异,无需将堆石料的全部孔隙注浆填充。堆石坝注浆加固的目的不仅在于提高堆石料抵抗变形的能力,同时仍需保持一定程度的自由排水能力,并减少注浆量。

本文采用自密实砂浆为注浆材料,开展现场堆石料注浆试验和室内试验,研究堆石料控制性注浆技术的可行性。现场注浆试验在某面板堆石坝主堆石料区上进行,以研究注浆的扩散范围及胶结效果。同时开展了注浆堆石料的三轴剪切试验,以研究注浆前后堆石料的力学特性变化,为堆石料注浆技术的工程应用提供理论支撑。

1 堆石料注浆技术

1.1 堆石料控制性注浆的原理

堆石料控制性注浆通过调整自密实砂浆配合比,改变自密实砂浆流动性和黏性,使砂浆在堆石体一定范围内扩散,防止扩散范围太大而出现跑浆、漏浆等不可控的情况。砂浆有一定程度的黏性,注入后沿着堆石体内的孔隙或通道向四周扩散,随着浆液流动性能的丧失,浆液附着在堆石体颗粒表面上越来越厚,直至孔隙减小到一定程度,最终形成具有一定胶结程度、且保持一定孔隙的堆石体。如图1所示的砂卵砾石控制性注浆后,形成相对稳定的胶结结构体。



图 1 控制性注浆原理及效果图

Fig. 1 Diagram of controlled grouting principle and effect

自密实砂浆的流动性和黏性分别由扩展度、V漏斗时间表示^[11],其指标的确定与堆石料渗透特性密切相关;对于渗透性大的堆石料采用低流动性浆液,对于渗透性低的采用超高流动性浆液,使自密实砂浆在堆石体限定范围内扩散。堆石料渗透特性与有效孔隙直径相关,刘杰等^[12]定义了堆石料的有效孔隙直径 $D_0=0.63nd_{20}$,以及堆石料的渗流系数 $k=106n^3 d_{20}^2$, n 为孔隙率, d_{20} 为堆石料的等效粒径。因此,可依据堆石料有效孔隙直径 D_0 或渗流系数 k ,选取合适的砂浆扩展度、V漏斗时间等指标,来控制和限定浆液的扩散范围。

堆石料砂浆扩散范围限定后,可用单米注浆量来控制注浆后堆石料的密实度。假定堆石料的初始孔隙率为 n_1 ,注浆后所需达到的设计孔隙率为 n_2 ,计算堆石体单位体积的注浆量为 $V_0=n_1-n_2$,当注浆可控范围的面积为 A ,即可得出堆石体单米的注浆量为 AV_0 。

1.2 堆石料注浆施工技术

堆石料注浆技术施工简单,对于堆石坝的除险加固处理工程,可采用钻孔下设 PVC 花管进行注浆;新建大坝可直接在每层堆石料碾压后在其表面挖坑注入砂浆。

对于堆石坝的除险加固处理,钻孔采用跟管法一次到底,下设花管后拔出套管,采用自下而上分段进行注浆,每段长度在 2~5 m。将制好的浆液通过溜槽、计量桶、漏斗等方式直接注入花管中,无需加压,而后由花管孔向堆石体四周自流。实时测量浆液的注入量和液面高度,持续灌入达到设计孔隙率所需的注浆量即可结束。最终可采用钻孔取芯检查和观察堆石料的填充和胶结情况,并采用深层型-水分密度仪检测堆石料的干密度及孔隙率。

1.3 现场注浆试验

本次现场注浆试验的场地为某混凝土面板堆石坝主堆石料区,该坝由于填筑料混乱及施工质量差,主堆石料区实测孔隙率达到 30%,大坝沉降变形占坝高的 1.39%。由于变形过大,继而产生面板结构性裂缝、接缝止水破坏,大坝渗漏严重,不得已作放空和加固处理。

(1) 砂浆扩散范围验证试验

现场注浆试验布置见图 2 所示,孔间距 2 m,钻孔 2 m 深,底部封堵后在进行注浆,以防止砂浆大量向下扩散;并采用挖坑检查以验证自密实砂浆在堆石体内扩散的有效范围。现场注浆试验自密实砂浆的配合比见表 1。

挖坑检查结果表明,在距注浆孔约 1.9 m、深 1.26 m 处堆石料中大块石之间发现明显的砂浆胶结,且结合良好,表明砂浆最大水平扩散半径达到 1.9 m。砂

浆流过大孔隙并附着在堆石体表面, 在块石与块石接触的部位有砂浆包裹胶结现象, 但在堆石细颗粒(碎石土)集中部位, 由于其孔隙较小, 砂浆无法进入填充。

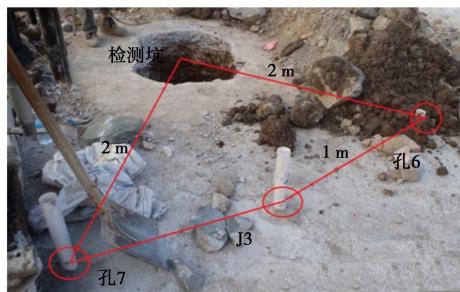


图 2 现场注浆试验布置示意图

Fig. 2 Arrangement of on-site grouting tests

表 1 扩散范围验证试验采用的水泥砂浆配合比

Table 1 Mixing ratios of cement mortar

孔号	水胶比	外加剂掺量/%	坍落扩展度/mm	V漏斗时间/s
6	1.0	1	390	4.42

(2) 全孔注浆试验

根据砂浆扩散范围的验证试验, 其扩散范围可达到 1.9 m, 将全孔注浆试验钻孔间距调整为 2.5 m, 检查孔位于中间。按堆石体的初始孔隙率 30%, 注浆后堆石料的孔隙率为 20%, 扩散范围为 2.5 m×2.5 m, 可计算单米注浆量。采用分段自下而上注浆, 分段长为 5.0 m, 通过检查孔取芯、密度检测等手段综合评价注浆效果。

检查孔取芯见图 3, 整个堆石料的取芯率较低, 但芯样中的砂浆胶结分布均匀, 约占总取芯长度的 31%。

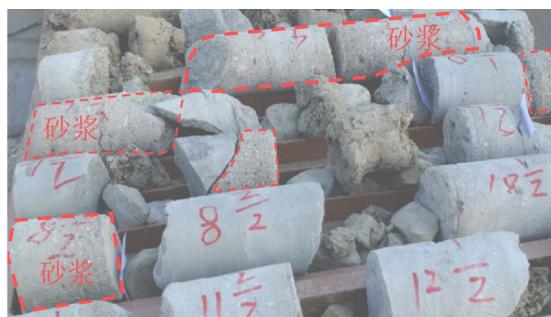


图 3 检查孔孔取芯照片

Fig. 3 Photo of inspection hole drilling core

在检查孔中采用南科院研制的 3019 型 γ -射线密度测井仪, 采用 Co-60 为 γ 射线源, 测量范围直径 1.2 m, 测量原位堆石料的密度和孔隙率。注浆后堆石料的孔隙率沿孔深的分布见图 4 所示, 注浆后堆石料整体均匀性较好, 孔隙率在 19.5%~20.8%, 随注浆的分

段长度不断来回跳动, 基本达到注浆可控的预期效果。

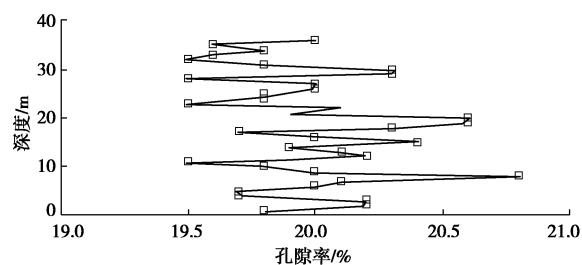


图 4 堆石孔隙率沿孔深的分布

Fig. 4 Distribution of porosity of rockfill along depth of hole

现场注浆试验表明, 自密实砂浆作为堆石料的注浆材料是可行的, 注浆扩散范围可控, 施工无需加压、技术简单; 注浆不仅减小了堆石料的孔隙率, 且使堆石料之间有一定程度的胶结作用。

2 注浆堆石料的力学试验

2.1 试验堆石料

为了分析注浆前后堆石料的力学特性, 本文开展了注浆堆石料的三轴剪切试验。堆石料取自该混凝土面板堆石坝主堆石料区, 以长石砂岩为主, 长石砂岩饱和抗压强度值为 40.2 MPa。现场坝料筛分试验结果及建议的平均线试验模拟级配见图 5。筛分试验表明, 堆石料粒径 30~300 mm 之间有一定程度的偏离设计级配包线, 且实测孔隙率不满足设计要求, 造成堆石料抵抗变形能力较差。现场堆石料邓肯模型模量系数 K 仅为原设计取值的 1/3, 表明颗粒级配不合格、密实度低是堆石料强度小及变形大的主要原因。

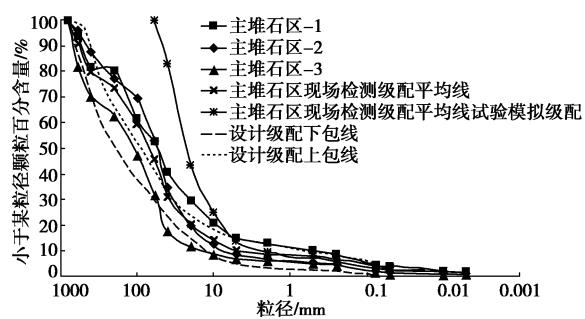


图 5 现场筛分试验结果及试验模拟级配

Fig. 5 Field screening test results and simulation gradation

2.2 三轴剪切试验过程

为了研究混凝土面板堆石坝主堆石料区的加固措施, 提高加固效果, 本次试验分别取实际筛分堆石料的上包线级配、平均线级配和下包线级配料分别制模, 然后进行注浆, 待浆液固化后进行大型三轴剪切试验, 研究不同级配情况下注浆对堆石力学特性的影响。试验料的级配先采用相似级配法 ($n=2$), 再采用等量替代法的混合法进行级配缩制; 上包线、平均线和下包

线 3 种不同级配条件下小于 5 mm 颗粒含量分别为 18.3%, 13.7%, 8.4%; 60~40 mm 的粗颗粒含量分别为 16.6%, 17.2%, 23.5%, 具体级配见表 2。试验按现场实测的孔隙率及干密度来制作试样, 而后注浆进行三轴剪切试验。堆石料试样的孔隙率取 30%, 干密度 1.94 t/m³。

表 2 不同级配制模料的各粒径质量百分比

Table 2 Mass percentages of particle sizes with different gradations

级配特征	60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	5~0 mm	(%)
上包线	16.6	35.6	16.4	13.1	18.3	
平均线	17.2	39.2	18.6	11.3	13.7	
下包线	23.5	48.3	12.8	6.9	8.4	

试验采用大型三轴仪, 试样尺寸均为 $\Phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 每个试样分 5 层, 按装样、振动压实、注浆固结三步进行。每层制样 3 个步骤的具体做法是: ①单层称料。先将单层的料称量好, 在铁盘中搅拌均匀, 装入制样桶, 保证试样制备的均匀。②机械振捣压实。将搅拌均匀的堆石装入制样筒后, 根据试样要求的干容重的大小控制振动时间, 通过控制单层堆石的高度来控制孔隙率和干密度。③堆石料注浆。对机械振捣后的堆石体注浆, 然后将流动性能良好的浆液从堆石体中心匀速浇入, 每层自密实净浆浇筑量占堆石体体积的 10%, 水泥砂浆配合比见表 3。每层重复单层称料装样、振动压实、注浆的过程, 直至 5 层全部灌注完毕, 试验过程见图 6, 养护 7 d 静置固结。

表 3 水泥砂浆配合比

Table 3 Mixing ratios of cement mortar

水胶比	外加剂掺量	坍落扩展度/mm	V 漏斗时间/s	7 d 抗压强度/MPa
1.15	1%	310	2.83	38.3



图 6 堆石控制性注浆试验过程

Fig 6 Rockfill controlled grouting test process

试样达到龄期后, 分别进行围压为 200, 300, 400, 600 kPa 条件下的静力大三轴剪切试验, 饱和方式采用水头饱和法, 试验过程记录轴向荷载、变形及排水量, 试验按《水电水利工程粗粒土试验规程》DL/T5356—

2006 的规定进行。

3 三轴剪切试验成果分析

3.1 注浆后堆石料的强度特性

各试样三轴试验破坏强度峰值见表 4。堆石料注浆后峰值强度显著提高, 在 200, 300, 400, 600 kPa 围压条件下注浆后平均线堆石料的峰值强度分别增加了 746, 804, 824, 793 kPa。峰值强度的增加值随围压的增加呈先增大而后减小的趋势, 但增加值相差不大, 这是由于堆石料颗粒之间形成一定程度的胶结, 结构自身强度增加, 围压对峰值强度的影响程度也相对有所减弱。各级配堆石料注浆后峰值强度对比可知, 下包线堆石料的峰值强度最大, 上包线堆石料的峰值强度最小; 表明粗颗粒含量越大, 堆石料的峰值强度越大, 粗颗粒骨架结构作用越明显。随着围压的增大, 由于高围压条件下粗颗粒发生破碎^[13], 各级配堆石料的峰值强度之间差值减小。

三轴试验得出的线性强度参数 c , φ 值和非线性强度参数 φ_0 , $\Delta\varphi$ 见表 5; 堆石料摩擦角 φ_0 随围压关系曲线见图 7。注浆后堆石料的参数 c , φ , φ_0 , $\Delta\varphi$ 值均有所提高; 注浆堆石料的线性参数 c 值增加了 184.1 kPa, 提高了 3.95 倍, 摩擦角 φ 值增加了 0.8°, 表明注浆后堆石颗粒之间形成一定程度的胶结结构, 显著提高了堆石料的黏聚力。注浆后非线性强度参数 φ_0 , $\Delta\varphi$ 均增加, 表明低围压条件下摩擦角增大, 随围压的增加, 摩擦角下降较快。

表 4 各试样三轴试验破坏强度峰值

Table 4 Peak values of failure strength in triaxial tests (kPa)

级配特性	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ /kPa				
	围压		围压		
	200 kPa	300 kPa	400 kPa	600 kPa	
未注浆	平均线	781	1082	1362	1902
	上包线	1271	1651	2021	2633
注浆后	平均线	1527	1886	2186	2695
	下包线	1973	2205	2546	2982

表 5 各级配堆石料注浆前后强度参数

Table 5 Strength parameters before and after grouting

级配特性	非线性指标		线性指标	
	φ_0 / (°)	$\Delta\varphi$ / (°)	c / kPa	φ / (°)
未注浆	43.9	7.8	62.4	35.6
	上包线	53.3	12.8	149.2
注浆后	平均线	57.8	18.1	246.5
	下包线	62.7	22.3	385.8

各级配堆石料注浆后, 下包线堆石料 c 值最大, φ 值最小; 上包线堆石料 c 值最小, φ 值最大。表明随着粗颗粒含量的增加, 线性参数 c 值有显著提高, φ 值反而有所降低; 粗颗粒含量越大, 堆石料的胶结

效果越好。

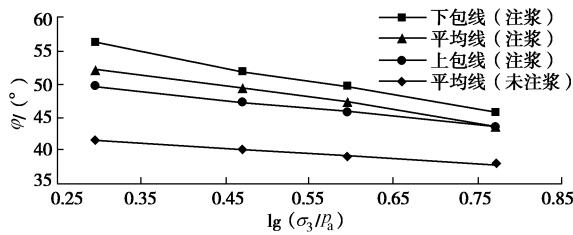


图 7 堆石料摩擦角(非线性指标)随围压关系曲线

Fig. 7 Curves of friction angle with confining pressure

3.2 注浆后堆石料的变形特性

堆石料注浆前后邓肯模型参数见表 6, 各堆石料 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系见图 8。注浆后平均线堆石料的模量系数 K 达到 1506, 较注浆前堆石料模量系数 208 增加了 7.24 倍, 注浆显著提高了堆石料抵抗变形的能力。注浆后上包线、平均线、下包线堆石料的模量系数 K 分别为 625, 1506, 3320, 表明粗颗粒含量越大, 注浆后粗骨料骨架作用越明显, 抵抗变形的能力越强。

表 6 各级配堆石料注浆前后邓肯模型参数表

Table 6 Duncan model parameters before and after grouting

级配特性	K	n	R_f	G	F	D
未注浆	平均线	208	0.39	0.67	0.22	0.13
	上包线	625	0.25	0.56	0.28	0.14
注浆后	平均线	1506	0.27	0.53	0.33	0.15
	下包线	3320	0.30	0.52	0.35	0.19
23.63						

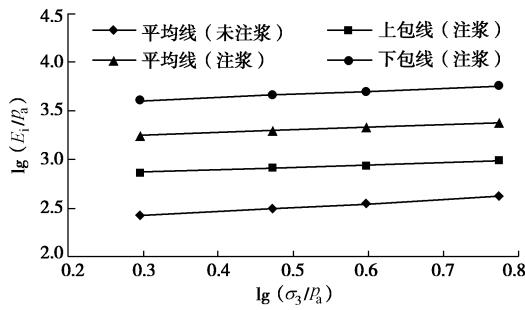


图 8 堆石料 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 8 Curves of E_i with confining pressure

堆石料(平均线)注浆前后三轴试验的应力应变关系曲线见图 9 所示。注浆前堆石料非线性特征明显, 表现为应变硬化型, 基本符合邓肯-张双曲线模型; 随着试验围压增大, 应力应变曲线的硬化特征越明显, 体缩变形也增大。而注浆后堆石料的应力应变曲线存在明显的峰值, 表现为应变软化型, 随着围压的增大, 峰值强度不断增大, 峰值强度对应的轴向应变也有小幅增加, 不同围压条件下峰值强度对应的轴向应变约为 2%~3%。随着轴向应变增加, 体积应变先表现为

剪缩现象, 峰值强度之后表现呈一定程度的剪胀现象; 随着围压的增大, 剪胀程度不断下降。

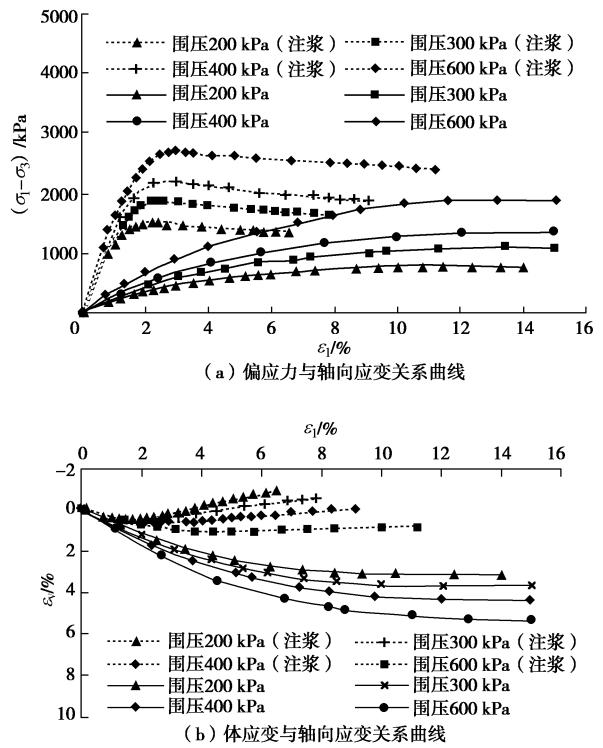


图 9 堆石料(平均线)注浆前后应力应变关系曲线

Fig. 9 Stress-strain curves before and after grouting of average graded rockfill

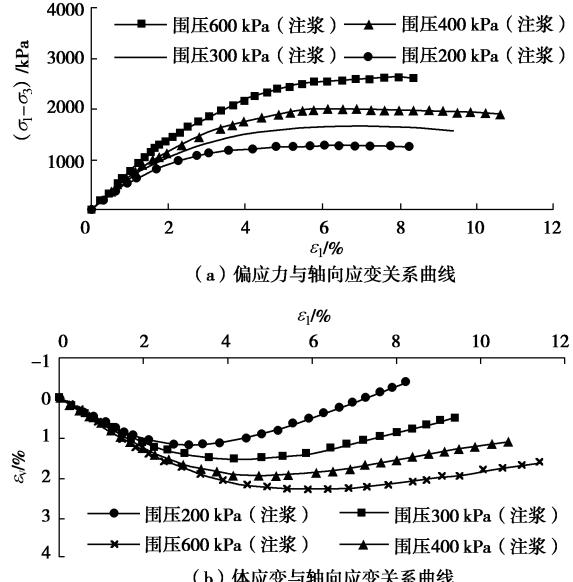


图 10 堆石料(上包线)级配注浆后应力应变关系曲线

Fig. 10 Stress-strain relationship curves of rockfill after grouting

堆石料上包线和下包线级配注浆后三轴试验的应力应变关系曲线见图 10, 11 所示。上包线级配堆石料注浆后的应力应变曲线呈应变硬化型; 平均线及下包线级配堆石料注浆后的应力应变曲线存在明显的峰值, 且应力峰值明显大于上包线值, 表现为典型的应

变软化关系, 且屈服后的应力应变基本呈线性关系。

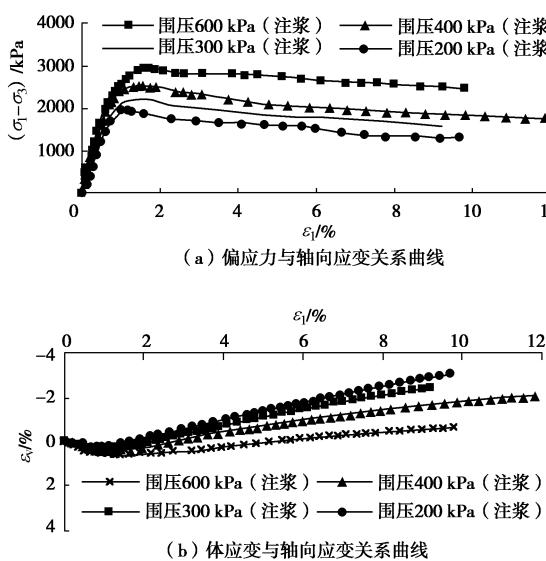


图 11 堆石料(下包线)级配注浆后应力应变关系曲线

Fig. 11 Stress-strain relationship curves of rockfill after grouting

注浆后各级配堆石料的剪缩、剪胀规律基本一致, 即随着轴向应变的增加, 先剪缩至屈服后开始剪胀, 且屈服后各堆石料的体应变与轴向应变基本呈线性关系。低围压条件下, 开始剪胀时对应的轴向应变小于峰值时的应变; 随着围压增大, 当围压为 600 kPa 时, 开始剪胀时对应的轴向应变大于峰值的应变, 表明高围压限制了堆石料的剪胀作用。

随着粗颗粒含量增加, 堆石料剪胀的机理有所不同。上包线细颗粒较多, 相应孔隙的等效孔径较小, 砂浆流动的通道较少, 注浆后以填充为主, 胶结结构的作用不明显, 当围压低、剪应力小, 试样以颗粒之间滑移为主, 产生剪胀变形, 应力应变曲线仍然表现为压硬性特征。而平均线及下包线的粗颗粒含量较多, 堆石料以粗骨料为骨架, 粗骨料之间孔隙的等效孔径较大, 砂浆流动的通道较多, 注浆后颗粒之间有一定黏结强度, 形成相对稳定的胶结结构, 颗粒之间滑移、错动相对困难, 以塑性剪切变形为主, 故应力应变曲线呈典型的应变软化特征。

4 结 论

本文开展了堆石料现场注浆试验, 注浆提高了堆石料的密实度及颗粒之间的胶结程度, 且能保持一定的孔隙率; 注浆施工技术简单, 注浆范围可控。并通过室内三轴剪切试验研究对比分析了注浆前后堆石料的力学特性, 得出以下 3 点结论。

(1) 注浆后堆石料的黏聚力显著提高, 摩擦角变化不大, 表明堆石颗粒之间形成一定程度的胶结结构。注浆后堆石料的模量系数显著增大, 极大提高了堆石

料抵抗变形的能力。

(2) 注浆后堆石料的应力应变曲线特征与颗粒级配有关, 平均线及下包线级配堆石料的应力应变曲线存在明显的峰值, 表现为应变软化型。各级配堆石料的剪缩、剪胀规律基本一致, 即随着轴向应变增加, 先剪缩至屈服后开始剪胀。

(3) 从各级配堆石料注浆后的强度、变形特征分析来看, 粗颗粒的含量越高, 粗骨料骨架作用越显著, 注浆后越能形成相对稳定的胶结结构; 堆石料的胶结效果越好, 凝聚力和模量系数也越大; 注浆堆石料胶结后颗粒之间滑移、错动相对困难, 以塑性滑移为主, 故应力应变曲线呈典型的应变软化特征。

上述研究表明, 注浆显著改善了堆石料的力学特性, 粗颗粒含量越大, 形成胶结结构的承载力越大。因此, 对于高面板堆石坝的变形控制或以粗粒料为填筑料的病坝加固处理, 堆石料控制注浆技术是一种有效手段。

参 考 文 献:

- [1] 凌 华, 傅 华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 12 - 16. (LING Hua, FU Hua, HAN Hua-qiang. Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 12 - 16. (in Chinese))
- [2] 蔡正银, 李小梅, 韩 林, 等. 考虑级配和颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, HAN Lin, et al. Critical state of rockfill materials considering particle gradation and breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (in Chinese))
- [3] 徐泽平, 邓 刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. 水利学报, 2018, 39(10): 1226 - 1234. (XU Ze-ping, DENG Gang. Development of high CFRD and key technologies for building super-high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 39(10): 1226 - 1234. (in Chinese))
- [4] 徐泽平, 邓 刚. 300 m 级高混凝土面板堆石坝应力变形特性研究[C]// 高面板堆石坝安全性研究及软岩筑坝技术进展. 南京, 2014. (XU Ze-ping, DENG Gang. Study on stress and deformation characteristics of 300m high concrete face rockfill dam[C]// Safety Study of High Face Rockfill Dam and Progress of Soft Rock Dam Construction Technology. Nanjing, 2014. (in Chinese))
- [5] 钮新强. 高面板堆石坝安全与思考[J]. 水力发电学报, 2017,

- 36(1): 104 - 111. (NIU Xin-qiang. Security of high concrete face rockfill dam consideration and conclusion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1): 104 - 111. (in Chinese))
- [6] 蔡新, 杨杰, 郭兴文, 等. 胶凝砂砾石料弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1569 - 1577. (CAI Xin, YANG Jie, GUO Xing-wen, et al. Elastoplastic constitutive model for cement-sand-gravel material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1569 - 1577. (in Chinese))
- [7] 张凤德, 李秀文, 彭云枫, 等. 胶凝砂砾石坝防渗措施及应力分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 194 - 200. (ZHANG Fengde, LI Xiu-wen, PENG Yun-feng, et al. Analysis of stress and seepage control measures in the Cement sand gravel dam[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(3): 194 - 200. (in Chinese))
- [8] 王志, 李龙, 王朝雅. 含裂隙类岩石注浆加固后破坏试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 957 - 963. (WANG Zhi, LI Long, WANG Chao-ya. Experimental study on failure of cracked rock-like material after grouting reinforcement[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(4): 957 - 963. (in Chinese))
- [9] 周茗如, 陈志超, 罗小博, 等. 湿陷性黄土中水泥浆液注浆加固机理[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(6): 65 - 70. (ZHOU Ming-ru, CHEN Zhi-chao, LUO Xiao-bo. Reinforcement mechanism of cement slurry grouting in collapsible loess[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(6): 65 - 70. (in Chinese))
- [10] 唐欣薇, 石建军, 张志恒, 等. 自密实堆石混凝土力学性能的细观仿真与试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(增刊2). (TANG Xin-wei, SHI Jian-jin, ZHANG Zhi-heng, et al. Meso-scale simulation and experimental study on self-compacted rock-fill concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(S2). (in Chinese))
- [11] BENABED B, KADRI E H, AZZOUZ L, et al. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand[J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(10): 1167 - 1173.
- [12] 刘杰, 谢定松. 我国土石坝渗流控制理论发展现状[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 714 - 718. (LIU Jie, XIE Ding-song. Development status of seepage control theory for earth-rock dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 714 - 718. (in Chinese))
- [13] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 堆石料的临界状态与考虑颗粒破碎的本构模型[J]. 岩土力学, 2011(增刊2): 148 - 154. (LIU En-long, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying. Critical state of rockfill materials and a constitutive model considering grain crushing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(S2): 148 - 154. (in Chinese))