

水泥灌浆胶结砂砾石抗剪特性试验研究

田巍巍, 努尔哈斯木·穆哈买提汗, 李文涛, 李青山

(新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:为提高新疆卡拉贝利水利枢纽工程坝体砂砾石的抗震稳定性,通过建立与原大坝施工参数一致的实体模型试验区,采用水泥灌浆的方式形成胶结砂砾石,并对其进行室内抗剪特性试验研究。研究表明:试验区砂砾石料在碾压完成后,能够形成“密实-骨架”结构;水泥灌浆后砂砾石的内摩擦角和黏聚力皆有很大提高;胶结物强度、胶结物与砾石的黏结强度、上部施加的法向应力对水泥灌浆胶结砂砾石的抗剪强度起主要作用;水泥灌浆胶结砂砾石的破坏是其在剪切应力作用下内部微裂隙逐步发展成贯通裂隙的结果;由于颗粒间的咬合作用及剪胀效应,水泥灌浆胶结砂砾石的残余黏聚力下降不明显。

关键词:水泥灌浆胶结砂砾石;抗剪特性;剪胀效应;抗震加固;水泥灌浆

中图分类号:TV41;TV223.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0060-06

Experimental study on shear characteristics of cement grouting cemented sand gravel//TIAN Weiwei, NURHASMU · Muhammadihan, LI Wentao, LI Qingshan (*Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Co., Ltd., Urumqi 830091, China*)

Abstract: In order to enhance the seismic stability of sand and gravel in the dam body of the Karabelli Water Conservancy Hub Project in Xinjiang, the prototype model test area was established based on the construction parameters of the original dam. The cemented sand and gravel were formed by cement grouting, and indoor shear characteristics of cement cemented sand and gravel were studied. The results show that the sand and gravel material form a “dense-skeleton” structure after rolling. By cement grouting, the shear parameters such as internal friction angle and cohesion are greatly improved. The strength of cement, the bond strength between cement and gravel, and the normal stress play a major role in the shear strength of cemented sand and gravel. Under shear stress, the internal micro cracks gradually develop into penetrating cracks, causing the failure of cement cemented sand and gravel. Due to the interlocking effect and shear dilatancy effect between particles, the residual cohesion of cement grouting cemented sand gravel does not significantly decrease.

Key words: cement grouting cemented sand gravel; shear characteristics; shear dilatancy effect; aseismic strengthening; cement grouting

砂砾石作为筑坝材料,在新疆碾压式土石坝应用较为普遍,但是砂砾石属于散粒体,抗剪强度远低于混凝土,并且表现出较高的离散性,使得坝体填筑层抗剪强度成为影响坝体稳定的关键因素^[1]。在砂砾石和混凝土之间存在一种人工胶结填筑材料,随着胶凝颗粒料筑坝技术的发展,这种新型材料得到了实践应用,目前我国已有山西守口堡水库胶结砂砾石坝、四川金鸡沟胶结坝、贵州西江水库胶结砂砾石坝等实践案例。

目前对水泥灌浆胶结砂砾石的研究主要集中于胶凝砂砾石(CSG)坝填筑材料应用及其力学行为分析。贾保振等^[1-2]对CSG进行了抗剪强度试验研究,得到了抗剪强度参数均满足大坝稳定要求的结

论;贾金生等^[3-4]对CSG围堰堰体的应力、稳定性、渗流和渗透溶蚀性能进行了研究,得到CSG特性参数要求的结论;尚延杰^[5]对沙坪一级水电站胶结砂筑坝进行研究,认为CSG可以节省成本和便于施工;冯炜等^[6]对三峡工程大坝的混凝土界面强度进行研究,发现通过优化配合比改善混凝土细观界面强度,使界面强度更加接近砂浆本体的强度,可提高混凝土的宏观力学性能;樊海柱^[7]通过室内剪切试验对西域砾岩的力学性质进行研究,得到了砾岩抗剪强度参数及应力与位移的相关性;Wu等^[8]对硬质填料的应力应变行为进行了研究,发现其强度和应力-应变关系表现为摩擦机制和黏聚机制。此外,冯炜等^[9-13]对CSG进行了抗压强度、抗折强度、加

卸载试验以及三轴剪切试验等,研究了 CSG 强度及应力应变的特性;王建有等^[14-15] 利用 Abaqus 与 Ansys 有限元分析软件对胶结砂砾石大坝的应力稳定性进行了模拟分析;明宇等^[16] 通过动三轴试验研究了 CSG 料的动力特性,认为 CSG 料的动应力及动应变受围压的影响较大。CSG 作为筑坝材料和筑坝技术已经有了相当成熟的研究,它主要是在前期和施工期应用,在大坝运行时能否作为大坝除险、抗震加固等措施应用,相关研究还很少。

新疆卡拉贝利水利枢纽工程原设计大坝为混凝土面板砂砾石坝,最大坝高 92.5 m,坝顶宽度为 12 m。大坝采用 50 年超越概率 2% 的地震动参数值进行设计,相应基岩地震动峰值加速度为 3.75 m/s²,采用 100 年超越概率 2% 的地震动参数值对大坝变形进行复核,相应基岩地震动峰值加速度为 4.24 m/s²^[17]。2012 年,邓铭江等^[18] 对卡拉贝利水利枢纽工程地震安全评价及抗震结构设计进行了研究,提出大坝抗震安全措施;2016 年,邓理想^[19] 结合抗震措施对卡拉贝利水利枢纽工程大坝进行抗震性能计算分析,认为混凝土面板砂砾石坝在技术上是可行的。但是随着 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》的实施,工程场址地震基本烈度提高为Ⅸ度,因此该工程原设计大坝不能够满足现有地震安全性评价的要求,需对大坝一定高程范围的上部坝体及一定深度范围的下游坝坡进行加固处理。目前参照 CSG 筑坝技术的研究思路,为提高新疆卡拉贝利水利枢纽工程坝体砂砾石的抗震稳定性,通过建立与原大坝施工参数一致的实体模型试验区,采用水泥灌浆的方式形成胶结砂砾石进而进行室内抗剪特性试验研究。该试验研究主要解决了新疆卡拉贝利水利枢纽工程大坝抗震稳定性问题,为大坝抗震加固设计提供理论支撑,同时将为今后碾压式土石坝抗震加固处理提供重要参考。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料来源与试样制备

为了解水泥灌浆胶结砂砾石的抗剪特性,建立

与原大坝碾压施工参数一致的试验区。试验区利用原大坝坝填材料进行现场分层填筑,然后在试验区进行水泥灌浆处理,孔位布置见图 1。在现场灌浆效果较好的套阀管法灌浆区(T4-1)制取试样进行室内抗剪强度特性试验研究。

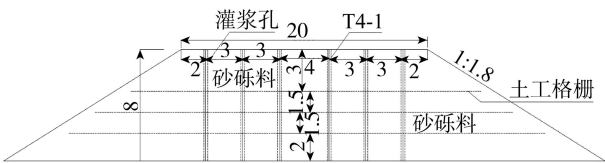


图 1 试验区孔位布置(单位:m)

套阀管法灌浆自下而上逐段注浆,采用普通硅酸盐水泥 P·O42.5 作为灌浆原材料,孔径为 127 mm,起始浆液水灰比为 3:1,终止浆液水灰比为 1:1~3:1,实际灌浆压力在 0.19~0.51 MPa 之间,具体灌浆工艺参数见表 1。灌浆 14 d 后,在灌浆影响范围大于 500 mm 的水泥灌浆胶结砂砾石体内,从胶结较薄弱的位置自上而下制取试样。制样方法近似于土样削环刀法,采用内径为 300 mm 较厚管壁的 PE 管,人工向下开挖的同时将 PE 管向下推进,使得胶结砂砾石逐步装入 PE 管内,取样高度不小于 300 mm。制样完毕后,将筒内缝隙用砂和泡沫塑料等填充,试验筒两头用薄钢板封口,并用螺纹钢连接,确保试样固定在试桶内。每组试样制取 5 块质地均匀的试件(4 块试验用,1 块备用),如图 2 所示。



(a) 封装试桶 (b) 胶结砂砾石原状样

图 2 胶结砂砾石取样与封装

为适应试验仪器尺寸要求,拟制备直径为 300 mm 的样品,成品试样实际直径为 290 mm。由于

表 1 套阀管法灌浆实测工艺参数

段次	灌浆孔段/m			孔径/mm	水灰比		水泥用量		灌浆压力/MPa	灌浆时间/min
	起	止	段长		起始	终止	注浆量/L	注灰量/kg		
1	7	8	1	127	3:1	1:1	3 482.70	1 838.48	0.51	105
2	6	7	1	127	3:1	3:1	515.85	155.35	0.51	55
3	5	6	1	127	3:1	2:1	1 314.55	439.67	0.31	70
4	4	5	1	127	3:1	2:1	125.70	39.80	0.30	35
5	3	4	1	127	3:1	1:1	2 212.10	877.30	0.29	85
6	2	3	1	127	3:1	2:1	461.00	158.21	0.31	50
7	1	2	1	127	3:1	3:1	259.35	78.10	0.20	40
8	0	1	1	127	3:1	3:1	497.85	149.93	0.19	55

试样极不规则,难以进行抗剪强度试验,因此在抗剪强度试验前对试样进行二次制模,以满足剪切容器的要求。采用1:2灰砂比配制水泥砂浆,将试样浇筑成 $\varnothing 290\text{ mm}\times 320\text{ mm}$ 圆柱体,使得胶结砂砾石体包裹在砂浆内部中央,并在试样中间位置预留2.5 cm宽剪切缝,在拆模后保证试样中间露出剪切缝。剪切缝上、下部分砂浆包裹体分两次成型完成,中间使用细沙或者粉土作为垫层,浇筑完成后养护7 d,最后使用高压水枪冲洗掉粉土垫层,制作完成的试样见图3。



(a) 浇筑成型后的试样 (b) 预留剪切缝

图3 胶结砂砾石试样

1.2 试验仪器与试验方法

试验仪器采用四川大学华西岩土仪器研究所研制的粗粒土剪切仪,试验过程中自动采集数据。试样在干燥状态下装入剪力仪,根据试样截面的大小预先设定法向压力,剪损后测量实际断面面积,反算施加的法向应力。为了更好地观察试样应力和变形的关系,试验控制最大位移在30 mm左右。当剪应力达到稳定或者显著后退时,停止试验。在试验过程中将预留的剪切缝放置在剪切盒中间,使剪切面

在剪切缝处发生破坏,确保能够准确获得水泥胶结砂石抗剪强度参数。

对剪损后的试件断面进行拍照,利用 AutoCAD 统计断面面积。基于4个试样在不同法向应力下的抗剪强度极限值,利用最小二乘法原理拟合出抗剪强度线性回归方程。为了方便快捷地处理数据,应用 Excel 自带程序快速生成线性回归方程和图表,以得到水泥灌浆胶结砂砾石的抗剪强度参数。

2 填筑料颗粒分析及物理力学性质

为了更好地模拟坝体实际状况,对试验区填筑料进行颗粒分析,以满足设计所要求粒径级配。采用筛分法进行颗粒分析,5 mm 及以上的粒径筛分在室外进行,筛分粒径分别为100、60、40、20、10、5 mm,其中大于100 mm的粒石直接量测筛分,5 mm以下的土样待取样后在室内进行颗粒分析。试验区砂砾石料的颗粒级配结果见表2,不均匀系数 C_u 为117.6~142.4,曲率系数 C_c 为3.3~6.2,有效粒径 d_{10} 在0.34~0.37 mm之间,将试验区砂砾石料定名为卵石混合土(SICb)。

模型试验区分层碾压完成后,对各层指标进行取样试验,结果见表3。由表3可知,填筑后干密度为2.31~2.37 g/cm³,含水率为0.71%~1.67%,相对密度为0.85~0.92,满足设计要求。砂砾石料直剪试验干燥状态下内摩擦角为42.0°~43.5°,黏聚力为6.00~15.0 kPa,渗透系数为3.4×10⁻³~3.6×10⁻² cm/s。另外,由表2可知,3个样品大于5 mm砾石占比均值为75.7%,因此试验区碾压过后砂砾

表2 砂砾石料颗粒级配结果

编号	不同粒径组成所对应质量分数/%										d_{10}/mm	C_u	C_c
	300 mm	200 ~ 300 mm	60 ~ 200 mm	20 ~ 60 mm	5 ~ 20 mm	2 ~ 5 mm	0.5 ~ 2 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.075 ~ 0.25 mm	<0.075 mm			
TK1	0.0	7.4	27.4	23.3	17.6	5.6	6.2	5.1	4.2	3.2	0.37	127.0	4.4
TK2	0.0	8.5	26.4	23.4	19.6	4.5	3.4	6.9	5.0	2.3	0.33	142.4	6.2
TK3	1.6	3.0	26.1	23.3	19.6	7.8	5.2	5.6	3.8	4.0	0.34	117.6	3.3

表3 试验区碾压后砂砾石料物理力学性质指标

试样编号	湿密度/ (g/cm ³)	含水率/%	干密度/ (g/cm ³)	最小干密度/ (g/cm ³)	最大干密度/ (g/cm ³)	相对密度	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/ (cm/s)
D1-1	2.38	0.95	2.36	1.96	2.42	0.89	8.00	42.5	1.9×10 ⁻²
D2-1	2.36	0.71	2.34	1.94	2.38	0.92	6.00	42.0	3.6×10 ⁻²
D3-1	2.38	1.38	2.35	1.95	2.41	0.89	12.00	42.0	2.3×10 ⁻²
D4-1	2.39	1.46	2.36	1.96	2.44	0.86	8.50	42.5	9.6×10 ⁻³
D5-1	2.40	1.20	2.37	1.96	2.44	0.88	9.00	43.0	8.8×10 ⁻³
D6-1	2.34	1.42	2.31	1.94	2.39	0.85	6.50	40.0	3.2×10 ⁻²
D7-1	2.40	1.06	2.37	1.97	2.44	0.88	10.00	43.5	6.8×10 ⁻³
D8-1	2.40	1.22	2.37	1.97	2.45	0.86	12.50	42.5	5.8×10 ⁻³
D9-1	2.40	1.25	2.37	1.95	2.43	0.90	15.00	42.5	3.4×10 ⁻³
D10-1	2.39	1.67	2.35	1.96	2.42	0.87	7.00	42.0	2.0×10 ⁻²
D11-1	2.41	1.62	2.37	1.97	2.45	0.86	11.50	43.0	5.6×10 ⁻³

石料可以形成骨架作用,且细颗粒能够较好地填充骨架内,形成“密实-骨架”结构^[20-21]。

3 水泥灌浆胶结砂砾石抗剪强度试验结果与分析

3.1 胶结砂砾石物理性质

抗剪强度试验前,对不同深度的两组试样进行物理性质指标检验。由水泥灌浆胶结砂砾石物理性质指标试验结果(表4)可知,灌浆后水泥灌浆胶结砂砾石的干密度在2.44~2.51 g/cm³之间,明显高于原大坝填筑密度。在2.6 m和5.7 m深度处所制取试样的密度几乎一致,可见在两层砂砾石内灌浆效果较为一致。

表4 水泥灌浆胶结砂砾石物理性质指标试验结果

试样编号	取样深度/m	干密度/(g/cm ³)	平均值/(g/cm ³)
T4-1-1	5.7	2.45	2.46
T4-1-2	5.7	2.44	2.46
T4-1-3	5.7	2.47	2.46
T4-1-4	5.7	2.44	2.46
T4-2-1	2.6	2.47	2.46
T4-2-2	2.6	2.47	2.46
T4-2-3	2.6	2.45	2.46
T4-2-4	2.6	2.51	2.46

3.2 法向应力与抗剪强度关系

在不同法向应力下对两组试样进行抗剪强度试验,得到了不同的抗剪强度试验结果,见表5。由试验结果可知,抗剪强度随着法向应力的增大而增大,且两者相关系数 R^2 为0.98,可见抗剪强度与法向应力具有很强的相关性,试验结果可靠性高。残余强度随着法向应力的增大也表现出增大的趋势,但是残余强度与峰值强度的差值逐步扩大。表6为两组试样峰值强度和残余强度的对比。由表6可知,水泥灌浆后胶结砂砾石抗剪强度明显高于水泥灌浆处理前的抗剪强度,尤其是黏聚力提高很大。对比峰值强度,破坏后的水泥灌浆胶结砂砾石残余内摩擦角下降较为明显,而残余黏聚力的衰减则不明显,仍保持较高的水平。

表5 试验区胶结砂砾石抗剪强度试验结果

试样编号	取样深度/m	法向应力/kPa	抗剪强度/kPa
T4-1-1	5.7	336.16	793.62
T4-1-2	5.7	780.00	1185.00
T4-1-3	5.7	944.51	1578.19
T4-1-4	5.7	1480.57	2190.95
T4-2-1	2.6	322.38	875.04
T4-2-2	2.6	793.58	1417.10
T4-2-3	2.6	517.92	1141.38
T4-2-4	2.6	968.77	1801.14

为了更好地分析试样破坏的情况,将试验完毕的试样打开观测。在剪损后发现试样上部破坏断面

表6 试验区胶结砂砾石峰值强度与残余强度的对比

取样深度/m	峰值强度		残余强度	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
2.6	421.70	53.5	355.81	34.0
5.7	331.77	51.5	255.46	29.5

凹凸不平,下部剪切面较为破碎,有些呈现出锯齿状破坏面,如图4所示。下部试样在切向应力下,粗颗粒滚动挤压导致水泥胶结物出现粉碎和断裂的现象,但除少量片状或者软弱的颗粒被剪断外,剪切破坏多发生在胶结物、胶结物和粗颗粒黏结面处,粗颗粒未发现剪损,这也是黏聚力得到较大提高的原因。



(a) 剪切面上部 (b) 剪切面下部

图4 剪切后试样情况

由此推断,胶结砂砾石在剪切过程中,抗剪强度主要受胶结物强度、砾石与胶结物间的黏结强度以及法向应力的影响。水平应力在达到一定程度后,剪切面附近砂浆胶结体开始出现微裂纹,随着水平应力的增长,微裂纹逐步扩大,在达到峰值强度后,试样内部出现贯通裂隙,抗剪强度发生缓慢下降甚至平缓波动,此时试样内部胶结物与粗粒黏结处发生破坏,颗粒间发生挤压错动,贯通裂隙继续扩张。随着抗剪强度下降速度的增大,在法向应力作用下试样内部应力重分布,此时抵御水平应力的抗剪强度主要为粗颗粒间的摩擦力,同时剪切面中薄弱的颗粒被挤压成棱角状颗粒,使残余强度稳定在某一水平上。

受到试样内部粗颗粒的影响,剪切破坏的过程还存在着剪胀效应,该效应主要表现在剪应力达到峰值前,在较低法向应力下贯通的破裂面开度会变得更大,另外,破坏后粗颗粒间水平挤压错动也会产生剪胀效应。由于剪切面附近剪损后粗颗粒间的错动咬合作用以及剪胀效应的发生使得试样残余黏聚力仍然保持着较高的水平。

3.3 剪应力与位移关系

为了更好地分析抗剪强度与剪切变形的关系,绘制典型的剪应力与位移关系曲线如图5所示。在不同的法向应力作用下,剪应力-位移曲线走势基本相同。在起始阶段,曲线走势较为平缓,此时剪应力主要表现为消除仪器设备的影响;随着位移的持续增加,剪应力出现快速的上升,剪应力与位移呈近似

线性关系,此时剪切过程处于弹性阶段;在接近峰值之前,增长趋势有所缓和,直至达到峰值后胶结砂砾石体进入塑性变形阶段。在塑性变形起始阶段短暂出现较为平缓的曲线,随着位移的增加,剪应力先是快速下降,而后缓慢降低至一定稳定水平,此时胶结砂砾石的抗剪强度为残余强度。

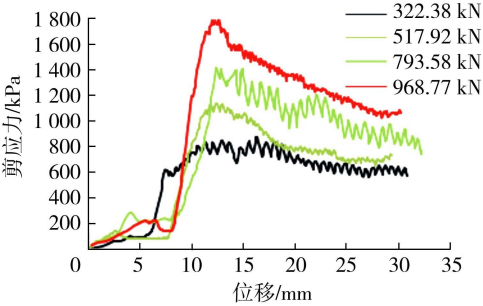


图5 不同法向应力作用下剪应力-位移曲线

出现这种情况主要是由于水泥灌浆胶结砂砾石粒径大小不一,粒径的咬合能力存在差异,在剪损时试样不是突然整体破坏,而是胶结薄弱的位置首先发生断裂,进而发展到水泥胶结物与砂砾石界面发生破坏,坚硬的砂砾石在剪应力作用下发生错动、咬合,使得剪应力出现平缓的趋势。本文的水泥灌浆胶结砂砾石抗剪特性试验结果和吴平安^[13]对CSG材料应力与应变关系分析结果一致。

4 讨论

a. CSG筑坝技术是在碾压混凝土筑坝技术和面板堆石筑坝技术上发展起来的新型筑坝技术^[22],《胶结颗粒料筑坝技术导则》中将CSG定义为“利用胶凝材料和砂砾石料,经拌和、摊铺、振动碾压形成的具有一定强度和抗剪性能的材料”,可以看出CSG技术是将胶凝材料与砂石相结合应用到大坝填筑的一项新技术,它在施工工艺上与本文研究的水泥灌浆胶结砂砾石加固应用技术有一定的区别。卡拉贝利水利枢纽工程拟处理坝体利用灌浆技术等将水泥浆压入砂砾石坝中,水泥浆液在砂砾石孔隙中扩散形成胶结物,从而显著提升大坝建筑物的强度和抗剪性能。水泥灌浆胶结砂砾石加固应用技术是对CSG技术的延伸和发展,为坝体施工完成后或者后期加固处理时所应用的一项新技术,目前所进行的研究尚处于初始阶段。

b. 硬化后水泥灌浆胶结砂砾石体强度提升的效果如何还与坝体灌浆效果及胶结程度有关。本文研究是在理想状态下对大坝进行抗震加固,未考虑灌浆效果和胶结程度的影响。今后将考虑灌浆效果和胶结程度对抗剪性能影响的研究,并对水泥灌浆胶结砂砾石动、静三轴压缩剪切破坏机理等进行深

入研究,以便更好地完善水泥灌浆胶结砂砾石加固应用技术。

5 结论

a. 试验区碾压后,在砂砾石料自身级配下坝体呈“密实-骨架”结构。经水泥灌浆后胶结砂砾石体的密度高于原大坝填筑密度,抗剪强度参数尤其是黏聚力比原坝体得到了明显的提高。

b. 法向应力与抗剪强度呈正相关关系,随着法向应力的增大,峰值强度与残余强度的差值逐步扩大。水泥灌浆胶结砂砾石的破坏是在剪切应力的作用下,内部微裂隙逐步发展成贯通裂隙的结果。由于剪损后颗粒间的咬合作用及剪胀效应的出现,水泥灌浆胶结砂砾石的残黏聚力下降不明显,仍保持较高的水平。

c. 从试验过程来看,胶结物强度、胶结物与砾石的黏结强度、上部施加的法向应力等对灌浆后胶结砂砾石抗剪特性影响较大。因此提高水泥胶结物强度及其与砂砾石的黏结强度,才能保证胶结砂砾石有更好的抗剪特性。

参考文献:

[1] 贾保振,贾金生,郑瑾莹,等. 胶结坝胶结砂砾石层面原位剪切试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20 (3): 244-250. (JIA Baozhen, JIA Jinsheng, ZHENG Cuiying, et al. Experimental study of in-situ shear of cemented sand and gravel rocks layers[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(3): 244-250. (in Chinese))

[2] 王莎,贾金生,任权,等. 胶凝砂砾石层面抗剪参数试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17 (1): 32-38. (WANG Sha, JIA Jinsheng, REN Quan, et al. Experimental study of shear parameters of CSGR layers [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17 (1): 32-38. (in Chinese))

[3] 贾金生,马锋玲,李新宇,等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37 (5): 578-582. (JIA Jinsheng, MA Fengling, LI Xinyu, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 578-582. (in Chinese))

[4] 王晓强. 胶凝砂砾石坝材料的渗透溶蚀研究及工程应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2005.

[5] 尚延杰. 胶结砂砾石筑坝技术在沙坪一级水电站中的应用[J]. 人民长江, 2022, 53 (增刊1): 73-75. (SHANG Yanjie. Application of cemented gravel dam construction technology in shaping I hydropower station [J]. Yangtze

- River,2022,53(Sup1):73-75. (in Chinese))
- [6] 冯炜,贾金生,陈改新,等. 大坝混凝土界面力学性能的测试与数值模拟研究[J]. 水利水电技术,2012,43(2):30-34. (FENG Wei, JIA Jinsheng, CHEN Gaixin, et al. Testing and numerical simulation on mechanical properties of dam concrete interface[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(2):30-34. (in Chinese))
- [7] 樊海柱. 西域砾岩结构特性及力学特性的试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [8] WU Mengxi, DU Bin, YAO Yuancheng, et al. An experimental study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material[J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 54(11):2015-2024.
- [9] 冯炜. 胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2013.
- [10] 蔡新,谢昕卓,杨杰. 胶凝砂砾石料剪胀特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):122-129. (CAI Xin, XIE Xinzhuo, YANG Jie. Experimental study on shear dilatancy characteristics of CSG[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2):122-129. (in Chinese))
- [11] 蔡新,江敏敏,单延功,等. 胶结砂砾石料三轴卸载—再加载力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊2):190-195. (CAI Xin, JIANG Minmin, SHAN Yangong, et al. Mechanical behaviors of cemented sand and gravel materials based on triaxial tests during unloading and reloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup2):190-195. (in Chinese))
- [12] 蔡新,武颖利,李洪焯,等. 胶凝堆石料本构特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1340-1344. (CAI Xin, WU Yingli, LI Hongxuan, et al. Constitutive equation for CSG materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9):1340-1344. (in Chinese))
- [13] 吴平安. 胶凝砂砾石材料力学性能试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2015.
- [14] 王建有,王朝菲,李曙光. 基于风化料的胶结砂砾石料力学性能研究与工程应用[J]. 中国农村水利水电,2021(8):207-211. (WANG Jianyou, WNAG Zhaoifei, LI Shuguang. Research on the mechanical properties of the cemented sand and gravel based on weathered materials and its application[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(8):207-211. (in Chinese))
- [15] 李永新,何蕴龙,乐治济. 胶结砂砾石坝应力与稳定有限元分析[J]. 中国农村水利水电,2005(7):35-38. (LI Yongxin, HE Yunlong, YUE Zhiji. Analysis of the stress and finite element stability for the cemented sand & gravel dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(7):35-38. (in Chinese))
- [16] 明宇,蔡新,郭兴文,等. 胶凝砂砾石料动力特性试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):49-52. (MING Yu, CAI Xin, GUO Xingwen, et al. Dynamic characteristic test on cemented sand and gravel material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1):49-52. (in Chinese))
- [17] 付建刚. 强震区砂砾石面板堆石坝填筑施工技术[C]//土石坝技术2016年论文集. 北京:中国电力出版社,2016:157-160.
- [18] 邓铭江,韩民,陆鸣,等. 卡拉贝利水利枢纽地震安全评价及大坝抗震结构设计[J]. 水利水电技术,2012,43(9):59-64. (DENG Mingjiang, HAN Min, LU Ming, et al. Seismic safety assessment and seismic structural design of dam for Kalabeily water control project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(9):59-64. (in Chinese))
- [19] 邓理想. 卡拉贝利水利枢纽工程混凝土面板砂砾石坝抗震设计[J]. 水利水电技术,2016,47(3):47-49. (DENG Lixiang. Seismic design of concrete face sand gravel dam for Kalabeili water control project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(3):47-49. (in Chinese))
- [20] 刘杰,张雄. 答蒋彭年先生[J]. 岩土工程学报,1997,19(5):113-114. (LIU Jie, ZHANG Xiong. Answer to Mr. JIANG Pengnian[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5):113-114. (in Chinese))
- [21] 王龙,马松林,徐德兴,等. 土石混合料的结构分类[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2000,33(6):129-132. (WANG Long, MA Songlin, XU Dexing, et al. The constructive classification of the soil-aggregate mixture[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(6):129-132. (in Chinese))
- [22] 郑昌坝.《胶结颗粒料筑坝技术导则》之胶凝砂砾石筑坝技术要点解读[J]. 浙江水利科技,2016,44(3):58-60. (ZHENG Changba. Interpreting key points of cement sand gravel dam technology in “technical guideline for cemented granular material dams”[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2016, 44(3):58-60. (in Chinese))

(收稿日期:2022-11-12 编辑:骆超)