

高流动性及水下抗分散改性砂浆研究

周建华^{1,2}, 赵卫全^{1,2}, 赵明华^{3,4}, 路威^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 北京中水科工程集团有限公司, 北京 100044;

3. 中国水电基础局有限公司, 天津 301700;

4. 天津市地基与基础工程企业重点实验室, 天津 301700)

摘要: 堰塞体通常具有组成成分复杂、结构松散、稳定性差、抗渗性能弱等特点,特别是位于水下部分的岩塞体,其防渗加固处理材料及工艺还不完善。针对堰塞体改良处理需求,以改性砂浆流动性为控制标准,开展正交试验,优选出三组具有不同流动性和水下抗分散性的砂浆配合比,根据室内试验结果,定量评价了各配合比水下抗分散性、力学强度及防渗性能。通过开展室内模型试验,研究了改性砂浆对于水下砂砾石的灌浆工艺及固结效果,检验了改性砂浆对于堰塞体改良处理的适用性和有效性,可为类似工程处理提供借鉴和参考。

关键词: 堰塞体; 防渗加固; 改性砂浆; 正交试验; 高流动性

中图分类号: TV432

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)05—0068—06

Modified Cement Mortar with High Fluidity and Underwater Anti-dispersion

ZHOU Jianhua^{1,2}, ZHAO WeiQuan^{1,2}, ZHAO Minghua^{3,4}, LU Wei^{1,2}

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. *Beijing IWHR Corporation, Beijing 100044, China;*

3. *Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China;*

4. *Enterprises Key Laboratory of Foundation and Foundation Engineering of Tianjin, Tianjin 301700, China)*

Abstract: The landslide dam body is characterized by complex material composition, loose and disordered structure, poor stability and weak anti-permeability. Especially for the landslide dam located in the underwater part, the anti-seepage and reinforcement technology and materials are not perfect. According to the needs of improving landslide dam, taking the fluidity of modified mortar as the control standard, orthogonal test was carried out, and three groups of mix proportion with different fluidity were selected. Based on the results of laboratory test, dispersion resistance underwater, mechanical properties and anti-seepage performance of each mix proportion mortar were evaluated quantitatively. Through the model test, the grouting effect of modified mortar for underwater sand-gravel with certain gradation is studied, it is verified that the modified mortar can meet the application requirements of different working conditions of the landslide dam, and can provide reference for similar engineering construction.

Keywords: landslide dam; anti-seepage reinforcement; modified cement mortar; orthogonal test; high fluidity

堰塞体通常由滑坡、崩塌、泥石流和碎屑流等方式形成,可以看作是一种特殊形式存在的土石坝,其

具有物质成分复杂、材料不均匀系数分布范围广、结构松散零乱、部分架空、稳定性差、抗渗透性能弱等特点,一旦遭遇强降雨、地震等恶劣自然条件,极易发生滑坡、管涌等模式的破坏^[1-4],严重危及人民群众生命和财产安全。为开发利用堰塞体,改造堰塞湖为控制性水库,达到减灾兴利的目的,必须进行防渗加固改良处理。目前对于堰塞体的再利用技术及相应加固防渗机理研究较少。国内仅有小南海水库地震堰塞体(帷幕灌浆解决堰塞体渗漏问题)和红石岩堰塞体(混凝土防渗墙解决堰塞体渗漏)等少量改造案例,相应防渗加固处理技术并不完善^[5-6]。

分析堰塞体组成特点可知,各区域材料颗粒级配和密实条件不同,孔隙率分布不同,上下游存在水头差,渗透水流存在一定流速,对加固材料可灌性(流动性能)及水下抗分散性能要求均较高。对堰塞体改良处理方法主要有^[7-10]:(1)普通水泥浆灌注,浆材耗量大、工效低;(2)常规膏浆材料灌注,需采用特制搅拌机及灌浆泵、施工专业化要求及成本高;(3)常规水泥砂浆灌注,砂浆水下易离析、固结效果可靠性能较差;(4)自流可控砂浆自流灌注,虽能改善孔隙发育条件,但达不到防渗要求,需结合帷幕灌浆处理。目前对于松散堆积体加固处理,通常采用水泥砂浆灌注,但砂浆材料具有水下易离析或流动性不足缺点,严重影响堰塞体水下部分的防渗加固效果。研发高流动性及水下抗分散砂浆材料,对于堰塞体防渗透加固具有十分重要的意义。

通过开展室内改性砂浆流动度正交试验,确定合适的体积水粉比、体积砂率、复合外加剂掺量,并优选出不同流动性的三组配合比,对其水下分散性、固结体力学及抗渗性能进行研究,并通过模型试验,验证了改性砂浆对于堰塞体改良处理的适用性和有效性。

1 改性砂浆流动度正交试验

1.1 试验原材料

(1) 钻牌普通硅酸盐水泥,标号 P. O42.5,主要性能指标见表 1。

表 1 普通硅酸盐水泥主要性能指标

密度比表面积 $/(kg \cdot / (m^2 \cdot m^{-3})$ $kg^{-1})$	安定性	凝结时间 /min		抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa		
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
		3180	380	良好	80	400	27.8	42.5

(2) 普通河砂,粒径级配见表 2。细度模数

2.20,细砂,表观密度 $2\ 160\ kg/m^3$ 。

表 2 河砂粒径分布

筛孔直径/mm	5.00	2.50	1.25	0.60	0.30	0.15
筛余率/%	0.00	4.23	10.77	12.18	20.97	44.65
累计筛余率/%	0.00	4.23	15.00	27.18	48.15	92.80

(3) 复合外加剂,由减水剂、增黏剂、稳定剂、促凝剂及自制水下抗分散剂组成。结合相应研究成果^[11-14],综合考虑各类外加剂改性作用、外加剂间及与水泥浆液间相容性、价格、材料来源、环保性能等,确定复合外加剂中各组分掺量,具体如表 3 所示。水下抗分散剂是由聚丙烯酰胺、硅藻土、纤维素醚及高岭土按照一定比例配制而成。

表 3 复合外加剂基本配比

种类	减水剂	增黏剂	稳定剂	促凝剂	水下抗分散剂
名称	标准高效聚羧酸减水剂	木质纤维	微细硅粉	碳酸锂	自制
外观	白色粉末	白色粉末	白色粉末	白色颗粒	白色粉末
掺量/%	1.0	0.35	0.2	0.1	0.8

1.2 流动性影响因素及水平

针对不同级配和密实条件下松散堰塞体,研发具有不同流动性的改性砂浆材料,对于堰塞体防渗加固处理是至关重要的,不仅能够保证不同配比材料的扩展度和充填效果,而且可以节省材料用量和提高改良处理工效。

结合相应研究成果^[13-15],选择体积水粉比(水体积 V_w 与所有粉体材料体积 V_p 之比,以 w/p 表示)、体积砂率(扣除砂含粉与砂含水后纯干砂体积 V_s 与砂浆体积 V_M 之比,以 S/M 表示)、复合外加剂掺量(复合外加剂用量与所有粉体材料的质量比,以 CAD 表示)作为流动性正交试验研究的影响因素,并确定每个影响因素具有三个水平。改性砂浆流动性正交试验影响因素与水平见表 4。

表 4 流动度影响因素与水平

影响水平	A 体积水粉比 (w/p)	B 复合外加剂 掺量/% (CAD)	C 体积砂率 /% (S/M)
1	0.8	2.43	40
2	1.0	2.94	45
3	1.2	3.14	50

1.3 流动性正交试验结果统计

相应配比下改性砂浆不同时间内流动性试验结果见表 5。分别对各试验指标进行分析,得出三种影响因素主次顺序和优化方案,见表 6。

表 5 流动度正交试验方案与结果

试验 编号	A	B	C	D	不同时间流动度/mm		
					0 min	20 min	60 min
1	1	1	1	1	325	320	310
2	1	2	2	2	360	340	335
3	1	3	3	3	355	345	340
4	2	1	2	3	335	332	330
5	2	2	3	1	345	335	325
6	2	3	1	2	385	370	360
7	3	1	3	2	370	365	355
8	3	2	1	3	400	390	375
9	3	3	2	1	415	405	385

表 6 流动度正交试验数据统计与计算

流动时间 /min	极差 分析	A 体积水粉比	B 复合外加剂掺量	C 体积砂率
初始	K_1^1	1025.0	1040.0	1110.0
	K_1^2	1065.0	1105.0	1125.0
	K_1^3	1185.0	1155.0	1070.0
	$\overline{K_1^1}$	341.7	346.7	370.0
	$\overline{K_1^2}$	355.0	368.3	375.0
	$\overline{K_1^3}$	395.0	385.0	356.7
	极差 R_1	53.3	38.3	13.3
主次顺序	A > B > C			
优化组合	A3B3C1/A3B3C2			
20	K_2^1	1005.0	1017.0	1080.0
	K_2^2	1037.0	1065.0	1077.0
	K_2^3	1160.0	1120.0	1045.0
	$\overline{K_2^1}$	335.0	339.0	360.0
	$\overline{K_2^2}$	345.7	355.0	359.0
	$\overline{K_2^3}$	386.7	373.3	348.3
	极差 R_2	51.7	34.3	11.7
主次顺序	A > B > C			
优化组合	A3B3C1/A3B3C2			
60	K_3^1	985.0	995.0	1045.0
	K_3^2	1015.0	1035.0	1050.0
	K_3^3	1115.0	1085.0	1020.0
	$\overline{K_3^1}$	328.3	331.7	348.3
	$\overline{K_3^2}$	338.3	345.0	350.0
	$\overline{K_3^3}$	371.7	361.7	340.0
	极差 R_3	43.3	30.0	10.0
主次顺序	A > B > C			
优化组合	A3B3C1/A3B3C2			

对上述流动性正交试验结果分析可知:

(1) 体积水粉比对初始、20 min 及 60 min 流动性极差最大,分别为 53.3、51.7 和 43.3,是最重要

影响因素,在确定优先水平时应重点考虑,体积水粉比越大,相应时间平均流动性越好,坍塌扩展度越大,应用时应根据堰塞体结构孔隙特点,选择合适体积水粉比。

(2) 外加剂掺量对初始、20 min 及 60 min 流动性极差较大,分别为 38.3、34.3 和 30.0,是第二影响因素。试验用量范围内,复合外加剂掺量越大,相应时间平均流动性最好,应用时还应考虑各类外加剂的作用机理,根据改性砂浆具体应用环境及性能要求,确定综合外加剂合理掺量。

(3) 体积砂率对初始、20 min 及 60 min 流动性极差相对较小,分别为 13.3、11.7 和 10.0,是次要因素。由于体积砂率变化幅度通常较小,一般取 45%~55%,流动性处于较为合理水平,且可以节省水泥用量,因此体积砂率对与改性砂浆性能影响程度相对较小。

(4) 过程中各配比砂浆均无明显析水、沉淀现象,证明各配比砂浆具有良好稳定性。

1.4 改性砂浆配合比优选

结合流动度正交试验结果,初步优选出以下 3 组改性砂浆配合比,如表 7 所示。

表 7 优选改性砂浆配合比

配比 名称	w/p	CAD /%	S/M /%	水泥 /kg	水 /kg	砂子 /kg	外加剂 掺量/kg
SK1	0.8	2.43	45	954	240	954	23.2
SK2	1.0	2.94	45	954	300	1060	28.0
SK3	1.2	3.15	50	954	360	1400	30.0

三组改性砂浆配比初始流动性为 355 mm、385 mm、415 mm,60 min 流动性为 340 mm、360 mm、385 mm,流动性良好,经时损失小,且流动性分布范围广,能够满足不同孔隙灌浆充填需求,可充分提高效率,保证防渗加固效果。

2 改性砂浆基本性能试验

2.1 水下抗分散性能试验

为验证改性砂浆的水下抗分散能力,采用配制好的改性砂浆分别进行标准环境及水下环境浇模、养护,观察模块水中形态,检测固结体质量损失,并与标准模块相应指标进行对比,以此定量评价砂浆水下抗分散能力。改性砂浆水下浇模、养护及固结体拆模后形态如图 1、图 2 所示。相应配比砂浆水下浇模后质量损失结果如表 8 所示。



图 1 改性砂浆水下浇筑

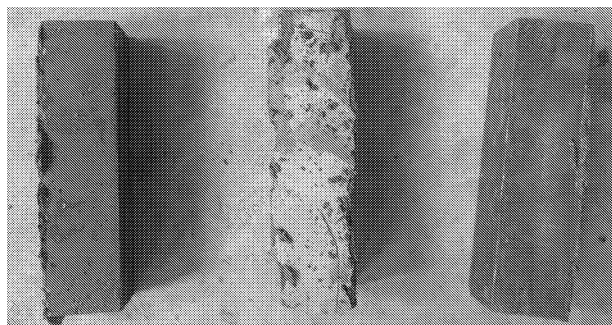


图 2 水下养护拆模后固结体状态

表 8 不同配比砂浆固结体质量损失率

配比名称	砂浆平均质量 /g	固结体平均质量/g	质量损失率 /%
SK1(水下)	560	524	6.5
SK1(标准)	560	546	2.5
SK2(水下)	543	497	8.5
SK2(标准)	543	524	3.5
SK3(水下)	531	482	9.2
SK3(标准)	531	510	4.0

分析砂浆水下环境试验过程及数据可知:

(1) 各配比改性砂浆水下环境浇模时,水体均轻微变混,浑浊程度较低,试模仍可见;固结后养护箱中残留少量固结体;试模表面比较光滑,无明显蜂窝麻面,体积变化不明显,整体性保持较好。

(2) 3 种配合比改性砂浆水下试模质量损失率最大为 9.2%,最小为 6.5%,标准条件下相应质量损失为 2.5%~4.0%,水下质量损失率最大为 5.2%,质量损失较小。

(3) 改性砂浆具有良好的水下抗分散能力,水下环境对于改性砂浆稳定性能影响不大,能够满足水下灌浆应用需求。

2.2 固结体力学性能试验

测试标准和水下环境模块 3 d、7 d 及 28 d 龄期抗折、抗压强度,定量评价改性砂浆固结体相应环境下力学性能。固结体抗折、抗压强度及强度差值随龄期变化过程如图 3—图 5 所示。

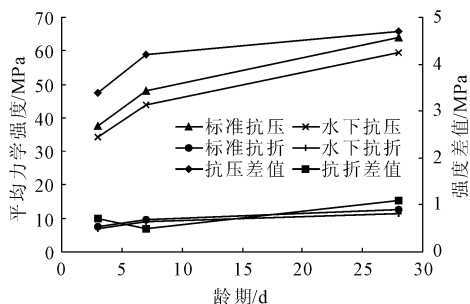


图 3 标准、水下 SK1 固结体力学强度及差值变化曲线

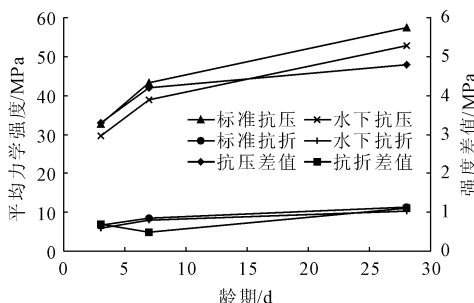


图 4 标准、水下 SK2 固结体力学强度及差值变化曲线

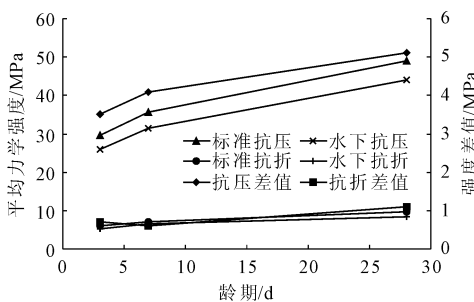


图 5 标准、水下 SK3 固结体力学强度及差值变化曲线

分析试验数据,可知:

(1) 各配比改性砂浆力学性能随龄期增加而增大,养护初期强度增长较快,后期增长相对较慢,3 d 力学强度约占 28 d 指标的 55%~60%。

(2) 一定范围内,改性砂浆固结体抗折、抗压力学性能随体积水粉比、综合外加剂掺量增加而减小,随体积砂率的增加而增大;体积水粉比对力学强度的影响最大,外加剂掺量是次要影响因素,体积砂率变化范围较小,影响也最小。

(3) 与标准条件相比,相应龄期 3 种配比砂浆水下固结体力学强度存在一定损失,28 d 抗折强度最大损失率 11.7%,抗压强度最大损失率 10.4%,流动性越好,水下抗折、抗压强度损失率越大,施工时应选用流动性合适的改性砂浆。

(4) SK1 砂浆力学强度最高,SK3 砂浆力学强度相对较小,标准试模 28 d 龄期抗压强度 49 MPa,抗折强度 9.6 MPa,水下试模抗压强度 43.5 MPa,抗折强度 8.5 MPa,标准及水下环境,相应龄期力学强

度均较高,也可说明改性砂浆具有较好的水下抗分散能力。

2.3 固结体抗渗性能试验

改性砂浆抗渗性能可以通过固结体抗渗压力及渗透系数进行评价,抗渗压力越大,渗透系数越小,抗渗性能越好。各配比砂浆抗渗性能试验结果如表 9 所示。

表 9 改性砂浆固结体抗渗性能试验结果

配比名称	砂浆抗渗压力/MPa	平均透水时长/s	平均透水量/ m^3	平均渗透系数/ $(m \cdot s^{-1})$
SK1	0.6	600	0.018	2.0×10^{-9}
SK2	0.6	600	0.029	3.3×10^{-9}
SK3	0.6	600	0.032	3.6×10^{-9}

分析表 9 可知,各配比砂浆固结体渗透压力为 0.6 MPa,渗透系数均在 10^{-9} m/s 量级,而对大孔隙结构或地层,灌浆处理后渗透系数约为 10^{-6} m/s 量级,故改性砂浆抗渗性能满足堰塞体改良加固工程需求。

3 室内模型试验研究

3.1 室内模型试验技术路线

采用砂砾石制作堰塞体模型,开展室内模拟试验,研究改性砂浆对于水下一级配砂砾石的灌浆固结效果,从而验证改性砂浆对于堰塞体改良加固工程的适用性和有效性。考虑到堰塞体物质成分胶结不良、不均匀系数分布范围大、堆积松散等结构特点,采用全级配砂砾卵石料作堰塞体模型材料,颗粒粒径分布范围为 0.075 mm ~ 150.000 mm,一次将模型填满,不进行压实,使充填材料孔隙率尽可能接近材料自然堆积时的孔隙率,以模拟宽级配堰塞体结构特点。砾卵石、砂颗粒级配如表 10 所示。

表 10 砾卵石、砂颗粒级配

粒径类型	砾卵石				砂			
	150 ~ 80	80 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 5	5 ~ 2.5	2.5 ~ 1.25	1.25 ~ 0.63	0.63 ~ 0.075
百分含量/%	4.1	12.1	14.3	29.3	11.2	5.8	6.2	12.5
合计/%	59.8				40.2			

模型制作具体步骤:(1) 采用透明有机玻璃加工 1#模型,四周侧壁及底部开孔,采用有机玻璃主要是便于观察灌浆过程中模型内浆液扩散情况,采用混凝土钢模制作 2#模型,模型尺寸均为 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m;(2) 将 1#模型放入尺寸 1.0 m × 1.0 m × 1.0 m 的有机玻璃水箱中;(3) 在模型正中间位

置预埋灌浆管,直径 25 mm,长度 60 cm,端部距底面 5 cm,分别在距离端部 5 cm、15 cm、25 cm、35 cm 处布设出浆孔,出浆孔沿圆周均匀分布,灌浆管用常温 PVA 水溶膜包裹,即能保证预埋过程中不会被堵塞,也可保证出浆孔顺利打开;(4) 将全级配砂砾卵石料按比例混合均匀后,一次性填满整个模型,充填材料自然堆积,不进行压实处理;(5) 充填完毕,向 1#模型水箱注水,控制水位为 40 cm。

采用灌浆泵对 2 个模型灌注 3 种配比改性砂浆,先灌注流动度较低、力学强度高的砂浆,再灌注流动度较高的砂浆,当灌浆管中改性砂浆下浆较慢时,则变换下一种配比砂浆;当流动性能最高的砂浆 10 min 不下浆后,停止灌浆。采用低压力慢灌的方式进行灌注,注浆过程中控制最大注浆压力不超过 0.2 MPa。灌浆结束后,1#模型在水箱中养护至模型固结,然后移出水箱,与 2#模型一起,在标准条件下养护至相应龄期。

3.2 模型试验过程及结果

模型试验灌浆及效果检测过程见图 6—图 8。

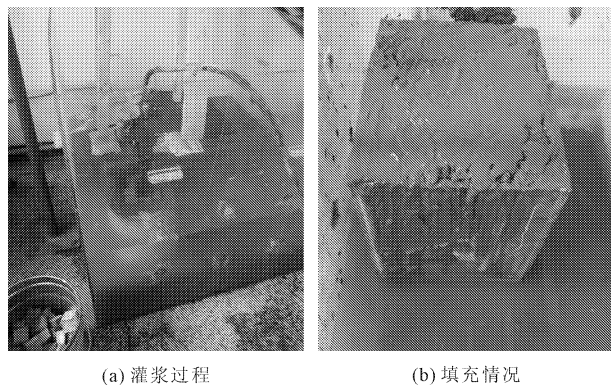


图 6 1#模型灌浆过程及填充情况

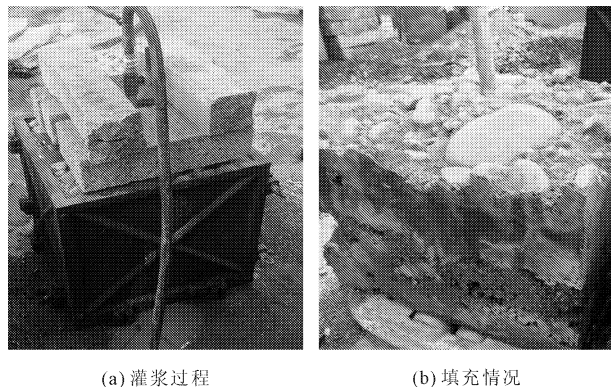


图 7 2#模型灌浆过程及填充情况

1#模型及 2#模型耗浆量及相应龄期下芯样抗压强度试验结果如表 11 所示。

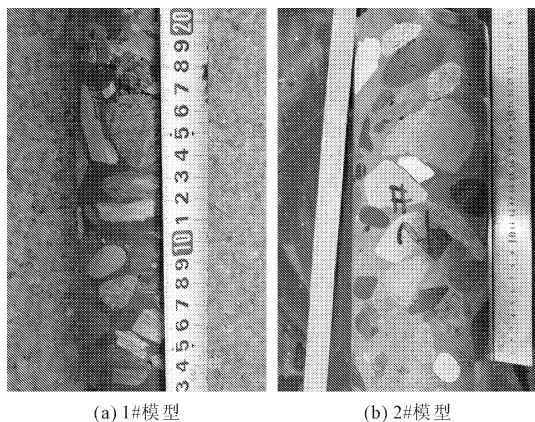


图8 1#、2#模型取芯情况

表11 模型耗浆量及芯样抗压强度

模型名称	成模及养护环境	耗浆量/L	抗压强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d
1#	水下	40	12.2	16.0	24.0
2#	标准	45	13.1	17.1	25.5
差值		5	0.9	1.1	1.5
损失率/%		12.5	7.0	6.5	6.0

分析模型灌浆试验过程及数据,可知:

(1) 改性砂浆对两模型充填效果均较好,砂浆扩散到模型全部区域,模型基本胶结为完整结石体;芯样完整情况良好,表面光滑,无明显蜂窝麻面,抗压强度均较高,28 d 抗压强度大于 24 MPa,满足加固工程对于结石体强度需求。

(2) 取芯过程顺利,无塌孔、孔底沉渣现象,芯样孔返水较多,取样后孔内水位无变化,说明模型具有了良好的抗渗性能,松散结构得到了较大程度改善。

(3) 相比于2#模型,1#模型水下灌浆过程中产生了少量跑浆,模型外部水箱中水体轻微变混,水位升高,底部出现少量沉积物,耗浆量增加 12.5%,芯样抗压强度平均损失 6.5%,说明改性砂浆能够将模型中水排出模型外部,具有良好抗分散性能,水下环境对于改性砂浆稳定性及力学性能影响不大。

4 结论

(1) 通过砂浆流动性正交试验优选出三组体积水粉比、复合外加剂掺量、体积砂率的改性砂浆配合比,该系列改性砂浆初始流动度为 355 mm、385 mm、415 mm,1 h 流动度为 340 mm、360 mm、385 mm,流动性良好、经时损失小,流动分布范围广;水下质量损失率最大为 5.2%,28 d 固结体抗折强度

最大损失率 11.7%,抗压强度最大损失率 10.4%,质量及力学强度损失率小,水下抗分散性能良好;渗透压力为 0.6 MPa,渗透系数均在 10^{-9} m/s 量级,固结体防渗性能高。

(2) 标准环境及水下环境中改性砂浆对全级配砂砾石均具有较好充填效果,灌后模型松散结构、抗渗性能得到了较大程度改善,芯样完整情况良好,28 d 抗压强度大于 24 MPa,相比于标准灌浆,水下灌浆耗浆量增加 12.5%,芯样抗压强度损失 6.5%,水下环境对改性砂浆稳定性及结石体力学性能影响不大。

参考文献:

- [1] 年廷凯,吴昊,陈光齐,等.堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J].岩土力学与工程学报,2018,37(8):1797-1807.
- [2] 石振明,马小龙,彭铭.基于大型数据库的堰塞坝特征统计分析与溃决参数快速评估模型[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1780-1790.
- [3] 石振明,程世誉,张清照,等.堰塞坝体材料渗透特性及其稳定性研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):95-100.
- [4] 李勤军,熊新宇.白格堰塞湖应急处置工程措施方案设计[J].水利水电快报,2019,40(3):7-9.
- [5] 张宗亮,张天明,杨再宏,等.牛栏江红石岩堰塞湖整治工程[J].水力发电,2016,35(9):83-86.
- [6] 刘宁.红石岩堰塞湖排险处置与统合管理[J].中国工程科学,2014,16(10):39-46.
- [7] 王征.自流可控灌浆在堰塞体防渗加固处理中应用[J].水利规划与设计,2017(6):136-138.
- [8] 赵元弘.小南海水库地震堰塞坝体防渗处理[J].水利水电科技进展,2008,28(5):39-45.
- [9] 张万银.自流控制灌浆技术对复杂堆石体防渗的实验研究[J].科技创新与应用,2018(21):132-133.
- [10] 陈长久,安雪晖,金峰,等.自流可控灌浆技术的开发与应用[J].清华大学学报(自然科学版),2014(8):1013-1017.
- [11] 危加阳.砌筑砂浆性能及配合比设计探析[J].水利与建筑工程学报,2014,10(2):207-212.
- [12] 刘文永.注浆材料与施工工艺[M].北京:中国建材工业出版社,2008:65-70.
- [13] 石旭武.自流可控灌浆材料性能与施工技术的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2016:25-36.
- [14] 杨欢,牛季收.净浆流变性能及与自密实混凝土工作性能的关联性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2018:22-26.
- [15] 刘平.基于骨料颗粒特性的自密实混凝土性能研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019:11-15.