

· 防护工程 ·



# 胶凝砂砾石的工程性质分析

杜双全<sup>1</sup>, 范适生<sup>2</sup>

(1. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614401;  
2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 胶结砂砾石坝结合了土石坝造价低及混凝土坝安全性高的优点, 可大幅提高土地利用效率, 在遇超标洪水后不会溃堤, 恢复期短, 抢险救灾难度大幅降低。通过总结目前国内外胶凝砂砾石坝工程实例的优势, 结合岷江犍为航电枢纽工程库区胶凝砂砾石堤防工程施工实例, 通过人工选择胶凝材料与砂砾石拌和、摊铺、碾压模拟砂砾石的成岩过程。试验分析人工合成胶凝砂砾石的工程性质, 确定最优配合比, 并与冶勒电站天然钙质胶结的胶凝砂砾石的工程性质进行对比。结果表明, 采用人工合成胶凝砂砾石筑堤坝安全可行, 可供同类工程参考。

**关键词:** 胶凝砂砾石; 配合比; 成岩过程; 堤坝; 犍为航电枢纽

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0125-04

## Analysis on engineering properties of cement-sand-gravel

DU Shuang-quan<sup>1</sup>, FAN Shi-sheng<sup>2</sup>

(1. Sichuan Minjiang Port and Navigation-Power Development Co., Ltd., Leshan 614401, China;  
2. Sichuan Communication Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** Cement-sand-gravel dam combines the advantages of low cost of earth rock dam and high safety of concrete dam, which can greatly improve the land utilization rate. In case of excessive flood, it will not break the dam and has a short recovery period, and the difficulty of rescue and disaster relief is greatly reduced. We summarize the advantages of current examples of cement-sand-gravel dam projects at home and abroad, simulate the diagenetic process of sand gravel by manually selecting cementitious materials and sand gravel for mixing, paving and rolling combining with the construction example of cement-sand-gravel dam project in the reservoir area of Qianwei navigation-power junction project in Minjiang River, test and analyze the engineering properties of synthetic cement-sand-gravel to determine the optimal mix proportion, and compare it with the engineering properties of natural calcium cemented cement-sand-gravel in Yele hydropower station. The results show that it is safe and feasible to use synthetic cement-sand-gravel to build dam, which can provide references for the similar projects.

**Keywords:** cement-sand-gravel; mix proportion; diagenetic process; dam; Qianwei navigation-power junction

胶结砂砾石是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的材料<sup>[1]</sup>。胶结砂砾石坝具有缩小坝体断面、背水面抗冲刷能力强、超标洪水翻坝后不易溃坝等优点, 并且可就地取材、减少弃料, 具有安全、经济和保护等特点, 已开始得到国际坝工界的重视<sup>[2-3]</sup>。

胶结砂砾石坝技术可为低水头围堰工程、堤防工程、水工挡水坝提供新的坝型, 其在福建街面水电站下游围堰(高程 16.3 m)、福建洪口水电站上游过水围堰(高程 35.5 m)、云南功果桥水电站上游过水围堰(高程 56.0 m)、贵州沱水电站二期下游围堰(高程 14.0 m)、四川飞仙关水电站一

收稿日期: 2021-05-28

作者简介: 杜双全(1972—), 男, 高级工程师, 从事水电与港航工程建设管理工作。

期纵向围堰(高程 12.0 m)等临时工程已有成功应用<sup>[4]</sup>,当前在建的四川顺江堰水利枢纽工程、金鸡沟水库大坝等永久工程推广应用了胶凝砂砾石技术,取得显著的经济和社会效益。

本文对人工合成胶凝砂砾石的工程性质进行分析,对比冶勒电站天然钙质胶结的胶凝砂砾石力学强度,研究胶结颗粒料在永久工程应用的可行性,为工程安全提供支撑和保障。

1 工程概况

岷江航电 4 个枢纽的库区防护堤总设计长度超过 80 km,属于非主体工程,高度一般为 7~10 m,最高不超过 18 m,挡水水头较小。其中,库区塘坝乡防护工程布置在镇江坝内过洪沟右侧,由距坝址约 3.6 km 处向上游延伸,长 2.755 km,建基面最低高程为 323.8 m,最大堤高 13.5 m;该城市防护等级为Ⅳ级,堤防工程级别为 4 级;永久性主要建筑物级别为 3 级。现场试验布置在主体工程右岸塘坝乡镇江村,试验总长 95 m(里程 0+282.866—0+377.866)。试验建基面高程为 323.8 m,共分 3 段,分缝长度分别为 30、40 和 25 m。

2 试验方法及仪器

2.1 胶凝砂砾石人工合成方法

四川南桷河上游冶勒盆地存在钙质半胶结砾石层和钙质半胶结土层,地层结构紧密,呈硬塑状态,通过颗粒分析和荷载试验、剪切试验、液化试验、渗透变形等物理力学试验表明,其物理力学指标较高,可作为地基持力层使用。究其原因,主要为上覆压力将松散土颗粒压实成形,经过长时间地质年代演变,在前期超固结压力和钙质胶结的双重作用下,松散土颗粒变成了相嵌密实、成形不散、强度很高的砾岩、砂岩、黏土岩,虽成岩程度和胶结程度较低,但其物理力学指标比松散颗粒已有大幅提高,天然地基钙质胶结土力学强度能满足 125 m 高坝附加荷载要求和变形要求<sup>[5]</sup>。

借鉴冶勒电站坝基天然钙质胶结砂砾石形成机理,对深厚覆盖层中的松散砂砾石、粉土加以改良和利用,形成人工合成胶凝砂砾石、胶结土、砾岩、粉砂岩的强度,其试验研究技术路线上的关键点是模拟前期超固结压力和选用合适的胶凝材料。通过大量配合比试验研究,选择适宜的胶凝材料和天然砂砾石或粉土,用经济的配合比获得较高的物理力学指标。

2.2 材料与设备选择

2.2.1 砂砾石材料

四川岷江下游河谷宽阔,河漫滩及Ⅰ级阶地发育,沉积了厚 20 m 以上的天然砂砾石层。该天然砂砾石材料分选性及级配较好,孔隙充填较密实,颗粒分析属宽级配土。天然砂砾石属低压缩性的无黏性土、承载力较高、透水性较强,具有较强的抗剪、抗变形的力学性能,但抗冲刷破坏能力较低,一般属于管涌土。河漫滩沉积的砂土为地震液化砂土。

2.2.2 胶凝材料

水泥采用当地普通硅酸盐 P·O 42.5 水泥,粉煤灰采用当地Ⅱ级粉煤灰,品质检验合格。

2.2.3 碾压设备

采用 22 t(激振力 390 kN)和 26 t 振动碾(激振力 405 kN)碾压,模拟替代前期超固结压力。

3 试验结果及分析

通过大量配合比试验研究,选用适量的普通硅酸盐水泥、粉煤灰作为胶凝材料,与砂砾石均匀拌和,碾压厚度 50~60 cm,碾压行走速度 1.0~1.5 km/h,静碾 2 遍,动碾 8 遍,压密、挤密可达最优密实度,检测密度可达 2.2 t/m<sup>3</sup>以上,最高值在 2.4~2.5 t/m<sup>3</sup>,相关试验结果见表 1~4。现场进行试坑注水试验时水面不下降,表明孔隙不连通、渗透性弱,与实验室测定的渗透系数在 1×10<sup>-8</sup>~1×10<sup>-7</sup> cm/s 的结果一致,施工摊铺碾压过程中,通过碾压荷载使胶结材料充分充填砾石空隙,形成密实的水泥砾岩,从而增强抗压、抗剪物理力学性能。

表 1 不同胶凝材料用量的胶凝砂砾石配合比及强度试验结果

试验组编号	砂率/%	水胶比	用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂砾石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	稠度 (VC 值)/s	抗压强度/MPa		
								28 d	90 d	180 d
PB-C35	18.8	1.13	85	35	40	2 396	4.0	5.1	10.0	11.3
PB-C40		1.06		40	40	2 392	6.0	6.0	11.2	12.4
PB-C45		1.00		45	40	2 387	6.5	6.5	11.8	13.1
XB-C35	28.1	1.60	120	35	40	2 298	3.5	2.1	4.5	5.1
XB-C40		1.50		40	40	2 294	3.5	2.7	5.5	6.5
XB-C45		1.41		45	40	2 289	4.5	3.3	6.6	7.7

表 2 包络线最粗、最细和平均级配胶凝砂砾石强度试验配合比

试验组编号	砂率/%	水胶比	用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂砾石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	稠度 (VC 值)/s	抗压强度/MPa		
								28 d	90 d	180 d
CA55	10.3	0.69	55	40	40	2 474	6	13.3	18.9	—
CA65		0.81	65			2 447	2	10.5	17.2	—
CA80		1.00	80			2 405	<1	7.7	—	—
CB80	15.0	1.00	80			2 407	1.9	7.9	—	—
CC80	17.0	1.00	80			2 406	2	8.0	—	14.2
PA65	18.8	0.81	65			2 447	40	9.4	16.7	18.0
PA75		0.94	75			2 419	24	8.5	15.8	17.6
PA85		1.06	85			2 392	6	6.0	11.2	13.1
PA90		1.13	90			2 378	3	5.2	9.6	11.8
PA95		1.19	95			2 364	<1	4.4	8.4	10.2
XA100		1.25	100			2 353	45	5.5	9.1	11.0
XA105	28.1	1.31	105			2 339	25	4.0	8.0	10.2
XA110		1.38	110			2 326	8.5	3.9	6.8	8.9
XA120		1.50	120			2 294	3.5	2.7	5.5	6.5
XA130		1.63	130			2 271	<1	2.4	4.2	5.1

表 3 富浆胶凝砂砾石配合比及强度试验结果

试验组编号	砂率/ %	减水剂 掺量/%	用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂砾石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	稠度 (VC 值)/s	抗压强度/MPa			劈拉强度/ MPa
									28 d	90 d	180 d	
DX-1	28.1	0.8	105	1.05	50	50	2 312	6.0	4.3	10.2	12.2	1.33
DX-2			105	0.88	60	60	2 289	7.0	6.1	14.0	17.6	2.06
DX-3			110	0.79	70	70	2 279	2.6	8.4	18.9	—	—
DX-4			110	0.69	80	80	2 229	5.0	12.7	24.2	—	—
DX-5			100	0.63	80	80	2 256	11.0	15.1	26.5	—	—
DX-6			111	0.65	85	85	2 214	4.9	14.3	25.3	—	—
DX-7			115	0.64	90	90	2 192	3.6	15.0	28.7	—	—
DC-1	18.0	0.8	85	0.71	60	60	2 346	1.5	11.0	19.9	24.4	2.42
DC-2			85	0.61	70	70	2 323	1.2	15.4	28.9	—	—
DC-3			80	0.50	80	80	2 313	10.0	22.2	33.8	—	—

表 4 推荐配合比的富浆胶凝砂砾石抗渗及变形性能(90 d 龄期)试验结果

试验组编号	砂率/%	胶凝材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗渗等级	渗水高度/cm	弹性模量/GPa	轴拉强度/MPa	极限拉伸值/10 <sup>-6</sup>	泊松比
DX-3	28.1	140	>W8	6.9	24.2	1.4	58	0.18
DC-1	18.0	120	>W8	5.4	25.3	1.7	62	0.20

在此基础上，富浆胶凝砂砾石配合比和强度试验组进行抗剪断试验和渗透溶蚀试验，结果见进行了 12 组对比试验，试验结果见表 5。通过对表 6、7。

表 5 防渗保护层富胶凝砂砾石配合比及强度试验结果

试验组 编号	砂率/ %	减水剂 掺量/%	引气剂 掺量/%	用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	胶凝材料用 量/(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂砾石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	塌落度/ cm	含气量/ %	抗压强度/MPa	
												28 d	90 d
HX-1	28.1	0.8	0.030	125	0.60	208	104	104	2 049	0.8	3.6	13.4	25.0
HX-2		1.1	0.030	125	0.60	208	104	104	2 049	0.9	5.4	10.1	19.2
HX-3		0.8	0.030	140	0.60	234	117	117	1 979	3.7	9.5	11.7	21.3
HX-4		0.8	0.030	125	0.69	180	90	90	2 082	2.5	7.6	10.0	20.2
HX-5		0.8	0.015	140	0.78	180	90	90	2 041	15.0	10.0	7.9	16.1
HX-6		0.8	0.008	132	0.66	200	100	100	2 040	4.1	4.0	12.9	25.8
HX-7		0.8	0.008	135	0.75	180	90	90	2 055	4.3	5.1	10.4	23.0
HX-8		0.8	0.008	132	0.65	203	122	81	2 157	7.3	5.3	15.6	25.7
HC-1	18.0	0.8	0.008	96	0.60	160	80	80	2 187	2.0	3.4	16.2	30.0
HC-2		0.8	0.006	108	0.60	180	90	90	2 131	9.6	3.6	17.2	23.3
HC-3		0.8	0.006	103	0.57	180	90	90	2 154	3.0	3.9	17.7	32.6
HC-4		0.8	0.006	98	0.65	151	91	60	2 281	5.3	4.1	19.6	28.9

表 6 胶凝砂砾石层抗剪试验结果

试验组编号	层面间隔时间/h	龄期/d	抗剪断试验		纯摩擦试验	
			摩擦系数 <i>f</i>	黏聚力 <i>c</i> /MPa	摩擦系数 <i>f'</i>	黏聚力 <i>c'</i> /MPa
HDCSGR	0	230	1.14	2.14	1.05	0.25
HD-5	5	230	0.87	1.16	0.83	0.21
贫胶 HD-30	30	230	0.96	0.80	0.74	0.11
富胶 HD-30	30	230	1.03	1.81	0.75	0.40

表 7 渗透溶蚀试件渗透系数

试件编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>
渗透系数/(10 <sup>-8</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	4.3	1.0	4.4

注：试件尺寸为 φ43 cm、长 44 cm。

通过试验结果可看出，富浆胶凝砂砾石呈混凝土固态，密度 2.4~2.5 t/m<sup>3</sup>，90 d 抗压强度 16.0~33.8 MPa，弹性模量 24~25 GPa，泊松比

0.18~0.20，摩擦系数 *f'* 为 1.03~1.14，纯摩擦试验的黏聚力 *c'* 较抗剪断试验的黏聚力 *c* 提高幅度达 1.0~1.5 MPa，渗透系数减小至 1×10<sup>-8</sup> cm/s，抗渗等级大于 W8，抗压强度最高达 24.4 MPa，力学强度接近于中硬岩强度指标。根据防渗保护层富浆胶凝砂砾石配合比和强度试验结果和坝体防渗保护层要求，优选推荐施工配合比见表 8。

表 8 推荐保护层富浆胶凝砂砾石工程性质(90 d 龄期)

编号	砂率/ %	胶凝材料/ (kg·m <sup>-3</sup> )	抗渗性能		弹模及极限拉伸性能				抗冻性能		
			抗渗等级	渗水 高度/cm	弹性 模量/GPa	轴拉 强度/MPa	极限拉伸 值/10 <sup>-6</sup>	泊松比	冻融 次数	相对动 弹模/%	质量损 失率/%
HX-8	28.1	203	>W8	2.0	30.3	2.2	90	0.23	25	92.3	0.52
									50	90.7	0.94
									75	86.5	1.20
									100	83.0	1.75
HC-4	18.0	151	>W8	1.9	33.3	2.4	84	0.20	25	90.2	0.65
									50	89.2	1.23
									75	87.8	1.74
									100	83.8	2.50