

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242113

# 沙坪一级水电站胶结砂砾石生产性试验研究

崔鹏飞, 喻星博

(国能大渡河老鹰岩(四川)水电有限公司, 四川 雅安 625499)

**摘要:** 胶结砂砾石筑坝技术融合了土石坝和混凝土坝的优点, 具有广阔的应用前景。以沙坪一级水电站为例, 对 C<sub>180</sub>6、C<sub>180</sub>10、C<sub>180</sub>20 胶结砂砾石进行了生产性试验, 并在 180 d 龄期时钻芯对其进行了抗压强度、劈拉强度、抗渗度及 SEM 电镜扫描试验。结果表明, 在科学配比和合理的施工工艺下, C<sub>180</sub>6、C<sub>180</sub>10、C<sub>180</sub>20 抗压强度分别达到了 7.1、14.8、29.4 MPa, 其中工程用量最多的 C<sub>180</sub>10 抗渗等级为 W8, 胶结砂砾石的性能可达到预期效果, 验证了施工方案的可行性, 可为后续施工提供技术支持, 也为后续水电站建设提供了可借鉴的范例。

**关键词:** 胶结砂砾石; 筑坝技术; 水电站建设; 沙坪一级水电站

中图分类号: TV64

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0106-04

## 1 概况

沙坪一级水电站位于四川省乐山市金口河区境内, 采用河床式开发, 电站总库容  $2\ 123 \times 10^4\text{ m}^3$ , 总装机容量 360 MW, 为二等大(2)型工程。该电站共应用约  $65 \times 10^4\text{ m}^3$  胶结砂砾石于电站主体及临时工程。永久工程中, 胶结砂砾石主要应用于泄洪闸下部坝体、护坦基础、厂房机组段局部、厂房安装间及左、右岸挡水坝坝后回填等部位, 方量约  $46.5\text{ m}^3$ 。临时工程中, 胶结砂砾石主要应用于上游混凝土导墙的基础回填, 并通过一条富浆带防渗区实现二期基坑的防渗; 二期上游围堰和下游围堰与纵向导墙的接头部位总应用方量约  $18.5 \times 10^4\text{ m}^3$ 。胶结砂砾石目前多用于水库大坝、堤防工程和围堰工程中, 很少应用于水电站主体建设部分<sup>[1-2]</sup>。沙坪一级水电站是我国首个在主体工程中采用胶结砂砾石筑坝技术的大型水电站, 本文对建设过程中采用的胶结砂砾石进行生产性试验研究, 其成功实践不仅有效降低了电站投资成本, 加快了施工进度, 也为胶结砂砾石筑坝技术的进一步发展和推广应用提供了参考。

## 2 试验方案

本工程胶结砂砾石选用河床开挖料和河道整治开挖料, 质量控制参照《胶结颗粒料筑坝技术导

则》(SL678-2014)<sup>[3]</sup>, 见表 1。胶结砂砾石施工配合比见表 2。试验采用四川峨胜水公司生产的 P. O 42.5 水泥、贵州盘南电厂生产的 II 级粉煤灰和北京新慧水利建筑有限公司生产的胶结砂砾石专用外加剂 CSGR-A2, 所检指标均符合相应规范中技术要求。

表 1 胶结砂砾石试验用料与标准对照表

Tab. 1 Comparison table of cemented gravel test materials and standards

指标	单位	《胶结颗粒料筑坝技术导则》(SL678-2014) <sup>[3]</sup>	试验用料
表观密度	kg/m <sup>3</sup>	≥2 450	2 720
最大粒径	mm	≤150	150
含泥量	%	≤5	1
粒径小于 5 mm 的砂料含量	%	18~35	26.5
粗骨料中粒径为 5~40 mm 的含量	%	35~65	48.3

表 2 胶结砂砾石施工配合比

Tab. 2 Construction mix ratio of cemented gravel

设计标号	施工配合比
C <sub>180</sub> 6	胶材用量 90 kg/m <sup>3</sup> (水泥、粉煤灰各一半), 用水量 60~90 kg/m <sup>3</sup> , 砂砾石 2 400~2 450 kg/m <sup>3</sup> , 外加剂 0.8~1.0 kg/m <sup>3</sup>
C <sub>180</sub> 10	胶材用量 120 kg/m <sup>3</sup> (水泥、粉煤灰各一半), 用水量 60~90 kg/m <sup>3</sup> , 砂砾石 2 390~2 430 kg/m <sup>3</sup> , 外加剂 1.0~1.2 kg/m <sup>3</sup>
C <sub>180</sub> 20	胶材用量 210 kg/m <sup>3</sup> (水泥、粉煤灰各一半), 用水量 90~100 kg/m <sup>3</sup> , 砂砾石 2 250~2 310 kg/m <sup>3</sup> , 外加剂 2.0 kg/m <sup>3</sup>

试验场地长 30 m, 宽 10 m, 依次对 C<sub>180</sub>10、C<sub>180</sub>20、C<sub>180</sub>6 进行生产性试验, 每种强度的胶结砂

收稿日期: 2024-11-11, 修回日期: 2024-12-26

作者简介: 崔鹏飞(1985-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水电工程建设, E-mail: 1344713600@qq.com

砾石试验层数各有三层,且三层摊铺、碾压层厚不同,松铺厚度分别为 550、660、770 mm,对应压实厚度分别为 500、600、700 mm,松铺系数以现场试验为准。鉴于施工现场机械设备配置的多样性和不确定性,本次试验碾压设备选用 26、32 t 振动碾各一台。生产性试验见图 1,试验操作说明见图 2、表 3。最终对试验场地进行钻孔取样,对孔芯进行抗压强度、劈拉强度、抗渗度及 SEM 电镜扫描试验。



图 1 生产性试验

Fig. 1 Productive test

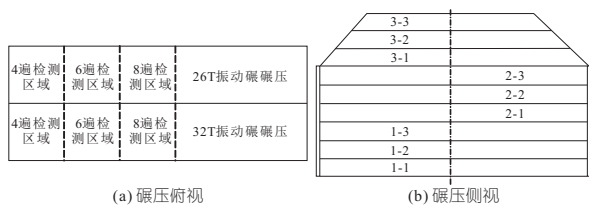


图 2 碾压图示

Fig. 2 Rolling diagram

表 3 胶结砂砾石碾压情况

Tab. 3 Rolling conditions of cemented gravel

分层	条带编号	标号	压实厚度/mm	碾压遍数
1~3	1-1 左(26t)	C <sub>180</sub> 10	500	静压 2 遍+振动 4 遍
	1-1 右(32t)	C <sub>180</sub> 10	500	静压 2 遍+振动 4 遍
	1-2 左(26t)	C <sub>180</sub> 10	600	静压 2 遍+振动 6 遍
	1-2 右(32t)	C <sub>180</sub> 10	600	静压 2 遍+振动 6 遍
	1-3 左(26t)	C <sub>180</sub> 10	700	静压 2 遍+振动 8 遍+静压 2 遍(适用于分层顶部)
	1-3 右(32t)	C <sub>180</sub> 10	700	静压 2 遍+振动 8 遍+静压 2 遍(适用于分层顶部)
4~6	2-1~3	C <sub>180</sub> 20		试验方法同上
7~9	3-1~3	C <sub>180</sub> 6		试验方法同上

### 3 试验分析

#### 3.1 VC 值及松铺系数

三种不同强度等级的胶结砂砾石机口、仓面维壳稠度值  $V_{VC}$  值各检测 9 次,结果见表 4。

由表 4 可知,C<sub>180</sub>6 机口的  $V_{VC}$  值为 4.5~7.1 s,仓面的  $V_{VC}$  值为 8.2~11.8 s;C<sub>180</sub>10 机口的  $V_{VC}$  值为 3.9~6.2 s,仓面的  $V_{VC}$  值为 3.5~

表 4 胶结砂砾石  $V_{VC}$  检测值

Tab. 4  $V_{VC}$  test value of cemented gravel

设计指标	位置	$V_{VC}/s$								
C <sub>180</sub> 6	机口	5.2	6.3	4.7	5.6	6.1	4.5	5.0	6.2	7.1
	仓面	8.9	10.8	8.2	9.7	9.8	9.0	9.5	9.9	11.8
C <sub>180</sub> 10	机口	4.6	5.1	5.8	5.3	6.2	3.9	5.5	4.7	5.6
	仓面	8.7	9.2	9.7	8.6	10.6	8.1	9.3	9.0	9.8
C <sub>180</sub> 20	机口	3.5	3.8	4.4	4.6	5.3	4.7	5.1	4.8	5.0
	仓面	8.3	7.6	8.5	9.1	8.8	8.6	9.3	9.2	9.7

11.8 s;C<sub>180</sub>20 机口的  $V_{VC}$  值为 3.5~5.3 s,仓面的  $V_{VC}$  值为 7.6~9.7 s。根据相关规范<sup>[4]</sup>,机口  $V_{VC}$  值应控制在 2~8 s,仓面  $V_{VC}$  值应控制在 2~12 s,检测结果表明胶结砂砾石干湿情况适度,骨料裹浆情况较好。其中吴海燕<sup>[5]</sup>对与本文 C<sub>180</sub>6、C<sub>180</sub>10 水胶比接近的胶结砂砾石  $V_{VC}$  值进行了检测,基本也都在 10 s 以内。

同时在制料过程中检测出 C<sub>180</sub>6 拌和物的初凝时间为 445 min,终凝时间为 630 min;C<sub>180</sub>10 拌和物的初凝时间为 395 min,终凝时间为 580 min;C<sub>180</sub>20 拌和物的初凝时间为 375 min,终凝时间为 530 min。

对碾压前后松铺不同厚度的胶结砂砾石用水准仪测量高程,并计算得到松铺系数。采用 26 t 振动碾时,反铲挖掘机平仓时松铺厚度分别为 550、660、770 mm 所对应的松铺系数分别为 1.12、1.11、1.11;采用 32 t 振动碾时,所对应的松铺系数分别为 1.14、1.13、1.14。结果表明相同碾压遍数下,振动碾为大吨位时,压实效果较好,为提高施工效率,建议采用更高吨位的碾压设备。同时碾压遍数在“静 2+动 4”~“静 2+动 6”时压实度增长较快,在振动 6 遍后,压实度增长变缓,原因是碾压遍数所对应的压实厚度不同,摊铺层越厚,振动碾传递到下层胶结砂砾石的能量衰减程度越高,要达到要求的密实度就需要增加振碾的遍数与时间,因此施工时应设计合理的摊铺、碾压层厚,从而达到施工高效率、胶结砂砾石高质量的效果<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 抗压强度及劈拉强度

在 7、28、180 d 时钻孔取芯并对不同标号的芯样切割为  $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆柱体,测量其抗压强度,28、180 d 的劈拉强度,180 d 时的抗渗强度。芯样见图 3,可见砂岩骨料光滑,碾压密实,胶结良好,未见明显的骨料压碎情况。抗压强度见图 4,劈拉强度见图 5。

由图 4 可知,C<sub>180</sub>6、C<sub>180</sub>10、C<sub>180</sub>20 在 180 d 时的抗压强度分别为 7.1、14.8、29.4 MPa,均达到了设计强度,并分别超过设计强度的 18.3%、



图 3 芯样图

Fig. 3 Core sample diagram

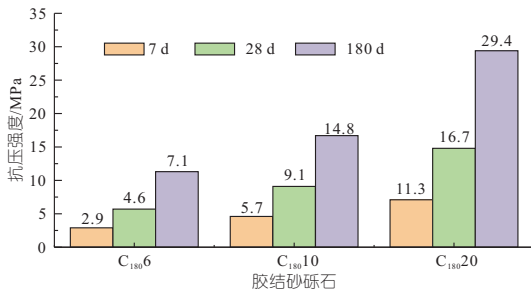


图 4 抗压强度

Fig. 4 Compressive strength

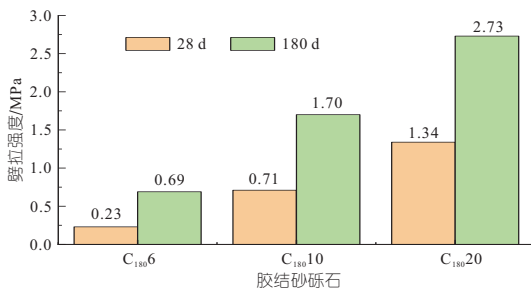


图 5 劈拉强度

Fig. 5 Split tensile strength

48%、47%。C<sub>180-6</sub>、C<sub>180-10</sub>、C<sub>180-20</sub> 在 180 d 时的劈拉强度分别为 0.69、1.70、2.73 MPa，同时劈拉强度约为抗压强度的 10%，说明胶结砂砾石的劈拉强度与抗压强度存在一定相关性。生产性试验结果与王建有等<sup>[7-8]</sup>的研究结果相差不大。

### 3.3 抗渗强度

因三种胶结砂砾石中 C<sub>180-10</sub> 在工程建设期间用量最多，故对其 6 个上截面 φ175 mm，下截面 φ185 mm，高 150 mm 的圆锥体试件展开抗渗强度试验，参照《水工混凝土试验规程》(SL/T 352-2020)<sup>[9]</sup>采用逐级加压法进行。试验时，水压从 0.1 MPa 开始，以后每隔 8 h 增加 0.1 MPa，随时观察试件端面渗水情况，并记录加压结束后试块的渗水高度，见表 5。在水压加至 0.8 MPa 时，试件还未渗水，说明试件抗渗等级为 W8。由表 5 可知，C<sub>180-10</sub> 试件渗水高度在 7.2~11.4 cm。

### 3.4 SEM 电镜

对用量最多的胶结砂砾石 C<sub>180-10</sub> 制样后进行 SEM 电镜扫描，扫描结果见图 6。由图 6 可知，胶结砂砾石界面过渡区表面致密，裂缝与孔洞较少，表明胶凝材料与骨料粘结性较好，碾压情况

表 5 抗渗强度试验后试件渗水高度  
Tab. 5 Impermeability strength test specimen water seepage height

测点	试块 1	试块 2	试块 3	试块 4	试块 5	试块 6
1	9.5	8.3	10.8	10.0	11.3	7.8
2	9.7	8.6	10.3	9.5	11.4	7.9
3	9.4	7.9	10.6	8.8	11.2	7.6
4	9.6	8.2	11.2	8.6	11.5	8.0
5	9.1	7.8	10.7	8.5	10.3	8.6
6	8.9	7.5	9.9	8.7	10.9	8.4
7	8.8	7.2	10.1	8.5	10.6	9.0
8	9.0	7.4	9.7	8.1	10.2	9.3
9	8.7	7.7	9.2	8.3	10.7	8.8
10	8.5	7.5	8.9	7.9	10.5	8.3

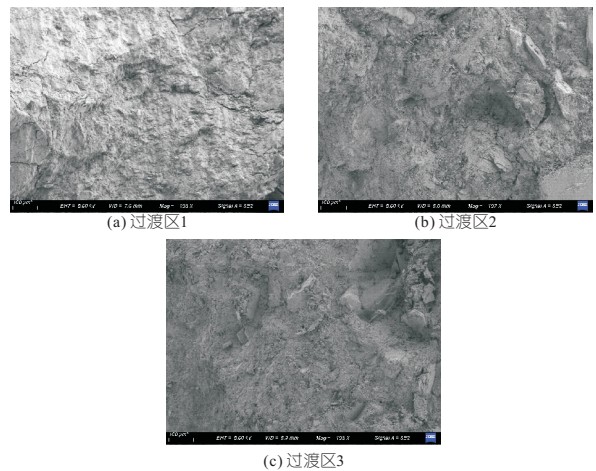


图 6 胶结砂砾石界面过渡区

Fig. 6 Cemented gravel interface transition zone

良好。分析原因有两个，一是在振动碾压过程中使骨料结构更密实，分布更均匀，二是在水泥水化过程中，粉煤灰会消耗产生的 Ca(OH)<sub>2</sub>，从而生成的水化硅酸钙凝胶会提升胶结砂砾石界面过渡区的密实度，弥补了薄弱区，有效削弱了 Ca(OH)<sub>2</sub> 形成较大的结晶产生择优取向的趋势，同时与抗压强度等宏观指标相互印证了可靠性。

### 3.5 施工工艺

#### 3.5.1 层间处理工艺

层间处理工艺可分三种工况：①在已铺筑胶结砂砾石初凝以前，可直接在上方铺筑胶结砂砾石；②在已铺筑胶结砂砾石初凝以后、终凝以前，可先在层面摊铺 20~30 mm 的垫层砂浆(强度应比胶结砂砾石等级高一级)，然后铺筑上方胶结砂砾石，从砂浆摊铺至胶结砂砾石覆盖不宜超过 15 min；③在已铺筑胶结砂砾石终凝以后，即形成了施工冷缝。需通过高压水冲毛或凿毛等方法清除硬化缝面的浮浆及松动骨料(以露出砂粒为准)，冲洗干净，接着在层面摊铺 20~30 mm 的垫层砂浆(强度应比胶结砂砾石等级高一级)，最后铺筑上方胶结砂砾石，从砂浆摊铺至胶结砂砾石覆盖不宜超过 15 min。

### 3.5.2 养护

在施工中浇筑仓内可采用雾炮机等设施进行喷雾养护,施工完成后立即覆盖、洒水保湿,永久外露面养护时间不少于 28 d,确保胶结砂砾石的工作性不损失。另外现场需准备移动式防雨棚等,避免下雨期间影响浇筑质量。

## 4 结论

a. 生产性试验结果均达到设计强度,证实了后续施工材料可按试验配比大规模生产及施工工艺的可靠性。

b. 考虑首次用于水电站主体工程,在实际施工拌制时,C<sub>180</sub>10、C<sub>180</sub>20 均取配合比中胶凝材料的上限值。

c. 为保证胶结砂砾石筑坝时的施工效率,建议使用吨位更大的设备碾压。同时设计龄期强度指标目前为 180 d,为保证施工进度,缩短工期,可调整配合比使其 30 d 或 90 d 就达到设计强度。

d. 为更好地推广胶结砂砾石筑坝技术,建议适当放宽含泥量指标限制。

### 参考文献:

[1] 孙明权,杨世锋,田青青. 胶凝砂砾石材料力学特性、耐久性及其坝型综述[J]. 人民黄河, 2016,38(7): 83-85, 99.

[2] 蔡新,杨杰,郭兴文. 胶凝砂砾石坝研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015,43(5): 431-441.

[3] 中华人民共和国水利部. 胶结颗粒料筑坝技术导则: SL 678-2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[4] 国家能源局. 水工碾压混凝土施工规范: DL/T 5112-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[5] 吴海燕. 胶凝砂砾石材料特性及填筑工艺研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(1): 151-155.

[6] 林育强,石妍,李家正,等. 四级配碾压混凝土现场施工工艺试验研究[J]. 水力发电学报, 2012,31(5): 245-249.

[7] 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.

[8] 罗巍,孔焯,杨会臣. 西河顺江堰引水枢纽整治工程胶结砂砾石坝研究与实践[J]. 四川水利, 2021, 42(4): 137-142.

[9] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

## Productive Experimental Study of Cemented Sand and Gravel for Shaping First-level Hydropower Station

CUI Peng-fei, YU Xing-bo

(CHN Energy Dadu River Laoyingyan (Sichuan) Hydropower Co., Ltd., Ya'an 625499, China)

**Abstract:** Cemented gravel dam construction technique combines the advantages of earth-rock dams and concrete dams, and has broad application prospects. Taking Shaping first-level Hydropower Station as an example, production tests were carried out on C<sub>180</sub>6, C<sub>180</sub>10 and C<sub>180</sub>20 cemented sand and gravel, and core drilling tests were carried out on their compressive strength, splitting tensile strength, permeability and SEM scanning tests at the age of 180 days. The results show that under scientific ratio and reasonable construction technology, the compressive strengths of C<sub>180</sub>6, C<sub>180</sub>10 and C<sub>180</sub>20 have reached 7.1 MPa, 14.8 MPa and 29.4 MPa, respectively. Among them, the impermeability grade of C<sub>180</sub>10 with the largest amount of project consumption is W8. The performance of cemented sand and gravel can achieve the expected results, which verifies the feasibility of the construction plan. Thus, it provides technical support for subsequent construction, and also provides reference examples for subsequent hydropower station construction.

**Key words:** cemented gravel; dam building technology; hydropower station construction; Shaping first-level Hydropower Station

\*\*\*\*\*  
(上接第 55 页)

## Research on Perception of Cultural Ecosystem Services in Water Park Based on Network Text

WU Meng, LI Hu, LU Mei-jun

(School of Human Settlements, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Water park is an important window of ecological civilization construction. Taking 20 national water parks as examples, using the public comment data, the CES dictionary of water park was constructed to analyze the public perception frequency and satisfaction of the CES during and after the COVID-19 pandemic. And then IPA model was used to evaluate water park. The results show that the public focus on water park are consumption, transportation, scenic spot environment and water conservancy engineering, and there are differences in different stages; The frequency of aesthetic value and recreation is the highest, and the frequency of inspiration service is the lowest. The frequency of popular science education is lower during the COVID-19 pandemic; The overall satisfaction is 80.51% during the COVID-19 pandemic and 82.15% after the COVID-19 pandemic ends; The future construction of water park in Henan Province should pay attention to social relations and science education service, while fully exploiting the potential of cultural history and spiritual service. The research is of great significance to the evaluation and planning and construction of water park.

**Key words:** water park; cultural ecosystem service; text of online comments; IPA analysis method