

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250355

大型水电工程胶结砂砾石坝设计研究

黄 维¹, 涂承义², 黄少奇², 叶 甜²

(1. 国家能源局大坝安全监察中心, 浙江 杭州 311122; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 沙坪一级胶结砂砾石坝为胶结砂砾石筑坝技术在大型水电主体工程中的首次应用,其配套设计体系尚有许多亟待完善的技术要点。对此,采用理论分析、物理试验、数值模拟及工程调研等方法,对胶结砂砾石坝结构及构造设计进行了深入研究。结果表明,胶结砂砾石坝断面根据地基条件和筑坝材料等情况综合确定,结构计算推荐采用单一安全系数法;坝体分区宜根据功能要求进行划分,可采用富浆胶结砂砾石作为坝面防渗保护层;坝体一般不设置纵横缝,当建筑物布置需要和施工强度制约时可设置横缝;防渗保护层应设置横缝;坝体横缝与河水接触部位均设置止水,以保护内部胶结砂砾石;胶结砂砾石坝体可不采取温控措施。研究成果为胶结砂砾石筑坝技术在大中型水电工程中的应用积累了宝贵经验。

关键词: 胶结砂砾石坝; 断面设计; 横缝; 纵缝; 水平施工缝; 坝体止水; 坝体防渗; 温度控制; 大型水电工程
中图分类号: TV222;TV64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2026)01-0089-05

Study on Design of Cemented Sand Gravel and Rock Dam for Large Hydropower Project

HUANG Wei¹, TU Cheng-yi², HUANG Shao-qi², YE Tian²

(1. Large Dam Safety Supervision Center, National Energy Administration, Hangzhou 311122, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The CSGR dam of Shaping I-stage is the first application of cemented sand gravel and rock dam construction technology in the main project of large hydropower station, and its supporting design system still has many technical points to be improved. In this paper, theoretical analysis, physical tests, numerical simulation and engineering research methods were used to study the structure and structural design of the CSGR dam. The results show that the section of the CSGR dam is determined comprehensively according to the foundation conditions and dam building materials, and the single safety factor method is recommended for structural calculation; The zoning of the dam body should be divided according to functional requirements, and the rich slurry cemented sand gravel and rock can be used as the anti-seepage protective layer on the dam surface; Generally, the dam body is not provided with longitudinal and transverse joints, and transverse joints can be provided when the building layout needs and the construction strength is restricted; The anti-seepage protection layer of the dam should be equipped with transverse joints; Waterstop shall be set at the contact part between the dam transverse joint and the river to protect the internal CSGR; Temperature control measures may not be taken for the CSGR dam. The research results have accumulated valuable experience for the application of the CSGR dam construction technology in large and medium-sized projects.

Key words: cemented sand gravel and rock dam; cross section design; transverse joint; longitudinal joint; horizontal construction joint; dam waterstop; seepage prevention; temperature control; large hydropower station

1 引言

混凝土重力坝凭借卓越的安全性,在全世界

范围内得到广泛应用,但存在建设成本高、水化热高及施工期温控复杂的问题。为改进这些问题,中国发展了胶结砂砾石。相较于碾压混凝土,胶

收稿日期: 2025-03-03,修回日期: 2025-04-27,接受日期: 2025-05-08

基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技基金(KY2019-SD-11)

作者简介: 黄维(1970-),男,硕士、正高级工程师,研究方向为水工结构设计、大坝安全管理等,E-mail: huang_w@

hdec.com

结砂砾石对原材料进一步放宽,软岩、风化料、人工骨料和掺和料均可用于筑坝,不需水洗、一次筛分,破碎工序简单,永久工程骨料最大粒径为 150 mm。因胶凝材料用量少,水化热较低,大多数工程无需采用水管冷却等温控措施。胶结砂砾石坝是介于碾压混凝土重力坝和面板堆石坝之间的一种坝型,该坝型设计原则与重力坝类似^[1],但胶结砂砾石在施工工艺和材料特性上与传统混凝土存在一定差异,因此胶结砂砾石坝在坝体构造、坝体防裂及温度控制等关键技术环节上均与传统混凝土坝不同。2004 年中国第一座胶结砂砾石坝建造完成,即坝高 16.3 m 的福建尤溪街面水电站下游围堰^[2],该技术主要在一些临时工程及中小型水利永久工程中应用^[3],在大型水电工程领域中的应用尚属空白,受工程规模所限,设计体系中尚有许多亟待完善的技术要点,特别是适应大型水电工程的配套结构与构造设计等均需深入研究。沙坪一级水电站实现了胶结砂砾石筑坝技术在大型水电站主体工程中的首次应用^[4],本文依

托沙坪一级水电站工程建设实践,深入研究胶结砂砾石坝结构及构造设计,以期胶结砂砾石筑坝技术在大中型水电工程中的应用提供参考。

2 胶结砂砾石坝设计

沙坪一级水电站采用河床式开发,装机容量 360 MW,为二等大(2)型工程。左岸布置河床式厂房,右岸河道布置 5 孔泄洪闸,坝高 63.0 m。河床覆盖层厚度为 3.30~54.75 m,总体上右侧比左侧厚。考虑到当地天然河床砂砾石料丰富,泄洪闸下部坝体采用胶结砂砾石筑坝方案。厂房坝段建基面大部分为弱风化蚀变辉绿岩,其中靠闸坝侧#5、#6 机局部覆盖层较厚,采用胶结砂砾石筑坝。本工程胶结砂砾石主要应用在泄洪闸下部坝体、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永久工程部位以及围堰等临时工程,总方量约 $65\times 10^4\text{ m}^3$ 。枢纽上游立视图见图 1。

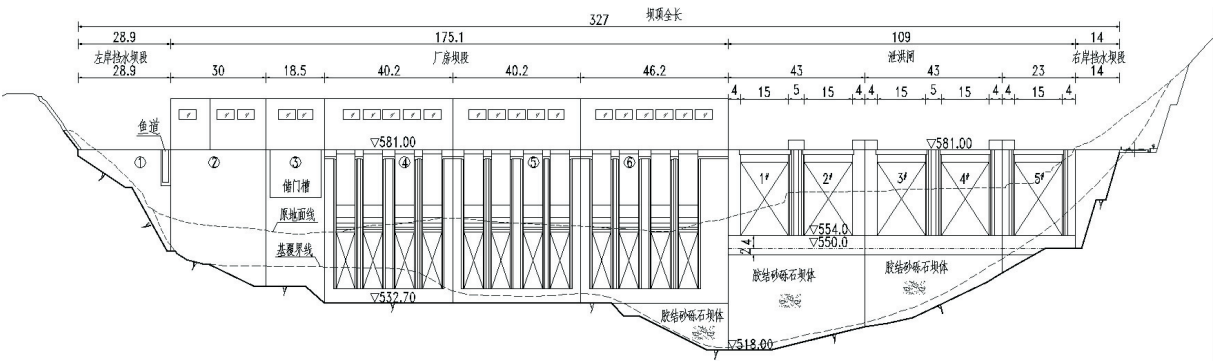


图 1 枢纽上游立视图(单位:m)

Fig.1 Upstream elevation view of the hub

2.1 坝体断面设计和分区

2.1.1 坝体断面设计

胶结砂砾石坝结构计算可参照重力坝相关规定,考虑到目前采用标准试件得到的胶结砂砾石抗压强度标准值与以分项系数表达的极限状态设计法不匹配。根据沙坪一级设计经验,胶结砂砾石坝结构计算可采用单一安全系数法,抗滑稳定及应力计算单一安全系数法可参照混凝土重力坝现行设计规范。抗滑稳定计算采用刚体极限平衡法;应力分析采用材料力学法。地基条件或结构复杂时,可采用有限元法进行计算分析。

根据横缝设置情况,本工程#1~#2 泄洪闸位于同一坝段,选取该坝段作为典型坝段,沿胶结砂砾石与基岩接触面,进行抗滑稳定及应力计算。计算结果见表 1。

表 1 #1、#2 泄洪闸坝段稳定、应力计算结果

Tab.1 Stability and stress calculation results for #1, #2 sluice dam sections

类 别	计算 情况	抗滑稳定安		应力/kPa			
		全系数 K_c					
		计算值	允许值	$\sigma_{\max}$		$\sigma_{\min}$	
基本 组合	正常蓄水位	6.25	3.00	1 105.53	$\leq 1\ 750$	78.44	≥ 0
	设计洪水位	65.19	3.00	620.28	$\leq 1\ 750$	581.59	≥ 0
特殊 组合	完建	稳定	3.00	1 033.01	$\leq 1\ 750$	990.72	≥ 0
	施工	25.28	2.50	677.99	$\leq 1\ 750$	532.89	≥ 0
检修 组合	检修	6.18	2.50	1 131.94	$\leq 1\ 750$	25.51	≥ 0
	校核洪水位	47.48	2.50	644.78	$\leq 1\ 750$	574.08	≥ 0
地震	地震	4.55	2.30	1 409.14	$\leq 1\ 750$	-225.18	≥ -537.82

选取#1、#2 闸孔坝段建立有限元模型进行分析。各工况胶结砂砾石坝体位移、应力计算结果见表 2。地震工况位移和主应力见图 2、3。计算表明,各工况胶结砂砾石坝体各部位应力均未

表 2 胶结砂砾石坝体位移、应力计算结果

Tab. 2 Displacement and stress calculation results of cemented sand gravel and rock dam

工况	顺河向	竖向位	最大主	最小主
	位移/mm	移/mm	应力/MPa	应力/MPa
正常蓄水位	3.96	−5.63	0.22	−3.75
设计洪水位	2.57	−4.45	0.09	−2.85
地震	3.06	−3.83	0.40	−3.63

注:位移顺河向以向下游为正,竖向以向上为正;主应力拉为正,压为负。

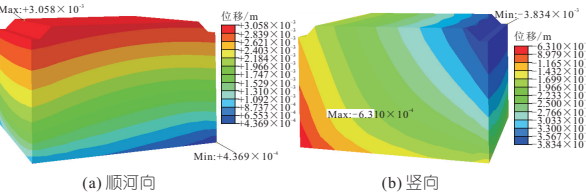


图 2 坝体顺河向和竖向位移云图

Fig. 2 Cloud map of dam displacement along the river and vertical

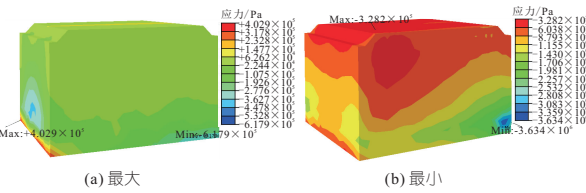


图 3 坝体最大和最小主应力云图

Fig. 3 Cloud map of maximum and minimum principal stress of dam body

超过材料许用应力。

2.1.2 坝体分区

胶结砂砾石坝一般采用梯形断面^[5],沙坪一级闸坝下部胶结砂砾石坝体上游铺盖和下游护坦基础回填砂卵石或胶结砂砾石,基础面宽度为 50 m,经抗滑稳定及应力复核,满足规范要求,因此本工程胶结砂砾石坝体上下游坝坡均为直立坡。

胶结砂砾石坝可根据料源与材料特性,对坝体进行分区设计。考虑到胶结砂砾石材料本身抗渗、抗冻等耐久性指标相对不足,工程中通常对关键部位采用常态混凝土或富浆胶结砂砾石进行强化处理。沙坪一级泄洪闸下部采用 C₁₈₀10 胶结砂砾石筑坝,胶结砂砾石坝体顶高程 548.0 m,坝基最低高程 518.0 m,最大高度为 30 m,顺河向宽度为 50 m。坝基设置 1 m 厚 C₁₈₀20W6F50 富浆胶结砂砾石垫层,坝体上下游防渗层采用 C₁₈₀20W6F50 富浆胶结砂砾石,上游厚 2 m,下游厚 1 m。这种分区设计既保持了胶结砂砾石材料的经济优势,又有效解决了耐久性问题,实现了工程安全性与经济性的统筹优化。泄洪闸典型剖面图见图 4。

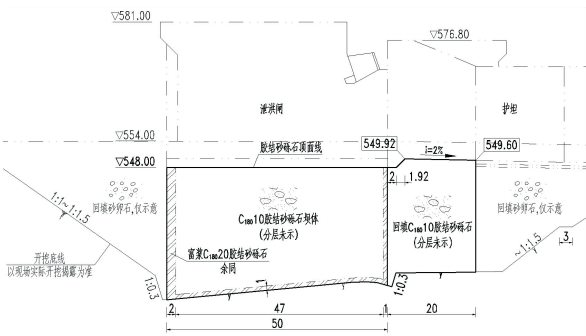


图 4 泄洪闸典型剖面图(单位:高程,m;尺寸,m)

Fig. 4 Typical sectional view of sluice

2.2 坝体分缝和止水

2.2.1 横缝

胶结砂砾石具有低水泥用量带来的水化热温升低的优势,可借鉴碾压混凝土坝薄层通仓浇筑的施工工艺,通过自然散热简化温控措施。理论上可取消坝体纵横缝,但考虑到目前对胶结砂砾石热力学性能研究的局限性,在实际工程应用时为安全计可设置横缝,但横缝间距可比重力坝大,具体可根据胶结砂砾石水泥用量及坝高参照重力坝适当增加。本工程有限元计算表明,最大仓面施工期温度应力低于材料抗拉强度,可不设横缝。胶结砂砾石坝面防渗保护层应设置横缝,横缝间距设置要求与混凝土坝、碾压混凝土坝类似,一般为 15~25 m。守口堡大坝采取了常态混凝土防渗面板,坝体胶结砂砾石未设横缝,只在上游防渗层和下游保护层设伸缩缝,每 15 m 设置一道^[6]。

本工程泄洪闸为整体式结构,根据本工程施工强度及组织,横缝在闸墩部位分缝,5 孔泄洪闸分为 3 个结构段,其中#1~#2、#3~#4 闸孔分别为一个结构段,#5 闸孔为一结构段,结构分缝宽度分别为 43、43、23 m。#1~#2、#3~#4 闸孔上下游设置 C₁₈₀20 富浆胶结砂砾石作为防渗保护层,中间设置一道结构缝,即防渗保护层结构段长 21.50 m。

2.2.2 纵缝和水平施工缝

胶结砂砾石坝采用通仓摊铺碾压的施工工艺,且一般不采取温控措施,从施工便利角度考虑,不宜设置纵缝。胶结砂砾石水平施工缝应进行缝面处理,清除浮浆及松动骨料,并铺垫一层砂浆或水泥净浆。胶结砂砾石层边缘部位还应做专门处理。

2.2.3 坝体止水

胶结砂砾石坝采用富浆胶结砂砾石作为防渗面板时,止水设施应置于防渗层内。为防止水力劈裂进入胶结砂砾石中,上游坝面横缝可根据坝

高设置 1~2 道铜片止水;溢流坝段下游溢流面横缝可根据坝高及流量设置 1~2 道铜片止水;止水片距坝面 0.5~1 m。穿过施工横缝的廊道周边一般需设置 1 道橡胶止水,在溢流坝段有时需加强为 2 道橡胶止水。

本工程各泄洪闸结构段横缝上下游贯通,另外#1~#2、#3~#4 闸孔上下游防渗层居中设置一道结构缝;坝体及防渗层横缝上游侧设两道止水,第一道为铜止水,第二道为橡胶止水,铜止水距上游坝面 0.8 m,两道止水间隔 0.8 m;下游侧设一道橡胶止水,距下游坝面 0.5 m。

2.2.4 坝体排水

从便于坝体排水及基础灌浆等角度考虑,胶结砂砾石坝坝体宜设置廊道。考虑到沙坪一级水电站为河床式厂房,正常运行时下游水位较高,如在闸坝内设置灌浆排水廊道,需布置抽排设施。考虑到本工程为低水头闸坝,为便于回填混凝土施工,坝内不设基础灌浆排水廊道,帷幕灌浆在基础块压重形成后进行,不设排水孔。取消灌浆排水廊道后,虽帷幕检修条件不甚理想,但即使发生帷幕失效极端情况,经分析,闸坝稳定应力满足规范要求。

2.3 坝体防渗

根据已开展的渗透溶蚀试验成果,胶结砂砾石具备一定的抗渗能力,但其胶凝材料掺量较低的特性导致长期耐久性指标难以满足永久工程要求,为保障大坝长期运行安全,并基于功能分区的设计理念,胶结砂砾石坝采用内部承载、外部防护的结构体系。坝体外部设置防渗保护层,重点解决大坝的防渗和耐久性问题。

坝面防渗保护层可根据工程实际采用富浆胶结砂砾石、碾压混凝土或常态混凝土等材料。如顺江堰胶结砂砾石坝,上游防渗面采用 1 m 厚 C20 富浆胶结砂砾石。本工程材料试验得到 C20 富浆胶结砂砾石的 180 d 抗压强度可在 20 MPa 以上、渗透系数接近同标号混凝土、弹模在 18 GPa 以上,可以满足防渗保护层的强度、变形和防渗要求。同时考虑施工的干扰,本工程上下游防渗保护层采用 C20 富浆胶结砂砾石,上游 2 m 厚,下游 1 m 厚,抗渗等级为 W6。

对于坝体难以碾压的不规则连接段,采用 C20 加浆振捣胶结砂砾石替代 C20 富浆胶结砂砾石。C20 加浆振捣胶结砂砾石是在回填基础胶结砂砾石基础上用注浆振捣的施工方式增加 6%~7% 的水泥净浆,水泥净浆中水泥和水的用量分别为 540、1 270 kg/m³。C20 加浆振捣胶结砂砾石

性能与 C20 富浆胶结砂砾石相当。

2.4 温度控制及防裂措施

根据当地气象站多年资料统计,各月平均最高气温发生在 7~8 月。根据胶结砂砾石坝施工计划,选取 8~10 月典型施工时段,研究施工期胶结砂砾石坝体的温度与应力变化规律。

2.4.1 温度计算结果

胶结砂砾石坝体内部最高温度包络图见图 5,坝体距离地面不同高度处内部点温度过程线见图 6,考虑到胶结砂砾石内部降温速率较慢,为展示温度变化全过程,对数据进行处理,使其快速降至稳定温度。可知:①胶结砂砾石坝体内部最高温度达到约 38℃,分布在坝体下部。②胶结砂砾石内部最大温升 12.7℃,且温升速度较慢。③由于没有温控措施,胶结砂砾石内部降温速率较慢,最大降温幅度为 0.04℃/d。④气温等散热条件的影响范围集中在距离坝面 6 m 左右范围内。

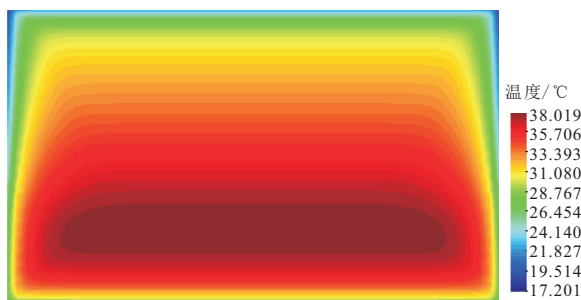


图 5 坝体内部最高温度包络图

Fig. 5 Envelope diagram of the highest temperature inside the dam body

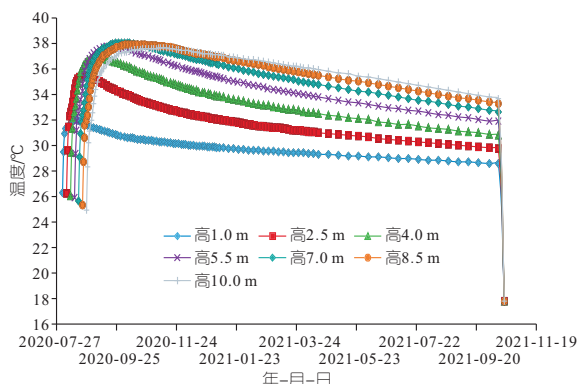


图 6 坝体距离地面不同高度处内部点温度过程线

Fig. 6 Temperature process lines of internal points at different heights of the dam body from the ground

2.4.2 应力计算结果

胶结砂砾石坝体内部最大应力包络图见图 7,坝体距离地面不同高度处内部点应力过程线见图 8。可知:①胶结砂砾石坝体内部最大拉应力为 0.29 MPa,出现在内部温度降至稳定温度时刻,低于胶结砂砾石抗拉强度,不会出现裂缝。②

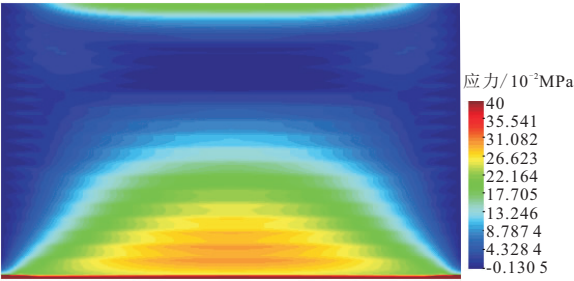


图 7 坝体内部最大应力包络图

Fig. 7 Envelope diagram of maximum stress inside the dam body

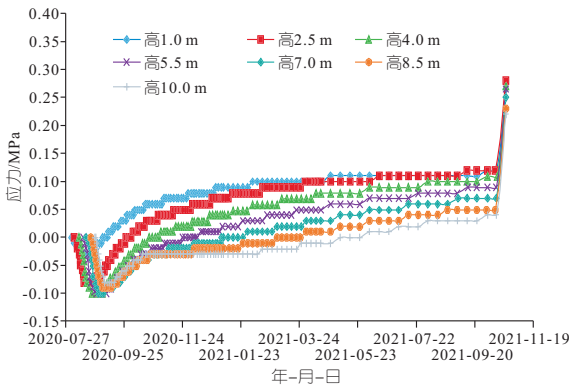


图 8 坝体距离地面不同高度处内部点应力过程线

Fig. 8 Stress process lines of internal points at different heights of the dam body from the ground

胶结砂砾石施工期拉应力较小。这是由于胶结砂砾石弹性模量较低(15.5 GPa),内部温降幅度较小。

2.4.3 温控措施

根据温度应力分析结果,在无温控措施情况下,胶结砂砾石坝体内最高温度约 38℃,最大拉应力为 0.29 MPa,低于胶结砂砾石抗拉强度,无开裂风险,可不采取温控措施。实际施工中,可采用自动喷水器或喷雾对已浇筑混凝土表面养护,覆盖保温被保持表面潮湿。

3 结论

a. 因标准试件抗压强度标准值与概率极限状态设计法不匹配,胶结砂砾石坝结构计算推荐采用单一安全系数法。

b. 胶结砂砾石材料性能偏低,需通过材料分区保障结构性能,坝体上下游设置富浆胶结砂砾石防渗保护层。胶结砂砾石水化热低,根据数值模拟结果,坝体可不设置纵横缝且不采取温控措施。

c. 沙坪一级水电站实现了胶结砂砾石筑坝技术在大型水电站主体工程中的首次应用,系统建立了适用于胶结砂砾石坝的设计技术体系,推

动了胶结砂砾石筑坝技术发展。

参考文献:

[1] 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 J S, MA F L, LI X Y, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application[J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 37(5): 578-582.

[2] 何光同,李祖发,俞钦. 胶凝砂砾石新坝型在街面量水堰中的研究和应用[C]//福建省水力发电工程学会 2006 年学术论文汇编. 2006: 3-6. (HE GUANGTONG, LI ZUFA, YU QIN. Research and application of the new dam type of cementitious sand and gravel in Jiemiao Measurement Weir[C]// Compilation of Academic Papers by Fujian Society of Hydroelectric Power Engineering in 2006. Fujian Provincial Investigation, Design Research Institute of Water Conservancy Hydropower Corporation Limited, 2006:3-6. (in Chinese))

[3] 贾金生,刘宁,郑瑞莹,等. 胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 315-323. (JIA J S, LIU N, ZHENG C Y, et al. Studies on cemented material dams and its application[J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 47(3): 315-323. (in Chinese))

[4] 朱忠平,叶炜民,杨会臣,等. 胶结砂砾石筑坝技术在大型水电工程中的应用研究[C]//中国大坝工程学会. 建造安全韧性绿色的国家水网之“结”. 2024: 11. (ZHU ZHONGPING, YE WEIMIN, YANG HUICHEN et al. Research on the application of cemented gravel dam construction technology in large-scale hydropower projects [C]//Chinese National Committee on Large Dams. Building Safe, Resilient and Green Large Dams for National Water Network. 2024:11. (in Chinese))

[5] 刘中伟,贾金生,冯炜,等. 胶凝砂砾石坝在中小型水利工程中的最新应用与实践[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 44-49. (LIU Z W, JIA J S, FENG W, et al. Latest practice and application of cemented sand and gravel dam to mid-small-scale water conservancy project[J]. Water resources and hydropower engineering, 2018, 49(5): 44-49. (in Chinese))

[6] 王晋瑛. 守口堡水库胶凝砂砾石坝设计与研究[J]. 山西水利科技, 2015(1): 1-4. (WANG J Y. Design and research on the cemented sand-gravel dam for the shoukoubu reservoir[J]. Shanxi hydrotechnics, 2015(1): 1-4. (in Chinese))