

安全监测在胶凝砂砾石围堰（CSG）的应用

王洪岩¹，张金海²，于鑫源³，时浩然⁴

¹ 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京

² 华能澜沧江水电股份有限公司 云南昆明

³ 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京

⁴ 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京

【摘要】 本文主要针对面板坝和碾压混凝土重力坝基础上发展起来的一项新型筑坝技术，简称 CSG（Cemented Sand & Gravel 胶凝砂砾石）筑坝技术。作者介绍了在对 CSG 围堰监测过程中，利用监测仪器数据，剖析了 CSG 围堰堰体内部的变化，从而论证了围堰设计的合理性及运行期的安全性。

【关键词】 CSG 围堰；监测成果；分析

Application of Safety Monitoring in Cemented Sand & Gravel Cofferdam (CSG)

Hongyan Wang¹, Jinhai Zhang², Xinyuan Yu³, Haoran Shi⁴

¹China Power Construction Group Beijing Survey and Design Research Institute Co., Ltd. Beijing

²Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd. Kunming, Yunnan

³PowerChina Group Beijing Survey and Design Research Institute Co., Ltd. Beijing

⁴China Power Construction Group Beijing Survey and Design Research Institute Co., Ltd. Beijing

【Abstract】 This article mainly focuses on a new type of dam construction technology developed on the basis of face-face dam and roller compacted concrete gravity dam, referred to as CSG (Cemented Sand & Gravel) dam construction technology. The author introduced the use of testing instrument data to analyze the internal changes of the CSG cofferdam in the process of monitoring the CSG cofferdam, thus demonstrating the rationality of the cofferdam design and the safety of operation.

【Keywords】 CSG cofferdam; Monitoring results; Analysis

1 引言

胶凝砂砾石筑坝技术是国际上近年发展起来的新型筑坝技术，其特点是采用胶凝材料及砂砾石材料（包括砂、石、砾石等）拌合筑坝。使用高效益的土石方运输机械和压实机械施工，施工快速、节省投资、安全和环境友好。与常规的混凝土与散粒体筑坝相比，有独特的优点，近年在日本、土耳其、西蜡、法国、菲律宾等国的永久工程得到运用。该筑坝技术扩大了坝型选择范围，放宽了筑坝条件，丰富了以土石坝、混凝土坝、堆石坝等为主的筑坝技术体系。通过合理的筑坝技术选择和组合，大坝施工可以充分利用筑坝材料，减少弃料，大幅减少大坝施工对环境的影响，胶凝砂砾石筑坝技术的应用对我国面广量大的中小型水利水电工程建设和众

多的病险工程的出险加固具有重要的意义。

大华桥水电站位于云南省澜沧江上游怒江州兰坪县兔峨乡境内，距兰坪县城 77km，是澜沧江干流上游河段规划梯级开发中的第六级水电站，电站上接黄登水电站，下接苗尾水电站。电站坝址处澜沧江河道呈反“S”状弯曲，河流从 SW240°流向 NW310°的坝址区后又向 SE165°方向流向下游，河流为横向谷。坝线处坝顶高程处河谷宽 202m，枯水期河面宽度 65m。河谷两岸边坡陡峭，坡度在 50~75°，坝址处板岩和石英砂岩所占比例大致相同，岩体断裂构造发育程度较轻，微地貌地形完整性较差。

大坝上游过水围堰采用胶凝砂砾石筑坝技术筑坝，围堰堰顶高程 1426.0m，围堰基础座落在基岩上，建基面高程为 1377.0m，最大堰度 49.0m，围堰

顶宽 7.0m, 最大底宽约 38m, 堰顶长约 121.0m。上游迎水面 1390.0m 高程以上垂直, 1390.0m 高程以下坡比 1:0.3, 下游背水面 1390.0m 高程以上按 1:0.7 台阶面布置, 下游面于 1390.0m 高程设一挑流平台, 平台宽度 9.0m, 平台以下堰坡垂直, 堰体上下游面和基础设 0.5m 厚变态混凝土。

2 基本地质条件

大华桥水电站大坝上游过水围堰胶凝砂砾石坝位于坝轴线上游约 100m, 堰顶高程 1426.0m, 轴线处枯水期河水位高程 1405m, 河水面宽 60~70m。根据河床钻孔勘探结果, 河床覆盖层厚度一般为 10~20m, 河床面地形起伏较大, 最深部靠左岸。覆盖层以冲积层含漂卵石、砾石为主, 基本上可分为三层: 表层漂卵石层、中部冲积砂卵石层及底部含泥砂卵石层。根据现场试验成果, 覆盖层天然含水率为 3.7~5.6%, 天然干密度为 2.19~2.21g/cm³, 属于中等密实~密实状态。渗透变形试验临界坡降平均为 0.53, 破坏坡降平均为 0.64, 渗透破坏类型为过渡型-管涌型, 渗透系数为 $1.56 \times 10^{-2} \sim 9.08 \times 10^{-2}$ cm/s, 属强透水。

围堰左、右岸边坡基本为岩质边坡。左岸自然坡度约 45°, 较平顺, 基岩主要为灰绿色板岩, 岩层产状为 NE3°NW∠80°, 基本无强风化层, 弱风化水平厚度 20~30m。右岸自然坡度约 60°~70°, 较陡峻, 基岩主要为灰绿色板岩, 岩层产状为 NE3°NW∠80°, 强风化层水平厚度 5~10m, 弱风化水平厚度 20~30m。两岸主要发育顺层裂隙, 垂直层面裂隙以及缓倾角裂隙, 边坡整体稳定, 局部存在不稳定的块体。

围堰基础下伏基岩为弱风化的白垩系地层, 总体以中厚层状石英砂岩与板岩互层出露, 岩层产状 NE3°NW∠75°~80°。岩体内构造不发育, 无较大规模断层出露, 但层理较发育, 以陡倾角裂隙为主, 岩体完整性较差。河床段基岩一般无强风化, 弱风化深约 7~12m, 透水性较弱。

3 CSG 围堰安全监测及实施情况

3.1 CSG 围堰安全监测

(1) 监测目的

工程安全监测的目的是了解上游胶凝砂砾石 (CSG) 围堰在施工期及运行期的工作状态, 为设计提供监测数据资料。

(2) 监测项目

按规范规定要求, 并根据工程建筑物布置、结构型式及地质条件等, 在满足监测目的前提下, 其监测项目和仪器设备的布置力求少而精, 并尽量减少施工干扰; 监测仪器设备的布置, 力求能够获取比较全面的围堰实测资料。

本工程为新型材料围堰, 主要设置的监测项目有: ①堰体沉降; ②堰体应力应变及温度; ③堰基及堰体渗流;

(3) 监测布置

①堰体沉降

选择最高断面作为主监测断面, 在堰顶上游侧设置 1 根沉降管, 管底深入基岩, 管口位于堰顶, 在堰顶设管口保护装置。沿管长每隔 5m 设置一个沉降环, 监测堰体变形。

②渗流监测

在布设监测断面堰基和堰体不同高程处布置渗压计, 监测堰基和堰体渗透压力。

③堰体应力应变

在布设监测断面靠近堰基和原河床高程处, 分两层设置三向应变计, 同时, 在应变计组附近布置无应力计, 监测堰体应力应变。

④堰体温度

在布设监测断面内呈网格状布置电测温度计, 网格间距约 5~10m, 监测堰体温度。

(4) 施工期观测及观测资料整理整编

根据《混凝土坝安全监测技术规范》(DL/T5178-2003) 的有关规定及设计文件要求, 结合本工程特点, 在围堰施工期及运行期内对围堰监测仪器进行定期观测, 并及时进行观测数据资料整理整编。

在进行日常观测的同时, 加强现场巡视检查, 记录施工现场中与工程安全有关的信息, 包括各种裂缝、渗水、掉块等现象。

及时进行观测资料整编, 包括施工期及运行期的日常资料整理和定期资料整编。观测资料包括人工巡视检查、观测原始记录、物理量计算成果等。

3.2 监测仪器实施情况

CSG 围堰共布置 3 个监测断面。即 I-I、II-II、III-III 三个监测面。CSG 围堰监测仪器完成情况见表 3.2-1。

截止到目前, CSG 围堰监测仪器已安装埋设完

毕, 共计完成 1 套沉降管 (12 个沉降磁环)、16 支
 渗压计、6 套三向应变计、6 套无应力计、8 支温度
 计的安装工作。

(4) 2015 年 05 月 17 日, CSG 碾压层完成;
 (5) 2015 年 06 月 02 日, 顶层混凝土浇筑完成。

4 CSG 围堰监测成果分析

4.2 CSG 围堰监测成果分析

4.1 CSG 围堰填筑情况

(1) 堰体沉降观测

- (1) 2015 年 01 月 15 日, 开始覆盖层开挖;
- (2) 2015 年 02 月 27 日, 开浇垫层常态混凝土;
- (3) 2015 年 03 月 11 日, CSG 碾压层开始铺

CSG 围堰沉降管已全部完成安装埋设; CSG 围
 堰沉降管监测成果见表 4.2-1, 沉降管各测点沉降分
 布图 4.2-1 和 4.2-2。

表 3.2-1 CSG 围堰监测仪器安装埋设完成情况统计表

序号	仪器名称	单位	仪器数量		备注
			设计量	完成量	
1	沉降管	套	12 个沉降环/1 套	12 个沉降环/1 套	
2	渗压计	支	16	16	
3	三向应变计	套	6	6	
4	无应力计	支	6	6	
5	温度计	支	8	8	
	总计 (支)		48	48	

表 4.2-1 CSG 围堰沉降仪沉降分布成果表 (观测日期: 2016 年 4 月 19 日)

观测日期	各测点沉降量(mm)											备注
	2# 磁环	3# 磁环	4# 磁环	5# 磁环	6# 磁环	7# 磁环	8# 磁环	9# 磁环	10# 磁环	11# 磁环	12# 磁环	
2016-4-20	-5	52	1	-10	6	11	10	-8	0	7	-8	
2016-4-20	-5		1	-10	6	11	10	-8	0	7	-8	剔除 3#测点

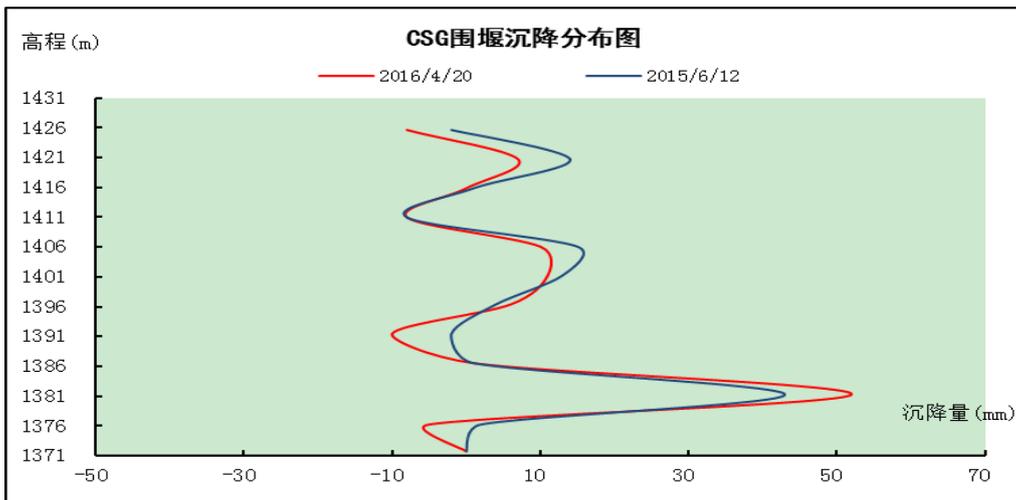


图 4.2-1 CSG 围堰沉降分布图

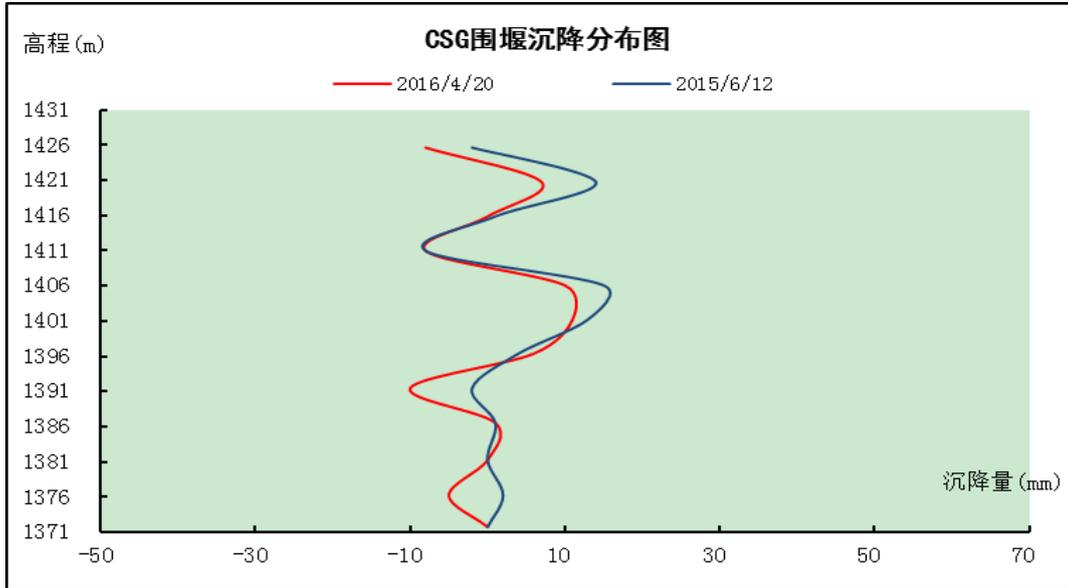


图 4.2-2 剔除 3#测点 CSG 围堰沉降分布图

从监测成果可以看出:

①1#沉降环做为基准点钻孔安装在基岩内, 同时 2#沉降环测点也埋设在基岩钻孔中, 接近基岩面的 3#沉降板测点 (高程 E.1381.217) 为安装在堰体的第一个沉降板, 成孔后孔内地下水不断涌出, 胶凝砂砾石材料被稀释产生膨胀, 考虑到监测仪器的保护, 沉降板周边 30cm 范围不允许振捣, 导致该 3#磁环沉降量较大, 沉降量达到 52mm。根据以往的工程实例及实际的沉降该测点接近基岩面沉降应该较小。

②剔除掉 3#测点沉降量, 从成果表可以看出 CSG 围堰堰体沉降量较小, 最大沉降量发生在堰体中部的 7#、8#测点, 为堰体的中部区域, 沉降量分别为 11mm、10mm, 符合一般规律。

③从监测成果看, 沉降发生在围堰浇筑施工阶段, CSG 围堰建成后, 随之堰体密实的沉降趋于平稳, 可以认定堰体的沉降状况符合设计标准。

(2) 渗压计观测

CSG 围堰建基面高程为 E11377m, 渗压计埋设点高程为 EL1372.8m~EL1411.8m。

渗压计监测成果表见表 4.2-2, 渗透水压力过程线见图 4.2-3。

从围堰渗压计监测成果表及 1-1 断面压力过程线可以看出:

①围堰最大渗透水压力发生在堰前 0-21.5 米 (EL. EL.1372.8m) 位置的 P1-1, 从堰前到堰后渗

透水压力依次递减, 说明堰体的防渗起到了效果。

②随着堰体高程的上升, 在堰体中部的渗透水压力明显较临近基岩面的渗透水压力小, 堰顶安装的渗压计无渗透水压力;

③渗压计的渗透水压力随着上游水位的上涨而增长, 说明水位上涨与埋设的渗压计渗透水压力有着密切关系。

水位越高, 基岩渗透压力越大, 围堰渗透水压力呈现依层递减的变化规律, 符合一般规律。同一层渗压计从堰前到堰后渗透水压力依次递减, 说明堰体的防渗起到了效果。

(3) 应力应变监测

CSG 围堰砼中埋设的三向应变计组主要用于监测大体积砼主应力应变方向, 正值为拉应变, 负值为压应变。考虑到无应力计所产生的自由应变值仅作为参数及其不确定性, 本文所给出的应变值均未扣除自由应变值, 即实测应变值。

围堰共布置应变计及无应力计各 6 套, 目前已全部完成安装埋设, CSG 围堰应变计和无应力计监测成果见表 4.2-3, 各测点应变变化曲线见图 4.2-4。

一般情况下, 应变计和无应力计在碾压砼浇筑前 (初值)、后 (埋设) 都会产生变化, 堰体砼的变形包括两个部分: 一部分由自身变形变化引起的, 另一部分由温度变化引起的。

从观测成果来看, 绝大部分三向应变计组测值处于受压状况, 即便个别测点出现拉应变, 但不代

表是主拉应变, 且所产生的作用力不大, 对此可忽略。

由监测结果可知, 大部分应变计基本处于受压状况, 满足堰体砗不产生拉应力的要求。在各应变

计组中, 安装高程越低应变计所受压应力应变值越大, 基本符合规范要求。堰体受渗水的影响, 温度测值较低, 因此可以认为, CSG 围堰整体碾压填筑质量是满足设计要求的。

表 4.2-2 CSG 围堰渗压计监测成果 (观测日期: 2016 年 4 月 19 日)

测点编号	埋设桩号	高程	渗透水压力 (kPa)	备注
P1-1	堰前 0-21.5	EL.1372.8m	299.52	
P1-2	堰前 0-6.5	EL.1373.87m	294.05	
P1-3	堰后 0+8.5	EL.1372.83m	219.51	
P1-4	堰后 0+23.5	EL.1377.20m	128.46	
P1-5	堰前 0-15.7	EL.1398.8m	11.53	
P1-6	堰 0+0	EL.1398.8m	33.21	
P1-7	堰后 0+18.6	EL.1398.8m	6.03	
P1-8	堰前 0-8.7	EL.1411	-7.01	
P2-1	堰前 0-17.0	EL.1378.40m	258.13	
P2-2	堰 0+0	EL.1381.7m	126.90	
P2-4	堰前 0-8.7	EL.1411	37.02	
P3-1	堰前 0-17.0	EL.1389.6	120.30	
P3-2	堰 0+0	EL.1389.3	119.37	
P3-3	堰后 0+23.5	EL.1389.2	36.12	
P3-4	堰前 0-8.7	EL.1411.8	104.40	

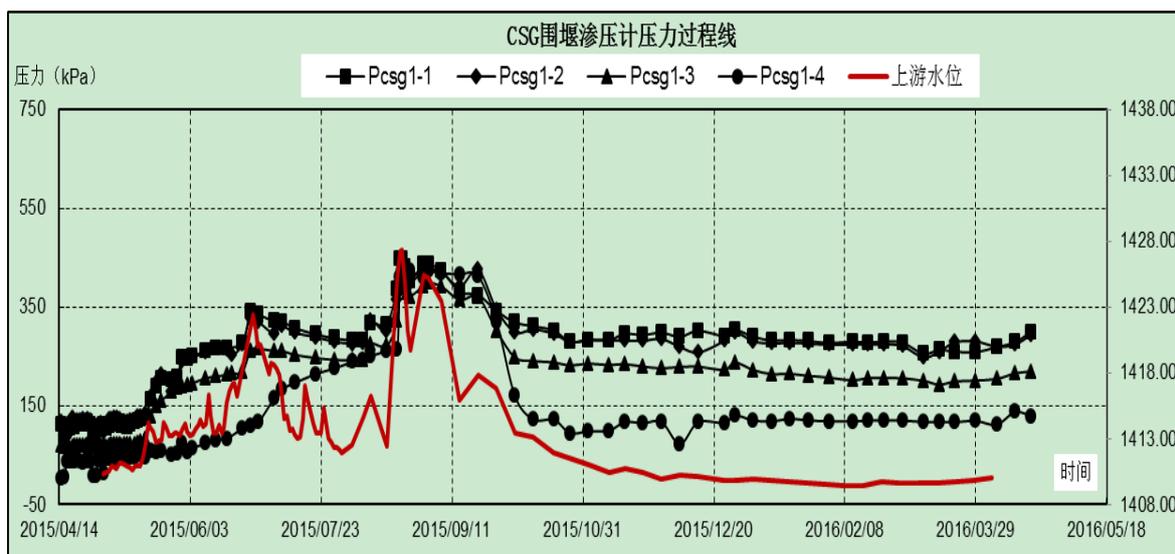


图 4.2-3 CSG 围堰渗透水压力过程线

表 4.2-3 CSG 围堰应变计监测成果表 (观测日期: 2016 年 04 月 19 日)

测点编号	埋设部位	高程	测点方向	应变	备注
				($\mu\epsilon$) 2016-04-19	
S3 1-1-1			垂直	-609.53	
S3 1-1-2	堰前 0-21.5	EL.1381m	垂直偏下 45°	-414.88	
S3 1-1-3			水平向下游	-195.89	
N1-1				-517.09	
S3 1-2-1			垂直	-345.18	
S3 1-2-2	堰前 0-6.5	EL.1381m	垂直偏下 45°	-101.95	
S3 1-2-3			水平向下游	-81.36	
N1-2				-104.01	
S3 1-3-1			垂直	187.60	
S3 1-3-2	堰后 0+8.5	EL.1381m	垂直偏下 45°	-551.33	
S3 1-3-3			水平向下游	94.27	
N1-3				-305.48	
S3 1-4-1			垂直	/	数据异常
S3 1-4-2	堰后 0+23.5	EL.1381m	垂直偏下 45°	-93.41	
S3 1-4-3			水平向下游	-17.98	
N1-4				-136.02	
S3 1-5-1			垂直	-179.99	
S3 1-5-2	堰前 0-6.5	EL.1396m	垂直偏下 45°	-137.71	
S3 1-5-3			水平向下游	-108.91	
N1-5				-320.10	
S3 1-6-1			垂直	-190.47	
S3 1-6-2	堰后 0+8.5	EL.1396m	垂直偏下 45°	-84.17	
S3 1-6-3			水平向下游	-158.26	
N1-6				-218.47	

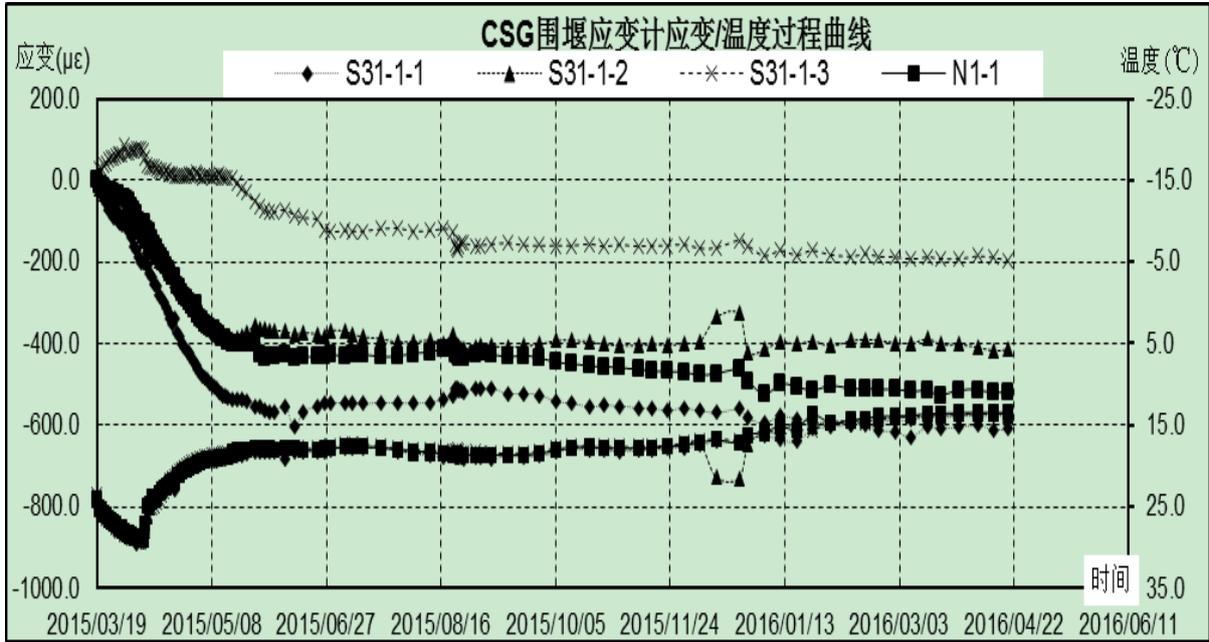


图 4.2-4 围堰应变/温度变化过程线

(4) 温度计观测

CSG 围堰属碾压坝型, 可以看作是一种贫胶碾压混凝土, 水泥用量少, 由砂自身控制温度。目前, 围堰中埋设的温度计基本处于较低温度, 且已全部完成安装埋设。CSG 围堰温度计监测成果表见表 4.2-5, 各测点温度变化曲线见图 4.2-6。

从围堰温度计观测数据来看

①仪器埋设后的温度在 19.5°C~22.7°C, 峰值温度在 29.3°C~40.1°C。绝大部分温度计在 20~25 天达到峰值温度, 少部分 33 天~46 天达到峰值温度。其中 T1-7 这支温度计峰值温度曾达到 40.10°C。

②就温度变化趋势来说, 峰值温度越高的, 温度梯度下降范围越小。由于堰体水泥用量较少, 水泥水化热所带来的温度应力也较小。反之, 在浇筑常态砂时, 水泥水化热一旦没有得到有效控制, 砂温度梯度下降幅度将是一个缓慢或停滞的过程。

③目前位于 EL1411 米的两支温度计的温度要高于 EL1481 米、EL1396 米两层温度计的温度。

总体上看, CSG 围堰浇筑期的温度自身控制是有效的。从最近的监测成果分析认为, 堰体温度基本处于较低温度状态。

表 4.2-5 CSG 围堰温度计监测成果表 (观测日期: 2016 年 4 月 19 日)

测点编号	埋设桩号	高程 (m)	2016 年 4 月	备注
T1-1	堰前 0-21.5	EL.1381m	14.30	
T1-2	堰前 0-6.5	EL.1381m	13.60	
T1-3	堰后 0+8.5	EL.1381m	14.00	
T1-4	堰后 0+23.5	EL.1381m	15.35	
T1-5	堰前 0-15.7	EL.1396m	11.90	
T1-6	堰后 0+18.6	EL.1396m	13.10	
T1-7	堰前 0-6.5	EL.1411	17.20	
T1-8	堰前 0-8.5	EL.1411	18.15	

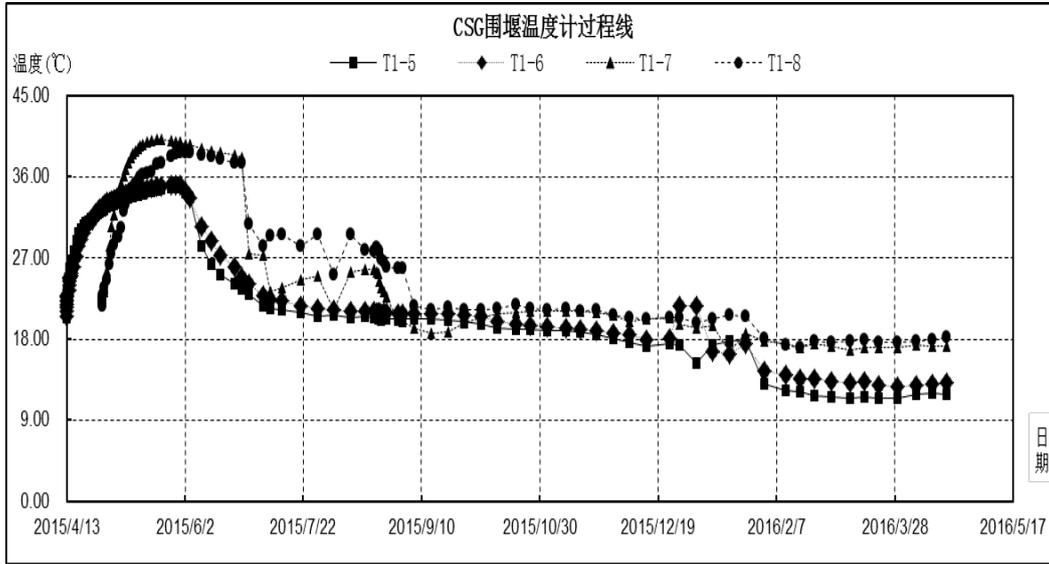


图 4.2-6 CSG 围堰温度计过程线

5 结论

(1) 按规范规定要求, 根据设计提出的在满足监测目的前提下, 监测项目和仪器设备的布置力求少而精, 并尽量减少施工干扰的原则, CSG 围堰堰体中埋设的仪器基本能反映围堰运行实际情况, 能够保证在汛期工况下安全过流。

(2) 根据堰体沉降监测资料分析认为, 沉降主要发生在施工初期, 剔除因钻孔涌水导致接近基岩的 3#测点的沉降值, 最大沉降发生在堰体的中部, 且沉降值较小, 符合堰体的沉降规律。目前各测点测值已基本稳定, 说明堰体沉降已平稳, 基岩所承受的荷载也相对稳定。

(3) 从观测数据来看, 围堰堰基埋设的渗压计所测压力较大, 水位越高, 渗透压力越大, 基本随上游水位变化。在围堰过水期间 (2015 年 8 月 24 日) 渗透压力达到最大, 为 448.36kPa, 与汛前相比, 增长了 261.36kPa。之后, 随着上游水位下降, 渗透压力也逐渐减小, 说明渗压计测值与堰体水位变化吻合。堰体防渗层施工满足设计要求。

(4) CSG 围堰分 3 层共埋设 8 支温度计, 从最近的监测成果分析认为, 实测温度已接近水温温度, 降至 11.90°C~18.15°C 范围。根据埋设期到观测期温度变化可知, 温度在达到峰值后, 梯度下降较快, 表明在填筑期间, 水泥水化热物理变化量不大, 满足设计要求。

(5) CSG 中埋设的三向应变计组分二层布置,

高程在 EL.1381m 和 EL.1396m, 以监测围堰建基面以上应力应变情况。监测数据表明, 堰体主要产生为压应力应变, 个别测点出现拉应变, 与温度有关, 温度越低, 所产生拉应变越大。目前, 观测到的拉应变数值较小, 不能代表堰体出现主拉应变, 可以认为满足设计提出的不产生拉应变的要求。

(6) 经各种监测仪器观测数据验证, CSG 围堰施工质量、挡水及过流标准均达到设计要求, 安全系数较高。

参考文献

- [1] 《岩土工程安全监测手册》第三版 中国水利水电出版社出版 2013 年 10 月
- [2] 《混凝土坝安全监测技术规范》 2003 年 6 月

收稿日期: 2022 年 3 月 9 日
 出刊日期: 2022 年 5 月 12 日
 引用本文: 王洪岩, 张金海, 于鑫源, 时浩然, 安全监测在胶凝砂砾石围堰 (CSG) 的应用[J]. 工程学研究, 2022, 1(1): 53-60
 DOI: 10.12208/j.jer.20220013
 检索信息: 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊
 版权声明: ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS