

DOI: 10.11779/CJGE202106016

# 蓄水初期红石岩堰塞坝混凝土防渗墙变形与受力分析

何 宁<sup>1, 2</sup>, 何 斌<sup>1</sup>, 张宗亮<sup>3</sup>, 张中流<sup>1</sup>, 周彦章<sup>1</sup>, 汪璋淳<sup>1</sup>, 郑 栋<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029, 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029, 3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051, 4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 针对堰塞湖开发利用工程安全保障等技术理论问题, 以牛栏江红石岩堰塞湖综合水利枢纽为工程依托, 设计提出了基于分布式光纤传感技术的堰塞坝混凝土防渗墙变形与受力监测技术及其埋设安装方法, 首次实施并成功应用于红石岩堰塞坝混凝土防渗墙安全监测。分析讨论了蓄水初期堰塞坝混凝土防渗墙变形与受力规律: 分布式光纤传感测量技术满足防渗墙变形受力监测需要和精度要求, 蓄水初期墙体混凝土总体受压, 受蓄水过程影响明显; 堆石体对防渗墙的支撑力存在较多应力集中, 堰塞坝堆石体材料呈明显不均匀性; 蓄水初期墙体混凝土受力总体小于混凝土材料强度指标, 防渗墙保有良好安全余量, 可有效保障防渗墙长期变形和受力安全。

**关键词:** 红石岩堰塞坝; 蓄水初期; 混凝土防渗墙; 分布式光纤监测; 变形受力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)06-1125-06

**作者简介:** 何 宁(1969—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事软土特性和软土地基加固处理方法、环境岩土工程、岩土工程安全监测和检测技术研究。E-mail: nhe@nhri.cn。

## Deformation and stress of concrete cut-off wall of Hongshiyuan dammed body at initial stage of water storage

HE Ning<sup>1, 2</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, ZHANG Zong-liang<sup>3</sup>, ZHANG Zhong-liu<sup>1</sup>, ZHOU Yan-zhang<sup>1</sup>, WANG Zhang-chun<sup>1</sup>, ZHENG Dong<sup>4</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China, 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China, 3. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China, 4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** With regard to the technical and theoretical problems of development and engineering safety guarantee of landslide-dammed lakes, the deformation and stress monitoring technology of concrete cut-off wall of dammed body and its installation method based on the distributed optical fiber sensing technology are designed and proposed. It has been successfully implemented and applied to the safety monitoring of the concrete cut-off wall of Hongshiyuan dammed body. The deformation and stress regulations of the concrete cut-off wall of the Hongshiyuan dammed body at the initial stage of water storage are analyzed and discussed. At the initial stage of water storage, the wall concrete is subjected to pressure in general and obviously affected by the impoundment process. There is more stress concentration in the supporting force of rockfill to the cut-off wall, and the materials of dammed body are obviously inhomogeneous. At the initial stage of water storage, the stress of concrete wall is far less than the strength index of concrete materials. The cut-off wall has good safety margin, and can effectively ensure its long-term deformation and stress safety.

**Key words:** Hongshiyuan dammed body; initial stage of water storage; concrete cut-off wall; distributed optical fiber sensing technology; deformation and stress

## 0 引 言

堰塞体作为特殊的天然土石坝, 一般由于地震、降雨、滑坡、泥石流阻塞山谷, 造成上游段壅水而形成<sup>[1-2]</sup>。堰塞体堵江形成堰塞湖作为重大水旱自然灾害, 具有集雨面积大、蓄水量大等特点, 全球范围内

有文献记载的堰塞体案例 1400 余处, 其中中国记录近 500 处(图 1)<sup>[2-3]</sup>。受地形地貌、地质构造运动及极

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508505)

收稿日期: 2020-07-28

\*通信作者(E-mail: yzzhou@nhri.cn)

端气候条件等综合作用,中国西南尤其是长江上游地区山体滑坡形成堰塞体呈多发、频发态势。

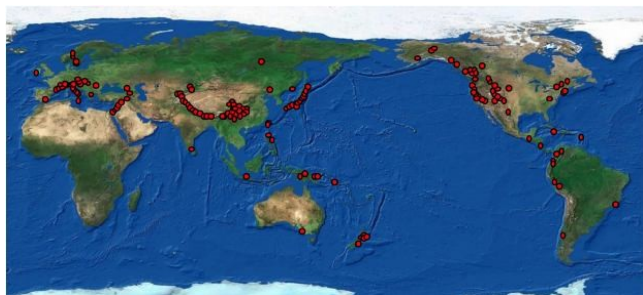


图1 全球350个大型堰塞体分布图

Fig. 1 Distribution of 350 large dammed bodies in the world

目前国内外针对堰塞坝开展相关研究主要包括堰塞坝形成条件和机制、失稳溃决特性及稳定性分析方法、应急除险技术等,堰塞湖开发利用相关研究少见报道。中国云南省牛栏江红石岩堰塞湖为国内外首个完成应急抢险后即开展综合治理和开发利用的堰塞湖综合水利枢纽工程,其综合治理设计和建设技术沿用传统土石坝相关技术理论。由于堰塞体坝料具有超宽级配、大粒径、局部松散、均匀性差等特点,以传统土石坝技术理论为基础的堰塞坝安全保障理论与技术缺少应用先例,堰塞坝安全监测与安全保障技术研究亟待深化开展,堰塞体内部变形及防渗墙体变形受力测量监测技术的研究与应用尚未有效实施。

基于前期系统模型试验研究成果,针对红石岩堰塞坝混凝土防渗墙的工程特点和成墙工艺,结合施工流程,设计提出了基于分布式光纤传感技术的堰塞坝混凝土防渗墙变形-受力监测技术及其埋设安装方法,首次实施并成功应用于红石岩堰塞坝混凝土防渗墙安全监测工作。实测得到了蓄水初期红石岩堰塞坝混凝土防渗墙的变形和受力规律,评价了蓄水初期混凝土防渗墙的工作特性及其安全特性,论证了应用新型分布式传感测量技术的可行性,为红石岩堰塞湖综合水利枢纽工程安全运行提供了技术保障和理论依据。

## 1 红石岩堰塞湖(坝)概况

### 1.1 堰塞湖基本情况

2014年8月3日16时30分,云南省鲁甸县发生6.5级地震,鲁甸县火德红乡李家山村和巧家县包谷垸乡红石岩村交界的牛栏江干流上,地震造成两岸山体塌方堵江形成堰塞湖。堰塞体位于原红石岩水电站取水坝下游600 m处,历史上红石岩左岸滑坡体曾发生堵江,地震发生后,滑坡表面物质被震松,大孤石及局部失稳碎石土滑移进入牛栏江,但滑坡体整体没有滑动,处于稳定状态。右岸滑坡体滑向河床形成泥石

流向下运动,加剧中上部边坡岩体变形破坏,高速倾倒崩滑,迅速向河床堆积形成堰塞体。右岸山体沿河流方向的崩塌长度约890 m,后缘岩壁高度约600 m,最大坡顶高程1843.7 m,属特大型崩塌<sup>[4-6]</sup>。

红石岩堰塞体顶部左岸低、右岸高,右岸边缘为滑坡堆积体,顶部顺河向平均宽度262 m,顶部横河向平均长度301 m,上游迎水面最低点高程1222 m,下游最低点高程1091.7 m,堰塞体左岸最高点高程1270 m,右岸最高点高程1349 m,上游迎水面平均坡比1:2.5、下游面平均坡比1:5.5。1222 m高程顶宽约17 m,顺河向下宽约910 m;沿1222 m高程坝轴线长度约307 m,估算堰塞体总方量约 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。至堰塞湖顶部1222 m,库容 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,回水长度约23 km。

### 1.2 堰塞坝坝料特性与防渗设计

红石岩堰塞坝坝体物质主要来自右岸高处,左岸亦有滑崩物质汇入;以碎块石为主,成份主要为弱、微风化、新鲜白云质灰岩、白云岩。初步估测堰塞体堆积物岩性组合,最大粒径大于5 m,块径50 cm以上约占50%,块径2~50 cm约占35%,块径2 cm以下约占15%。堰塞体渗流量较小,初步判断堆石级配基本连续,密实度较高<sup>[7]</sup>。

堰塞坝坝体防渗设计采用防渗墙和防渗帷幕,两岸防渗通过灌浆洞进行帷幕灌浆。防渗墙顶部长度267 m、厚度1.2 m,最深位置约125 m;由于左岸相对不透水层埋深较大,防渗帷幕较深,在左岸分两层布置灌浆洞,灌浆洞底高程分别为1209, 1135 m。由于左岸堆积体深厚,为避免开挖扰动左岸堆积体,在左岸堆积体范围内开挖灌浆洞,并延伸灌浆洞与地下水位线相接,堆积体范围内进行双排帷幕灌浆防渗,堆积体范围内帷幕深度约90 m,基岩范围内采用单排灌浆防渗,帷幕深度按深入基岩单位吸水率 $\omega \leq 0.05 \text{ L/min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$ 地层5 m控制,灌浆间距1.5 m。右岸崩塌体边坡内设灌浆洞,与 $\omega \leq 0.05 \text{ L/min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$ 线相交,设置单排帷幕,帷幕深度按伸入基岩单位吸水率 $\omega \leq 0.05 \text{ L/min} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$ 地层5 m控制,帷幕间距1.5 m<sup>[8]</sup>。

## 2 分布式传感光纤监测系统设计与安装

### 2.1 传感光纤布置设计

根据采用分布式光纤传感测量技术监测岩土工程及结构变形与受力的试验研究和工程应用成果<sup>[9-12]</sup>:分布式光纤传感技术能够满足土石堤坝内部变形监测需要,可用于混凝土面板与混凝土防渗墙等水工结构变形与受力的分布式监测,测量精度较高。为精确评判红石岩堰塞坝混凝土防渗墙工作特性,采用分布式传感光纤测量监测系统开展防渗墙变形和受力监测研

究。

本次分布式传感光纤监测系统布置于红石岩堰塞坝Ⅱ期槽#38槽段,该槽段防渗墙深度约94 m,槽底高程约1105.00 m,墙顶高程1208.80 m,防渗墙上部20 m为C35钢筋混凝土,下部73.8 m为C35素混凝土。监测系统应变传感光纤布置型式设计为:沿混凝土防渗墙上游面,经防渗墙底部及墙体下游面,布置#1号V0型应变传感光纤,上、下游面光纤平行,构成测量回路引至地面;沿混凝土防渗墙上游面,经防渗墙底部及墙体中部,布置#2号V0型应变传感光纤,上游面与墙体中部光纤平行,构成测量回路引至地面;防渗墙上、下游面外侧各保留10 cm厚度混凝土作为传感光纤保护层,传感光纤在混凝土防渗墙中实际布置如图2。

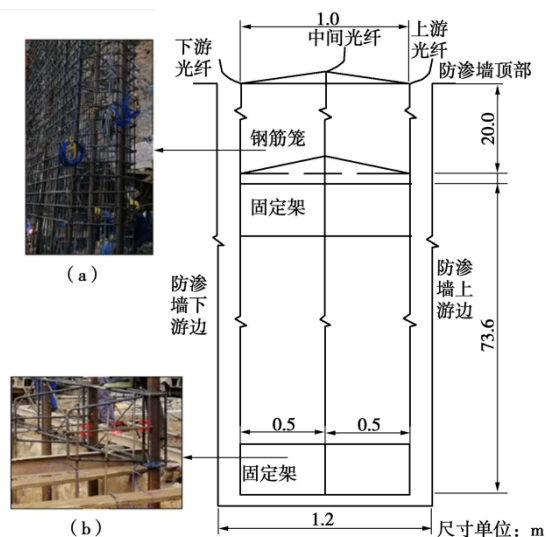


图2 墙体内传感光纤布置设计与安装示意图

Fig. 2 Layout and installation of sensing fiber in wall

## 2.2 传感光纤安装

红石岩堰塞坝混凝土防渗墙采用冲孔成槽、水下浇筑的成墙工艺,浇筑前预埋灌浆导管,灌浆导管每隔10 m设置1组导向固定架以保持灌浆导管垂直;槽顶上部20 m长度范围设置钢筋笼,不另设导向固定架,灌浆导管与钢筋笼直接固定以保持垂直。

结合成墙工艺,传感光纤安装前,分别在上下相邻的两组导向架的上游面、中部和下游面焊接相互平行的3根 $\Phi 22$ 螺纹钢筋,光纤从槽底开始分别捆扎在3根平行钢筋上(图2(a)),沿钢筋逐段向上引至钢筋笼高程后,分别捆扎在钢筋笼对应的钢筋上(图2(b)),光纤继续上引至槽口位置接续光纤跳线,对传感光纤合理保护后,开始测量。

## 3 监测资料分析

防渗墙#38槽段2019年11月1日完成预埋件安

装并验收合格后,于12:00开始浇筑防渗墙混凝土,至11月2日凌晨0:30,墙体混凝土浇筑完成。2019年12月19日,红石岩堰塞湖整治工程下闸蓄水,至2020年1月初蓄水至1179.00 m高程,5月中旬蓄水至1185.00 m高程。防渗墙混凝土浇筑及初期蓄水过程中同步对墙体应变传感光纤进行测量,得到大坝蓄水前后墙体中部沿深度方向的垂直向分布式应变测值及上、下游面光纤的垂直向应变差值见图3(a),(b)。

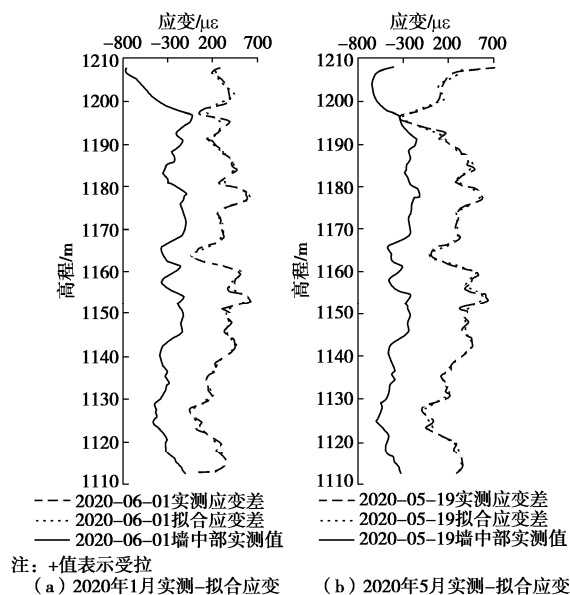


图3 墙体应变测量结果

Fig. 3 Measured strains in wall

### 3.1 防渗墙变形分析

根据材料力学受弯结构变形理论<sup>[13]</sup>,采用受弯结构受力变形特性拟合计算方法对防渗墙上、下游表面应变差值进行拟合(图3),积分计算得墙体沿深度方向水平位移分布曲线<sup>[9-10]</sup>。因堰塞坝混凝土防渗墙入岩深度不小于2 m,可认为墙体根部不发生水平位移,墙体根部水平位移取值为0。墙体顶部水平位移根据红石岩堰塞坝蓄水期安全监测GNSS测量分析结果<sup>[14]</sup>取值,以墙体根部和顶部两点水平位移为已知值。根据图3中墙体上、下游应变差值结果,积分计算得2020年1月6日和5月19日坝前水位分别为1179, 1185 m时,墙体沿深度的水平位移分布曲线如图4(a);基于材料力学的受压结构变形与应变关系<sup>[13]</sup>,通过墙体中部应变传感光纤测得墙体中部应变曲线(图3)计算墙体沉降变形,得到2020年1月6日和5月19日坝前水位分别为1179, 1185 m时,墙体沿深度的沉降分布曲线见图4(b)。

根据国内外混凝土面板堆石坝的面板挠度总结成果<sup>[15-16]</sup>:大坝蓄水后正常运行后百米级混凝土面板堆石坝的面板最大挠度在36~810 mm范围内,面板最

大挠度出现在 1/2 坝高以上位置。红石岩堰塞湖整治工程校核洪水位 1208.06 m, 相应库容  $1.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 正常蓄水位 1200 m, 相应库容  $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 死水位 1180.00 m, 相应库容  $0.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。红石岩堰塞坝为百米级, 由于其堆石材料性质相对复杂, 可视作特殊的混凝土防渗墙堆石坝, 其混凝土防渗墙变形可参考百米级混凝土面板堆石坝的面板变形特性。布置应变传感光纤的#38 槽段位置坝高约 90 m, 图 4 (a) 中基于分布式传感光纤技术的变形监测系统测得大坝蓄水到设计死水位后, #38 槽段混凝土防渗墙墙体最大水平位移为 616.46 mm, 量值与同高度级别的混凝土面板堆石坝的面板最大挠度基本相当, 且沿深度分布规律基本相似, 表明基于分布式传感光纤技术的变形监测系统较为可行。根据#38 槽段混凝土防渗墙墙体水平位移实测规律成果, 墙体沿深度方向整体向下游位移, 墙体最大水平位移发生在约 49 m 高(高程约 1163 m)的墙体位置, 基本位于墙中部, 坝前水位自 1179 m 上升至 1185 m 后, 墙体位移曲线逐渐向下发展。

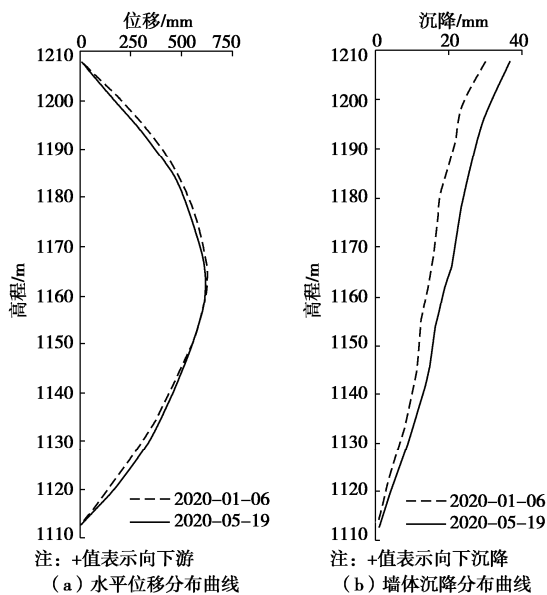


图 4 墙体变形计算结果

Fig. 4 Horizontal displacements and settlements of wall

根据分布式传感光纤变形监测系统 2020 年 5 月 19 日测量结果求得垂直方向变形如图 4 (b), 计算得到#38 槽段混凝土防渗墙顶部沉降 36.5 mm, 与红石岩堰塞坝蓄水期 GNSS 表面变形监测结果<sup>[14]</sup>较为接近, 说明基于分布式传感光纤技术的变形监测系统用于混凝土防渗墙沉降变形监测较为合理, 监测数据表明红石岩堰塞坝混凝土防渗墙沉降变形主要由墙体压缩形成, 墙体基本为整体压缩。

### 3.2 防渗墙受力分析

根据实测成果, #38 槽段防渗墙内应变传感光纤

测得该槽段防渗墙上、下游面混凝土垂直向应变测值在  $-1068.5 \sim 173.1 \mu\epsilon$ , 测得防渗墙上、下游面混凝土垂直向应变实测值沿深度分布曲线如图 5 所示。

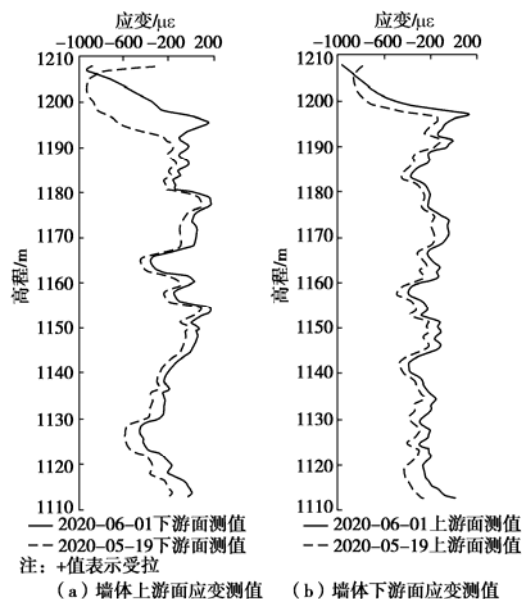


图 5 墙体上、下游面应变测值

Fig. 5 Measured strains in upstream and downstream of wall

根据红石岩堰塞坝蓄水期安全监测分析结果<sup>[14]</sup>, 截至 2020 年 2 月底, 防渗墙槽段内应变计测得防渗墙混凝土垂直向应变变化自安装以来总体呈受压增加趋势。蓄水期间, 上游水位抬升, 受压有所增加, 随着上游水位的趋于稳定, 受压应变变幅趋于稳定。

对比实测结果, 该槽段防渗墙上、下游面混凝土垂直向应变的光纤测值与应变计测值的量值和规律基本一致。图 5 中, 应变传感光纤测得#38 槽段防渗墙混凝土垂直向总体受压, 局部出现受拉区, 即 2020 年 1 月 6 日分别在墙体下游面约 1145, 1168, 1194 m 的 3 个高程出现 3 段长度分别约为 5, 12, 2 m 长度的受拉区, 最大拉应变分别约为 63.6, 173.1, 147.6  $\mu\epsilon$  (图 5 (a))。大坝蓄水稳定在设计死水位后, 监测到#38 槽段防渗墙全深度范围内混凝土压、拉应变总体小于混凝土材料极限应变, 大坝蓄水稳定在设计死水位时防渗墙混凝土保有安全余量; 蓄水期间, 随上游水位抬升, 受压程度有所增加, 受压规律与安装在其它 3 个槽段防渗墙内常规混凝土应变计监测结果吻合。

相对特殊的是, 图 5 中应变传感光纤测值显示#38 槽段防渗墙顶部一定深度范围内墙体混凝土垂直向压应变明显, 下游面约 15 m 深、上游面约 10 m 深, 较墙体下部混凝土压应变更大, 且大坝蓄水初期防渗墙顶部上、下游面混凝土压应变均为墙体全深度范围内的压应变的最大值。分析原因在于该槽段临近右岸



边坡, 区域范围内地震形成的滑坡堆积体未清除, 且部分堆积体尚未完全稳定, 对应顶部一定深度范围内的混凝土防渗墙受力影响明显、导致防渗墙顶部受压所致, 建议加强对堰塞坝坝体右岸滑坡堆积体的安全监测, 并根据防渗墙后期变形和受力监测资料分析防渗墙受堆积体影响的安全特性, 保证工程安全。随着大坝蓄水水位抬升, 防渗墙顶部混凝土所受压应变开始减少, 与墙体下部混凝土应变增长规律相反。

根据材料力学应力应变关系  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , 基于防渗墙中部应变传感光纤的应变测值, 可计算墙体中部垂直应力分布。根据材料力学梁弯矩理论<sup>[13]</sup>, 平行布设结构体两侧应变与结构体本身弯矩关系可由下式表达<sup>[10-12]</sup>, 对结构体弯矩曲线函数求导即可求得结构的水平向剪力分布:

$$M(x) = \frac{I_z E [(\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x))]}{Y} \quad (1)$$

根据安装在红石岩堰塞坝#38 槽段混凝土防渗墙中部传感光纤的应变测值, 计算得到墙体中部混凝土垂直应力沿深度分布曲线见图 6 (a); 基于埋设在其上、下游面应变传感光纤测得应变差值, 计算墙体沿深度方向混凝土的剪力分布曲线如图 6 (b)。

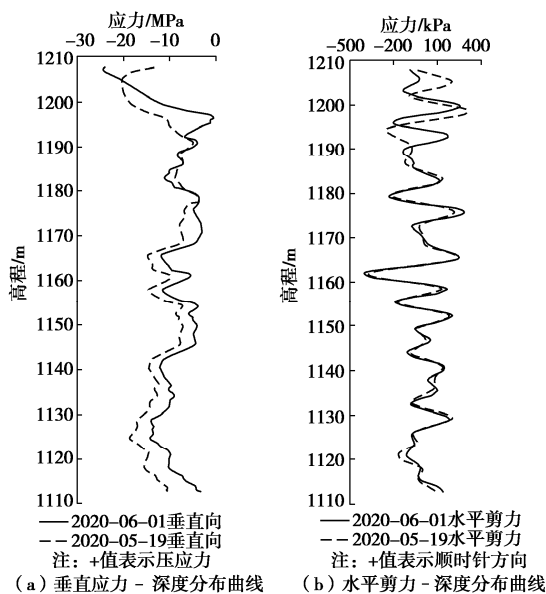


图 6 墙体混凝土应力分布

Fig. 6 Stresses of concrete in wall

图 6 (a) 中防渗墙#38 槽段中部传感光纤应变测值的应力计算结果显示, 蓄水初期防渗墙中部混凝土受力均为压应力, 量值较小, 墙体下部混凝土应力未超过防渗墙 C35 混凝土材料强度指标, 堰塞坝防渗墙混凝土保有良好的安全余量; 墙体垂直应力变化规律与墙体上、下游面混凝土受力变化规律基本一致, 蓄水期间, 上游水位抬升, 墙体受压情况有所增加。

图 6 (b) 中#38 槽段防渗墙水平剪力计算结果显示, 蓄水初期墙体所受水平剪力量值均小于 500 kPa, 总体小于墙体 C35 混凝土强度指标, 红石岩堰塞坝堆石体对其混凝土防渗墙具有良好支撑作用; 2020 年 1 月 6 日—5 月 19 日蓄水水位从 1179 m 升至 1185 m, 坝前水位抬升 6 m 后, 高程 1185 m 以下墙体的水平向剪力分布基本保持不变, 表明随坝前水位升高, 坝前水位以下堆石体对防渗墙支撑力与上游变化库水压力基本同步平衡; 根据垂直方向水平剪应力沿墙深度方向分布曲线, 墙体水平向正、负向波动较大, 表明堆石体对防渗墙的支撑力存在较多的应力集中情况, 说明红石岩堰塞堆石体材料存在明显不均匀性。

## 4 结 论

针对红石岩堰塞湖水利枢纽工程特点, 开展了基于分布式光纤传感测量技术的堰塞坝防渗墙变形与受力监测应用研究, 分析讨论了蓄水初期红石岩堰塞坝混凝土防渗墙变形与受力规律, 得到 3 点结论。

(1) 对比传统方法监测结果和混凝土面板堆石坝规律性监测成果, 分布式光纤传感测量监测技术能够满足混凝土防渗墙变形和受力监测需要和精度要求, 可实现分布式测量监测。

(2) 蓄水初期红石岩堰塞坝防渗墙墙体变形量较小, 墙体混凝土总体受压, 墙体变形与受力规律受蓄水过程影响明显, 沿深度方向整体向下游位移, 最大水平位移发生在中部位置; 墙体混凝土受力总体小于墙体 C35 混凝土材料强度指标, 防渗墙保有良好的安全余量, 防渗墙设计指标满足工程安全需要。

(3) 蓄水初期墙体所受水平剪力远小于墙体混凝土强度指标, 红石岩堰塞坝堆石体对防渗墙混凝土具有良好支撑作用, 可有效保障防渗墙变形和受力安全; 堆石体对防渗墙的支撑力存在较多的应力集中, 堰塞坝堆石体材料呈明显不均匀性。

## 参考文献:

- [1] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 1054 - 1068.
- [2] ERMINI L, CASAGLI N. Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2003, 28(1): 31 - 47.
- [3] 刘 宁, 杨启贵, 陈祖煜. 堰塞湖风险处置[M]. 武汉: 长江出版社, 2016. (LIU Ning, YANG Qi-gui, CHEN Zu-yu. Hazard Mitigation for Barrier Lakes[M]. Wuhan: Changjiang

- Press, 2016. (in Chinese))
- [4] 堰塞湖风险等级划分标准: SL450—2009[S]. 2009. (Standard for Classification of Risk Grade of Landslide Lake: SL450—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [5] 刘建康, 程尊兰, 余涛. 云南鲁甸红石岩堰塞湖溃坝风险及其影响[J]. 山地学报, 2016, **34**(2): 208 - 215. (LIU Jian-kan, CHENG Zun-lan, SHE Tao. Assessment of dam failure and secondary hazards for hongshiyuan dammed lake caused by Ludian Earthquake in Niulanjiang River[J]. Mountain Research, 2016, **34**(2): 208 - 215. (in Chinese))
- [6] 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司. 云南省鲁甸“8.03”地震牛栏江红石岩堰塞湖堰塞体安全评价报告[R]. 昆明: 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司. 2015. (Kunming Engineering Corporation Limited. Safety evaluation report on Hongshiyuan lake of Niulan River during the "8.03" earthquake in Ludian, Yunnan Province[R]. Kunming: Kunming Engineering Corporation Limited. 2015. (in Chinese))
- [7] 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司. 云南省牛栏江红石岩整治工程——堰塞湖风险等级评估与应急抢险、后续处置措施研究及应用[R]. 昆明: 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司. 2015. (Kunming Engineering Corporation Limited. Hongshiyuan regulation project of Niulanjiang, Yunnan Province-Research and application of risk grade assessment, emergency rescue and follow-up treatment measures for landslide lake[R]. Kunming: Kunming Engineering Corporation Limited. 2015. (in Chinese))
- [8] 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, **42**(9): 83 - 86. (ZHANG Zong-liang, ZHANG Tian-ming, YANG Zai-hong, et al. Remediation project of Hongshiyuan dammed Lake in Niulan River[J]. Water Power, 2016, **42**(9): 83 - 86. (in Chinese))
- [9] 丁勇, 王平, 何宁, 等. 基于BOTDA光纤传感技术的SMW工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 719 - 724. (DING Yong, WANG Ping, HE Ning, et al. Application of intelligent SMW pile based on BOTDA[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 719 - 724. (in Chinese))
- [10] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 地面沉降分布式光纤监测土-缆耦合性分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1670 - 1678. (ZHANG Cheng-cheng, SHI Bin, ZHU Hong-hu, et al. Theoretical analysis of mechanical coupling between soil and fiber optic strain sensing cable for distributed monitoring of ground settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1670 - 1678. (in Chinese))
- [11] 许滨华, 何宁, 何斌, 等. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, **40**(8): 20 - 30. (XU Bin-hua, HE Ning, HE Bin, et al. Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, **40**(8): 20 - 30. (in Chinese))
- [12] 何斌, 何宁, 许滨华, 等. 混凝土面板堆石坝面板挠度分布式监测试验[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 837 - 844. (HE Bin, HE Ning, XU Bin-hua, et al. Tests on distributed monitoring of deflection of concrete faces of CFRDs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 837 - 844. (in Chinese))
- [13] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (SUN Xun-fang, FANG Xiao-shu, GUAN Lai-tai. Material Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [14] 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司. 石成金红石岩堰塞坝蓄水期安全监测分析报告[R]. 昆明: 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司. 2015. (Kunming Engineering Corporation Limited. Analysis report on safety monitoring of Hongshiyuan dammed body during water storage period[R]. Kunming: Kunming Engineering Corporation Limited. 2015. (in Chinese))
- [15] 赵新瑞, 吕晓曼, 黄耀英, 等. 基于进化神经网络模型的面板堆石坝沉降和面板挠度预测[J]. 水力发电, 2017, **43**(3): 68 - 72. (ZHAO Xin-rui, LU Xiao-man, HUANG Yao-ying, et al. Settlement and slab deflection prediction of concrete face rockfill dam based on evolutionary neural network model[J]. Water Power, 2017, **43**(3): 68 - 72. (in Chinese))
- [16] 贾金生, 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (JIA Jin-shen, LI Neng-hui. Study on Key Technology for the Safety of High CFRDs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2014. (in Chinese))