

DOI: 10.11779/CJGE201611020

光纤光栅位移计组在围岩变形连续监测中的应用研究

朱赵辉^{1,3}, 任大春², 李秀文^{1,3}, 孙建会^{1,3}, 王万顺^{1,3}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038; 3. 北京中水科工程总公司, 北京 100038)

摘要: 针对多点变位计和滑动测微计在监测地下洞室围岩变形方面存在轴向位移分布连续性不足和无法实现自动化的问题, 提出了将光纤光栅位移传感器通过组装成串应用在围岩变形连续监测的方法。该方法可准确得到仪器埋设沿线任一测点的监测量, 由于光纤光栅位移计组具有精度高的特性, 测得的围岩位移变化与洞室扩挖施工关系密切, 与多点变位计监测结果总体变形规律基本一致, 但光纤光栅位移计组能够监测到整个大尺度的监测线中任意间距的轴向位移分布, 取得的成果信息量更大更为直观。作为对光纤光栅位移计在岩土工程变形监测中的应用探索, 具有一定借鉴意义。

关键词: 光纤光栅位移计; 地下洞室; 围岩变形; 监测

中图分类号: TU454

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)11-2093-08

作者简介: 朱赵辉(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工建筑物安全监控理论和方法。E-mail: zzhbb@163.com。

Application of fiber Bragg grating displacement meter groups in continuous monitoring of deformation of surrounding rock

ZHU Zhao-hui^{1,3}, REN Da-chun², LI Xiu-wen^{1,3}, SUN Jian-hui^{1,3}, WANG Wan-shun^{1,3}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 3. Beijing IWHR Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: In the field of monitoring the deformation of surrounding rock of underground caverns, multi-point displacement meters and sliding micrometers lack continuity in the axial deformation and automatic monitoring, cannot be realized. In view of the above problems, a continuous monitoring method is proposed, that is, the fiber Bragg grating displacement sensors are assembled to monitor deformation of the surrounding rock. This method can get the accurate monitoring value at any point of the hole. Because of the high precision of the fiber Bragg grating displacement meter groups, variation of displacement of the surrounding rock is closely related to the excavation of the caverns, and the wholly deformation law is basically consistent with the results of multi-point displacement meters. But the fiber Bragg grating displacement meter groups can monitor the distribution of axial displacement with in any distance of the whole large-scale monitoring line, and the achieved information is much more and more intuitive. The application of fiber Bragg grating displacement meters in the deformation monitoring of geotechnical engineering is of great significance.

Key words: fiber Bragg grating displacement meter group; underground cavern; deformation of surrounding rock; monitoring

1 研究背景

在大规模地下洞室群开挖过程中, 围岩的稳定性是由多种因素决定的, 围岩变形是判断围岩的稳定性、判断支护效果、指导施工、预防拱顶崩塌、保证施工质量和安全的最基本资料, 也是围岩应力状态变化最直接的反映。围岩变形监测是及时、正确地认识岩体的性状及其稳定性的有效手段, 同时也是检验和优化设计以及指导施工的前提。目前较为常用的监测岩体轴向变形的仪器主要有多点变位计和滑动测微计^[1-3], 前者埋设简单、成本低、易于实现自动化监测, 在现

有工程中已经得到了广泛使用, 但缺点是无法获得轴向位移的连续分布成果(锚头间隔 2~20 m, 甚至间距更大); 后者精度较高、能够得到轴向位移的连续分布成果(间隔 1 m), 但由于成本较高、观测复杂、无法实现自动化监测等原因导致应用较少。

在工程规模不断扩大、施工难度不断增加、信息技术和传感技术不断突破的今天, 实时、连续监测不同深度围岩变形对指导工程施工和保证工程安全具有

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB035900)

收稿日期: 2016-03-23

非常重要的作用。随着大型水电工程纷纷开工，地下洞室尺寸越来越大（如向家坝地下厂房 245.0 m×33.0 m×85.5 m（长×宽×高，下同），溪洛渡地下厂房 368.1 m×31.9 m×75.1 m，小湾地下厂房 298.4 m×30.6 m×86.4 m，龙滩地下厂房 398.9 m×30.7 m×75.1 m），为获取开挖过程中围岩变形的变化规律和特征，几乎所有工程无一例外地在地下洞室群中布置了多点变位计用以监测围岩变形，但这些监测仪器均为间断性分布的“点性”测量，无法进行地下洞室群变形的空间上连续性（线性）监测。仅有少数工程采用了滑动测微计进行轴向位移监测，如水布垭、小湾、大岗山、呼和浩特抽水蓄能电站等，但由于成本高、无法实现自动化等原因，不适于当今水电工程无人值班少人值守的管理理念。为了系统地获得地下洞室群围岩的变形分布状况，进行反馈性分析，为工程开挖和支护等施工提供安全合理的动态设计方案，对地下洞室群围岩不同深度连续的线性变形监测是非常必要的。

随着光纤光栅（FBG）传感技术的发展，在一些实际工程的温度、渗流及变形监测项目中得到应用^[4-15]。为解决连续监测围岩轴向位移分布问题，通过将多支光纤光栅位移计组装成串，准确定位法兰盘间距（标距），利用测得的位移值可以计算出围岩不同深度连续的变形值。结合工程实际，每个孔设计安装 20~30 支位移计，法兰盘间距取 500，1000，1500 mm，通过将多支位移计连接成串并导出整条测线上轴向变形，可连续测得 15~30 m 深度的围岩变形。监测时即便某一测点出现超量程情况，也不会影响其他测点正常监测，从而可以测量围岩的沿整条测线上轴向的变形情况，且光纤光栅传感器具有精度高、易于实现自动化等优点，适合于作为连续测量洞室围岩变形的传感器。

白鹤滩水电站地下厂房规模巨大（438 m×34 m×88.7 m），地质条件复杂，柱状节理玄武岩和层内层间错动带对洞室稳定性影响较大，同时开挖过程中发现片帮和掉块现象严重，断层、陡倾角裂隙和层间错动带发育。本文以白鹤滩水电站左岸地下厂房为依托针对洞室围岩变形进行研究，制定针对性的应对措施和埋设方案，从采购运输、率定检验、光缆熔接、仪器埋设安装、保护、观测等多方归纳总结提炼出一套有效的实施方法，具有重要的科研价值。

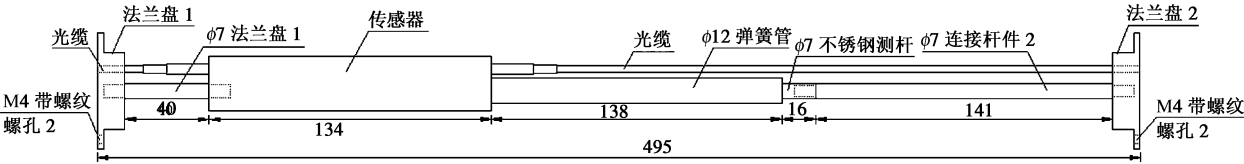


图2 单支位移传感器组装示意图

Fig. 2 Assembly of single displacement sensor

2 监测仪器安装方法及原理

2.1 光纤光栅位移计组的设计

每个光纤光栅位移传感器间距 500 mm（或 1000 mm）。连接时考虑采用法兰盘 1 和法兰盘 2 将两个位移传感器进行连接，预拉后两个法兰盘两端间距保持 500 mm（或 1000 mm）。各组件照片如图 1 所示，各组件通过图 2 所示进行装配得到单支光纤光栅位移计，多支位移计通过法兰盘 1 和法兰盘 2 首尾相连后即得到光纤光栅位移计组，连接方法如图 3 所示。

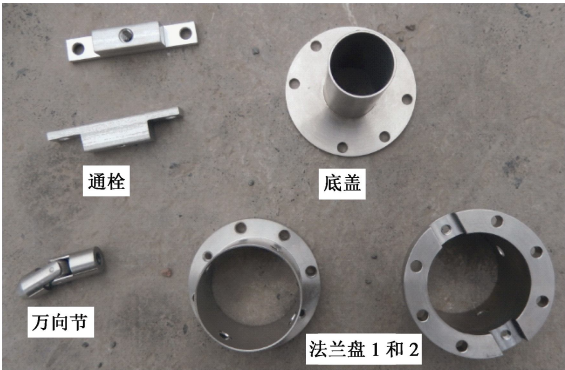


图1 光纤光栅位移计组各组件照片

Fig. 1 Components of fiber Bragg grating displacement meter group

2.2 保护设计

为防止灌浆时仪器遭到破坏，同时隔离传感器活动部位和水泥浆液，在光纤光栅位移传感器连接装置外套上保护管进行保护。保护管选用 Φ40（管壁厚 2 mm）和 Φ50（管壁厚 3.7 mm）的 PVC-U 管。传感器组保护管安装完成后，两支光纤光栅传感器组成的位移传感器组局部连接如图 4 所示。

2.3 计算原理

(1) 光纤光栅位移计

$$\Delta L = A[(\lambda_1 - \lambda_{10}) - (\lambda_2 - \lambda_{20})]^2 + B[(\lambda_1 - \lambda_{10}) - (\lambda_2 - \lambda_{20})] + C \quad (1)$$

式中， ΔL 为仪器长度变化量（mm）， A ， B ， C 为多项式系数， A 的单位是 mm/nm²， B 的单位 mm/nm， C 的单位 mm； λ_1 ， λ_2 为当前光栅波长（nm）； λ_{10} ， λ_{20} 为初始光栅的波长（nm）。

(2) 振弦式位移计

$$\Delta L = G(R_i - R_0) \quad , \quad (2)$$
式中, ΔL 为各锚头与相应传感器两点间的位移 (mm), R_i 和 R_0 分别为当前和初始频模读数 (Digit, Digit = $f^2/1000$)。

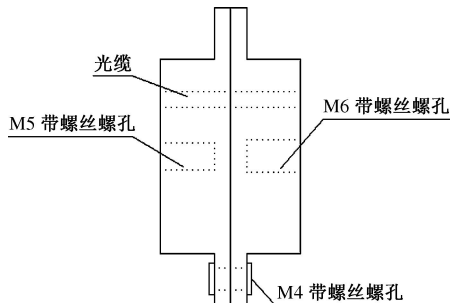


图 3 法兰盘 1 和法兰盘 2 连接示意图

Fig. 3 Connection of flange 1 and flange 2

(3) 成果对比原理

在上游侧拱脚、顶拱、下游侧拱脚安装四点式或五点式变位计 (岩面距分别为 1.5, 3.5, 6.5, 11.0 m 或 1.5, 3.5, 6.5, 11.0, 17.0 m); 每个光纤光栅位移计安装孔内安装 20 支光纤光栅位移计 (岩面距分别为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5, 11.5, 12.5, 13.5, 14.5, 15.5 m)。由于单支光纤光栅位移计测得的是其两端法

兰盘范围内的变形情况, 为与振弦式多点变位计监测成果对比分析, 参照土体位移计计算原理, 以每孔的末端光纤光栅位移计 (岩面距 15.5 m) 为基准, 将不同测点的围岩变形累加, 得到岩面距为 1.5, 3.5, 6.5, 10.5, 15.5 m 的围岩位移。

3 监测设计及布置

在左岸主厂房布置了 0+019.4 和 0+152.0 两个光纤光栅监测断面, 0+019.4 断面光纤光栅仪器布置如图 5 所示。上游侧拱肩、顶拱、下游侧拱肩布置 3 个光纤光栅位移计安装孔, 每孔安装 20 支光纤光栅位移计。与光纤光栅位移计对应的四点式多点变位计在两个断面的拱脚位置。

4 工程概况及地质条件

4.1 洞室开挖过程

左岸主副厂房洞开挖尺寸为 438 m×31 m (34 m) ×88.7 m (长×宽×高), 计划分 10 层进行开挖, 主副厂房分层开挖示意图如图 6 所示, 目前已经完成第一层、第二层开挖, 正进行第三层 III₁ 区、III₂ 区开挖施工, 各层开挖时间见表 1, 当前开挖剖面图见图 7。光纤光栅位移计监测断面具体开挖时间见表 2。

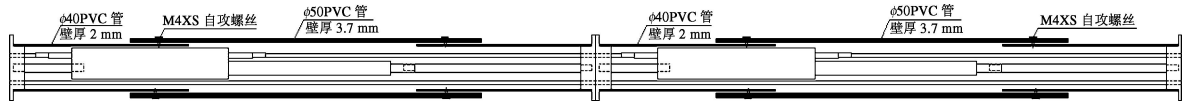


图 4 位移传感器保护组装置示意图

Fig. 4 Protection assembly of displacement sensor

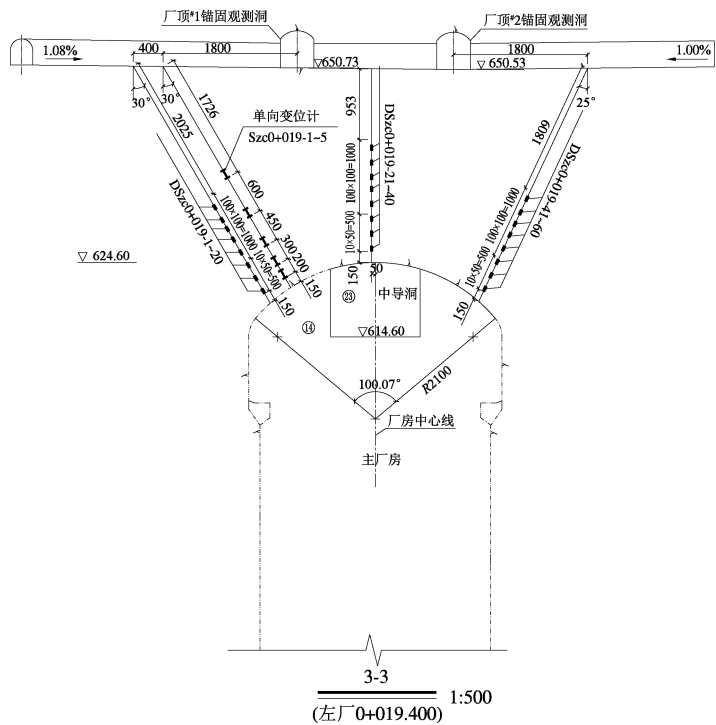


图 5 0+019.4 断面光纤光栅仪器布置图

Fig. 5 Layout of fiber Bragg grating meter of 0+019.4 section

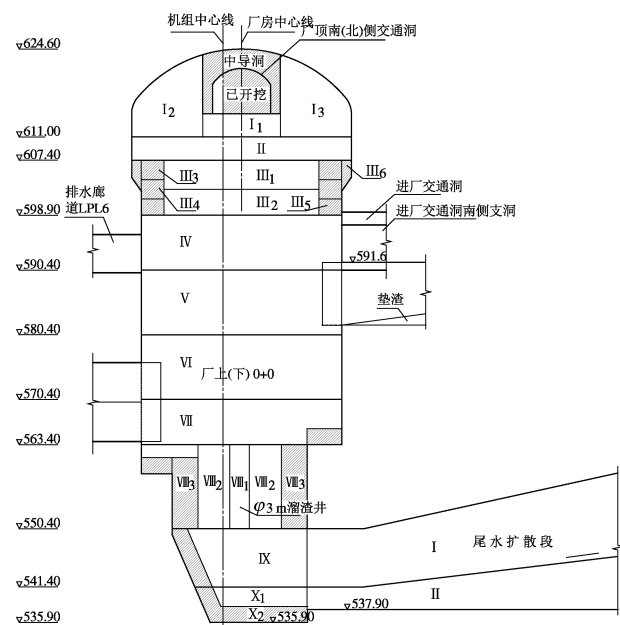


图 6 左岸厂房分层开挖示意图
Fig. 6 Excavation at left bank of power plant

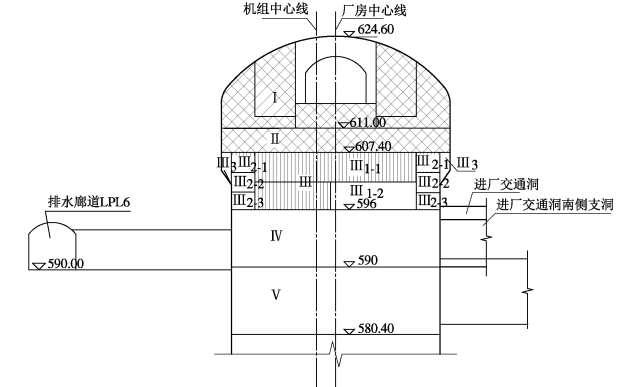


图 7 厂房当前开挖剖面图(截至 2015 年 7 月 31 日)
Fig. 7 Excavation profile of power plant (by July 31, 2015)

表 1 各层开挖高程、区域相应时间表

开挖层数 及高程	区域	开挖时间	完成时间
第一层 EL624.6— EL611.0	上游侧 I ₁ 区	2014-05-22	2014-10-02
	下游侧 I ₂ 区	2014-06-20	2014-09-04
	上游侧 I ₃ 区	2014-10-17	2014-12-05
	下游侧 I ₄ 区	2014-09-19	2014-12-04
第二层 EL611.0— EL607.4	II ₁ 区上游侧保护层	2015-03-15	2015-05-21
	II ₂ 区底板拉槽	2015-03-10	2015-04-09
	II ₃ 区下游侧保护层	2015-03-15	2015-05-21
第三层 EL607.4— EL598.9	III ₁₋₁ 上游侧底板		
	左厂 0+015~0+090.0 拉槽		
	上游侧		
	0+062~0+300 边墙扩挖	正在施工	
	下游侧		
第四层 EL598.9— EL590.0	0+092~0+300 边墙扩挖		
	上游侧 III ₁₋₂ 区		
第五层 EL590.0— EL580.40	0+180~0+250 拉槽		

4.2 地质条件

岩层走向与厂房轴线小角度相交,围岩主要由 $P_2\beta_3$ 和 $P_2\beta_3$ 层新鲜的隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、

杏仁状玄武岩、角砾熔岩等组成,岩质坚硬,其中 $P_2\beta_2^3$ 层第 7 岩性层为第二类柱状节理玄武岩,厚度约 20~25 m,出露于#6~#8 机组边墙底部及底板部位。 $P_2\beta_2^3$ 顶部的 $P_2\beta_2^4$ 层为厚 20~80 cm 的凝灰岩,岩质软弱,遇水易软化,该层出露于厂房边墙中下部。

表 2 光纤监测断面分区开挖时间

Table 2 Time of excavation of fiber monitoring section			
监测断面 (桩号)	区域	开挖时间	支护时间
0+019.4	上游侧 I ₁ 区	2014-08-30	2014-09-15
	下游侧 I ₂ 区	2014-07-22	2014-08-12
	上游侧 I ₃ 区	2014-12-14	2014-12-20
	下游侧 I ₄ 区	2014-09-29	2014-10-08
	上游侧边墙 II ₁ 区	2015-05-11	2015-05-18
	底板拉槽 II ₂ 区	2015-04-11	—
	下游侧边墙 II ₃ 区	2015-05-06	2015-05-10
0+152.0	上游侧 I ₁ 区	2014-09-14	2014-09-17
	下游侧 I ₂ 区	2014-07-28	2014-09-17
	上游侧 I ₃ 区	2014-11-25	2014-12-03
	下游侧 I ₄ 区	2014-10-10	2014-11-13
	上游侧边墙 II ₁ 区	2015-05-02	2015-05-10
	底板拉槽 II ₂ 区	2015-03-23	—
	下游侧边墙 II ₃ 区	2015-05-06	2015-05-10

断层发育 f_{720} 、 f_{721} 、 f_{717} 等,规模较小,主要为陡倾角结构面,为岩块岩屑型;长大裂隙有 T_{720} 和 T_{721} ,为陡倾角硬性结构面;层间错动带 C_2 斜穿厂房边墙中下部,沿 $P_2\beta_2^4$ 凝灰岩中部发育,错动带厚度 10~30 cm,泥夹岩屑型。

5 监测成果分析

通过对光纤光栅位移计组与振弦式多点变位计连续十个月的监测,取得了阶段性成果,为增强可比性,本次分析将多点变位计基准值选取时间修改为对应位置处光纤光栅位移计组的基准值日期。

5.1 围岩变形与洞室施工关系

各断面不同部位围岩变形统计见表 3,0+019.4 断面光纤光栅位移计监测到的浅表部围岩累计变形量在 2.85~12.69 mm 之间;0+018.4 断面多点变位计监测到的浅表部围岩累计变形量在 4.48~22.54 mm 之间。0+152.0 断面光纤光栅位移计监测到的浅表部围岩累计变形量在 1.81~6.44 mm 之间;0+152.0 断面多点变位计监测到的浅表部围岩累计变形量在 2.58~10.00 mm 之间。从两个断面的成果来看,光纤光栅位移计监测到的围岩变形总体小于多点变位计。

(1) 0+019.4 断面顶拱部位的光纤光栅位移计和 0+018.4 断面顶拱部位的多点变位计监测围岩不同深度位移-时间变化曲线见图 8,9。

表 3 各断面围岩变形统计表							
Table 3 Deformation of surrounding rock of different sections (mm)							
断面	仪器类型	上游拱肩 (拱脚)		顶拱		下游拱肩	
		表部	10.5 (11)m	表部	10.5 (11)m	表部	10.5 (11)m
19.4	光纤光栅位移计	12.69	0.65	4.28	0.24	2.85	0.09
18.4	多点变位计	22.54	3.12	4.48	2.26	5.93	5.07
152	光纤光栅位移计	3.17	-0.11	2.22	1.81	6.44	-0.06
152	多点变位计	2.58	0.78	4.04	0.41	10.00	5.81

注: 光纤光栅位移计选取的深部位移为 10.5 m 深处, 多点变位计选取的深部位移为 11 m 深处。

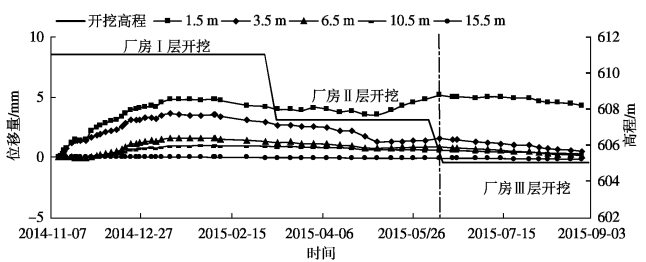


图 8 0+019.4 断面顶拱围岩位移过程线 (光纤光栅位移计组)
Fig. 8 Process lines of displacements of surrounding rock at top of 0+019.4 section (fiber Bragg grating displacement meter group)

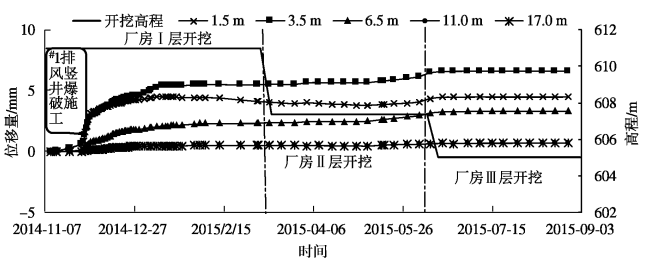


图 9 0+018.4 断面顶拱围岩位移过程线 (多点变位计)
Fig. 9 Process lines of displacements of surrounding rock at top of 0+018.4 section (multi-point displacement meter)

- a) 受 2014 年 11 月 28 日 0+032.0—0+037.0 位置处^{#1} 排风竖井爆破施工影响, 围岩位移略有增长, 光纤光栅位移计 DSzc0+019-21~40 测点监测到的围岩位移最大变化量为 0.77 mm (1.5 m 深度), 多点变位计 Mzc0+018-2 监测到的围岩位移最大变化量为 0.98 mm (1.5 m 深度)。
- b) 受 2014 年 12 月 10 日至 2014 年 12 月 16 日上游侧 I₃ 区 0+013.0~0+018.0 扩挖影响, 围岩位移略有增长, 光纤光栅位移计 DSzc0+019-21~40 测点监测到的围岩位移最大变化量为 0.41 mm (1.5 m 深度), 多点变位计 Mzc0+018-2 监测到的围岩位移最大变化量为 0.56 mm (3.5 m 深度)。
- c) 由于厂房第二层、第三层开挖后厂房开挖施工部位高度差距离顶拱逐渐增大, 对顶拱围岩变形影响

- 较小。第二层开挖期间, 光纤监测围岩变形最大变化量为 0.86 mm (1.5 m 深度), 多点变位计监测围岩变形最大变化量为 0.64 mm (3.5 m 深度)。目前 DSzc0+019-21~40 测点各深度处围岩位移处于平稳状态, Mzc0+018-2 测点各深度处围岩位移处于平稳状态。
- (2) 0+152 断面顶拱部位的光纤光栅位移计和多点变位计监测围岩不同深度位移—时间变化曲线见图 10, 11。光纤光栅位移计 DSzc0+152-21~40 测点监测到的围岩变形目前整体表现为受拉状态。受 2014 年 11 月 26 日至 2014 年 12 月 2 日上游侧 I₃ 区左厂 0+142.0~0+152.0 扩挖影响, DSzc0+152-21~40 监测到的围岩位移增长 0.04 mm (1.5 深度), 多点变位计监测到的围岩位移有略微增长, 最大变化量为 0.37 mm (1.5 m 深度)。厂房第二层开挖期间, 光纤监测围岩位移增长 2.82 mm (1.5 m 深度), 多点变位计监测围岩位移增长 2.23 mm (1.5 m 深度), 目前 Mzc0+152-2 测点各深度处围岩位移处于平缓状态。

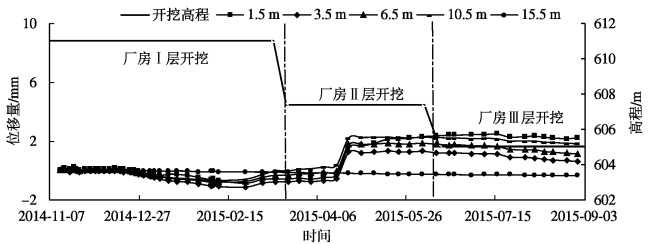


图 10 0+152 断面顶拱围岩位移过程线 (光纤光栅位移计组)
Fig. 10 Process lines of displacements of surrounding rock at top of 0+152 section (fiber Bragg grating displacement meter group)

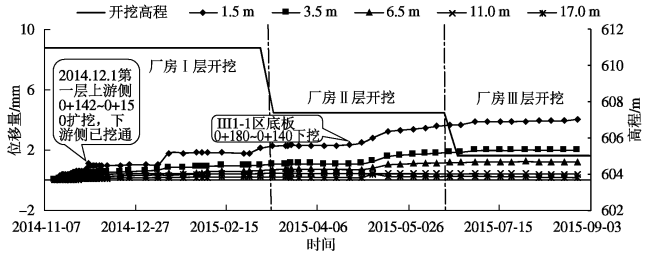


图 11 0+152 断面顶拱围岩位移过程线 (多点变位计)
Fig. 11 Process lines of displacements of surrounding rock at top of 0+152 section (multi-point displacement meter)

- (3) 由以上分析可以得出:
- a) 部分多点变位计和光纤光栅位移计对围岩变形的响应点基本一致, 2015 年 6 月中旬, 厂房 II 层开挖完成及支护施工逐步完善, 由于第 III 层开挖面距离的增大, 厂顶围岩对施工的变形响应相对较小。
- b) 厂房围岩由于分层深度的不同, 围岩应力状态受开挖影响也不同, 加之各层围岩性质之间存在差异, 围岩分层的位移不一致, 甚至存在一定差异; 厂房光纤围岩位移与多点变位计位移存在差异原因有以下几

点：①由于二者安装部位、测量原理不同，以及围岩本身的特性和不确定性等因素，相近位置的两种仪器在相同工况下所反映的围岩变形并不完全一致。如 0+18.4 断面上游侧多点变位计安装在拱脚位置，0+19.4 断面上游侧光纤光栅位移计安装在拱肩位置，相对来说拱脚受开挖爆破影响较大。②多点变位计埋设于拱脚部位，而光纤光栅位移计组的传感器埋设于拱肩部位，拱脚部位受下层开挖影响大于拱肩部位，所以总体上光纤光栅位移计组监测到的变形量值均小于多点变位计。

5.2 围岩不同深度分布规律

图 12 为 0+019.4 断面光纤光栅位移计组和 0+018.4 断面多点变位计的岩面距 - 围岩位移变化曲线，图中变形时段按#1 排风竖井爆破后（2014 年 11 月 29 日）、0+018.4 断面附近上游侧 I₃ 区扩挖后（2014 年 12 月 16 日）、底板 II₂ 区拉槽后（2015 年 4 月 16 日）、上游侧 II₁ 区边墙及下游侧 II₂ 区边墙开挖后（2015 年 5 月 15 日）、当前观测日期（2015 年 8 月 29 日）进行选择。

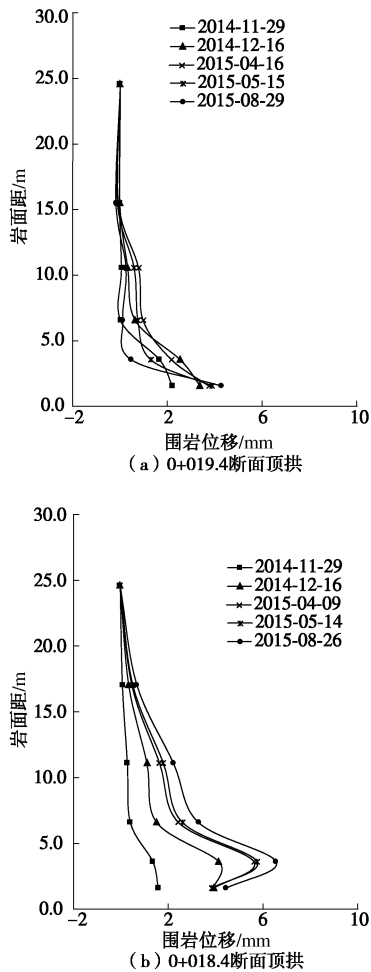


图 12 0+019.4 (0+018.4) 断面顶拱岩面距 - 位移变化曲线
Fig. 12 Curves of displacements at different depths at the top of 0+19.4 (0+018.4) section

图 13 为 0+152 断面光纤光栅位移计和多点变位计的岩面距 - 围岩位移变化曲线，图中变形时段按 0+152.0 断面附近上游侧 I₃ 区扩挖后（2014 年 11 月 26 日）、底板 II₂ 区拉槽后（2015 年 3 月 23 日）、上游侧 II₁ 区边墙及下游侧 II₃ 区边墙开挖后（2015 年 5 月 6 日）、当前观测日期（2015 年 8 月 29 日）选择。

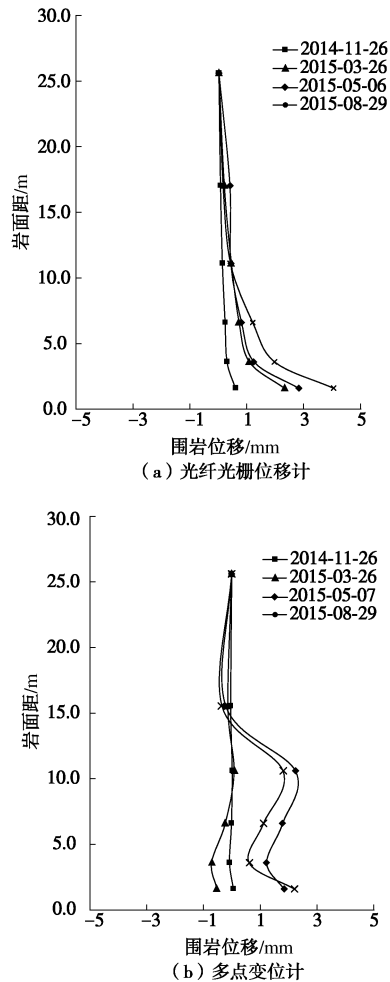


图 13 0+152 断面顶拱岩面距 - 位移变化曲线

Fig. 13 Curves of displacements at different depths at the top of 0+152 section

图 14, 15 为 0+019.4 断面光纤光栅位移计和 0+018.4 断面多点变位计监测围岩位移分布图，从图中可以直观看到当前两种监测仪器测得的围岩变形情况。

(1) 光纤光栅位移计测得围岩表层变形最大（距围岩表面 1.5 m 深度），由洞壁表层逐渐向围岩深部延伸，围岩变形由表及里呈逐渐减弱或收敛的变化趋势（围岩最深部位—锚固观测洞底板为相对不动点，位移为零）。

(2) 多点变位计测得围岩 3.5 m 或 6.5 m 深度变形最大，上游侧拱脚处达 25.09 mm（6.5 m 深度），钻孔取得岩芯显示在 6.5 m 处岩芯相对较碎。

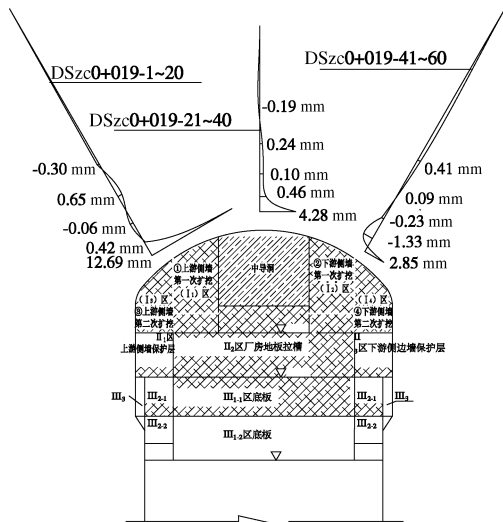


图 14 0+019.4 断面光纤光栅位移计组分布图

Fig. 14 Distribution of fiber Bragg grating displacement meter group in 0+019.4 section

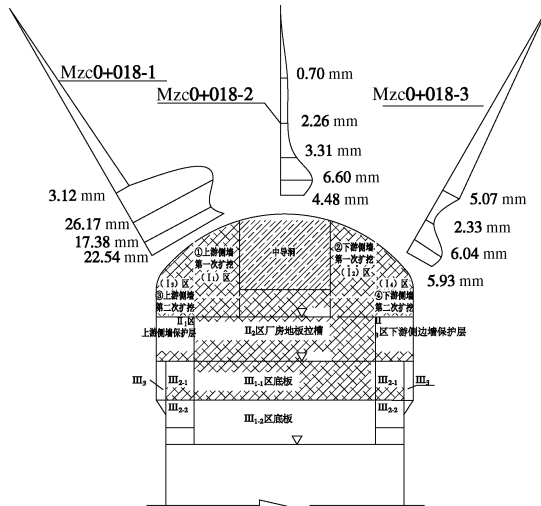


图 15 0+018.4 断面多点变位计分布图

Fig. 15 Distribution of multi-point displacement meter in 0+018.4 section

(3) 虽然两种传感器得到的监测成果趋势大概一致,但是不同深度的围岩变形值差别较大,对于光纤光栅位移计组,除 0+152 断面顶拱位置外,几乎所有部位孔口处位移量较大,在距离孔口 6.5 m 范围外,变形量很小,对于多点变位计监测成果,连续性都很好,由孔口向孔底位移量有递减的过程。由以上现象可以看出,多点变位计测得的成果是大尺度宏观位移,反映的是两个锚头之间的位移,而光纤光栅位移计组是细化到 0.5~1 m 的尺度,且多点变位计传感器均位于孔口位置,光纤光栅传感器均布于整条钻孔沿线,受洞室爆破及开挖影响程度不同,测得的位移分布有所不同。因此,多点变位计仅能监测到有限几个所埋设锚头位置的位移量,无法获得更为详尽的轴向位移分布,光纤光栅位移计组能够监测到不同深度的位移量。

(4) 同时还可以看出,两种仪器监测到的顶拱部位变形基本一致,而两侧相差较大,这种差异主要与仪器埋设位置不同有关,多点变位计埋设于拱脚位置,光纤光栅传感器埋设于拱肩,拱脚部位由于结构自身原因产生较大应力集中,且受下部开挖影响更大,因此拱脚变形明显大于拱肩。

6 结 论

光纤光栅安全监测仪器在国内地下洞室群安全监测中成功应用的实例不多,国内光纤光栅安全监测仪器也没有安装实施相关的规范规程。通过在白鹤滩地下工程洞室群近一年来的监测成果及与多点变位计的监测成果对比分析来看,得到以下 3 点结论。

(1) 多点变位计和光纤光栅位移计组对围岩变形的响应点及变形趋势基本一致。但多点变位计受锚头埋设相对距离限制,短则 3~5 m,长则 10~20 m,位移量为两个锚头之间的变形,无法获得更为详尽的轴向位移分布,仅能监测到有限几个所埋设锚头位置的位移量,无法获得更为详尽的轴向位移分布,而光纤光栅位移计组能够监测到连续的不同深度的轴向位移分布状况。

(2) 厂房围岩由于分层深度的不同,围岩应力状态受开挖影响也不同,加之各层围岩性质之间存在差异,围岩分层的位移不一致,甚至存在一定差异,且越靠近孔口处传感器测得的变形值受爆破和开挖影响越大,光纤光栅位移计组能够比多点位移计更为敏感和连续的监测到这一变形特征。

(3) 在仪器埋设后,也暴露出光纤光栅传感器自身存在的问题,该仪器受爆破震动影响较大,对监测成果也有一定影响,主要由于国内光纤光栅传感器的光栅不是焊接而是胶粘固定,如改进传感器加工工艺会使监测成果更为稳定可靠。

本项研究解决了多点变位计和收敛计无法连续测得围岩不同深度变形的问题,同时也规避了滑动测微计投入大和无法实现自动化监测的问题,通过将光纤光栅位移计连接成组,连续测得地下洞室围岩不同深度的变形情况是合理可行的,该装置操作简单,经济实用,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 袁培进,孙建会,刘志珍,等. 向家坝水电站地下主厂房围岩稳定监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1140 - 1148. (YUAN Pei-jin, SUN Jian-hui, LIU Zhi-zhen, et al. Monitoring analysis for rock stability of underground main power house in Xiangjiaba hydropower station[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1140 – 1148. (in Chinese))
- [2] 覃卫民, 孙 役, 陈润发, 等. 全站仪和滑动测微计在水布垭地下厂房等监测中的应用[J]. 岩土力学, 2008, **29**(2): 557 – 561. (QIN Wei-min, SUN Yi, CHEN Run-fa, et al. Application of total station instrument and sliding micrometer to monitoring Shuibuya Underground Powerhouse[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 557 – 561. (in Chinese))
- [3] 武学毅, 熊成林, 成 涛. 基于滑动测微计的地下洞室围岩变形分析[J]. 水电能源科学, 2013, **31**(1): 104 – 106, 239. (WU Xue-yi, XIONG Cheng-lin, CHENG Tao. Surrounding rock deformation analysis of underground chamber based on sliding micrometer[J]. Water Resources and Power, 2013, **31**(1): 104 – 106, 239. (in Chinese))
- [4] 段 杭, 任大春, 王宗魁, 等. 光纤 Bragg 光栅温度传感器在三峡大坝坝前水温监测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, **27**(9): 25 – 28. (DUAN Hang, REN Da-chun, WANG Zong-kui, et al. Application of FBG temperature sensors in water temperature monitoring for Three Gorges Dam[J]. Journal of Yangze River Scientific Research Institute, 2010, **27**(9): 25 – 28. (in Chinese))
- [5] 林传年, 刘泉声, 高 玮, 等. 光纤传感技术在锚杆轴力监测中的应用[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3161 – 3164. (LIN Chuan-nian, LIU Quan-sheng, GAO Wei, et al. Application of fiber optical sensing technology to monitoring axial forces of anchor bolts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3161 – 3164. (in Chinese))
- [6] 赵 鸣, 何 涛, 李 杰. 光纤光栅传感器在大体积混凝土基础温度监测中的应用[J]. 实验力学, 2005, **20**(1): 23 – 29. (ZHAO Ming, HE Tao, LI Jie. The application of the fiber bragg grating sensors in the temperature monitoring of the large volume concrete foundation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, **20**(1): 23 – 29. (in Chinese))
- [7] 张 晨, 冯永祥, 由 静. 光线布拉格光栅串式多点变位计[J]. 大坝与安全, 2013(5): 44 – 46. (ZHANG Chen, FENG Yong-xiang, YOU Jing. Fiber bragg grating displacement sensor[J]. Dam and Safty, 2013(5): 44 – 46. (in Chinese))
- [8] 李智忠, 许忠良, 李海涛, 等. 基于互谱相关的光纤光栅波长位移计测方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(6): 40 – 45. (LI Zhi-zhong, XU Zhong-liang, LI Hai-tao, et al. Fiber bragg grating wavelength shift measurement method based on cross-spectrum detection and cross-correlation technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, **43**(6): 40 – 45. (in Chinese))
- [9] 隋海波, 施 斌, 张 丹, 等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 2): 3725 – 3731. (SUI Hai-bo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Study on distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3725 – 3731. (in Chinese))
- [10] 李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报, 2005, **37**(4): 435 – 441. (LI Dong-sheng, LI Hong-nan. Strain transferring analysis of embedded fiber bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, **37**(4): 435 – 441. (in Chinese))
- [11] 丁 勇, 施 斌, 崔何亮, 等. 光纤传感器网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 338 – 342. (DING Yong, SHI Bin, CUI He-liang, et al. A fiber optic sensing net applied in slope monitoring based on brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 338 – 342. (in Chinese))
- [12] 马豪豪, 姚贝贝. 光线布拉格光栅传感技术在边坡监测中的应用[J]. 公路交通科技, 2013, **30**(10): 28 – 32, 53. (MA Hao-hao, YAO Bei-bei. Application of fiber bragg grating sensing technology in slope monitoring[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, **30**(10): 28 – 32, 53. (in Chinese))
- [13] 刘 波, 牛文成, 杨亦飞, 等. 基于光线布拉格光栅传感器的精密位移测量[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, **3**(1): 53 – 55. (LIU Bo, NIU Wen-cheng, YANG Yi-fei, et al. Exactitude displacement measurement based on fiber bragg grating sensors[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, **3**(1): 53 – 55. (in Chinese))
- [14] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(8): 1703 – 1708. (LI Huan-qiang, SUN Hong-yue, LIU Yong-li, et al. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(8): 1703 – 1708. (in Chinese))
- [15] 马豪豪, 刘保健, 翁效林, 等. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道模型试验中的应用[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 2): 185 – 190. (MA Hao-hao, LIU Bao-jian, WENG Xiao-lin, et al. Application of optical fiber Bragg grating sensing technology to tunnel model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S2): 185 – 190. (in Chinese))