

基于三维激光扫描的地下洞室危岩体 识别与监测技术

邓人文¹, 周家文¹, 韩进奇², 李海波³, 侯奇东³

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081;

3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 采用三维激光扫描技术对白鹤滩左岸地下厂房进行全域扫描建模, 定量获取了已掉落块体的空间位置、形状、体积等信息, 识别和监控潜在失稳块体, 并结合地质力学特性, 基于块体空间变形监测结果初步分析了其潜在失稳破坏机理。结果表明三维激光扫描技术可为地下洞室群危岩体的全域无接触识别、监测提供新途径, 具有较高的应用价值与广阔前景。

关键词: 地下洞室; 三维激光扫描; 危岩体识别; 变形监测

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)02—0039—07

Identification and Monitoring Technology of Underground Powerhouse Cavern Dangerous Rock Mass Based on Three-dimensional Laser Scanning

DENG Renwen¹, ZHOU Jiawen¹, HAN Jinqi², LI Haibo³, HOU Qidong³

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China;

3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The surrounding rock surface of the underground cavern on the left bank of Baihetan was scanned and measured by three-dimensional laser technology, and the high-precision point cloud data of the rock surface was obtained without contact, and the point cloud data was registered and splice by target registration method, so as to monitor the deformation of surrounding rock in a specific period. Through the multi-phase comparison of the continuous model of excavated surrounding rock surface after scanning, the deformation of surrounding rock is accurately monitored, the spatial position of the dangerous rock mass is located, and the morphological characteristics of the dangerous rock mass are identified. Three-dimensional laser technology could provide a new way for the monitoring and identification of the dangerous rock mass in underground engineering in the future and has high application value.

Keywords: underground cavern; three-dimensional laser technology; dangerous rock mass; deformation monitoring

危岩体是指在多组结构面切割, 在自身重力、差异性风化、地应力、岩爆开挖等多种因素作用下形成的稳定性较差, 逐渐与母岩分离, 直致完全脱离母岩的岩体^[1]。洞室危岩体常发生在断层破碎带、不整

合接触面及岩体结构面不利组合地段, 洞室开挖后围岩由构造应力作用蓄集的能量得到释放, 使岩体碎片化造成掉落或弹射, 其孕育具有渐进性、失稳具有突发性, 对洞室稳定和施工人员安全造成极大威

脉^[2]。猫跳河四级引水洞在 K0 + 92—K0 + 109m 区段沿结构面形成 17 m × 9 m × 7 m 的掉落;青藏线关角隧道通过 11 条断层带,岩体掉落达 60 多次,最长达 5 m,方量为 1 500 m³;渔子溪、映秀湾电站在施工中也曾因围岩掉落引起人身事故和支护物破坏^[3]。

徐进军等^[4]将三维激光扫描技术引入到库区滑坡变形监测与分析中;Lemy 等^[5]将三维激光扫描技术用于开挖隧洞围岩衬砌变形测量中;董秀军等^[6]将三维激光扫描技术应用于高陡边坡地质结构面产状的测量研究中;刘昌军等^[7]将三维激光扫描技术投入到高边坡危岩体的识别与分类研究中。以上研究虽然将三维激光技术应用于工程地质领域,但对地下洞室危岩体的调查研究却较少,传统的高边坡危岩体勘察通过调查人员实地走访和观察,其调查直观方便、实用性强,在多年的岩土工程勘察工程中发挥了不可或缺的作用^[8]。

本文以白鹤滩左岸地下洞室为依托,其尺寸规模巨大、采光困难、面临的工程地质条件更为复杂隐蔽。造成统计危岩体的信息不全面、人工排查危岩体困难、难以解释危岩体形成区域与洞室位置地质情况的内在联系等问题。三维激光扫描技术基于遥感技术快速(5 min/次)、高密度(10 mm/点距)、高密度(mm 级)获取岩体表面信息^[9]。准确记录危岩体表面的三维坐标,对区域实现精准定位;激光扫描克服受光照条件影响;识别所在区域节理等结构面,建立危岩体与地质条件的相互关联。

1 基于三维扫描的危岩体监测技术

1.1 三维激光扫描

三维激光扫描技术(Terrestrial Laser Scanning)又称为“实景复制技术”,是继 GPS 空间定位系统之后又一项测绘技术新突破。它采用光电测距原理,发射并接收反射回来的激光脉冲信号,来确定物体表面点与扫描仪的相对空间位置关系,通过激光飞行时间(TOF)来计算每个反射点与仪器中心点的斜距 ρ ,仪器同时记录水平向扫描角度 α 和垂直向扫描角度值 θ ,再根据空间几何关系即可计算出每个反射点在位于仪器中心的笛卡尔坐标系($X-Y-Z$)中的 X 、 Y 和 Z 坐标值。如图 1 所示。

三维激光扫描技术可以在短时间内捕获测量区表面数千万甚至数亿个点的三维位置,以创建测量对象正确的三维几何“图像”。所获得的空间点群称为点云,可用于创建精确的三维表面模型或数字

高程模型(DEM),用于测绘、工程测量或进一步的岩土工程分析。

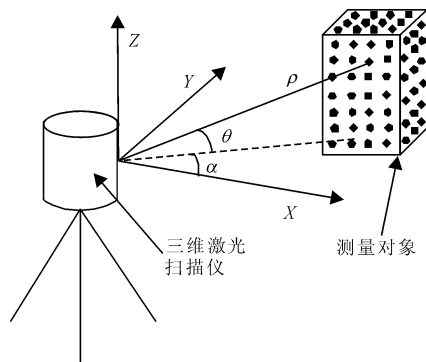


图 1 三维激光扫描测量原理图

三维激光扫描的另一个重要应用是变化测量,通过对比同一个测量对象不同时刻的高精度三维模型,可计算出该物体在特定时间段内的变化情况,如表面变形、凹陷、堆积、脱落等等。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 测站点设置

三维激光扫描通过主动发射激光脉冲信号来完成测量工作,不受环境光照的影响,因此可在黑暗的地下洞室中正常工作,如图 2 所示。地下洞室一般都是狭长线性结构,受扫描角度限制,需要沿洞轴线布置多个扫描站点,依次扫描。



图 2 三维激光扫描仪在隧洞中工作

扫描站点间距的设置直接影响扫描数据的质量。扫描间距越小,扫描越精细,点云密度也越高,但是所需扫描时间就越长;反之扫描间距越大,点云就越稀,但过大的扫描间距会导致点云质量大幅下降。这是由于扫描点云精度与激光入射角有关,入射角越大,激光越发散,精度也越低^[10]。扫描间距越大,激光入射角越大,则点云密度越低,精度也越差,过稀的点云密度甚至会导致物体表面几何信息的失真。合适的扫描间距是确保扫描质量的关键,研究表明,当最大入射角 $\theta_{\max} > 65^\circ$ 时,点云误差开始急剧上升^[11]。本研究中,根据刘绍堂等^[12]的建

议,取扫描间距为1倍洞径,这时最大入射角 $\theta_{\max} = 45^\circ$,满足精度要求。

1.2.2 点云降噪

三维激光对地下洞室的扫描中,不可避免的受到机械设备、施工机械、电缆线、脚手架等设备的干扰,使得扫描的点云产生噪点,对洞室的变形监测产生严重干扰,需要将其剔除。

其具体过程如下:将洞室点云切分为无数断面,通过改进的最小二乘法椭圆拟合,解算出精确的断面方程与断面中心点,利用二次样条曲线插值得出洞室中轴线^[13]。基于地下洞室拟合的中轴线到洞壁的距离以及不同种类物体反射率的差异,将非洞室边壁的点云提取出来并进行分类,最终集中剔除。中轴线法拟合下的噪点提取及分类过程见图3。

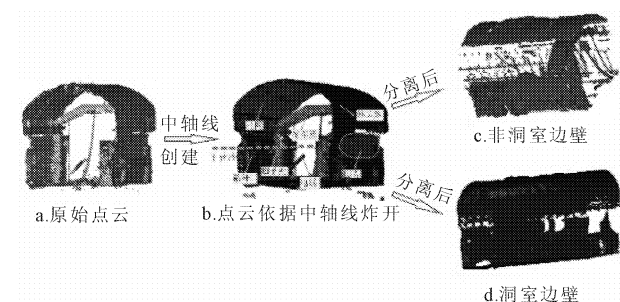


图3 噪点提取及分类

1.2.3 点云配准

点云配准,即站点拼接,将处在不同局部坐标系下的点云通过坐标转换,统一到同一坐标系下形成一个三维整体的过程^[14]。

目前常用的配准方式主要有无靶标的基于临近点的ICP算法和有靶标的计算旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 的转换算法两类,但ICP算法迭代耗时较长,且对初值选取要求高,一旦选取不慎,收敛速度会很慢或不收敛^[15]。靶标配准是基于靶心作同名点^[16],根据配准算法,计算 R 与 T ,通过 R 与 T 的变换将所有点云统一到同一坐标系下。靶标配准原理见图4。在三维空间内,旋转矩阵 R 与平移矩阵 T 可以表示为:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$T = (t_x \quad t_y \quad t_z)^T \quad (2)$$

其中 α, β, γ 表示沿 X, Y, Z 轴的旋转角, t_x, t_y, t_z 表示位移量。

对于要匹配的两个空间点云集合 $A = \{a_i\}$, $B = \{b_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (见图4),目标即找到最优旋转矩阵 R 与平移矩阵 T ,使函数

$$f(R, T) = \sum_{i=1}^n \|a_i - (Rb_i + T)\|^2 \quad (3)$$

的值最小即可^[16]。

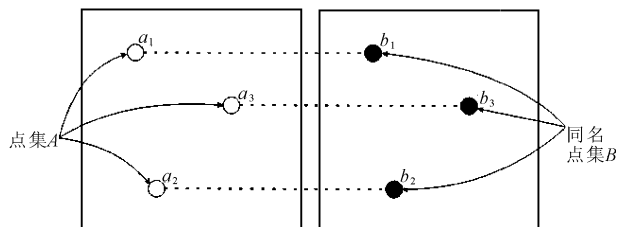


图4 靶标配准原理

1.3 危岩体监测原理

最短距离测量法在变形监测中非常有效,因为它允许检测垂直、水平、倾斜的差异,而不是只有高度上的变化。正的SD数据中的点云位于参考点的上方或前面,负的SD数据中的点云位于参考点的下方或后面。在洞室变形监测中,正的SD解释为向岩体内部变形,也可以解释为岩崩引起的掉落;负的数据解释为向临空面变形,也可以解释为卸荷回弹引起的外鼓。

在Riscanpro中,两个连续点云之间的差异被计算为SD。对于数据点云的每个点 $i[X_{i, \text{data}}, Y_{i, \text{data}}, Z_{i, \text{data}}]$, SD算法在参考点云中搜索最邻近点 $j[X_{j, \text{ref}}, Y_{j, \text{ref}}, Z_{j, \text{ref}}]$, 计算两个点云之间的SD向量 V_i 。

$$V_i = \begin{pmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{i, \text{ref}} \\ Y_{i, \text{ref}} \\ Z_{i, \text{ref}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{j, \text{data}} \\ Y_{j, \text{data}} \\ Z_{j, \text{data}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

因此,SD算法不仅生成了连续数据集中最近点间的距离,还生成了SD向量 v_i 的三维方向^[17]。地下洞室基于围岩剥落的SD向量见图5。

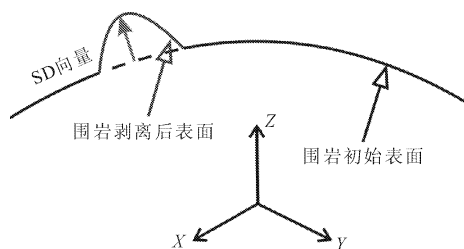


图5 基于围岩剥落的SD向量

连续表面模型在特定期期内的差异以可视化方式呈现,如变形量、变形区域、变形特征,因此可用作

定量监测。

2 白鹤滩大型地下厂房危岩体监测

2.1 地下厂房基本情况

白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县境内,是金沙江下游干流河段梯级开发的第二个梯级电站。其左、右两岸地下厂房内部布置基本相同。主副厂房洞断面尺寸为:长 438 m,高 88.7 m,岩锚梁以下宽为 31.0 m,以上宽为 34.0 m,是世界迄今为止最大的水电站地下洞室工程。其左岸的地下洞室三维模型见图 6。因此,白鹤滩地下厂房属于典型的超大型地下洞室,采用三维激光扫描技术对其危岩体风险进行识别和监测极有必要。

2.2 危岩体监测结果

2.2.1 危岩体位置分布及体积

白鹤滩左岸地下洞室扫描时间跨度为 2017 年 3 月至 2018 年 12 月。以 2017 年 3 月、2017 年 8 月、2017 年 12 月、2018 年 3 月分别作第 1、2、3、4 期。四次扫描历时近 12 个月,图 7 反映第一期与第四期变形情况。①区域是由现场施工条件干扰导致的数据缺失。②区域为由开挖卸荷引起的回弹及应力重分布变形;③渐变层区域是危岩体区域,岩体朝围岩方向凹陷,已发生破坏;④渐变层区域向临空面鼓起,是潜在危岩体掉落区域,及时监测并支护此区域以预防新一轮掉落。A、B、D、E 区域为危岩体区域,C 为潜在危岩体掉落区域。

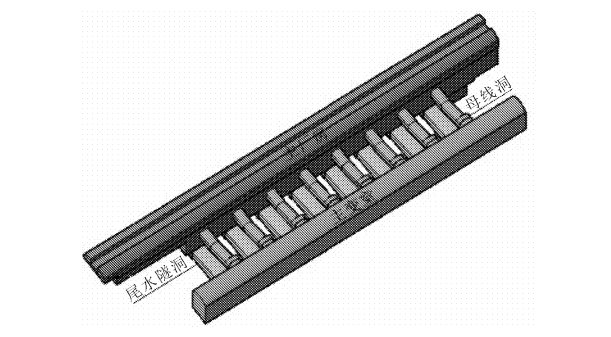


图 6 地下洞室三维模型

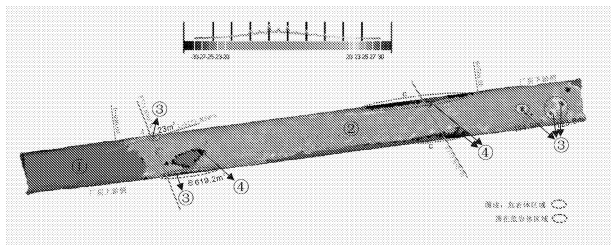


图 7 洞室特定时期内变形量

图 7 显示危岩体分布整体较为分散,一号机组至安装间定位五个危岩体发育部位。为便于分析危岩体形成机理,同时显示了主要断层和层内错动带(f 表示断层,LS 表示层内错动带)与危岩体的相对位置。

A 区在左厂 K0 + 000 断面附近一号机组处顶拱靠近上游边墙处,其危岩体较集中,体积约 23 m³。B 区危岩体在二号机组处顶拱靠近下游边墙处,沿主厂房轴线方向呈长条形分布,长度范围跨越 40 余米,体积约 619.2 m³。C 区是洞室中部潜在危岩体掉落区域,在顶拱近上下游端均有分布,块体整体厚度在 2 cm 以上,沿厂房轴线方向长度约 90 m。D、E 区均位于安装间顶拱部分。D 区危岩体最为集中,体积约 114.9 m³。E 区体积约 123.8 m³,厚度不大,约 10 cm。表 1 为危岩体分布区域统计情况。

2.2.2 围岩变形监测

C 区域为桩号 K1 + 180—K1 + 260 区段,主要岩性为斜斑玄武岩,同时发育 f₇₁₇ 陡倾断层及 T₇₂₀、T₇₂₁ 陡倾硬性结构面裂隙。图 8 为 C 区域垂直厂房轴线剖面图。

表 1 危岩体分布区域概况

扫描结果	区域划分	分布位置	体积 /m ³
危岩体区域	A	左厂 1 号机组顶拱近下游边墙	23.0
	B	左厂 2 号机组顶拱近上游边墙	619.2
	D	8 号机组左厂中轴线附近	114.9
	E	左厂安装间左厂中轴线偏上游	123.8
潜在危岩体区域	C	左厂 5 至 7 号机组顶拱两侧近边墙	—

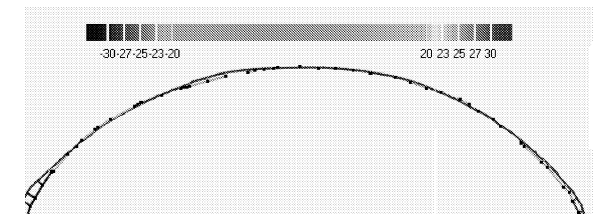


图 8 C 区域垂直厂房轴线截面

由图 8 可以看出,在 C 区域顶拱附近的变形并不显著,为 10 mm 左右;主要的变形集中在侧拱两边,约为 30 mm,且越接近边墙方向变形量越大。

图 9 为三维激光基于反射率模式扫描下获取的部分结构面识别和此区域的节理分布。从图 9 可以看出,节理优势发育方向为 N80°E,发育条数集中在 6 条~12 条,节理总体较发育。

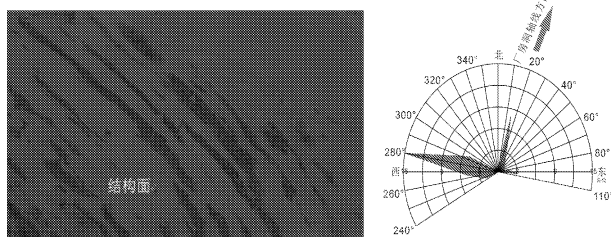


图9 K1+180—K1+260 结构面识别及节理分布

现将C区域上游侧拱肩位置沿着平行于厂房轴线引一条直线取8个点,变形结果反映见图10。

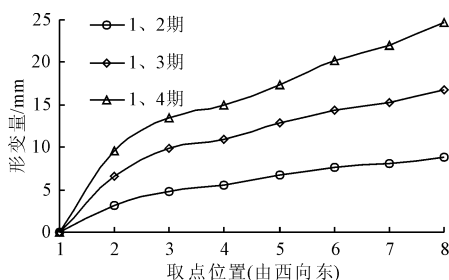


图10 岩体表面变形监测

由图10可知变形由西向东逐级递增,1、2期数据量级在0~10 mm量级,1、3期数据量级在0~15 mm量级,1、4期数据在0~25 mm量级,变形逐级递减呈收敛趋势。

洞室的稳定性基本沿用材料力学的思路,以应力与强度为中心以及其关系;来评定岩石所处状态,而大量实践证明这种应力体系的理论在应用中因岩体过于复杂而遭遇阻力。但不管隧道的作用机理如何复杂,其经受各种作用后的反应可以用位移体现出来^[18]。一般来说,洞室围岩的卸荷回弹变形经过一段时间达到一定数值后将趋于稳定,这种在不会导致围岩破坏情况下的最大变形,称为围岩的允许变形^[19]。但在实际工程中由于地质条件复杂及后期支护延迟导致岩体失稳破坏对人员和工程造成安全隐患,故允许变形的确定是岩体失稳的必要条件^[20]。通过现场的测点变形监测数据可知,A、D、E的三个破坏区域(B区资料缺失),发生临界破坏状态前大部分的平均变形达到50 mm左右,本文将此处的允许变形确定为50 mm($D_{允}=50$)。同时为了应对围岩破坏带来的损害,对达到30 mm左右的岩体大变形区域提出预警预报($D_{预}=30$),同时加强激光扫描的监测频率并观察变形速率是否出现收敛迹象,对位移速率加大的位置进行破碎岩体的清除与支护^[21]。

2.2.3 危岩体形态特征

图11为洞室危岩体区域四组垂直厂房截面方向的危岩体形态,分别为板状、楔形体状、片状、驼峰状。图11(a)板状危岩体其厚度约为10 mm,此处节理裂隙较少且相对较小,对区域稳定影响不大。但在开挖过程中由施工振动导致的裂隙延展,增多。形成的结构面与岩层面切割,最后脱落形成板状危岩体。图11(b)楔形体状破坏是危岩体中一种常见模式,又称“V”字破坏,是由两组及以上的结构面与临空面组合形成不稳定楔形体。坚硬岩层受两组交错面斜节理切割,沿缓倾角结构面下滑,两侧破坏的同时上部失衡崩塌出现“V”字形破坏。图11(c)片状岩体出现在侧拱附近,开挖后围岩出现垂直于临空面方向的较高压应力,同时受断层带的切割影响,使断层与临空面间的围岩被分割成薄层状,在自身重力扰动下,岩体从岩层面层层剥落。图11(d)驼峰形围岩在侧拱近边墙附近,临空面卸荷回弹及与岩层面平行的一对主应力 σ_1 共同挤压作用下,部分岩体表现出外鼓,在后期的持续作用下最终掉落。

3 危岩体形成机理与演化讨论

3.1 地下洞室基本地质条件

3.1.1 地层岩性

左岸地下洞室揭露的岩性主要为 $P_2\beta_3^1$ 层斜斑玄武岩、角砾熔岩、杏仁状玄武岩以及隐晶质玄武岩。岩质坚硬,微新、无卸荷状,岩体以块状结构为主,局部块状结构、镶嵌结构。顶拱围岩以Ⅲ1类为主,占91%,其余为Ⅱ类围岩,占9%。边墙围岩类别主要为Ⅲ1类,上下游侧边墙Ⅲ1类围岩均占90%,少量Ⅱ类及Ⅳ岩体,分别4%、6%。图12为左岸地下厂房地质纵剖面图。

3.1.2 结构面发育情况

主要发育断层 f_{717} , f_{720} , f_{721} 等,宽度2 cm~20 cm,带内物质以节理化构造岩、构造角砾岩为主,岩块岩屑为A型。层间错动带C2沿 $P_2\beta_2^4$ 层凝灰岩中部发育,产状为 $N42^\circ \sim 45^\circ E$, $SE \angle 14^\circ \sim 17^\circ$,错动带厚度10 cm~60 cm,平均厚度约20 cm,泥夹岩屑型,遇水即软化。层内错动带 LS_{3152} 发育 $P_2\beta_3^1$ 层顶部,带宽2 cm,带内为角砾化构造岩。

左岸地下洞室优势节理分为三组:① $N35^\circ \sim 60^\circ W$, SW , $\angle 75^\circ \sim 85^\circ$; ② $N24^\circ \sim 55^\circ E$, SE , $\angle 68^\circ \sim 78^\circ$; ③ $N35^\circ \sim 50^\circ E$, SE , $\angle 15^\circ \sim 22^\circ$,三组裂隙与洞室洞轴线的赤平投影图,如图13所示。

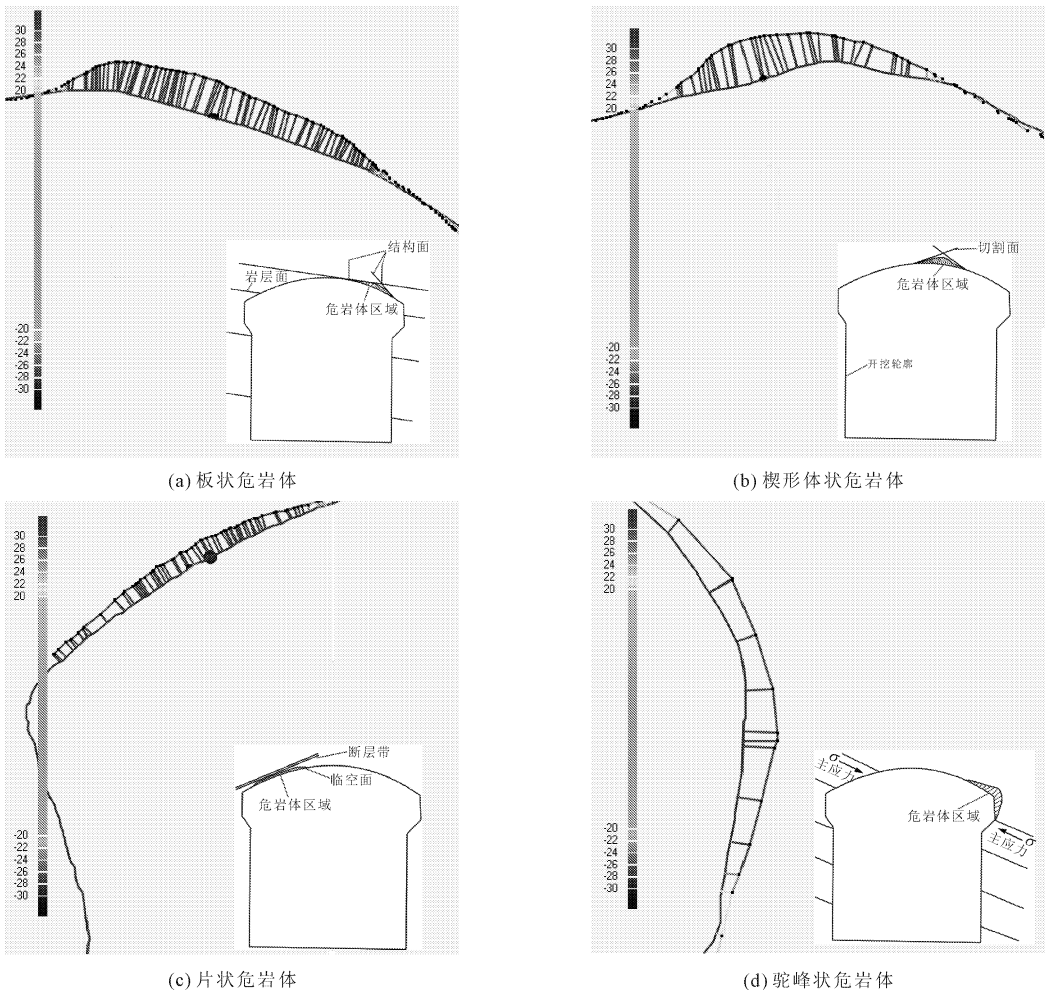


图 11 危岩体截面形态特征

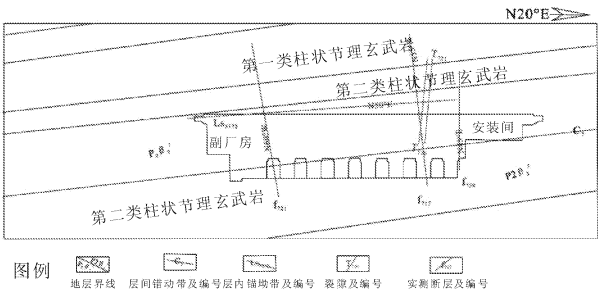


图 12 左岸地下厂房地质纵剖面

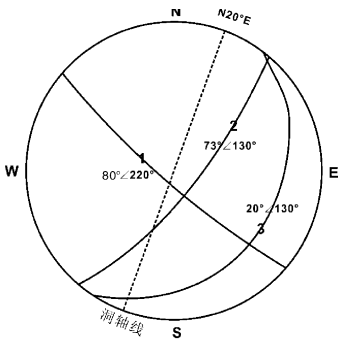


图 13 优势裂隙与厂房轴线赤平面投影

3.1.3 地应力

受喜山期运动(NW - NWW 方向的区域挤压)的影响,白鹤滩水电站左岸地下洞室围岩的应力以构造应力为主,为典型的“驼峰状”应力分布形式。洞轴线方向为 N20°E,第一和第二主应力基本水平,第三主应力大致垂直。 σ_1 方向为 N40°W 左右,倾角 5° ~ 13°,量值约在 19 MPa ~ 23 MPa; σ_2 量值在 13 MPa ~ 16 MPa; σ_3 在 6.7 MPa ~ 8.7 MPa 之间,方向变化大,倾角多 50° ~ 75°。岩石强度应力比为 (R_b/σ_1) 为 3.22 ~ 5.89,局部应力集中可达 30 MPa 以上,总体上属于高应力区。

3.2 危岩体发育机理

B 区域为四块危岩体区域中体积最大(619.2 m³)、分布最集中的一块,现以 B 区域为例分析其危岩体形成到掉落过程,简要揭示危岩体发育机理。B 区围岩主要由 P² β_2^3 和 P² β_3^1 层隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、角砾熔岩等组成。此区域危岩体的形成受几个方面影响。施工震动方面:表层岩体受施工

扰动作用,在剪切破坏作用下通过岩体裂纹向深部传递并释放围岩应力,深层岩部开始形成松动区。结构面方面:结构面的切割使连接两侧部位的岩体在表面逐渐松动,岩体上部胶结住母岩,更易使得上部在重力作用下拉裂。应力方面:与临空面方向平行的切向应力 σ_1 显著增加,卸荷方向的法向应力 σ_3 急剧下降,两个方向应力的巨大反差导致平行于卸荷方向的张性裂隙迅速扩张。张性裂隙破坏岩体的完整性,使岩体结构更加松弛。同时应力重分布下集中应力接近原来三倍,产生塑性屈服变形,受最大主应力 $\sigma_{\max}$ 方向和洞周轮廓线大角度相交的位置关系影响^[22-23],围岩易发生脆性破坏。图14为最大主应力下围岩破坏状态。其他因素方面:尽管开挖面为弱风化区,但 f_{721} 断层和 LS_{3254} 和 LS_{3253} 层内错动带使得裂隙在此交错分布,空气、温度、地下水等风化营力通过其楔入深部岩体^[24],在表层和深部岩体接触部位形成差异性风化。受上述因素综合影响,使得岩体变形模量和承载力急剧降低,张性裂缝连续贯通,长期受自重及扰动影响从岩层掉落。

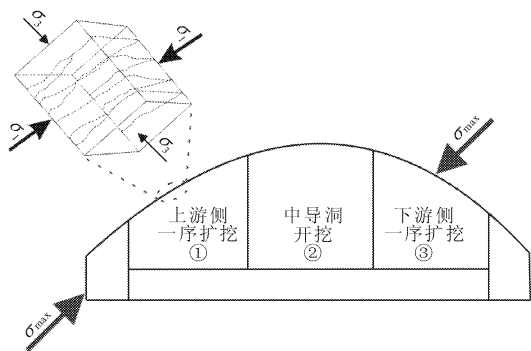


图14 最大主应力下围岩破坏状态

4 结 论

通过总结三位激光技术在白鹤滩左岸地下洞室危岩体调查中的应用,获得以下几点认识:

(1) 三维激光技术对白鹤滩左岸地下洞室中实现了对危岩体区域精准定位,同时展示了危岩体的形态特征。

(2) 三维激光技术对围岩变形监测可以做到及时捕捉,有利于现场人员及时加强支护,有效降低了洞室工作人员的伤亡风险。

(3) 三维激光技术在地下洞室危岩体的应用尚在开端,因其自动排查,便利高效,在未来的地下空间地理信息监测领域具有广阔前景。

参考文献:

- [1] 刘卫华,黄润秋,裴向军,等. 危岩体调查及稳定性工程地质分类方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2007,3(S1):1269-1273.
- [2] 鲁凯翔. 基于法向量的点云比较用于危岩变形监测研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [3] 李华晔. 国内外地下洞室建设与地质灾害综述[C]//中国岩石力学与工程学会. 面向国民经济可持续发展的岩石力学与岩石工程—中国岩石力学与工程学会第五次学术大会论文集,上海:中国科学技术出版社,1998:73-79.
- [4] 徐进军,王海城,罗喻真,等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. 岩土力学,2010,31(7):2188-2191,2196.
- [5] Lemy F, Yong S, Schulz T. A case study of monitoring tunnel wall displacement using laser scanning technology [C]//Proceeding of the 10 th IAEG Congress Engineering Geology for Tomorrows Cities. London: The Geological Society of London, 2009:482.
- [6] 董秀军,黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3629-3635.
- [7] 刘昌军,张顺福,丁留谦,等. 基于激光扫描的高边坡危岩体识别及锚固方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(10):2139-2146.
- [8] 黄江,石豫川,吉锋,等. 三维激光扫描技术在高边坡危岩体调查中的应用与讨论[J]. 长江科学院院报,2013,30(11):48-52.
- [9] 李万逵. 激光扫描在阿尔塔什右岸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(2):68-74.
- [10] 贾东峰,程效军,刘燕萍,等. 入射角度对激光点云精度的影响分析[J]. 工程勘察,2018,46(5):43-49.
- [11] Lichti D D. Error modelling, calibration and analysis of an AM - CW terrestrial laser scanner system[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 61(5):307-324.
- [12] 刘绍堂,刘文锴,周跃寅. 一种隧道整体变形监测方法及其应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014,39(8):981-986.
- [13] 王井利,邓伟,张德峰. 基于激光点云的隧道中心线自动提取算法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(2):301-308.
- [14] 陈爱云,曾唯恐,王哲,等. 基于三维激光扫描技术的危岩体特征快速识别方法及稳定性评价[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):60-64,176.

参考文献:

- [1] 朱邦范,陈立飞,杜晓庆,等.盾构法在哈尔滨化工路综合管廊中的应用研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(3):459-464.
- [2] 刘志军,朱明星,王胜年,等.软土地区某地下综合管廊工程基坑设计优化分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):172-175,180.
- [3] 张景威,周晶.地下综合管廊结构的易损性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):48-53.
- [4] 蒋雅丽.基于 BIM4D 的综合管廊工程施工进度管理[D].西安:西安理工大学,2018.
- [5] 孙书伟,朱本珍,马宁.城市地下综合管廊开挖方法及设计参数分析[J].铁道工程学报,2019,36(3):61-66.
- [6] 有维宝,王建波,张樵民,等.基于 TOPSIS - UI 的城市地下综合管廊 PPP 项目风险分担[J].土木工程与管理学报,2019,36(2):186-194.
- [7] 李芊,段雯,许高强.基于 DEMATEL 的综合管廊运维管理风险因素研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(1):31-39.
- [8] 陈丽.城市地下综合管廊运营阶段风险管理研究[J].现代建筑电气,2019,10(1):48-52.
- [9] 和晓丹.我国城市综合管廊 PPP 项目运维管理研究[J].徐州:中国矿业大学,2017.
- [10] 陈雍君,李宏远,汪雯娟,等.基于贝叶斯网络的综合管廊运维灾害风险分析[J].安全与环境学报,2018,18(6):2109-2114.
- [11] 刘玉梅,郭海滨,张程城,等.基于灰色聚类的地下综合管廊项目运营风险评价研究[J].价值工程,2018(26):121-125.
- [12] 袁欣然,许淑惠,李磊,等.我国台湾地区和大陆地区综合管廊运维管理对比分析[J].市政技术,2019,37(1):172-174.
- [13] 郭佳奇,钱源,王珍珍,等.城市地下综合管廊常见运维灾害及对策研究[J].灾害学,2019,34(1):27-33.
- [14] 翁玉峰,张立新.关于综合管廊可视化运营与管理信息平台的建设实践与剖析[J].公路,2018,63(12):202-205.
- [15] 龚剑,胡乃联,崔翔,等.基于 AHP - TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1442-1448.
- [16] 姜安民,董彦辰,吴洋,等.三标度 AHP - 熵优化组合赋权法在 PPP 项目风险评价中的应用[J].工程管理学报,2017,31(5):62-67.
- [17] 曹未,蒲光杰.基于 AHP - 熵权的模糊物元模型在 DSM 效果综合评价中的运用[J].电力与能源,2015,36(5):617-623.
- [18] 陈蓉芳,姜安民,董彦辰,等.基于熵权可拓模型的深大基坑施工风险评估[J].数学的实践与认识,2019,49(2):311-319.

(上接第 45 页)

- [15] 袁亮.三维重建过程中的点云数据配准算法的研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
- [16] 刘尚蔚,朱小超,张永光,等.多片点云数据拼接处理技术的研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):121-124.
- [17] Oppikofer T, Jaboyedoff M, Blikra L, et al. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2009,9(3):1003-1019.
- [18] 朱永全.隧道稳定性位移判别准则[J].中国铁道科学,2001(6):81-84.
- [19] 王启耀.陡倾角层状岩体中大型地下洞室群围岩变形的预报与控制[D].上海:同济大学,2003.
- [20] 刘文斐.地下开挖空间岩体工程质量评价及支护方案优化技术研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [21] 陈改霞.成功岭隧道洞口段施工方法与支护参数的研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [22] Read R S. 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004,41(8):1251-1275.
- [23] Martin C D, Christiansson R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(2):219-228.
- [24] 王奖臻,黄润秋,许模.金沙江下游白鹤滩水电站岩体结构的建造特征[J].地球科学进展,2004(S1):66-69.