

DOI: 10.11779/CJGE201807022

激光扫描隧洞变形与岩体结构面测试技术及应用

许 度¹, 冯夏庭¹, 李邵军¹, 吴世勇², 邱士利¹, 周扬一¹, 高要辉¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘 要: 提出了基于三维激光扫描技术的隧洞变形与岩体结构面非接触原位一体化测试技术, 建立了基于三维激光扫描信息的岩体结构面定量表征方法。以中国锦屏地下实验室二期工程中的深埋隧洞群为例, 应用了本研究的测试技术, 介绍了相关测试结果, 主要包括隧洞变形和结构面测试的三维激光扫描方法, 优势结构面的统计与变形综合分析, 并以#5 实验室的典型岩爆案例分析了三维激光扫描获得的灾变机制, 评价了隧洞锚喷支护设计方法, 进一步讨论了三维激光扫描的隧洞变形与岩体结构面测试技术存在的缺陷和改进方法。为隧洞岩体变形、结构面分析和安全监测评价提供了重要支撑。

关键词: 三维激光扫描; 原位监测; 隧洞变形; 结构面

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)07-1336-08

作者简介: 许 度(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事深埋洞室稳定性的研究工作。E-mail: kelingxu0913@163.com。

In-situ testing technique for tunnel deformation and structural plane of rock mass based on contactless laser scanning method and its application

XU Du¹, FENG Xia-ting¹, LI Shao-jun¹, WU Shi-yong², QIU Shi-li¹, ZHOU Yang-yi¹, GAO Yao-hui¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: The technique of contactless comprehensive in-situ tests on tunnel deformation and structural plane of rock mass based on the technology of 3D laser scanning is proposed, and the quantitative characterization methods for structural plane of rock mass are established. With the deep tunnel groups in the second phase project of the Jinping Underground Laboratories as an example, the testing technique of this research is applied, and the relevant test results including the method for tunnel deformation and structural plane tests, advantage structural plane statistics and deformation comprehensive analysis are introduced. Taking the typical rock burst case in the 5th laboratory as an example, the cognition of catastrophic mechanism is obtained by 3D laser scanning. The design method for supports mainly based on shotcrete and anchors is evaluated. The disadvantages and the improved method for the technique of tests on tunnel deformation and structural plane of rock mass are discussed. It may provide important supports for the deformation, structural plane analysis and safety monitoring evaluation of tunnels.

Key words: 3D laser scanning; in-situ monitoring; tunnel deformation; structural plane

0 引 言

在深埋隧洞工程中, 岩体变形和结构面是隧洞稳定性分析及施工设计的重要参数^[1]。由于支护系统和隧洞围岩之间的相互作用十分复杂, 目前国内外广泛采用新奥法来指导隧洞的设计、施工。新奥法强调充分利用围岩的自承能力, 基于隧洞监控量测信息来优化设计和施工方案, 其中变形监测和结构面量测是其中不可或缺的一项重要内容^[2]。

随着计算机、材料和信息技术的高速发展, 现有的隧洞监测技术也获得重要突破, 接触和非接触技术得到了广泛应用。王于宝等^[3]、Li 等^[4]通过预埋多点位移计的方法获得了隧洞开挖全过程及后期的变形情

况; Li 等^[5-6]利用钻孔摄像的方法测试了深埋隧洞开挖时裂纹的演化; 王川婴等^[7]、葛修润等^[8]对钻孔摄像技术的形成、理论基础、关键技术等进行了总结, 并用滑动测微计结合钻孔摄像、声波测试研究了岩爆的演化机制。目前隧洞变形监测多采用收敛计, 预先埋设多点位移计等接触式测量的方法, 这些方法具有安装费用高, 安装难度大, 监测断面少, 监测点数量有限, 监测过程复杂, 监测速度慢等缺点^[9]。隧洞结构面的优势产状是评价隧洞结构面发育的重要指标, 在

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11232014, U1765206); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0600702)
收稿日期: 2017-03-05

实际隧洞工程中对这些结构面的优势产状的获取, 是人们了解隧洞稳定性的重要参数, 如何全面、快速和准确地获取和采集隧洞结构面的优势产状是隧洞围岩稳定性评价的前提与基础。王凤艳等^[10]采用数字摄影测量技术对岩体结构面几何信息获取进行了研究, 但效率仍有待提高; 周春霖等^[11]研究了摄像机双目系统的岩体结构面产状测量方法; Feng 等^[12]利用全站仪对裸露岩体进行了非连续点位测量, 利用空间三点建立少数结构面平面方程从而求得产状。目前隧洞中结构面信息的获取主要是依靠人工罗盘现场接触测量为主, 该方法具有劳动强度大, 效率低, 安全性差, 难以满足快速施工的要求等缺点^[13]。

随着测量技术的发展, 人们尝试将三维激光扫描仪应用于隧洞工程监测。史玉峰等^[14]利用三维激光扫描技术对地铁隧道变形进行了监测与分析; 谢雄耀等^[15]从数据采集以及数据处理方面研究了基于三维激光扫描技术的隧道相对变形测量方法; Wang 等^[16]用三维激光扫描技术获取隧道轮廓变化, 并验证其可应用性; Groccia 等^[17]用三维激光扫描技术得到深部镍矿开挖的横断面轮廓图; Han 等^[18]通过改进三维激光扫描技术的算法更精确的获得隧道变形值; 其监测相对于传统的隧洞变形监测方法、结构面测试方法具有高效、安全、精度高、监测信息丰富的优点。基于此, 本文对基于三维激光扫描技术的隧洞变形与岩体结构面测试技术进行了分析与研究, 并成功应用于中国锦屏地下实验室二期工程中。

1 隧洞变形和结构面一体化测试技术

1.1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描, 如图 1 所示, 它是对被测物体进行快速精确扫描的一种技术, 它能够根据扫描所得的信息, 精确地重构被扫描物体的表面轮廓点云。其测试原理如下:

通过三维扫描仪的扫描头向目标物发射出窄束激光脉冲, 利用内部扫描控制模板测量和控制每束激光的横向扫描角度 α 和纵向扫描角度 θ ; 利用内部测量模块计算激光发射和接收之间的时间差, 进而计算出扫描中心到目标物之间的距离 S , 并且还可以根据反射回来的激光强度, 对目标点进行灰度值的匹配。对于三维激光扫描仪而言, 采集数据使用的坐标系是局部坐标系, 以扫描仪自身中心为原点, x, y 轴位于局部坐标系的水平面上, 且 y 轴为扫描仪的扫描方向, z 轴指向局部坐标系的垂直方向。三维激光扫描目标点 P 坐标 (x_s, y_s, z_s) 的计算公式如下^[19]:

$$\left. \begin{aligned} x_s &= S \cos \theta \cos \alpha \\ y_s &= S \cos \theta \sin \alpha \\ z_s &= S \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



图 1 典型三维激光扫描仪

Fig. 1 Typical 3D laser scanner

1.2 隧洞变形测试技术

基于三维激光扫描仪 360 度全方位、高精度的采集目标表面轮廓的特点, 将该技术运用于隧洞监测中以获取围岩表面轮廓的变化信息。针对施工期的隧洞, 轮廓的表面信息获取的测试的方法和步骤如下: 架设三维激光扫描仪、全站仪以及 3 个不共线的标靶, 并调平扫描仪、全站仪、标靶, 将三维激光扫描仪尽量架设在待测洞段的洞轴线处, 如图 2 (a) 所示。全站仪利用后方交会的方法复核已知点。设置三维激光扫描仪进行全景扫描, 如图 2 (b) 所示。利用三维激光扫描仪对 3 个标靶进行扫描, 同时用全站仪测量 3 个标靶中心点的坐标, 如图 2 (c) 所示。

全程观测用时 14 ~ 15 min。

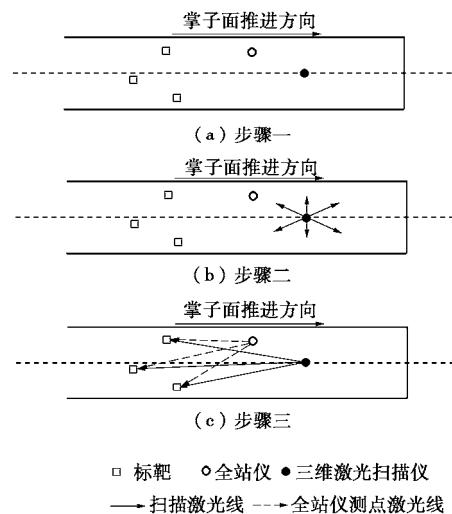


图 2 基于三维激光扫描的隧洞变形测试方法

Fig. 2 Method for tunnel deformation tests based on 3D laser scanning technique

1.3 隧洞结构面测试技术

基于三维激光扫描技术能够局部精确采集扫描物表面轮廓的特点，将该技术运用于隧洞开挖时的结构面产状的测试中。针对施工期的隧洞，结构面产状的测试的步骤和方法如下：隧洞开挖结束以后，观察开挖后的围岩出露的结构面分布情况。架设三维激光扫描仪、全站仪以及3个不共线的标靶，并调平扫描仪、全站仪、标靶，将三维激光扫描仪尽量架设在结构面分布密集区域的中垂线上，如图3(a)所示。

全站仪利用后方交会的方法复核已知点。设置三维激光扫描仪对结构面密集区域进行局部扫描，如图3(b)所示。利用三维激光扫描仪对3个标靶进行扫描，同时用全站仪测量3个标靶中心点的坐标，如图3(c)所示。

全程观测用时 3 ~ 5 min。

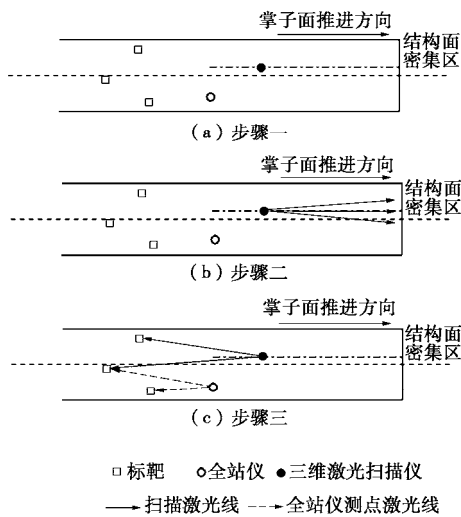


图3 基于三维激光扫描的隧洞结构面测试方法

Fig. 3 Method for structural plane tests in tunnels based on 3D laser scanning technique

1.4 隧洞变形与结构面一体化测试技术

基于三维激光扫描技术既能够360度全方位又能够局部精确采集扫描物表面轮廓的特点，提出隧洞变形与结构面一体化测试技术。综合1.2, 1.3节，对周围环境进行全景扫描后再对结构面密集区进行局部高精度扫描。最后利用扫描得到的3个公共标靶的信息将全局扫描的隧洞变形信息与局部扫描的结构面信息进行配准耦合，叠加在一起。实现隧洞变形与结构面一体化测试。

全程观测用时 17 ~ 20 min。

2 岩体结构面的表征方法

2.1 单条结构面产状算法

基于隧洞变形和结构面一体化测试技术的单条岩

体结构面产状算法如下：

岩体结构面的产状一般采用倾向 ($0^\circ \sim \varphi \sim 360^\circ$) 和倾角 ($0^\circ \sim \beta \sim 90^\circ$) 来表示，根据刘昌军等^[20]修改得到的结构面空间示意图(图4)：平面 abc 为空间一结构面， a 点位于 $x(E)$ 轴， b 点位于 $y(N)$ 轴， c 点位于 z 轴。且 n 为平面 abc 的单位法向量， n' 为法向量 n 在 xy 平面的投影，且 k 为 n' 与 $y(N)$ 轴正向的夹角。

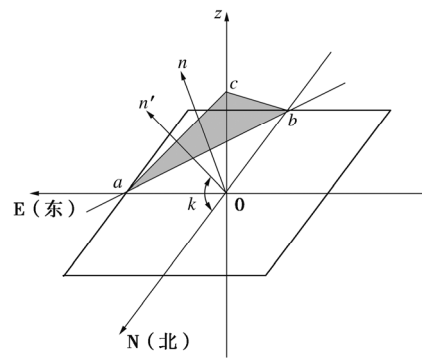


图4 结构面空间几何关系

Fig. 4 Geometric relationship of structural plane

设结构面的单位法向量 n 的坐标为 (A, B, C) ，它和平面的单位法向量 $(0, 0, 1)$ 的夹角就是结构面的倾角，可以表示为

$$\beta = \arccos \left| \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right| \quad (2)$$

又 $A^2 + B^2 + C^2 = 1$ ，所以

$$\beta = \arccos |C| \quad (3)$$

计算倾向需要先确定单位法向量 n 在 $x-y$ 平面投影 n' 所在的象限。设 k 为结构面单位法向量在 $x-y$ 平面投影与 y 轴的夹角，则

$$k = \arccos \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4)$$

进一步有

$$\varphi = \begin{cases} \arccos k & (1 > C > 0, A > 0) \\ 360^\circ - \arccos k & (1 > C > 0, A < 0) \\ 180^\circ - \arccos k & (-1 < C < 0, A > 0) \\ 180^\circ + \arccos k & (-1 < C < 0, A < 0) \end{cases} \quad (5)$$

其中，当 $C = 0$ ，为直立结构面，当 $C = \pm 1$ ，为水平结构面。

以上过程通过 C++ 编程实现。单条结构面的产状值为 $\varphi \angle \beta$ 。

在一次扫描的过程中，结合现场的照片信息，识别单条结构面处的点云并提取，根据所得到的单条结构面的点云，利用 CYCLONE 软件，获得结构面的单位法向量，并依据上述单条结构面的产状算法进行计

算, 得到结构面的产状值。任取某一结构面, 利用上述算法计算得到的产状为 $243.0^\circ \angle 58.8^\circ$, 同一结构面采用地质罗盘测到的结果为 $245^\circ \angle 60^\circ$, 二者相差不大, 故利用三维激光扫描测量结构面产状的精度可满足要求。

2.2 多条结构面优势方位计算分析

在一次扫描过程中, 结合现场的照片信息, 识别多条结构面处的点云并分别提取, 根据所得到的多条结构面的点云, 利用 CYCLONE 软件, 分别获得多条结构面的单位法向量, 并依据上述单条结构面的产状算法分别进行计算, 得到多条结构面的产状值: $(\varphi_1, \beta_1), (\varphi_2, \beta_2), (\varphi_3, \beta_3), (\varphi_4, \beta_4), \dots, (\varphi_i, \beta_i), \dots, (\varphi_n, \beta_n) (1 \leq i \leq n)$ 。所谓的优势方向指的是岩体结构面中较为发育的方位, 岩体中可以有一个或者多个优势方向, 某一优势方向的统计具体从以下两方面进行。

(1) 通常采用某组结构面方位的算术平均值, 即平均方向来表示该组结构面的综合性方向:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (6)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (7)$$

(2) 将所得到的 n 条结构面的产状编制节理玫瑰花图、极点图、结构面极点密度等值线图。通过输入到 DIPS 软件中实现上述过程。

3 工程应用

3.1 工程背景

锦屏地下实验室二期工程位于四川省凉山彝族自治州锦屏交通洞 A 洞南侧, 埋深大约 2400 m, 地下实验室的总体方案采用 4 洞 9 室错开型布置, 如图 5 所示, 目前有 9 个实验室, 各实验室均采用钻爆法开挖。

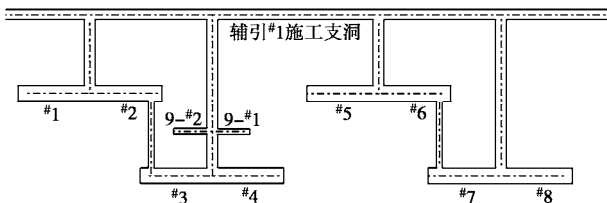


图 5 锦屏地下实验室平面布置

Fig. 5 Layout of Jinping Underground Laboratory

其中#5 实验室尺寸为 $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ 的马蹄形, 如图 6 所示开挖方式采用中导洞先行开挖区, 然后再向两侧扩挖区, 最后向底部扩挖区的方式。隧洞长 65 m, 以灰白色厚层大理岩为主, 桩号 0+0 洞段到桩号 0+41 洞段岩体挤压破碎强烈, 部分原岩结构遭到破坏。

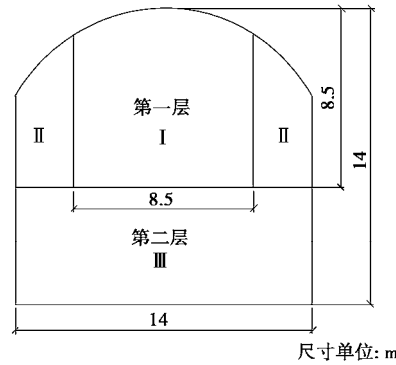


图 6 实验室开挖方案

Fig. 6 Excavation methods for 5th laboratory

3.2 隧洞变形与结构面测试一体化测试结果

#5 实验室开挖期间, 采用隧洞变形和结构面一体化测试技术跟随掌子面开挖进度进行监测。测试得到的开挖后区 0+35—0+45 区间轮廓的点云如图 7 所示。

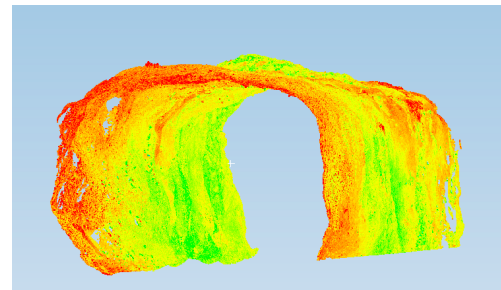


图 7 #5 实验室 I 区桩号 0+35—0+45 m 轮廓点云

Fig. 7 Contours of point cloud at stake of 0+35~0+45m in zone I of 5th laboratory

对#5 实验室开挖期间揭露的岩体结构采用隧洞变形和结构面一体化测试技术得到的结构面产状的结果采用上半球赤平投影法进行分析如图 8~10 所示; 变形测量的结果, 取桩号 0+30 处为例进行分析, 该断面首次测试的时间为 2015 年 3 月 22 日, 最后一次测试的时间为 2015 年 4 月 23 日, 以首次测试的时间为相对时间零点, 隧洞向内收敛为正, 得到的变形测量结果如图 11 所示。

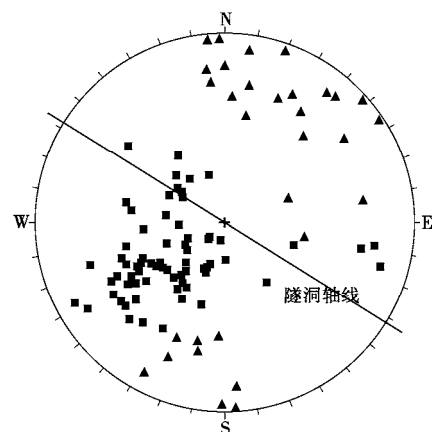


图 8 #5 实验室结构面极点赤平投影图

Fig. 8 Pole plane projection of structural planes in 5th laboratory

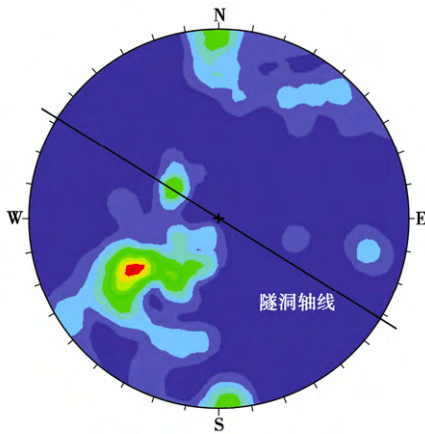


图 9 #5 实验室结构面等密度图

Fig. 9 Densities of structural planes in 5th laboratory

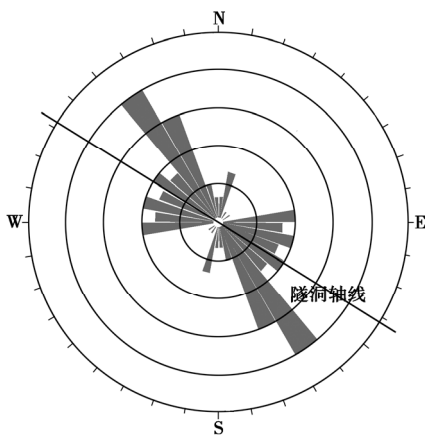


图 10 #5 实验室结构面产状玫瑰花图

Fig. 10 Rose figure of structural planes in 5th laboratory

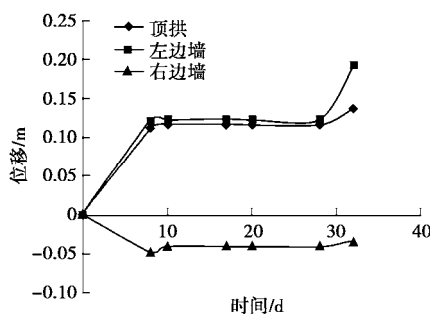


图 11 #5 实验室桩号 0+30 处的位移

Fig. 11 Displacements at stake of 0+30 in 5th laboratory

根据#5 实验室的测试结果，可以得到以下结论：
 #5 实验室主要受到两组优势结构面，第一组平均倾向 238.68°，平均倾角 44°，第二组平均倾向 16.55°，平均倾角 84.22°。两组优势结构面多以 级结构面为主，#5 实验室受 级结构面的控制较强。第一组优势结构面走向与#5 实验室轴线的夹角为 26.68°，第二组优势结构面走向与#5 实验室轴线夹角为 15.45°。控制#5 实验室的两组优势结构面与#5 实验室隧洞轴线成小角度相交，且两组优势结构面多沿着左侧边墙分

布，一定条件下#5 实验室容易产生沿着左侧边墙的结构面破坏的情况。0~8 d，顶拱共产生 11.12 cm 位移，左边墙共产生 12.18 cm 的位移，右边墙产生 -4.7 cm 的位移；8~10 d，顶拱又产生了 5.3 mm 的位移，左边墙产生 1.4 mm 的位移，右边墙产生 6.4 mm 的位移；此后的 10~28 d，隧洞没有新增加的位移产生；28~32 d，顶拱产生 2.15 cm 的位移，左边墙产生 6.93 cm 的位移，右边墙产生 6.8 mm 的位移。

3.3 #5 实验室岩爆灾害和支护分析

2015 年 4 月 23 日，#5 实验室桩号 0—0+12.5 及 0+35—0+45 区间的左侧边墙发生岩爆，岩爆产生的岩体块体不一，薄板状、小碎块状、大块体状均有出现。如图 12 所示。

如图 12 所示，该次岩爆产生两个破坏区，运用隧洞变形与结构面一体化测试技术对现场两个破坏区进行测试：A 破坏区为桩号 0—0+12.5 区间，该区间出露两条铁锰充填的 级结构面，两条结构面的产状分别为 248.26°∠78.02°，237.31°∠48.68°，前者属于 4.2 中测试所得的#5 实验室的第一组优势结构面，如图 13 所示；B 破坏区为 0+35—0+45 区间，该区间出露一条铁锰充填的 级结构面，结构面的产状为 239.89°∠45.21°，属于 3.2 节中测试所得的#5 实验室的第一组优势结构面，如图 14 所示。

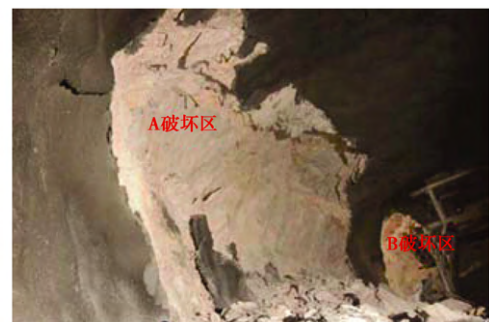


图 12 #5 实验室桩号 0—0+12.5 与 0+35—0+45 区间岩爆
Fig. 12 Rockbursts occurred in 5th laboratory between stakes 0—12.5 m and 35—45 m

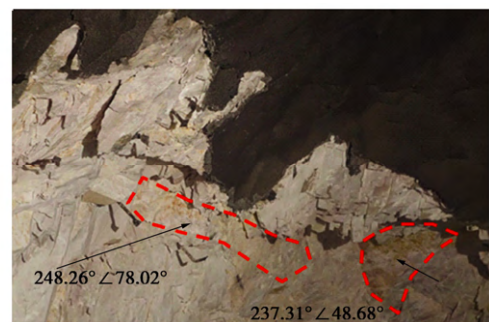


图 13 #5 实验室岩爆的 A 破坏区
Fig. 13 Failure zone A of rockburst in 5th laboratory

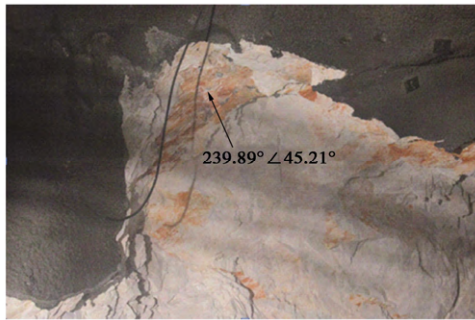


图 14 #5 实验室岩爆的 B 破坏区

Fig. 14 Failure zone B of rockburst in 5th laboratory

该次破坏的发生主要有以下两个原因：

(1) 第一组优势结构面在左侧边墙发育是本次岩爆发生的重要内在因素之一。#5 实验洞左侧边墙开裂近平行于开挖面, 形成了大量的岩板状结构。且该区域近隧洞轴向 $248.26^\circ \angle 78.02^\circ$ 结构面贯穿整个破坏 A 区, 同时被 $237.31^\circ \angle 48.68^\circ$ 另一条结构面切割, 构成了破坏 A 区深度方向上的边界, 如图 13 所示。两条结构面将原有板状结构岩体的上边界切断, 因而在该结构组合上, 结构面下盘的岩体最易发生破坏。此外, 特别注意的是, 两条结构面是限制破坏 A 区形成此破坏深度的主要因素, 因为它们是破坏区的边界。同样 $239.89^\circ \angle 45.21^\circ$ 结构面对破坏 B 区起主控作用, 大部分岩体位于其下盘, 局部深度穿过该结构面, 说明破坏 B 区的形成是受到以结构面为主要影响、应力局部影响的结果。

(2) 开挖弱支护是中导洞本次岩爆的另一重要因素。#5 实验室 3 月 6 日左右开挖至 0+012 洞段, 直至 4 月 23 日岩爆发生, 这期间 47 d 的时间内, 岩爆区域内仅 15 cm 厚的纳米钢纤维混凝土喷层支护, 仅顶拱区域完成锚杆支护。边墙和拱肩岩体长时间处于弱支护的条件下, 一方面围岩不断开裂松弛而强度降低, 大部分节理已经张开, 并发生显著变形。图 15 是通过变形和结构面一体化测试技术得到的 A 区的轮廓变形结果, 而锚喷支护的顶拱在发生了 15~20 cm 的变形后即趋于稳定, 锚喷支护对岩爆破坏区段的围岩起到足够的控制作用。另一方面, 深部岩体开挖后二次应力不断重分布、调整和聚集, 该应力超过围岩中损伤岩体的峰值强度, 边墙和拱肩的岩体在临时弱支护条件下极易发生岩爆。

针对#5 实验室这类存在岩爆威胁的洞段, 支护措施上应当满足: 支护体系应当有足够大的覆盖率, 以及较高的支护承载能力。支护体系应当允许围岩产生较大的位移, 以达到吸收更多的能量的效果, 从而减小岩爆风险。以“锚杆-喷射混凝土-钢筋网”为主的柔性支护系统能够很好地满足上述要求。

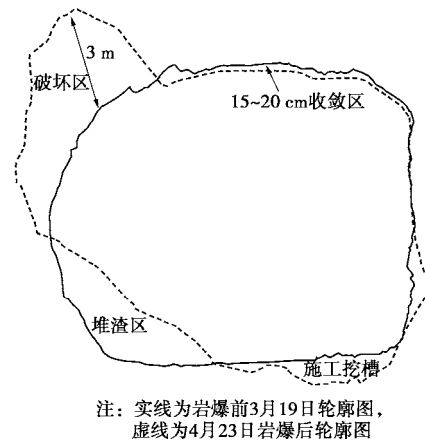


图 15 A 区破坏前后横截面轮廓变形对比

Fig. 15 Contrast of cross section contours before and after damage in failure zone A

锚杆对岩体起着对岩体加固和补强的作用, 当发生岩爆的时候, 围岩表面产生较大的位移, 为了使得围岩产生较大位移的时候, 支护仍然有很强的承载能力, 选用摩擦式锚杆, 插入围岩的深度需大于松动圈, 取为 6.0 m, 加大锚杆布置的纵横间距, 纵横间距取为 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$, 在边墙、顶拱均匀布置, 以实现对比边墙至拱肩的岩体补充强支护的目的。

喷射混凝土采用能提高抗剪能力、抗拉能力的 C30 混凝土, 喷层厚度从 15 cm 增加到 25 cm, 以满足能承受较大变形而不容易开裂的要求。

钢筋网在打完锚杆后立即安设, 直径为 8 mm, 间距为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 采用整体挂网的方式, 紧贴周围岩石, 使得喷、锚、网形成一体, 降低岩爆风险。

4 讨 论

尽管基于三维激光扫描的隧洞变形与岩体结构面非接触综合原位测试技术为隧洞的变形监测与结构面测试提供了简洁而高效的途径, 但还是不可避免地存在以下两点缺陷: 测试过程中不可避免地存在灰尘大、施工机械干扰等不利影响, 一定程度上会增大测试误差, 降低测试结果的精度, 尤其是隧洞变形的精度。测试时, 不可避免有些结构面露头较少, 使得扫描后得到的点云较少, 对后期结构面的识别造成阻碍。

针对以上两点缺陷, 从提高测试精度和采集数据的完整性上考虑, 实际测试时, 应当遵循以下原则, 以降低该影响: 选择在施工干扰较小的地方架设仪器, 以免由于施工产生的机械震动与噪声对扫描仪产生扰动, 造成扫描精度下降; 避免在烟尘较大的地方架设扫描仪或者通过打开风机通风降低尘烟密度, 避免由于空气中的烟尘颗粒的反射而加大测量误差;

当测试区存在露头较少的结构面时,应当尽量选择能完整扫描到露头较少的结构面的地方做测试,并且辅助以拍照等方式记录结构面的信息。

5 结 论

基于三维激光扫描技术,提出隧洞变形与岩体结构面非接触综合原位测试方法,在以中国锦屏地下实验室二期工程中的#5实验室中进行了成功应用,主要得到以下5点结论。

(1)基于三维激光扫描技术的隧洞变形与岩体结构面非接触综合原位测试技术不仅可以精确获取隧洞轮廓变形值,还可以得到影响隧洞稳定性的优势结构面产状。

(2)锦屏地下实验室#5实验室主要受到两组级、同实验室轴线成小夹角相交、多在左侧边墙分布的优势结构面控制。其位移主要发生在开挖后前10天,10d以后,围岩保持相对稳定,岩爆发生的前4天,围岩又产生了向临空面的较小位移。

(3)岩爆区的第一组优势结构面在左侧边墙发育是该次岩爆发生的重要原因。结构面 $248.26^\circ \angle 78.02^\circ$, $237.31^\circ \angle 48.68^\circ$ 构成A区的边界,结构面 $239.89^\circ \angle 45.21^\circ$ 构成B区的边界,局部深度穿过该结构面。岩爆的发生是结构面、应力和扰动等多因素影响的结果。

(4)中导洞施工时对边墙至拱肩位置岩体不采取强支护,导致其长时间岩体开裂劣化而强度降低是岩爆发生的重要外在因素。锚杆允许顶拱产生一定位移,并提供较高的支撑能力,对岩爆区的顶拱围岩起到一定的控制作用。

(5)“锚杆-喷射混凝土-钢筋网”为主的柔性支护系统允许围岩产生较大的位移,吸收更多的能量,对围岩提供较强的支撑作用。对岩爆洞段全方位、大面积的采用该支护措施可以降低岩爆风险。

致 谢:本文的研究工作得到了雅砻江流域水电开发有限公司、清华大学、上海交通大学、中国电建华东勘测设计研究院有限公司的大力支持,中铁十八局集团有限公司、四川二滩建设咨询有限公司为现场测试工作的顺利开展提供了帮助和配合。此外课题组黄晶柱、程远、谭双等师兄也为现场测试提供了许多帮助,特此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 冯夏庭,张传庆,李邵军,等.深埋硬岩隧洞动态设计方法[M].北京:科学出版社,2013:437-518.(FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, LI Shao-jun, et al. Dynamic design

method for deep tunnels[M]. Beijing: Science Press, 2013: 437-518. (in Chinese))

- [2] 朱汉华,杨建辉,尚岳全.隧道新奥法原理与发展[J].隧道建设,2008,2(28):12-14.(ZHU Han-hua, YANG Jian-hui, SHANG Yue-quan. New austrian tunneling method and its development[J]. Tunnel Construction, 2008, 2(28): 12-14. (in Chinese))
- [3] 王子宝,王晓卫,颜新荣,等.大坂引水隧洞工程变形监测及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):3784-3787.(WANG Yu-bao, WANG Xiao-wei, YAN Xin-rong, et al. Deformation monitoring and stability analysis of dabandiversion tunnel project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 3784-3787. (in Chinese))
- [4] LI S J, FENG X T, HUDSON J A. ISRM suggested method for measuring rock mass displacement using a sliding micrometer[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013(46): 645-653.
- [5] LI S J, FENG X T, LI Z H, et al. Evolution of fractures in the excavation damaged zone of a deeply buried tunnel during TBM construction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55(10): 125-138.
- [6] LI S J, FENG X T, LI Z H, et al. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station[J]. Engineering Geology, 2012(137/138): 85-96.
- [7] 王川婴, LAW K T. 钻孔摄像技术的发展与现状[J].岩石力学与工程学报,2005,10(24):3441-3447.(WANG Chuan-ying, LAW K T. Review of borehole camera technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 10(24): 3441-3447. (in Chinese))
- [8] 葛修润,王川婴.数字式全景钻孔摄像技术与数字钻[J].地下空间,2001,21(4):254-261.(WANG Chuan-ying, GE Xiu-run. Digital panoramic borehole camera technique and digital borehole[J]. Underground Space, 2001, 21(4): 254-261. (in Chinese))
- [9] 邓念武,朱杰兵.全站仪在隧洞三维变形监测中的应用研究[J].岩土力学,2003,22(增刊1):159-161.(DENG Nian-wu, ZHU Jie-bing. Study on application of total station instrument to three dimensional deformation monitoring for a constructed tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 22(S1): 159-161. (in Chinese))
- [10] 王凤艳,陈剑平,付学惠,等.基于VirtuoZo的岩体结构面几何信息获取研究[J].岩石力学与工程学报,2008,

- 27(1): 169–175. (WANG Feng-yan, CHEN Jian-ping, FU Xue-hui, et al. Study on geometrical information of obtaining rock mass discontinuities based on VirtuoZo[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 169–175. (in Chinese))
- [11] 周春霖, 朱合华, 赵 文. 双目系统的岩体结构面产状非接触测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 112–117. (ZHOU Chun-lin, ZHU He-hua, ZHAO Wen. Non-contact measurement of rock mass discontinuity occurrence with binocular system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 112–117. (in Chinese))
- [12] FENG Q, SJÖGREN P, STEPHANSSON O, et al. Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station[J]. Engineering Geology, 2001, 59(1/2): 133–146.
- [13] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚. 基于激光点云数据的岩体结构面全自动模糊群聚分析及几何信息获取[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 30(2): 359–364. (LIU Chang-jun, DING Liu-qian, SUN Dong-ya. Automatic fuzzy clustering analysis and geometric information acquisition of rock mass discontinuities based on laser point cloud data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 30(2): 359–364. (in Chinese))
- [14] 史玉峰, 张 俊, 张迎亚. 基于地面三维激光扫描技术的隧道安全监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 11(增刊2): 247–249. (SHI Yu-feng, ZHANG Jun, ZHANG Ying-ya. Tunnel safety monitoring based on terrestrial laser scanning technology[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 11(S2): 247–249. (in Chinese))
- [15] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2215–2224. (XIE Xiong-yao, LU Xiao-zhi, TIAN Hai-yang, et al. Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2215–2224. (in Chinese))
- [16] WANG T T, JAW J J, CHANG Y H, et al. Application and validation of profile-image method for measuring deformation of tunnel wall[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24: 136–147.
- [17] GROCCIA C, CAI M, PUNKKINEN A. Quantifying rock mass bulking at a deep underground nickel mine[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 81: 1–11.
- [18] HAN J Y, GUO J, JIANG Y S. Monitoring tunnel deformations by means of multi-epoch dispersed 3D LiDAR point clouds: an improved approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 386–389.
- [19] 冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 650–657. (FENG Xia-ting, WU Shi-yong, LI Shao-jun, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory(CJPL-II) in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 650–657. (in Chinese))
- [20] 刘昌军, 张顺福, 丁留谦. 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): 2140–2146. (LIU Chang-jun, ZHANG Shun-fu, DING Liu-qian. Identification of dangerous rock mass of high slope and study of anchoring method based on laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2140–2146. (in Chinese))