

# 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

陈爱云<sup>1</sup>, 曾唯恐<sup>2</sup>, 王哲<sup>1</sup>, 瞿晓浩<sup>1</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司道路院, 湖北 武汉 430063;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

**摘要:** 危岩体的稳定性受到多种因素制约,其稳定性计算需要调查边界条件和较多参数,传统的地质调查手段难以查明准确的几何参数。三维激光扫描技术具有高效率、高精度、非接触式测量等优势,有效地弥补了传统地质勘察方法的缺点。在黔江某段高速公路的一侧,利用三维激光扫描仪开展危岩体几何尺寸、边界范围、结构面产状等信息快速识别方法的探索,最终对危岩体进行定性定量评价。证明了三维激光扫描技术在高边坡危岩体调查中具有较高的应用价值与广阔前景。

**关键词:** 危岩体;三维激光扫描;快速识别;稳定性分析

中图分类号: TU45<sup>+</sup>.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0060—05

## Application of Unstable Rock Investigation and Stability Evaluation Based on 3D Laser Scanning Technology

CHEN Aiyun<sup>1</sup>, ZENG Weikong<sup>2</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>, QU Xiaohao<sup>1</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China;

2. State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** The stability of unstable rock mass is affected by many factors. The stability calculation involves many parameters and boundary conditions, therefore, it is difficult to find accurate geometric parameters by traditional geological survey methods. The advantages of high-efficiency, high-precision, long-distance non-contact measurement of 3D laser scanning technology can overcome the shortcomings of traditional geological survey methods. By taking a section of the Qianjiang Highway as an example, the three-dimensional laser scanner was used to explore the rapid information methods of the geometrical dimensions, boundary range and structural surface of the unstable rock mass, and the qualitative and quantitative evaluation of the unstable rock mass was carried out to prove the three-dimensional data, which proves that laser scanning technology has high application value and broad prospects in the investigation of unstable rock mass in high slope.

**Keywords:** unstable rock; 3D laser scanning; quick identification; stability analysis

危岩体的稳定性评价是危岩体防治工程的重要一环,需要工程技术人员实地进行危岩体识别和勘测,以提供危岩体基础资料<sup>[1]</sup>,并综合确定崩塌的形成机制与工程防治手段<sup>[2]</sup>。传统的危岩体测绘方法一般是依靠工程地质工程师接触地质实体,通

过罗盘和皮尺来统计结构面的结构特征,借此获取到结构面的地质信息。人工接触测量方法工作强度大、测量效率低,容易受到地形、天气等因素制约,且不能排除测量过程中的人工误差<sup>[3]</sup>。

三维激光扫描技术是一种新兴的测量手段,能

够高精度地扫描并重建实物的三维点云数据,具有远距离、非接触、实体化等优势,在危岩体调查中有着不可比拟的优势<sup>[4]</sup>,并得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。本文以高山铺危岩体为例,研究三维激光扫描技术在危岩体调查和点云数据在 Riscan Pro 软件中的处理流程,并将结果用于稳定性评价。

## 1 高山铺危岩体三维激光扫描

### 1.1 研究区概况

危岩体位于黔江过境高速公路冯家街道后侧陡坡地段,该地段地形临空条件发育,岩层为巨砾岩,砾岩成分主要为灰岩、泥灰岩、灰质白云岩,钙质胶结,溶蚀现象明显,受平行坡面的外倾卸荷裂隙控制,与岩层面、坡面组合将岩体切割成大小不等的块体形成三处高位危岩体,见图 1。

根据现场初步调查,WY01 危岩体长约 9.2 m,宽约 1.0 m,体积 73.6 m<sup>3</sup>,岩性为砾岩,岩体被两条主要裂隙切割成长条状块体,块体下部岩体由于地表水、裂隙水的溶蚀作用,形成半裸露岩腔,出现较大的临空面。上部岩石为临空面上的“悬挂”危岩,处于不稳定状态,危岩所处坡向 215°,危岩前缘倾角 85°,破坏方式为坠落式,WY02 危岩体长 9.5 m,宽 2 m,体积 144 m<sup>3</sup>,危岩体总体呈不规则块体。危岩体受后壁裂隙和下部层面控制,形成大小不一块状不稳定块体,上部块体较小,大小为 1 m×2 m,下部岩体块体大小 2 m×8 m,岩体具有向前方倾倒的趋势,处于不稳定状态,危岩所处坡向 189°,危岩前缘倾角 89°,底部坡脚为 55°~65°,临空条件发育,周围植被发育,破坏方式为倾倒式。

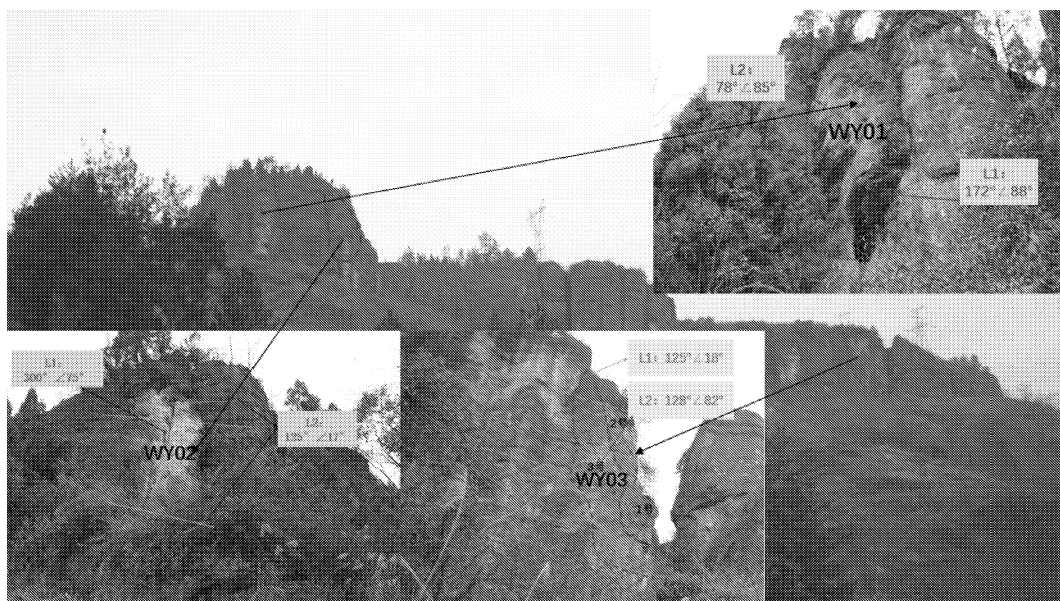


图 1 危岩体分布及特征

WY03 危岩体长 17 m,宽 3 m,体积 561 m<sup>3</sup>,危岩体层间软弱带以及重力卸荷裂缝的共同切割作用下,形成 1 号、2 号、3 号滑移危岩块体,岩性为砾岩,发育两条主要控制型节理面,分为 L1、L2,加之在重力累积作用下,岩体发育 3 处潜在滑移块体,呈顺次滑移剥落破坏特征,首先出现滑移破坏的是 1 号块体,依次为 2 号、3 号,滑移方向为 98°,危岩所处坡向 170°,临空条件发育,破坏方式为滑塌式。

### 1.2 点云影像数据获取

由于三处危岩体(WY01、WY02、WY03)均发育在高位,无法对危岩体信息(危岩体尺寸、控制结构面产状等)进行实地调查,工程人员的经验估计值

误差较大,难以满足后期分析的需要。因此选用了加拿大 Optech 公司生产的 Polaris TLS1600 三维激光扫描仪对其扫描,其采样速率为 22 万点/s,采样间距 1 mm,远距离测量精度 < 15 mm,能有效控制点云精度<sup>[6]</sup>。扫描过程中用 RTK-GPS 同时测量了各站点的大地坐标,用于后期对点云数据进行地理配准<sup>[7]</sup>。

### 1.3 点云坐标与大地坐标拟合

每处危岩体都需要多站扫描数据拼接得到,因此需要进行坐标配准将各站数据转换为统一坐标系。这一步通过选取同名点进行匹配得到<sup>[8]</sup>。再处理软件 Riscan Pro 中进行匹配得到。同时导入前

期采集的各站点实际坐标信息,最终将该区域的原始坐标系转换为大地坐标系。并选取了三处拟合点

与实测大地坐标进行误差分析(见表 1),最大的误差值 < 10 cm,满足危岩体调查的要求<sup>[9]</sup>。

表 1 坐标误差分析

站点	测量方式	X	Y	Z	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
拟合点 1	RTK	3256538.359	499347.5887	575.2632	-0.011	0.0257	-0.0268
	点云	3256538.370	499347.5630	575.2900			
拟合点 2	RTK	3256525.821	499336.8337	571.3622	-0.047	0.0367	0.0822
	点云	3256525.868	499336.7970	571.2800			
拟合点 3	RTK	3256523.722	499335.7327	570.6239	-0.005	0.6470	0.0529
	点云	3256523.727	499335.6680	570.5710			

## 2 危岩体特征数据自动化提取

### 2.1 几何尺寸及体积量测

通过三维激光扫描技术,能够精确地获取到危岩体的长、宽、高、坡度、相对高差等几何尺寸数据,为危岩体的稳定性评价、防治措施等提供了可靠的

基础资料。该方法需要在点云数据中识别出这两处危岩体的点云数据后,量测其整体轮廓,测量方式将其视为不规则长方体处理,这种测量方式比传统的估算更精准(见图 2)。图中,A 为 WY01 体积量测过程;B 为 WY02 体积量测过程;C 为 WY03 体积量测过程。

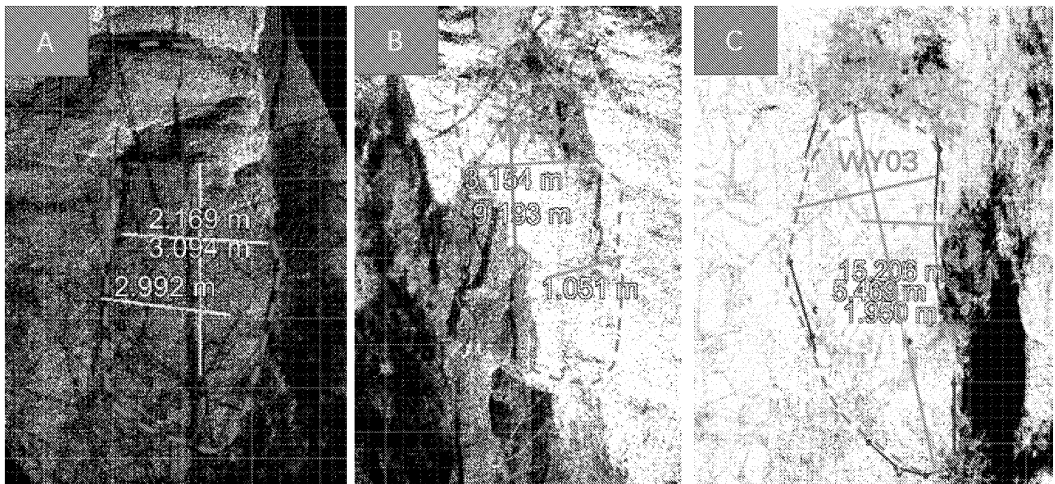


图 2 点云获取的危岩体几何特征及快速测定

针对危岩体的体积的量测,该方法方便简单,且能够满足调查要求。若要测得更精准的体积数据,需要对点云数据进行去噪处理,去除植被、粉尘等干扰点,再对点云数据进行三角网格化,测出该封闭网格体得到<sup>[10]</sup>。测量结果见表 2。

表 2 危岩体尺寸测量结果

危岩体编号	长/m	宽/m	高/m	体积/m <sup>3</sup>
WY01	3.10	1.05	9.19	29.91
WY02	3.00	2.17	3.10	20.18
WY03	5.47	1.95	15.20	162.10

### 2.2 结构面产状量测

岩体的控制性结构面是后期稳定性计算的重要

资料,传统方法需要测量人员用罗盘近距离测量,受环境因素限制大<sup>[11]</sup>。前人总结了在点云中提取结构面的方法,分别为“三点法”和“多点法拟合”,“三点法”适用于解译出露明显的结构面,从而选取具有代表性的三点建立平面,符合三点构面法则<sup>[12]</sup>。对于以一定的面状出露的结构面,采用“多点拟合法”更为准确。

本文的拟合过程主要基于“多点拟合法”,使用 Riscan Pro 软件对点云结构面进行拟合测量。通过选取危岩体裂隙出露平面的点云数据以创建平面,该软件能根据平面法向量自动计算其产状,减少了后期计算步骤(见图 3)。测量得到的三处危岩体的控制性裂隙产状数据见表 3。

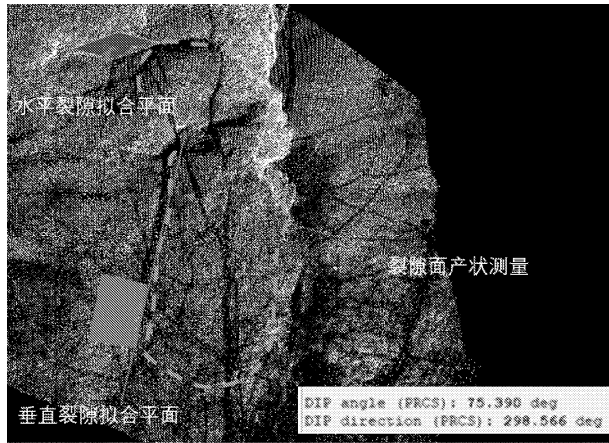


图 3 结构面拟合过程(以 WY2 为例)

表 3 控制性结构面测量数据

危岩体编号	坡向/(°)	层面/(°)	裂隙 1/(°)	裂隙 2/(°)
WY01	215	—	172 ∠ 86	78 ∠ 86
WY02	189	125 ∠ 18	298 ∠ 75	—
WY03	206	128 ∠ 17	94 ∠ 80	123 ∠ 86

### 2.3 危岩体剖面图的获取

传统上通过两种方法获取地形剖面图<sup>[13]</sup>,一种是利用皮尺、罗盘进行现场测量,但在高陡边坡难以满足测量条件;第二种是通过地形等高线切取剖面,但对于不同比例尺图件切制出的剖面线差异很大,难以反映局部微地形的起伏。点云数据中能反映更精细的地表起伏和局部的微地形,利用三维激光扫描数据获取危岩二维剖面图是简单有效的。

需要注意的是,扫描仪获取的原始地形数据还包括了地表上的植被以及树木等干扰数据,通过通过 Riscan Pro 软件中的“Filter data”工具过滤植被。

在 Riscan 软件中,剖面线提取的方法首先需要确定好目标危岩体的位置,同时根据主崩方向在点

云视图中点击“创建平面”以模拟剖面线(见图 4(A)),创建的面与点云的交线即为地形断面线(见图 4(B))。将截取到的点云数据导入 CAD 中加以修饰就能得到精确的剖面图,图 5 为三处危岩体的剖面图中的 WY01 剖面。

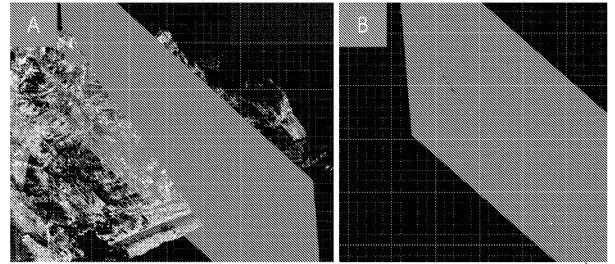


图 4 危岩体剖面获取过程(以 WY01 为例)

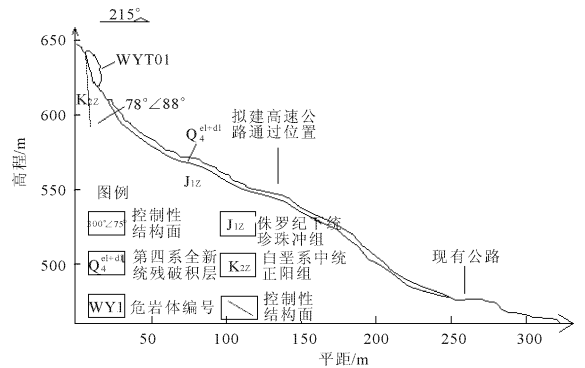


图 5 危岩体剖面结构(以 WY01 为例)

## 3 危岩体稳定性评价

### 3.1 稳定性定性评价

危岩体的稳定性定性评价应用极射赤平投影法进行分析<sup>[14]</sup>,该方法需要获取危岩体控制性结构面的产状。根据前文中量测到的危岩体切割裂隙的信息,对三块危岩体分别做赤平投影分析(见图 6(a)、图 6(b)、图 6(c))。

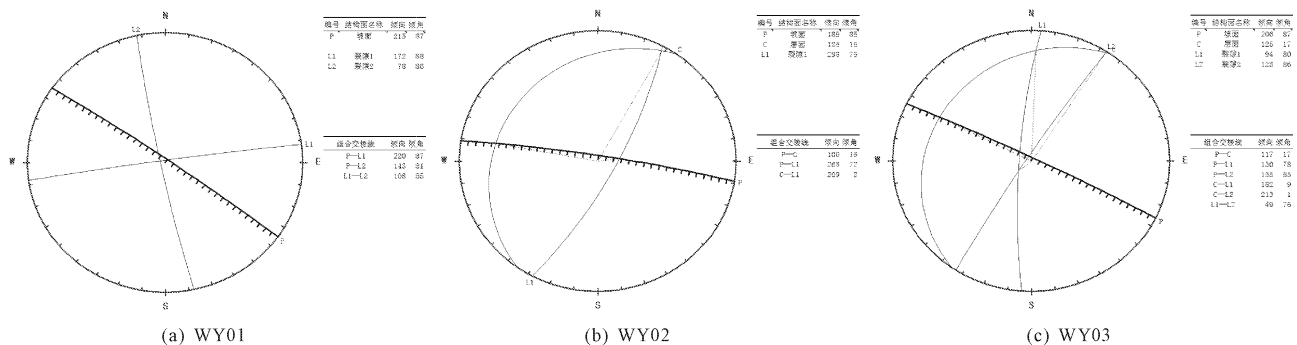


图 6 危岩体赤平投影图

根据 WY01 的赤平投影图,危岩体所在坡面产状为  $215^\circ \angle 87^\circ$ ,危岩体受到  $172^\circ \angle 88^\circ$ 、 $78^\circ \angle 86^\circ$  两组结构面所切割。结构面交点落在边坡投影弧外,组成结构较稳定,但在降雨条件雨水容易沿裂隙面入渗形成坠落式破坏。

WY02 坡面产状  $189^\circ \angle 85^\circ$ ,层面产状为  $125^\circ \angle 18^\circ$ ,主要发育一组深切割裂隙,产状为  $298^\circ \angle 75^\circ$ 。裂隙和层面的交线与坡面倾向一致,但倾角远远缓于坡角,属于较不稳定结构。

根据 WY03 的赤平投影图,危岩体所在坡面产状为  $206^\circ \angle 87^\circ$ ,此外发育两组侧向裂隙  $123^\circ \angle 86^\circ$ 、 $94^\circ \angle 80^\circ$  和近水平层面  $125^\circ \angle 17^\circ$ 。从图中可以看出,两条裂隙的交点落在坡面投影弧的对侧,是较稳定的状态。但层面与裂隙 1、裂隙 2 形成的交线与坡面投影弧为同一侧,且倾角比坡面更缓,因此为不稳定状态。判断危岩体在天然状态下较稳定,在降雨条件下层面黏聚力降低容易导致危岩体失稳。

### 3.2 稳定性定量评价

应用极限平衡法<sup>[15]</sup>对三块危岩体进行计算,按照危岩体的基本类型,应用不同计算模型,在不同的工况(天然状态、暴雨状态、地震状态)下进行定量计算分析。计算公式如下:

(1) 倾倒式危岩(暴雨+地震工况):

$$K = \frac{\frac{1}{2}[\sigma_t] \frac{(H-e)^2}{\sin^2\beta}}{Wa + Ph_0 + Q\left(\frac{H-e}{\sin\beta} + \frac{2e}{9\sin\beta}\right)} \quad (1)$$

式中, $H$ 为危岩体高度,m; $P$ 为单位长度危岩体所承受的水平地震力,kN; $W$ 为单位长度危岩体的重力,kN; $Q$ 为孔隙中静水压力,kN; $\beta$ 为破裂面倾角,(°); $[\sigma_t]$ 为危岩体抗拉强度标准值,kPa; $h_0$ 为地震力距倾覆点的垂直距离,m; $a$ 为重力作用点距倾覆点的水平距离,m; $e$ 为孔隙深度,m。

(2) 滑移式危岩(暴雨+地震工况):

$$K = \frac{(W\cos\beta - P\sin\beta - Q)\tan\varphi + C \frac{H}{\sin\beta}}{W\sin\beta + P\cos\beta} \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为底滑面内摩擦角,(°); $C$ 为底滑面黏聚力,kPa。其余符号同上。

(3) 坠落式危岩:

$$K = \frac{C(H-e) - Qtg\varphi}{W} \quad (3)$$

式中符号同上。

根据现场已有勘查获取的研究区内危岩体物理

力学指标(见表4),稳定性评价标准按《崩塌防治工程勘查规范(试行)》<sup>[15]</sup>(T/CAGHP 011—2018)(见表5),其余长度、角度数据均在点云数据中量测,将最终结果代入极限平衡计算公式中计算得各工况稳定性计算表(见表6)。

表 4 砾岩物理力学参数表

天然重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $C$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	抗拉强度 $[\sigma_t]$ /MPa
25.8	1.044	37.79	0.392

表 5 危岩稳定性评价标准

破坏模式	不同稳定状态评价标准			
	稳定	基本稳定	欠稳定	不稳定
滑塌式	$K \geq F_1$	$1.15 \leq K < F_1$	$1.00 \leq F < 1.15$	$F < 1.00$
倾倒式	$K \geq F_1$	$1.25 \leq K < F_1$	$1.00 \leq F < 1.25$	$F < 1.00$
坠落式	$K \geq F_1$	$1.35 \leq K < F_1$	$1.00 \leq F < 1.35$	$F < 1.00$

注: $F_1$ 为危岩稳定安全系数。表中稳定系数对应的工况是一般工况,即天然工况和暴雨(融雪)工况。

表 6 危岩稳定性评价表

危岩编号	破坏模式	稳定性系数			稳定性评价		
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
WYT01	坠落式	1.21	1.18	1.16	欠稳定	欠稳定	欠稳定
WYT02	倾倒式	1.22	1.19	1.07	欠稳定	欠稳定	欠稳定
WYT03	滑塌式	1.44	1.39	1.28	基本稳定	基本稳定	基本稳定

由表 6 计算结果可知,1、2 号危岩体在各项工况下均欠稳定,3 号危岩体为基本稳定。

## 4 结 论

三维激光扫描技术是测绘领域的一项新的技术突破,本文总结了三维扫描技术在危岩体调查上的应用,并在黔江在建公路某段的危岩体上得到验证。应用表明在高陡危岩体的调查中,三维激光扫描技术能更为准确完整地识别危岩体特征和采集结构面信息,从而为危岩体的治理和设计提供可靠的资料。

### 参考文献:

- [1] 刘卫华,黄润秋.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(7):1269-1273.
- [2] 成永刚,范安军,李兵,等.川藏高速公路汶(川)马(尔康)段崩塌危岩发生机制与防治[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):21-27.
- [3] 李东黎.基于三维激光扫描技术的危岩落石调查方法[J].工程勘察,2015,43(4):78-82

坏更加明显。

### 参考文献:

- [1] 尚守平,张宝静,吕新飞. 预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁间接刚度试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11):74-81.
- [2] Lou T J, Liu M Y, Sergio M R, et al. Effect of bond on flexure of concrete beams prestressed with FRP tendons [J]. *Composite Structures*, 2017, 173:168-176.
- [3] Aslam M, Shafiqh P, Jumaat M Z, et al. Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers - A review [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 82: 235-256.
- [4] 程东辉,杨燕红. 预应力 CFRP 布加固荷载混凝土柱轴心受压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4):34-40.
- [5] Gao P, Gu X, Mosallam A S. Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates [J]. *Composite Structures*, 2016, 157: 33-50.
- [6] 洪雷,张雨剑,王苏岩. 冻融循环作用下 CFRP - 高强混凝土的界面行为[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3):200-205.
- [7] 王苏岩,朱方芳,张红涛,等. 持载与湿热环境下 CFRP 加固高强混凝土梁结构性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3):36-41.
- [8] 洪雷,江海鑫. 干湿循环下预应力 CFRP 加固高强混凝土的耐久性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(12):143-148.
- [9] 王吉忠,杨俊龙,崔文佳. 盐溶液干湿循环对 CFRP - 混凝土界面粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8):2055-2064.
- [10] 王苏岩,丁荔,洪雷,等. 持载与干湿循环作用下 CFRP 加固高强混凝土梁耐久性研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(21):78-83.
- [11] Silva M A G, Fonseca B S, Biscaia H. On estimates of durability of FRP based on accelerated tests[J]. *Composite Structures*, 2014, 116:377-387.
- [12] 姚因杰. 恶劣环境与荷载作用下 FRP - 高强混凝土耐久性试验及数值研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016:30-41.
- [13] 江海鑫. 冻融和干湿循环下预应力 CFRP 加固高强混凝土的耐久性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [14] 邓文明. 氯盐环境下 BFRP 板加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 南宁:广西大学, 2016:40-65.
- [15] 洪雷,王涛. 盐雾干湿循环对预应力 CFRP 加固梁抗弯性能影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3):144-149.
- [16] 曲俊龙,洪雷. 一种 FRP 预应力加载试验装置: 201820055622. 8[P]. 2018-01-15.

(上接第 64 页)

- [4] 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(2):3629-3635.
- [5] 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):66-72.
- [6] 张会霞,朱文博. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [7] 荆海峰,王力,杨文锋,等. 自由设站法在点云拼接中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(1):94-96, 98.
- [8] 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.
- [9] 刘浩,张冬阳,冯健,等. 地面三维激光扫描仪数据的误差分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4):38-41.
- [10] 魏小佳,黄润秋,裴向军,等. 三维激光技术在高陡危岩体调查中的应用[J]. 工程勘察, 2014, 42(3):57-63, 69.
- [11] 吴雪楠,向喜琼,沈焱辉,等. 三维激光技术在危岩体地质信息采集中的应用[J]. 勘察科学技术, 2016(6):53-56.
- [12] 王梓龙,裴向军,董秀军,等. 三维激光扫描技术在边坡地质编录中的应用[J]. 人民黄河, 2018, 40(5):111-115, 121.
- [13] 黄江. 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):45-49.
- [14] 孙玉科. 赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1980:58-71.
- [15] 中国地质灾害防治工程行业协会. 崩塌防治工程勘察规范(试行):T/CAGHP 011—2018[S]. 武汉:中国地质大学出版社, 2018:25-30.