

# 三维激光扫描在边坡监测中的应用研究\*

## Application of 3D Laser Scanning in Slope Monitoring

王 旻<sup>1</sup>, 王法景<sup>1</sup>, 刘 松<sup>2</sup>, 惠孟堂<sup>3</sup>

1. 杨凌职业技术学院交通与测绘工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国长江三峡集团有限公司, 四川 成都 610041;
3. 北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘 要:** 为了提高边坡位移监测精度, 增强边坡灾害防范效果, 研究三维激光扫描在边坡监测中的应用。利用三维激光扫描仪, 获取边坡的点云数据; 采用卡尔曼滤波算法, 参考边坡点云数据自身的状态转移矩阵与观测资料判断边坡点云数据最优状态, 对所采集的含噪边坡点云数据进行降噪处理。扫描降噪后边坡点云数据, 利用曲率提取该点云数据的特征点, 利用不在同一坐标系内的特征点构建空间坐标系, 设置部分特征点为坐标系位置参数, 对比不同时间点下坐标系位置参数, 确定边坡某点的位移变化情况。结果显示: 所研究方法可实现边坡点云数据降噪处理, 各特征点所得位移监测与实际位移差异小于0.6 mm, 在监测边坡位移情况时所得位移误差均低于3 cm, 提高了边坡位移监测精度, 为边坡滑坡地质灾害防范提供了科学依据。

**关键词:** 三维激光扫描; 边坡监测; 点云数据; 卡尔曼滤波; 特征点; 位移

中图分类号: TN297 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 04-0106-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.018

WANG Meng<sup>1</sup>, WANG Fajing<sup>1</sup>, LIU Song<sup>2</sup>, HUI Mengtang<sup>3</sup>

1. School of Transportation and Surveying Engineering, Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China;
2. China Three Gorges Corporation, Chengdu 610041, China;
3. North Information Control Research Academy Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of slope displacement monitoring and enhance the effect of slope disaster prevention, the application of 3D laser scanning in slope monitoring was studied. The point cloud data of slope is obtained by using 3D laser scanner; the Kalman filtering algorithm is used to judge the optimal state of the slope point cloud data by referring to the state transition matrix of the slope point cloud data itself and the observation data, and the noise reduction processing is carried out for the collected noisy slope point cloud data. Scan the slope point cloud data after noise reduction, extract the characteristic points of the point cloud data by using curvature, build a spatial coordinate system by using the characteristic points not in the same coordinate system, set some characteristic points as the coordinate system position parameters, compare the coordinate system position parameters at different time points, and determine the displacement change of a point on the slope. The results show that the research method can realize the noise reduction of the slope point cloud data, the difference between the displacement monitoring and the actual displacement of each characteristic point is less than 0.6 mm, and the displacement error obtained when monitoring the slope displacement is less than 3 cm, which improves the slope displacement monitoring accuracy and provides a scientific basis for the prevention of slope landslide geological disasters.

**Keywords:** 3D laser scanning; slope monitoring; point cloud data; Kalman filter; feature points; displacement

\* 基金项目: 杨凌职业技术学院自然科学基金项目: “三维激光扫描技术在边坡监测中的应用研究” (编号: ZK20-33)。

作者简介: 王旻 (1991—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为三维激光扫描技术、无人机摄影测量。

收稿日期: 2022-02-18

## 0 引言

滑坡是一种典型的地质灾害，边坡受降水等外界因素影响后失稳形成滑坡灾害，造成周边的经济损失与人员伤亡，因此边坡变形与位移监测工作极为重要，成为预防滑坡地质灾害的主要方式<sup>[1-3]</sup>。

以往相关领域学者对于边坡的监测进行了大量研究，但大多采用传感器进行边坡监测<sup>[4]</sup>。姚飞等<sup>[5]</sup>利用光纤光栅位移传感探头分析边坡位移情况。但该方法所采集的测绘点信息并不全面，导致监测过程中需设定大量监测点，监测过程中浪费大量时间与金钱。李俊鑫等<sup>[6]</sup>利用测斜传感器分析边坡倾斜情况，考虑边坡地理环境的特殊性，所采集的信息中包含大量的噪声信息，导致监测结果存在显著误差。仇唐国等<sup>[7]</sup>利用基于光频域反射技术的分布式光纤测量法监测边坡土体位移情况。但该方法仅适用于小范围的边坡检测，实用性受到一定限制。

采集边坡监测数据时，为确保边坡结构的完整性，需采集大量的测绘点，所以边坡结构信息的完整、快速、准确采集成为确保边坡稳定性的关键技术。三维激光扫描技术能够将实体信息转换为计算机能够识别的数据，为边坡数据的采集与分析提供了新的方向，能够完善其他测绘点信息采集的缺陷，因此利用三维激光扫描技术获取准确的边坡采样点信息；采用卡尔曼滤波算法判断边坡点云数据最优状态，并对数据进行降噪处理；利用曲率提取点云数据的特征点，构建空间坐标系，确定边坡的位移变化情况。实验结果表明研究方法可有效进行边坡点云数据降噪处理，监测边坡位移情况时所得位移量误差较低，提升了边坡位移监测的精度，增强了边坡滑坡地质灾害防范效果。

## 1 基于三维激光扫描的边坡监测方法

### 1.1 边坡监测流程

边坡监测是一个长期工作，通过采集不同时

间点的边坡数据进行分析与比对完成边坡变形监测过程。为提升所采集的监测对象三维数据精度，在利用三维激光扫描数据初次采集监测对象相关数据前需进行现场调研，确定监测对象上所设定的测试点与永久性边坡控制点。图 1 为基于三维激光扫描的边坡监测流程。在设定测站后，利用三维激光扫描仪获取边坡的点云数据，对边坡点云数据实施降噪与配准等预处理，并构建三维可视化模型；基于曲率确定特征点，利用不同特征点构建空间坐标系，对比不同时间点下特征点的空间坐标，由此确定边坡的位移量。

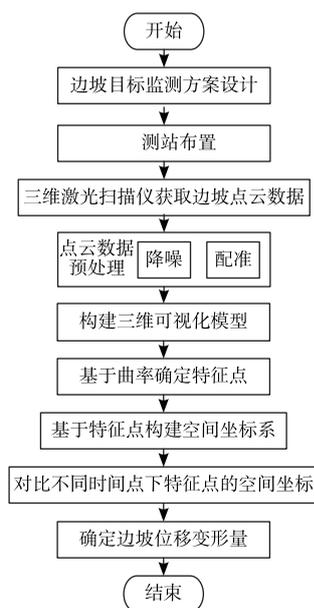


图 1 边坡监测流程

Fig. 1 Slope monitoring process

### 1.2 基于三维激光扫描技术的边坡点云数据获取

利用三维激光扫描仪采集边坡点云数据，由于地理条件所限，当前边坡监测过程中所使用的三维激光扫描仪大多以 TOF 脉冲测距为核心<sup>[8-9]</sup>，结合 CCD 数字摄影技术等，利用支架系统、激光测距系统和激光扫描系统采集边坡点云数据。三维激光扫描仪的测距过程可归纳为发射激光、接收激光、判断时延以及检测时间延迟四个步骤<sup>[10]</sup>，实际测量过程中通过激光发射脉冲信号与接收激光脉冲信号间的时间差确定边坡距离  $S$ <sup>[11]</sup>，利用式 (1) 描述此过程：

## 研究与应用

$$S = \frac{CT}{2} \quad (1)$$

式中： $C$  和  $T$  分别为光的传播速度和激光脉冲信号发射与接收的时间差。

经由上述数据采集过程中获取边坡距离  $S$ ，同时检测各激光脉冲不同方向扫描角度的观测值  $\alpha$  与  $\beta$ ，由此能够得到边坡上点  $P$  的坐标值：

$$\begin{cases} X = S \cos \theta \sin \alpha \\ Y = S \cos \theta \cos \alpha \\ Z = S \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

利用三维扫描仪能够获取边坡表面的空间采样点，也就是边坡点云数据<sup>[12]</sup>。

### 1.3 基于卡尔曼滤波算法的边坡点云数据降噪

受边坡上山石与树木等外界因素影响，所采集的边坡点云数据内包含大量噪声信息，为获取准确的边坡位移监测结果，采用卡尔曼滤波算法对含噪边坡点云数据实施处理。卡尔曼滤波法选用递推方式参考边坡点云数据自身的状态转移矩阵与观测资料判断边坡点云数据最优状态<sup>[13-14]</sup>，利用式 (3) 描述离散化方程：

$$\begin{cases} X_k = A_{k, k-1} X_{k-1} + B_{k-1} \varphi_{k-1} \\ y_k = U_k X_k + H_k \end{cases} \quad (3)$$

式中： $X_k$  和  $y_k$  分别为  $t_k$  时刻边坡点云数据  $n \times 1$  阶状态向量和  $m \times 1$  阶观测向量； $A_{k, k-1}$  和  $B_{k-1}$  分别为  $t_{k-1}$  至  $t_k$  的  $m \times n$  阶边坡点云数据状态转移矩阵和  $n \times r$  阶动态噪声矩阵； $\varphi_{k-1}$ 、 $U_k$  和  $H_k$  分别为  $t_{k-1}$  时刻  $r \times 1$  阶动态噪声、 $t_k$  时刻的  $m \times n$  阶观测矩阵和  $m \times 1$  阶观测噪声。

$\varphi_{k-1}$  和  $H_k$  均具有独立特性，且均值为 0，两者的统计特性为：

$$\begin{cases} E(\varphi_k) = 0, E(\varphi_k, \varphi_j^T) = H_k \varphi_{k-1} \\ E(H_k) = 0, E(H_k, H_j^T) = H_k U_k \\ E(\varphi_k, H_j^T) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

利边坡点云数据状态向量  $X(0)$  初始值的统计特性为<sup>[15]</sup>：

$$\begin{cases} EX(0) = \mu_0 \\ \text{var}\{X(0)\} = E\{[X(0) - \mu_0][X(0) - \mu_0]^T\} = P_0 \end{cases} \quad (5)$$

利用最小二乘原理确定卡尔曼滤波递推表达式，状态预报为：

$$\hat{X}_{i+1} = A_{i+1} \hat{X}_i \quad (6)$$

利用式 (7) 描述一步预测的方差矩阵：

$$P_{i+1} = A_{i+1} P_i A_{i+1}^T + B_{k-1} \varphi_{k-1} B_{k-1}^T \quad (7)$$

边坡点云数据状态向量判断值为：

$$\hat{X} = \hat{X}_{i+1} + P_k (X(0) - U_k \hat{X}_{i+1}) \quad (8)$$

状态向量判断值的协方差矩阵为：

$$P_k = (I - J_k \hat{X}) P_0 \quad (9)$$

式中： $J_k$  为滤波增益矩阵。 $P_0$  为状态向量判断初始矩阵。设定  $\hat{X}(0) = 0$ ， $I$  为单位矩阵。基于上述描述完成滤波过程。

### 1.4 基于特征点的边坡位移计算

#### 1.4.1 基于曲率的特征点提取

曲率是判断几何体起伏程度的标准， $P$  表示曲线上的某个点，将存在一个曲线上同  $P$  点相切的圆，其与曲线无限趋近，即称此圆为曲线的曲率圆。扫描降噪后边坡点云数据，利用曲率在其中提取特征点的过程如下：

设置阈值  $f$ ， $W$  表示点云一个曲面的平均曲率，计算  $W$ ，如果  $W$  大于  $f$ ，即可将此数据点作为候选特征点，由此迭代获取候选特征点集合  $O$ 。在集合  $O$  内确定一个边界点  $P$ ，依照曲率上限方向确定其两个相邻点，以  $o_1$  和  $o_2$  表示，利用  $k(o_1)$  和  $k(o_2)$  分别表示点  $o_1$  和  $o_2$  在曲率上限方向上的法曲率。以  $k_1$  和  $k_2$  分别表示某边界点的不同主曲率，对比  $k_1$  同  $k(o_1)$ 、 $k_2$  同  $k(o_2)$  间的绝对值，如果所得结果符合极值要求，即可确定此边界点为特征点；相反则基于曲率方向下限循环上述过程实施判断。

利用上述过程能够得到边坡点云数据的特征点，基于所提取的特征点进行位移计算。

#### 1.4.2 基于特征点的位移计算

不处于同一平面内的三个或以上的点能够构建一个空间，根据这些点能够构建空间坐标系。初次扫描边坡点云数据，在边坡点云数据特征点内任意选取  $n$  个点，在这  $n$  个点内至少有三个点不在同一坐标系内，利用不在同一坐标系内的点构建坐标系，

剩余点作为固定的坐标系位置参数，发挥参考功能。二次扫描边坡点云数据，利用相同的特征点构建坐标系，与初始坐标系位置参数进行对比，若边坡点云数据其中的某个特征点的位置出现变化，在此坐标系内均能直观体现。若初次扫描边坡点云数据点云内某特征点  $P$  坐标为  $(x, y, z)$ ，二次扫描边坡点云数据，特征点  $P$  产生位移后处于位置  $(x_1, y_1, z_1)$  上，则说明其位移，位移量为  $\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}$ 。

## 2 测试结果与分析

以某高速公路边坡为实验对象，其土质存在显著湿陷性特征，在降水量较大的季节内稳定性显著下降，极易产生位移沉降等问题，严重时将造成高速公路拥堵现象，因此对其进行监测十分必要。

### 2.1 边坡点云数据获取与滤波

针对实验对象所处地理环境，选取 Trimble TX8 三维激光扫描仪对实验对象实施整体覆盖式扫描，将监测点设置在高速公路另一侧的山坡坡顶上，以此获取完整清晰的边坡点云数据，同时通过降低监测点数量在一定程度上提升点云数据精度。采集实验对象三维点云数据如图 2 所示。

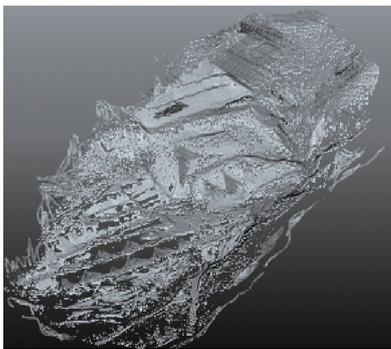


图 2 实验对象原始三维点云数据

Fig. 2 Original 3D point cloud data of the experimental subjects

针对图 2 的实验对象三维点云数据，采用本文方法进行滤波处理，设定初值为：阈值  $f = 0$ 。

$01, X(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P_0 = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。从图 2 中随机选取 50 个点，图 3 为各点

水平坐标滤波前后的对比结果。图 4 为降噪处理后的实验对象三维点云数据。分析图 3 得到，在经由本文方法进行降噪处理后，各点坐标数据的曲线更为平缓。对比图 2 和图 4 可知，经过本文方法降噪处理后的实验对象三维点云数据更加集中。由上可知，本文方法能够有效消除初始获取的点云数据中所包含的随机噪声，由此提升最终位移监测的精度。

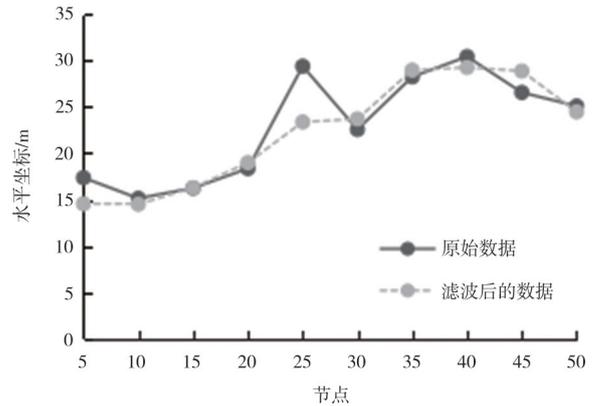


图 3 各点滤波前后对比结果

Fig. 3 Comparison of the results before and after filtering at each point

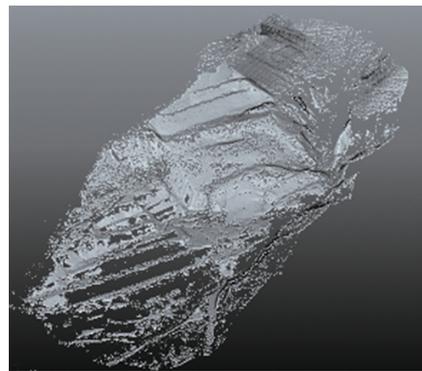


图 4 降噪处理后的实验对象三维点云数据

Fig. 4 3D point cloud data of experimental subjects after noise reduction

### 2.2 位移监测结果

采用本文方法在实验对象点云数据内采集特征点，在所采集特征点内随机选取 6 个特征点，获取所选特征点的位移情况，结果见表 1。分析表 1 得到，采用本文方法能够有效监测实验对象内各特征点的位移变化，并且所得检测结果与各特征点的实际位移情况差异小于 0.6 mm，由此说明采用本文方法能够准确监测实验对象的位移情况。

## 研究与应用

表 1 特征点位移情况/m  
Table 1 Displacement of characteristic points/m

特征点数据来源	X	Y	Z	
1	初次扫描	2.5597	0.6971	0.3987
	二次扫描	2.5564	0.6974	0.3924
	本文方法	0.0032	0.0003	0.0063
	实际位移	0.0030	0.0003	0.0065
2	初次扫描	11.2687	2.1587	0.9527
	二次扫描	11.2578	2.1504	0.9515
	本文方法	0.0109	0.0083	0.0012
	实际位移	0.0113	0.0080	0.0009
3	初次扫描	19.6112	4.0540	1.8261
	二次扫描	19.5998	4.0497	1.8300
	本文方法	0.0114	0.0043	0.0039
	实际位移	0.0108	0.0048	0.0040
4	初次扫描	51.1019	5.1102	1.0013
	二次扫描	51.0938	5.1114	1.0028
	本文方法	0.0081	0.0012	0.0015
	实际位移	0.0075	0.0012	0.0014
5	初次扫描	26.3984	3.0054	0.5478
	二次扫描	26.4006	3.0084	0.5504
	本文方法	0.0020	0.0030	0.0026
	实际位移	0.0020	0.0035	0.0024
6	初次扫描	78.4568	2.0004	0.2872
	二次扫描	78.4598	1.9998	0.2885
	本文方法	0.0030	0.0006	0.0013
	实际位移	0.0028	0.0008	0.0015

### 2.3 监测结果精度对比

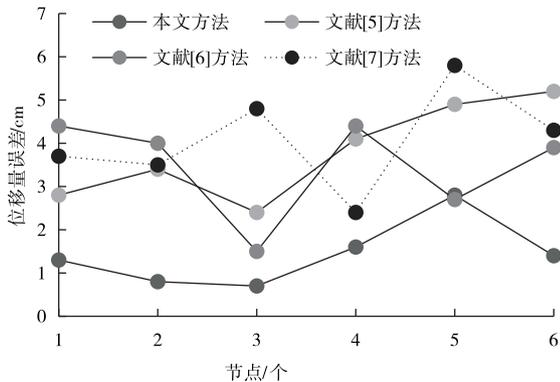


图 5 对比结果

Fig. 5 Comparison result

以文献 [5]、文献 [6] 和文献 [7] 内的监测方法为对比方法, 对比本文方法对三种对比方法对于实验对象位移监测结果的精度, 所得结果如图 5 所示。分析图 5 得到, 采用文献 [5] 方法所得位移量误差高于 5 cm, 文献 [6] 所得位移量误差高于 4 cm, 采用文献 [7] 方法所得位移量误差高于 5.5 cm, 而采用本文方法对实验对象进行

位移监测所得位移量误差均低于 3 cm, 与其他三种对比方法相比显著降低, 由此说明本文方法与对比方法相比具有更好的监测精度。

### 2.4 滑坡防范效果

通过监测边坡的位移情况, 提前做好滑坡风险防范, 能够有效避免滑坡地质灾害发生。采用本文方法实际应用于该地区的滑坡风险防范工作中, 前后实验对象滑坡地质灾害发生的频率如图 6 所示。分析图 6 得到, 采用本文方法进行监测前, 实验对象三年内共发生 92 次滑坡地质灾害, 平均每年发生滑坡地质灾害 30 次以上。而采用本文方法进行检测后的一年, 实验对象共发生地质灾害 15 次, 与采用本文方法监测前相比降低 50%。证明本文获得的边坡位移监测结果为边坡滑坡地质灾害防治提供了科学依据和理论参考, 地质部门根据监测结果进行滑坡灾害风险地区进行了防治和加固, 有效增强了边坡滑坡地质灾害防治效果。采用本文方法获得的监测结果能够间接降低滑坡发生的频率, 有效避免实验对象滑坡地质灾害的发生。

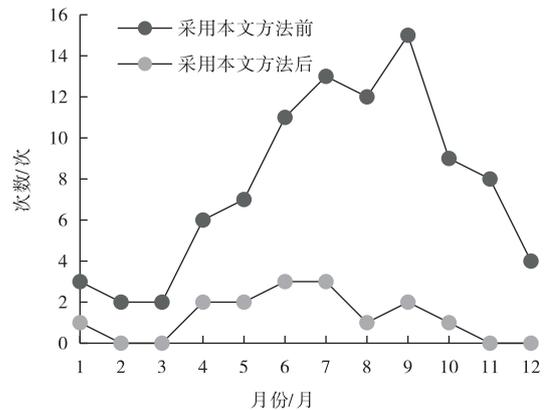


图 6 滑坡发生频率

Fig. 6 Frequency of landslide occurrence

### 3 结束语

利用三维激光扫描技术采集边坡点云数据, 根据点云数据进行边坡位移检测, 实验结果表明, 本文方法能够准确检测边坡的位移量, 且能增强边坡滑坡地质灾害防范效果, 避免滑坡灾害的发生。由于实验时间与地理区域限制, 本文方法的测试仅在单一边坡对象上进行, 在后续实验分析

中,将本文方法应用在更多的边坡中,提升本文方法可应用性。

### 参 考 文 献

- [1] 常明,潘荔君,孟宪纲,等.基于三维激光扫描仪的边坡形变监测研究[J].大地测量与地球动力学,2019,39(5):533-537.
- [2] 杜江丽,岳军红,陈建平,等.基于三维激光扫描仪的矿区边坡变形监测数据的分析处理[J].矿业安全与环保,2021,48(1):75-79.
- [3] 陈辉,黄晓铭,刘万泉.基于动态网格k邻域搜索的激光点云精简算法[J].控制与决策,2020,35(12):2986-2992.
- [4] 何秉高,孙向阳,孟繁磊,等.三维激光扫描定位光机系统优化设计[J].激光与红外,2020,50(9):1048-1056.
- [5] 姚飞,胡肖潇,曾丽珍,等.基于光纤光栅的深部位移传感探头研究[J].光通信技术,2019,43(5):9-12.
- [6] 李俊鑫,强小俊,郎向伟.基于FBG的测斜传感器设计与实现[J].压电与声光,2019,41(1):53-56.
- [7] 仇唐国,孙阳阳,卢天鸣,等.基于OFDR技术的深层土体水平位移场监测研究[J].压电与声光,2020,42(1):108-112.

- [8] 王旭娇,马杰,王楠楠,等.基于图卷积网络的深度学习点云分类模型[J].激光与光电子学进展,2019,56(21):56-60.
- [9] 江鸿,张永涛,陈培帅,等.山岭隧道三维激光扫描及数据处理技术研究[J].施工技术,2019,48(1):116-120.
- [10] 黄晓杰,陈宇磊,邵跃堂,等.基于激光雷达的地铁隧道形变检测方法[J].城市轨道交通研究,2019,22(11):47-51.
- [11] 王帅,徐颖,夏开文,等.基于三维激光扫描技术的混凝土磨蚀监测方法研究[J].水利水电技术,2019,50(2):208-213.
- [12] 马福义,赵喜江,张在岩,等.基于三维激光扫描技术的竖井井筒变形分析方法[J].中国矿业,2019,28(S1):72-75.
- [13] 沙欧,吕源治,凌剑勇,等.三维激光扫描系统中目标点云的颜色复原[J].光学精密工程,2020,28(10):2158-2167.
- [14] 何荣,陆广.基于三维激光扫描的矿区地表倾斜值提取方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(11):199-205.
- [15] 许艺腾,李国元,邱春霞,等.基于地形相关和最小二乘曲线拟合的单光子激光数据处理技术[J].红外与激光工程,2019,48(12):148-157.

(上接第73页)

### 3 结 论

(1)掺加2%~3%硅烷聚合物防水粉末的早强砂浆,初始流动度和30 min流动度均符合规范要求;与未掺加的砂浆相比,早期强度有所降低,1 d龄期抗压强度和抗折强度最大降低了22.2%和40.4%,但28 d龄期抗压强度和抗折强度基本持平。

(2)硅烷聚合物防水粉末的加入明显降低了砂浆的吸水率,28 d时吸水率最大降低58.9%。这是由于硅烷聚合物防水粉末改善了水泥凝胶孔结构疏水性,有效降低液态水的渗透速率,从而降低砂浆的吸水率。

(3)硅烷聚合物防水粉末的加入降低了砂浆试件的表层氯离子含量,一定掺量范围内,最大降低46.4%;随着距离表面深度的增加,氯离子含量均呈现降低的趋势。

### 参 考 文 献

- [1] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B, et al. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement - calcium sulphoaluminate clinker - calcium sulphate binders[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(5):551-561.
- [2] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B. The ternary system Portland cement - calcium sulphoaluminate clinker - anhydrite: hydration mechanism and mortar properties[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(7):497-507.
- [3] 张鹏,赵铁军,戴建国,等.硅烷改性混凝土防水和抗氯离子性能试验研究[J].土木工程学报,2011,44(3):72-78.
- [4] 赵炜,黄巍林,宋强,等.冻融环境下硅烷防水混凝土渗透性试验研究[J].混凝土,2016,322(8):238-242.
- [5] 马志鸣,赵铁军,朱方之,等.掺硅烷乳液制备整体防水混凝土的抗冻性试验研究[J].新型建筑材料,2012,(7):53-56.
- [6] GB/T 17671-1999,水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S].
- [7] GB/T 50448-2015,水泥基灌浆材料应用技术规范[S].