

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.05.009

# 基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测方法

江胜华<sup>1,2</sup>, 宋韞皓<sup>1</sup>, 孙伟贺<sup>1</sup>, 陈欢<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 余浩<sup>1</sup>

(1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 边坡滑动大变形监测存在服役环境恶劣、传感器布设困难、需要精细维护、传感器的量程有限等问题。提出粘贴式智能石块的概念, 发展基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测方法, 给出了基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测的超宽带通信算法, 通过推移加载的模型试验验证粘贴式智能石块的边坡大变形监测性能。结果表明: 粘贴式智能石块的位移可反映边坡失稳滑动及坍塌的大变形演化, 且与软尺常规测量结果的规律一致。

**关键词:** 边坡稳定; 粘贴式智能石块; 超宽带; 大变形监测; 模型试验

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)05-076-08

## Large slope deformation monitoring method based on pasted smart rock

JIANG Shenghua<sup>1,2</sup>, SONG Yunhao<sup>1</sup>, SUN Weihe<sup>1</sup>, CHEN Huan<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** The existing slope deformation monitoring is often influenced by extreme harsh environment, difficult sensor layout and limited sensor range, etc. In this paper, the conception of pasted smart rock was put forward and a slope large deformation monitoring method using pasted smart rock was developed. Accordingly, the simplified algorithm of ultra-wide band (UWB) was given for the slope deformation monitoring method. The monitoring method was verified by landslide simulation system applied with driving force. The results show that the slope large deformation development and slope instability evaluation can be judged by pasted smart rock's horizontal displacements, and the results are in accord with those of the monitoring assessment by soft film size. The proposed method can be used as reference in the further study and practical engineering monitoring.

**Keywords:** slope stability; pasted smart rock; UWB; large deformation monitoring; model test

边坡滑动是由局部破坏逐渐扩展贯通形成滑动面的渐进累积发展过程<sup>[1-2]</sup>, 边坡临近失稳破坏时呈现高度的突变性、随机性和离散性<sup>[3]</sup>, 失稳滑动后土体和石块坍塌飞落, 边坡破坏时土体和岩体将运动一段距离, 会堵塞道路和铁路, 掩埋建筑物、农田及河道等, 严重影响交通枢纽并危及人民的生命财产安全, 因此, 边坡

收稿日期: 2019-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208078); 重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jscx-msybX0028); 重庆市基础与前沿应用研究计划(cstc2015jcyjA30008)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51208078), Chongqing Technology and Application Demonstration Project (cstc2018jscx-msybx0028), Chongqing Research Program of Basic and Frontier Technology(cstc2015jcyjA30008).

作者简介: 江胜华(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测等方向的研究, (E-mail)jiangsh@whu.edu.cn。

的中后期大变形,尤其是边坡失稳滑动、坍塌飞落的大变形监测非常关键。传统的边坡变形测量主要有位移计、测斜仪、滑动变形计、大地测量法等。目前,逐渐发展的监测方法大致有三维激光扫描技术<sup>[4]</sup>、合成孔径雷达干涉测量技术<sup>[5]</sup>、地质雷达<sup>[6]</sup>、GIS 测量<sup>[7]</sup>、GPS 测量<sup>[8]</sup>、摄影测量方法<sup>[9]</sup>、电荷耦合器件微变形监测<sup>[10]</sup>、时域反射<sup>[11]</sup>、光线光栅<sup>[12]</sup>、声发射技术<sup>[13]</sup>等检测/监测方法。现有边坡变形监测方法大多需要布置测杆、电缆等,需要精心维护,难以在野外恶劣环境下服役,且监测的量程有限,仅可监测边坡的初期和失稳滑动的中期变形,无法有效监测边坡失稳滑动及其坍塌飞落的中后期大变形。因此,研究维护方便、布设简单、可靠性高的边坡中后期大变形监测方法及器件势在必行,是解决滑坡灾害预警的主要技术手段之一,对那些变形较大的特征点或滑动面附近测试点进行初期和中后期的全过程变形连续观测,并进行安全评价及预警,为边坡工程的服役提供安全保障。

超宽带(UWB)通信及定位技术采用无载波且具有纳秒级宽度的脉冲来传递信息<sup>[14]</sup>,具有对信道衰落不敏感、发射信号功耗低<sup>[15]</sup>、穿透能力较强、理论上能提供数厘米级甚至毫米级的定位精度<sup>[16]</sup>、通信定位距离可达 300 m、不易受干扰等优点,超宽带通信方法和定位技术作为一种远距离的非接触式监测技术,具有定位精度高、维护简便、可监测边坡中后期大变形等优点。结合边坡滑动时大变形的失稳破坏模式,构建基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测系统,提出简化的大变形监测算法,实现边坡失稳滑动全过程的大变形监测方法;采用推移加载模拟边坡滑动大变形,并与常规的监测方法比较验证粘贴式智能石块的监测效果。

## 1 基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测系统

基于粘贴式智能石块的边坡变形监测系统包括粘贴式智能石块和测量基站,如图 1 所示,其中包括 1 个测量主基站和 3 个测量辅基站。测量辅基站可直接与测量主基站进行无线数据通讯,测量主基站通过无线方式与计算机连接。在边坡表面选择若干特征点布置粘贴式智能石块,在边坡表面选择 4 个参考点,参考点的位置应坚实稳定、地质条件较好且和变形体有一定的距离,4 个参考点不得位于同一个平面内(在图 1 中仅显示 3 个参考点,即 1 个测量主基站和 2 个测量辅基站),在 4 个参考点处布置测量基站。边坡发生失稳滑动及崩塌,甚至在降雨情况下形成泥石流时,粘贴式智能石块随之移动,粘贴式智能石块上的智能标签与基站之间的距离会发生改变,通过测量基站与智能标签之间的信号传输时间,采用超宽带通信理论计算粘贴式智能石块的瞬时三维位移,通过粘贴式智能石块的位移变化评价边坡滑动的大变形发展历程并进行预警。

粘贴式智能石块由智能标签和天然石块或轻质混凝土块组成,在天然石块或轻质混凝土块钻孔,采用环氧树脂将智能标签粘贴在天然石块或轻质混凝土块的孔内(智能标签的天线部分朝上,并暴露在外),如图 2 所示。智能标签由超宽带标签(爱尔兰 Decawave 公司生产,型号为 DW1000,低功耗,尺寸为 35 mm×21 mm)和超小型可充电电池(深圳市中顺新能源电池有限公司生产,尺寸为 61 mm×17 mm×11 mm,带充电接口,可与太阳能电池连接实现全天候工作)。

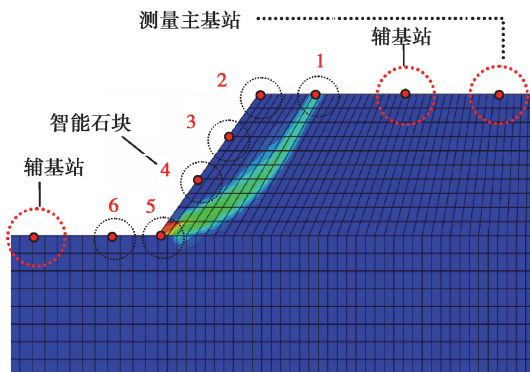


图 1 基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测系统  
Fig. 1 Slope large deformation monitoring system using pasted smart rock

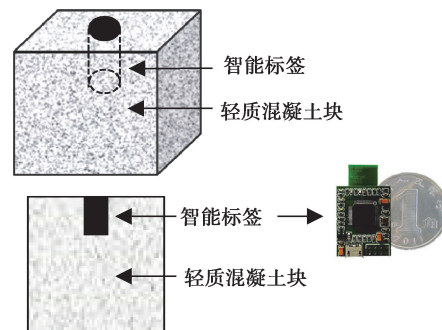


图 2 粘贴式智能石块的结构  
Fig. 2 Structure of pasted smart rock

## 2 基于粘贴式智能石块的边坡大变形边监测算法

由于超宽带(UWB)信号采用超短脉冲,具有持续时间短<sup>[17]</sup>、带宽极大(吉赫兹级),可以提供非常高的时间分辨率(纳秒级)<sup>[18]</sup>,超宽带定位通常采用 TOA(time of flight,或 time of arrival)的测距方案<sup>[19]</sup>,通过测量粘贴式智能石块的智能标签和参考点处基站之间信号的飞行时间,再乘电磁波的传播速度计算出粘贴式智能石块和参考点之间的距离,测距误差可达厘米级。

智能标签的测距原理示如图 3 所示。在  $t_1$  时刻,由粘贴式智能石块上的智能标签向参考点处的基站发送一个无线脉冲消息; $t_2$  时刻,对应基站收到包含时间  $t_1$  的无线脉冲消息,并经过一个事先设定的响应时间( $T_{\text{reply1}}$ )于  $t_3$  时刻向智能标签发送无线脉冲确认消息;智能标签在  $t_4$  时刻收到基站无线脉冲的确认信息,并经过一个事先设定的响应时间( $T_{\text{reply2}}$ )于  $t_5$  时刻发送计算距离的无线脉冲消息;基站在  $t_6$  时刻收到智能标签的包含时间  $t_5$  的无线脉冲消息。 $t_1$ 、 $t_4$  和  $t_5$  为智能标签测量的时间,以智能标签的晶振时钟为基准;而  $t_2$ 、 $t_3$  和  $t_6$  为基站测量的时刻,以基站的晶振时钟为基准。

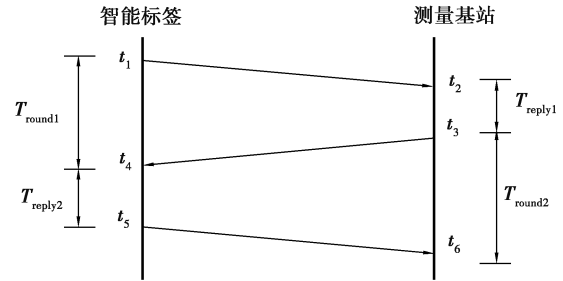


图 3 基于飞行时间和双向测距的智能标签测距原理

Fig. 3 Principle of smart label using TOA and two-way ranging using smart label

粘贴式智能石块上的智能标签至参考点处测量基站的单程飞行时间  $T$  为

$$T = \frac{1}{2}(T_{\text{round1}} - T_{\text{reply1}}), \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2}(T_{\text{round2}} - T_{\text{reply2}}), \quad (2)$$

式中, $T_{\text{round1}}$ 为粘贴式智能石块上的智能标签向参考点处的测量基站发送一个无线脉冲消息并收到确认消息的时间; $T_{\text{reply1}}$ 为测量基站中芯片设定的响应时间; $T_{\text{round2}}$ 为参考点处的测量基站向智能标签发送一个无线脉冲消息并收到确认消息的时间; $T_{\text{reply2}}$ 为智能标签中芯片设定的响应时间; $T_{\text{round1}} = t_4 - t_1$ ,  $T_{\text{reply1}} = t_3 - t_2$ ,  $T_{\text{reply2}} = t_5 - t_4$ ,  $T_{\text{round2}} = t_6 - t_3$ 。

式(1)两边乘以  $T_{\text{reply2}}$ ,式(2)两边乘以  $T_{\text{reply1}}$ ,两式相加可得

$$T(T_{\text{reply1}} + T_{\text{reply2}}) = \frac{1}{2}T_{\text{round1}}T_{\text{reply2}} + \frac{1}{2}T_{\text{round2}}T_{\text{reply1}} - T_{\text{reply1}}T_{\text{reply2}}。 \quad (3)$$

由式(1)和式(2),将式(3)右侧前 2 项的  $T_{\text{reply2}}$  和  $T_{\text{reply1}}$  进行替换,则

$$T(T_{\text{reply1}} + T_{\text{reply2}}) = \frac{1}{2}T_{\text{round1}}(T_{\text{round2}} - 2T) + \frac{1}{2}T_{\text{round2}}(T_{\text{round1}} - 2T) - T_{\text{reply1}}T_{\text{reply2}}。 \quad (4)$$

式(4)进一步转换,可得到智能标签至参考点处的测量基站的单程飞行时间为

$$T = \frac{T_{\text{round1}}T_{\text{round2}} - T_{\text{reply1}}T_{\text{reply2}}}{T_{\text{reply1}} + T_{\text{reply2}} + T_{\text{round1}} + T_{\text{round2}}}。 \quad (5)$$

现有晶振时钟漂移会影响时间测量,假定智能标签和测量基站的晶振时钟漂移分别为  $e_A$  和  $e_B$ ,以  $10^{-6}$  为单位,表示在 1 ms 内存在 1  $\mu$ s 的时间误差。考虑晶振时钟漂移后,单程飞行时间存在延时,则实际的单程飞行时间  $\hat{T}$  为

$$\hat{T} = \frac{T_{\text{round1}}(1 + e_A) - T_{\text{reply1}}(1 + e_B)}{2}, \quad (6)$$

$$\hat{T} = \frac{T_{\text{round2}}(1 + e_B) - T_{\text{reply2}}(1 + e_A)}{2}。 \quad (7)$$

近似认为每次测距时均有  $\hat{T} = T + \Delta T$ ,则式(6)和式(7)可转化为

$$\hat{T} = \frac{T_{\text{round1}} - T_{\text{reply1}}}{2} + \left[ \frac{(e_A - e_B) T_{\text{reply1}}}{2} + \frac{T_{\text{round1}} e_A - T_{\text{reply1}} e_A}{2} \right] = T + \Delta T, \quad (8)$$

$$\hat{T} = \frac{T_{\text{round2}} - T_{\text{reply2}}}{2} + \left[ \frac{(e_B - e_A) T_{\text{reply2}}}{2} + \frac{T_{\text{round2}} e_B - T_{\text{reply2}} e_B}{2} \right] = T + \Delta T. \quad (9)$$

考虑式(1),则式(8)和式(9)可进一步转化为

$$\Delta T = \frac{(e_A - e_B) T_{\text{reply1}}}{2} + \frac{T_{\text{round1}} e_A - T_{\text{reply1}} e_A}{2} = \frac{(e_B - e_A) T_{\text{reply1}}}{2} + \frac{T e_A}{2}, \quad (10)$$

$$\Delta T = \frac{(e_B - e_A) T_{\text{reply2}}}{2} + \frac{T_{\text{round2}} e_B - T_{\text{reply2}} e_B}{2} = \frac{(e_A - e_B) T_{\text{reply2}}}{2} + \frac{T e_B}{2}, \quad (11)$$

式(10)两边乘以  $T_{\text{reply2}}$ ,式(11)两边乘以  $T_{\text{reply1}}$ ,两式相加可得

$$\Delta T = \frac{e_B T_{\text{reply1}} + e_A T_{\text{reply2}}}{2(T_{\text{reply2}} + T_{\text{reply1}})} T. \quad (12)$$

考虑晶振时钟漂移导致的延时后,粘贴式智能石块的智能标签至参考点处测量基站的实际单程飞行时间  $\hat{T}$  和理论飞行时间  $T$  的关系为

$$T = \hat{T} - \Delta T = \hat{T} / \left[ 1 + \frac{e_B T_{\text{reply1}} + e_A T_{\text{reply2}}}{2(T_{\text{reply2}} + T_{\text{reply1}})} \right]. \quad (13)$$

考虑晶振时钟漂移,智能标签至参考点处测量基站的距离  $\hat{L}$  必然存在误差,修正前距离  $\hat{L}$  为

$$\hat{L} = c\hat{T}, \quad (14)$$

式中, $c$  为光速,取  $3 \times 10^8$  m/s。

考虑晶振动随温度的影响及环境的干扰,可将智能标签至参考点处测量基站的距离  $\hat{L}$  进行修正:

$$L = a\hat{L} + b, \quad (15)$$

式中, $a$  和  $b$  为修正系数,由式(13)和式(15)可知, $a$  小于 1。在试验中, $a = 0.987\ 55$ , $b = -0.186\ 85$ 。

在布置粘贴式智能石块时,设置 4 个参考点  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $(i = 1, \dots, 4)$ ,可选择其中 1 个参考点为坐标原点,并根据坐标原点测量各参考点的初始三维位置。假定粘贴式智能石块的三维坐标为  $(x, y, z)$ ,在边坡变形过程中,测量粘贴式智能石块至各参考点的距离  $L_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ),则

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = L_i^2, (i = 1, \dots, 4). \quad (16)$$

式(16)为高度非线性的方程组,可通过优化搜索的方式求解  $(x, y, z)$ :

$$O(C) = \min \{ [(L'_1 - L_1)^2 + (L'_2 - L_2)^2 + (L'_3 - L_3)^2 + (L'_4 - L_4)^2] / 4 \} 0.5, \quad (17)$$

式中, $L_1, L_2, L_3$  和  $L_4$  为粘贴式智能石块至 4 个参考点考虑延时修正后的实测距离, $L'_1, L'_2, L'_3$  和  $L'_4$  为通过式(17)计算得到粘贴式智能石块至 4 个参考点的理论距离,且  $L'_1, L'_2, L'_3$  和  $L'_4$  均含有未知的三维位置  $(x, y, z)$ 。

测得粘贴式智能石块任意时刻的瞬时三维位置  $(x, y, z)$  后,与布设粘贴式智能石块时的坐标比较,得到粘贴式智能石块的三维位移变化  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ,从而判断边坡的变形状态。

### 3 粘贴式智能标签的模拟定位试验

取 4 个参考点,其坐标分别  $R_1(0, 0, 0)$ 、 $R_2(2.976, 0, 0)$ 、 $R_3(2.976, 4.058, 0)$  和  $R_4(0, 4.058, 0.678)$ ,其中,参考点  $R_1(0, 0, 0)$  布置测量主基站,其他 3 个参考点布置测量辅基站,模拟定位试验如图 4 所示。智能标签的初始坐标为  $R_0(-1.954, 2.013, -1.773)$ ,将智能标签沿着  $x$  轴方向从  $x = -1.954$  移动到  $x = 5.046$ ,通过式(1)~式(17)采用超宽带通信理论和定位方法测算智能标签的坐标,并与激光测距仪测量的实际坐标对比,结果见表 1,表中  $x$  轴坐标误差  $\epsilon_x = |x - x'|$ , $x$  和  $x'$  分别为智能标签的实际坐标和测算坐标。

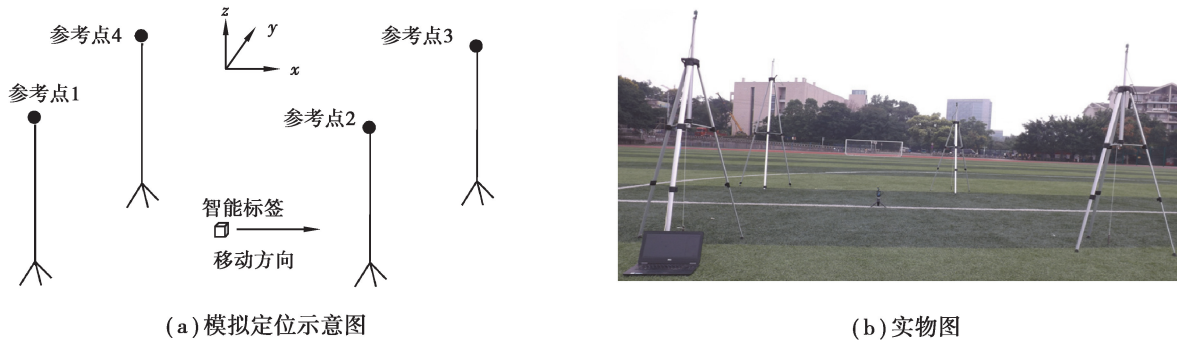


图 4 粘贴式智能标签模拟定位试验示意图  
Fig. 4 Sketch of localization for pasted smart label

表 1 智能标签的定位精度

Table 1 Localization resolution of smart label			m
$x$ 轴坐标实际值	$x$ 轴坐标测算值	$x$ 轴坐标误差 $\varepsilon_x$	
-1.954	-1.973	0.019	
-1.454	-1.445	0.009	
-0.954	-0.965	0.011	
-0.454	-0.467	0.013	
0.046	0.048	0.002	
0.546	0.572	0.026	
1.046	1.024	0.022	
1.546	1.555	0.009	
2.046	2.057	0.011	
2.546	2.564	0.018	
3.046	3.076	0.030	
3.546	3.522	0.024	
4.046	4.046	0.000	
4.546	4.568	0.022	
5.046	5.051	0.005	

由表 1 可得,测量误差的平均值  $\mu$  为 0.009 m,标准差  $\sigma$  为 0.015 m,上述测量样本为 15 个,假定测量误差服从正态分布,按 95% 的置信水平考虑,则智能标签的定位误差为  $\mu \pm 1.96\sigma/\sqrt{n} = \pm 0.017$  m,即置信区间为  $[-0.017, 0.017]$ 。可见,粘贴式智能石块的监测精度在厘米级别(1.7 cm),小于边坡处于临界失稳状态时的特征点变形,再考虑到粘贴式智能石块的远距离、非接触式的监测模式,粘贴式智能石块可用于监测边坡的失稳滑动的初期及中期变形监测,也可用于边坡失稳之后的滑动、坍塌、飞落等中后期大变形破坏过程。

#### 4 粘贴式智能石块的边坡大变形监测模型试验

文中采用推移加载模拟边坡滑动<sup>[20]</sup>,在不锈钢模型槽中制作边坡模型,通过推移边坡致使边坡失稳并坍塌,研究在边坡滑动坍塌飞落过程中粘贴式智能石块的变形监测性能。模型槽尺寸为  $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,采

用不锈钢和钢化玻璃制作,通过大行程分离式千斤顶施加推力模拟滑动时的推力,大行程分离式千斤顶的行程为 150 mm。布置 4 个粘贴式智能石块,坡面和坡顶各 2 个。为了验证粘贴式智能石块的监测效果,在边坡表面放置 8 个彩色标志作为特征点,坡面和坡顶面各 4 个,为了观测方便和准确,将 8 个特征点布置在靠近钢化玻璃大约 1~2 cm 处的边坡侧面。在模型槽的钢化玻璃上粘贴高精度软尺(精度为 0.5 mm,估读到 0.1 mm),用于观测 8 个特征点的水平位移。在模型槽外侧设置 4 个参考点,在参考点 1 处设置主基站,并取参考点 1 处为原点, $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴分别为模型槽宽度、长度和高度方向。4 个参考点的坐标分别为  $P_1(0,0,0)$ 、 $P_2(1.404,0,0)$ 、 $P_3(1.404,2.301,0)$  和  $P_4(0,2.301,0.678)$ 。边坡变形过程粘贴式智能石块的三维坐标为  $P_0(x,y,z)$ 。试验中边坡砂土的力学参数见文献[20]。模型边坡高为 0.75 m,分为 2 层,下层为 0.35 m,上层为 0.4 m,试验中仅推移 0.4 m 的边坡上层部分,坡肩至推移板的水平距离为 0.4 m,坡肩至坡脚的水平距离为 1.05 m,坡脚至推移板的水平距离为 1.45 m,斜坡的坡角为 35.5°。边坡模型试验的示意图和实物图如图 5 所示。

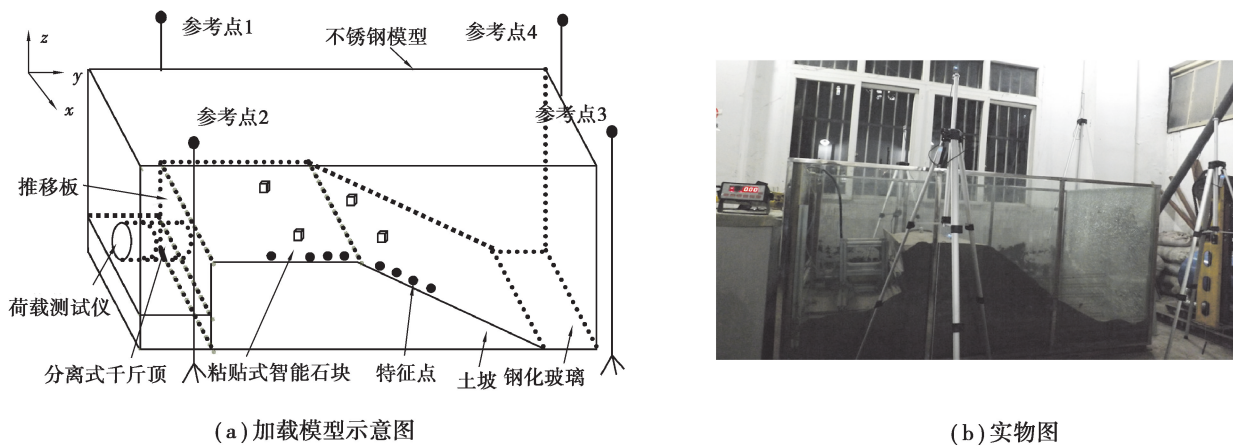


图 5 边坡模型试验示意图

Fig. 5 Sketch of slope model loading

加载时采用荷载测试仪测量分离式千斤顶的推移荷载,测量精度为 10 N,分 22 级荷载进行加载,各级荷载维持 10 min。前 10 级荷载每级荷载约 200 N,加载至大概 1 800 N 时边坡开始失稳滑动,后 12 级荷载由分离式千斤顶的行程控制,每一级推移 10 mm,同时记录分离式千斤顶的推力。采用软尺测量 8 个特征点的水平位移,其与推移荷载的关系如图 6 所示。通过式(1)~式(17),采用超宽带测量 4 个参考点处测量基站至粘贴式智能石块的距离,然后计算粘贴式智能石块的三维位移。试验中,在推移作用下边坡沿模型槽长度方向滑动坍塌,粘贴式智能石块的  $y$  方向水平位移占主导地位,故仅给出粘贴式智能石块沿模型槽长度方向的水平位移,粘贴式智能石块的  $y$  方向水平位移与推力的关系如图 7 所示。

由图 6 可知,在推力 < 1 800 N 时,通过软尺测得的 8 个特征点的水平位移与推力之间的曲线关系近似为线性关系;在推力为 1 800 N 左右时,水平位移与推移荷载的曲线关系出现拐点,边坡处于临界状态,各特征点的水平位移在 30 mm 以内;如分离式千斤顶的行程继续增大,边坡的水平位移迅速增大,分离式千斤顶的行程大幅度增加而推移荷载开始逐渐小幅度降低,此阶段为边坡发生失稳滑动的大变形阶段,边坡的中间部分开始发生局部坍塌;最终分离式千斤顶的行程达到 150 mm 时,边坡的中间部分发生大面积坍塌,由于模型槽钢化玻璃的摩擦作用,边坡两侧部分仅发生较大变形的滑移,8 个特征点的水平位移大幅度增加,而分离式千斤顶的荷载继续减小。可见,由边坡表面的 8 个特征点水平位移可判断,在推力为 1 800 N(水平位移在 30 mm 以内)时,边坡为临界稳定状态,之后发生失稳破坏的大变形滑动,随着边坡中间部分发生坍塌,8 个特征点的水平位移迅速提高而对应的推移荷载减小。

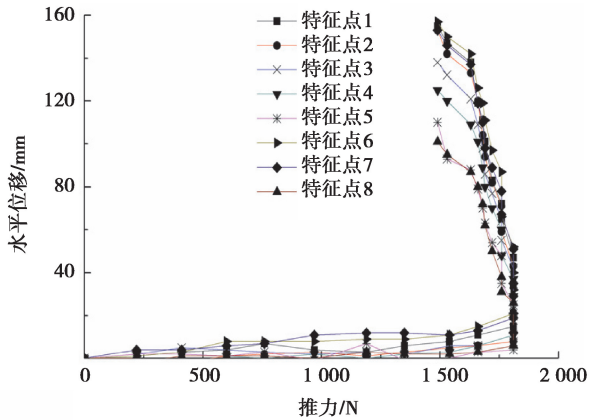


图 6 边坡特征点水平位移与推力的关系

Fig. 6 Relationship between critical points' horizontal displacement and driving force

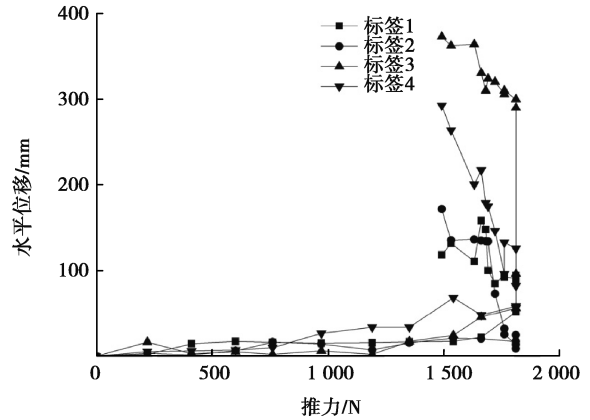


图 7 粘贴式智能石块的水平位移与推力的关系

Fig. 7 Relationship between pasted smart rock's horizontal displacement and driving force

由图 7 可知,在推力 $<1\ 800\ \text{N}$ 时,粘贴式智能石块的水平位移与推力的关系近似为线性关系;在推力为 $1\ 800\ \text{N}$ 左右时,粘贴式智能石块的水平位移与推力的曲线关系存在拐点和突变,此时粘贴式智能石块的水平位移在 $50\ \text{mm}$ 以内;如分离式千斤顶的行程继续增大,粘贴式智能石块的水平位移迅速增大,分离式千斤顶的行程大幅度增加而推移荷载开始逐渐小幅度降低,此阶段为边坡发生失稳滑动的大变形阶段,边坡的中间部分发生局部坍塌;最终分离式千斤顶的行程达到 $150\ \text{mm}$ 时,边坡的中间部分发生大面积坍塌,布置在坡顶的 2 个粘贴式智能石块的水平位移在 $150\ \text{mm}$ 左右,布置在坡面的 2 个粘贴式智能石块位于坍塌区,其水平位移超过 $300\ \text{mm}$ ,与边坡坍塌后的运动距离基本一致。考虑到模型槽两侧钢化玻璃的摩擦作用,由于粘贴式智能石块布置在边坡中间且 2 个粘贴式智能石块位于坡面的坍塌区域,其水平位移大于布置坡顶的 2 个粘贴式智能石块及边坡两侧的 8 个特征点。

通过粘贴式智能石块的水平位移等可判断在推力为 $1\ 800\ \text{N}$ 时边坡为临界稳定状态,随着行程增大,边坡中间发生局部失稳坍塌并最终发生大面积坍塌,其结果与软尺的位移监测结果趋势基本一致。

## 5 结 论

1) 针对边坡滑动失稳及坍塌飞落的中后期大变形监测存在服役环境恶劣、传感器布设困难、现有传感器量程有限等问题,提出基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测方法,提出粘贴式智能石块的概念,发展了基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测的超宽带测量简化算法。

2) 根据模拟定位试验,粘贴式智能标签的定位精度为 $\pm 0.017\ \text{m}$ ,且具有 95% 的置信水平。采用不锈钢和钢化玻璃模型槽、大量程分离式千斤顶和荷载测试仪构建了边坡滑动坍塌大变形试验系统,通过推移加载方法模拟边坡滑动坍塌,采用粘贴式智能石块和超宽带测量基站,通过室外粘贴式智能标签的模拟定位试验和室内边坡模型试验验证了粘贴式智能石块的监测效果。

3) 通过软尺观测的结果显示,在推力为 $1\ 800\ \text{N}$ 时,8 个特征点的水平位移与推力的曲线关系出现拐点,在分离式千斤顶的行程继续增大时,8 个特征点的水平位移迅速提高,边坡发生坍塌的大变形破坏。粘贴式智能石块测量的结果显示,在推力为 $1\ 800\ \text{N}$ 时,粘贴式智能石块的水平位移与推力的曲线关系出现拐点,随后粘贴式智能石块的水平位移迅速提高而对应的推力减小,最终分离式千斤顶的行程达到 $150\ \text{mm}$ 时,布置在坡顶的 2 个粘贴式智能石块的水平位移在 $150\ \text{mm}$ 左右,布置在坡面的 2 个粘贴式智能石块位于坍塌区,其水平位移超过 $300\ \text{mm}$ ,与边坡坍塌后的运动距离基本一致。粘贴式智能石块的位移可反映边坡变形失稳及滑动坍塌的中后期大变形,且与软尺常规的监测结果规律一致。

4) 基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测方法具有无需布线、非接触式、精度高、测量距离远等优点,与其他方法结合使用可实现边坡变形全过程监测,基于粘贴式智能石块的边坡大变形监测方法值得进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 唐晓松,郑颖人,唐辉明. 边坡变形破坏演化特征的数值分析[J]. 重庆大学学报,2013,36(10):101-113.  
TANG Xiaosong, ZHENG Yinren, TANG Huiming. Numerical analysis on the evolutionary features of deformation and failure modes of slopes[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36 (10): 101-113. (in Chinese)
- [2] 江胜华,汪时机,李伟清,等. 基于位移变化率和强度折减有限元的边坡失稳判定方法[J]. 农业工程学报,2017,33(15):155-161.  
JIANG Shenghua, WANG Shiji, LI Weiqing, et al. Slope instability evaluation method using finite element method of strength reduction and displacement rate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (15):155-161. (in Chinese)
- [3] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307-316.
- [4] Michael J O. In situ change analysis and monitoring through terrestrial laser scanning[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29(2): 04014040.
- [5] Lan H X, Gao X, Liu H J, et al. Integration of terraSAR-X and palsar psi for detecting ground deformation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(15):5393-5408.
- [6] Dar H C, Andrew W. Inspection and condition assessment using ground penetrating radar[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1):207 -214.
- [7] Shu R Y. Assessment of rainfall-induced landslide susceptibility using GIS-based slope unit approach[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(4): 04017026.
- [8] Wang J P, Gao J X, Liu C, et al. High precision slope deformation monitoring model based on the GPS/ Pseudolites technology in open-pit mine[J]. Mining Science and Technology, 2010(20): 126-132.
- [9] 贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩土力学, 2018,39(3):1130-1136.  
JIA Shuguang, JIN Aibing, ZHAO Yiqing. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39 (3):1130-1136. (in Chinese)
- [10] 高杰,尚岳全,孙红月,等. CCD微变形监测技术在边坡远程监控中的应用. 岩土力学,2011,32(4):1269-1272.  
GAO Jie, SHANG Yuequan,SUN Hongyue, et al. Application of CCD micro-deformation monitoring technology to slope remote monitoring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1269-1272. (in Chinese)
- [11] Chung C C, Lin C P, Wang K, et al. Improved TDR method for quality control of soil-nailing works[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 06015011.
- [12] Assaf K, Shun U, Eyal L. In situ profiling of soil stiffness parameters using high-resolution fiber-optic distributed sensing [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(8): 04016032.
- [13] Mao W W, Yang Y, Lin W L, et al. High frequency acoustic emissions observed during model pile penetration in sand and implications for particle breakage behavior[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11): 04018143.
- [14] 王方秋,张小飞,汪飞. IR-UWB系统中基于 root-music 算法的 TOA 和 DOA 联合估计[J]. 通信学报,2014(2):137-145.  
WANG Fangqiu, ZHANG Xiaofei, WANG Fei. Root-music-based joint TOA and DOA estimation in IR-UWB[J]. Journal on Communications, 2014 (2): 137-145. (in Chinese)
- [15] 沈丹鸿,李培丽,郑加金,等. 基于 LiNbO<sub>3</sub>M-Z 调制器的 UWB 信号 PAM 调制技术研究[J]. 光电子·激光,2013(1):79-86.  
SHEN Danhong, LI Peili, ZHENG Jiajin, et al. Research of ultra-wide band pulse amplitude modulation based on LiNbO<sub>3</sub> Mach-Zehnder modulator[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2013 (1): 79-86. (in Chinese)



- [10] Yuze N, Junliang T, Suisheng L, et al. Study of eccentric load coefficient of pre-stressed concrete partial cable-stayed bridge with corrugated steel webs[J]. *Advances in Engineering Research (AER)*, 132:224-230.
- [11] 常诚. 现浇箱梁横向分布调整系数的实体有限元计算研究[J]. *中外公路*, 2018, 38(5): 102-105.  
CHANG Cheng. Study on solid finite element computation of load transverse distribution adjustment coefficients of cast-in-place box girder method[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(5): 102-105. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D60-2015 General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)

(上接第 83 页)

- [16] Patwari N, Ash J N, Kyperountas S, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 54-69.
- [17] 陈丽丽, 于欣, 窦峥. 采用椭圆波脉冲的多波段超宽带性能研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014(4): 499-503.  
CHEN Lili, YU Xin, DOU Zheng. Research on the performance of the multiband impulse radio UWB communication system based on PSWF[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014 (4): 499-503. (in Chinese)
- [18] 翟双, 钱志鸿, 王雪, 等. IR-UWB 系统中基于归一化门限的 TOA 估计[J]. *北京邮电大学学报*, 2015, 38(4): 19-23.  
ZHAI Shuang, QIAN Zhihong, WANG Xue, et al. Toa estimation based on normalized threshold for IR-UWB systems [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2015, 38 (4): 19-23. (in Chinese)
- [19] 马永涛, 侯振寰, 姜启登, 等. 基于超宽带信号到达时间的室内人员被动式定位算法及仿真[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(8): 843-849.  
MA Yongtao, HOU Zhenhuan, JIANG Qideng, et al. Device-free indoor person localization algorithm and simulation based on time of arrival for UWB signal[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2017, 50 (8): 843-849. (in Chinese)
- [20] 江胜华, 刘晓春, 孙伟贺, 等. 基于智能磁性石块埋入的边坡深部变形失稳监测模型 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 156-161.  
JIANG Shenghua, LIU Xiaochun, SUN Weihe, et al. Monitoring model of slope internal deformation and instability based on smart magnetic rock [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(8): 156-161. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)