

锚杆支护边坡预警阈值研究及智能监测系统开发

王桂萱,黄平,赵杰

(大连大学土木工程技术研究与开发中心,辽宁 大连 116622)

摘要 目的 研究锚杆支护边坡失稳情况下的监测预警阈值,开发智能监测系统,实现边坡安全预警。**方法** 采用 PLAXIS2D 建立边坡有限元模型,运用强度折减法分析动态折减的边坡稳定性,研究锚杆应变与边坡失稳过程的关联性;利用 LabVIEW 软件平台开发具有智能预警功能的实时监测系统并在实际现场进行应用。**结果** 获得了动态折减系数下对应的安全稳定系数;边坡安全系数越小,锚杆应变值越大,应变变化速率越快,边坡处于不稳定状态,易发生边坡失稳破坏;对边坡预警分级标准给出的对应锚杆监测应变阈值分别为 195.12×10^{-6} 、 1212.15×10^{-6} 、 1236.92×10^{-6} ;在 LabVIEW 中实现了智能监测预警系统的开发,并对某挡土墙的预警监测验证其实际效果是可行的。**结论** 笔者所开发锚杆支护边坡安全预警分级开发的智能监测系统监测效果较好,可为锚杆支护边坡结构的智能监测预警系统提供思路。

关键词 锚杆支护;强度折减;预警阈值;LabVIEW;监测系统

中图分类号 TU457

文献标志码 A

Research on Warning Threshold and Development of Intelligent Monitoring System of Rock Bolt Supporting Slope

WANG Guixuan, HUANG Ping, ZHAO Jie

(Research and Development Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian, China, 116622)

Abstract: This paper had developed an intelligent monitoring system based on the research of monitoring and early warning thresholds in the case of slope instability of anchor support to realize slope safety early warning. PLAXIS2D was employed to establish the slope finite element model. The strength reduction method was applied to analyze the stability of the dynamically reduced slope and to study the correlation between anchor strain and slope instability process. The LabVIEW software platform was used to develop a real-time monitoring system with intelligent

收稿日期:2020-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51738010)

作者简介:王桂萱(1960—),男,教授,主要从事岩土工程、防灾减灾、结构健康监测等方面研究。

warning function and apply it in the actual site. The coefficient of safety and stability corresponding to the dynamic discount factor were obtained. The smaller the slope safety factor is, the larger the anchor strain value is and the faster the strain change rate is. The slope is in an unstable state and prone to slope instability damage at this point. The corresponding anchor monitoring strain thresholds given for the slope warning classification criteria were 195.12×10^{-6} , $1\,212.15 \times 10^{-6}$ and $1\,236.92 \times 10^{-6}$ respectively. The development of intelligent monitoring and warning system had been realized in LabVIEW. Its effect was verified by monitoring a retaining wall. The intelligent monitoring system developed based on the safety warning grading of anchor support slope has a good monitoring effect. It can provide ideas for the intelligent monitoring and early warning system of anchor support slope structure.

Key words: bolt support; strength reduction; warning threshold; LabVIEW; monitoring system

随着我国基础建设规模日渐庞大,锚杆在复杂环境下的边坡支护工程中得到了广泛运用。锚杆以自身的高抗拉性能以及注浆体与土层粘结作用,充分提高岩土边坡整体强度,从而提升边坡的安全稳定性,避免滑坡导致的地质灾害,造成不同程度的人员伤亡、经济损失及环境破坏,因此在边坡工程防护中具有不可替代的作用^[1]。然而在锚杆投入运营后,受到外界因素影响,仍然有很大可能引起边坡失稳,造成滑坡事故,所以有效的监测预警必不可少。坡体变形破坏大多符合渐进破坏特征^[2]和三级法^[3-5]特点,整个变形失稳过程从初始变形到最终破坏,经历了局部应力集中、局部塑性区出现、塑性区贯通几个阶段。除了传统的极限平衡法外,强度折减法^[6]在地质边坡研究与实践中得到了广泛运用。其中不乏开创性的成果:陈国庆^[7]、刘海政^[8]将整体强度折减法和动态强度折减法相结合,克服传统算法导致的缺陷,更好地判断边坡稳定性;晏长根等^[9]进一步完善边坡安全评价体系,在监测预警工作方面提供一定参考。目前多数研究都停留在支护边坡的受力变形特征分析^[10-11],对深入的预警研究还是稍有不足,有部分原因是监测对象多样性,没有深入研究某种监测对象的监测结果与边坡稳定性的内在联系。笔者对于在支护结构中得到大量应用的锚杆进行了相关研究。LabVIEW 软件对于系统开发有

着难以超越的简便性与高效性^[12-13]。基于上述分析,笔者运用岩土数值分析软件 PLAXIS 分析边坡锚杆应变与安全稳定性系数的关联性,利用强度折减法的原理,对锚杆的受力变形分析,寻找到边坡临界失稳破坏的锚杆应变阈值,判定最终的预警阈值,将其导入 LabVIEW 所编译的监测系统中,优化监测方法,达到智能监测预警的目的。

1 计算方法及预警分级

1.1 强度折减法

强度折减法即在进行弹塑性有限元分析的过程中将岩土体的抗剪强度参数减至其临界破坏状态,有限元软件可依据内置算法及相关命令进行计算,最终得到边坡安全稳定性系数,同时也可以得出坡体的破坏滑动面。

强度折减计算主要对土体的两个抗剪强度参数内摩擦角 φ 与黏聚力 c 进行比例折减。安全性分析中计算阶段的土体强度参数通过总乘子 $\sum M_{sf}$ 定义,即

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{input}}{\tan\varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \tag{1}$$

式中:带下标“input”的强度参数是在材料初始输入的值;带下标“reduced”的强度参数是在分析中采用的折减值。在 PLAXIS 中进行安全性计算时,所有材料强度参数取输入值,即 $\sum M_{sf}$ 为 1.0;利用式(1)来调整土体的强度指标对边坡稳定性进行数值分析,

通过不断增加折减系数,反复计算,达到模型破坏状态为止,此时的总乘子即为安全稳定性系数 F_s 。

1.2 预警分级划分

《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2017)对于边坡稳定性状态的划分给出了标准,依据文献[8],将锚杆支护的边坡进行监测预警分级分为绿色安全、黄色异常、橙色警告和红色危险。为了避免延迟预警造成恶劣突发事件的发生,提高规范中的边坡稳定安全系数,在规范基础上增加 0.05,如表 1 所示。

表 1 锚杆监测的边坡预警分级

Table 1 Early warning classifications of slope using monitoring method of bolts

| 边坡稳定系数 F_s | 锚杆轴向应变 ε_s | 边坡稳定性状态 | 预警分级 |
|--------------------------|--|---------|------|
| $F_s < 1.05$ | $\varepsilon_s > \varepsilon_{1.05}$ | 不稳定 | 红色危险 |
| $1.05 \leq F_s < 1.10$ | $\varepsilon_{1.05} \geq \varepsilon_s > \varepsilon_{1.10}$ | 欠稳定 | 橙色警告 |
| $1.10 \leq F_s < F_{st}$ | $\varepsilon_{1.10} \geq \varepsilon_s > \varepsilon_{st}$ | 基本稳定 | 黄色异常 |
| $F_s \geq F_{st}$ | $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}$ | 稳定 | 绿色安全 |

注: F_{st} 为《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2017)规定的稳定安全系数再加 0.05 得到的值。

2 系统开发设计

笔者基于图标型程序编译平台 LabVIEW 进行监测预警系统的开发。LabVIEW 是一个优秀的虚拟机软件,不仅可以进行程序编写工作,还可以根据需求设计运行环境及系统编译。

整个程序的目标实现主要依靠条件语句来限定程序的逻辑顺序,即启动程序→启动仪器→连接目标→保存数据、实时显示、预警→关闭引擎→退出,逻辑顺序示意图如图 1 所示。

此逻辑架构主要利用将初始字符串数组在移位寄存器中进行寄存上一次循环值,然后再传递到下一次循环中,进而利用对数组的操作操控条件结构,最终使条件结构根据指令作出相应判断和分支执行。

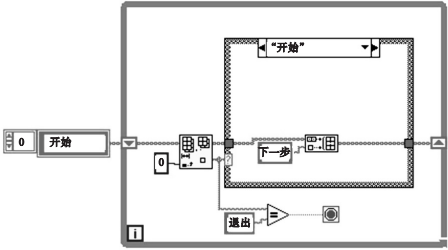


图 1 逻辑顺序示意图

Fig. 1 Logical sequence diagram

示意架构图主要实现过程首先初始数组值只有一个字符串,即“开始”。此时启动进入 While 循环结构,删除数组函数将第一个(0)信号值删去,并将第一个信号值(开始)接入条件结构触发“开始”分支执行,在执行过程中创建新字符串数组并添加“退出”,传递条件结构并寄存在移位寄存器中;同理,再依次激活“下一步”和“退出”分支,最终由删除信号值与“退出”等价触发 While 循环结束信号。

3 算例分析

3.1 模型及参数

当进行边坡安全稳定性分析时,若使用高级岩土本构模型,如土体硬化模型和小应变土体硬化模型,这些本构模型实际上会退化为标准的 Mohr-Coulomb 模型,这是由于 PLAXIS2D 安全性计算时不考虑刚度的应力相关性以及土体硬化效应,刚度在计算阶段开始时基于初始应力进行计算,此后一直保持为常量至计算阶段结束。因此可以直接选择 Mohr-Coulomb 模型进行安全稳定性分析。

Embedded beam row 单元是 PLAXIS 软件中的一种特殊结构单元,考虑桩周土体的三维应力状态和变形特征,能够对注浆锚杆进行有效的简化模拟。

某边坡工程,边坡比例 1:0.5,边坡高度为 10 m,边坡剖面如图 2 所示。采用 3 排无护表构件锚杆进行支护,锚杆钢筋长度为 9 m,直径为 0.028 m,锚固角为 15°(不考虑施工因素的影响)。

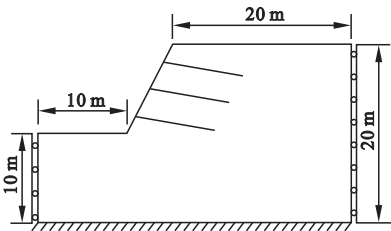


图2 边坡算例剖面图

Fig. 2 Cross-section of slope example

边坡的有限元网格模型如图3所示。边坡侧面约束对应的法向位移,底面部位约束所有方向的位移。土体参数如表2所示,锚杆弹性模量 E 为29 GPa,钻孔半径为0.05 m。

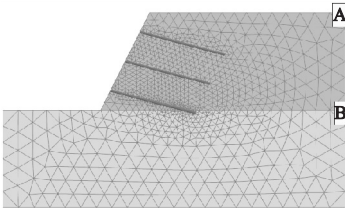


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

表2 土体参数表

Table 2 Soil parameter table

| 土体 | 重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | c/kPa | $\varphi/(\text{^\circ})$ | E/MPa | 泊松比 ν |
|----|--|----------------|---------------------------|----------------|--------------|
| A | 18 | 33 | 28 | 10 | 0.3 |
| B | 20 | 35 | 32 | 20 | 0.3 |

3.2 计算分析

边坡在经过锚杆支护加固后,其稳定性得到了一定提高。初始边坡安全系数为1.549,进行加固后变为2.151。进行边坡安全系数计算时产生的增量位移与边坡实际的位移并无太大关系,可从增量位移变化云图中看出滑动面位置。图4和图5分别为加固前后的增量位移云图及图例,加固之后的滑动面较天然边坡后移,边坡稳定性明显提高。

在锚杆施工完成后工作中,假设边坡其他条件保持不变,对土层的抗剪强度系数 K 进行折减接近边坡极限状态,其取值序列为1.10,1.20,1.30,1.40,1.50,1.60,1.70,1.80,1.90,2.00,2.10。基于Mohr-Coulomb强度准则,通过动态折减序列折减边坡强度参数后,再通过整体强度折减法计算整个边坡的安全稳定性系数。

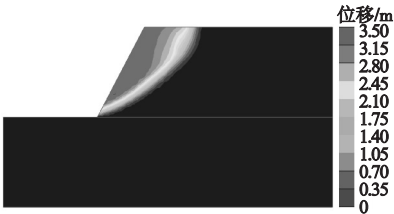


图4 天然边坡增量位移云图

Fig. 4 Cloud chart and legend of incremental displacement of natural slope

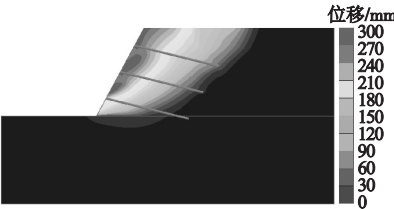


图5 锚固边坡增量位移云图

Fig. 5 Cloud chart and legend of incremental displacement of anchored slope

将动态折减序列的强度参数输入模型,利用整体强度折减法进行计算,获得了边坡渐进失稳的演化过程,在不断的折减过程中观测到塑性区延展趋势,图6所示为部分折减模拟结果及塑性点区域。随着折减系数的增大,整个边坡的塑性区不断扩大,边坡响应也更加强烈,基于抗剪强度参数的动态序列折减方法对于研究边坡稳定性及破坏机理有一定的实用性。

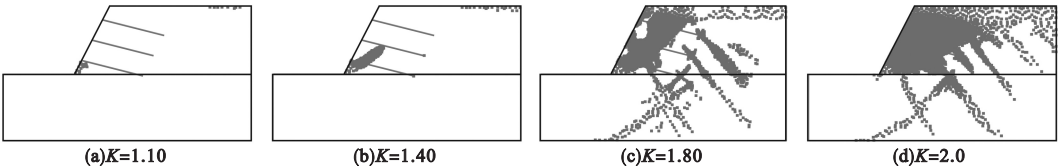


图6 折减模拟结果

Fig. 6 Strength reduction simulation results

3.3 动态稳定性系数

土体的抗剪强度参数每经历一次折减后,再利用整体强度折减法计算,可算出折减系数 K 对应的稳定性系数 F_s 值。表3为折减系数 K 动态序列变化对应的动态安全系数。

表3 动态折减系数与安全系数

Table 3 Dynamic reduction factors and safety factors

| K | F_s | K | F_s |
|-----|-------|-----|-------|
| 1.0 | 2.151 | 1.6 | 1.344 |
| 1.1 | 1.957 | 1.7 | 1.265 |
| 1.2 | 1.792 | 1.8 | 1.194 |
| 1.3 | 1.655 | 1.9 | 1.132 |
| 1.4 | 1.536 | 2.0 | 1.075 |
| 1.5 | 1.433 | 2.1 | 1.024 |

随着折减系数的增大,抗剪强度参数逐渐减小,安全系数也随之降低;锚固边坡的初始安全系数为2.151,开始进行折减时,安全系数下降速率较快,当折减系数逐渐接近2.151时,安全系数下降的速率会逐渐降低;当达到初始安全系数的临界值时,边坡发生失稳,开始倒塌。当边坡除抗剪强度参数外其他条件保持不变时,初始折减序列与折减后边坡安全稳定系数成反比。

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2017)要求,边坡锚杆监测预警分级中 F_{st} 取1.35(规定值再加0.05)。当 F_s 分别为1.05,1.10,1.35时,对应折减系数 K 为2.049,1.957,1.593。

3.4 数据处理

无护表构件锚杆工作时,现场利用埋设在锚杆钢筋内的应变传感器可以测得不同截面除的轴向应变值,锚杆某截面的轴力值可利用弹性力学公式计算出。因此,根据弹性力学公式,锚杆应变的计算方法如下:

$$\varepsilon = N_s / E_m A. \tag{2}$$

式中: ε 为锚杆的应变; N_s 为锚杆某处的轴力; E_m 为锚杆的弹性模量; A 为锚杆截面积。提取折减系数为2.049、1.957及1.593的三种工况模型中对应的锚杆最大轴力,计算对应的应变值作为预警阈值,计算结果见表4。

表4 预警分级及预警阈值

Table 4 Early warning classifications and warning threshold

| 预警值 F | 折减系数 K | 轴力 N/kN | 应变阈值/ 10^{-6} |
|------------|----------|------------------|-----------------|
| $F_{1.05}$ | 2.049 | 281.72 | 1 236.92 |
| $F_{1.10}$ | 1.957 | 276.08 | 1212.15 |
| $F_{1.35}$ | 1.593 | 44.44 | 195.12 |

当锚杆监测应变值小于 195.12×10^{-6} 时,边坡安全系数大于1.35,处于稳定状态,前面板显示图标为绿色安全;当监测应变值处于 $195.1 \times 10^{-6} \sim 1212.15 \times 10^{-6}$ 时,边坡处于基本稳定状态;当监测应变值处于 $1212.15 \times 10^{-6} \sim 1\,236.92 \times 10^{-6}$ 时,边坡处于橙色警告阶段,此时边坡安稳定系数已经下降至(1.05,1.10]区间,此时应采取相关措施,对监测对象进行健康诊断;当监测应变值大于 $1\,236.92 \times 10^{-6}$ 时,此时边坡处于一个相当危险的阶段,监测工作人员应立即采取措施加固坡体,必要时疏散周围人群,避免造成巨大损失。当边坡安全系数越小时,锚杆应变监测值越大,应变值变化越快,此时边坡处在警告危险状态,发生突然失稳破坏的概率越大;当边坡安全系数越大,锚杆应变值基本较小,基本为锚杆注浆体硬化及边坡初始应力场产生的应变监测值,此时边坡处于安全稳定状态。

4 监测预警系统开发

依据数值分析的最终结果,其可行性及预警阈值为系统开发提供了前提条件。成套的数据采集系统包括了传感器、解调设备、数据采集卡、计算机以及测量采集软件,如图7所示。

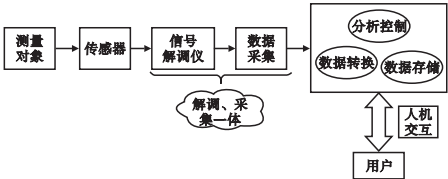


图7 监测数据采集及预警系统示意图
Fig. 7 Schematic diagram of monitoring data collection and early warning system

4.1 数据监测预警

数据从下位机(信号解调仪)解调出上传到上位机(监测程序),再从虚拟机的前面板传递到程序面板,结果程序处理后,最终将数据传导回前面板显示或者存储等。

预警程序结构如图 8 所示。其中阈值区为簇,内部包含三个数值输入控件。由采集来的数据信号簇执行进入“Update Display”分支,用按名称解除捆绑函数自由选择需要的单独元素信号,达到实时预警。并通过执行主体功能分支的前分支状态,将通道值赋予对应的配置信号,再通过前面板选取通道来执行“Update Display”分支,完成数据显示。

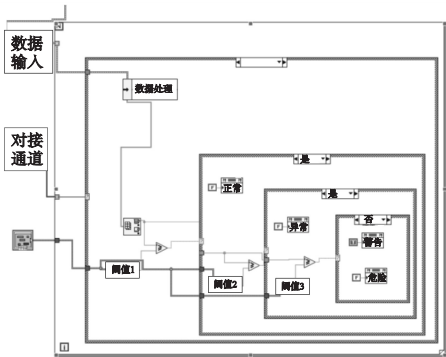


图 8 预警程序结构

Fig. 8 Early warning program structure

预警程序逻辑主要是利用数组函数选出信号组中的最大值与第一个阈值比较大小,若大于等于则执行最外围条件结构的“是”分支,否则执行“否”分支并结束返回重新实时取值。依次类推,直到遇到需要执行“否”分支就终止并点亮相应的信号灯及熄灭其他无关信号灯。具体的逻辑流程图如图 9 所示。

4.2 数据实时显示

数据实时显示主要是通过选定通道,读取配置信号数组并配置进曲图中,从而实现解调的应变数据实时显示。程序示意框图如图 10 所示,时程图子 vi 共设置了 4 个接线端,分别为对接通道接入口(Channel List)、解调配置接入口(DLUT_SHM_Cluster)、前一循环波形 vi 服务器引用接入口、波形导出

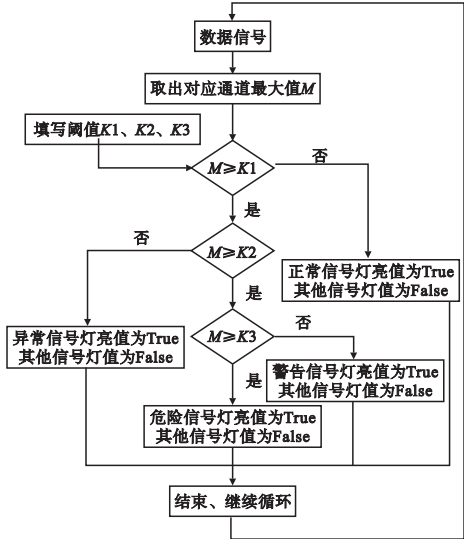


图 9 预警逻辑流程图

Fig. 9 Early warning logical flow chart

接入口。该程序主要运用了调用对象属性节点和 vi 服务器引用。调用对象属性节点可以有效地抽取出其属性值;vi 服务器引用在默认情况下,返回当前 vi 的静态 vi 引用,此处的 vi 特指波形图。由于通道为列表框类型,所以利用调用列表框的属性节点来有效的抽取出其属性值,同时为了将数据实时加入进波形图中,将波形图的服务器引用由前到后的不断循环。

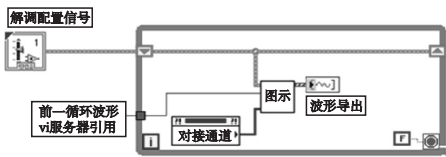


图 10 应变实时显示程序示意框图

Fig. 10 Real-time display program schematic diagram

4.3 监测预警测试

在整体系统完备后,需要对软件系统实用性进行调试,让其可以应用到实验或实际工程中,起到智能监测及实时预警的作用。采用预警级别划分计算出来的阈值,所以在阈值区从小到大分别导入阈值 1、阈值 2、阈值 3 作为解调阈值。系统启动后,选中解调配置过的通道即可实时显示与监测预警。

调试过程:选中两个对应通道,在波形图中分别为蓝色与红色线条,拉动应变传感器,以传递实时应变量。当通道内最大应变大于 50×10^{-6} 时,系统此时是危险的信号灯亮起。

5 实例分析

大连大学旧停车场,紧靠某东西走向加筋挡土墙,后由于规划重新使用,因此采用锚杆对旧挡土墙进行加固。挡土墙高 3.4 m,墙后为填土,坡顶有一道路。该挡土墙为直立式挡土墙,墙厚 0.3 m,有 6 层加筋,根据相关工程规范,选用 4.2 m 长锚杆进行挡土墙的加固。锚杆采用钢筋直径为 0.025 m,弹性模量为 210 GPa。锚杆钻孔孔径为 0.15 m,锚杆间隔为 2 m。注浆体采用标号为 42.5 的硅酸盐水泥拌和砂浆,砂浆抗压强度为 14.6 MPa,现场如图 11 所示。



图 11 挡土墙锚杆支护

Fig. 11 Retaining wall bolt support

利用有限元软件 PLAXIS 建立数值分析模型。填土采用 Mohr-Coulomb 模型进行模拟,具体参数见表 5。加筋挡土墙用 Plate 单元以及 Geogrid 单元进行模拟,两者之间为刚性连接。Plate 单元与土体接触,因此需建立界面单元模拟与土的相互作用,同时其重力密度需减去土的重力密度,取值为 8 kN/m^3 ,Plate 单元弹性模量为 30 000 MPa,泊松比 0.2。Geogrid 单元模拟的土工格栅为细长结构,只能受拉,弹性模量为 2 600 MPa。锚杆使用 Embedded beam row 单元进行模拟,在距离地面 1.1 m 进行钻孔,锚固角为 25° 。坡顶道路附加一辆均布荷载 5 kN/m^2 的模拟车辆通行荷载。加筋挡土墙简化模型如图 12 所示。

表 5 土体参数表

Table 5 Soil parameter

| 土体 | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | c/kPa | $\varphi/(^\circ)$ | E/MPa | ν |
|----|--|----------------|--------------------|----------------|-------|
| 填土 | 18 | 9 | 17 | 10 | 0.2 |

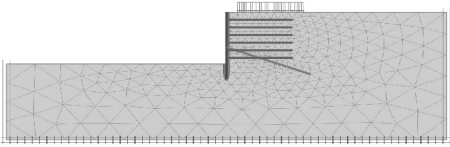


图 12 加筋挡土墙模型

Fig. 12 Reinforced retaining wall model

原加筋挡土墙土坡整体安全系数为 1.277,钻孔机打入锚杆进行加固后安全系数为 1.544。根据前文计算方法,最终计算出的预警应变阈值如表 6 所示。

表 6 预警分级及预警阈值

Table 6 Early warning classifications and warning threshold

| 预警值 F | 折减系数 K | 轴力 N/kN | 应变阈值/ 10^{-6} |
|------------|----------|------------------|-----------------|
| $F_{1.05}$ | 1.47 | 32.7 | 2 722.41 |
| $F_{1.10}$ | 1.404 | 22.695 | 1 889.45 |
| $F_{1.35}$ | 1.144 | 13.911 | 13.81 |

锚杆注浆体硬化进入工作状态后开始进行现场监测工作,四根锚杆监测数据见图 13。

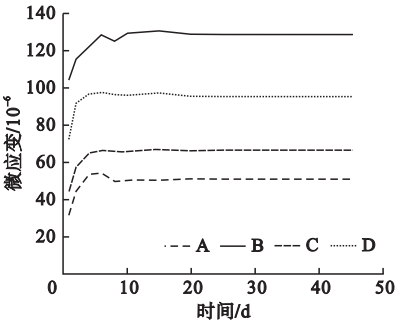


图 13 锚杆应变监测

Fig. 13 Bolt strain monitoring

初始阶段注浆体硬化,FBG 传感器受其自身灵敏度及应变传递系数的影响,监测的初始应变值各有高低。锚杆钢筋在土体自重荷载以及原挡土墙结构的相互作用下应变监测值逐渐增长,监测期间该停车场还未完全投入使用,停车场车流量还在较小阶段,监测值达到最大值附近后没有太大的波动。初步加固后安全稳定系数得到了一定提高,四根锚杆监测应变值消除初始客观因素影响后,

其应变值为 18.51×10^{-6} 、 23.94×10^{-6} 、 21.42×10^{-6} 、 22.39×10^{-6} ,略大于预警分级绿色安全阈值。在安全系数较高时,理论上应变值随边坡稳定性变化较小,此时应变值也比较小,可能受到扰动后产生变化,但是边坡的安全稳定系数并不会发生大的变化,因此现场锚杆监测的数据有一定的可靠性。

6 结 论

(1)锚杆支护边坡预警分级按照边坡稳定性状态分为绿色安全、黄色异常、橙色警告和红色危险四个等级,并针对预警分级给出对应的锚杆应变监测阈值。

(2)随着锚杆支护边坡安全系数减小,边坡稳定性变差,锚杆内力逐渐增大,锚杆应变监测值随之增加,应变变化速率加快,边坡进入危险状态,在降雨、开挖、爆破等外界因素影响下易发生地质灾害。

(3)基于预警分级下的锚杆应变阈值,在 LabVIEW 中实现了边坡智能监测系统的开发,并进行现场调试试验,验证了智能预警监测系统的实用性与可行性,对监测方法优化提供新的思路。

参考文献

- [1] 王涛,吴树仁,石菊松,等.国内外典型工程滑坡灾害比较[J].地质通报,2013,32(12):1881-1899.
(WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. A comparative study of typical engineering landslide disasters both in China and abroad [J]. Geological bulletin of China, 2013, 32(12):1881-1899.)
- [2] 张坤勇,李广山,杜伟,等.土质边坡渐进破坏过程的近似模拟[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(增刊1):99-105.
(ZHANG Kunyong, LI Guangshan, DU Wei, et al. A simulation of progressive failure process of soil slope [J]. Journal of Tianjin university(science and technology), 2019, 52(S1):99-105.)
- [3] ANTONELLO T, ENRICO C, ANTONIO D. Two and three-dimensional numerical analysis of the progressive failure that occurred in an excavation-induced landslide [J]. Engineering geology, 2014, 183(3):265-275.
- [4] HU W, GIANVITO S, XU Q, et al. Suction and rate-dependent behavior of a shear-zone soil from a landslide in a gently-inclined mudstone-sandstone sequence in the Sichuan basin, China [J]. Engineering geology, 2018, 237(4):1-11.
- [5] FAN X M, JUANG C H, HUANG R Q, et al.

- What we have learned from the 2008 Wenchuan earthquake and its aftermath: a decade of research and challenges [J]. Engineering geology, 2018, 241(7):25-32.
- [6] 赵尚毅,郑颖人,时卫民.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报, 2002, 24(3):343-346.
(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2002, 24(3):343-346.)
- [7] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等.基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报, 2014, 33(2):243-256.
(CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(2):243-256.)
- [8] 刘海政,刘海燕,常金源,等.基于动态和整体强度折减法的某公路边坡稳定性分析[J].水力发电, 2016, 42(11):34-37.
(LIU Haizheng, LIU Haiyan, CHANG Jinyuan, et al. Analyses of slope stability based on dynamic and whole strength reduction method [J]. Water power, 2016, 42(11):34-37.)
- [9] 晏长根,孙巍锋,徐伟,等.基于锚杆监测的单滑动面边坡动态预警分析及安全分级[J].中国公路学报, 2018, 31(6):188-194.
(YAN Changgen, SUN Weifeng, XU Wei, et al. Dynamic early warning analysis and safety classification of slope with single sliding plane based on monitoring of fully grouted bolts [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(6):188-194.)
- [10] TAO Z G, WANG Y, ZHU C, et al. Mechanical evolution of constant resistance and large deformation anchor cables and their application in landslide monitoring [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2019, 78(7):4787-4803.
- [11] 任德斌,常思萌,王国业.扩大头锚杆结构参数优化研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3):466-475.
(REN Debin, CHANG Simeng, WANG Guoye. Optimization study on structural parameters of the bit expanded anchor [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2016, 32(3):466-475.)
- [12] 王志鹏,何闻,于梅,等.超低频振动校准自动控制系统研究[J].机电工程, 2011, 28(6):693-697.
(WANG Zhipeng, HE Wen, YU Mei, et al. Research of automatic control system for ultralow frequency vibration calibration [J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2011, 28(6):693-697.)
- [13] HERMSDORF G L, SZILAGYI S A, RÖSCH S, et al. High performance passive vibration isolation system for optical tables using six-degree-of-freedom viscous damping combined with steel springs [J]. Review of scientific instruments, 2019, 90(1):105-113.

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)