

考虑降雨影响的路堑高边坡变形监测点优化布置研究

何乃福², 张 飞^{1,2*}, 潘 童^{1,2}, 吴为东³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省岩土工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 杭州都市高速公路有限公司, 浙江 杭州 310024)

摘要: 为了研究降雨对边坡变形和监测点布置的影响, 运用有限差分-强度折减法计算边坡在不同折减系数及降雨强度下的变形, 通过灰色理论分析获得边坡拟监测点变形与折减系数的关联度, 实现边坡变形监测布置优化, 并结合实际工程制订监测点优化布置方案。结果表明: 降雨作用更易导致边坡发生浅层破坏; 灰色关联度应用于工程中监测点的布设, 避免了不必要的监测点, 使得监测数据更有利于指导预警工作。

关键词: 边坡; 降雨; 灰色理论; 监测布置

中图分类号: TU44

文献标识码: A

Research on Optimal Layout of Deformation Monitoring Points of Cutting High Slope Considering Rainfall

HE Naifu^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2*}, PAN Tong^{1,2}, WU Weidong³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Province's Geotechnical Research Center, Nanjing 210098, China; 3. Hangzhou Metropolitan Expressway Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310024, China)

Abstract: In order to study the influence of rainfall on slope deformation and monitoring point arrangement, the finite difference-strength reduction method was used to calculate slope deformation under different reduction coefficients and rainfall intensity. The correlation degree between deformation of monitoring points and reduction coefficient can be obtained by using grey theory analysis, which can realize the optimization of slope deformation monitoring arrangement, and a monitoring point optimization arrangement plan was formulated according to an actual project. The results show that the slope is more possible to behave shallow failure due to rainfall. The application of grey relational degree in engineering can avoid the unnecessary monitoring points and make the monitoring data more conducive to guiding the warning work.

Key words: slope; rainfall; grey theory; monitoring point layout

边坡安全一直是公路建设和交通运输中的重要问题之一, 一旦发生滑坡灾害将严重影响交通安全, 因而边坡安全监测至关重要。边坡安全监测主要以位移情况来判断其稳定状态, 需要重点监测边坡变形^[1]。目前边坡变形监测技术^[2]主要分为: 非接触式监测(如激光扫描、合成孔径雷达等)和接触式监测(如大地测量、GNSS 变形监测等), 其中接触式监测技术应用较为广泛, 但是需

要预先布置多个监测点。先进的接触式监测技术能够实现实时动态监测, 然而需要兼顾成本和效果, 合理布置监测点。监测点位的选取既要能全面体现边坡的变形趋势, 又要能准确反映边坡安全状态, 因此需要优化监测点布置。

目前边坡变形监测点布置优化方法主要分为两种: 经验法和优化理论分析法(如灰色理论、模糊识别等)。经验法^[3]大多依据数值分析, 初步判

收稿日期: 2020-01-13

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2018036); 国家自然科学基金资助项目(51878248)

作者简介: 何乃福(1994-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 从事边坡工程方面的研究。

* 通讯作者: 张飞(1985-), 男, 江苏南京人, 博士, 副教授, 从事边坡工程方面的研究。

断边坡变形情况并划分变形区域,依据工程经验将监测点布置在变形较大和变形较敏感处,但这种选点方法过于依赖经验,具有较强的主观性。优化理论分析法^[4-6]基于数值分析获得的边坡变形结果,运用相关优化方法分析拟监测点与边坡稳定性之间的关系,优化监测点布置。王洪德等^[7]运用 FLAC 数值软件和模糊识别理论,考虑裂隙、软夹层等结构,提出链子崖危岩体地表位移监测点布置方法。吴浩^[8]等运用 ANSYS 和灰色理论,综合考虑工程经验和理论分析,提出敏感度与关联度联合优化测点布置的方法。这些方法仅考虑了不降雨情况(下简称正常工况)下进行监测点布置优化,尚未考虑降雨对边坡变形监测点布置的影响。降雨作用极易引起边坡变形,甚至产生滑坡灾害,有必要考虑降雨影响对边坡变形监测点布置进行优化。本文考虑了降雨对边坡变形的影响,通过 FLAC 有限差分软件建立边坡模型,基于强度折减法研究正常工况和降雨工况下边坡变形特点,运用灰色理论分析拟测点变形与折减系数的关联度,提出监测点优化布置方法。

1 分析方法

本文运用 FLAC 中两相流模块(TP flow),模拟非饱和土的降雨入渗,基于强度折减法计算拟监测点在不同折减系数及降雨作用下,边坡的变形情况,最后利用灰色关联度计算拟监测点位移与边坡稳定性的关联度,从而实现降雨作用下边坡监测点优化布置。

1.1 有限差分基本原理

1.1.1 强度折减法

强度折减法^[9]是指在数值计算中,通过不断降低土层的抗剪强度参数直到边坡达到极限破坏状态。此时,折减系数即为该计算边坡的安全系数。对于满足 MC 条件的土体,抗剪强度参数折减方法如下:

$$\tau_f = c_f + \sigma \tan \varphi_f \quad (1)$$

$$c_f = c/F_s \quad (2)$$

$$\tan \varphi_f = \tan \varphi / F_s \quad (3)$$

式中: F_s 为折减系数; τ_f 为折减后土体的抗剪强度; c_f 、 φ_f 为折减后土体黏聚力和摩擦角。

1.1.2 土体本构和屈服准则

本文采用 MC 本构模型描述土体应力应变关系,屈服准则的确定和土体所处的状态有关。当

FLAC 中的两相流模块打开,土体处于非饱和状态,需要考虑基质吸力的影响,按公式(4)的屈服准则^[10]判断土体状态;当土体处于饱和状态时,屈服准则变成莫尔-库仑屈服判据。

$$\tau_{\max} = (\sigma - P_a) \tan \varphi_f + S_w (P_a - P_w) \tan \varphi_f + c_f \quad (4)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为土体抗剪强度, P_a 为孔隙气压力、 P_w 孔隙水压力。

1.2 降雨入渗基本原理

1.2.1 非饱和渗透

在 FLAC 两相流理论^[11]中,土体孔隙被水和空气两种流体完全填充,并且用流动系数来表示土体渗透性的强弱。土体流动系数 k ($\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{sec}$) 和渗透系数 k_s (m/s) 的换算公式为: $k = k_s \times 1.02 \times 10^{-4}$ 。两种流体的移动方式用达西定律表示:

$$q_i^w = -k_{ij}^w k_r^w \frac{\partial}{\partial x_j} (P_w - \rho_w g_k x_k) \quad (5)$$

$$q_i^a = -k_{ij}^w \frac{\mu_w}{\mu_a} k_r^a \frac{\partial}{\partial x_j} (P_a - \rho_a g_k x_k) \quad (6)$$

式中: k_{ij}^w 为饱和流动系数; k_r 为流体相对渗透率; μ 为液体流动的动力粘滞系数; ρ_w 为液相密度; ρ_a 为气相密度; P_w 为孔隙水压; P_a 为孔隙气压; g_k 为重力矢量;下标 w 代表液相、下标 a 代表气相。

1.2.2 土-水特征曲线

土-水特征曲线描述的是基质吸力和含水量之间的关系。本文运用传统的 Van Genuchten (VG) 模型^[12]来描述土层的土-水特征曲线。FLAC 数值软件中,采用标准化饱和度(S_s)^[13]表示 VG 模型,其表达式为:

$$S_s = \frac{S_w - S_l}{1 - S_l} = \frac{1}{[1 + \{(P_a - P_w)/P_0\}^{1/(1-d)}]^d} \quad (7)$$

$$k_{\text{rel}}^w = \frac{k}{k_s} = S_s^b [1 - (1 - S_s^{1/d})^d]^2 \quad (8)$$

$$k_{\text{rel}}^a = (1 - S_s)^c [1 - S_s^{1/d}]^{2d} \quad (9)$$

式中: S_s 为土体标准化饱和度, S_w 为土体饱和度, S_l 为土体残余饱和度, P_0 、 b 、 c 、 d 为公式拟合参数, k_{rel} 为土体相对渗透系数。

1.3 灰色关联度分析

灰色关联度分析方法^[14]的原理是依据参考序列及各个相关因素序列增长变化相似程度,来判断两者之间紧密度。

本文以强度折减法输出边坡在正常工况和降

雨工况下的变形。分别以折减系数和拟监测点对应的位移值作为参考序列 X_0 , 相关因素序列 X_i 。利用灰色理论进行关联度分析时^[15], 首先将参考序列及相关因素序列标准化, 本文按式(5)将 X_0 和 X_i 两组序列初值化, 得到新的序列 X'_0 和 X'_i ; 其次, 用新的相关因素序列 X'_i 减去新的参考序列 X'_0 , 并取绝对值, 得新序列的差序列 $\Delta_i(k)$, 找出其中序列中的极差 m 和 M ; 然后, 用关联系数公式(6)计算各个数据的关联系数, 并将某监测点 T_j 关联系数取平均, 作为该监测点的关联度, 计算关联度如式(7)所示。最后依据关联度对监测点排序, 筛选变形监测点, 进而优化监测点布置方案。

$$X'_i = \frac{X_i}{x_i(1)} = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)) \quad (10)$$

式中, $i=0, 1, 2, \dots, m; n$ 表示有 n 个相关因素; m 表示每个相关因素有 m 个测试数据。

$$\gamma_{ji}(k) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M} \quad (11)$$

式中, γ_{ji} 是 j 个相关因素的第 i 个测试数据与相应折减系数的关联系数; $k=0, 1, 2, \dots, n; m$ 和 M 分别为差序列 $\Delta_i(k)$ 中的极小值和极大值; $\xi \in (0, 1)$ 是相关度参数。

$$\gamma_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{ji}(k) \quad (12)$$

式中, γ_j 表示第 j 个相关因素与折减系数之间的关联度。

求解灰色关联度时, 依据上述公式编写灰色关联度 MATLAB 计算程序, 将正常工况和降雨工况下的 X_0 和 X_i 序列输入计算程序中, 计算拟监测点的位移与边坡稳定性的关联度。

2 方法应用

2.1 工程概况

本文以杭州某高速公路路堑边坡为例, 研究其变形监测点优化布置方法。该段路堑边坡长 140 m, 最大坡高约 56 m, 设计为五级坡, 每级坡高 10 m, 第五级开挖到顶, 边坡样式如图 1 所示。地质特征从上到下分别为, 顶部表层是 1~2 m 含碎石粉质粘土; 基岩是 13~15 m 强风化辉绿岩; 下层为中风化辉绿岩。工程区处于亚热带季风气候区, 降雨频繁, 极易诱发边坡滑坡灾害。

2.2 数值模拟

FLAC 两相流模板 (Tp flow) 可以模拟气相和

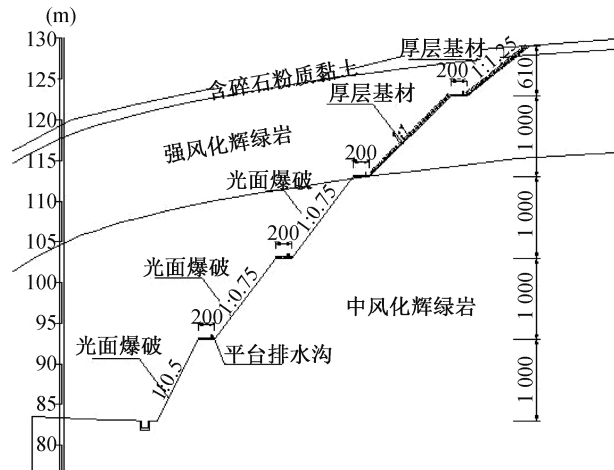


图1 路堑边坡示意图

Fig.1 Schematic diagram of cutting slope

液相在土体中的流动, 对非饱和土边坡降雨入渗进行分析^[11]。运用 FLAC 软件中的两相流模板, 在模型上先拟布设监测点位, 采用强度折减法, 求取边坡的安全系数并模拟其破坏过程, 利用 FISH 语言编写相应程序记录各个拟布点的位移变化。

由于地勘资料有限, 地貌起伏不定, 假定不考虑地层起伏的影响, 将路堑边坡断面简化, 所分析断面数值模型见图 2。根据现场地质勘查以及相关室内试验, 结合相关规范和文献综合分析得到岩土体物理力学参数。计算参数取值见表 1, 其中降雨量参考我国城市暴雨强度公式查询表, 取 50 年一遇降雨 6 h 的最大降雨强度, 即 $6.89444 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

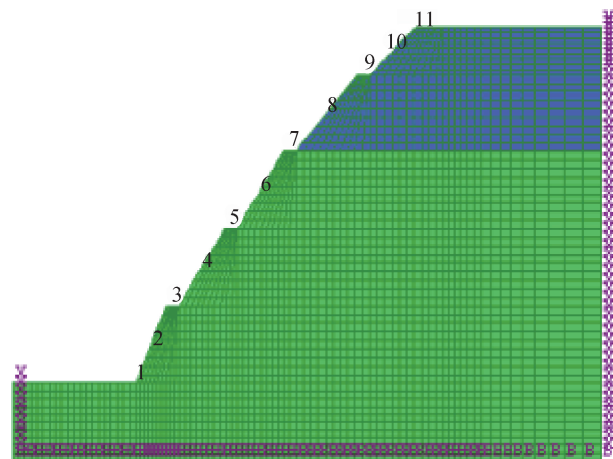


图2 边坡监测断面数值模型

Fig.2 Numerical model of slope monitoring section

3 监测点优化布置方法

计算正常工况、降雨持时分别为 12、24、36 h 情况下, 边坡的安全系数及变形情况。图 3 给出了

表 1 岩土体物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rock and soil

土层参数	强风化 辉绿岩	中风化 辉绿岩
饱和渗透系数 $q/\times 10^{-10}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2. 0	0. 01
天然密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 820	2 200
饱和密度 $\rho_{\text{sat}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 850	2 205
黏聚力 c/kPa	20. 0	120. 0
内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	18. 3	24. 1
进气值 P_0/kPa	100	10
孔隙率/%	0. 35	0. 18
弹性模量 E/MPa	50	200
泊松比 μ	0. 3	0. 25

相应的边坡水平位移分布情况,发生降雨时边坡破坏滑动面由底部向顶部扩展,变形最大区域由第一级边坡底部变为第四级边坡底部。降雨 12 h 后,边坡由原来的整体破坏过度到局部破坏,因此,需要着重关注降雨时间超过 12 h 之后的边坡变形情况。

利用灰色理论计算各监测点位移与安全系数之间的关联度并排序的过程,即为监测点优化布置的过程。基于上述正常工况及降雨工况下边坡稳定性分析,获得边坡强度折减计算过程中拟布点位的位移变化,输出降雨 6 h 50 年一遇的降雨强度下,拟布置的监测点在不同强度折减系数下的位移值。当边坡破坏,即测点位移突变或边坡塑性区贯通时,停止计算。折减系数较小时,各监测点变形量较小,对此时的位移进行关联度分析没有意义;只有接近破坏时,监测点变形量与折减系数的关联度才能指导预警工作。表 2 中给出降雨 36 h 情况下折减系数 1. 05~1. 11 范围内的各拟布点位移值,并以此来构建灰色关联分析的关系序列。然后利用上述灰色理论计算降雨工况下拟监测点水平位移与强度折减系数之间的关联度值,计算结果如表 3 所示。以同样方式计算正常工况和降雨 12、24 h 情况下水平位移与强度折减系数关联度,结果如图 4 所示。

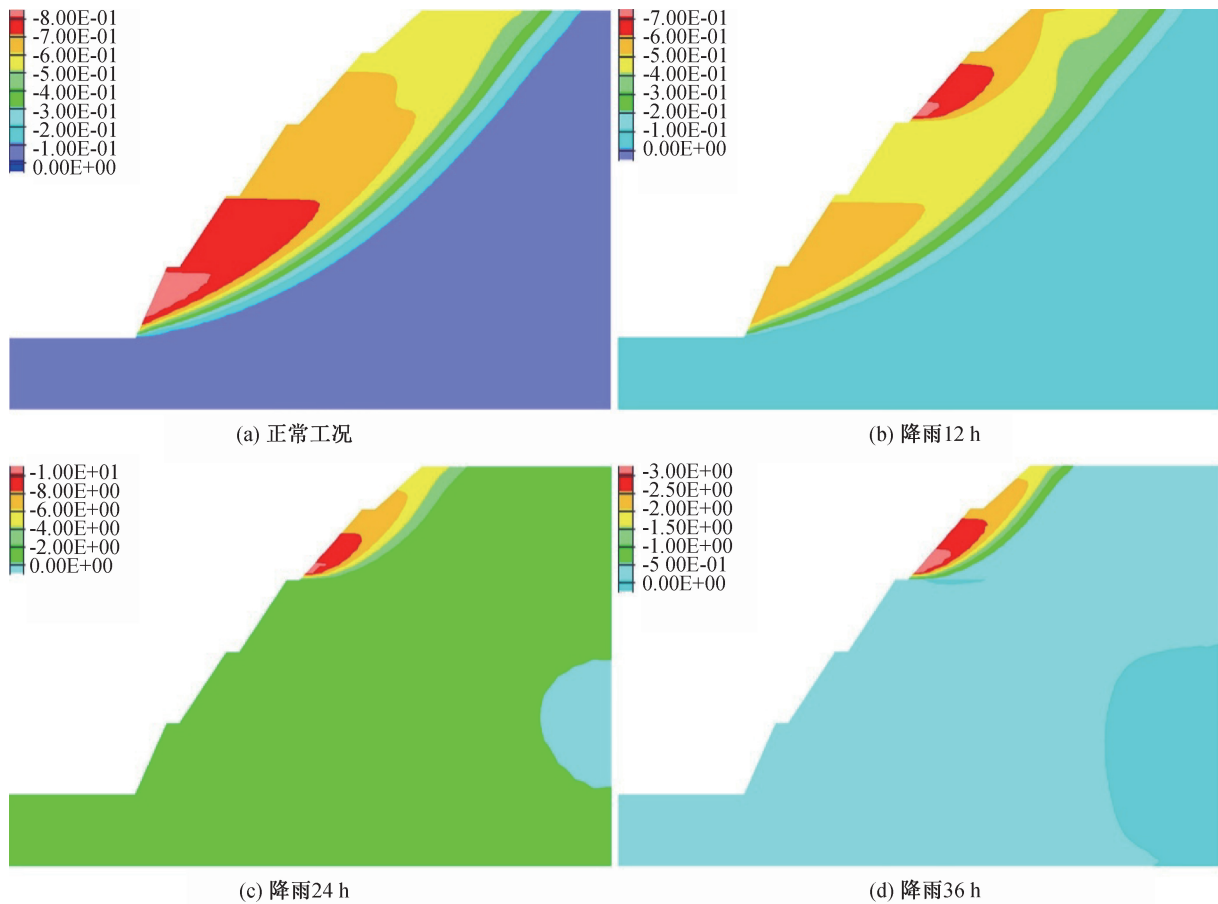


图 3 不同降雨时间边坡水平位移云图

Fig.3 Cloud map of horizontal displacement of slope at different rainfall times

表 2 降雨 36 h 监测点水平位移与强度折减系数的序列关系 (单位:cm)

Tab.2 Sequence of horizontal displacement and intensity reduction coefficients at rainfall for 36 h

测点序列	折减系数						
	1. 05	1. 06	1. 07	1. 08	1. 09	1. 1	1. 11
T1	-0. 505	-0. 625	-0. 755	-0. 889	-1. 029	-1. 175	-1. 318
T2	-1. 810	-2. 243	-2. 721	-3. 279	-3. 908	-4. 606	-5. 356
T3	-2. 068	-2. 518	-2. 996	-3. 516	-4. 073	-4. 668	-5. 284
T4	-1. 950	-2. 369	-2. 819	-3. 316	-3. 852	-4. 424	-4. 998
T5	-1. 617	-1. 967	-2. 348	-2. 775	-3. 240	-3. 738	-4. 227
T6	-0. 967	-1. 212	-1. 486	-1. 802	-2. 154	-2. 525	-2. 855
T7	-0. 103	-0. 220	-0. 366	-0. 550	-0. 766	-0. 991	-1. 154
T8	-39. 280	-42. 320	-45. 612	-49. 441	-53. 942	-62. 842	-145. 700
T9	-25. 492	-27. 521	-29. 748	-32. 385	-35. 544	-42. 193	-107. 660
T10	-20. 347	-21. 723	-23. 235	-25. 073	-27. 357	-32. 838	-92. 569
T11	-20. 444	-21. 924	-23. 497	-25. 336	-27. 591	-32. 814	-88. 255

表 3 降雨 36 h 监测点水平位移与折减系数关联度

Tab.3 Correlation between horizontal displacement and reduction coefficient at rainfall for 36 h

测点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
关联度	0. 878	0. 865	0. 884	0. 884	0. 881	0. 860	0. 596	0. 916	0. 908	0. 909	0. 911
排序	8	9	5	6	7	10	11	1	4	3	2

表 4 正常工况和降雨工况下的关联度

Tab.4 Correlation under normal and rainfall conditions

测点	关联度			排序
	正常工况	降雨工况	平均值	
T1	0. 965	0. 872	0. 864	4
T2	0. 942	0. 871	0. 794	9
T3	0. 953	0. 869	0. 818	7
T4	0. 954	0. 857	0. 823	6
T5	0. 949	0. 837	0. 814	8
T6	0. 931	0. 817	0. 783	10
T8	0. 951	0. 806	0. 875	1
T9	0. 926	0. 781	0. 852	5
T10	0. 913	0. 773	0. 864	3
T11	0. 889	0. 633	0. 867	2

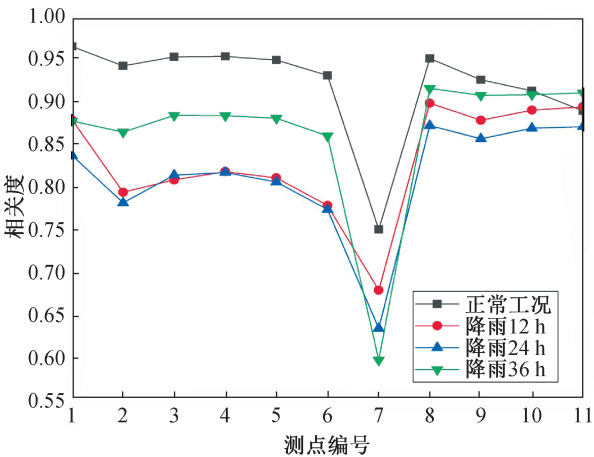


图 4 各种工况下各监测点相应的关联度

Fig.4 Correlation of monitoring points under various conditions

图 4 给出了各种工况下拟监测点的关联度计算结果,可以发现:无论是正常工况还是降雨工况下,监测点 T7 对应的关联度都很小,说明该类点的水平位移变化规律与边坡稳定性相似度不高,因而该类点位不适宜作为边坡变形监测点。按土层分类,分别分析各测点在正常工况下相应的关联度,发现接近各土层底部的测点对应的关联度比较高,并且由土层底部向土层顶部逐渐减小,这与现有的监测点布设研究结论基本一致。随着降雨的持续,测点 T9—T11 的关联度逐渐与 T8 的结果相接近,说明上部土层测点位移与折减系数的关联度受降雨影响显著。由于降雨 24 h 后,边坡安全系数为 1. 19,更接近规范规定的预警值 1. 15。因此,取剩余 10 个监测点正常工况和降雨 24 h 下的关联度,取平均值并排序,结果如表 4 所示。综合考虑两种工况与折减系数的关联度,监测点应优先布置在 T8、T11、T10、T1、T9、T4、T3 处;考虑施工和安装的便宜程度,建议将监测点布置在平台上,因此选取 T1、T3、T9 和 T11 为监测点。

4 结论

1) 正常工况下,边坡破坏形式为整体破坏,降雨工况下破坏形式为局部破坏。正常工况下边坡坡脚处变形与边坡稳定的关联度较大,降雨工况下边坡坡顶处关联度较大,需要重点对坡脚及坡

顶两处的变形进行监测。

2)本文提出的监测点优化布置方法,避免了不必要的监测点,使得监测数据更有利于指导预警工作,对经济合理地布置监测点具有一定的指导意义。该方法综合考虑正常工况和降雨工况,更接近于工程实际,为监测点布置提供决策依据。

本文提出的监测点优化布置方法,具有较强的实用性。但本文在关联度分析过程中,取两种工况的平均值,具有一定的局限性。在以后的研究中,可以考虑两种工况的权重或多种触发因素,对监测点优化布设展开研究。

参考文献:

- [1] 宋大伟,张发明,韩新捷,等.基于FLAC^{3D}对含软硬岩互层边坡的变形分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2016,33(2):86-90.
- [2] 刘志平.GNSS边坡监测与变形分析[M].北京:测绘出版社,2014.
- [3] 赵志峰.基于位移监测信息的岩石高边坡安全评价理论和方法研究[D].南京:河海大学,2007.
- [4] 邓贤国.基于数值计算的边坡位移监测点优化布设方法研究[D].成都:西南石油大学,2012.
- [5] 王贵成,曹平,林杭,等.用灰色理论确定边坡最优监测点及安全系数[J].中南大学学报:自然科学版,2007(3):574-578.
- [6] 熊先才,岳仁宾,陆光灿,等.有限差分法在选取滑坡监测点中的应用[J].工程勘察,2009,37(5):56-59.
- [7] 王洪德,高幼龙,薛星桥,等.典型滑坡监测点优化布置[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(3):858-866.
- [8] 吴浩,李珍,鲁清华,等.敏感度与关联度协同优化的边坡变形监测布点方法[J].金属矿山,2019(4):180-184.
- [9] 刘波,韩彦辉.FLAC原理实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [10] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [11] 胡冉.非饱和土水力全耦合模型与数值模拟方法研究[M].武汉:武汉大学出版社,2016.
- [12] VAN GENUCHTEN, M T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J 1980,44(5), 892-898.
- [13] FORSYTH P A, WU Y S, PRUESS K. Robust Numerical Methods for Saturated-unsaturated Flow with Dry Initial Conditions in Heterogeneous Media[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 22(1):92.
- [14] 王飞,陈鲜阁.基于熵的灰关联模型在工程评标中的应用[J].河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(1):103-106.
- [15] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2018.

(责任编辑 周雪梅)