

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-06

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高 晗

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 夏季抚顺降雨频发且持续时间长, 若遇上矿震, 边坡极易失稳破坏。为分析雨季矿震作用对抚顺西露天矿的影响, 采用极限平衡法整合渗流场, 分析边坡稳定性。结果表明: 相同雨强, 持续时间越长, 孔隙水压力等值线越密集, 等值线闭合区域越多, 边坡的安全系数越低; 相同持时, 雨强越大, 孔隙水压力等值线图变化越快; 降雨量相同, 雨强越小雨水入渗影响的范围越大; 加入水平矿震荷载系数后, 随着矿震烈度增加, 边坡安全系数降低。边坡降雨存在一个降雨临界值, 降雨量未到达临界值时, 边坡的安全系数下降缓慢, 当到达临界值后, 安全系数迅速下降。降雨和矿震对边坡安全影响极大, 应当提前对边坡进行加固。

关键词: 矿震; 降雨; 孔隙水压力; 荷载系数; 安全系数

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0040-07

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

LIU Xiangfeng, GUO Ziyu, WANG Laigui, GAO Han

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In summer, the rainfall in Fushun occurs frequently and lasts for a long time. If there is a mine earthquake, the slope is very easy to be unstable and destroyed. The limit equilibrium method combined with the seepage field is used to analyze the slope stability, so that we can analyze the impact of mine earthquakes in the rainy season on the Fushun West Open-pit Mine. The results show that with the same rainfall intensity and the longer duration, the pore water pressure contour is denser, and the more closed areas of the contour are, the lower the safety factor of the slope is. At the same duration, the greater the rainfall intensity, the faster the pore water pressure contour map changes; Rainfall is the same, the smaller the rainfall intensity, the greater the range of rainfall infiltration; After adding the horizontal mine earthquake load factor, as the mine earthquake intensity increases, the slope safety factor decreases. There is a rainfall critical value for slope rainfall. When the rainfall does not reach the critical value, the safety factor of the slope decreases slowly, and when it reaches the critical value, the safety factor decreases rapidly. Rainfall and mine earthquake have a great impact on the safety of the slope, so the slope should be reinforced in advance.

Keywords: mine earthquake; rainfall; pore water pressure; load factor; safety factor

0 引言

滑坡作为一种地质灾害, 它的成因复杂且多变, 降雨和矿震是诱发滑坡灾害的主要因素^[1-2]。抚顺露天矿

地区属北中温带半湿润大陆性季风气候, 夏季降雨频发, 年平均降雨量为 773.6 mm, 雨量集中在 7—9 月份, 占年降雨量的 55.2%^[3]。南帮 E1000 ~ E1300 地面为刘山旧河道位置, 渗透性良好, 矿区西侧约 500m 处为古

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-09-06

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC1503101)

第一作者: 刘向峰(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学系统稳定性方面的研究工作。E-mail: 305066889@qq.com

通讯作者: 郭子钰(1996-), 男, 硕士生, 主要从事边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: 1832629979@qq.com

城河,沿西露天矿坑西侧汇入浑河。矿区的水文条件复杂,再加上夏季降雨频发,严重影响矿区边坡的稳定性。自 1968 年 12 月开始对矿震作监测记录,截至 2002 年 12 月 31 日,共记录到 $ML>0$ 级的矿震 81 522 次。其中 $ML>3.0$ 级 64 次,最大震级为 $ML3.7$ 级^[4]。可知抚顺西露天矿矿震频发,如果雨季再发生矿震,边坡就极易失稳,因此通过数值计算分析雨季矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡的稳定性。

侯龙^[5]利用数学解析、室内试验和数值模拟等手段,从宏观现象和微观结构,对非饱和土内的孔隙水作用机理以及相应的土体力学性质进行研究。孙必雄^[6]对非饱和土的力学特性进行了系统性论述和对降雨入渗下的填方路基渗流场问题进行了数值模拟分析,模拟出填方路基在降雨渗流作用下位移的分布情况与发展规律,得出了相应情况下安全系数的变化规律。海龙等^[7]以饱和—非饱和渗流数学模型为基础,运用 GEO-SLOPE 计算软件模拟了不同的降雨强度和降雨持时对边坡稳定性的影响,并探讨各参数变化对边坡稳定性安全系数的影响。刘卫涛等^[8]基于改进的 Green-Ampt 模型推导了考虑土体非饱和特性的斜坡降雨入渗模型,并将其引入到无限斜坡稳定性分析当中,通过数值解和现有模型相比,证明了该方法的正确性和适用性。杨世豪等^[9]为分析上覆第四纪残坡积物的昔格达组粉砂土边坡,在强降雨作用下渗流特性及稳定性,结合石棉县莫家岗滑坡,用数值模拟方法研究坡体渗流规律,结果表明雨水在坡体中逐层入渗,雨停后渗流过程将继续发展,由于存在土层分界面,坡体渗流特性不同于均质坡体。向章波等^[10]应用 Slide 软件,在饱和—非饱和渗流理论的基础上模拟降雨强度和降雨历时对某红层路堑边坡稳定性的影响,结果表明随着降雨时间的增加,坡体内孔隙水压力不断增大,非饱和区最大基质吸力不断减小,稳定性系数不断下降。徐翔等^[11]应用 Geostudio 软件模拟不同降雨类型联合库水位骤降对边坡稳定性的影响,结果表明库水位下降过程中孔压变化有个“响应延迟”现象,后峰型降雨容易导致边坡失稳。前人们主要研究降雨入渗对边坡稳定性的影响,本文在前人的研究基础上考虑加入矿震荷载,分析雨季矿震叠加作用对矿区边坡孔隙水压力和安全系数的变化规律。

1 工程地质概况

抚顺西露天矿位于抚顺市区南部,抚顺煤田西南部,区内地貌类型为丘陵区,地形起伏较大,经过多年的开采,矿坑区域形成台阶地形,边坡岩体由凝灰岩和玄

武岩构成。水文地质条件复杂,夏季降雨量大,矿震频发。本文以 E1200 剖面为研究对象,整体边坡角 27° 。简化计算模型自上而下依次为:杂填土、凝灰岩、玄武岩。

2 数值模拟

2.1 数值计算模型

本文采用极限平衡法整合渗流场分析边坡稳定性,分析类型选用 Morgenstern-Price,计算模型如图 1 所示,以左下角为原点,建立长为 1 350 m,高为 600 m(顶部标高+67 m)的模型,并划分为 1 018 个节点和 960 个单元进行计算(图 1)。

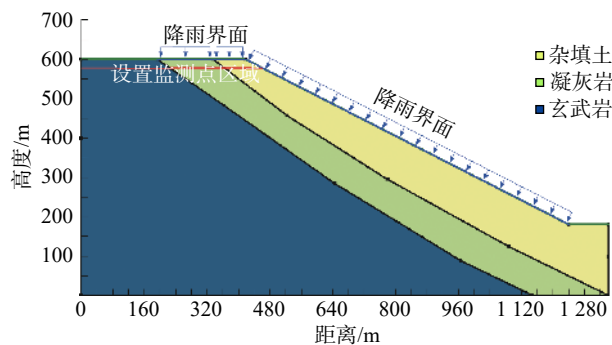


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

2.1.1 模拟过程

(1)进行稳态分析,模拟未降雨的状态,计算时间设置 1 h;

(2)稳定后进行模拟不同雨强降雨情况,得到不同雨强的渗流场,计算时间设置 24 h;

(3)稳定后在渗流场的基础上,选取最危险降雨情况,施加不同矿震载荷,得到叠加作用下边坡的安全系数。

2.1.2 数值计算的边界条件

(1)水头边界:模型左侧和右侧实测地下水位以下为定水头边界,左侧水头高为 400 m,右侧水头高为 150 m,左侧水头 400 m 和右侧水头 150 m 以上为 0 流量边界,模型底部为 0 流量边界,上部施加降雨边界。

(2)降雨边界:施加坡面降雨。

(3)矿震载荷边界:在模型底部施加水平荷载。

2.1.3 数值计算的监测点设置

为了更好的观察三种不同雨强孔隙水压力变化情况,在 575 m 坡高位置设置水平监测点。

由图 2 可知,无降雨时孔隙水压力等值线在竖直方向层层分布。图中箭头矢量为计算水流渗透方向,按照图中的矢量方向从高到低逐步向坡面渗透,最后形成水位线,由于凝灰岩的渗透系数较大,图中的矢量箭头向

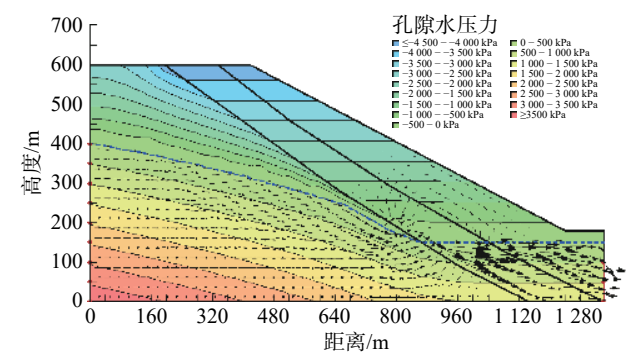


图 2 0 h 孔隙水压力等值线云图

Fig. 2 0 h pore water pressure contour cloud map

凝灰岩区域集中,而玄武岩层和凝灰岩层得渗透系数差别大从而形成明显的渗透界限,导致孔隙水压力等值线

没有水平一致,呈现图 2 中所示状态。水位线以上各类土层没有达到饱和状态,孔隙水压力为负,表现为吸力状态,水位线以下孔隙水压力为正。

2.2 数值计算参数

根据试验测得的各岩层基本物理参数(表 1),绘制数值模拟采用的渗透系数函数(图 3)。

表 1 岩层的基本物理参数			
Table 1 Basic physical parameters of rock formation			
岩层	杂填土	凝灰岩	玄武岩
渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	10^{-2}	5×10^{-3}	8×10^{-7}
黏聚力 c/MPa	0.1	0.15	0.14
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	20	39	42
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 000	2 600	2 800

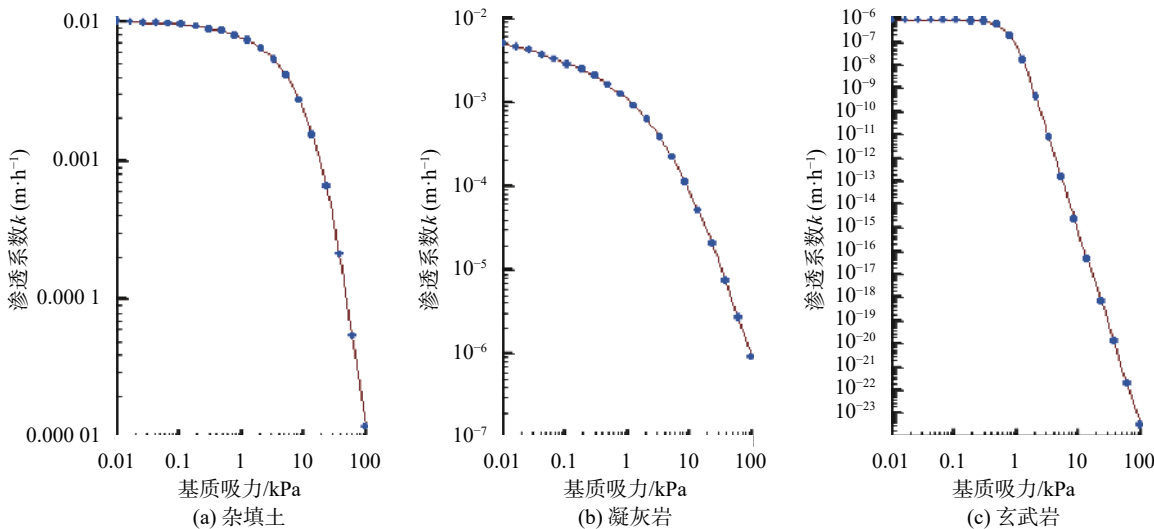


图 3 不同岩层渗透系数曲线

Fig. 3 Permeability coefficient curves of different rock formations

2.3 计算方案

先对边坡进行不同雨强模拟验证,得到了 24 h 降雨量在 100 mm 以下对边坡的影响较小,故考虑暴雨级别(24 h 降雨量在 100 mm 以上)工况对应降雨情况为 A 型雨强、B 型雨强和 C 型雨强(表 2),再进行数值计算,得到不同雨强情况下的渗流场。再考虑最危险降雨情况 A 型雨强,分析叠加矿震作用对边坡的影响。

表 2 降雨情况		
Table 2 Rainfall		
降雨情况	降雨强度 $/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	持续时间/h
A	0.02	24
B	0.01	24
C	0.005	24

一次矿震只有一个震级,而在不同的地方会表现出不同的烈度,离震源比较近,烈度较高,根据 GB/T 17742—2008^[12]规定Ⅵ度以下从无感到有感逐渐增加,对边坡的影响都较小,Ⅵ度为简陋棚舍损坏,陡坎滑坡,故考虑矿震烈度Ⅵ度以上,再根据 GB 50330—2013^[13]的规定加入不同矿震荷载系数(表 3),研究不同矿震烈度对抚顺西露天矿的影响。

表 3 水平矿震系数					
Table 3 Horizontal mine seismic coefficient					
矿震烈度	无	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
峰值加速度 g	0	0.05	0.1	0.2	0.4
荷载系数	0	6.25×10^{-4}	2.5×10^{-3}	0.01	0.04

本文考虑最危险工况对应设计 7 种计算方案分析雨季矿震对抚顺西露天矿稳定性的影响(表 4)。

表 4 计算方案							
Table 4 Calculation scheme							
计算方案	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7
降雨情况	A	B	C	A	A	A	A
矿震烈度	无	无	无	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度

3 计算结果分析

监测孔隙水压力随时间变化,得到了不同雨强的不同时刻监测点孔隙水压力变化曲线图(图 4)。图中 0~200 m 为玄武岩岩层,200~350 m 为凝灰岩岩层,350~450 m 为杂填土,由于降雨条件的设置 0~200 m 没有降雨条件,导致 0~200 m 处的孔隙水压力几乎没有变化。雨水对边坡的影响主要依靠降雨入渗,不同雨强条件下,对应孔隙水压力变化曲线走势基本一致,对应的孔隙水压力值不同而已。对比相同雨强,不同降雨时间情况下,随着时间推移,各点孔隙水压力增大。这是由于降雨时间的推移,水分不断进入到岩层中,改变了岩层的孔隙水压力,故孔隙水压力逐渐增大。

从图 4 中可以看出,相同雨强,不同降雨时间,不同岩层处的孔隙水压力变化不同,由于杂填土的渗透系数高于凝灰岩高于玄武岩,渗透系数较大,雨水进入到岩层更快,导致杂填土区域的孔隙水压力变化最快。

图 5 的(a)(b)(c)分别为 A 型雨强 24 h 孔隙水压力变化云图、B 型雨强 24h 孔隙水压力变化云图、C 型雨强 24 h 孔隙水压力变化云图。从图 5 中可知,A 型、B 型和 C 型雨强孔隙水压力等值线从底部向上层层分布,坡面和坡顶处的孔隙水压力等值线逐渐出现闭合区域,这是由于 A 型雨强的强度高于 B 型高于 C 型,坡面雨水比较充足,经过渗透作用,导致坡面和坡顶的孔隙水压力改变较快,故闭合区域最多。

其中 A 型雨强 24 h 时坡顶有部分积水,坡面的孔隙水压力等值线由 0 h 的水平稀疏状态,变成与坡面平行紧密状态,这是由于降雨的影响,雨水渗透到土层中,导致边坡内部孔隙水压力改变,形成新的孔隙水压力等值线,水分逐渐渗透到土层之中,使得坡顶达到饱和状态,孔隙水压力等值线也就呈现闭合趋势。而 B 型和 C 型降雨由于降雨强度较小,坡面处的孔隙水压力等值线相对于 A 型较为稀疏。

由图 6 可知,对比相同时间,不同雨强,可以看出雨强越大,孔隙水压力变化越快,这是由于降雨强度高,雨

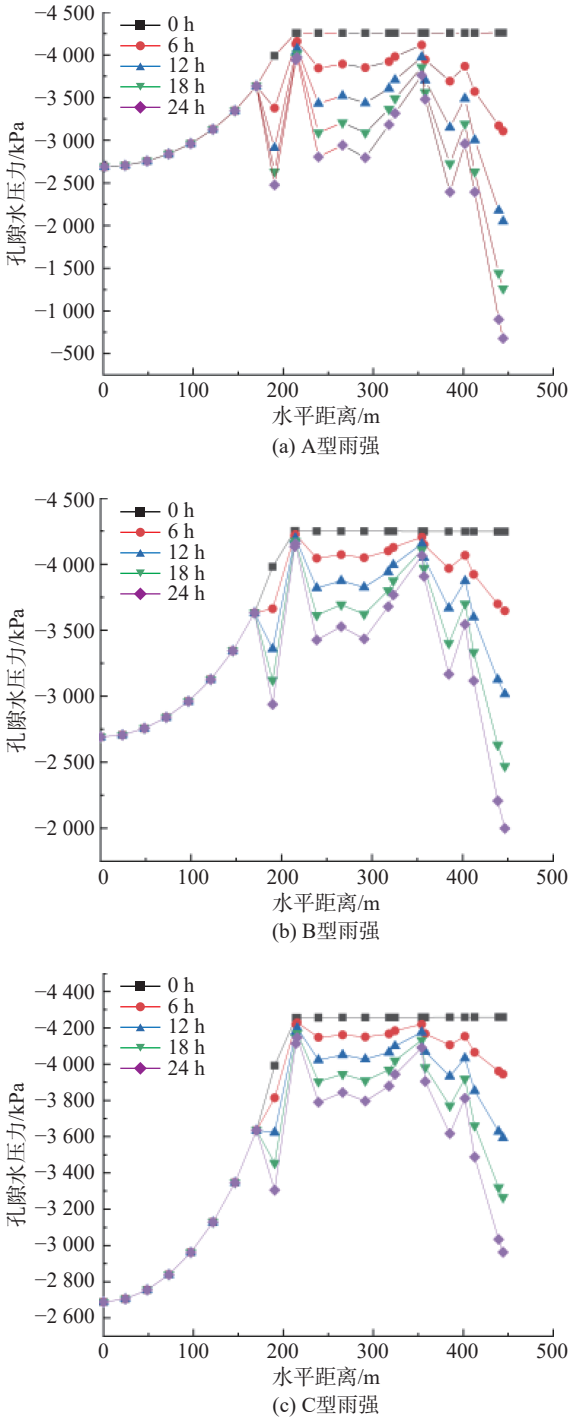


图 4 不同雨强的不同时刻孔隙水压力变化曲线
Fig. 4 The change curve of pore water pressure at different times of different rain intensity

水补给充足,岩层表层已形成了暂态饱和区域^[7],故雨强越大,孔隙水压力变化越快。

如图 7 所示,当降雨量累积均为 120 mm 时,降雨强度越高,相同位置的孔隙水压力越小,雨水入渗的深度越浅,这是由于降雨强度高,坡面的雨水充足,但是入渗时间短,大部分沿着坡面流失,反而降雨强度小的,入

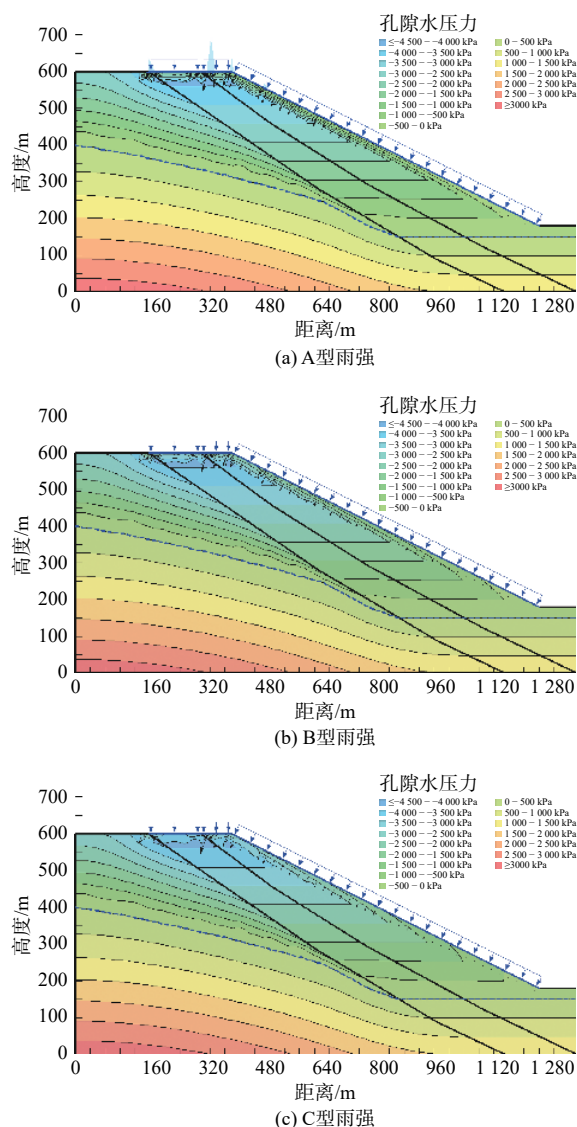


图 5 不同雨强 24 h 孔隙水压力变化云图

Fig. 5 24 h pore water pressure cloud diagram of different rain intensities

渗时间长, 有较多的水分进入边坡内部, 改变边坡内部的吸力, 改变孔隙水压力等值线的分布, 使得相同的降雨量, 降雨强度越大, 影响的范围越小。

A 型雨强不施加矿震荷载条件下, 边坡进行稳定性计算, 产生的滑面范围如图 8 所示, 滑面范围主要在凝灰岩和杂填土层, 由渗流计算可以知道, 这两层的孔隙水压力等值线变化最快, 通过持续降雨, 雨水渗入对凝灰岩层和杂填土层影响大, 此处岩层经过降雨影响, 力学参数降低, 导致可能失稳, 所以滑移面在此处产生。

由图 9 所示, 在未降雨 0 h, 边坡的安全系数一样, 在不同雨强不同时间作用下对边坡安全有一定的影响, 持续降雨导致孔隙水压力等值线变得越来越密集, 坡面处岩层的力学参数降低, 从而使安全系数下降。在相同

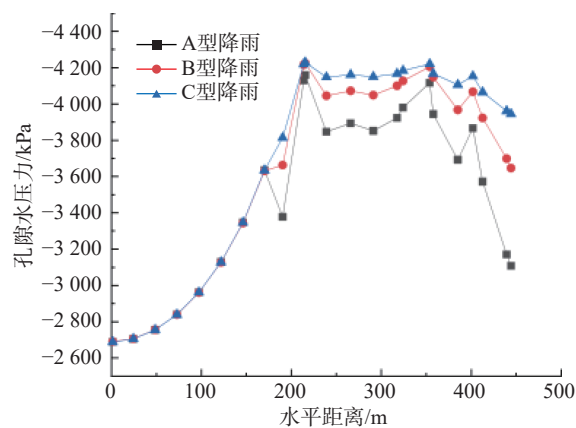


图 6 不同雨强 6 h 孔隙水压力变化曲线

Fig. 6 6 h pore water pressure change curve of different rain intensities

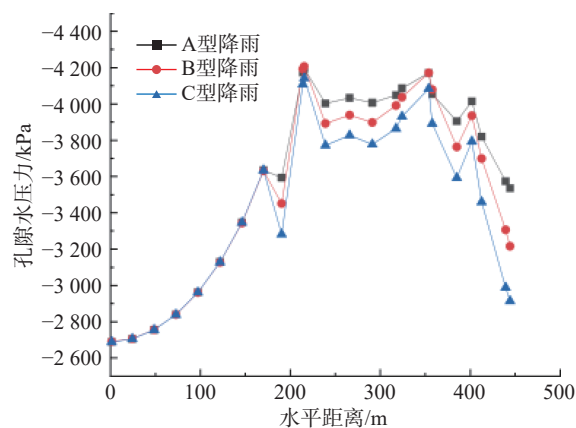


图 7 降雨量 120 mm 时孔隙水压力变化曲线

Fig. 7 The change curve of pore water pressure when the rainfall is 120 mm

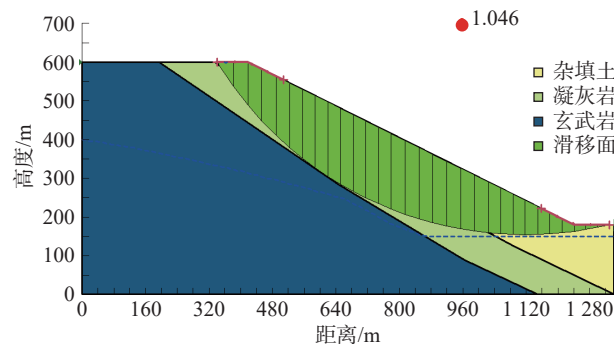


图 8 A 型无矿震荷载滑面范围

Fig. 8 Range of A-type non-ore seismic load sliding surface

的降雨时长, A 型降雨的安全系数低于 B 型低于 C 型, 这是由于在相同降雨时长, A 型降雨强度大于 B 型大于 C 型, A 型的雨水足够充分, 导致孔隙水压力变化最快, 从而造成安全系数最低。其中 A 型降雨的安全系数在 14h 后迅速下降, 这说明土层存在一个降雨临界点

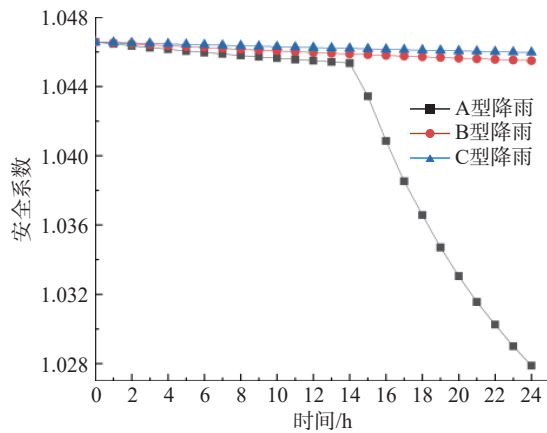


图9 无矿震荷载安全系数曲线

Fig. 9 Load safety factor curve of non-ore earthquake

(降雨量为 280 mm), 即土层的吸力存在一个极限值, 当降雨量越过这个界限时, 土层会迅速被破坏, 滑面的吸力下降或丧失, 使得安全系数骤降。降雨量没有达到 280 mm 时, 边坡安全系数相差不大, B 型和 C 型雨强较小, 边坡几乎处于稳定状态, 但随着降雨量的增加, 安全系数也在下降, 也需要提前支护加固, 防止滑坡产生, 危害生命财产安全。

由表 5 可知, 有无降雨情况下, 随着矿震烈度逐级增加, 边坡安全系数都降低, 烈度在增加到Ⅷ度时, 边坡的安全系数降至 1 附近, 增加到Ⅸ度时, 安全系数低于 1, 此时的边坡为不稳定状态。无降雨时矿震烈度Ⅵ度时, 边坡的安全系数下降仅为 0.19%, 当烈度由Ⅶ度增加到Ⅸ度时, 安全系数下降的比例分别为 0.57%、2.4%、8.6%, 经过 24 h 降雨, 安全系数下降比例分别为 0.1%、0.49%、2.14%、8.27%, 可以明显的看出, 烈度增加, 安全系数迅速下降。这是由于施加矿震载荷后, 相当于模型整体施加水平作用力, 随着矿震荷载增加, 使其作用到坡面的水平力增加, 导致边坡切向变形逐渐增大, 安全系数下降。

表 5 A 型雨强不同矿震载荷作用边坡安全系数

Table 5 Safety factors of slopes under different mine seismic loads of Type A rain intensities

工况	0 h	边坡稳定性状态	24 h	边坡稳定性状态
无	1.046	欠稳定	1.028	欠稳定
Ⅵ度	1.045	欠稳定	1.027	欠稳定
Ⅶ度	1.041	欠稳定	1.023	欠稳定
Ⅷ度	1.022	欠稳定	1.006	欠稳定
Ⅸ度	0.957	不稳定	0.943	不稳定

由表 5 可知, 叠加降雨和矿震作用, 使其边坡安全

系数降低更快, 这是由于降雨雨水渗透到岩层中, 使其力学参数降低, 再加上水平方向的荷载, 故使其安全系数降低更快。

4 结论

(1) 降雨时长相同, 雨强越大, 边坡的孔隙水压力变化越快, 安全系数越低, 边坡越危险。

(2) 雨强一致时, 降雨持续时间越长, 边坡的孔隙水压力等值线由稀疏变得密集, 逐渐呈现闭合趋势, 边坡的安全系数低, 边坡越危险。

(3) 降雨量相同, 雨强越小, 边坡的孔隙水压力等值线影响的范围越大。

(4) 边坡降雨存在一个降雨阈值, 当降雨量达到阈值后, 边坡安全系数迅速降低。

(5) 随着矿震烈度增加, 边坡的安全系数降低, 降雨和矿震叠加作用后安全系数更低。

参考文献 (References):

- [1] 杨攀, 杨军. 考虑前期降雨的边坡稳定降雨阈值曲面 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 169-174. [YANG Pan, YANG Jun. Rainfall threshold surface for slopes stability considering antecedent rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1): 169-174. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王一兆, 隋耀华. 降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4): 122-125. [WANG Yizhao, SUI Yaohua. Influence of rainfall infiltration on slope stability at shallow layer [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4): 122-125. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 周秀艳, 付建飞. 抚顺西露天矿区地下水水化学及演变特征 [J]. 露天采矿技术, 2020, 35(2): 6-10. [ZHOU Xiuyan, FU Jianfei. Hydrochemistry and evolution characteristics of groundwater in Fushun West Open-pit Mine [J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(2): 6-10. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 赵广信, 常耀广, 李兰. 抚顺煤田极值矿震影响范围预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 80-83. [ZHAO Guangxin, CHANG Yaoguang, LI Lan. Prediction of the scope influenced by the mining caused earthquake in Fushun coalfield [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3): 80-83. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 侯龙. 非饱和土孔隙水作用机理及其在边坡稳定分析中的应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012. [HOU Long. Research on the mechanism of pore water action within unsaturated soil and the corresponding slope stability [D].

- Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 孙必雄. 降雨入渗下非饱和土填方路基的渗流特性与稳定性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. [SUN Bixiong. The research on seepage characteristic and stability of the unsaturated soil fill subgrade under the condition of rainfall infiltration[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 海龙, 梁冰. 考虑降雨入渗条件的土体边坡稳定性分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 46–50. [HAI Long, LIANG Bing. Analysis of land slope stability considering rainfall infiltration [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(4): 46–50. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘卫涛, 曹文贵, 张运强. 考虑土体非饱和特性的斜坡降雨入渗模型及边坡稳定性分析 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(4): 102–109. [LIU Weitao, CAO Wengui, ZHANG Yunqiang. Rainfall infiltration model and slope stability analysis in consideration of unsaturated soil characteristics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 102–109. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨世豪, 苏立君, 张崇磊, 等. 强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 19–27. [YANG Shihao, SU Lijun, ZHANG Chonglei, et al. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda formation slope under heavy rainfall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 19–27. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 向章波, 张家铭, 周晓宇, 等. 基于Slide的某红层路堑边坡稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 90–95. [XIANG Zhangbo, ZHANG Jiaming, ZHOU Xiaoyu, et al. The slope stability analysis of red bed based on slide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 90–95. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 徐翔, 王义兴, 方正. 降雨和库水联合作用下边坡稳定性变化规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 51–58. [XU Xiang, WANG Yixing, FANG Zheng. Analysis on stability of a slope under rainfall and reservoir water level variation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 51–58. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震烈度表: GB/T 17742—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The Chinese seismic intensity scale: GB/T 17742 —2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330 —2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)]