

边坡在降雨及地震作用下的稳定性分析

任德斌,汪莹,于世海

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究边坡在地震和降雨作用下稳定性的变化规律,得出导致边坡失稳的敏感因素.方法 基于 ABAQUS 有限元软件模拟分析边坡稳定性的变化过程,采用拟静力法和强度折减的有限元法等方法对边坡进行数值模拟,将得到的安全系数与极限平衡法所得安全系数进行对比.结果 在弱降雨 20 mm/h 条件下,边坡安全系数发生变化的几率特别小,可见一定强度的弱降雨不会对边坡安全构成威胁;在强降雨 50 mm/h 状态下,前期边坡安全系数变化不大,后期安全系数逐渐降低且变化明显,甚至在降雨大约 34h 后边坡发生失稳破坏,安全系数极具降低,强降雨会对边坡安全性构成极大威胁.结论 在边坡或者堤坝等岩土工程中降雨和地震对其稳定性和安全性的影响,相对于其他外界因素更为重要.

关键词 边坡;强度折减法;降雨;地震;ABAQUS

中图分类号 TU473

文献标志码 A

Analysis on Stability of Gravel Slope under Rainfall and Earthquake

REN Debin, WANG Ying, YU Shihai

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To analyze the slope stability under rainfall and earthquake conditions, and get sensitive factors that lead to slope instability. The ABAQUS software is used to simulate the slope stability changes, and the slope is simulated with the quasi-static method and the strength reduction method. It compares the factor of safety with the safety factor obtained by the limit equilibrium method. The result shows that: the slope safety factor is very small at 20 mm/h under weak rainfall, and weak rainfall with certain intensity will not pose a threat to slope safety. In the heavy rainfall at 50 mm/h, the early safety factor is not changed much, the late safety factor is gradually reduced and the change is obvious, even after about 34 hours of rainfall, the safety factor is greatly reduced, and it can be seen that the heavy rainfall will pose a great threat to the safety and stability of the slope. The conclusion shows that: the influence of rainfall and earthquake on its ability and safety is more important than other external factors in geotechnical engineering such as slope or dam.

Key words: slope; strength reduction method; rainfall; earthquake; ABAQUS

收稿日期:2016-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51478275)

作者简介:任德斌(1960—),男,教授,主要从事有限元模拟应用研究.

边坡的稳定性分析是岩土工程的一个重要研究方向,因其岩土性质本身具有诸多影响因素并且对于稳定性的影响原因(降雨、地震、人工开挖、各种荷载作用、岩土体工程性质)也是不同的,而降雨和地震则是最主要也是较为常见的两个因素,至今仍是边坡稳定性研究的重点.对边坡与降雨或地震之间的关系进行分析研究对于边坡失稳的预防与整治将起到非常重要的作用^[1].边坡的稳定性直接影响工程的设计和造价,由此带来的损失更是难以估计.例如中国科学院地球环境研究所最新研究发现,2008 年汶川地震中由于地震和降雨产生近 6 万个滑坡,岷江、沱江、涪江三条河流的输沙量比地震前增加了 3~7 倍,由滑坡产生的泥沙将在面积约 7 万平方公里的流域内停留数十年到数百年.

四川省芦山“4.20”7 级强烈地震,在降雨之后又发生余震,雨水入渗改变了土壤的含水率,地震又使得土质疏松,很容易导致滑坡、泥石流等地质灾害.目前,国内外学者对边坡的稳定性做了大量的研究,朱文彬等^[2]利用有限元软件模拟了降雨条件下边坡破坏,分别利用了饱和、非饱和土的渗流理论分析了边坡在降雨作用下的位移、渗流和稳定性的过程.郑颖人等^[3]分析了有限元强度折减法的影响因素和计算精度,提出了提高计算精度的具体方法.邓东平等^[4]基于拟静力法对地震作用下的边坡稳定性进行了分析.张鲁渝等^[5]利用在有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究中以某均质土坡为例,应用强度折减法进行了边坡稳定性安全系数分析.李维光等^[6]利用拟静力法分析了岩质边坡的稳定性.唐晓松等^[7-8]利用 PLAXIS、ADINA 等有限元程序对渗流作用下土坡的稳定性进行了分析,张晓咏等^[9]应用 ABAQUS 有限元程序结合强度折减计算对渗流和应力直接耦合,分析了

渗流作用下边坡的稳定性.已有研究大都局限于单因素或者单工况情况下的边坡稳定性研究,没有综合考虑多因素条件下的边坡分析,与工程实际存在较大距离.因此,笔者采用强度折减法,基于 ABAQUS 软件分析边坡在降雨和地震共同作用下的稳定性,在双重因素的作用下对于边坡的失稳形态与标准进行探讨,并得到边坡的安全系数来指导工程实践.

1 模型的建立

1.1 模型基本假定

数值模拟假设条件如下:①保证计算结果符合工程实际,又使有限元计算易于进行,将边坡模型简化为平面应变问题,合理地设定边界条件;②模型计算假设为一个均匀土质边坡;③剪胀角取为零;④采用摩尔-库伦模型模拟土体的本构关系;⑤基于强度折减法计算边坡的安全系数.

二维边坡模型考虑模型边界与土体之间的相互约束作用,模型的边界条件设置如图 1 所示.对模型的左右两侧边界加水平向的约束,基底两个方向位移全部约束,上部为自由边界.土体基本参数见表 1.

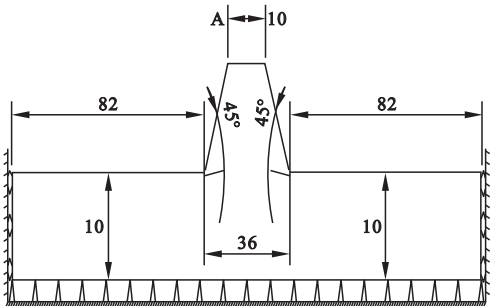


图 1 边坡模型侧面

Fig. 1 Slope model and its cross-section

表 1 土质参数

Table 1 Properties of soil

重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	变形模 量/MPa	泊松 比
20	15	30	10	0.3

1.2 边坡安全系数计算方法与分析

笔者应用强度折减法计算边坡安全系数,而使用强度折减法的关键是正确选取失稳判据,在计算过程中将边坡顶点位移突变作为边坡失稳破坏的标志. 根据边坡破坏的现象来看,边坡破坏导致坡面失稳滑出,边坡顶点位移随滑动面滑出产生位移突变,并且位移将向无穷大趋势发展,结合位移发展规律可以用来作为判定边坡失稳的标准.

2 不同工况下边坡稳定性分析

2.1 自然状态下边坡稳定性分析

选取土坡坡顶节点作为计算参数,经计算可得土坡自然无应力状态下的安全系数(即强度折减系数 $FV1$) 为 1.4(见图 2). 利用 ABAQUS 软件,按照表 1 所列参数建立模型,在计算与判断失稳参考点时应注意并不是所有的取值都是以第一个位移拐点为评价标准,也要对对应的位移进行综合考虑,显然对于 $FV1 = 1.55$ 所对应的位移过大,不满足安全系数的定义.

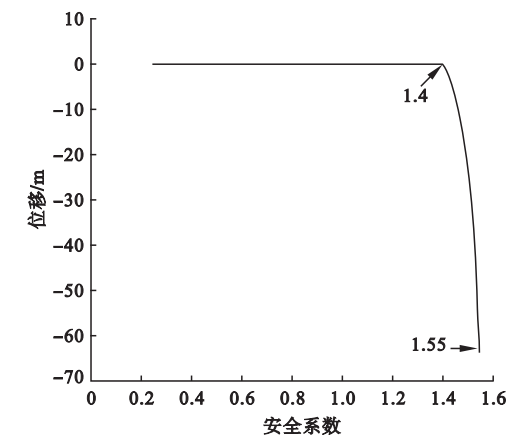


图2 节点变量 $FV1$ 随位移的变化关系
Fig.2 Relationship curve between field variables and node displacements

2.2 边坡降雨入渗及稳定性分析

首先分析边坡的内在因素如土体重力密度、内摩擦角、土壤黏聚力等参数的变化对安全系数的影响. 研究表明,随着土体重力密度

的增大,边坡安全系数随之减小,随着土体内摩擦角的增大,边坡安全系数增大且变化明显,随着土壤黏聚力的增大,边坡安全系数逐渐增大. 基于上述事实,分析降雨与地震对于边坡稳定性的影响就更具说服力.

2.2.1 降雨前边坡初始状态

为了增加对比性和说服力,在计算地震与降雨联合作用下的土体状态之前需要引入初始状态. 模拟计算中吸湿曲线和渗透系数的参数见图 3.

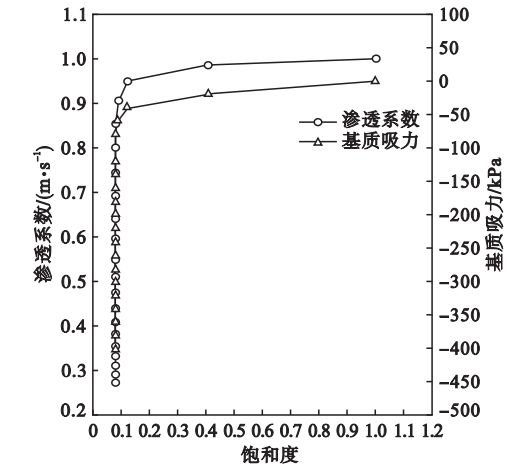


图3 基质吸力和渗透系数随饱和度变化曲线
Fig.3 Moisture absorption curve and the coefficient of permeability changing with the saturation curve

在采用吸湿曲线和渗透系数随饱和度变化曲线之后所得到初始状态下孔压分布和饱和度分布如图 4 所示. 由图可见,孔隙压力的分布呈线性分布,底部为 100 kPa,顶部为 -100 kPa. 降雨之前的饱和度分布如图 5 所示. 由图可见水位以下饱和度为 1,水位以上迅速减少到 0.08,与给定的条件是对应的,而且从这些初始状态的研究对象来看,边坡在初始状态的稳定性强、安全度高. 降雨之前的竖向有效应力分布如图 6 所示,从图中可以看出,有效应力在受到基质吸力影响下,有效应力从外及里逐渐增大,且表面不存在应力为零的区域,说明边坡是稳定的.

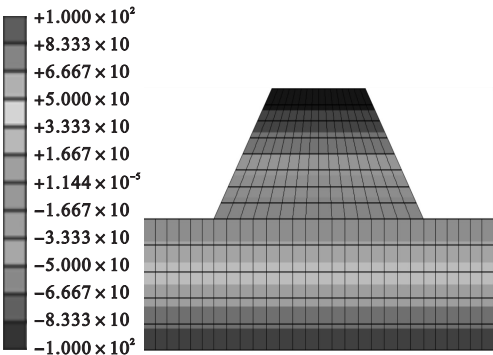


图4 降雨之前的孔压分布

Fig. 4 The distribution of pore pressure before the rain

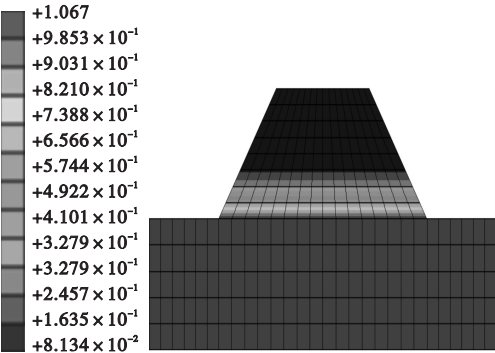


图5 降雨之前的饱和度分布

Fig. 5 The saturation of pore pressure before the rain

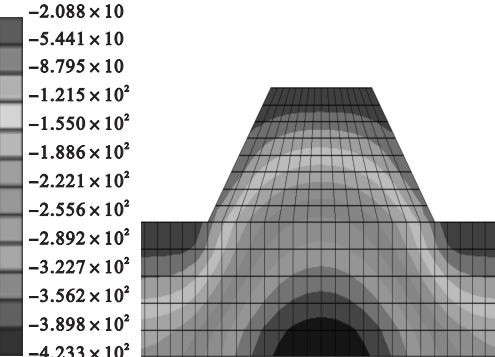


图6 降雨之前的竖向有效应力分布

Fig. 6 The distribution of vertical effective stress before the rain

2.2.2 降雨入渗分析

从孔隙压力方面进行分析,边坡降雨强度分别为 20 mm/h 和 50 mm/h,坡脚处不降雨,得出孔压分布示意图(见图 7). 通过模拟发现降雨入渗后孔隙水压力与初始状态有明显的区别. 与未降雨状态相比,降雨作用下边

坡整体范围内孔隙水压力变大,此时坡面孔隙水压力增大相对比较快,边坡内部变化相对较慢,并且边坡内部仍未达到饱和状态,仍有很大部分负压压力区. 当停止降雨后,边坡从坡顶开始饱和度逐渐减小,孔隙水压力减小,坡面减小的速度快于边坡内部减小的速度. 降雨强度 20 mm/h 和 50 mm/h 相比,在 50 mm/h 作用下边坡的孔隙水压力升高得比较快,尤其是坡面处孔隙压力增幅比较明显,与降雨 20 mm/h 相比负压压力区相对较小. 已有研究表明,孔隙水压力的存在本身对于降低边坡稳定性有巨大影响,孔隙水压力不断弱化有助于提高边坡稳定性的土体参数,更关键的是直接减小土体的强度指标黏聚力,所以孔隙水压力升高得越快,其破坏的速度就越快,孔隙水压力的值越高,边坡处于稳定性和安全性的可能性就越小. 因此,在保证入渗率的前提下降雨强度越大,边坡越不稳定.

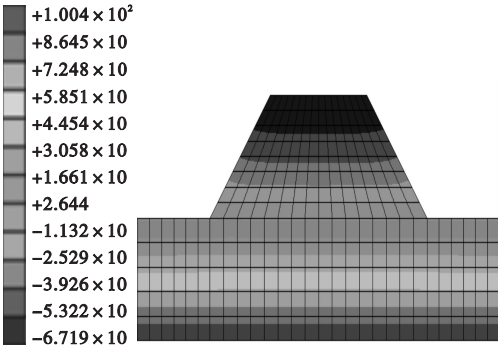


图7 降雨边坡孔隙压力分布示意图

Fig. 7 Rainfall intensity pore pressure distribution chart state

降雨作用下不同时间边坡的位移分析如图 8 所示. 从图中可以看出,初期边坡顶部位移出现负值,是由于降雨作用下边坡有效应力减小而出现荷载回弹而发生的膨胀(见图 8 (a)、(e)). 降雨停止后坡顶有效应力逐渐增大,这一状态随着降雨停止而逐渐消失(见图 8 (c)、(g)). 降雨过程中坡脚和坡顶的位移变化相对较大. 降雨强度 20 mm/h 和 50 mm/h 相比,降雨 50 mm/h 作用下边坡位移变化速度快于降雨 20 mm/h 的位移变化速度.

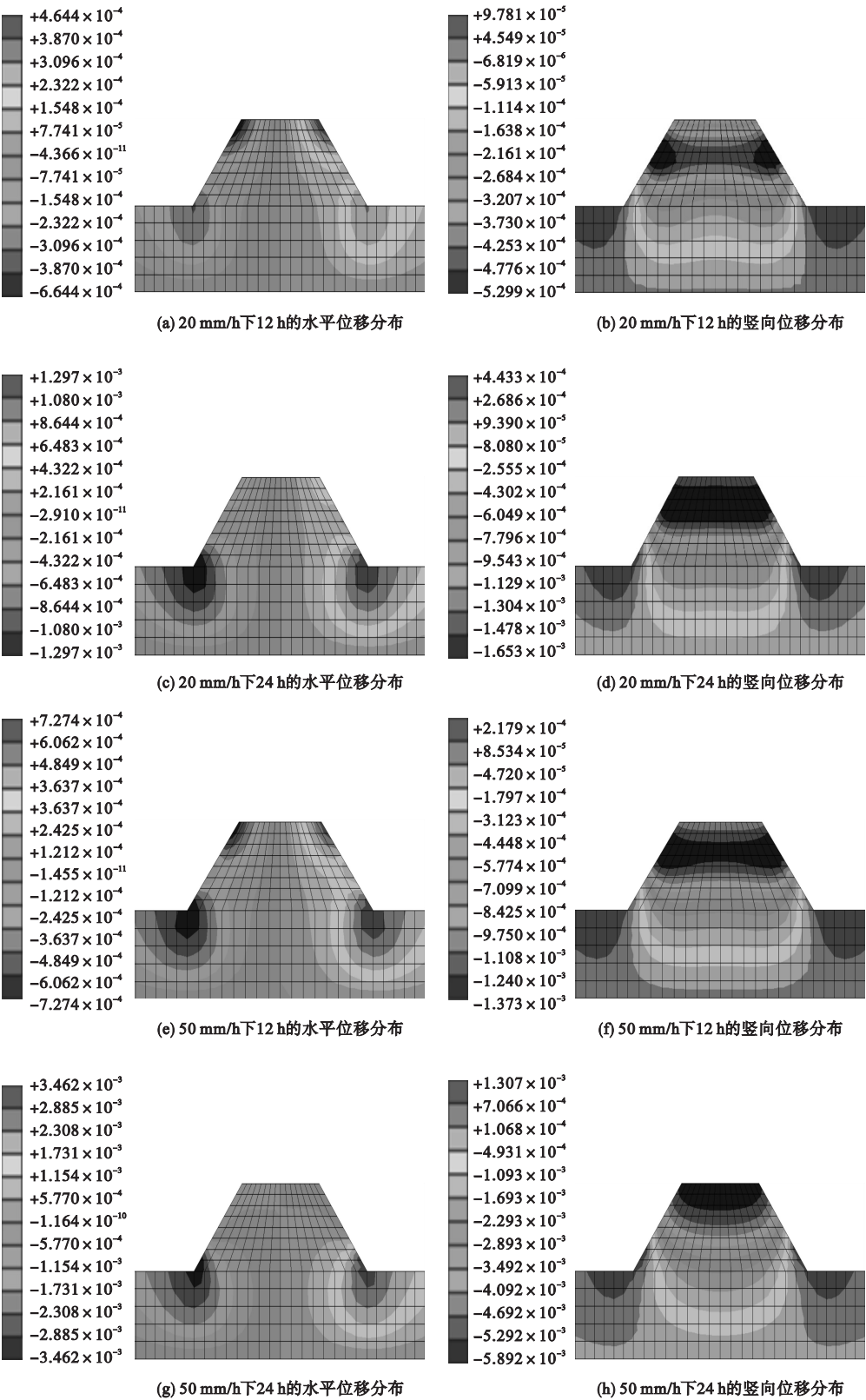


图8 位移分布图

Fig. 8 Vertical displacement distribution chart state

2.2.3 降雨强度对边坡稳定性的影响

两种降雨强度条件下,边坡顶点 A、坡脚点 B 相对位移与降雨持时关系如图 9 所示。从图中可以看出,在降雨强度恒定的条件下,随着降雨的进行,边坡相对位移逐渐增加。弱降雨时,土坡的相对位移增加较为缓慢,弱降雨时,坡顶点 A 与坡脚点 B 的相对位移大小基本相同,两点位移增长速率几乎同步。强降雨条件下,降雨 10 h 内,土坡相对位移变化不大,10 h 后土坡相对位移变化较大,位移增长速度较快,而且坡顶点相对总位移大于坡脚点总位移。同时可以看出坡脚和坡顶点在强降雨作用下的位移大于弱降雨作用下的位移。

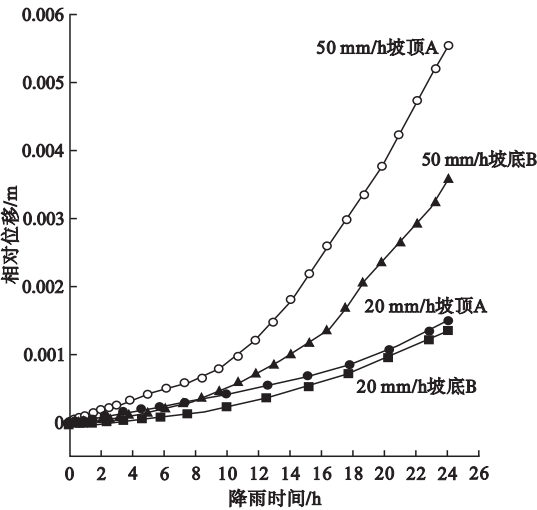


图 9 降雨时间与相对位移关系

Fig. 9 The relationship curves of relative displacement and rainfall duration

不同降雨状态下边坡安全系数随降雨持时变化情况如图 10 所示。从图中可以看出在弱降雨作用下,边坡安全系数变化不大,可见弱降雨不会对边坡产生破坏作用。而在强降雨作用下,前 22 h 边坡安全系数变化不大,基本稳定。22 h 后边坡安全系数变化较大,甚至在降雨 34 h 边坡已经发生破坏。对比两种降雨强度作用下,边坡在前 22 h 内安全系数差值很小,22 h 后边坡安全系数差值逐渐变大。

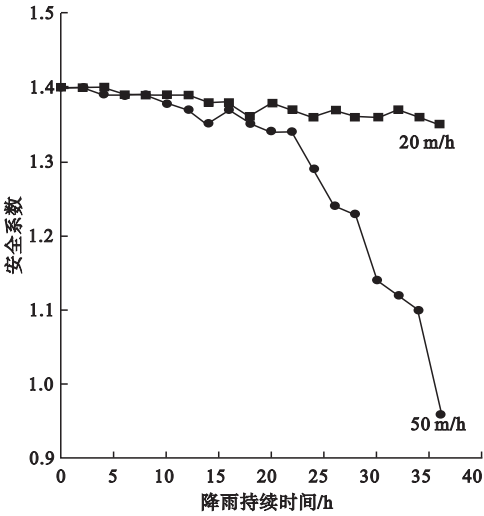


图 10 边坡安全系数随降雨时间变化曲线

Fig. 10 Variation curves of slope safety coefficient with rainfall duration

2.3 地震作用下边坡稳定性分析

文中地震力计算采用拟静力法,参照文献[10]计算地震惯性力。

$$F_{hi} = \alpha_h \xi W_i \alpha_i / g. \tag{1}$$

式中: F_{hi} 为质点 i 的水平向地震惯性力; α_h 为设计地震加速度; ξ 为折减系数,取 0.25; W_i 为质点 i 的重量; α_i 为质点 i 的动态分布系数,取 $\alpha_i = 1$; g 为重力加速度。

安全系数计算采用强度折减法,经计算可得边坡在不同峰值加速度下的安全系数,可知边坡的安全系数随峰值加速度的增加而减小。即使峰值加速度等于 0.4 g,边坡的安全系数仍大于 1,这验证了文献[11]所给定的路堑土质边坡最大放坡率是相对安全的。

2.4 降雨和地震联合作用下边坡稳定性分析

在现实生活中,边坡的破坏是多种因素共同作用的结果,特别是在地震或降雨作用下很容易产生滑坡、泥石流等地质灾害^[12]。虽然地震不经常发生,但爆破震动以及机械震动却经常发生^[13-17]。笔者为研究不同工况下边坡的稳定性,分别计算边坡在不同降雨时间和不同地震强度下的安全系数(见表 2)。

表2 不同峰值加速度和降雨时间作用下边坡的安全系数

峰值加		安全系数								
速度/g	0 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h	28 h	32 h	36 h
0.00	1.4	1.39	1.39	1.37	1.37	1.34	1.29	1.23	1.12	0.96
0.05	1.26	1.26	1.24	1.22	1.2	1.16	1.12	1.04	0.99	0.72
0.10	1.23	1.23	1.22	1.2	1.18	1.14	1.11	1.01	0.97	0.72
0.15	1.22	1.21	1.2	1.18	1.16	1.12	1.08	1	0.96	0.71
0.20	1.2	1.19	1.18	1.16	1.14	1.11	1.06	0.98	0.94	0.69
0.25	1.17	1.17	1.16	1.14	1.12	1.08	1.03	0.97	0.93	0.69
0.30	1.15	1.15	1.14	1.12	1.11	1.06	1.01	0.96	0.91	0.67
0.35	1.13	1.13	1.12	1.11	1.08	1.03	0.99	0.94	0.9	0.62
0.40	1.12	1.11	1.1	1.08	1.06	1.01	0.98	0.92	0.88	0.61

根据上表数据拟合而成的安全系数分布面如图 11 所示。

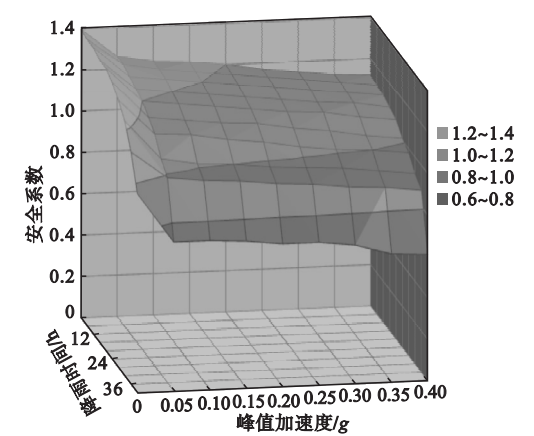


图 11 安全系数分布曲面

Fig. 11 Variation surface of safety factor of stability coefficient with acceleration and rainfall duration

边坡在单独降雨或地震作用下基本保持安全状态,然而在降雨和地震联合作用下,边坡的安全系数发生了新变化,相比仅考虑降雨或地震^[15-18]作用边坡的安全系数降低了一部分,在图 11 所示分布区域中已经出现大面积安全系数小于 1 的区域。

3 结 论

(1)在弱降雨(20 mm/h)状态下,边坡安全系数发生变化的几率特别小,可见一定强度的弱降雨不会对边坡安全构成威胁。

(2)在强降雨(50 mm/h)状态下,前期边坡安全系数变化不大,后期安全系数逐渐降低且变化明显,甚至在降雨大约 34 h 后边

坡发生失稳破坏,安全系数极具降低。可见强降雨会对边坡安全稳定性构成极大威胁。

(3)在地震作用下通过调整地震峰值加速度,在规范规定的最大边坡比仍保持安全状态,与单独降雨或地震作用相比,降雨和地震联合作用下边坡安全系数进一步降低且破坏程度更加严重,边坡破坏概率增大很多。

(4)在边坡或者堤坝等岩土工程中降雨和地震对其稳定性和安全性的影响,相对于其他外界因素更为重要。

参考文献

[1] 余飞,陈善雄,余和平. 顺层岩质边坡渐进破坏及失稳机制的数值模拟研究[J]. 岩土力学,2005,26(增刊2):36-40.
(YU Fei, CHEN Shanxiong, YU Heping. Numerical simulation study on progressive destruction and failure mechanism of bedding rock slopes [J]. Rock and soil mechanics, 2005,26(S2):36-40.)

[2] 朱文彬,刘宝琛. 降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(4):509-512.
(ZHU Wenbin, LIU Baochen. Forming and development process of soil landslides during rainfall[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2002,21(4):509-512.)

[3] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004,23(19):3381-3388.)

[4] 邓东平,李亮,赵炼恒. 地震作用下边坡稳定

- 性分析的拟静力法研究[J]. 中南大学学报, 2014, 45(10): 3578–3588.
(DENG Dongping, LI Liang, ZHAO Lianheng. Research on quasi-static method of slope stability analysis during earthquake[J]. Journal of central south university (science and technology), 2014, 45(10): 3578–3588.)
- [5] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 21–28.
(ZHANG Luyu, ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of hydraulic engineering, 2003, 34(1): 21–28.)
- [6] 李维光, 张继春. 地震作用下顺层岩质边坡稳定性的拟静力分析[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 184–189.
(LI Weiguang, ZHANG Jichun. Equivalent static stability study on rock mass bedding slope under blasting[J]. Journal of mountain science, 2007, 25(2): 184–189.)
- [7] 唐晓松, 郑颖人, 邹爱清, 等. 应用 PLAXIS 有限元程序进行渗流作用下的边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 13–16.
(TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, WU Aiqing, et al. Stability analysis of soil slope under seepage PLAXIS finite element program[J]. Journal of Yangtze river scientific research institute 2006, 23(4): 13–16.)
- [8] 唐晓松, 赵尚毅, 郑颖人, 等. 渗流作用下利用有限元强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(9): 6–10.
(TANG Xiaosong, ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, et al. Analysis of soil slope stability by strength reduction element method under seepage[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2007, 24(9): 6–10.)
- [9] 张晓咏, 戴自航. 应用 ABAQUS 程序进行渗流作用下边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程, 2010, 29(增刊1): 2927–2934.
(ZHANG Xiaoyong, DAI Zihang. Analysis of slope stability under seepage by using ABAQUS program[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(S1): 2927–2934.)
- [10] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程边坡设计规范: SL386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for engineered slopes in water resources and hydropower projects: SL386—2007[S]. Beijing: China Water Power Press, 2007)
- [11] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1993, 49(3): 387–403.
- [12] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
(Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.)
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
(QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Earthwork principle and calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.)
- [15] 罗强, 赵炼恒, 李亮, 等. 地震效应和坡顶超载对均质土坡稳定性影响的拟静力分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3835–3842.
(LUO Qiang, ZHAO Lianheng, LI Liang, et al. Quasi-static stability analysis of homogeneous soil slopes under effect of surcharge and earthquake[J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(12): 3835–3842.)
- [16] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173–180.
(ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2010, 30(2): 173–180.)
- [17] 黄诚, 王安明, 任伟中. 水平向与竖向地震动的时程组合模式对边坡动力安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3404–3410.
(HUANG Cheng, WANG Anming, REN Weizhong. Influence of time combination pattern of horizontal and vertical ground motions on slope seismic safety factor[J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(11): 3404–3410.)
- [18] 朱亚林, 孔宪京, 邹德高, 等. 高土石坝地震反应和破坏机理分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1362–1367.
(ZHU Yalin, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Dynamic response and failure mechanism of high earth-rockfill dams[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(9): 1362–1367.)