

地震峰值加速度作用下含水边坡稳定性分析*

陈冲¹,张宜虎¹,周火明¹,张科²

(1.长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010;2.中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘 要:根据 Darcy 定律和二次抛物线降深曲线确定了边坡含水情况下 7 种浸润面位置,选取浸润面位于边坡表面时的位置作为对比。选取地震波峰值加速度由 0 到 0.2g 共 6 个数据,组合得 48 组模型计算参数。采用拟静力法,结合 FLAC^{3D}程序的强度折减法对边坡进行稳定性分析。结果表明:(1)边坡涉水后,滑动面由近坡面往坡内移动到浸润面附近。随着浸润面的上升,滑动面靠近坡面且保持在浸润面附近。(2)在单一地震因素作用时,边坡滑动面随峰值加速度变化不大,但在含水的情况下,滑动面随峰值加速度变大而往坡内大幅移动,边坡破坏模式由浅层破坏转变为深层破坏。(3)浸润面位置对边坡稳定性的影响较大,因此,合理的确定浸润面的位置具有重要意义。

关键词:峰值加速度;浸润面;边坡稳定;强度折减法

中图分类号:TV221 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)00-0545-06

Stability Analysis of Hydrous Slope under Peak Seismic Acceleration

Chen Chong¹,Zhang Yihu¹,Zhou Huoming¹,Zhang Ke²

(1.Yangtze River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources Division of Geotechnical Engineering, Wuhan 430010, P.R. China;
2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Hunan 410083, P.R. China)

Abstract: Based on Darcy’s law and the hypothesis of drawdown curve in Parabola, seven phreatic surfaces in different hydrous slopes were determined, another condition that all the slopes full with water were added for comparing. Choosing six peak seismic accelerations varied from 0 to 0.2g, forty-eight calculation models were founded. Combined with static method, stability of slope was analyzed by using strength reduction in FLAC^{3D}. The results show that: (1) after the slope contains water, its slip plane moves from near the slope surface to the phreatic surface. If the phreatic surface becomes higher, it will stay nearby and move towards the surface of the slope. (2) When the slope is only influenced by seismic wave, its slip plane changes little with the increasing of the peak seismic acceleration. After it contains water, the slip plane moves towards the inside of side slope quickly, and failure mode transfers from the shallow slip to the deep slip. (3) The phreatic surface has a great impact on the stability of slope, so it is important to use correct way to determine the phreatic surface.

Keywords: peak seismic acceleration; phreatic surface; slope stability; strength reduction method

0 引言

经过多年经济高速的发展,在我国的水利建设、公路建设、城市基建等行业中出现了众多的边

坡。特别是在水利水电工程建设中,边坡是重要的危险因素。边坡稳定性分析一直是岩土工程界极为关心的研究课题之一,也是边坡工程研究的核心。边坡稳定性分析方法主要有工程地质分析法、

* 收稿日期:2016-04-19(修改稿)
作者简介:陈冲(1990-),男,湖北天门人,硕士,助理工程师,主要从事岩土工程测试及分析评价等方面的工作。
E-mail:chenchong_c@mail.crsri.cn
基金项目:中国高等教育博士学科点专项科研基金(No.20120162110009)

极限平衡分析法、极限分析法、可靠性分析法以及数值分析方法^[1]。随着计算机技术的快速发展,数值分析方法在岩土工程中发挥越来越重要的作用。数值分析方法中的有限差分法,克服了边界元和有限元基于小变形的假设,也克服了离散元中把离散块体作为刚体的假设,单元网格可以随着材料的变形而变形,能够准确、动态地反映材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形的过程,非常适合模拟边坡稳定这类大变形问题^[2]。基于强度折减的有限差分法,将强度折减法、极限平衡原理和有限差分原理相结合,计算边坡的最小安全系数,结合边坡滑动面,分析判断边坡的稳定性。

在自然状态下存在的边坡,其稳定性受到很多因素影响。其中,地震因素作用和边坡含水情况对边坡的稳定性影响最大。目前,国内外很多学者将地震动参数引入地震诱发的滑坡分析研究中,利用地震参数进行定量分析,使地震滑坡研究更加客观、严谨和科学^[3]。在描述地震动的参数中,峰值加速度最为常见,作为地震记录的瞬时极大值,可以在一定程度上反映地震动的整体作用水平。选取地震波峰值加速度作为边坡最危险受力状况来分析边坡的稳定性,具有较强的物理和现实意义。

水的作用也会对边坡的稳定性造成不利的影响。在大多数的边坡工程中,由于地下水或者降雨的影响,边坡中浸润面的形状是不规整的。但目前的边坡工程中大都按经验粗略的确定边坡体内浸润面的位置,浸润面形状较为规整与实际出入较大。唐晓松、郑颖人等^[4-5]通过对比分析发现,按经验粗略确定的稳态浸润面位置进行稳定性分析,其结果将偏于危险,且误差在 10% 以上。

本文采用拟静力法,选取不同地震波峰值加速度进行研究。根据 Darcy 定律和二次抛物线的降深曲线确定边坡不同含水情况下的浸润面位置,结合 FLAC^{3D} 程序的强度折减法,对比分析了地震波峰值加速度和浸润面位置对边坡稳定性的影响,并分析了两者综合作用下边坡稳定性系数和滑动面的变化,具有一定的理论和现实意义。

1 强度折减法原理简介

强度折减法的基本原理是将边坡岩土体与剪切强度相关的参数 c, φ 值同时除以初始的边坡安全系数 $F_{\text{初始}}$, 得到新的岩土体的参数 c', φ' 值, 然后将新的参数代入重新进行计算, 直至边坡处于临界平衡状态, 此时的折减系数即为边坡的安全系数。计算公式如下:

$$c' = \frac{c}{F_{\text{初始}}} \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{F_{\text{初始}}} \tag{2}$$

式中: c, φ 分别为岩土体原始的黏聚力和内摩擦角; c', φ' 分别为经过折减后的黏聚力和内摩擦角。边坡的安全系数等于临界状态对应的折减系数或 $F_s = F_{\text{临界}}$ 。

2 数值分析模型的建立

2.1 边坡模型

选取均质边坡作为分析对象, 边坡高 20 m, 坡角为 45°, 坡脚到左侧边界距离为 30 m, 坡顶到右侧边界距离为 55 m, 坡脚向下边界延伸 1 个坡高距离 20 m, 模型宽度取为 2.5 m, 具体尺寸如图 1。建立模型共 816 个单元, 1 176 个节点。整个模型分 3 个部分建立, 第 I 部分水平、竖直方向网格为 12×8; 第 II 部分水平、竖直方向网格为 40×8; 第 III 部分水平、竖直方向网格为 40×10。

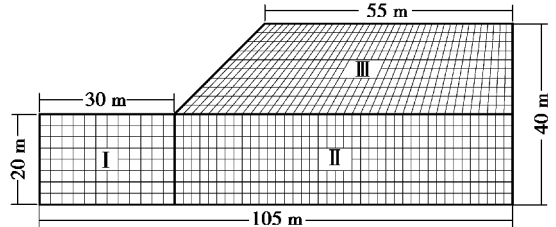


图 1 模型尺寸

Fig.1 Model size

边坡岩土体参数为: 弹性模量 $E = 10 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。浸润面以上重度 γ 取为 $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 粘结力 c 和内摩擦角 φ 分别取为 155.98 kPa 和 33°。浸润面以下重度 γ 取为 $26 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 粘结力 c 和内摩擦角 φ 分别取为 110 kPa 和 16°^[6-7]。

2.2 浸润面位置的确定

采用 Darcy 定律和二次抛物线降深曲线的假设确定边坡浸润面位置, 如图 2 所示。

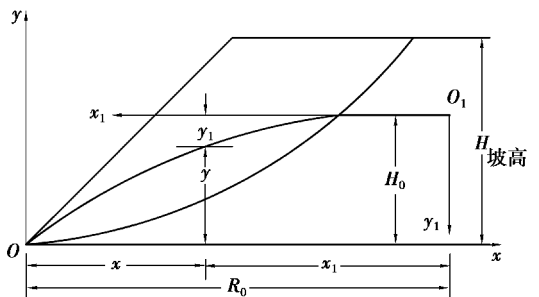


图 2 浸润面计算方法

Fig.2 Calculation method of phreatic surface

在 $X_1O_1Y_1$ 坐标系中,假定:

$$y_1 = ax_1^2 \tag{3}$$

且

$$a = H_0/R_0^2 \tag{4}$$

式中: H_0 为地下水稳定水位相对 X 轴高程; R_0 为地下水的影响半径。

而在 XOY 坐标系中:

$$y = H_0 - y_1 \tag{5}$$
$$x = R_0 - x_1 \tag{6}$$

把式(4)、式(5)、式(6)带入式(3)中,有

$$y = H_0 - a(R_0 - x)^2 \tag{7}$$

在坡脚以上的模型中,选取 H_0 从坡脚到坡顶共 5 个数据,每次递增 1/4 个坡高的高度,由式(7)计算出边坡的浸润面位置。在坡脚以下的模型中,选取浸润面位于模型底部、中间两种位置,且浸润面是水平的。另外,选取浸润面位于边坡表面时的位置作为对比。边坡中浸润面的位置共有 8 种,如图 3。采用浸润面最高点距离坡底的垂直高度来衡量浸润面位置的高低,8 种边坡浸润面位置对应的高度如表 1。

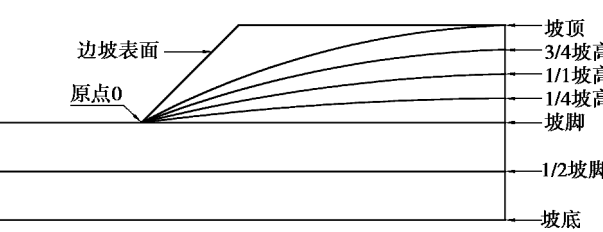


图 3 浸润面位置
Fig.3 Phreatic surfaces

表 1 不同边坡含水情况对应的浸润面高度

Table 1 Height of phreatic surfaces in different hydrous slopes

浸润面位置	坡底	1/2坡脚	坡脚	1/4坡高	1/2坡高	3/4坡高	坡顶/边坡表面
浸润面高度 H/m	0	10	20	25	30	35	40

2.3 地震波峰值加速度的选取

参照中国地震局记录的汶川地震获得的地震记录,结合震区 $0.2g$ 的峰值加速度分界线^[3],选取最大峰值加速度为 $0.2g$,以 $0.04g$ 为间隔,分为 6 个。结合边坡含水情况下 8 种浸润面位置,数据组合后共 48 个模型计算参数,用 FLAC^{3D} 计算并分析。

3 结果及分析

3.1 峰值加速度对边坡稳定性的影响

(1) 根据计算结果,绘制了不同地震波峰值加速度情况下的边坡安全系数,如图 4。从图中可以看出,在相同浸润面高度的情况下,随着峰值加速度的增加,边坡的安全系数呈线性下降,且在 $H>10\text{ m}$ 后,随着边坡浸润面上升曲线斜率略有降低。

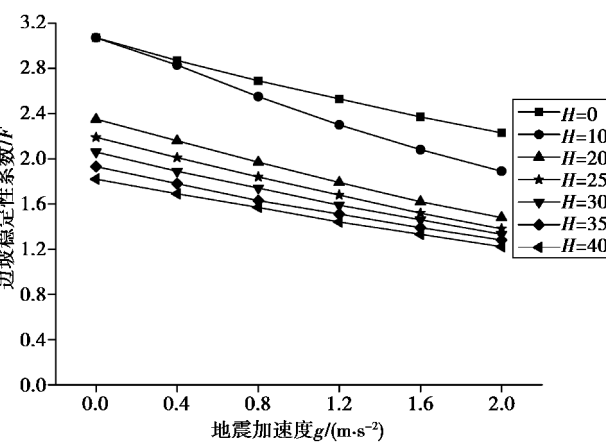


图 4 边坡安全系数随峰值加速度的变化
Fig.4 Changes of slope stability with different peak seismic accelerations

(2) 绘制 $H=0$ 时不同峰值加速度下的边坡滑动面,如图 5。从图中可以看出,在 $H=0$ 的情况下,随着峰值加速度增加,不仅边坡的安全系数降低,滑动面也往坡内移动。

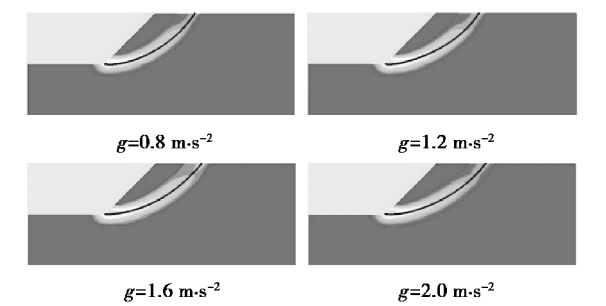


图 5 $H=0$ 时边坡滑动面随峰值加速度的变化
Fig.5 Changes of slip planes with different peak seismic accelerations when H equals 0

3.2 浸润面位置对边坡稳定性的影响

(1) 根据计算结果,绘制了不同浸润面高度情况下的边坡安全系数,如图 6。从图中可以看出,在边坡浸润面高度较低、地震波峰值加速度加速较小时,随边坡浸润面上升,安全系数下降不明显。在相同峰值加速度的情况下,边坡安全系数随着浸润面高度增加而下降,且 H 在 0 和 10 m 之间时曲线斜率升高,在 10 m 和 40 m 之间时曲线斜率降

低。其中,边坡安全系数在 $H=10\text{ m}$ 到 $H=20\text{ m}$ 之间下降速度最大,在 $H=20\text{ m}$ 到 $H=40\text{ m}$ 之间呈线性下降趋势。

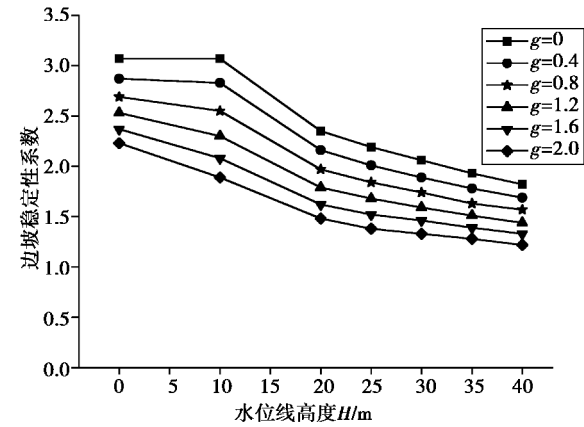


图6 边坡安全系数随浸润面高度的变化

Fig.6 Changes of slope stabilities in different height of phreatic surfaces

(2)图7中峰值加速度为0时,浸润面高度 H 从0增加到10 m的过程中,边坡滑动面范围变化不大。 $H=20\text{ m}$ 时的滑动面由近坡面往坡内移动到浸润面附近。在 $H\geq 20\text{ m}$ 后,滑动面随着浸润面上升往坡面移动且保持在浸润面附近。分析可知,边坡浸润面以下的岩土体由于饱和度变大,其粘聚力和内摩擦角大幅下降,浸润面上升后,边坡的安全系数减小^[8]。并且,由于浸润面附近的岩石力学参数相差较大,地震作用时,剪应力集中造成边坡部分滑动面位于浸润面上。

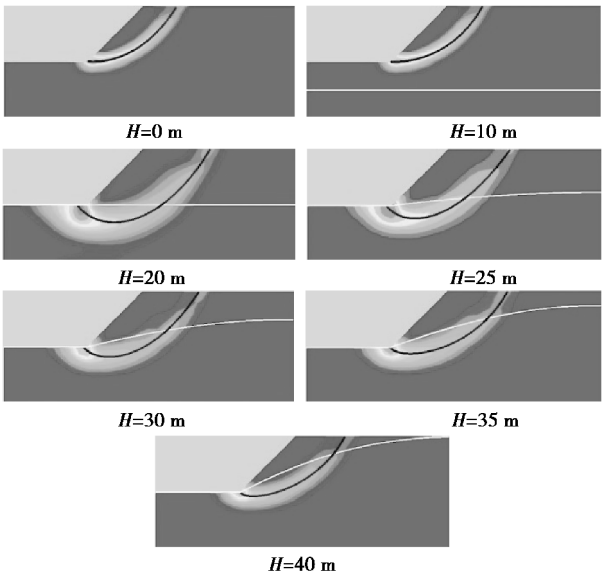


图7 峰值加速度为0时不同浸润面高度边坡滑动面的变化

Fig.7 Changes of slip planes with different height of phreatic surfaces when g equals 0

3.3 两者综合作用对边坡稳定性的影响

(1)图4中在峰值加速度由0增加到 $2.0g$ 的过程中,边坡浸润面高度 $H=0$ 时的安全系数下降了0.84, $H=20\text{ m}$ 时的安全系数下降了0.87,且两种情况下安全系数与峰值加速度都呈线性关系。对比图5和图8中两种情况下的边坡滑动面, $H=20\text{ m}$ 时的滑动面随着地震波峰值加速度增加往坡内大幅移动。表明在边坡浸润面从边坡底部上升时,随峰值加速度增加,边坡安全系数变化值相近,但在含水的情况下,边坡滑动面随峰值加速度变大而往坡内大幅移动。

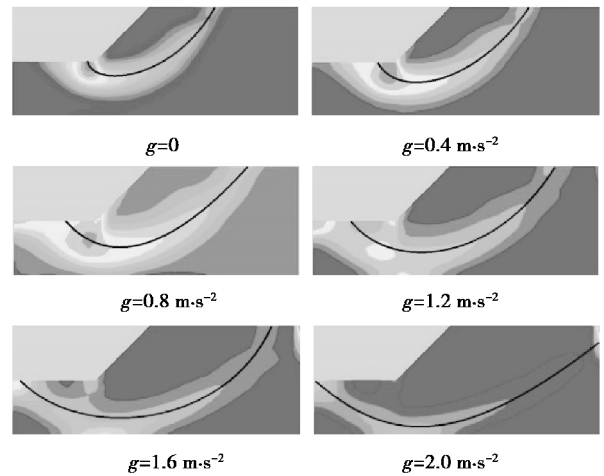


图8 $H=20\text{ m}$ 时的滑动面随峰值加速度的变化

Fig.8 Changes of slip planes with different peak seismic accelerations when H equals 20 m

(2)对比图7和图9中两种情况下 $H=0$ 和 $H=10\text{ m}$ 时的边坡滑动面,在 $g=0$ 时几乎没有多大变化,而在 $g=0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时由近坡面移动到浸润面以下,在坡脚附近仅仅出现部分剪应力增加的情况。表明含水边坡在地震波作用下,滑动面发生较大变化,由近坡面移动到浸润面附近。

图6中浸润面高度 H 由0增加到40 m的过程中,地震波峰值加速度 $g=0$ 时的边坡安全系数减小了1.25,峰值加速度 $g=0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时的安全系数减小了1.18。在图7和图9中, H 大于10 m后,滑动面变化趋势相同。表明地震峰值加速度从0增加时,随着浸润面的上升,边坡安全系数变化值相近,在 $H>10\text{ m}$ 后,滑动面变化趋势差别不大。

(3)图4中峰值加速度由0增加到 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时,边坡安全系数平均下降了0.81,且随峰值加速度增加呈线性下降。图6中边坡浸润面高度由0

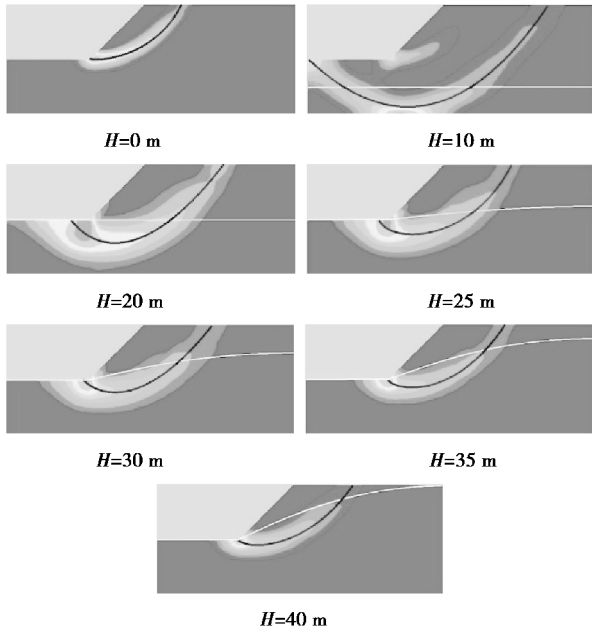


图9 峰值加速度为 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时不同浸润面高度的边坡滑动面的变化

Fig.9 Changes of slip planes with different height of phreatic surfaces when g equals $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

增加到 40 m 时,边坡安全系数平均下降了 1.12,随浸润面的上升其下降速度先增大后减小。图 5 和图 8 中,边坡滑动面随着峰值加速度的增加而往坡内移动,而在图 7 和图 9 中,边坡涉水后,滑动面由近坡面往坡内移动到浸润面附近,随着浸润面的上升,滑动面靠近坡面且最保持在浸润面附近。表明峰值加速度的大小对边坡安全系数和滑动面的影响是线性的,而浸润面位置对安全系数和滑动面的影响是非线性的。综合以上结论可以发现,浸润面位置对边坡稳定性影响更大。

3.4 不同浸润面位置确定方法的对比

边坡浸润面高度 $H=40\text{ m}$ 时的浸润面位置有两种,一种是根据经验假定浸润面位于坡面,另一种是由式(7)计算得到,浸润面位于坡内。对比图 10 中两种浸润面形状下的边坡安全系数,前者的边坡安全系数平均下降了 0.2。对比图 11 中两种浸润面形状下的边坡滑动面,浸润面位于坡面时的滑动面在坡面附近,且随着地震波峰值加速度的增加而靠近坡面。浸润面位于坡内时边坡滑动面范围明显要大,且随着峰值加速度的增加而往坡内移动并最终贯穿整个边坡。

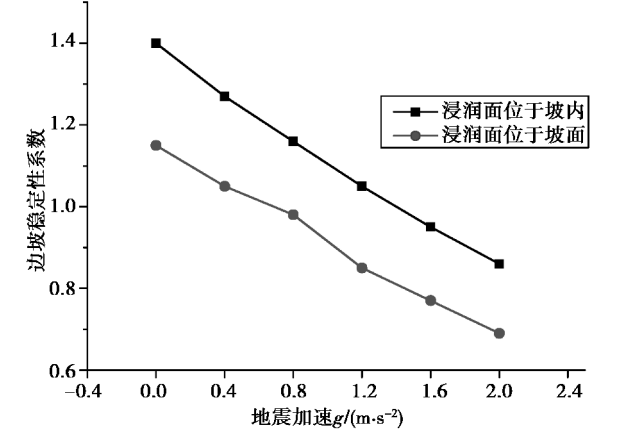


图 10 边坡全部含水时不同峰值加速度下的稳定系数

Fig.10 Slope stability when it is full with water with different peak seismic accelerations

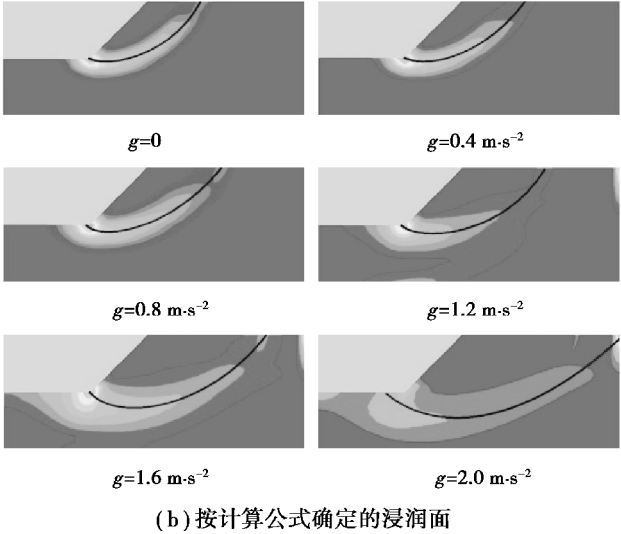
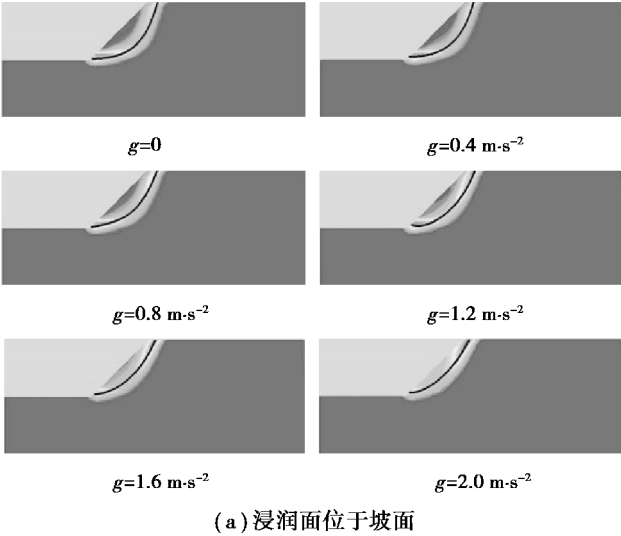


图 11 边坡全部含水时边坡滑动面不同峰值加速度下的变化

Fig.11 Changes of slip planes in different peak ground accelerations when the slope is full with water

4 结论

(1)随着地震波峰值加速度变大,边坡安全系数下降,且两者之间呈线性关系。在单一地震因素作用时,边坡滑动面随峰值加速度变化不大,但在含水的情况下,滑动面随峰值加速度变大而往坡内大幅移动,边坡破坏模式由浅层破坏转变为深层破坏,同时,地震诱发滑坡灾害也越严重^[3]。

(2)边坡浸润面从坡脚上升到坡顶的过程中,其安全系数下降,且两者之间呈线性关系。边坡涉水,边坡滑动面往坡内移动,由近坡面移动到浸润面附近。随着浸润面的上升,滑动面范围减小并保持在浸润面附近且往坡面移动。

(3)峰值加速度的大小对边坡安全系数和滑动面的影响是线性的,而浸润面高度对安全系数和滑动面的影响是非线性的。相比地震波峰值加速度的大小对边坡稳定性影响而言,边坡浸润面的位置对边坡稳定性影响更大。

(4)边坡全部含水时,在按照经验假定和由公式计算确定的不同浸润面位置下,边坡安全系数的大小不同,滑动面位置也有很大差别,且随着地震波峰值加速度增加其移动趋势也不一样,而浸润面位置对边坡稳定性的影响较大。因此,合理地确定浸润面位置具有重要意义。

参考文献(References)

[1] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学,2011,32(5): 1437-1450. (Yang Tianhong, Zhang Fengchun, Yu Qinglei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(5): 1437-1450.(in Chinese))

[2] 韩爱民,李建国,傅国利,等.基于有限差分强度折减法的多级边坡破坏模式研究[J].工程地质学报,2007,15(6): 784-788. (Han Aimin, Li Jianguo, Fu Guoli, et al. Numerical analysis of failure modes in slopes with multi-steps using shear strength reduction fdm[J]. Journal of Engineering Geology,2007,15(6):

784-788.(in Chinese))

[3] 王秀英,聂高众,王登伟.汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1): 82-89. (Wang Xiuying, Nie Gaozhong, Wang Dengwei. Research on relationship between landslides and peak ground accelerations induced by Wen Chuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(1): 82-89.(in Chinese))

[4] 唐晓松,郑颖人,林成功.浸润面位置的确定方法对涉水边坡稳定性分析的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增1): 2814-2819. (Tang Xiaosong, Zheng Yingren, Lin Chenggong. Influence of approach on locating phreatic surface hydrous slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(Supp.1): 2814-2819. (in Chinese))

[5] 郑颖人,唐晓松,赵尚毅.有限元强度折减法在涉水岸坡工程中的应用[J]. 水利水运工程学报,2009(4): 1-10. (Zheng Yingren, Tang Xiaosong, Zhao Shangyi. The use of finite element strength reduction method in wading slope engineering[J]. Hydro-science and Enginerig,2009(4): 1-10.(in Chinese))

[6] 凌华,殷宗泽.非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7): 1499-1503. (Ling Hua, Yin Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(7): 1499-1503.(in Chinese))

[7] 凌华,殷宗泽,蔡正银.非饱和土的应力-含水率-应变关系试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(3): 651-655. (Ling Hua, Yin Zongze, Cai Zhengyin. Experimental study on stress-water content-strain relationship of unsaturated soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(3): 651-655.(in Chinese))

[8] 汪益敏,陈页开,韩大建,等.降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(6): 920-924. (Wang Yimin, Chen Yekai, Han Dajian, et al. Case study on influence of rainfall permeation on slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(6): 920-924.(in Chinese))