

坡肩位置及深度对边坡稳定性的影响

叶剑武¹,黄华东²

(1.北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司重庆分公司,重庆 401120;
2.重庆市市政设计研究院,重庆 400020)

摘要:利用有限元极限平衡法,从坡体形态(坡比、坡高、上部坡体坡比)出发,分析其对裂缝深度、裂缝最易产生位置、坡体安全系数的影响。当坡体上部水平、坡比一定时,随着坡高的增加,坡体的坡肩裂缝深度逐渐增加,坡体安全系数逐渐减小;坡高一定时,坡比越大,坡肩裂缝深度越小,坡体安全系数越小。当坡体上部倾斜、坡高一定时,坡体上部越缓,坡肩裂缝深度越小,坡肩裂缝的最易开裂位置越靠近坡背,坡体安全系数越大;上部坡体坡比一定时,坡体越高,坡肩裂缝深度越大,坡肩裂缝的最易开裂位置距坡缘的距离越远,坡体安全系数越小。

关键词:坡肩裂缝;边坡稳定性;坡体形态

中图分类号:U412 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)04-0045-05

大量黄土地区的工程勘察结果表明,坡肩出现裂缝是黄土滑坡的前奏。坡肩裂缝是边坡内部机制的外在表现,是土体微观变形的宏观积累^[1-3]。坡肩裂缝产生位置和深度的预测为边坡稳定性的判定提供依据,有助于边坡变形监测点的合理布置,从而有效地抑制边坡变形破坏,为滑坡防治工作提供指导,具有一定的工程实用价值^[4-7]。

有限元极限平衡法综合了有限元法和极限平衡法两者的优点,同时克服了两种单一方法各自的局限性。杨辉等^[8]在有限元分析应力的基础上将稳定性分析问题转化为带有约束的数学规划问题,赵杰^[9]将有限元极限平衡法应用于边坡开挖和填筑的稳定性分析。

本文利用有限元极限平衡法,从坡体形态(坡比、坡高、上部坡体坡比)出发,分析其对裂缝深度、裂缝最易产生位置、坡体安全系数的影响。

1 模型的建立

1.1 工程概况

某高速道路宽 24.5 m,双向四车道,公路 RK1 058+600 右侧路堑边坡高约 60 m。该坡体地质情况复杂,属于典型的多级复杂性土坡。图

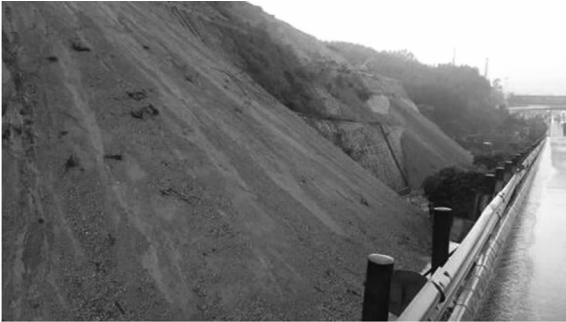


图 1 滑坡全貌图
Fig.1 Overall view of slope

1 为该滑坡全貌图。

1.2 地质概况

1.2.1 气象及水文

工作区气候湿润温和,雨量丰富。春早、夏热,秋、冬连续绵雨,日照少,湿度大,为勘察区气候的基本特征。场地处于斜坡地带,滑坡区内未发现泉水(井)点,无地表水体。

1.2.2 地形地貌

滑坡区位于一条近于东西向的山沟北坡较厚的崩塌堆积体上,地貌为一斜坡地形,总体北西侧高、南东侧低,斜坡自然坡度角为 30°~40°,坡向为 142°。场地地貌为剥蚀中山地貌形态。

1.2.3 地层结构

地表工程地质测绘及钻探结果表明,该坡体主要为黄土型边坡,结构单一。因此分析过程中不考虑地下水情况。

1.3 模型建立

由于其自身岩土体的性质,湿陷型黄土边坡易发生胀缩作用。边坡的破坏受到多种因素的影响,本文主要从坡比、坡高、坡顶坡比对坡肩裂缝的影响,对边坡稳定性进行分析。边坡滑动面示意图如图 2 所示,图中 b 为坡肩裂缝最易开裂位置, d 为裂缝深度, m 。表 1 为坡体岩土体物理力学参数。

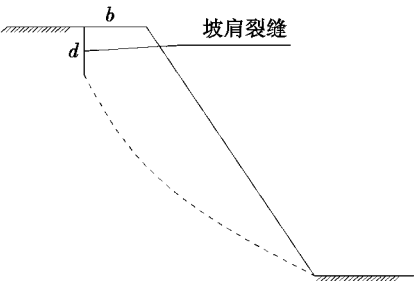


图 2 滑动面示意图
Fig. 2 Sketch map of slide surface

表 1 坡体岩土体物理力学参数

Table 1 Physic and mechanics parameters of slope					
岩性	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	弹性模 量/MPa	泊松比
黄土	18.5	15	28	45	0.3

2 有限元极限平衡法

有限元极限平衡法是有限元法和极限平衡法的结合,有限元极限平衡法首先通过有限元计算输出模型区域内应力场分布,再采用插值方法得到假定滑动面上的应力值,然后用有限元网格和滑面的交点对圆弧分段,并计算这些线段的下滑力和抗滑力,而不需要对条间作用力作任何假定,岩土体不但满足平衡条件,而且还满足变形协调条件。

有限元极限平衡法分析过程如下:

(1)通过弹塑性有限元分析,对于每个单元高斯积分点 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$,计算单元节点应力

$$f = N^{-1} \{ F \}$$
 (1)

(2)利用差值函数求出单元中任意一点的应力状态 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$,计算式为

$$y = N \{ Y \}$$
 (2)

(3)用有限元网格和滑面的交点对圆弧进行分段,划分土条。

(4)找到包含土条 1 底部中点 (x, y) 坐标的单元,计算土条中心点的应力状态,计算式为

$$\{ \sigma \} = N \{ \sigma_n \}$$
 (3)

式中, σ_n 为滑面上所在单元节点的应力状态。

(5)用摩尔圆计算土条底部的正应力和剪应力,计算式为

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha$$
 (4)

$$\tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha$$
 (5)

(6)滑动面安全系数 F_s 定义为沿滑动面土体抗剪强度与实际剪应力的比值

$$F_s = \frac{\int (\sigma \tan \varphi + c) dl}{\int \tau dl}$$
 (6)

该安全系数反映了岩土体的强度储备。

重复上述处理过程,直到第 n 个土条。

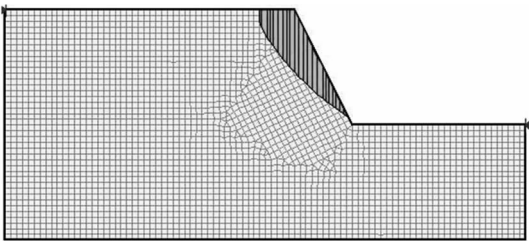
有限元极限平衡法将应力应变关系引入平衡方程,反映了岩土体内的应力应变分布,同时将岩土体当成变形体,从而搜索出的滑动面形状更接近真实状态。

3 坡体形态对边坡稳定性的影响

采用有限元极限平衡法,对不同形态的黄土边坡进行稳定性分析。

3.1 坡比对坡肩裂缝的影响

选取 1:0.5、1:1、1:1.5、1:2 4 种不同坡比的黄土边坡,坡高为 50 m,分别采用有限元极限平衡法对坡体裂缝及稳定性进行分析。图 3 为不同坡比下的坡体极限平衡法分析结果,表 2、表 3 分别为不同坡比下坡肩裂缝深度、坡体安全系数的计算结果。



a 坡比 1:0.5

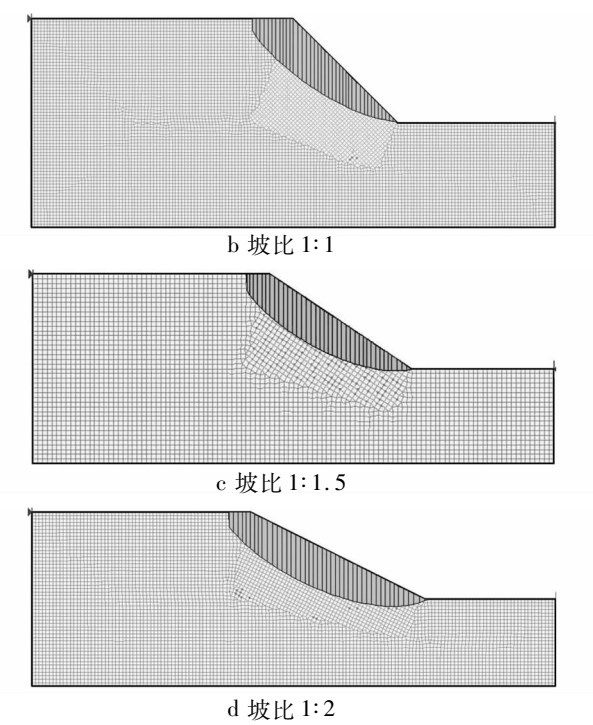


图3 不同坡比下的坡体极限平衡法分析
Fig.3 Limit equilibrium method of slope under different slope ratio

表2 不同坡比下坡肩裂缝深度 Table 2 Crack depth of slope shoulder under different slope ratio	
坡比	坡肩裂缝深度 d/m
1:0.5	3.1
1:1	5.1
1:1.5	5.4
1:2	5.5

表3 不同坡比下坡体安全系数 Table 3 Safety factor of slope under different slope ratio	
坡比	坡体安全系数
1:0.5	0.65
1:1	1.02
1:1.5	1.11
1:2	1.35

由表2、表3可知:在不同的坡比情况下,坡肩裂缝深度和坡体安全系数相差很大,坡面越陡,坡肩裂缝深度越小,坡体越不稳定。

3.2 坡高对坡肩裂缝的影响

选取10 m、20 m、30 m、40 m、50 m 5种不同坡高的黄土边坡,坡比分别为1:0.5、1:1、1:1.5、1:2,分别采用有限元极限平衡法对坡体裂缝及稳定性进行分析。图4、图5分别为不同坡高情况下坡肩裂缝、坡体安全系数计算结果的示意图。

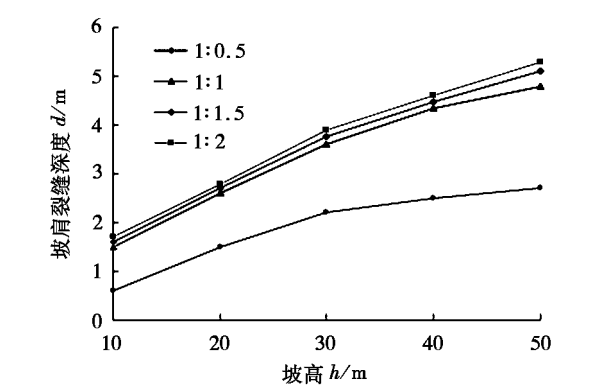


图4 不同坡高情况下坡肩裂缝计算结果
Fig.4 Computing results of slope shoulder crack under different slope height

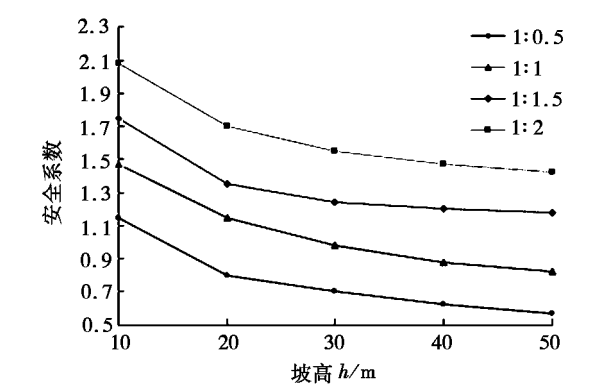


图5 不同坡高情况下坡体安全系数计算结果
Fig.5 Computing results of slope safety factor under different slope height

从图4可知,随着坡高的增加,不同坡比情况下坡体的坡肩裂缝深度均逐渐增加,坡比为1:0.5时,其坡肩裂缝深度要远远小于其余3种坡比情况下的坡肩裂缝深度,坡比为1:1、1:1.5、1:2时,随着坡高的增加,3种坡比情况下坡肩裂缝深度相差不大,但坡比越大,坡肩裂缝深度越小。

从图5可以看出,坡比一定时,随着坡高的增加,坡体安全系数逐渐减小,同一坡高情况下的坡体,坡比越大,坡体安全系数越小。

3.3 坡顶坡比对坡肩裂缝的影响

在实际工程中,边坡的坡顶面往往不是水平的,坡顶的坡比不同,坡体的稳定性也有很大差异。图6为坡顶倾斜时滑动面位置示意图,图7为坡顶坡比不同时有限元极限平衡法分析示意图。

从图6可以看出,边坡上部坡体越陡,坡比越大,滑移体的体积逐渐减小,当滑移体的体积较大时,坡体的破坏为深层破坏,随着滑移体的体积减小,坡体的破坏变为浅层破坏。

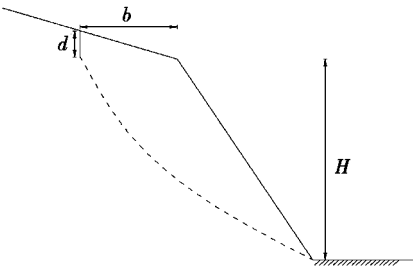
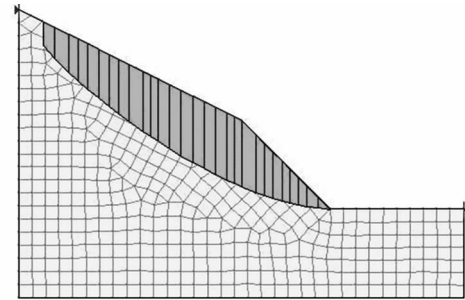
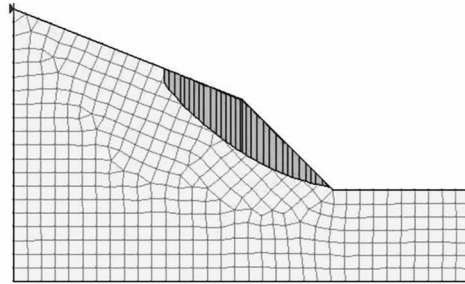


图 6 坡顶倾斜时滑移面示意图

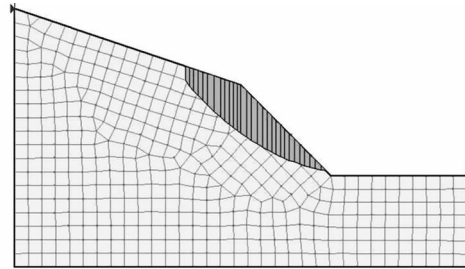
Fig.6 Sketch map of slide surface when the slope top is tilted



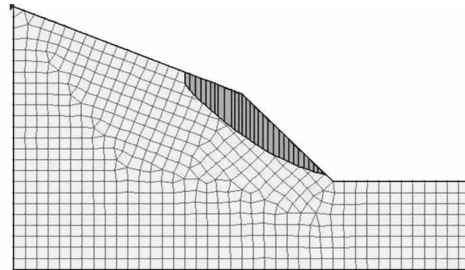
a 坡比 1:2



b 坡比 1:2.5



c 坡比 1:3



d 坡比 1:5

图 7 坡顶坡比不同时的坡体极限平衡法分析示意图

Fig.7 Analysis sketch of slope limit equilibrium method when the slope ratio of slope top is different

坡顶坡比不同时,选取不同坡高的坡体进行有限元极限平衡法分析。设定坡高 H 分别为 10 m、20 m、30 m,坡顶坡分别为 1:1、1:1.5、1:2、1:2.5、1:3、1:5,对 18 种模型的边坡进行稳定性分析。图 8~图 10 分别为上部坡体坡比不同时坡肩裂缝深度、坡肩裂缝位置、坡体安全系数的计算结果。

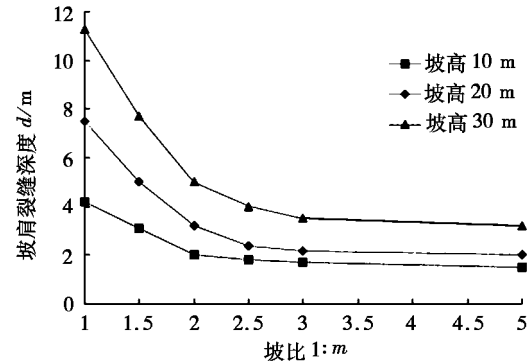


图 8 上部坡体坡比不同时坡肩裂缝深度计算结果

Fig.8 Computing results of slope shoulder crack depth when the slope ratio of upper slope is different

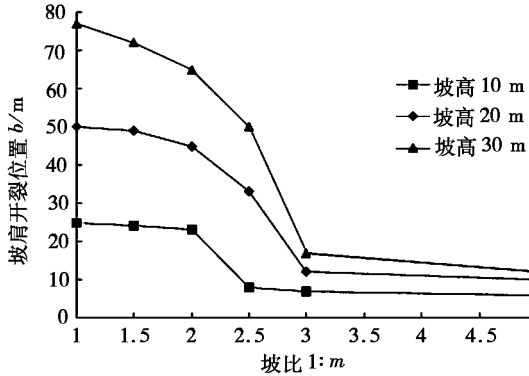


图 9 上部坡体坡比不同时坡肩裂缝位置计算结果

Fig.9 Computing results of slope shoulder crack location when the slope ratio of upper slope is different

从图 8 可以看出,坡高一定时,坡体上部越缓,坡肩裂缝深度越小;坡体上部坡比一定时,坡体越高,坡肩裂缝深度越大。从图 9 可以看出,坡高一定时,坡体上部越缓,最易开裂位置 b 越小,坡肩裂缝的最易开裂位置越靠近坡背;坡体上部坡比一定时,坡体越高,最易开裂位置 b 越大,坡肩开裂位置距坡缘的距离越远。从图 10 可以看出,坡高一定时,坡体上部越缓,坡体安全系数越大;坡体上部坡比一定时,坡体越高,坡体安全系数越大。

从图 8~图 10 可以看出,当上部坡体坡比小于 1:3 时,坡比发生改变,坡肩裂缝深度、最易开

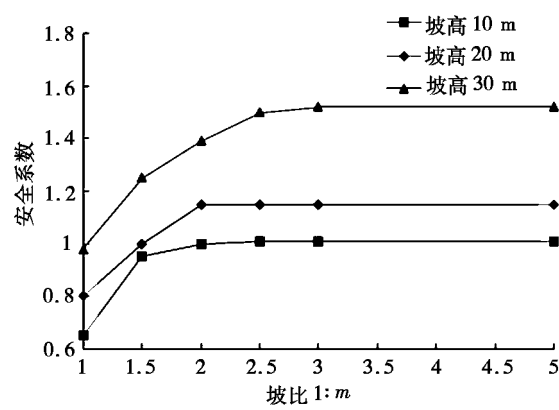


图 10 上部坡体坡比不同时坡体安全系数计算结果
Fig. 10 Computing results of slope safety factor when the slope ratio of upper slope is different

裂位置、坡体安全系数均无明显变化。当上部坡体坡比大于 1:3 时,坡面倾角对坡肩裂缝深度、最易开裂位置、坡体安全系数均产生一定的影响。

参考文献:

[1] 柴波,殷坤龙. 顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):628-634.
[2] 白云峰. 顺层岩质边坡稳定性及工程设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2005.
[3] 王建华,易朋莹,邓继辉,等. 滑坡稳定性可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(4):668-672.
[4] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312.
[5] 姚海林,游慧杰,范永丰,等. 柳家凹黄土滑坡滑动机制研究[J]. 岩土力学,2013,34(1):182-188.
[6] 许领,戴福初,祁国麟,等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. 山地学报,2008,26(3):364-371.
[7] 唐晓松,郑颖人,唐辉明. 边坡变形破坏演化特征的数值分析[J]. 重庆大学学报,2013,36(10):101-113.
[8] 杨辉. 边坡稳定分析的有限元极限平衡法原理及程序实现[D]. 北京:北京交通大学,2014.
[9] 赵杰. 边坡稳定有限元分析方法中若干应用问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.

4 结论

坡肩裂缝深度及位置是黄土边坡工程研究的重要问题,利用有限元极限平衡法,从坡体形态(坡比、坡高、上部坡体坡比)出发,分析其对裂缝深度、裂缝最易产生位置、坡体安全系数的影响。

(1)坡比一定时,随着坡高的增加,坡体的坡肩裂缝深度均逐渐增加,坡体安全系数逐渐减小;坡高一定时,坡比越大,坡肩裂缝深度越小,坡体安全系数越小。

(2)坡高一定时,坡体上部越缓,坡肩裂缝深度越小,坡肩裂缝的最易开裂位置越靠近坡背,坡体安全系数越大。

(3)上部坡体坡比一定时,坡体越高,坡肩裂缝深度越大,坡肩裂缝的最易开裂位置距坡缘的距离越远,坡体安全系数越小。

Influence of Slope Shoulder Position and Depth on Slope Stability

YE Jianwu¹, HUANG Huadong²

(1. The Third Chongqing Branch of Beijing Construction Engineering Quality Third Test Institute co., LTD, in Beijing, Chongqing 401120, China;
2. Chongqing Municipal Research Institute of Design and Research Institute, Chongqing 400020, China)

Abstract:Based on the finite element limit equilibrium method, the influences of slope morphology (slope ratio, slope height, slope ratio of upper slope) on crack depth, the most prone location of the crack and the safety factor of the slope are analyzed. When the upper part of the slope is horizontal and the slope ratio is constant, with the increase of the slope height, the slope shoulder crack depth of the slope gradually increases, and the safety factor of the slope gradually decreases. When the upper part of the slope is inclined and the height of the slope is constant, the slower the upper part of the slope is, the smaller the crack depth of the shoulder is. The closer the crack location of slope shoulder is to the slope back, the greater the safety factor of slope body will be. When the upper slope ratio of the slope is constant, the higher the slope, the greater the crack depth of the shoulder. The farther the crack location of shoulder is from the slope edge, the smaller the safety factor of slope is.

Keywords:slope shoulder crack; slope stability; slope shape

(责任编辑:张英健)