

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2493-07

基于不同水压分布的平面滑动边坡稳定性研究

吴恒滨^{1,2}, 何泽平¹, 曹卫文³

(1.重庆三峡学院 建筑工程系, 重庆 404000; 2.重庆市城口县国土资源和房屋管理局, 重庆 405900;
3.湖南省地质环境监测总站, 长沙 410007)

摘 要: 为研究地下水对平面滑动边坡的影响, 归纳了平面滑动边坡常见的 3 种水压分布形式, 并阐述了其分布假设的合理性。根据极限平衡理论, 采用 Matlab 编制程序, 通过有无张裂缝两个算例, 定性与定量分析相结合, 就不同滑动面水深、滑动面倾角、坡高、坡顶倾角、裂缝水平夹角等影响因子进行敏感性分析, 重点探讨了在不同水压分布时影响因子对边坡安全系数影响的动态演绎规律。研究表明, 平面滑动边坡临界倾角可通过极限平衡理论编制程序计算, 并考虑地下水得出临界倾角变化趋势, 取经验值 10% 为浮动范围; 边坡影响因子对安全系数的影响随着地下水位的升高而变大, 其中坡高对安全系数影响显著, 坡顶倾角、张裂缝水平夹角和坡顶距张裂缝距离等对安全系数影响不明显。

关 键 词: 平面滑动; 水压分布; 边坡稳定性; 临界倾角; 敏感性分析

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Stability study of slope with planar failure based on different water pressure distributions

WU Heng-bin^{1,2}, HE Ze-ping¹, CAO Wei-wen³

(1. Department of Architectural Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China;
2. Chengkou County Administration of State Land, Resources and Housing of Chongqing City, Chongqing 405900, China;
3. General Geological Environmental Monitoring Station of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to study the impact of groundwater on slope with planar failure surface, three common forms of water pressure distribution are generalized; and the rationality of assumption for water pressure is described. According to the limit equilibrium theory, using Matlab to program, and through two examples with or without tension fissures, combined the methods of quantitative and qualitative analysis, sensitivities of the factors such as water depth, failure surface angle in sliding surface, slope height, slope crest angle, horizontal angle of tension fissure are analyzed. Dynamic law of influence of the factors on slope safety factor is discussed under different water pressure distributions. The results show that the critical angle of planar sliding slope could be calculated by program according to limit equilibrium theory; and the variation of critical angle is obtained considering groundwater; 10% of empirical value is the floating range. Influence of factors on slope safety factor is enhanced as the rising of groundwater table. The influence of slope height is significant; but the influences of slope crest angle, horizontal angle of tension fissure, and distance from crest to tension fissure are not obvious.

Key words: planar sliding; water pressure distribution; slope stability; critical angle; sensitivity analysis

1 引 言

在均质砂性土或没有主控结构面穿过的较陡岩质边坡中, 其滑面多呈平面或近似平面。平面滑动破坏作为边坡常见的破坏形式之一, 国内外已做了很多相关研究^[1-3]。文献[4]就岩质边坡平面滑动

破坏进行了详细地阐述。蒋斌松等^[5]根据极限平衡理论, 对折线型、台阶型、具有张裂缝、静水压力以及考虑地震力的平面滑动边坡建立临界滑动面倾角和最小安全系数的解析式。赵尚毅等^[6]考虑地下水、施工过程等因素, 对贯通和非贯通的节理岩质边坡进行稳定性分析, 通过算例验证其可行性。王

收稿日期: 2010-02-05

基金项目: 重庆市自然科学基金(No. CSTC, 2010BB1315); 重庆市教委科研项目(No. KJ101113); 重庆三峡学院科学研究项目(重点项目: No. 10ZD-11; 青年项目: No. 10QN-21); 重庆市万州区国土资源与房屋管理局科技咨询项目。

第一作者简介: 吴恒滨, 男, 1984 年生, 硕士, 助教, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: hbw8456@163.com

广月等^[7]运用模糊可靠度理论对岩质边坡平面滑动进行研究。有关平面滑动边坡研究成果,也已被广泛运用到实际工程中。

大量工程实践表明,边坡失稳破坏大多和水有关,然而地下水的实际状态是未知的,其分布假设也存在诸多不确定性。Hoek 和 Bray^[1]提出了最大水压在张裂缝底部的分布假设,至今被许多人沿用。文献[8]对水压分布进行改进(即最大水压出现在水深中点处),并就其合理性做了详细分析。因此,针对不同水压分布的平面滑动边坡进行稳定性影响因子敏感性研究,对指导该类型边坡设计施工有着重要的理论意义。

2 平面滑动边坡

根据极限平衡理论,平面滑动边坡安全系数可写为

$$F = \frac{cA + (W \cos \alpha - aW \sin \alpha - U - V \sin \alpha) \tan \varphi}{W \sin \alpha + aW \cos \alpha + V \cos \alpha} \quad (1)$$

式中: c 为岩体凝聚力; A 为边坡滑面面积; a 为地震水平加速度; W 为滑坡自重; α 为边坡临界滑面倾角; φ 为内摩擦角; U 、 V 分别为滑动面和张裂缝处的静水压力。

有关平面滑动边坡的计算文献[1, 5, 9]已有详述,这里将边坡几何特性推广为一般状态,即无张裂缝和有张裂缝。

2.1 无张裂缝边坡

在不考虑地下水和地震作用时

$$F = \frac{cA + W \cos \alpha \tan \varphi}{W \sin \alpha} = \tan \varphi \cot \alpha + \frac{2c}{\gamma H [\sin^2 \alpha (\cot \alpha - \cot \beta)]} \quad (2)$$

式中: γ 为滑坡体重度; H 为坡高; β 为边坡倾角。

图1为无张裂缝边坡的几何特性,由图中几何关系可得

$$\left. \begin{aligned} B_x &= H \cot \beta, B_y = H \\ L &= \frac{H(1 - \cot \beta \tan \psi)}{\sin \alpha - \cos \alpha \tan \psi} = A \\ C_x &= L \cos \alpha, C_y = L \sin \alpha \\ W &= \frac{1}{2} \gamma (B_y C_x - C_y B_x) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ψ 为边坡坡顶倾角。

令 $\partial F / \partial \alpha = 0$, 可求得临界破坏面倾角

$$\cot \alpha = \cot \beta + \csc \beta \sqrt{b/(b+f)} \quad (4)$$

式中: $b = 2c/\gamma H$; $f = \tan \varphi$ 。

将式(4)代入式(3)可求得最小安全系数为

$$F_{\min} = (b+f) \cot \beta + 2 \csc \beta \sqrt{b(b+f)} \quad (5)$$

式(5)和文献[5]中没有考虑坡顶倾角情况一致,即在不考虑地下水、地震等外部因素时,边坡坡顶倾角 ψ 对边坡安全系数并不产生任何影响。

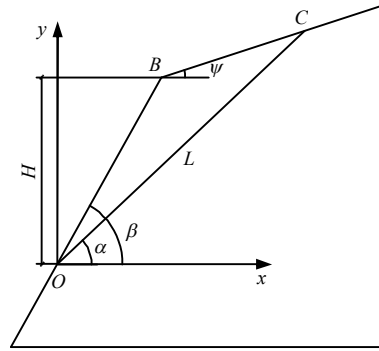


图1 无张裂缝边坡几何特性

Fig.1 Geometric properties of slope without tension fissure

2.2 有张裂缝边坡

图2为有张裂缝边坡的几何特性,根据图中几何关系有

$$\left. \begin{aligned} B_x &= H \cot \beta, B_y = H \\ C_x &= B_x + T, C_y = B_y + T \tan \psi \\ Q &= \frac{C_y \cot \alpha - C_x}{\sin \theta \cot \alpha - \cos \theta} \\ D_x &= C_x - Q \cos \theta, D_y = C_y - Q \sin \theta \\ D_x &= L \cos \alpha, D_y = L \sin \alpha \\ L &= \frac{C_x - Q \cos \theta}{\cos \alpha} = \frac{C_y - Q \sin \theta}{\sin \alpha} = A \\ W &= 0.5 \gamma [(D_x C_y - C_x D_y) + (C_x B_y - B_x C_y)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

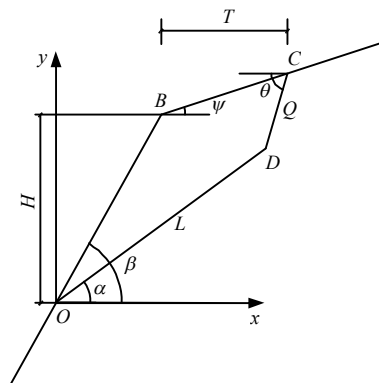


图2 有张裂缝边坡几何特性

Fig.2 Geometric properties of slope with tension fissure

将式(6)代入式(2), 令 $\partial F / \partial \alpha = 0$, 可求得临界破坏面倾角, 然后代回式(2)即为最小安全系数。笔者采用 Matlab 编制程序实现, 鉴于计算结果较为烦琐, 这里不予列出。

3 不同水压分布形式

现实中的水压分布较假设要复杂得多, 根据边坡实际情况做出合理假设就显得非常重要。根据现有学者研究成果, 归纳了平面滑动边坡常用的3种水压分布形式: ①最大水压在地下水位中点, 文中记为 mid; ②最大水压在边坡底部, 记为 bot; ③最大水压在张裂缝底部, 记为 bott。Hoek^[1]认为, 实际工程中水的分布是未知的, 并进一步把水压分布看作第3种情况, 即最大水压出现在张裂缝底部。舒继森等^[8]参考 TAGSoft 公司软件对水压分布进行改进(即第1种情况, 即最大水压出现在地下水位中点), 并就其合理性做了详细分析。在暴雨时且边坡滑动面开度较大, 可以认为第1种假设是合理的, 若开度较小或没有开度, 则流入张裂缝的水远远大于排出的水, 从而导致张裂缝底部静水压力骤增, 即为第3种水压分布情况, 若在冻土或季节性冻土地区冬季结冰或其他因素导致的滑动面底部不透水, 则第2种情况也是真实存在的。

一般来说, 这样计算得出的结果是偏于保守的, 但岩土工程师主要的任务并非进行精确地计算, 而是准确地判断。因此, 针对不同水压分布的平面滑动边坡进行稳定性影响因子敏感性研究, 进而指导该类型边坡设计施工有着重要的工程实践价值。

3.1 最大水压出现在地下水位中点

(1) 无张裂缝边坡的最大水压出现在地下水位中点时, 水压分布形式见图 3(a)。此时, $U = \frac{\gamma_w z_w^2}{4 \sin \alpha}$, $V = 0$ 。其中, z_w 为地下水高度, γ_w 为水的重度。

(2) 有张裂缝边坡

当 $z_w \leq z_f$ 时, z_f 为张裂缝底部的高度, 即为 D_y , 水压分布形式见图 3(b), 此时, $U = \frac{\gamma_w z_w^2}{4 \sin \alpha}$, $V = 0$ 。

当 $z_w > z_f > z_w / 2$ 时, 水压分布形式见图 3(c),

此时, $U = \frac{\gamma_w z_w^2}{8 \sin \alpha} + \frac{1}{2} \gamma_w \left(\frac{3}{2} z_w - z_f \right) \left(L - \frac{z_w}{2 \sin \alpha} \right)$,

$V = \frac{\gamma_w (z_w - z_f)^2}{2 \sin \theta}$ 。

当 $z_w / 2 > z_f$ 时, 水压分布形式见图 3(d), 此时

$$U = 0.5 \gamma_w z_f L, \quad V = \frac{1}{2} \left(\gamma_w z_f + \frac{1}{2} \gamma_w z_w \right) \frac{(z_w / 2 - z_f)}{\sin \theta} + \frac{\gamma_w z_w^2}{8 \sin \theta}。$$

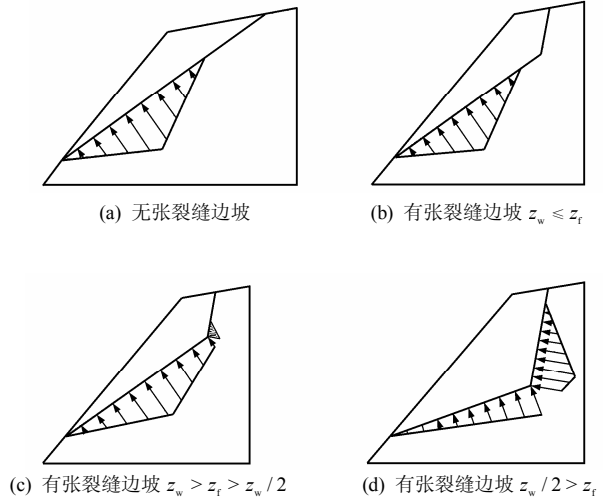


图3 最大水压在水位中点时的水压分布

Fig.3 Water pressure distributions for the largest value in the middle of ground water depth

3.2 最大水压出现在边坡底部

(1) 无张裂缝边坡的最大水压出现在边坡底部时, 水压分布形式见图 4(a)。此时 $U = \frac{\gamma_w z_w^2}{2 \sin \alpha}$, $V = 0$ 。

(2) 有张裂缝边坡

当 $z_w \geq z_f$ 时, 水压分布形式见图 4(b), 此时 $U = 0.5 [\gamma_w (z_w - z_f) + \gamma_w z_w] L$, $V = \frac{0.5 \gamma_w (z_w - z_f)^2}{\sin \theta}$ 。
当 $z_w < z_f$ 时, 水压分布形式见图 4(c), 此时 $U = \frac{\gamma_w z_w^2}{2 \sin \alpha}$, $V = 0$ 。

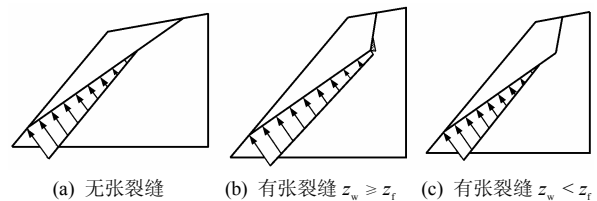


图4 最大水压在边坡底部时的水压分布

Fig.4 Water pressure distributions for the largest value in the bottom of slope

3.3 最大水压出现在张裂缝底部

对于有张裂缝边坡, 当 $z_w \geq z_f$ 时, 水压分布形式见图 5(a), 此时 $U = 0.5 \gamma_w (z_w - z_f) L$, $V = [0.5 \gamma_w \cdot (z_w - z_f)^2] / \sin \theta$ 。

当 $z_w < z_f$ 时, $U = 0$, $V = 0$ 。

当滑动面无水压时, 边坡水压分布形式见图

5(b), 此时 $U = 0$, $V = \frac{\gamma_w(z_w - z_f)^2}{2\sin\theta}$ 。

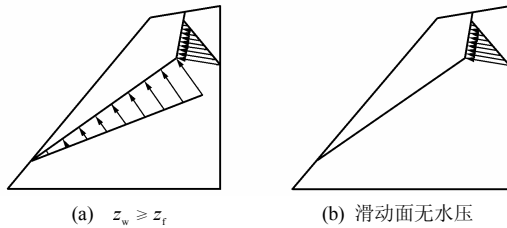


图 5 最大水压在张裂缝底部时的水压分布

Fig.5 Water pressure distributions for the largest value in the bottom of tension fissure

4 算例分析

4.1 算例 1 (无张裂缝边坡)

无张裂缝边坡几何参数见图 6, 材料参数如下: 岩石重度为 25 kN/m^3 , 凝聚力为 200 kPa , 内摩擦角为 40° , 水的重度为 10 kN/m^3 。

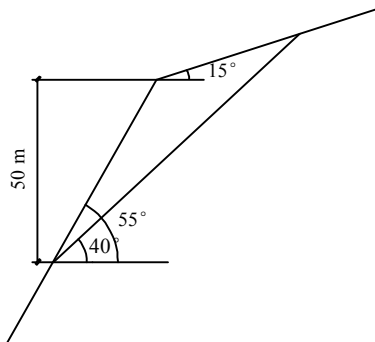


图 6 算例 1 边坡几何特性

Fig.6 Geometric properties of slope for example 1

根据第 3 节所述 3 种水压分布形式及作用力可知, 第 2 种水压分布形式即最大水压在边坡底部的情况是最为保守的。图 7 为不同滑动面水深情况下的边坡稳定性分析结果, 这里将滑动面水深和边坡坡高之比记为 z/H 。则由图 7(a)可知, 第 1 种水压分布形式下随地下水位升高边坡安全系数由 2.58 减小到 1.59; 第 2 种水压分布形式下当 z/H 为 0.72 时, 由于抗滑力丧失导致边坡安全系数减小为 0。可见, 若地下水不能正常通过滑体底部流出, 边坡稳定性可能会超出计算结果的预期, 该点在季节性冻土地区更为值得关注。

文献[1]认为, 在没有主控结构面穿过坡体时,

对坡角小于 45° 的软岩边坡或土坡, 破坏面将呈圆弧状。较陡的边坡破坏多呈平面, 临界倾角 $\varphi_f = (\varphi + \varphi_0)/2$, 其中 φ_0 边坡坡面倾角。蒋斌松等^[5]根据极限平衡理论, 建立临界滑动面倾角和最小安全系数的解析式, 求出了平面滑动边坡临界倾角。舒继森等^[9]认为: 在没有确定滑面时, 现有平面滑动边坡临界倾角公式是错误的, 由式 (1) 推导出滑面的隐式解析, 结果表明, 滑面临界倾角不仅是边坡倾角和破坏面摩擦角的函数, 还与滑体高度、破坏面凝聚力和岩体重度等参数有关。

为解决临界倾角的不确定性, 针对算例 1 验证其合理性。如图 7(b)所示, 不考虑地下水时, 该边坡平面滑动的临界倾角为 36.8° ; 当 $z/H = 0.3$ 时, 两种水压形式都没有产生影响; 当 $z/H = 0.7$ 时, 第 1 种水压形式的临界倾角变为 37.4° , 第 2 种水压形式的临界倾角为 38.6° 。该结论与文献[5, 9]是一致的, 可以这样认为, Hoek 提出的公式更多地用来经验判断, 而平面滑动边坡临界倾角可在不考虑地下水的条件下采用式 (4) 取值, 当地下水位较低时对其没有影响, 地下水位较高时临界坡角稍有增大, 鉴于增大量不宜确定, 可取经验值 10% 为浮动范围。

从图 7(c)中可以看出, 坡高对边坡安全系数影响显著。第 2 种水压分布形式下坡高对安全系数影响较第 1 种稍大, 且随着地下水位升高影响也变大, 增量不显著。其中, 在不考虑静水压力作用时, 坡高由 10 m 增大到 100 m 时, 边坡安全系数降低为原来的 20%; 当 $z/H = 0.3$ 时分别为 19%、18.5%; 当 $z/H = 0.7$ 时分别为 15.5%、10.1%。

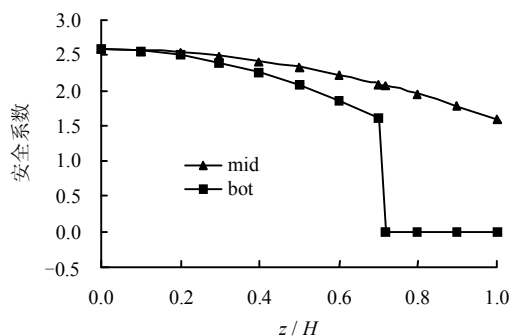
由第 2 节分析中可知, 在不考虑水压时, 边坡坡顶倾角理论上对边坡安全系数没有影响, 图 7(d)显示, 在地下水位较低时, 边坡坡顶倾角对边坡安全系数的影响也很小; 当 $z/H = 0.7$ 时, 就已经比较显著, 第 1 种水压分布边坡安全系数降低了 17%, 第 2 种水压分布在倾角为 17° 时, 由于抗滑力丧失导致边坡安全系数减小为 0。换言之, 坡顶倾角对边坡安全系数的影响随着地下水位升高而变大。

4.2 算例 2 (有张裂缝边坡)

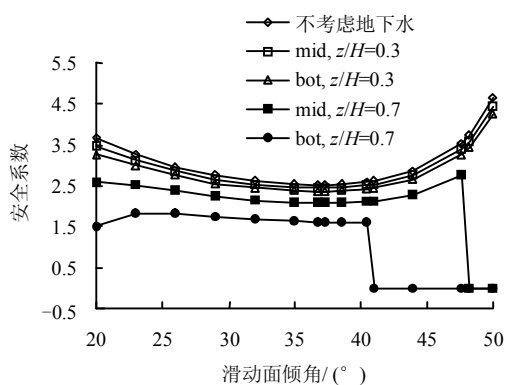
有张裂缝边坡几何参数见图 8, 材料参数如下: 岩石重度为 25 kN/m^3 , 凝聚力为 200 kPa , 内摩擦角为 40° , 水的重度为 10 kN/m^3 。

图 9(a)中 bott1 为滑动面上有水压, bott2 为只在张裂缝中存在水压, 二者都是水位达到张裂缝处才能产生静水压力。坡顶有张裂缝时地下水位对边坡安全系数的影响规律和无张裂缝是一致的, 其中

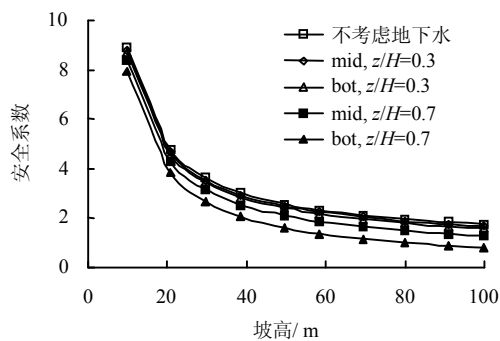
对安全系数的影响程度从大到小分别为 bot、mid、bott1、bott2。



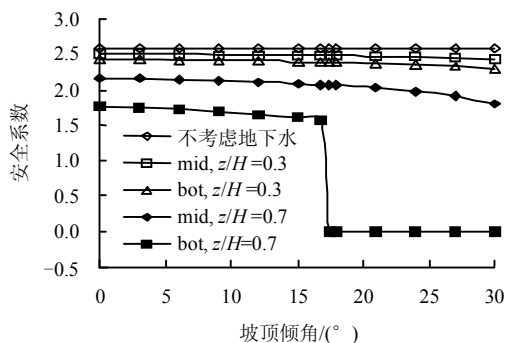
(a) 滑动面水深不同



(b) 滑动面倾角不同



(c) 坡高不同



(d) 坡顶倾角不同

图 7 无张裂缝边坡安全系数

Fig.7 Safety factors of slope without tension fissure

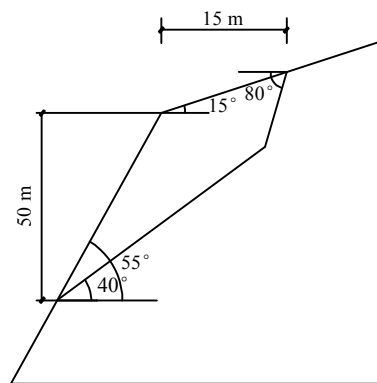


图 8 算例 2 边坡几何特性

Fig.8 Geometric properties of slope for example 2

为进一步验证算例 1 中提到的平面滑动边坡临界倾角问题, 图 9(b)显示, 在不考虑地下水时, 该边坡临界倾角为 36.5° ; 当 $z/H = 0.5$ 时, 第 1 种和第 3 种水压分布没有产生影响, 第 2 种水压分布的临界倾角降低为 36° ; 当 $z/H = 0.8$ 时, 第 1 种和第 3 种水压分布的临界倾角分别为: 35° 、 35.5° , 第 2 种水压分布由于抗滑力丧失导致边坡安全系数减小为 0。

其中, 算例 1 中地下水的存在将使临界倾角略有增大, 而算例 2 中张裂缝中的水使临界倾角减小, 但变化量很小。即通过第 2 节所述理论编制程序计算边坡平面滑动临界倾角, 并考虑地下水得出倾角变化趋势, 鉴于破坏面的不确定性, 考虑地下水的影响只能增加问题的复杂性, 其定量分析不能看作是完全合理的, 可取 10% 经验值为浮动范围。

图 9(c)~9(f)分别为在考虑不同水压分布情况下坡高、坡顶倾角、张裂缝水平夹角和坡顶距张裂缝距离对边坡安全系数的影响规律。从图中可知, 影响因子对边坡安全系数的影响随着地下水位的升高而变大, 其中坡高对安全系数影响显著, 坡顶倾角、张裂缝水平夹角和坡顶距张裂缝距离对安全系数影响不明显。

5 结 论

边坡失稳破坏大多与水有关, 然而地下水的实际状态却是未知的, 其分布假设的合理性也存在诸多争议。在现有研究基础上, 根据极限平衡理论, 就不同水压分布时边坡稳定影响因子敏感性进行研究。

(1) 将平面滑动边坡计算理论推广到一般状态, 归纳了平面滑动边坡常见 3 种水压分布形式, 并阐述其分布假设的合理性。

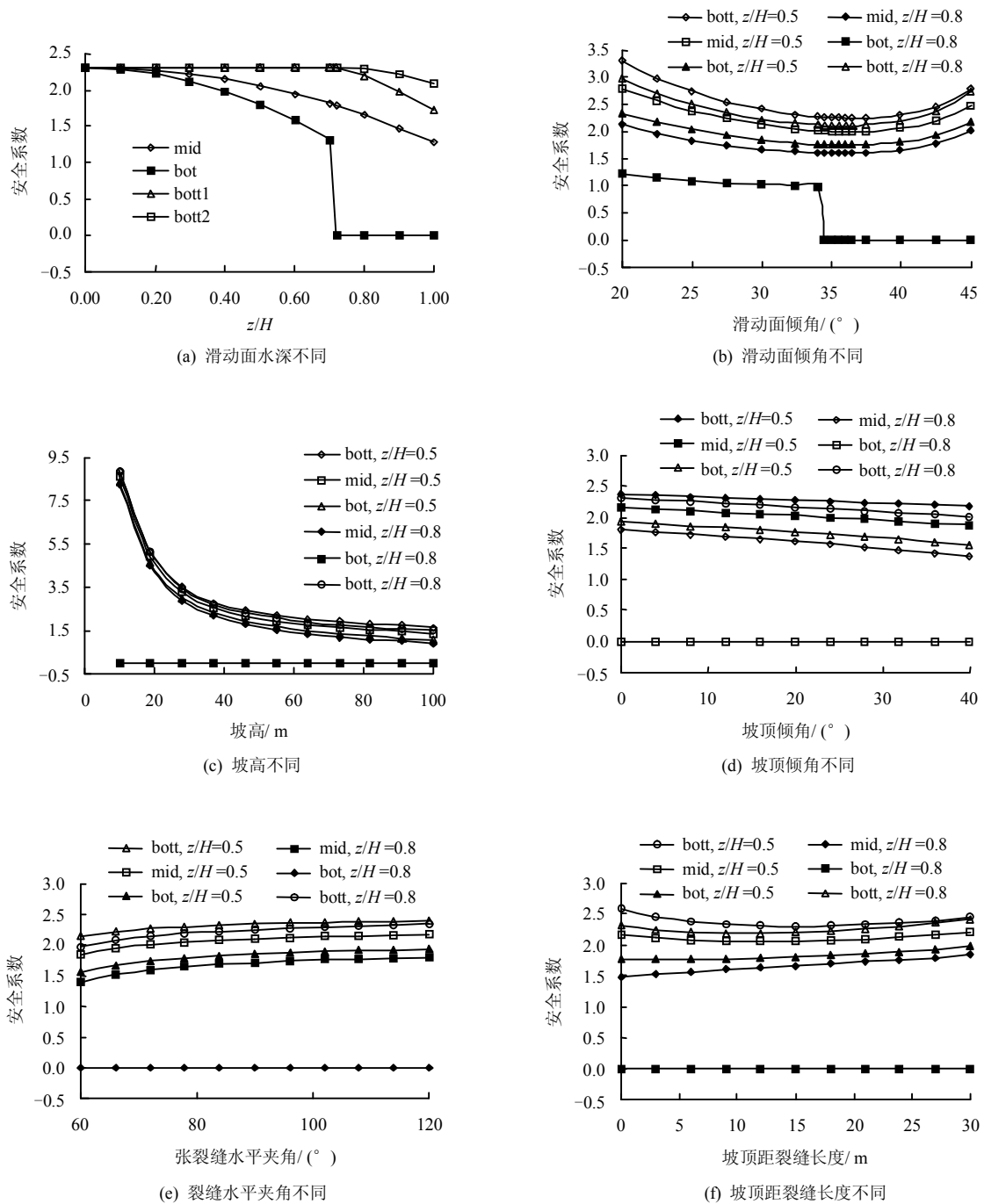


图 9 有张裂缝边坡安全系数

Fig.9 Safety factors of slope with tension fissures

(2) 平面滑动边坡临界倾角的计算可通过极限平衡理论编程序计算得到, 并考虑地下水得出倾角变化趋势, 鉴于破坏面的不确定性, 考虑地下水的影响只能增加问题的复杂性, 其定量分析不能看作是合理的, 取经验值 10% 为浮动范围。

(3) 影响因子对边坡安全系数的影响随着地下水位升高而变大, 其中坡高对安全系数影响显著, 坡顶倾角、张裂缝水平夹角和坡顶距张裂缝距离对安全系数影响不明显。

参考文献

- [1] HOEK E, BRAY J W. Rock slope engineering[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977.
- [2] PRUDENCIO M, VAN SINT JAN M. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 890—902.
- [3] 李强, 齐艳新, 陈宁华. 马钢新区土坡失稳机制及土体

- 力学参数的反演[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(4): 3—6.
- LI Qiang, QI Yan-xin, CHEN Ning-hua. Study of the crack mechanism and back analysis of mechanics parameters of the soil slope in the new area of Magang[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2008, 20(4): 3—6.
- [4] SHARMA S, RAGHUVANSHI T K, ANBALAGAN R. Plane failure analysis of rock slopes[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1995, 13: 105—111.
- [5] 蒋斌松, 蔡美峰, 都浩. 平面滑动边坡稳定性的解析计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 91—94.
- JIANG Bin-song, CAI Mei-feng, DU Hao. Analytical calculation on stability of slope with planar failure surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(1): 91—94.
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254—260.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 254—260.
- [7] 王广月, 刘健, 王有志. 岩质边坡平面滑动的模糊可靠度分析[J]. 岩土力学, 2005, (增刊 1): 283—286.
- WANG Guang-yue, LIU Jian, WANG You-zhi. Analysis of fuzzy reliability for plane sliding of slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (Supp.1): 283—286.
- [8] 舒继森, 王兴中, 周义勇. 岩石边坡中滑动面水压分布假设的改进[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 509—512.
- SHU Ji-sen, WANG Xing-zhong, ZHOU Yi-yong. Improving on assumption for water pressure distributing on failure surface in rock slope[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(5): 509—512.
- [9] 舒继森, 才庆祥, 王成龙, 等. 岩石边坡平面滑动时的临界滑面倾角的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 437—440.
- SHU Ji-sen, CAI Qing-xiang, WANG Cheng-long, et al. Inquire into critical inclination of failure face in rock slope with planar failure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(4): 437—440.
- ZHANG Gui-rong, YIN Kun-long, CHEN Li-xia. Population vulnerability assessment on regional landslide hazards and casualty risk forecasting in Yongjia County, Zhejiang Province[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2007, 26(4): 70—75.
- [9] 石莉莉, 乔建平. 基于GIS和贡献权重迭加方法的区域滑坡灾害易损性评价[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 46—50.
- SHI Li-li, QIAO Jian-ping. Vulnerability evaluation on regional landslides based on GIS and contribution weight superposition approach[J]. **Journal of Catastrophology**, 2009, 24(3): 46—50.
- [10] AGS. A national landslide risk management framework for Australia[J]. **Australian Geomechanics**, 2007, 42(1): 1—12.
- [11] HUNTER G, FELL R. Travel distance angle for “rapid” landslides in constructed and natural soil slopes[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40(6): 1123—1141.
- [12] 胡厚田, 刘涌江, 邢爱国, 等. 高速远程滑坡流体动力学理论的研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003: 81—83.
- [13] 张宇, 韦方强, 贾松伟, 等. 砖砌体建筑在泥石流冲击作用下动态响应试验[J]. 山地学报, 2006, 24(3): 340—345.
- ZHANG Yu, WEI Fang-qiang, JIA Song-wei, et al. Experimental research of unreinforced masonry wall under dynamic impact of debris flow[J]. **Journal of Mountain Science**, 2006, 24(3): 340—345.
- [14] 戴树和. 工程风险分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [15] 尹之潜. 地震灾害及损失预测方法[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [16] 黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

上接第 2492 页