

基于上限理论的孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性分析

张京伍, 张海洋, 李明东, 管仲敏

Upper Bound Analysis on the Stability of Cracked Slopes at Tunnel Entrance Subjected to Pore Water Pressure

ZHANG Jingwu, ZHANG Haiyang, LI Mingdong, and GUAN Zhongmin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑底部隆起的浅埋隧道围岩压力计算分析

Limit Analysis of Surrounding Rock Pressure for Shallow Tunnels Considering Floor Heave

应用数学和力学. 2017, 38(8): 911-921

定荷载和双面排水条件下非饱和土一维固结的解析解

Analytical Solution for 1D Consolidation of Unsaturated Soil Under Constant Load and DoubleSide Drainage

应用数学和力学. 2019, 40(9): 1035-1047

多次爆炸载荷作用下浅埋隧道破坏过程的持续同调特征分析

Analysis on Persistent Homology Characteristics of Failure Processes of Shallow Buried Tunnels Under Multi-Time Explosions

应用数学和力学. 2020, 41(11): 1237-1249

高烈度下双裂缝主控结构面危岩的断裂破坏机制分析

Fracture Mechanism of Unstable Rock With Double-Crack Control Discontinuity Subjected to High Earthquake Intensities

应用数学和力学. 2021, 42(6): 645-655

裂缝性储层射孔井起裂压力影响因素分析

Research on Influential Factors of Initiation Pressure in Fracture Formation for Perforated Boreholes

应用数学和力学. 2018, 39(7): 811-820

扁球壳在热-机械荷载作用下的稳定性分析

Thermomechanical Stability Analysis of Shallow Spherical Shells

应用数学和力学. 2017, 38(10): 1146-1154



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于上限理论的孔隙水压力作用下隧道洞口段 含裂缝仰坡稳定性分析*

张京伍¹, 张海洋¹, 李明东¹, 管仲敏²

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 南昌 330013;
2. 鹏盛建设集团有限公司, 江西 上饶 334600)

摘要: 研究了孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡的稳定性. 采用极限分析上限法, 构建了坡顶含竖向裂缝的对数螺旋转动破坏机制, 推导了可反映边坡临界坡高的稳定系数计算公式, 将计算结果与未考虑孔隙水压力作用下的含裂缝边坡稳定性极限分析结果进行对比, 验证了所提研究方法的合理性. 通过算例分析, 研究了坡顶裂缝最不利位置分布及仰坡整体安全系数. 结果表明: 坡顶裂缝开裂深度、土体内摩擦角、坡角越大及水位分布越浅, 裂缝位置越靠近坡顶边缘处; 孔隙水压力系数、坡顶裂缝开裂深度越大, 仰坡稳定性系数越小; 坡顶裂缝越深、孔隙水压力系数越大、边坡越陡, 越不利于仰坡稳定; 而坡内水位分布越低, 越有利于仰坡稳定.

关键词: 极限分析上限理论; 安全系数; 隧道边坡; 孔隙水压力; 拉裂缝

中图分类号: O39 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.420054

Upper Bound Analysis on the Stability of Cracked Slopes at Tunnel Entrance Subjected to Pore Water Pressure

ZHANG Jingwu¹, ZHANG Haiyang¹, LI Mingdong¹, GUAN Zhongmin²

(1. School of Civil & Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, P.R.China;
2. Pengsheng Construction Group Co., Ltd., Shangrao, Jiangxi 334600, P.R.China)

Abstract: The stability of the cracked slope at tunnel entrance subjected to pore water pressure was studied. The upper-bound limit analysis method and the logarithmic spiral rotation failure mechanism were adopted. A formula for calculating the stability coefficient reflecting the critical slope height was derived. The rationality of the proposed method was verified through comparison of the calculated results with those without effects of the pore water pressure. The distribution of the most critical crack position at the top of slope and the safety factor of the slope were studied by an example analysis. The results show that, the greater the crack depth is, the larger the internal friction angle and the slope angle will be, and the shallower the water level is, the closer the crack position will be to the edge of the slope. The greater the pore water pressure coefficient and the cracking depth are, the smaller the stability coefficient of the slope top will be. The deeper the crack is, the higher the pore water pressure coefficient and the steeper the slope will be, and the more unstable the slope will be. However, the lower the water level is, the more stable the slope will be.

* 收稿日期: 2021-03-01; 修订日期: 2021-05-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51869001)

作者简介: 张京伍 (1985—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师 (通讯作者. E-mail: zhangjingwu2010@126.com).

引用格式: 张京伍, 张海洋, 李明东, 管仲敏. 基于上限理论的孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性分析[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(12): 1287-1295.

Key words: upper bound theorem of limit analysis; safety factor; slope at tunnel entrance; pore-water pressure; tensile crack

引言

山区高速公路施工中往往会形成隧道洞口仰坡, 坡体稳定性问题成为此类区域高速公路建设的重要工程地质问题之一^[1-2]. 大量工程实践表明: 边坡失稳与裂缝密切相关, 土质边坡在失稳前, 一般会在坡顶产生竖向拉裂缝, 裂缝的产生会使边坡的稳定性降低, 并最终导致坡体破坏. 同时, 裂缝的存在为地下水、降雨等渗入边坡内部提供了便利通道, 尤其当裂缝充满水时, 会加大边坡的下滑力, 进而加速坡体失稳破坏过程^[3]. 因此, 为保证坡体稳定性及采取合理的坡体加固措施, 需考虑孔隙水压力作用的隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性.

现有含裂隙边坡稳定性分析方法主要有: 1) 极限平衡法. Terzaghi 和 Peck^[4] 推导了考虑土体单元间受力条件下的坡顶张拉裂缝估计公式. Spencer^[5]、Law 和 Lumb^[6]、Zhu 等^[7] 采用条分法研究了土体张拉条件下的边坡稳定性问题. 2) 变分法. Baker^[8] 首次采用变分极值理论对黏性土坡拉裂缝的影响进行了评价. 此后, Leshchinsky^[9] 将这种变分方法推广到含裂缝边坡安全系数的计算中. 3) 数值法. Antão 等^[10] 尝试对板桩加筋边坡进行有限元上限极限分析, 其中包含了指定位置和深度的裂缝. Liu 和 Zhao^[11] 采用刚体有限元法对坡面含张裂缝的湿性边坡进行数值极限分析. 分析裂隙边坡稳定性的另一有效方法是建立在土体塑性力学理论基础上的极限分析上限法, 利用构建的机动许可速度场中外力做功和内能耗散的关系建立虚功方程, 该方法最大的优势在于, 无论土体的力学特性多么复杂, 都可以得到一个近似实际情况的破坏荷载^[12]. 极限分析上限法最早由 Drucker 和 Prager^[13] 引入到边坡稳定性分析中, 而后该方法被广泛用于各种岩土工程问题的稳定性分析中^[14-18], 可对极限状态下的各种岩土工程问题进行分析. 相对传统的极限平衡法, 极限分析上限法以得到接近真值的最小上限解为目标. Michalowski^[19] 在边坡稳定性分析中首次将孔隙水压力做功功率作为外力功率引入极限分析上限法中. Viratjandr 和 Michalowski^[20] 认为孔隙水压力做功等于水压力作用于土体功和水压力在边界上做功之和. Utili^[21] 采用极限分析上限法, 不考虑裂缝水的渗透作用, 分析了裂缝水压力对边坡稳定性的影响. 邹飞等^[3] 基于极限分析上限法, 分析了水力效应对裂缝边坡稳定性的影响, 重点研究了临界裂缝深度和最不利裂缝位置随地下水位、边坡坡角的变化规律. 刘锋等^[22] 采用极限分析上限法, 考虑稳定渗流场作用, 基于对数螺旋破坏机制, 研究了孔隙水压力系数变化和抗剪强度参数变化对边坡稳定性以及张拉裂缝临界深度的影响. 可以看出: 采用极限分析上限法研究传统的含裂缝边坡稳定性及分析孔隙水压力作用对边坡稳定的影响是适用的.

本文基于前人的研究基础, 针对隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性问题, 重点考虑坡体水位变化对边坡整体稳定性的影响, 采用极限分析上限结合强度折减法, 通过构建对数螺旋转动破坏机制, 建立考虑坡顶拉裂缝分布及孔隙水压力作用的隧道洞口段仰坡稳定性极限状态解析式, 通过对比分析, 验证了所提方法的有效性. 进一步研究了裂缝深度及水位变化、孔隙水压力系数及坡角对边坡稳定数、最不利裂缝位置及边坡安全系数的影响规律.

1 基本理论与假设

本文结合已有隧道洞口段仰坡稳定性分析理论, 建立如图 1 所示隧道洞口段坡顶含裂缝仰坡对数螺旋破坏机制, 潜在滑移面始于坡顶拉裂缝底 (图 1 中 C 点) 穿过隧道开挖面 (图 1 中 D 点), 裂缝以下 CD 段及隧道洞口段土体组成的滑体 (图 1 中 AEB CD 区域) 以 O 为旋转中心、 ω 为角速度做整体转动. 图 1 中 BC 段为坡顶裂缝开裂深度 H_c , BB' 段为坡内水位距坡顶高度 H_w , H 为隧道洞口段转动破坏机制下潜在滑移面分布高度, EF 段为假设无裂缝潜在滑移面后缘处与坡顶边缘处距离 L_1 , BF 段为坡顶裂缝位置处与坡顶边缘处距离 L_2 , AD 段为潜在滑动面穿过隧道顶部处与隧道洞口处距离 L_3 . 参数 β 为仰坡坡角, θ_0 及 θ_n 分别为坡体转动破坏机制下的初始及终止角, θ_c 表示旋转中心 O 与坡顶裂缝底的连线与水平向的夹角, θ_w 表示旋转中心 O 与水位的连线与水平向的夹角, θ_d 表示旋转中心 O 与潜在滑动面穿过隧道顶部位置的连线与水平向的夹角.

结合极限分析上限理论, 为方便求解孔隙水作用下隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性问题, 我们给出以下基本

假设:

- 1) 坡顶含裂缝隧道洞口段仰坡视为各向同性、均质土体;
- 2) 边坡稳定性服从 M-C 破坏准则且作为平面应变问题进行分析, 遵循相关联流动法则;
- 3) 拉裂缝位于坡顶且裂缝沿坡高方向竖向分布;
- 4) 土水整体当作极限分析上限法中的研究对象, 孔隙水压力作为外荷载作用于土水体中, 且仅考虑静水压力对边坡稳定性影响.

由图 1 可得到对数螺旋转动破坏机制下坡体几何关系表示为

$$H_r = H/r_0 = \sin \theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0)\psi] - \sin \theta_0, \quad (1)$$

式中 $\psi = \tan \varphi_m = (\tan \varphi)/F_s$, 参数 F_s 为土体强度折减系数, 根据土体强度折减原理, 当增加土体强度折减系数直至边坡发生破坏时, 此时的强度折减系数值可认为是边坡的安全系数. 同理, $c_m = c/F_s$.

令 $H_1 = \alpha_1 H$, 则

$$H_{1r} = H_1/r_0 = \sin \theta_d \exp[(\theta_d - \theta_0)\psi] - \sin \theta_0, \quad (2)$$

裂缝深度已知时, 裂缝底端几何角度 θ_c 可表示为变量 θ_0, θ_h 的函数:

$$\sin \theta_c \exp(\theta_c \psi) = \sin \theta_0 \exp(\theta_0 \psi) \left(1 - \frac{H_c}{H}\right) + \sin \theta_h \exp(\theta_h \psi) \left(\frac{H_c}{H}\right). \quad (3)$$

与坡顶裂缝位置分布相关的表达式为

$$L_{1r} = \frac{L_1}{r_0} = \frac{\sin(\theta_0 + \beta)}{\sin \beta} - \frac{\sin(\theta_h + \beta)}{\sin \beta} \exp[(\theta_h - \theta_0)\psi], \quad (4)$$

$$L_{2r} = \frac{L_2}{r_0} = \cos \theta_0 - \cos \theta_c \exp[(\theta_c - \theta_0)\psi], \quad (5)$$

式中最不利裂缝位置可通过搜索最危险滑动面获得.

裂缝所处位置与坡顶边缘的距离 (EB 段) 为

$$L = L_1 - L_2. \quad (6)$$

潜在滑动面穿过隧道顶部处与隧道洞口处距离 L_3 可表示为

$$L_{3r} = \frac{L_3}{r_0} = \cos \theta_d \exp[(\theta_d - \theta_0)\psi] - \cos \theta_0 + L_{1r} + H_{1r} \cot \beta. \quad (7)$$

同时, 由图 1 可得到坡内水位几何角度 θ_w 的表达式:

$$\sin \theta_w \exp[(\theta_w - \theta_0)\psi] = \sin \theta_0 + t_w H_{1r}, \quad (8)$$

其中 $t_w = H_w/H_1$.

2 考虑孔隙水压力的极限分析上限法

2.1 外力做功功率

基于 Chen^[12] 提出的极限分析上限理论, 首先建立孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡外力做功功率. 图 1 中滑体 AEB CD 区域土体重力做功功率 W_r , 可由 A'EF 区域土体重力做功功率减去 A'AD 区域土体重力做功功率及 BFC 区域土体重力做功功率:

$$W_r = \gamma r_0^3 \omega (f_1 - f_2 - f_3 - f_4 - f_5 + f_6 + f_7), \quad (9)$$

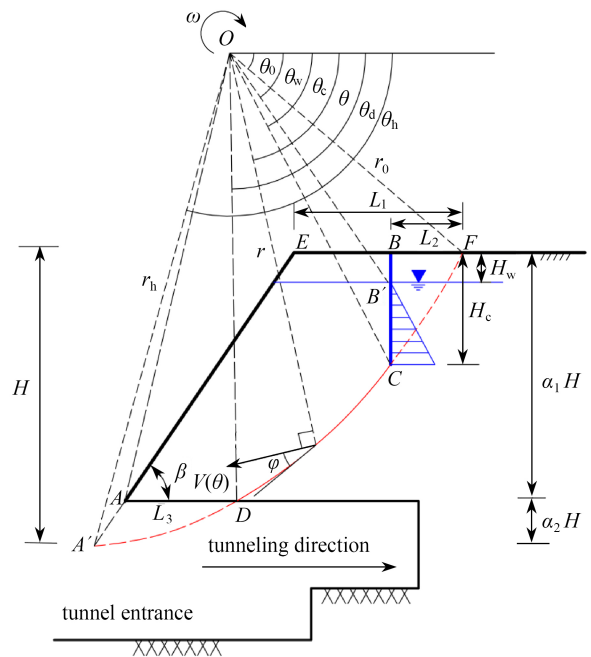


图 1 孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡破坏机制
Fig. 1 The failure mechanism for a cracked slope at tunnel entrance subjected to pore water pressure

其中

$$f_1 = \frac{1}{3(1+9\psi^2)} \{ \exp[3\psi(\theta_h - \theta_0)](3\psi \cos \theta_h + \sin \theta_h) - 3\psi \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \}, \quad (10)$$

$$f_2 = \frac{\sin \theta_0 (2 \cos \theta_0 - L_{1r})}{6} L_{1r}, \quad (11)$$

$$f_3 = \frac{1}{6} \{ \cos \theta_0 + \exp[(\theta_h - \theta_0)\psi] \cos \theta_h - L_{1r} \} [\sin(\theta_h - \theta_0) - L_{1r} \sin \theta_h] \exp[(\theta_h - \theta_0)\psi], \quad (12)$$

$$f_4 = \frac{1}{2} \frac{H_1}{r_0} \frac{L_3}{r_0} \left[\exp(\theta_h - \theta_0)\psi \cos \theta_h + \frac{L_3}{3r_0} + \frac{H_1}{r_0} \cot \beta \right], \quad (13)$$

$$f_5 = \frac{1}{3(1+9\psi^2)} \{ \exp[(\theta_c - \theta_0)\psi] (3\psi \cos \theta_c + \sin \theta_c) - 3\psi \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \}, \quad (14)$$

$$f_6 = \frac{\sin \theta_0 (2 \cos \theta_0 - L_{2r})}{6} L_{2r}, \quad (15)$$

$$f_7 = \frac{1}{3} \cos^2 \theta_c \exp[2(\theta_h - \theta_0)\psi] \{ \exp[(\theta_c - \theta_0)\psi] \sin \theta_c - \sin \theta_0 \}. \quad (16)$$

参照 Viratjandr 和 Michalowski^[20] 的研究, 将孔隙水压力做功功率作用于土体及边界上, 根据 Bishop 等^[23] 提出土体中孔隙水压力可以视为土层自重应力的一部分, 孔隙水压力 u 可表示为

$$u = r_u \gamma z, \quad (17)$$

式中 r_u 为孔隙水压力系数, γ 为土的体积质量, z 为该点距浸润线的距离.

为了得到孔隙水压力, 首先假定一个简化的流场, 其等势线与水平面垂直, 破坏面上一点的孔隙水压力作用方向与破坏面在该点处的法向方向一致, 再由式 (17) 得到孔隙水压力. 设定地下水位高于坡顶裂缝最低端 (图 1 中 C 点), 因此, 孔隙水压力做功由两部分组成, 一是坡顶裂缝中的水压力做功, 二是孔隙水对潜在滑动面的做功.

1) 坡顶裂缝水压力做功

$$W_w = \gamma r_u r_0^3 \omega f_w, \quad (18)$$

其中

$$f_w = \frac{1}{2} \left(\frac{H_c - H_w}{r_0} \right)^2 \left\{ \exp[(\theta_c - \theta_0)\psi] \sin \theta_c - \frac{1}{3} \frac{H_c - H_w}{r_0} \right\}. \quad (19)$$

2) 滑动面孔隙水压力做功

$$W_u = \gamma r_u r_0^3 \omega (f_{u1} + f_{u2}), \quad (20)$$

其中

$$\begin{cases} f_{u1} = \int_{\theta_c}^{\theta_2} \frac{z_1}{r_0} \exp[2(\theta - \theta_0)\psi] d\theta, \\ f_{u2} = \int_{\theta_2}^{\theta_d} \frac{z_2}{r_0} \exp[2(\theta - \theta_0)\psi] d\theta, \end{cases} \quad (21)$$

式中 z_1/r_0 及 z_2/r_0 可表示为

$$\begin{cases} \frac{z_1}{r_0} = \exp[(\theta - \theta_0)\psi] \sin \theta - \exp[(\theta_w - \theta_0)\psi] \sin \theta_w, \\ \frac{z_2}{r_0} = \{ \exp[(\theta - \theta_0)\psi] \cos \theta - \exp[(\theta_d - \theta_0)\psi] \cos \theta_d \} \tan \beta + \\ \exp[(\theta - \theta_0)\psi] \sin \theta - \sin \theta_0 - (H_{1r} - L_{3r} \tan \beta). \end{cases} \quad (22)$$

2.2 内能耗散

考虑坡顶已存在拉裂缝, 而不考虑由于坡顶土体开裂导致的内能耗散功率, 坡体内能耗散仅发生在图 1 速度间断面 CD 上, 总的内能耗散功率可表示为

$$D = \int_{\theta_c}^{\theta_b} c_m (v \cos \varphi) \frac{rd\theta}{\cos \varphi} = c_m r_0^2 \omega f_d, \tag{23}$$

其中

$$f_d = \frac{1}{2\psi} \{ \exp[2(\theta_d - \theta_0)\psi] - \exp[2(\theta_c - \theta_0)\psi] \}. \tag{24}$$

根据极限分析上限法原理, 孔隙水压力作用下隧道洞口段坡顶含裂缝仰坡能量平衡方程可表示为

$$W_r + W_w + W_u = D. \tag{25}$$

由上式推导可分别得到边坡稳定性系数表达式及包含边坡安全系数的隐函数方程:

$$N_s = \frac{\gamma H}{c} = \frac{f_d H_r}{t_1 + r_u t_2}, \tag{26}$$

式中

$$t_1 = f_1 - f_2 - f_3 - f_4 - f_5 + f_6 + f_7, \tag{27}$$

$$t_2 = f_w + f_{u1} + f_{u2}. \tag{28}$$

变换式 (26), 可得到包含边坡安全系数 F_s 的隐函数表达式:

$$N_f = \frac{c}{\gamma H \tan \varphi} = \frac{t_1}{f_d H_r \psi} + \frac{r_u t_2}{f_d H_r \psi}. \tag{29}$$

进一步采用数值优化方法, 得到稳定系数 $N_s = f_1(\theta_0, \theta_h, \theta_d, \theta_c, \beta, \varphi, t_w)$ 及 $N_f = f_2(\theta_0, \theta_h, \theta_d, \theta_c, \beta, \varphi, t_w)$ 的最优上限解.

3 对比验证

Utili^[21] 采用极限分析上限法得到临界状态下, 考虑坡顶不同裂缝深度下的边坡稳定性系数 N_s 计算结果. 为验证所提理论方法的合理性, 将研究计算结果与 Utili^[21] 得到的研究结果进行对比, 如图 2 所示. 可以看出, H_c/H 越小即裂缝深度越浅, 转动破坏机制下的边坡稳定系数 N_s 较平动破坏机制计算结果越小, 说明转动破坏机制相比平动破坏机制可以得到稳定系数更小的上限解, 计算结果更接近真实值. 此外, 基于对数螺旋转动破坏机制计算方法得到边坡稳定系数 N_s 与 Utili^[21] 计算结果几乎一致, 说明基于对数螺旋转动破坏机制采用极限分析上限法研究隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性是合理的.

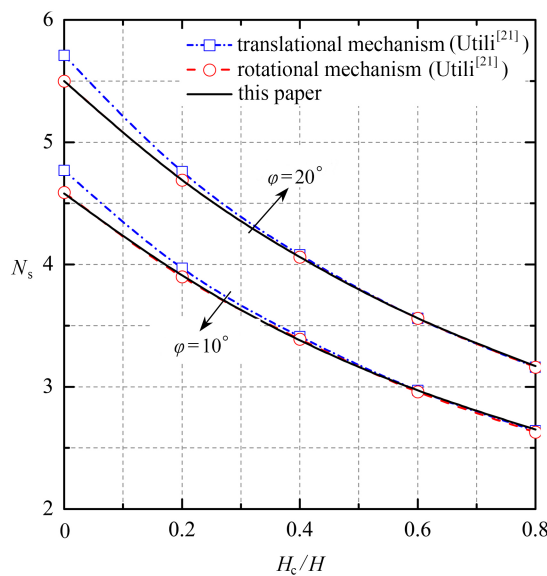


图 2 含裂缝边坡稳定性系数计算结果对比

Fig. 2 Comparisons of stability factors of the cracked slope

4 参数分析

4.1 坡顶裂缝最不利位置分布规律

设定坡顶裂缝深度参数 $H_c/H_1=0.1\sim 0.5$, 水位分布参数 $H_w/H_1=0, 0.1$, 坡角 $\beta=30^\circ\sim 60^\circ$, 孔隙水压力系数 $r_u=0\sim 0.5$, 土体内摩擦角 $\varphi=10^\circ\sim 40^\circ$. 图3给出坡顶裂缝最不利位置分布随上述参数变化的影响规律. 可以看出, 随着坡顶裂缝开裂深度 H_c 的增大、水位越接近坡顶、土体内摩擦角 φ 越大, L/H_1 越小 (EB 段长度越短), 说明裂缝分布位置越靠近坡顶边缘处; 而孔隙水压力系数 r_u 越大、坡角 β 越大, L/H_1 越大, 裂缝位置越远离坡顶边缘处.

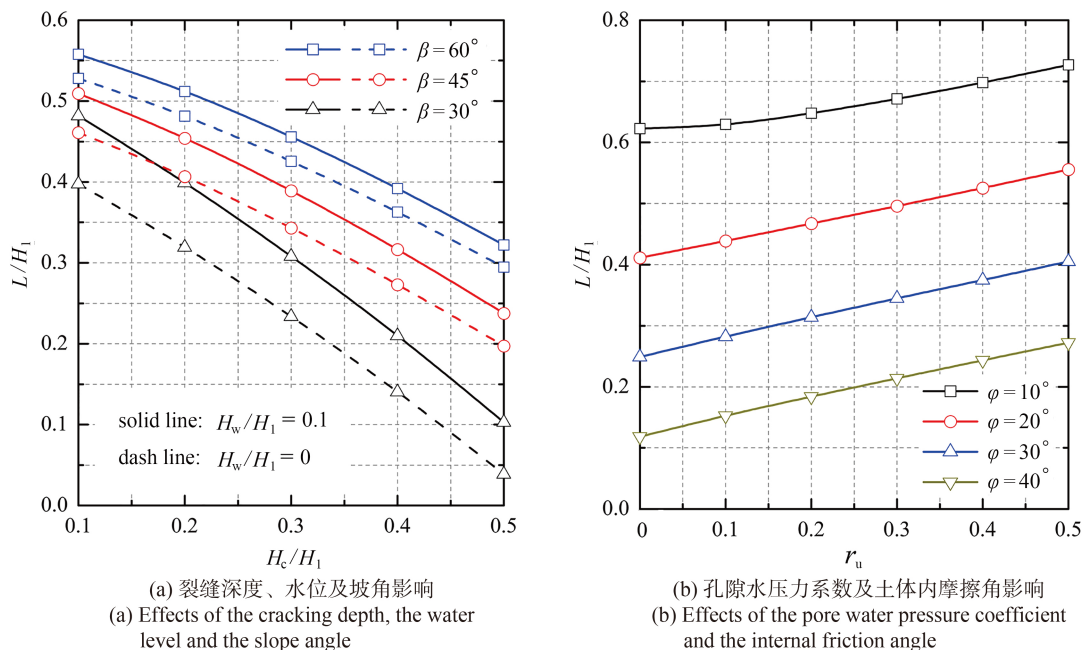


图3 不同参数对坡顶裂缝位置分布影响规律

Fig. 3 Influence of different parameters on critical position of cracks

4.2 仰坡稳定性系数影响规律

图4给出坡顶裂缝开裂深度 H_c/H_1 、水位分布 H_w/H_1 、坡角 β 、孔隙水压力系数 r_u 及土体内摩擦角 φ 对坡顶裂缝最不利位置分布影响. 从图4(a)可以看出, 孔隙水压力系数 r_u 对仰坡稳定性系数影响较大, 表现为孔隙水压力系数 r_u 越大, 仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 越小, 且随着坡角 β 的增大, 仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 降低的幅度越小, 曲线趋于平缓. 随着坡顶裂缝开裂深度 H_c 的增大, 仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 越小, 但这种影响不明显. 图4(b)中, 土体内摩擦角 φ 及水位分布对仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 影响较大, 表现为随着土体内摩擦角 φ 的增大、水位分布越深, 仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 越大, 但随着坡角 β 的增大, 仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 差距越小, 特别是当坡角 β 为 75° 时, 不同水位分布影响下的仰坡稳定性系数趋于一致.

4.3 仰坡安全系数计算及影响规律

本文给出一种通过稳定图间接求仰坡安全系数的计算方法. 设定隧道洞口段坡顶含裂缝仰坡高度为 15 m, $H_c/H_1 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$, $H_w/H_1 = 0 \sim 0.2$, $\beta = 30^\circ \sim 60^\circ$, $\alpha_1 = 0.2$, $c = 30$ kPa, $r_u = 0 \sim 0.5$, $\varphi = 20^\circ$, $\gamma = 18$ kN/m². 结合式 (25) 计算后, 可绘制得到纵坐标为 $c/(\gamma H_1 \tan \varphi)$ 、横坐标为 $(\tan \varphi)/F_s$ 的稳定图, 如图5所示. 可以看出, 坡顶裂缝 H_1/H 影响下的稳定性系数 $c/(\gamma H_1 \tan \varphi)$ 差距较小, 呈非线性分布, 但坡角 β 对稳定图中各曲线分布影响较明显. 仰坡安全系数计算实现过程如下: 首先依据已知算例中的参数值得得 $c/(\gamma H_1 \tan \varphi)$ 值, 其次确定 H_1/H 及 β 值, 进一步分别找到图5(a)、(b)中纵坐标该值对应的横坐标 $(\tan \varphi)/F_s$ 值, 最后可由已知土体内摩擦角 φ 反算得到边坡安全系数 F_s .

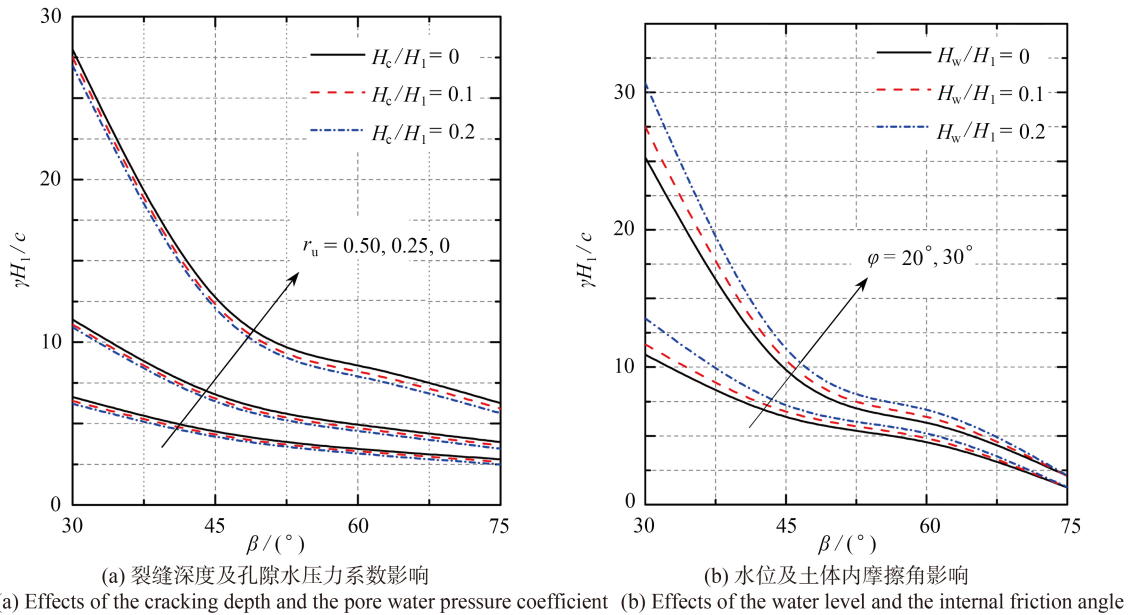


图 4 不同参数对裂缝边坡稳定性系数的影响规律

Fig. 4 Influence of different parameters on stability factors of cracked slope

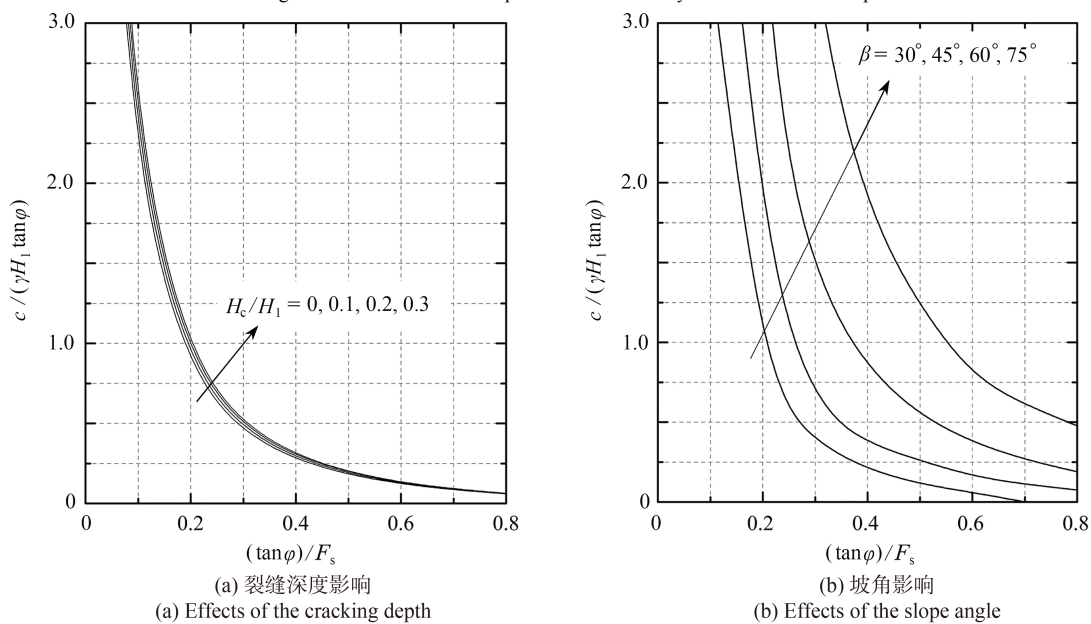


图 5 隧道洞口段含裂缝仰坡稳定图

Fig. 5 Stability of the cracked slope at tunnel entrance

为完整研究各参数对仰坡安全系数的影响,图 6 分别给出坡顶裂缝开裂深度 H_c/H_1 、孔隙水压力系数 r_u 、水位分布 H_w/H_1 及坡角 β 对隧道洞口段含裂缝仰坡安全系数 F_s 的影响。可以看出,随着坡顶裂缝开裂深度 H_c/H_1 、孔隙水压力系数 r_u 及坡角 β 的增大,仰坡安全系数逐渐减小,说明裂缝越深、孔隙水压力系数越大、边坡越陡,越不利于仰坡稳定,且坡顶裂缝开裂深度及坡角对仰坡安全系数影响更明显。同时可以发现,随着水位深度系数 H_w/H_1 增大,仰坡安全系数逐渐增大,这也说明水位越低,坡内承受的孔隙水压力越小,越有利于仰坡稳定。

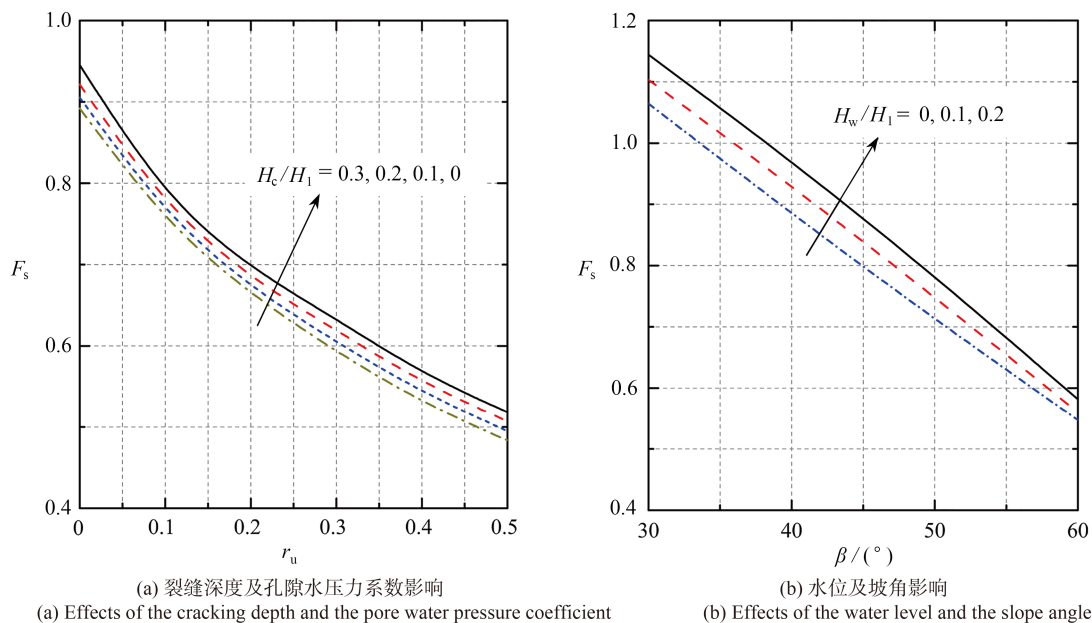


图6 隧道洞口段含裂缝仰坡安全系数

Fig. 6 Safety factors of cracked slope at tunnel entrance

5 结 论

本文基于极限分析上限法开展孔隙水压力作用下的隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性研究,运用数值优化方法得到坡顶裂缝最不利位置分布及仰坡稳定性系数,进一步通过算例给出以稳定图间接计算仰坡安全系数的方法.得到主要结论如下:

1) 坡顶裂缝开裂深度 H_c 、土体内摩擦角 φ 及水位分布越浅,裂缝位置越靠近坡顶边缘处;而孔隙水压力系数及坡角 β 越大,裂缝位置远离坡顶边缘处.

2) 孔隙水压力系数 r_u 、坡顶裂缝开裂深度 H_c 越大,仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 越小;土体内摩擦角 φ 越大、水位分布越深,仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 越大,但随着坡角 β 的增大,仰坡稳定性系数 $\gamma H_1/c$ 差距越小,特别是当坡角 β 为达到特定角度时,不同水位分布影响下的仰坡稳定性系数趋于一致.

3) 坡顶裂缝越深、孔隙水压力系数越大、边坡越陡,越不利于仰坡稳定;坡内水位分布越低,坡内承受的孔隙水压力越小,越有利于仰坡稳定.

参考文献(References):

- [1] 李小青. 隧道工程[M]. 1版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (LI Xiaoqing. *Tunnel Engineering*[M]. 1st ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 于宁, 朱合华, 苏生瑞. 大风垭口公路隧道施工中的地质灾害及对策[J]. *地质灾害与环境保护*, 2003, **14**(2): 21-26. (YU Ning, ZHU Hehua, SU Shengrui. Analysis of geological hazards and corresponding management during the road construction[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2003, **14**(2): 21-26.(in Chinese))
- [3] 邹飞, 程肖, 赵炼恒, 等. 水力效应对裂缝边坡稳定性影响的上限分析[J]. 北京工业大学学报, 2016, **42**(12): 104-112. (ZOU Fei, CHENG Xiao, ZHAO Lianheng, et al. Upper bound analysis of cracked slopes subject to hydraulic effect[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, **42**(12): 104-112.(in Chinese))
- [4] TERZAGHI K, PECK R B. *Soil Mechanics in Engineering Practice*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1967.
- [5] SPENCER E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces[J]. *Géotechnique*, 1967, **17**(1): 11-26.
- [6] LAW K T, LUMB P. A limit equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, **15**(1): 113-122.

- [7] ZHU D Y, LEE C F, JIANG H D. Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis[J]. *Geotechnique*, 2003, **53**(4): 377-395.
- [8] BAKER R. Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes[J]. *Soils and Foundations*, 1981, **21**(2): 1-17.
- [9] LESHCHINSKY D. Slope stability analysis: generalized approach[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, **116**(5): 851-867.
- [10] ANTÃO A N, GUERRA N M D C, MATOS FERNANDES M, et al. Influence of tension cut-off on the stability of anchored concrete soldier-pile walls in clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, **45**(7): 1036-1044.
- [11] LIU F T, ZHAO J D. Limit analysis of slope stability by rigid finite-element method and linear programming considering rotational failure[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2013, **13**(6): 827-839.
- [12] CHEN W F. *Limit Analysis and Soil Plasticity*[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [13] DRUCKER D C, PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, **10**(2): 157-164.
- [14] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 等. 水平矩形浅锚极限抗拔力分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, **32**(9): 1414-1420. (ZHAO Lianheng, LUO Qiang, LI Liang, et al. Ultimate pullout capacity of horizontal rectangular plate anchors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **32**(9): 1414-1420.(in Chinese))
- [15] MICHALOWSKI R L. Limit loads on reinforced foundation soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(4): 381-390.
- [16] LI Y, EMERIAULT F, KASTNER R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, **24**(4): 472-481.
- [17] 杨峰, 阳军生, 张学民, 等. 斜坡地基单侧滑移破坏模式及承载力上限解[J]. *工程力学*, 2010, **27**(6): 162-168. (YANG Feng, YANG Junsheng, ZHANG Xuemin, et al. One-side slip failure mechanism and upper bound solution for bearing capacity of foundation on slope[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, **27**(6): 162-168.(in Chinese))
- [18] 张翔, 李林安, 王世斌, 等. 考虑底部隆起的浅埋隧道围岩压力计算分析[J]. *应用数学和力学*, 2017, **38**(8): 911-921. (ZHANG Xiang, LI Lin'an, WANG Shibin, et al. Limit analysis of surrounding rock pressure for shallow tunnels considering floor heave[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(8): 911-921.(in Chinese))
- [19] MICHALOWSKI R L. Slope stability analysis: a kinematical approach[J]. *Geotechnique*, 1995, **45**(2): 283-293.
- [20] VIRATJANDR C, MICHALOWSKI R L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, **43**(8): 802-814.
- [21] UTILI S. Investigation by limit analysis on the stability of slopes with cracks[J]. *Geotechnique*, 2013, **63**(2): 140-154.
- [22] 刘锋, 芮勇勤, 张春. 坡顶张拉裂缝对边坡稳定性影响[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2016, **35**(9): 949-954. (LIU Feng, RUI Yongqin, ZHANG Chun. Influence of tension cracks of slope crest on the stability of slope[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition)*, 2016, **35**(9): 949-954.(in Chinese))
- [23] BISHOP A W, MORGENSTERN N R. Stability coefficients for earth slopes[J]. *Geotechnique*, 1960, **10**(4): 129-153.