

文章编号: 1674—8247(2020)05—0001—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.001

裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响

晏仁¹ 翁运新² 晏园¹ 申权¹ 祝方才¹

(1. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:裂隙是边坡稳定性分析中的重要影响因素,裂隙的存在不仅会降低原生膨胀土的强度,还为雨水入渗提供了良好的通道,使膨胀土坡体内孔隙水压力增大,最终导致边坡失稳。本文以云桂铁路沿线膨胀土边坡工程为例,基于极限分析上限理论,建立了考虑裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法,探讨了裂隙深度、裂隙倾角等对膨胀土边坡稳定性及锚杆拉力的影响规律。研究表明:(1)裂隙深度对边坡安全系数和锚杆拉力的影响较大,安全系数随裂隙深度的增加而减小,锚杆拉力随裂隙深度的增加而增大;(2)裂隙倾角对边坡安全系数和锚杆拉力的影响较小,安全系数随裂隙角度增大稍许减小,锚杆拉力随裂隙倾角的减小缓慢增大;(3)裂隙对边坡安全系数的影响小于地震作用和孔隙水压力,但大于水平膨胀变形力。本文研究成果可为膨胀土地区边坡工程防灾减灾设计和施工提供参考。

关键词:膨胀土边坡;裂隙深度;裂隙倾角;极限上限法;安全系数

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Influence of Fissure on Stability of Expansive Soil Slope

YAN Ren¹ WENG Yunxin² YAN Yuan¹ SHEN Quan¹ ZHU Fangcai¹

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Fissure is an important influencing factor in slope stability analysis. It will not only reduce the strength of primary expansive soil, but also provide a good channel for rainwater infiltration, which will increase pore water pressure in expansive soil slope and eventually lead to slope instability. In the paper, taking the expansive soil slope construction along Nanning-Kunming Railway as an example, based on the upper bound theory of limit analysis, the analysis method on the stability of expansive soil slope considering the influence of fissures is established, and the influence rule of fissure depth and inclination angle on expansive soil slope stability and anchor rod tension is discussed. The research results show that: (1) The fissure depth has a great influence on the slope safety factor and anchor rod tension. With the increase of fissure depth, the safety factor decreases and the anchor rod tension increases. (2) The fissure inclination angle has little influence on the slope safety factor and anchor rod tension. The safety factor decreases slightly with the increase of fissure angle and the anchor rod tension increases slowly with the decrease of fissure inclination angle. (3) The influence of fissures on the slope safety factor is less than earthquake action and pore water pressure, but greater than horizontal expansion deformation force. The research results in the paper can provide a reference for the design and construction of slope construction on disaster prevention and mitigation in expansive soil areas.

Key words: expansive soil slope; fissure depth; fissure inclination angle; upper bound method; safety factor

收稿日期:2020-03-02

作者简介:晏仁(1989-),女,硕士研究生。

基金项目:国家自然科学基金(41672296, 51878667, 51678571),湖南省教育厅科学研究项目(18C0501)

引文格式:晏仁,翁运新,晏园,等.裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响[J].高速铁路技术,2020,11(5):1-7.

YAN Ren, WENG Yunxin, YAN Yuan, et al. Influence of Fissure on Stability of Expansive Soil Slope[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):1-7.

膨胀土是一种特殊性黏土,具有多裂隙性、强胀缩性和超固结性特征。由于膨胀土具有强烈的胀缩特性,其在降雨蒸发的干湿循环过程中很容易形成裂隙。裂隙对膨胀土的强度、变形、渗流等性质有着重要的影响。因此,对膨胀土边坡进行稳定性分析时必须考虑到裂隙的影响^[1-4]。

迄今为止,研究者们已通过研究认识到了裂隙在膨胀土边坡稳定性中起到的重要作用。殷宗泽^[5-7]等人从不同角度论证了多裂隙性是影响膨胀土边坡失稳的关键,结合膨胀土边坡失稳实例,探讨了裂隙在边坡稳定性中所起的作用,解释了裂隙开展与膨胀土边坡失稳特征的联系,提出了考虑裂隙影响的边坡稳定分析方法和用土工膜限制裂隙发展的加固方法。陈善雄^[8]等人针对现有膨胀土边坡稳定性分析方法的不足,基于南水北调中线工程,在进行了大量现场滑坡调研的基础上,提出了一种含裂隙膨胀土边坡的稳定性分析方法,建立了膨胀土裂隙边坡的地质模型。研究结果表明,在考虑地表垂直裂隙、地下水及坡脚缓倾裂隙后,边坡的安全系数显著降低。李雄威^[9]等人以广西白色强膨胀土为研究对象,对裂隙描述的雨水入渗膨胀土边坡进行稳定性计算,结果表明,是否考虑裂隙对膨胀土边坡稳定性的计算结果影响较大。姚海林^[10]等人对膨胀土边坡进行了考虑裂隙和降雨入渗影响的稳定性分析,通过工程实例比较了考虑裂隙和不考虑裂隙的差别。研究结果表明,考虑裂隙影响的边坡降雨入渗和稳定性分析较为合理。平扬^[11]等人考虑膨胀土开裂性的情况下,研究了雨水入渗条件下膨胀土边坡的渗流规律,并进行了相对应的稳定性分析。郑长安^[12]通过室内试验,将非饱和状态下的强度参数及膨胀力表示为土体含水率的函数,并在此基础上,提出了考虑多种因素的膨胀土稳定性分析方法。黄润秋^[13]等人采用简化 Bishop 法,研究裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响。包承纲^[14]以吸力问题为中心,对新近研究的降雨入渗和裂隙影响进行了定量分析,并在此基础上对边坡失稳机理和考虑裂隙和雨水入渗的稳定分析方法进行了研究。谭波^[15]等人采用室内试验和 PFC3D 数值仿真试验相结合的方法来获取裂隙膨胀土体的抗剪强度指标,并初步探寻膨胀土裂隙发育对强度的影响规律。

总体来说,现有考虑裂隙影响膨胀土边坡稳定性的研究主要集中于裂隙和雨水入渗,涉及膨胀土裂隙和膨胀变形力方面的研究较少,特别是考虑裂隙倾角对边坡稳定性影响的研究少见报道。因此,本文以新建云桂高速铁路沿线采用锚杆框架梁支护的两级膨胀土边坡为背景,基于极限分析上限理论,结合膨胀变形

力、孔隙水压力、地震荷载和锚杆拉力等因素,建立了考虑裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法,研究了裂隙对膨胀土边坡稳定性及锚杆拉力的影响,探讨了裂隙深度、倾角对膨胀土边坡稳定性及锚杆拉力的影响规律,以期为膨胀土边坡工程设计与施工提供参考。

1 建立考虑裂隙影响的边坡模型

多裂隙性是膨胀土的典型特征,且裂隙是边坡稳定性分析中的重要影响因素。膨胀土本身的渗透率较小,雨水入渗量有限,但裂隙的存在给雨水入渗提供了良好通道,并进一步造成膨胀土边坡滑坡。本文考虑连通滑裂面的裂隙,如图1所示。裂隙深度为 h_w ,裂隙静水压力为 P_w (降雨条件下),则:

$$h_w = nH(0 \leq n \leq 1) \quad P_w = \frac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \quad (1)$$

式中: γ_w ——水的容重。

当 $n=0$ 时,表明裂隙深度为0,当 $n=1$ 时,表明裂隙深度为边坡高度 H 。

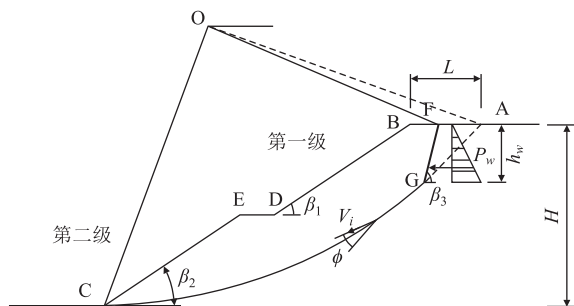


图1 裂隙对边坡影响示意图

1.1 边坡的几何关系

新建云桂高速铁路沿线有多处两级膨胀土(岩)边坡,均采用锚杆框架梁支护,本文基于极限分析上限理论,研究 DK 221+790 右侧两级边坡的稳定性。边坡破坏模式为对数螺旋线,如图2所示。膨胀土边坡平台宽度由上往下分别为 $d_0=L$ 、 d_1 和 $d_2=0$ (其中 $d_0=L$ 、 $d_2=0$),边坡倾角由上往下分别为 β_1 和 β_2 ,边坡高度由上往下为 $\alpha_1 H$ 和 $\alpha_2 H$ (其中 α_1 、 α_2 为高度系数),以上参数可根据具体边坡尺寸确定。此外,假设破坏面AC为对数螺旋面,破坏面通过坡脚,滑动体ABC绕旋转中心O相对AC面以下的稳定体做旋转运动,因此,AC面是一个薄层的速度间断面。线段OA的长度为 r_0 ,OA与OC的倾角分别为 θ_0 和 θ_h ,边坡高度 H 。

利用坐标变换,从几何关系可以看出, H/r_0 和 L/r_0 的比值可用 θ_0 和 θ_h 表示。

$$\frac{H}{r_0} = e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} \sin \theta_h - \sin \theta_0 \quad (2)$$

(3) 静水压力

静水压力的合力作用点距离点 G 的高度为 $\frac{h_2}{3}$, 静水压力外功率:

$$W_p = \gamma_w \Omega r_0^3 w_2 \sin \phi \quad (8)$$

其中, $w_2 = \frac{1}{2} n_1^2 \left(\frac{H}{r_0} \right)^2 \times$

$$\sqrt{\left(e^{3(\theta_g - \theta_0) \tan \phi} \cos \theta_g + n_1 \frac{H}{r_0} \cot \beta_3 \right)^2 + \left(e^{3(\theta_g - \theta_0) \tan \phi} \cos \theta_g - \frac{n_1 H}{3 r_0} \right)^2}$$

(4) 内部损耗率

$$C_{AC} = \frac{S_x c r_0^2 \Omega}{2 \tan \phi} \left[\left(e^{2(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - 1 \right) - \left(e^{2(\theta_g - \theta_0) \tan \phi} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

式中: C ——土体粘聚力。

(5) 孔隙水压力

$$W_{\text{water}} = S_x \gamma_w \Omega \sin \phi \left(\int_{\theta_0}^{\theta_h} r_i^3 \sin \theta - r_i^2 r_0 \sin \theta_0 d\theta + \int_{\theta_h}^{\theta_d} r_i^3 \cos \theta \tan \beta_1 - r_i^2 r_b \cos \theta_b \tan \beta_1 d\theta - \int_{\theta_d}^{\theta_h} r_i^2 \alpha_2 H d\theta + \int_{\theta_e}^{\theta_h} r_i^3 \cos \theta \tan \beta_2 - r_i^2 r_e \cos \theta_e \tan \beta_2 d\theta \right) = r_0^3 \gamma_w \Omega \sin \phi \times w \quad (10)$$

式中: w ——孔隙水压力功率。

(6) 地震荷载外功率

$$W_k = W_{kv} + W_{kh} = k_v r_0^3 \Omega (f_1 - f_2 - f_3 - f_4 - f_5) + k_h r_0^3 \Omega (g_1 - g_2 - g_3 - g_4 - g_5) \quad (11)$$

式中: k_v, k_h ——分别为竖向和水平向地震加速度放大系数。

(7) 锚杆(索)的拉力外功率

$$W_m = -r_0 \Omega T_i \sum [e^{(\theta_i - \theta_0) \tan \varphi} \cdot \sin(\theta_i - \xi)] \quad (12)$$

式中: T_i ——第 i 根锚杆拉力;

θ_i ——第 i 根锚杆与水平面的夹角;

ξ ——锚杆的水平倾角。

2 边坡安全系数及锚杆支护分析

2.1 安全系数

(1) 考虑裂隙的影响, 由外功率与内能耗散功率相等, 可得:

$$W_{FBCG} = C_{AC} \quad (13)$$

(2) 考虑裂隙及裂隙静水压力的影响, 由外功率与内能耗散功率相等, 可得:

$$W_{FBCG} + W_p = C_{AC} \quad (14)$$

(3) 考虑裂隙、孔隙水压力(裂隙和孔隙)和变形力影响, 由外功率与内能耗散功率相等, 可得:

$$W_{FBCG} + F_{FBCG} + W_p = C_{AC} \quad (15)$$

(4) 考虑裂隙和地震影响, 由外功率与内能耗散功率相等, 可得:

$$W_{FBCG} + W_k = C_{AC} \quad (16)$$

(5) 考虑裂隙和地震影响, 由外功率与内能耗散功率相等, 可得:

$$W_{FBCG} + F_{FBCG} + W_k = C_{AC} \quad (17)$$

(6) 考虑裂隙、水压力(裂隙和孔隙)、变形力和地震的影响, 由外功率与内能耗散功率相等, 可得:

$$W_{FBCG} + W_p + W_{\text{water}} + F_{FBCG} + W_k = C_{AC} \quad (18)$$

选取典型膨胀土边坡断面, 裂隙倾角取 $\beta_3 = 90^\circ$, $n_1 = 0.1$, 膨胀土边坡参数如表 1 所示。考虑孔隙水压力作用, 边坡安全系数的计算结果如表 2 所示。

表 1 膨胀土边坡参数表

d_1/m	α_1	α_2	$\beta_1/(\circ)$	$\beta_2/(\circ)$	H/m	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\phi/(\circ)$	$\beta_h/(\text{kN}/\text{m}^3)$	k_h	k_v
3	1/2	1/2	33.7	33.7	16	18.85	10	15	1.22	0.1	0.2/3

表 2 边坡安全系数计算结果表

工况	安全系数		降低百分比 /%
	不考虑裂隙	考虑裂隙	
自重	0.903	0.828	8.31
自重 + 裂隙静水压力	0.895	0.825	7.82
自重 + 变形力	0.833	0.757	9.12
自重 + 地震	0.742	0.696	6.20
自重 + 变形力 + 地震	0.686	0.664	3.21
自重 + 变形力 + 地震 + 水压力	0.558	0.492	11.83

从表 2 可以看出, 裂隙使边坡的安全系数有所降低, 最大降低百分比为 11.83%, 说明裂隙对边坡稳定

性不利。裂隙对边坡安全系数的影响小于地震作用(降低 17.65%)和孔隙水压力作用(降低 16.17%), 但大于变形力作用(降低 7.8%)。

自重 + 裂隙、自重 + 变形力 + 裂隙、自重 + 地震 + 裂隙 3 种工况下的边坡滑裂面如图 3 所示。

由图 3 可知, 考虑裂隙的影响后, 边坡的滑裂面长度变短, 且与裂隙连通。对比 3 种工况可知, 就对数螺旋滑裂面的初始半径而言; 自重 + 裂隙工况的初始半径最大, 自重 + 变形力 + 裂隙工况次之, 自重 + 地震 + 裂隙工况最小。

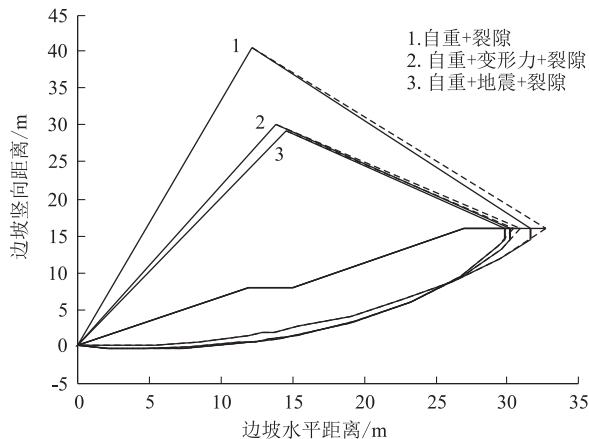


图3 考虑裂隙影响的边坡对数螺旋滑裂面图

2.2 锚杆拉力计算

考虑裂隙、静水压力、孔隙水压力、变形力、地震荷载、锚索拉力,由外功率与内能耗散功率相等,可得:

$$W_{\text{FBCG}} + W_p + W_{\text{water}} + F_{\text{FBCG}} + W_k + W_m = C_{\text{AC}} \quad (19)$$

由此可得,考虑变形力和地震作用下,锚杆(索)的拉力与安全系数之间的关系为:

$$T = \frac{1}{\sum [e^{(\theta_i - \theta_0) \tan \phi} \sin(\theta_i - \xi)]} S_x \times r_0^2 \times [(\beta_h + k_h \gamma \times K)g + (\gamma + k_v \gamma \times K)f + w\gamma_w \sin \phi + \gamma_w w_2 \sin \phi] - S_x \frac{cr_0}{2 \tan \phi} \times [e^{2(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - 1] \quad (20)$$

锚杆拉力的计算结果如图4所示。

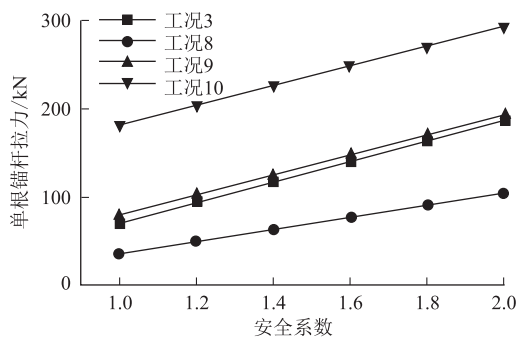


图4 锚杆拉力与安全系数之间的关系图

由图4可知,各种工况下,锚杆的拉力与安全系数呈线性关系,锚杆拉力越大,安全系数也越大。由规范可知,在进行锚杆(索)设计时,边坡安全系数的取值在1.2~1.6之间,对于考虑自重、裂隙、孔隙水压力、地震和变形力作用的膨胀土边坡而言,单根锚杆的拉力设计值可取203.70~248.79 kN。

3 影响因素分析

3.1 裂隙深度对安全系数的影响

裂隙倾角为 90° ,裂隙深度分别选取1 m、2 m、3 m和4 m,计算自重+裂隙、自重+裂隙+变形力和自重+裂隙+地震+变形力3种工况下裂隙深度与安全系数之间的关系,计算结果如图5所示。

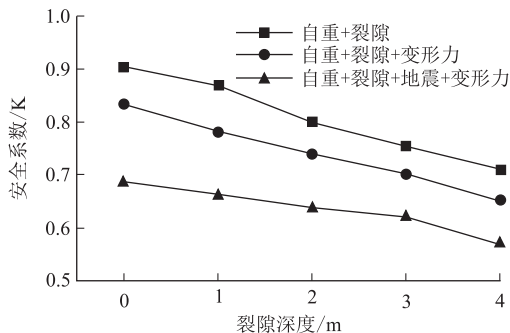


图5 裂隙深度与安全系数之间的关系图

由图5可知,安全系数随裂隙深度的增加而减小,当裂隙深度为4 m时,自重+裂隙工况的安全系数为0.71,自重+裂隙+变形力工况的安全系数为0.651,自重+裂隙+地震+变形力工况的安全系数降为0.569。

3.2 裂隙深度对锚杆拉力的影响

裂隙倾角为 90° ,安全系数取1.2,裂隙深度分别选取0 m、1 m、2 m、3 m和4 m,不考虑水压力作用,计算考虑地震作用和不考虑地震作用时裂隙深度与锚杆拉力之间的关系,计算结果如图6所示。

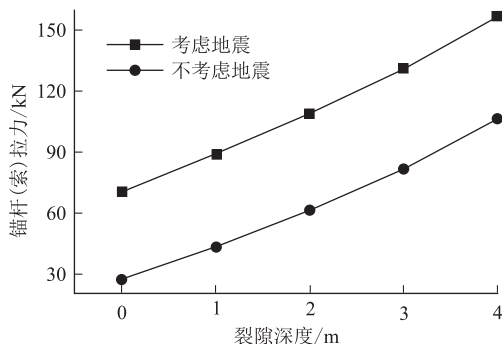


图6 裂隙深度与锚杆拉力之间的关系图

由图6可知,锚杆拉力随裂隙深度的增加而增大,当裂隙深度为4 m时,考虑地震作用工况下的锚杆拉力为157.14 kN,不考虑地震作用工况的锚杆拉力为106.61 kN。

3.3 裂隙倾角对安全系数的影响

裂隙深度为1.6 m,裂隙倾角分别选取 110° 、

100°、90°、80°和70°,锚杆拉力分别取0 kN、50 kN、100 kN和150 kN,计算裂隙倾角与安全系数之间的关系,结果如表3和图7所示。

表3 裂隙倾角与安全系数之间的关系表

裂隙倾角/°	110	100	90	80	70	拉力 T/kN
安全系数	0.665	0.664	0.664	0.648	0.649	0
	0.825	0.824	0.823	0.807	0.809	50
	1.24	1.239	1.238	1.222	1.223	100
	1.655	1.654	1.653	1.637	1.639	150

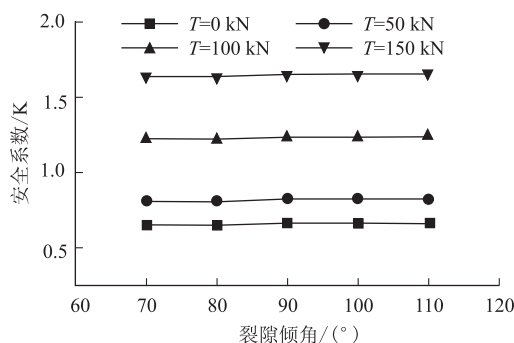


图7 裂隙倾角与安全系数之间的关系图

由表3和图7可知,裂隙倾角的变化对安全系数的影响较小,随着裂隙倾角的增大,安全系数稍许减小。

不同裂隙倾角和不同裂隙深度的边坡滑裂面如图8和图9所示。

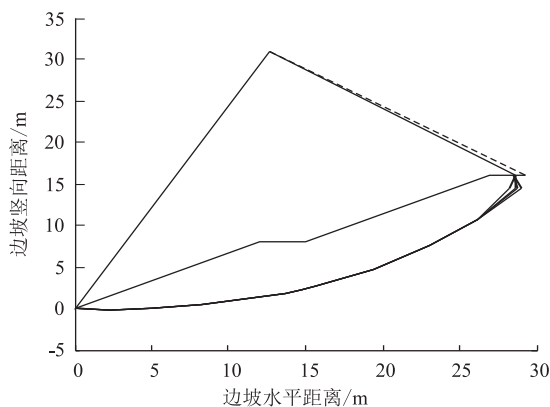


图8 不同裂隙倾角下边坡滑裂面图

由图8可知,裂隙倾角分别选取110°、100°、90°、80°和70°时,对数螺旋滑裂面的 θ_b 、 θ_0 、 r_0 和 L 均未发生变化,由此可知,裂隙倾角对边坡安全系数的影响较小。由图9可知,裂隙深度分别选取1 m、2 m、3 m和4 m时,对数螺旋滑裂面 θ_0 、 r_0 和 L 均发生了不同程度的变化,因此,相对于裂隙倾角而言,裂隙深度对边坡安全系数的影响较大。

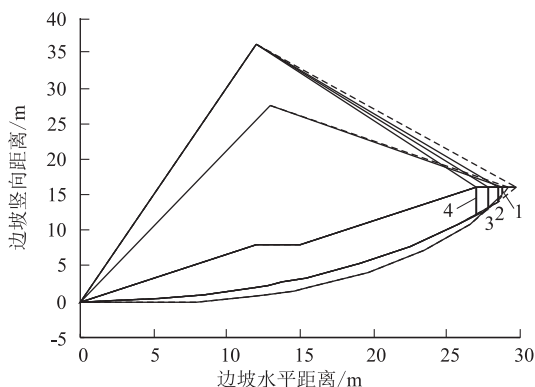


图9 不同裂隙深度下边坡滑裂面图

3.4 裂隙倾角对锚杆拉力的影响

裂隙深度为1.6 m,安全系数取1.2,裂隙倾角分别选取110°、100°、90°、80°和70°,不考虑水压力作用,计算考虑地震作用和不考虑地震作用时裂隙倾角与锚杆拉力之间的关系,计算结果如图10所示。

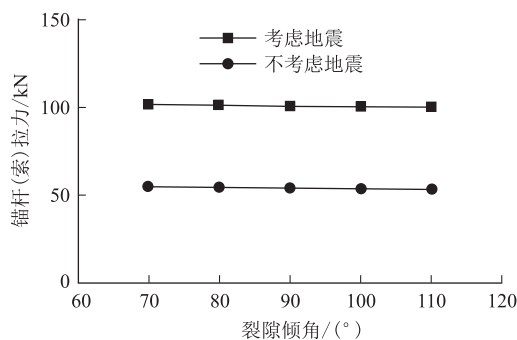


图10 裂隙倾角与锚杆拉力之间的关系图

由图10可知,裂隙倾角的变化对锚杆拉力的影响较小,锚杆拉力随裂隙倾角的减小缓慢增大;当裂隙倾角为70°时,锚杆拉力较大,考虑地震作用工况下的锚杆拉力为101.55 kN,不考虑地震作用工况下的锚杆拉力为54.69 kN。

4 结论

本文基于极限分析上限理论,建立了考虑裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法,探讨了裂隙深度、倾角对膨胀土边坡稳定性和锚杆拉力的影响规律,主要结论如下:

(1)安全系数随裂隙深度的增加而减小,其中,考虑地震作用和变形力影响的安全系数最小;安全系数随裂隙倾角的增大稍许减小;裂隙深度对边坡安全系数的影响较大,且影响滑裂面的几何形状。

(2)锚杆拉力随裂隙深度的增加而增大,在相同裂隙深度时,考虑地震作用工况的锚杆拉力较不考虑

地震作用工况的拉力更大;裂隙倾角的变化对锚杆拉力的影响较小。

(3)裂隙对边坡安全系数的影响小于地震作用和孔隙水压力的作用,但大于水平膨胀变形力的作用。

参考文献:

- [1] 常锦, 杨和平, 肖杰, 等. 酸性环境干湿循环条件下膨胀土的膨胀特性及微观作用分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3):34-43.
CHANG Jin, YANG Heping, XIAO Jie, et al. Swelling Characteristics and Microscopical Analysis of Expansive Soil under Dry-wet Cycles in Acid Environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3):34-43.
- [2] 吴珺华, 袁俊平. 膨胀土裂隙特性与边坡防治技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
WU Junhua, YUAN Junping. Fissure Characteristics of Expansive Soil and Slope Prevention Technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [3] HOU Dinggui, TAO Zhigang, HAO Zhenli, et al. Numerical Analysis of Rainfall Saturated-unsaturated Seepage and Stability of Expansive Soil Slope with Fissures [C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Structural, Mechanical and Material Engineering. Paris, France: Atlantis Press, 2015:29.
- [4] LI Xiongwei, WANG Yong, YU Jingwei, et al. Unsaturated Expansive Soil Fissure Characteristics Combined with Engineering Behaviors[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(12): 3564-3571.
- [5] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12):2155-2161.
YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influences of Fissures on Slope Stability of Expansive Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12):2155-2161.
- [6] 殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3):454-459.
YIN Zongze, XU Bin. Slope Stability of Expansive Soil under Fissure Influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3):454-459.
- [7] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):727-731.
LIU Huaqiang, YIN Zongze. Test Study of Influence of Crack Evolution on Strength Parameters of Expansive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):727-731.
- [8] 陈善雄, 戴张俊, 陆定杰, 等. 考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2014, 45(12):1442-1449.
CHEN Shanxiong, DAI Zhangjun, LU Dingjie, et al. Stability Analysis Considering Fracture Distribution and Strength for Expansive Soil Slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(12): 1442-1449.
- [9] 李雄威, 代国忠, 于常瑶, 等. 基于裂隙描述的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6):1069-1075.
LI Xiongwei, DAI Guozhong, YU Changyao, et al. Stability Analysis of Cut Slope of Expansive Soil Based on Fissure Description [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6):1069-1075.
- [10] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5):606-609.
YAO Hailin, ZHENG Shaohe, CHEN Shouyi. Analysis on the Slope Stability of Expansive Soils Considering Cracks and Infiltration of Rain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 606-609.
- [11] 平扬, 刘明智, 郑少河. 降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1):4478-4484.
PING Yang, LIU Mingzhi, ZHENG Shaohe. Stability Analysis of Expansive Soil Slope with Rainfall Infiltration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1):4478-4484.
- [12] 黄润秋, 吴礼舟. 非饱和膨胀土边坡稳定性分析[J]. 地学前缘, 2007, 14(6):129-133.
HUANG Runqiu, WU Lizhou. Stability Analysis of Unsaturated Expansive Soil Slope [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 129-133.
- [13] 郑长安. 多因素耦合的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1):82-86.
ZHENG Changan. Expansive Soil Slope Stability Analysis Affected by many Factors [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1):82-86.
- [14] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1):1-15.
BAO Chenggang. Behavior of Unsaturated Soil and Stability of Expansive Soil Slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1):1-15.
- [15] 谭波, 郑健龙, 张锐. 基于室内试验与数值模拟的膨胀土裂隙对强度影响规律研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3):463-467.
TAN Bo, ZHENG Jianlong, ZHANG Rui. Law of Strength under Influence of Expansive Soil Cracks Based on the Laboratory Test and Numerical Simulation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(3):463-467.