

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220509005

基于拟动力法抗滑桩加固非饱和土边坡稳定性分析*

王 龙^{1,2,3}, 陈国兴², 胡 伟³, 周恩全⁴, 孙德安⁵

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 4. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 5. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 基于极限分析上限原理和拟动力法, 提出一种半解析改进水平片分法, 计算具有非线性分布特征的非饱和土重力和地震惯性力所做外功率, 将传统塑性理论扩展至非饱和土中以考虑基质吸力对桩侧阻力的提升作用, 与解析解对比验证了该方法的合理性。通过算例分析, 揭示了吸力对非饱和土边坡稳定性及抗滑桩加固效果的强化作用, 探究了非饱和土边坡的地震响应规律, 研究了抗滑桩布设参数对支挡结构边坡稳定性的影响规律。研究结果表明: 吸力对边坡稳定性的提升效果可达20%~50%, 吸力效应与地震动特性密切相关, 在地震波达到峰值时显著增强; 水平和竖向加速度系数以及土剪切模量对边坡地震稳定性影响较大; 桩距 $D_1/d_p \leq 4$ 时, 抗滑桩加固效果较为显著并随摩擦角的增加得到强化, 抗滑桩最佳桩位位于边坡中上部, 且随摩擦角的增加逐渐减小, 对应的加固效果也有所降低。

关键词: 非饱和土边坡; 极限分析; 抗滑桩; 拟动力法; 基质吸力

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1386-09

Seismic Stability of Unsaturated Soil Slopes Stabilized by Anti-slide Piles Based on Pseudo-dynamic Approach

WANG Long^{1,2,3}, CHEN Guoxing², HU Wei³, ZHOU Enquan⁴, SUN Dean⁵

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 5. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Based on the upper bound limit analysis theorem and the pseudo-dynamic approach, a modified horizontal slice method is proposed to calculate the work rates of soil gravity and seismic inertia forces, both characterized by evident nonlinear distribution features. Traditional plasticity theory is extended to unsaturated soils to account for the influence of soil suction on the resistance forces acting on piles. The proposed method is validated by comparing it with analytical solutions. A series of parametric analysis are conducted regarding the impacts of soil suction and pile design parameters on soil slope

* 收稿日期:2022-05-09;修回日期:2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208345)、成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLP2022K002)、江苏省自然科学基金项目(BK20210479)资助

作者简介: 王龙(1989—),男,讲师,博士。主要从事边坡稳定性研究。E-mail: longwang@jiangnan.edu.cn

通讯作者: 胡伟(1981—),男,教授,博导,博士。主要从事大型地质灾害机理研究。E-mail: huwei1999@126.com

stability. The results show that the slope stability is underestimated by 20% ~ 50% when soil suction is not considered in practice. The suction effect depends on seismic excitations and is significantly enhanced when the seismic wave approaches its peak. The horizontal, vertical acceleration coefficients, and the soil shear modulus all have a great influence on seismic slope stability. When the pile spacing $D_1/d_p \leq 4$, pile reinforcement becomes obvious and increases rapidly as the internal friction angle increases. The optimum pile location commonly lies in the middle and upper part of the slope. The optimum pile location gradually decreases, and the pile reinforcement is slightly reduced as the internal friction angle increases.

Keywords: unsaturated soil slope; limit analysis; anti-slide pile; pseudo-dynamic approach; matric suction

0 引言

地震作用是诱发边坡失稳破坏的主要因素之一,地震作用下边坡的稳定性问题仍是岩土工程和防灾减灾工程届关注的热点问题,尤其是在地震多发地区^[1]。

地震荷载描述方法的合理性是进行边坡地震稳定性分析的基础,目前常用的地震波描述方法主要有时程曲线法、拟静力法和拟动力法三种。地震加速度时程曲线可以真实地描述地震发生整个过程中各个方向的地震加速度,常与计算机数值仿真模拟技术结合对具体实际边坡进行地震时程分析。拟动力法^[2-3]克服了拟静力法不能反映地震动时程特性的缺点,常与理论方法结合,用于典型边坡的地震稳定性评价^[4-5]。为了提高危险边坡的稳定性,挡土墙、抗滑桩和预应力锚索等加固措施成为滑坡灾害防治中的主要手段,国内外学者针对支挡结构边坡的稳定性问题开展了大量的研究工作^[6-9]。基于极限分析上限法和平动破坏机构,郑刚等^[7]对静、动力荷载作用下含软弱层边坡的稳定性进行分析,研究了桩位和桩距对抗滑桩加固效果的影响。董建华等^[8]研究了地震作用下预应力锚索抗滑桩新型滑坡防治结构的工作机理和动力计算方法。宁帅等^[9]研究了软土强度各向异性、非均质性和水平土拱效应对抗滑桩加固边坡稳定性的影响。

常规边坡稳定性分析中,通常假定边坡土体处于饱和状态,而实际上的边坡土体往往具有明显的非饱和特性,饱和土与非饱和土的物理力学性质存在显著差异^[10-15],非饱和土力学理论的发展和完善为非饱和土边坡稳定性评价提供了现实的理论指导和依据。目前国内外学者已提出多种直接或间

接预测非饱和土强度的方法,这些方法均借助土-水特征曲线(SWCC)^[10]将基质吸力引起的强度增加与土中含水量联系以反映非饱和土的强度特性,通常可分为两大类:单一变量有效应力(Bishop有效应力)^[14]和Fredlund双参数理论^[15]。由于土中吸力的复杂性,目前边坡地震稳定性评价中,关于吸力效应和抗滑桩加固效应的综合研究还相对较少。

本文基于极限分析上限原理和拟动力法研究了抗滑桩加固非饱和土边坡的地震稳定性。提出一种改进水平片分法,可有效考虑土中水分含量变化对边坡稳定性的影响,揭示边坡地震响应规律。将传统塑性理论扩展至非饱和土中来考虑基质吸力对桩侧阻力的提升作用,研究了抗滑桩布设参数对支挡结构边坡稳定性的影响规律。

1 非饱和土边坡极限分析

1.1 上限极限分析法

塑性极限分析根据上限和下限定理对岩土结构真实极限荷载的上下限进行求解^[16],通过建立合理的运动许可速度场和静力容许应力场,便可将真实极限荷载限定在较小的范围内。基于极限分析上限定理和虚功原理,可求解真实荷载的上限。假定土体为理想刚塑性材料并遵循摩尔-库仑屈服准则以及相关联的流动法则,虚功率方程可以表述为:

$$\int_A T_i v_i dA + \int_V F_i v_i dV = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad (1)$$

式中, A 和 V 为滑坡体的表面积和体积; T_i 与 F_i 为滑坡体所受的面力和体力; σ_{ij} 为与面力 T_i 和体力 F_i 相对应的应力场; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为与速度场 v_i 相协调的应变率场。等式左侧为外力产生的功率,等式右侧为外力作用

下滑坡体内部的能量耗散率,根据刚塑性滑体假定,能量耗散仅发生在滑动面上。

1.2 非饱和土性质

抗滑桩加固均质非饱和土边坡如图1所示,假设土体处于理想弹塑性状态,边坡高度为 H ,坡面倾角为 β ,地下水位于地面以下 z_0 处,水平地将土体分为饱和土层与非饱和土层。采用对数螺旋机构模拟潜在滑动面,滑动面初始和结束极角分别为 θ_0 和 θ_n 。抗滑桩垂直埋入滑坡体以下土体中,距坡趾水平距离为 L_p 。

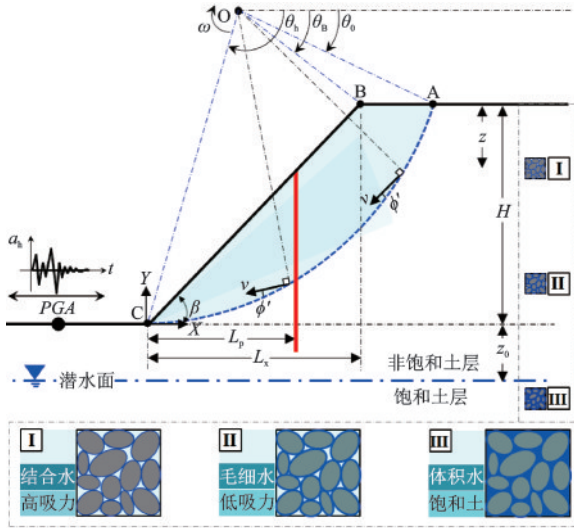


图1 抗滑桩加固非饱和土边坡地震稳定性算简图

Fig.1 Diagram of an unsaturated soil slope reinforced by anti-slide piles based on the pseudo-dynamic approach

将土体假定为饱和状态对边坡稳定性进行分析稍显保守,边坡的安全储备虽然得到提高,但经济性也随之降低。典型非饱和土边坡稳定性分析通常基于修正 Mohr-Coulomb 破坏准则将基质吸力对土抗剪强度的贡献视为黏聚力来实现^[10-15]。根据 SWCC,非饱和土毛细黏聚力可以表示为^[10]:

$$c_{\text{cap}} = \psi \left[\left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \right] \quad (2)$$

式中, ψ 为基质吸力; ϕ' 为土内摩擦角; θ_w 为体积含水率; θ_r 和 θ_s 分别为残余和饱和体积含水率。

非饱和土 SWCC 可采用 Fredlund 和 Xing 模型^[13]来描述,其体积含水率可表示为:

$$\theta_w = \left\{ 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right\} \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + (\psi/a_t)^{n_t} \right] \right\}^{m_t}} \quad (3)$$

式中, ψ_r 为非饱和土残余含水量状态对应的基质吸力; a_t 、 m_t 和 n_t 可通过图解法测量 SWCC 上的拐点来确定。

稳态条件下基质吸力的解析表达式为:

$$\psi = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[\left(1 + q/k_s \right) e^{-\alpha \gamma_w (z+z_0)} - q/k_s \right] \quad (4)$$

式中, q/k_s 为竖向比流量; γ_w 为水单位重量; α 为拟合参数; z 为土中某点至坡脚的垂直距离; z_0 为地下水深度。

非饱和土单位土重可根据土的干重度 γ_d 得到:

$$\gamma' = \gamma_d + \theta_w \gamma_w \quad (5)$$

根据土体的三相比例关系,饱和体积含水量可根据饱和土单位重量 γ_{sat} 得到:

$$\theta_s = (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_d) / \gamma_{\text{sat}} \quad (6)$$

1.3 拟动力假定

拟动力法具有可以考虑地震动持时、周期和放大效应等优点,被广泛用于支挡结构边坡的地震稳定性评价。研究表明^[2-3],正弦波可以较好地反映地震动上述特性,揭示岩土支挡结构的地震动响应规律,基于该方法,水平和竖向地震加速度可表示为:

$$a_h(z_s, t) = k_h g \left[1 + (f_a - 1) \frac{(H - z_s)}{H} \right] \sin \left[\omega_s \left(t - \frac{H - z_s}{V_s} \right) \right] \quad (7)$$

$$a_v(z_s, t) = k_v g \left[1 + (f_a - 1) \frac{(H - z_s)}{H} \right] \sin \left[\omega_s \left(t - \frac{H - z_s}{V_p} \right) \right] \quad (8)$$

式中, V_s 和 V_p 分别为剪切波速和压缩波速; k_h 和 k_v 分别为水平和竖向地震加速度系数; f_a 为放大系数; z_s 为至坡顶的垂直距离; t 为时间; g 为重力加速度; ω_s 为地震波角速度($\omega_s = 2\pi/T$, T 为地震波周期)。

土中剪切波速和压缩波速可根据土的剪切模量 G 、密度和泊松比 ν 采用经验公式估算。非饱和土边坡土单位重度沿土深度呈非线性分布,因此剪切波速和压缩波速沿土层深度非线性增加:

$$V_s = \sqrt{\frac{Gg}{\gamma_d + \theta_w \gamma_w}} \quad (9)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{G(2 - 2\nu)g}{(\gamma_d + \theta_w \gamma_w)(1 - 2\nu)}} \quad (10)$$

和切向速度分量的乘积,在整个速度不连续面上积分得到:

$$D_c = \omega r_0^2 \int_{\theta_0}^{\theta_h} [c_{\text{cap}}(z_1) + c'] \exp 2(\theta - \theta_0) \tan \phi' d\theta \quad (26)$$

式中, $c_{\text{cap}}(z_1)$ 为微元速度不连续面对应的毛细黏聚力; c' 为黏聚力; z_1 为微元速度不连续面至地下水位的垂距,可表示为:

$$z_1 = r_0 \exp(\theta_h - \theta_0) \tan \phi' \sin \theta_h - r_0 \exp(\theta - \theta_0) \tan \phi' \sin \theta + z_0 \quad (27)$$

根据瑞利阻尼模型,地震振动过程中滑坡体阻尼力的能量耗散可表示为:

$$p(z') = (c' + c_{\text{cap}}(z)) D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^A \left[\frac{C - 2N_{\phi'}^{1/2} \tan \phi' - 1}{N_{\phi'} \tan \phi'} + \frac{B}{A} \right] - (c' + c_{\text{cap}}(z)) \left(D_1 \frac{B}{A} - 2D_2 N_{\phi'}^{-1/2} \right) + \frac{\gamma'(z) z'}{N_{\phi'}} \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^A C - D_2 \right] \quad (30)$$

式中, D_1 为相邻抗滑桩的中心间距; D_2 为相邻桩间的净距离; γ' 为非饱和土单位重度; z' 为距坡面的任意深度; $N_{\phi'}$ 、 A 、 B 和 C 可表示如下:

$$N_{\phi'} = \tan^2(\pi/4 + \phi'/2) \quad (31)$$

$$A = N_{\phi'}^{1/2} \tan \phi' + N_{\phi'} - 1 \quad (32)$$

$$B = 2 \tan \phi' + 2N_{\phi'}^{1/2} + N_{\phi'}^{-1/2} \quad (33)$$

$$C = \exp \left[\left(\frac{d_p}{D_2} \right) N_{\phi'} \tan \phi' \tan \left(\pi/8 + \phi'/4 \right) \right] \quad (34)$$

式中, d_p 为抗滑桩直径(即 $d_p = D_1 - D_2$)。

抗滑桩侧阻力的功率耗散率可同样采用分层方法求得,即:

$$D_p = \omega \sum_{i=1}^n F_{pi} l_i \quad (35)$$

式中, F_{pi} 为单桩提供单位宽度的最大侧阻力; l_i 为桩侧阻力作用点的极径。关于上式的具体计算过程可参考文献[17]。

极限分析基本不等式可表述为优化问题,根据极限分析上限定理,抗滑桩加固非饱和土边坡地震稳定性可基于容重增加原理采用工程实践中常用的安全系数(FOS)来表示:

$$\text{FOS}(t) = \frac{D_c + D_s^h + D_s^v + D_p}{W_{\gamma'} + W_s^{\text{ah}} + W_s^{\text{av}}} \quad (36)$$

借助 MATHEMATICA 商用数值分析软件,本文开发了一种变步长循环算法计算代码搜索安全系数的最小值,搜索过程中几何变量 θ_0 和 θ_h 应满足: $0^\circ < \theta_0 < \theta_b < \theta_h < 180^\circ$ 。边坡几何参数和土体强度指标对半解析方法计算效率有一定的影响,但当滑坡体划分 60 层及以上时,该半解析法可得到令人

$$D_s^h = \omega \sum_{i=1}^m \alpha_0 v_h(t, (H - z_i)) S_i \rho'(z_i + z_0) \quad (28)$$

$$D_s^v = \omega \sum_{i=1}^m \alpha_0 v_v(t, (H - z_i)) S_i \rho'(z_i + z_0) \quad (29)$$

2.3 抗滑桩侧阻力能量耗散

准确评估桩侧阻力是预测桩加固边坡稳定性的基础。对于非饱和土边坡,假定桩周围的土体处于塑性极限状态并满足修正 Mohr-Coulomb 破坏准则。根据 T.Ito 等^[6]的假设,摩擦性土中,作用在刚性桩的侧向土压力可通过下式来估算:

满意的计算结果^[17],因此本文分析中采用该值。

2.4 对比分析

对于给定边坡几何参数和土体物理力学指标的抗滑桩加固边坡: $H = 13.7 \text{ m}$ 、 $\beta = 30^\circ$ 、 $\gamma_{\text{sat}} = 19.63 \text{ kN/m}^3$ 、 $D_1 = 2.25 \text{ m}$ 、 $D_2 = 1.35 \text{ m}$ 、 $L_p = 12.2 \text{ m}$ 。X.P.Li 等^[18]采用极限平衡法给出该边坡的屈服加速系数的临界值(表 1)。可以发现,本文得到的边坡屈服加速度系数与 X.P.Li 等^[18]得到的结果非常相近,表明本文提出的半解析计算方法是合理的,优化程序可搜索到安全系数的最小上限解。计算结果间的差异一是由于采用方法的不同所致,极限平衡法是一种近似方法,并不是严格意义上的上限法或下限法;二是由于滑坡体划分层数所致,本文半解析解与解析解的误差小于 1%^[17]。

表 1 边坡临界屈服加速度系数

Table 1 Yield acceleration coefficients of the slope				
序号	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	文献[18]	本文结果
1	23.94	10	0.20	0.206
2	23.94	15	0.29	0.324
3	18	15	0.23	0.245

3 计算结果

研究吸力、地震动特性和抗滑桩布设参数对边坡地震稳定性的影响,边坡具体尺寸、土体强度参数和地震动参数为: $H = 13.7 \text{ m}$ 、 $\beta = 30^\circ$ 、 $z_0 = 2$

$m, c' = 23.94 \text{ kPa}, \phi' = 10^\circ, \gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3, \gamma_{\text{sat}} = 19.63 \text{ kN/m}^3, q/k_s = 0, D_1 = 4.0 \text{ m}, D_2 = 3.4 \text{ m}, G = 25 \text{ MPa}, \mu = 0.3, k_h = 0.2, k_v = 0.1, f_a = 1.1, T = 0.25 \text{ s}$ 。选用四种典型非饱和土的SWCC,如图3所示^[19],其相关参数见表2。

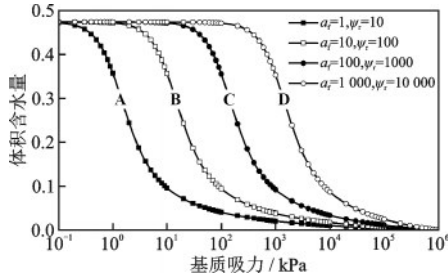


图3 四种典型非饱和土的SWCC

Fig.3 SWCC for four selected unsaturated soils

表2 典型非饱和土SWCC曲线参数

Table 2 Parameters of selected SWCC for unsaturated soils

土体SW-CC种类	a_i/kPa	n_i	m_i	ψ_i/kPa	α/kPa^{-1}	θ_i
A	1	2	1	10	1	0.08
B	10	2	1	100	0.1	0.07
C	100	2	1	1 000	0.01	0.06
D	1 000	2	1	10 000	0.001	0.05

3.1 吸力的影响

图4展示了土体类型对非饱和土边坡动安全系数的影响。可以发现边坡安全系数随地震波的传播呈正弦变化, $t = 0.1 \text{ s}$ 时,安全系数达到峰值。与考虑吸力时边坡的安全系数相比,不考虑吸力会显著低估边坡的稳定性,吸力效应对边坡稳定性的提升效果可达20%~50%。

值得注意的是,四种SWCC差异较大,但吸力效应却相差较小,这主要是因为土中水分含量变化

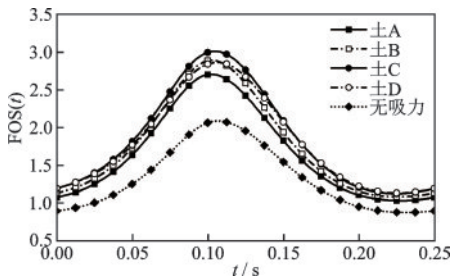


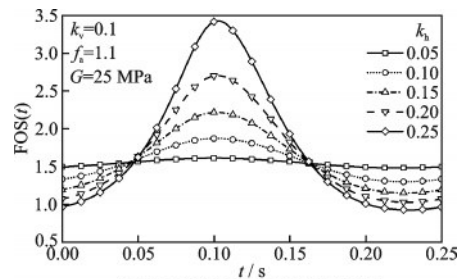
图4 土体类型对非饱和土边坡动安全系数的影响

Fig.4 Influence of soil types on seismic slope stability

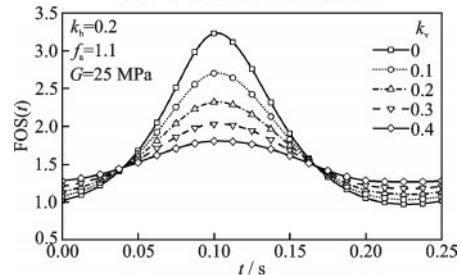
同时影响毛细黏聚力和土单位重度。对于保水性强的边坡,其高毛细黏聚力有利于边坡稳定性的发挥;而对于保水性差的边坡,土单位重度相对较低,这种低重度对边坡稳定性的不利影响也相对较弱。此外可以发现,吸力对边坡稳定性的提升效果还与地震动特性密切相关,当地震波达到峰值时,边坡吸力效应得到显著加强,而当地震波处于峰谷时,边坡吸力效应相对较弱。

3.2 地震动参数的影响

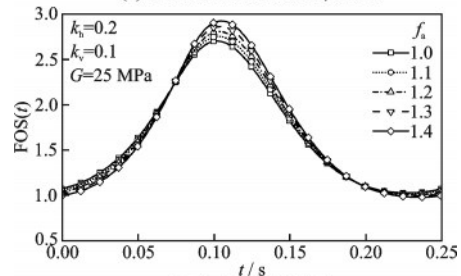
图5为水平和竖向加速度系数、放大系数和土体剪切模量对边坡地震稳定性的影响。边坡安全



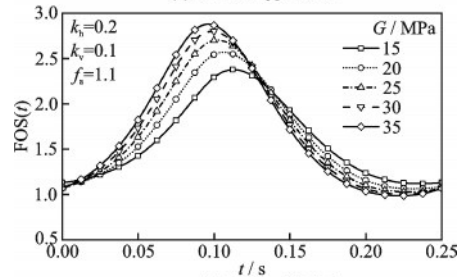
(a) 水平地震加速度系数 k_h 的影响



(b) 竖向地震加速度系数 k_v 的影响



(c) 放大系数 f_a 的影响



(d) 剪切模量 G 的影响

图5 地震动参数对非饱和土边坡动安全系数的影响

Fig.5 Influences of the seismic excitation characterized factors on seismic slope stability

系数的峰值随水平加速度系数的增加迅速增加,谷值随水平加速度系数的增加而略有减小,整个曲线变得更加“瘦高”。竖向加速度系数对边坡稳定性起相反作用,边坡安全系数的峰值随竖向加速度系数的减小而迅速增加,谷值随竖向加速度系数的减小而略有降低,这主要是由于水平和竖向加速度方向决定的。放大系数对边坡地震稳定性的影响稍弱,FOS的幅值随放大系数的增加而略有增加。这是因为放大系数直接决定地震加速度的幅值,导致地震力的增加,进而影响边坡的地震稳定性。土剪切模量决定土中地震波速度的大小,进而影响边坡的地震稳定性,但需要注意的是,随着土体硬度的增加,边坡安全系数的峰值略有增加并向负方向移动。

3.3 抗滑桩设计参数的影响

图6为桩距和桩位对抗滑桩加固效果的影响($t = 0$ s)。抗滑桩加固效果随桩距的增加急剧减小并逐渐趋于定值,当桩距增加至 $D_1/d_p = 4$ 时,抗滑桩加固效果减小至10%,而当桩距继续增加至 $D_1/d_p = 8$ 时,抗滑桩加固效果小于5%,抗滑桩的加固效果几乎可以忽略不计。摩擦角对抗滑桩加固效果有显著影响且与桩距密切相关,对于密排桩边坡,加固效果随摩擦角的增加迅速增加,而对于

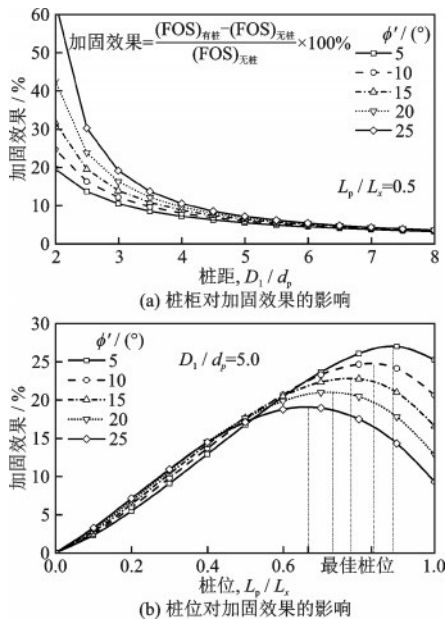


图6 桩距和桩位对抗滑桩加固效果的影响

Fig.6 Influences of pile spacing and pile location on pile reinforcement

疏排桩边坡,摩擦角对加固效果的影响可以忽略不计,这是由于作用在抗滑桩上的主动土压力与土的摩擦特性正相关的缘故。

抗滑桩加固效果随桩位的增加先增后减,存在最佳桩位。当抗滑桩埋设于边坡中上部时,抗滑桩的加固效果最为显著。最佳桩位与摩擦角存在一定的相关性,对于粗粒土边坡,其最佳桩位靠近边坡中部,而当边坡处于不排水条件下时,最佳桩位向边坡肩部靠近,相应的加固效果也有所增加。 $\phi' = 25^\circ$ 时,最佳桩位 $L_p/L_x = 0.66$,相应的加固效果为18.9%,而当摩擦角减小至 $\phi' = 5^\circ$ 时,最佳桩位 $L_p/L_x = 0.88$,相应的加固效果增加至26.8%。

3.4 临界滑动面

图7展示了吸力、地震动、桩距和桩位对临界滑动面的影响。可以发现,吸力效应对边坡临界滑动面的影响较弱,不考虑吸力时的滑坡体后缘向坡肩

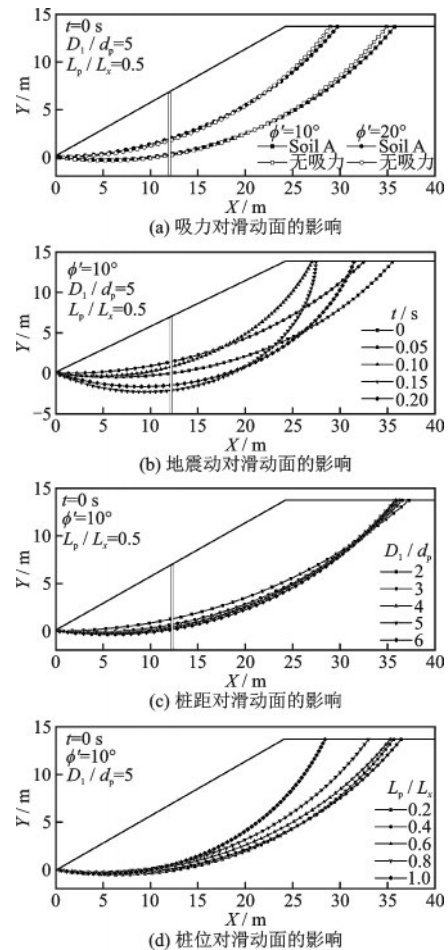


图7 吸力、地震动、桩距和桩位对临界滑动面的影响

Fig.7 Influences of suction, seismic action, pile spacing and pile location on critical slip surface

靠近;摩擦角对临界滑动面的影响较强,随摩擦角的增加,边坡临界滑动面将会变浅,边坡将发生浅层滑动现象。地震动对边坡临界滑动面的影响尤为显著,当地震波达到峰值时,临界滑动面逐渐变浅,滑坡体后缘向坡肩靠近,滑坡体的体积逐渐减小,地震波达到峰值后,临界滑动面逐渐加深,出现深层滑动现象。桩距对临界画面的影响较弱,边坡临界滑动面随桩距的增加而逐渐加深,桩位对临界画面的影响较强,当桩位靠近坡顶时,边坡临界滑动面将会变浅,滑坡体后缘更加靠近坡肩。

4 结 论

基于极限分析上限原理和拟动力法研究了抗滑桩加固非饱和土边坡的地震稳定性。提出一种改进水平片分法,可有效考虑土中水分含量变化对边坡稳定性的影响,揭示边坡地震响应规律。通过典型边坡的地震稳定性分析,主要结论如下:

(1)吸力对边坡稳定性的提升效果可达20%~50%,不考虑吸力会显著低估边坡的稳定性。吸力对边坡稳定性的提升效果不仅取决于边坡土体类型,还与地震动特性密切相关,震波达到峰值时吸力效应得到显著加强,当地震波处于峰谷时,边坡吸力效应相对较弱。

(2)地震加速度系数对边坡地震稳定性影响较大,安全系数幅值随水平加速度系数的增加迅速增加,随竖向加速度系数的增加迅速急剧减小,随放大系数的增加而略有增加,随剪切模量的增加,安全系数的峰值略有增加并向负方向移动。

(3)桩距和桩位对抗滑桩加固效果有显著的影响并与土摩擦角密切相关,当桩距 $D_1/d_p \leq 4$ 时,抗滑桩的加固效果非常明显且随摩擦角增加迅速增加,而当相邻桩之间的间隔 $D_1/d_p > 4$ 时,抗滑桩的加固效果明显减弱,几乎不受摩擦角影响。最佳桩位位于边坡中上部,且随摩擦角的增加而逐渐减小,对应的加固效果也有所降低。

(4)吸力效应和桩距对桩加固边坡临界滑动面的影响较小,地震动和桩位对滑动面的影响较为显著,地震波接近峰值时,临界滑动面逐渐变浅,滑坡体体积逐渐减小,出现“浅层”滑动现象。当抗滑桩设置于边坡中上部时,滑动面将会变浅,同样出现“浅层”滑动现象。

参考文献:

- [1] 刘康琦,刘红岩.地震作用下土石混合体边坡稳定性分析研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(1):224-230.
Liu K Q, Liu H Y. Stability analysis of soil-rock mixture slope under earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 224-230. (in Chinese)
- [2] Steedman R S, Zeng X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall[J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 103-112.
- [3] Zeng X, Steedman R S. On the behavior of quay walls in earthquakes[J]. Geotechnique, 1993, 43: 417-431.
- [4] 饶平平,童磊磊,师昀巍.基于拟动力法的抗滑桩加固边坡地震稳定性分析[J].世界地震工程,2020,36(1):189-196.
Rao P P, Tong L L, Shi Y W. Seismic stability analysis of slopes reinforced with anti-slide piles based on pseudo-dynamic method [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 189-196. (in Chinese)
- [5] 傅永求.基于拟动力方法的加固边坡稳定性分析[J].路基工程,2022(1):134-138.
Fu Y Q. Analysis on stability of reinforced slopes based on the pseudo-dynamic method[J]. Subgrade Engineering, 2022(1): 134-138. (in Chinese)
- [6] Ito T, Matsui T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles [J]. Soils and Foundations, 1975, 15(4): 43-59.
- [7] 郑刚,赵佳鹏,周海祚,等.抗滑桩加固含软弱夹层边坡的静动力极限分析[J].重庆大学学报,2019,42(11):47-55.
Zheng G, Zhao J P, Zhou H Z, et al. Stability analysis of weak interlayer slopes reinforced with piles under seismic loads [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(11): 47-55. (in Chinese)
- [8] 董建华,吴晓磊,连博,等.预应力锚索抗滑桩滑坡防治结构的动力计算方法研究[J].土木工程学报,2022,55(11):72-82.
Dong J H, Wu X L, Lian B, et al. Study on dynamic calculation method for landslide prevention structure of anti-slide pile with pre-stressed anchor cable [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(11): 72-82. (in Chinese)

- [9] 宁帅, 庄妍, 崔晓艳, 等. 各向异性和非均质性的抗滑桩边坡稳定性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(4): 529-535.
Ning S, Zhuang Y, Cui X Y, et al. Stability analysis of slope reinforced with piles in anisotropic and heterogeneity soils[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(4): 529-535. (in Chinese)
- [10] Vanapali S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.
- [11] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [12] Fredlund D G, Rahardjo H, Fredlund M D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[M]. New Jersey: Wiley, Hoboken, 2012.
- [13] Fredlund D G, Xing A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [14] Bishop A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 39: 859-863.
- [15] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [16] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [17] Wang L, Sun D A, Yao Y P, et al. Kinematic limit analysis of three-dimensional unsaturated soil slopes reinforced with a row of piles[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 120: 103428.
- [18] Li X P, Su L, He S M, et al. Limit equilibrium analysis of seismic stability of slopes reinforced with a row of piles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(8): 1241-1250.
- [19] Zhang L L, Fredlund D G, Fredlund M D, et al. Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(12): 1384-1398.

(本文编辑:池营营)



(上接第 1385 页)

- [27] Karanci E, Betti R. Modeling corrosion in suspension bridge main cables. II: Long-term corrosion and remaining strength[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(6):04018026.
- [28] 王子挺, 朱劲松. 大跨度地锚式悬索桥弹塑性极限承载力分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(7):78-85, 184.
Wang Z T, Zhu J S. Elastoplastic ultimate bearing capacity analysis of long-span ground anchored suspension bridge[J]. Highway Transportation Technology, 2023, 40(7): 78-85, 184. (in Chinese)
- [29] 成新. 自锚式悬索桥极限承载力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- Cheng X. Analysis of ultimate bearing capacity of self-anchored suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [30] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [31] 邱文亮, 姜萌, 张哲. 混凝土自锚式悬索桥极限承载力影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(8): 128-131.
Qiu W L, Jiang M, Zhang Z. Influence factors of ultimate bearing capacity of self-anchored concrete suspension bridge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(8): 128-131. (in Chinese)