

地震作用下顺层岩质边坡锚固特性的拟动力分析

周 炜, 李海波, 刘亚群, 柴少波, 刘景森

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 实践证明锚杆对边坡加固效果明显, 但目前对地震作用下岩质边坡的锚固机制研究还不够深入, 因此研究锚固边坡的抗震性能对于边坡锚固的优化设计具有重要意义。采用拟动力法模拟地震加速度时程曲线的输入, 并基于极限分析上限定理推导地震作用下顺层岩质边坡临界无量纲总锚固力及锚固边坡稳定安全系数的表达式。通过算例对比分析锚杆倾角、节理面倾角、地震加速度影响系数、地震加速度放大系数、节理黏聚力与内摩擦角对边坡临界状态下总锚固力的影响。研究结果表明: 边坡临界状态下锚固力与锚杆倾角、节理内摩擦角、水平向地震加速度影响系数及地震加速度放大系数正相关, 与节理面倾角、竖向地震加速度影响系数及节理黏聚力负相关; 随着节理内摩擦角的增大, 水平向地震加速度影响系数及地震加速度放大系数对边坡临界状态下锚固力的影响越明显, 而锚杆倾角、节理面倾角、竖向地震加速度影响系数及节理黏聚力的影响则逐渐减弱。

关键词: 边坡工程; 地震力; 拟动力法; 极限分析上限定理; 总锚固力

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 2-3570-07

Pseudo-dynamic analysis of anchored characteristics of layered rock slopes subjected to seismic loads

ZHOU Wei, LI Haibo, LIU Yaqun, CHAI Shaobo, LIU Jingsen

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Anchoring technology has played an important role in slope reinforcements in engineering practice. However, the failure mechanism of anchored slopes subjected to seismic loads is not fully understood at present. Therefore, the study of dynamic behavior of anchored slopes is of great significance for the optimal design of slope reinforcements. In this paper, the pseudo-dynamic method is used to simulate the input of acceleration-time history. Based on the upper bound theorem of limit analysis, the mathematical expressions of the required reinforcement force when the layered rock slope under seismic loads is in critical status and the factor of safety of it are then deduced. Finally, the parametric studies on the influence of the dip angle of bolt, the dip angle of joint surface, seismic acceleration coefficients, seismic amplification factor, joint cohesion, joint friction angle on the required reinforcement force when the slope is in critical status are discussed. The results indicate that the stability of layered rock slope is influenced to some extents by all the parameters mentioned above. In addition, with the increase of joint friction angle, the horizontal seismic acceleration coefficient and seismic amplification factor have greater effects on the required reinforcement force, while the dip angle of bolt, the dip angle of joint surface, the

收稿日期: 2015-12-16; **修回日期:** 2016-01-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51025935); 国家自然科学基金资助项目(51174190)

Project supported by National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(Grant No. 51025935) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51174190)

作者简介: 周 炜(1987-), 男, 2009年毕业于华中科技大学道路桥梁与渡河工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地震边坡稳定性分析方面的研究工作。E-mail: zhouwei0720@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1742

vertical seismic acceleration coefficient and joint cohesion have less influence on it.

Key words : slope engineering ; seismic loads ; pseudo-dynamic analysis ; the upper bound theorem of limit analysis ; total reinforcement force

1 引 言

地震荷载作用下的边坡破坏威胁到人们生命、财产以及基础设施的安全,尤其是在 2008 年四川汶川发生罕见的 8.0 级地震以来,这一岩土工程灾害问题备受关注。锚杆是一种常用的支护结构,在我国边坡支护工程中有广泛的应用,但是,对其抗震设计的理论研究却并不成熟,因此,有必要展开系列而深入的研究工作,为锚固边坡的抗震设计提供参考。近年来,国内外许多学者做了大量的理论和实验研究,针对锚固边坡的稳定性分析提出了许多的理论和方法。锚固边坡在静力情况下的稳定性研究主要采用:极限平衡法^[1-2]、上限分析法^[3-4]、下限分析法^[5]以及滑移线法^[6-7]。考虑地震荷载作用下,H. I. Ling 等^[8]采用拟静力法结合极限平衡法得出了水平地震荷载作用下锚固边坡的稳定性及永久位移理论计算公式。随后,H. I. Ling 和 D. Leshchinsky^[9]在 H. I. Ling 等^[8]研究的基础上考虑了竖向地震荷载作用效果。H. Nouri 等^[10]采用水平条分法分析了地震荷载作用下加筋土边坡的稳定性。M. Jahanandish 和 A. Keshavarz^[11]采用滑移线法对锚固边坡抗震承载能力进行了分析。R. L. Michalowsko^[12-13]采用极限动力法计算得出了地震荷载作用下防止边坡破坏所需锚固力。拟静力法被广泛的应用于当前边坡稳定性的研究,该法假定地震荷载与时间无关,忽略了地震惯性力的动力特征^[14]。然而地震力是随时间和空间变化的,地震加速度不仅随着时间 t 和竖直高度 z 变化,也和地震放大系数 f_a 有关^[15]。拟静力法忽略了以上问题,因此局限性很大,不能满足工程要求。为克服拟静力法的不足,R. S. Steedman 等^[16-17]提出了拟动力法,并通过离心机试验验证了拟动力法的合理性。S. S. Nimbalkar 等^[18]采用拟动力法研究了加筋土挡墙曲线破裂面的边坡稳定性。P. Ghosh^[19]采用该法研究了倾斜挡土墙的土压力分布。马少俊等^[20]采用拟动力法推导了地震作用下挡土墙抗滑稳定安全系数的表达式,得出挡土墙抗滑稳定性随墙背倾斜角、墙土摩擦角及填土内摩擦角增大而增大的结论。周小平等^[21]采用拟动力法对临水挡土墙进行稳定性分

析,确定了挡土墙和墙后填土所受的阻尼力和惯性力,获得地震荷载作用下挡土墙的被动土压力、抗滑和抗倾覆稳定性系数的封闭形式解析解。何思明等^[22]采用拟动力法、薄层分析法并结合极限平衡理论,推导了地震荷载作用下挡土墙土压力随地震加速度时程变化的表达式。

本文以锚固边坡为研究对象,基于极限分析上限定理,采用拟动力分析法,从能量角度提出了锚固体系的安全系数及锚固力的计算方法,研究了锚杆倾角、节理面倾角、地震放大效应、地震加速度影响系数、节理黏聚力与内摩擦角等因素对锚固边坡稳定性及所需锚固力的影响。

2 模型建立与分析方法

2.1 极限分析上限定理

极限分析是求解理想刚塑体的极限荷载的一种方法^[23],通过上限定理和下限定理,可以近似的得到极限荷载值。极限分析避开了材料的弹塑性变形过程,直接求解极限状态下的极限荷载及其分布,大大简化问题的求解,在工程中得到了广泛的应用。极限分析上限定理要求对于任意机动容许的破坏机制,内能损耗率不小于外力功率,可用下式表示:

$$\int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV - \int_S T_i v_i dS + \int_V X_i v_i dV \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: X_i 为体积力, T_i 为表面力, v_i 为机动容许的速度场, ε_{ij} 为与 v_i 相容的应变率场, σ_{ij} 为 X_i 与 T_i 关联的应力场, S 为表面力作用面积, V 为破坏的岩体体积。

对于受地震荷载作用的边坡锚固体系,外力做功由滑动岩体的重力做功、地震力做功和锚杆拉力做功三部分组成,而内能耗散则仅发生在沿滑动面的速度间断面上。

2.2 拟动力法

目前拟动力法多采用正弦波来模拟地震加速度的输入,水平和竖直方向的正弦加速度随着高度 z 、时间 t 和地震加速度放大系数 f_a 变化的表达式^[21]分别为

$$\alpha_h(z, t) = \left[1 + \frac{H-z}{H}(f_a - 1) \right] k_h g \left[\sin \omega \left(t - \frac{H-z}{v_s} \right) \right] \quad (2)$$

$$\alpha_v(z, t) = \left[1 + \frac{(H-z)}{H}(f_a - 1) \right] k_v g \sin \left[\omega \left(t - \frac{H-z}{v_p} \right) \right] \quad (3)$$

式中： $\alpha_h(z, t)$ ， $\alpha_v(z, t)$ 分别为水平和竖直方向地震加速度； k_h ， k_v 分别为水平和竖直方向的地震加速度系数； H 为边坡坡高； g 为地震加速度； ω 为角加速度， $\omega = 2\pi/T$ ， T 为地震的卓越周期； v_s 和 v_p 分别为水平向和竖直向地震波在岩体中的传播速度，可表示为

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (4)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{G(2-2\mu)}{\rho(1-2\mu)}} \quad (5)$$

式中： G 为剪切模量， ρ 为密度， μ 为泊松比。

2.3 计算模型及功率分析

建立如图 1 所示岩质边坡锚固体系模型，块体 ABC 由于受到地震荷载作用，沿着节理面 AC 滑动形成刚塑性楔体 ABC ，其坡高为 H ，边坡和节理的倾角分别为 δ 和 $\delta - \theta$ ，锚杆与水平方向夹角为 α ，节理的黏聚力和内摩擦角为 c 和 ϕ 。

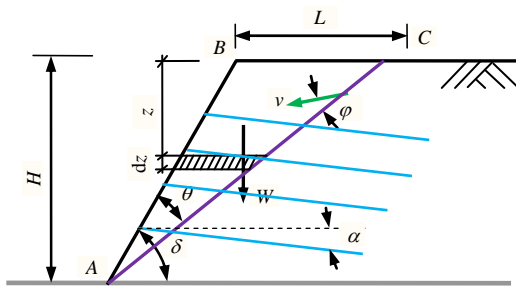


图 1 锚固边坡计算模型

Fig.1 Model for reinforced slope

(1) 外力功率的计算

对受地震荷载作用的岩质边坡锚固体系而言，作用在滑体上的外力功率由滑体重力、锚杆的抗滑力和地震荷载提供(见图 1)。通过微分和几何分析可得各外力功率表达式。

根据几何关系可得滑体质量：

$$M = \frac{\rho \sin \theta}{2 \sin(\delta - \theta) \sin \delta} H^2 \quad (6)$$

因此，滑体自重所做的外力功率为

$$P_G = \frac{\rho g \sin \theta}{2 \sin(\delta - \theta) \sin \delta} H^2 v \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \quad (7)$$

式中： P_G 为滑体自重所做的外力功率， v 为滑体滑

动时速度。

锚杆抗滑力所做功率为

$$P_F = \sum_{i=1}^n T_i v [\sin(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \cos \alpha + \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \sin \alpha] \quad (8)$$

式中： P_F 为锚杆抗滑力所做功率， n 为锚杆数量， T_i 为第 i 根锚杆轴力。

根据几何关系可以求得阴影部分质量：

$$m_{(z)} = \rho(H-z)[\cot(\delta - \theta) - \cot \delta] dz \quad (9)$$

式中： z 为阴影部分微元体至坡顶距离， dz 为阴影部分微元体高度。

所以水平向地震作用力可表示为

$$Q_h(t) = \int_0^H m_{(z)} \alpha_h(z, t) = \frac{k_h \rho g [\cot(\delta - \theta) - \cot \delta]}{4\pi^3} \left[(H\lambda)x_1 + \frac{\lambda^2}{2} x_2 + \frac{\lambda^3}{H} x_3 \right] \quad (10)$$

其中，

$$x_1 = 2\pi^2 f_a \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda} \right) \right]$$

$$x_2 = 2\pi \left\{ (2f_a - 1) \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda} \right) \right] - \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right\}$$

$$x_3 = (f_a - 1) \left\{ \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) - \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H}{\lambda} \right) \right] \right\}$$

$$\lambda = Tv_s$$

竖直向地震作用力可表示为

$$Q_v(t) = \int_0^H m_{(z)} \alpha_v(z, t) = \frac{k_v \rho g [\cot(\delta - \theta) - \cot \delta]}{4\pi^3} \left[(H\eta)y_1 + \frac{\eta^2}{2} y_2 + \frac{\eta^3}{H} y_3 \right] \quad (11)$$

其中，

$$y_1 = 2\pi^2 f_a \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H}{\eta} \right) \right]$$

$$y_2 = 2\pi \left\{ (2f_a - 1) \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H}{\eta} \right) \right] - \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right\}$$

$$y_3 = (f_a - 1) \left\{ \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) - \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{H}{\eta} \right) \right] \right\}$$

$$\eta = Tv_p$$

因此，地震力所做功率为

$$P_D = Q_h v \sin(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) - Q_v v \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \quad (12)$$

(2) 节理面的内部能量耗散

在极限状态下，滑体 ABC 沿节理面 AC 能量耗散的功率为

$$P_J = \frac{cH}{\sin(\delta - \theta)} v \cos \varphi \quad (13)$$

(3) 边坡稳定性系数定义

根据极限分析上限定理可知，边坡的稳定程度取决于外力功与内能耗散的关系，故可将边坡稳定性系数 K 定义为

$$K = \frac{P_J}{P_G + P_D - P_F} \quad (14)$$

将式(7)，(8)，(12)，(13)代入式(14)可得

$$K = \frac{cH \cos \varphi}{\sin(\delta - \theta)} \left/ \left\{ \frac{\rho g \sin \theta}{2 \sin(\delta - \theta) \sin \delta} H^2 \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) + Q_h \sin(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) - Q_v \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) - \sum_{i=1}^n T_i [\sin(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \cos \alpha + \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \sin \alpha] \right\} \right. \quad (15)$$

(4) 临界总锚固力

如 H. I. Ling 等^[8]研究，令 k 为在地震荷载作用下保持边坡稳定的最小总锚固力(量纲一)，即

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{0.5 \rho g H^2} \quad (16)$$

由极限分析上限定理可知：

$$P_D + P_G = P_F + P_J \quad (17)$$

此时边坡稳定性系数 K = 1，结合式(7)，(8)，(12)，(13)可得在地震荷载作用极限状态下所需 k 可表示为

$$k = \left[Q_h \sin(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) - Q_v \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) + \frac{\rho g \sin \theta H^2 \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi)}{2 \sin(\delta - \theta) \sin \delta} - \frac{cH \cos \varphi}{\sin(\delta - \theta)} \right] \left/ \left[0.5 \rho g H^2 [\sin(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \cos \alpha + \cos(90^\circ - \delta + \theta + \varphi) \sin \alpha] \right] \right. \quad (18)$$

3 算例分析

由式(18)可知，地震荷载作用下边坡所需临界锚固力的大小与锚杆倾角、节理面倾角、地震放大效应、地震加速度影响系数、节理黏聚力、节理内摩擦角等因素相关。为研究上述因素对临界锚固力大小的影响，进行如下算例对比分析。在算例中假设边坡坡高 H = 50 m，边坡倾角为 δ = 60°，岩体密度 ρ = 2 700 kg/m³，重力加速度 g = 10 m/s²，泊松比 μ = 0.25，剪切模量 G = 10 GPa，地震周期 T = 0.2 s。

3.1 锚杆倾角的影响

根据规范^[24]：倾斜锚杆的倾角不应小于 13°，并不得大于 45°，以 15°~35°为宜，本文取锚杆与水平方向夹角分别为 α = 15°，25°，35°三种情况进行对比分析。假设地震加速度放大系数 f_a = 1.2^[21]，节理黏聚力 c = 30 kPa，水平向地震加速度系数 k_h = 0.2，竖向地震加速度系数 k_v = 0.5k_h，节理面倾角 β = δ - θ = 40°，边坡所需临界量纲一的总锚固力 k 结果如图 2 所示。由图 2 可知：当节理内摩擦角 φ 取值从 0°~35°递增时，边坡所需临界无量纲总锚固力 k 呈现递减规律；锚杆倾角从 α = 15°~35°递增时，k 呈现递增规律。例如当 φ = 0°时，α 从 15°~35°递增时，k 从 0.567 增大到 1.257，增长幅度达 121.61%；在 φ = 25°时，α 从 15°变化到 35°，k 从 0.166 增大到 0.223，增长幅度达 34.73%；在 φ = 35°时，α 从 15°变化到 35°，k 从 0.065 增大到 0.080，增长幅度达 22.67%。由此可见，当 φ 越小，α 越大时，边坡所需总锚固力越大；随着 φ 增大，α 对 k 的影响逐渐减小。

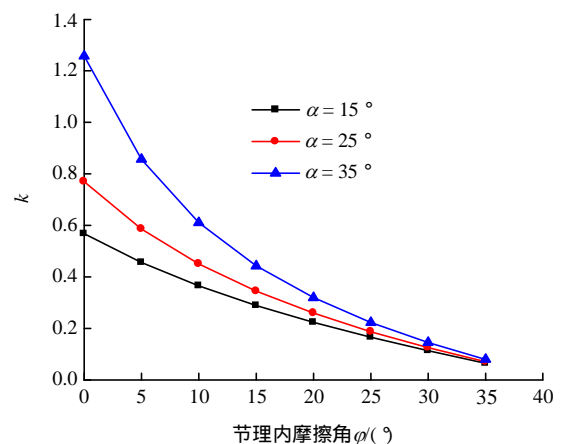


图 2 锚杆倾角 α 对总锚固力 k 的影响
Fig.2 Effects of the dip angle α of bolt on required non-dimensional anchorage force k

3.2 节理面倾角的影响

图 3 表示不同节理面倾角 β 分别为 30° , 40° , 50° 时边坡所需 k 随节理内摩擦角变化曲线, 其中, 水平向地震加速度系数 $k_h = 0.2$, 竖向地震加速度系数 $k_v = 0.5k_h$, 地震加速度放大系数 $f_a = 1.2$, 节理黏聚力 $c = 30 \text{ kPa}$, 锚杆倾角 $\alpha = 20^\circ$ 。由图 3 可知: 当节理内摩擦角 φ 取值从 0° 增加到 35° 时, 边坡所需临界无量纲总锚固力 k 呈现单调递减规律, 并且节理面倾角 β 对其变化率产生了明显影响。结果表明, 当节理面倾角增大时, 无量纲总锚固力随节理内摩擦角的减小趋势逐渐减小, 曲线趋于平缓, 即此时内摩擦角对 k 的影响程度相对减弱。

当节理面倾角从 $\beta = 30^\circ \sim 50^\circ$ 递增时, k 在一定区间 ($\varphi = 0^\circ \sim 21.5^\circ$) 呈现递减规律。例如, 当 $\varphi = 0^\circ$ 时, β 从 30° 变化到 50° , k 从 0.816 减小到 0.392 ; 而当 $\varphi = 35^\circ$ 时, β 从 30° 变化到 50° , k 从 0.001 增大到 0.050 ; $\beta = 30^\circ$ 曲线与 $\beta = 40^\circ$ 曲线相交, 交点约在 $\varphi = 21.5^\circ$ 附近, $\beta = 30^\circ$ 曲线与 $\beta = 50^\circ$ 曲线相交, 交点约在 φ 为 28.8° 附近。由此可见, 在一定区间 ($\varphi = 0^\circ \sim 21.5^\circ$) 内, 当 φ 和 β 越大时, 边坡所需总锚固力越小, 边坡越安全。

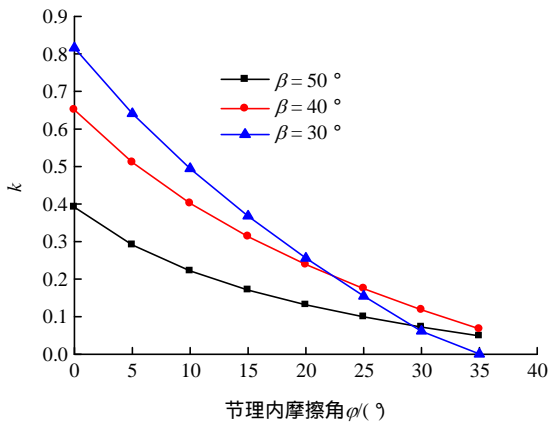


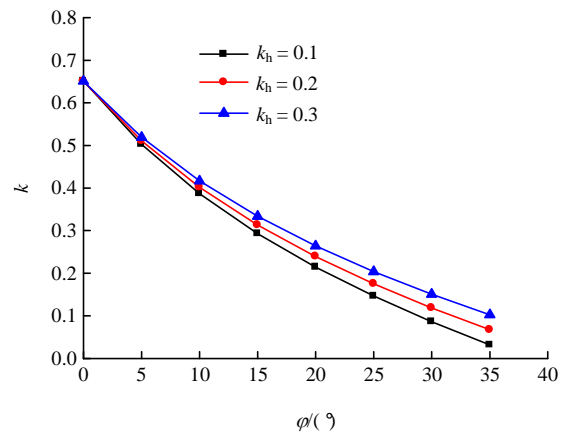
图 3 节理面倾角 β 对总锚固力 k 的影响

Fig.3 Effects of the dip angle of joint surface on required non-dimensional anchorage force

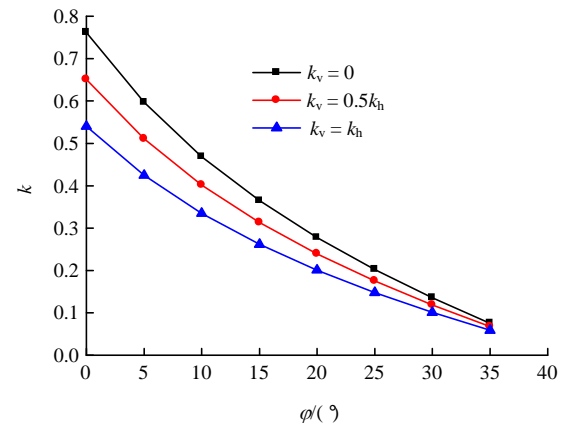
3.3 地震加速度影响系数的影响

当水平向、竖向地震加速度系数取不同值时, 边坡所需 k 随节理面内摩擦角变化关系如图 4 所示。

如图 4(a)所示, 此时假设竖向地震加速度系数 $k_v = 0.5k_h$, 地震加速度放大系数 $f_a = 1.2$, 节理黏聚力 $c = 30 \text{ kPa}$, 节理面倾角 $\beta = 40^\circ$, 锚杆倾角 $\alpha = 20^\circ$ 。当节理内摩擦角 φ 取值从 $0^\circ \sim 35^\circ$ 递增时, 边坡所需 k 呈现递减规律; 当水平向地震加速度 k_h



(a) 水平向地震加速度影响系数对总锚固力的影响



(b) 竖向地震加速度影响系数对总锚固力的影响

图 4 地震加速度影响系数对总锚固力的影响

Fig.4 Effects of seismic acceleration coefficients on required non-dimensional anchorage force

取值由 0.1 递增到 0.3 时, k 呈现递增规律。例如当 $\varphi = 5^\circ$ 时, k_h 从 0.1 变化到 0.3 , k 从 0.502 增大到 0.519 , 增长幅度达 3.26% ; 当 $\varphi = 35^\circ$ 时, k_h 从 0.1 变化到 0.3 , k 从 0.032 增大到 0.103 , 增长幅度达 221.36% 。由此可见, 当 φ 越小, k_h 越大时, 边坡所需总锚固力越大, 且随着 φ 增大, k_h 对 k 的影响越明显。

如图 4(b)所示, 此时假设水平向地震加速度系数 $k_h = 0.2$, 地震加速度放大系数 $f_a = 1.2$, 节理黏聚力 $c = 30 \text{ kPa}$, 节理面倾角 $\beta = 40^\circ$, 锚杆倾角 $\alpha = 20^\circ$ 。当节理内摩擦角 φ 取值从 0° 到 35° 递增时, 边坡所需 k 呈现递减规律; 当水平向地震加速度 k_v 取值由 0 递增到 k_h 时, k 呈现递减规律。例如当 $\varphi = 0^\circ$ 时, k_v 从 0 变化到 k_h , k 从 0.762 减小到 0.540 , 降低幅值为 0.222 ; 当 $\varphi = 35^\circ$ 时, k_v 从 0 变化到 k_h , k 从 0.076 减小到 0.059 , 降低幅值为 0.017 。由此可见, 当 φ 和 k_v 越大时, 边坡所需总锚固力越

小，且 φ 越小， k_v 对 k 的影响越明显。

3.4 地震加速度放大系数的影响

当地震加速度放大系数 f_a 取不同值时，可得边坡所需 k 与节理内摩擦角 φ 的关系如图 5 所示。此时假设 $k_h = 0.2$ ， $k_v = 0.5k_h$ ， $c = 30$ kPa， $\alpha = 20^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ 。由图 5 可知：当 φ 取值从 0° 变化到 35° 时，边坡所需 k 呈现递减规律。当 φ 取值为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 范围内， f_a 对 k 的影响不明显；当 φ 取值为 $10^\circ \sim 35^\circ$ 范围内， f_a 对 k 有较明显影响，此时地震加速度放大系数 f_a 取值从 1 递增到 1.8， k 呈现递增规律。例如当 $\varphi = 15^\circ$ 时， f_a 从 1 变化到 1.8， k 从 0.309 增大到 0.325，增长幅度为 4.93%；当 $\varphi = 35^\circ$ 时， f_a 从 1 变化到 1.8， k 从 0.058 增大到 0.094，增长幅度为 61.20%。由此可见，当 φ 越大， f_a 越小时，边坡所需总锚固力越小，边坡越安全，且 φ 越大， f_a 对 k 的影响越明显。

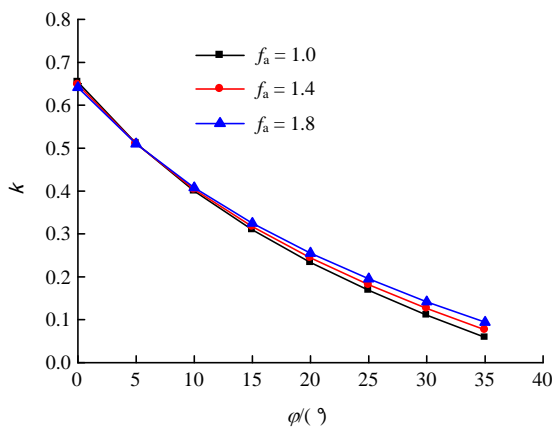


图 5 地震加速度放大系数 f_a 对总锚固力的影响
Fig.5 Effects of amplification factor on required non-dimensional anchorage force

3.5 节理黏聚力的影响

当节理黏聚力 c 取不同值时，可得边坡所需 k 随节理内摩擦角 φ 变化规律如图 6 所示。此时假设 $k_h = 0.2$ ， $k_v = 0.5k_h$ ， $f_a = 1.2$ ， $\alpha = 20^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ 。由图 6 可知：当 φ 取值从 0° 变化到 35° 时，边坡所需 k 呈现递减规律；当节理黏聚力 c 取值从 10 kPa 递增到 30 kPa 时， k 呈现递减规律。例如当 $\varphi = 0^\circ$ 时， c 从 10 kPa 变化到 30 kPa， k 从 0.743 减小到 0.651，降低幅度为 12.41%；例如当 $\varphi = 35^\circ$ 时， c 从 10 kPa 变化到 30 kPa， k 从 0.109 减小到 0.067，降低幅度为 38.25%。由此可见，当 φ 越大， c 越大时，边坡所需总锚固力越小，边坡越安全；且 φ 越大， c 对 k 的影响越小。

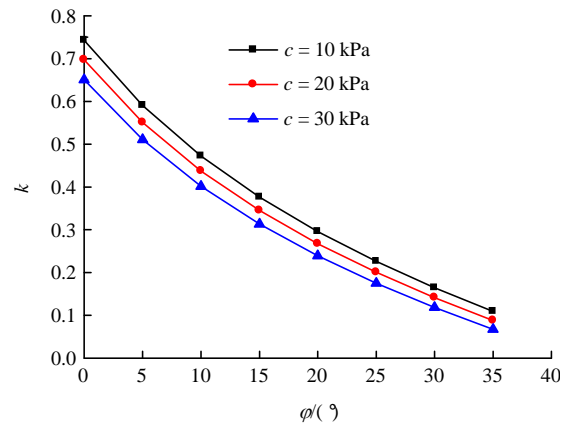


图 6 节理黏聚力 c 对总锚固力 k 的影响
Fig.6 Effects of joint cohesion c on non-dimensional anchorage force k

4 结 论

本文采用拟动力法结合极限分析上限定理，采用正弦波来模拟地震波的输入，对顺层岩质边坡的锚固特性进行分析。考虑锚杆倾角、节理面倾角、地震放大效应、地震加速度影响系数、节理黏聚力的影响，推导得出地震作用下顺层岩质边坡所需总锚固力 k (量纲一) 及锚固边坡稳定安全系数的计算公式，进而对地震荷载作用下顺层岩质边坡锚固特性进行参数化研究。得到以下结论：

- (1) 锚杆倾角对边坡所需锚固力大小有一定影响，但该影响随着节理内摩擦角的增大而逐渐减小，且锚杆倾角越大减小的幅度越快。
- (2) 节理面倾角、黏聚力与边坡临界状态锚固力大小负相关，而节理内摩擦角与其正相关。节理面倾角对边坡所需锚固力的影响随着节理内摩擦角的增大而逐渐减小，且节理面倾角越小减小的幅度越快。节理面内黏聚力对边坡所需锚固力的影响随着节理内摩擦角的增大而逐渐减小。

- (3) 水平向地震加速度影响系数和地震加速度放大系数与边坡临界状态所需锚固力大小正相关，而竖向地震加速度与其负相关。随着节理内摩擦角的增大，水平向地震加速度、地震加速度放大系数对边坡临界状态所需锚固力的影响越明显，而竖向地震加速度对边坡临界状态锚固力的影响则趋弱。

参考文献(References)：

- [1] JEWELL R A. Revised design charts for steep reinforced slopes[C] // SHERCLIFF D A ,ed. Reinforced Embankments :Theory and Practice.

- [S.1.] : Thomas Telford Publishing , 1990 : 1 – 30.
- [2] SRBULOV M. Analysis of stability of geogrid reinforced steep slopes and retaining walls[J]. *Computers and Geotechnics* , 2001 , 28(4) : 255 – 268.
- [3] DE BUHAN P ,MANGIACACCHI R ,NOVA R ,et al. Yield design of reinforced earth walls by a homogenization method[J]. *Geotechnique* , 1989 , 39(2) : 189 – 201.
- [4] PORBAHA A , ZHAO A , KOBAYASHI M , et al. Upper bound estimate of scaled reinforced soil retaining walls[J]. *Geotextiles and Geomembranes* , 2000 , 18(6) : 403 – 413.
- [5] SINGH D N , BASUDHAR P K. Determination of the optimal lower-bound-bearing capacity of reinforced soil-retaining walls by using finite elements and non-linear programming[J]. *Geotextiles and Geomembranes* , 1993 , 12(7) : 665 – 686.
- [6] MICHALOWSKI R L , ZHAO A. Continuum versus structural approach to stability of reinforced soil[J]. *Journal of Geotechnical Engineering* , 1995 , 121(2) : 152 – 162.
- [7] ZHAO A , MONTANELLI F , RIMOLDI P. Design of reinforced foundations by the slip-line method[C]// *Proceedings of the Earth Reinforcement*. Ochiai , Japan : [s.n.] , 1996 : 709 – 714.
- [8] LING H I , LESHCHINSKY D , PERRY E B. Seismic design and performance of geosynthetic-reinforced soil structures[J]. *Geotechnique* , 1997 , 47(5) : 933 – 952.
- [9] LING H I , LESHCHINSKY D. Effect of vertical acceleration on seismic design of geosynthetic-reinforced soil structure[J]. *Geotechnique* , 1998 , 48(3) : 347 – 373.
- [10] NOURI H , FAKHER A , JONES C. Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls[J]. *Geotextiles and Geomembranes* , 2006 , 24(3) : 175 – 187.
- [11] JAHANANDISH M , KESHAVARZ A. Seismic bearing capacity of foundations on reinforced soil slopes[J]. *Geotextiles and Geomembranes* , 2005 , 23(1) : 1 – 25.
- [12] MICHALOWSKI R L. Soil reinforcement for seismic design of geotechnical structures[J]. *Computers and Geotechnics* , 1998 , 23(1) : 1 – 17.
- [13] AUSILIO E , CONTE E , DENTE G. Seismic stability analysis of reinforced slopes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 2000 , 19(3) : 159 – 172.
- [14] 程亚男, 孙树林, 阮晓波, 等. 加筋土挡墙地震稳定性的拟动力分析[J]. *岩土力学* , 2013 , 34(12) : 3 573 – 3 579.(CHENG Yanan , SUN Shulin , RUAN Xiaobo , et al. Pseudo-dynamic analysis of seismic stability of reinforced soil walls[J]. *Rock and Soil Mechanics* , 2013 , 34(12) : 3 573 – 3 579.(in Chinese))
- [15] 杜修力, 路德春. 土动力学与岩土地震工程研究进展[J]. *岩土力学* , 2011 , 32(增 2) : 10 – 20.(DU Xiuli , LU Dechun. Advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics* , 2011 , 32(Supp.2) : 10 – 20.(in Chinese))
- [16] 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.
- [17] ZENG X , STEEDMAN R S. On the behavior of quay walls in earthquakes[J]. *Geotechnique* , 1993 , 43(3) : 417 – 431.
- [18] NIMBALKAR S S , CHOUDHURY D , MANDAL J N. Seismic stability of reinforced-soil wall by pseudo-dynamic method[J]. *Geosynthetics International* , 2006 , 13(3) : 111 – 119.
- [19] GHOSH P. Seismic active earth pressure behind a nonvertical retaining wall using pseudo-dynamic analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal* , 2008 , 45(1) : 117 – 123.
- [20] 马少俊, 胡安峰, 王奎华. 地震作用下挡土墙的滑动稳定性分析[J]. *工程力学* , 2012 , 29(7) : 209 – 213.(MA Sshaojun , HU Aanfeng , WANG Kuihua. Stability against sliding analysis of a retaining wall under seismic loading condition[J]. *Engineering Mechanics* , 2012 , 29(7) : 209 – 213.(in Chinese))
- [21] 周小平, 季璇, 钱七虎. 强地震荷载作用下临水挡土墙的拟动力法稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报* , 2012 , 31(10) : 2 071 – 2 081.(ZHOU Xiaoping , JI Xuan , QIAN Qihu. Stability analysis of water front retaining wall subjected to seismic loads using pseudo-dynamic method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2012 , 31(10) : 2 071 – 2 081.(in Chinese))
- [22] 何思明, 王忠福, 王娟. 考虑地震加速度时程影响的挡土墙动土压力分布[J]. *四川大学学报 : 自然科学版* , 2015 , 47(4) : 31 – 37.(HE Siming , WANG Zhongfu , WANG Juan. Research on the earth pressure distribution behind the retaining wall under seismic acceleration influence[J]. *Journal of Sichuan University : Natural Science* , 2015 , 47(4) : 31 – 37.(in Chinese))
- [23] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. [S.1.] : Elsevier , 2013 : 1 – 90.
- [24] 中国工程建设标准化协会. CECS22 : 90 土层锚杆设计与施工规范[S]. 北京 : 中国工程建设标准化协会 , 1991.(China Association for Engineering Construction Standardization. CECS22 : 90 Code for design and construction of soil anchors[S]. Beijing : China Association for Engineering Construction Standardization , 1991.(in Chinese))