

基于三维强度折减有限元的抗滑桩优化探讨

韦立德¹, 杨春和¹, 高长胜²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 采用抗剪强度折减弹塑性有限元法分析含抗滑桩边坡稳定性优化问题, 结果表明, 在采用单排抗滑桩支护、坡脚和坡顶水平且坡体材料是各向同性材料时, 桩布置在边坡中线上最有利于提高边坡稳定性, 增大抗滑桩密度比增大桩径更能有效提高边坡的稳定性。

关键词: 边坡稳定性; 抗滑桩; 强度折减; 弹塑性有限元; 优化

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)11-1350-03

作者简介: 韦立德(1973-), 男, 2003年于河海大学获博士学位, 中科院武汉岩土力学研究所站博士后, 主要从事岩土力学和考虑渗流的边坡稳定性分析方面研究。

Optimization of slide-resistant piles based on strength reduction method with 3D FEM

WEI Li-de¹, YANG Chun-he¹, GAO Chang-sheng²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 2. Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The strength reduction method was applied in elasto-plastic FEM to optimize the piles used to reinforce slope. The computed results showed that the piles placed in the middle of the slope could increase the stability of the slope most affectively, and the stability of the slope would be increased more quickly by reducing the longitudinal spacing than by increasing the radius of pile.

Key words: slope stability; piles; strength reduction; elastoplastic FEM; optimization

0 引 言

对于均质土坡, 土坡稳定分析目前主要应用极限平衡法, 通过各种优化方法来搜索危险滑动面。但是, 对于含有抗滑桩等支护结构的边坡, 由于桩和岩土介质具有不同的弹性模量、重度和强度, 势必引起应力分布的非均匀化和进入塑性极限的不同步性, 给边坡的稳定分析带来了巨大的困难。传统极限平衡方法采用过多的简化方法来搜索危险滑动面以及相应的稳定安全系数, 结果很难令人信服。而目前的各种数值分析方法, 一般只能得出边坡应力、位移、塑性区, 无法得到边坡危险滑动面以及相应的安全系数。本文主要探索在采用单排抗滑桩支护、坡脚和坡顶水平且坡体材料是各向同性材料时, 基于三维强度折减有限元法的抗滑桩支护的优化规律, 以期能更好地解决工程问题。

所谓抗剪强度折减技术就是将抗剪强度指标 c 和 φ , 用一个折减系数 F_s , 进行折减, 然后用折减后的虚拟抗剪强度指标 c_F 和 φ_F , 取代原来的抗剪强度指标 c 和 φ , 在有限元分析中使用。 c_F 和 φ_F 的表达式如下:

$$c_F = c/F_s, \quad (1)$$

$$\varphi_F = \arctan(\tan(\varphi)/F_s), \quad (2)$$

式中 c 是粘聚力, φ 是内摩擦角。在弹塑性有限元数值分析中, 折减系数 F_s 的初始值取得足够小, 以保证开始时是一个近乎弹性的问题。然后不断增加 F_s 的值, 折减后的抗剪强度指标逐步减小, 反复对边坡进行分析, 首先部分单元开始屈服, 应力在单元之间重新分配, 局部失稳逐渐发展; 直到某一个临界状态, 在虚拟的折减抗剪强度下整个边坡发生失稳。那么在发生整体失稳之前的那个折减系数值, 即实际抗剪强度指标与发生虚拟破坏时折减强度指标的比值, 就是

1 计算原理

1.1 抗剪强度折减有限元法

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412704); 国家自然科学基金资助项目 (50374064); 国家自然科学基金资助项目 (50334060)

收稿日期: 2005-01-18

这个边坡的稳定安全系数。这种稳定分析方法称为抗剪强度折减有限元法(SSRFEM)^[2]。使用该有限元法可以直接得出边坡的稳定安全系数,不需要事先假设滑裂面的形式和位置,还可以得到各单元的应力和变形情况,从而大致给出破坏面的位置。这里定义的抗剪强度折减系数,与极限平衡分析中的边坡稳定安全系数在本质上是是一致的。

用强度折减有限元法分析边坡的稳定性,采用解的不收敛作为破坏标准。在指定的收敛准则下算法不能收敛,即表示应力分布不能满足土体的破坏准则和总体平衡要求,意味着出现破坏。

1.2 岩土体和抗滑桩的本构模型

岩土体和抗滑桩采用实体单元模拟,本构模型采用非关联准则的弹塑性本构模型。采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,表达式为

$$f = \sqrt{J_2} (\cos\theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\theta \sin\varphi) - 3I_1 \sin\varphi - c \cos\varphi \quad , \quad (3)$$

式中 f 为屈服函数, $\theta = \frac{1}{3} \arcsin(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}})$, $(-\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6})$, I_1 、 J_3 和 J_2 分别是应力张量的第一不变量、应力偏量的第二不变量和应力偏量的第三不变量。选 Drucker-Prager 方程作为塑性势函数 g , 即

$$g = -\alpha I_1 + J_2^{\frac{1}{2}} - k \quad , \quad (4)$$

式中 $\alpha = \frac{\tan\psi}{\sqrt{9+12\tan^2\psi}}$, $k = \frac{3c}{\sqrt{9+12\tan^2\psi}}$, ψ 是剪胀角。

1.3 岩土体和抗滑桩交界面的本构模型

岩土体和抗滑桩的交接面采用无厚度接触单元模拟,本构模型采用各向同性弹塑性模型,弹性和塑性参数参照接触单元一侧岩土介质的参数区值。采用 Mohr-Coulomb 准则定义屈服函数和塑性势函数如下:

$$f = \tau - \sigma_n \tan\varphi - c \quad , \quad (5)$$

$$g = \tau - \sigma_n \tan\psi \quad , \quad (6)$$

式中 τ 是沿着接触单元的剪切应力的矢量和, σ_n 是垂直于接触单元的法向应力, c 和 φ 分别是接触单元一侧岩土介质的粘聚力和内摩擦角, ψ 是接触单元一侧岩土介质的剪胀角。

2 抗滑桩优化分析

某边坡工程,边坡比例为 1:1.33,高 15 m,长 20 m,不支护时采用强度折减有限元法和极限平衡法(边坡稳定性分析商用软件 slide)计算的边坡稳定性安全系数分别是 1.15、1.085(简布法)和 1.161(毕肖普法)。初步采用单排抗滑桩进行支护,桩顶自由,

运用强度折减有限元法和极限平衡法确定具体的支护方案。只考虑自重荷载,且仅取边坡中的一段进行分析。

2.1 三维有限元计算

土体采用 20 节点实体单元模拟,桩采用 15 节点实体单元和 20 节点实体单元模拟,桩和土的交界面采用 16 节点无厚度接触单元模拟,抗滑桩位于边坡中线的几何模型见图 1。计算范围:坡脚水平延伸 20 m,坡顶水平延伸 20 m,坡脚到坡体底面高差 20 m,边坡截面为通过桩心的截面和沿两根桩中点的截面,抗滑桩贯穿到坡体底面。约束条件:坡体侧面约束相应的水平位移,坡体底面约束 3 个方向的位移。参数见表 1。

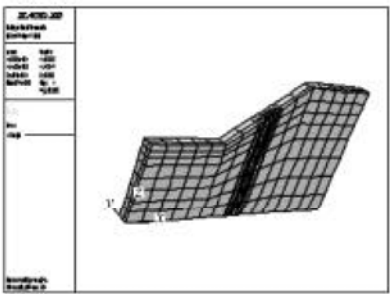


图 1 三维有限元模型

Fig. 1 3D FEM model

表 1 计算分析参数表

Table 1 Parameters for analysis

项目	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\psi/(\text{^\circ})$	E/MPa	γ/kPa	ν
土体	12.0	15.0	0.0	300.0	20.0	0.3
桩	10000.0	0.0	0.0	150000.0	24.5	0.2
桩土交界面	12.0	15.0	0.0	2307.69(G)	0.0	

为了比较强度折减有限元法的效果,在此共进行了三个方案的计算。第一个方案没有支护;第二个方案桩径为 1.5 m,桩心距为 6 m;第三个方案桩径为 1.5 m,桩心距为 3 m。采用传统极限平衡法(slide)和三维强度折减有限元法对边坡的稳定性安全系数进行计算,结果见表 2。最后确定采用第三种支护方案。关于抗滑桩对边坡影响讨论见文献[7]。为了进一步探索更加有利的抗滑桩的位置,本文变换桩的位置和桩距,采用有限元进行了 21 种方案的边坡稳定性分析,所得结果讨论如下。

2.2 桩的位置对边坡稳定性安全系数的影响

在图 2 中, $L=20\text{ m}$, L_x 是桩心到坡脚的水平距离,对桩心距分别是 2 m 和 4 m 两种类型在不同边坡位置的边坡稳定性进行的有限元计算结果。从图中可以看

出, 在采用单排抗滑桩支护、坡脚和坡顶水平且坡体材料是各向同性材料时, 桩布置在边坡中线上最有利于提高边坡稳定性。

表 2 各种分析方法计算的边坡稳定性安全系数

Table 2 Safety factors obtained with different analysis methods

项目	安全系数		
	第一方案	第二方案	第三方案
强度折减有限元法	1.15	1.41	1.56
极限平衡			
简布法	1.085	1.418	1.418
法 (slide)			
毕肖普法	1.161	1.503	1.503

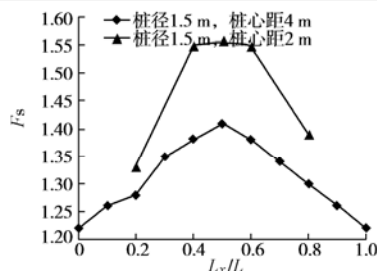


图 2 桩的位置对边坡稳定性的影响

Fig. 2 The influence of situation of pile on slope stability

2.3 桩距对边坡稳定性安全系数的影响

在图 3 中, $L_x = 10$ m, 对初始桩径为 1.5 m, 初始桩心距分别为 2 m、4 m 和 8 m, 分别增大桩径和增大抗滑桩密度 (缩短桩心距) 使新布置的桩材料体积增大为原来的 2 倍, 即分别在桩心距不变的情况下增大桩径为 $1.5\sqrt{2}$ m, 和在原来桩径不变的情况下减小桩心距为原桩心距的 0.5 倍, 采用折减有限元法计算出相应的稳定性安全系数。计算结果表明, 两种方法都能够提高边坡稳定性安全系数 (见图 3 (a)), 图中系数增量为增大桩径或者缩小桩心间距所得的稳定性安全系数增加量值, 采用增大桩径的方法比采用增大抗滑桩密度方法得到增大的安全系数小, 采用增大桩径的方法得到稳定性安全系数的增量和采用增大抗滑桩密度方法得到稳定性安全系数的增量的比值为增长系数比, 见图 3 (b)。从图中可以看出, 在桩心距大于等于 8 倍桩径时, 桩径为原桩径 1.4142 倍基本不能增大边坡的稳定性安全系数; 随着抗滑桩密度增大, 桩径为原桩径 1.4142 倍使得边坡的稳定性安全系数逐渐增大, 采用增大桩径得到稳定性安全系数的增量和采用增大抗滑桩密度得到稳定性安全系数的增量的比值也逐渐增大; 且比值都小于 1, 因此增大抗滑桩密度比增大桩径更能有效提高边坡的稳定性, 是一种可行且节省材料的方法。计算结果表明可采用支护方案参数: 桩径 1.5 m, 桩心距 3 m, $F_s = 1.56$ 。

3 结论与建议

(1) 在采用单排抗滑桩支护、坡脚和坡顶水平且

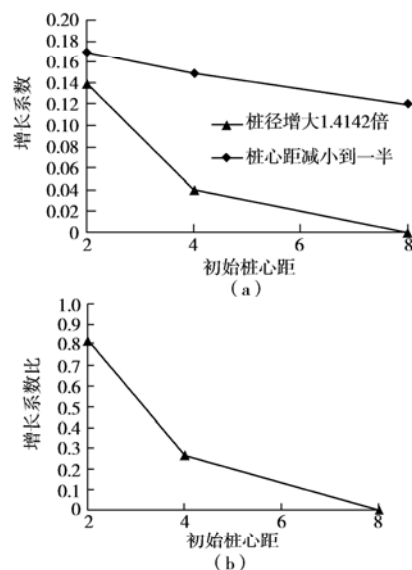


图 3 增大桩径和桩密度对边坡稳定性的影响

Fig. 3 The influence of radius and spacing of pile on slope stability
坡体材料是各向同性材料时, 桩布置在边坡中线上最有利于提高边坡稳定性。

(2) 在采用单排抗滑桩支护、坡脚和坡顶水平且坡体材料是各向同性材料、桩布置在边坡中线上时, 增大抗滑桩密度比增大桩径更能有效提高边坡的稳定性, 且节省材料。

(3) 其它类型边坡的抗滑桩支护优化问题也可以参照本文方法探索相应的优化支护方法。

(4) 抗滑桩的桩长优化问题、双排抗滑桩的优化问题也非常重要, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [2] 孙 伟, 龚晓南. 土坡稳定分析强度折减有限元法[J]. 科技通报, 2003, 19(4): 319 - 322.
- [3] 连锁营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407 - 411.
- [4] 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.
- [5] 马建勋, 赖志生, 蔡庆娥. 基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2690 - 2693.
- [6] 朱伯芳. 有限元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利出版社, 1998.
- [7] 韦立德, 高长胜, 杨春和, 等. 基于强度折减法的含抗滑桩边坡稳定性三维有限元分析[J]. 岩土力学, (已录用).