抗滑桩处理路堤滑坡的数值模拟

崔　澈，张志耕，闫澍旺

（天津大学建工学院，天津 300072）

摘　要：采用数值模拟技术分析了抗滑桩处理路堤滑坡的作用机理。分析方法采用强度折减法，桩土相互作用采用零厚度的弹塑性接触面单元模拟。给出了桩间距、桩的位置对抗滑桩处理效果的影响以及各种情况下桩的性状，结果表明：最大安全系数时的桩的布置位置与滑动形式有关，对于路堤滑坡而言，布置于坡角处可以满足安全要求；适当减小桩间距可以提高路堤的稳定性，有利于土拱效应的发挥。

关键词：抗滑桩；路堤滑坡；强度折减法；接触面单元；数值模拟

作者简介：崔　澈(1977－　)，男，博士，讲师。主要从事岩土工程方面的教学及科研工作。

0　前　　言

抗滑桩被广泛应用于非稳定岩土边坡的治理工程中，但是，在桩与土体的作用机理、桩的受力、桩间距和桩的位置的合理确定等方面尚没有准确完备的理论和经验可以借鉴。张建华[1]、周德培[2]、冯君[3]等采用不同的方法分析了抗滑桩结构土拱产生的机理和条件，其结论可以为桩间距设计提供参考；戴自航[4]给出了抗滑桩内力计算的模式和有限差分解法，可以进一步了解抗滑桩的受力特性。但是，传统的方法总是将滑坡稳定和桩的响应割裂开来，并没有达到真实模拟抗滑桩和滑坡相互作用机理的目的，数值分析技术[5-7]则为这些问题的解决提供了另一种科学的方法。

本文通过对某一路堤滑坡进行二维和三维的数值分析，得出了抗滑桩布置位置、桩间距等对加筋路堤边坡安全系数的影响，并分析了各种情况下桩的性状，其结论可以为设计和施工提供参考。

1　分析方法

1.1　强度折减法

土坡的稳定分析一般采用极限平衡理论。但是，在研究桩土的相互作用方面，极限平衡理论存在一定的不足。基于强度折减技术的弹塑性数值分析方法在边坡安全系数的定义上与极限平衡理论一致，可以用于边坡的稳定分析[9-10]。

强度折减法中的参数 c_F 和 φ_F 的定义如下：

$$c_F = c/F \quad , \tag{1}$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\varphi}{F}\right) \quad , \tag{2}$$

式中　F 为强度折减系数；折减后的强度参数 c_F 和 φ_F 用来代替屈服准则中的 c 和 φ。在静力稳态计算中，如果模型为不稳定状态，计算将不收敛，基于此原理，通过降低边坡的强度，使系统达到不稳定状态，此时的强度折减系数 F 即为边坡安全系数。

强度折减法的一个最主要的优点在于安全系数完全来源于计算分析中，而不需要任何人为的演绎推理。强度折减法可以较为准确获得加筋边坡的安全系数，并能真实得到桩的特征响应。

1.2　桩－土相互作用的模拟

在研究桩－土相互作用方面，等参接触面单元已经被广泛研究和应用。接触面应力由正应力 σ_n 和两个剪应力 τ_s、τ_t 定义。正应力和剪应力与接触面单元的法向和切向相对位移的本构矩阵相关联。对于弹性本构矩阵而言，可以采用如下方程表示

$$D = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \quad , \tag{3}$$

式中　K_n 为弹性法向刚度，K_s 和 K_t 分别为 s 方向和 t 方向的剪切刚度。为了使荷载位移曲线的初始斜率更加近似于由弹性解答而得，必须选择合适的接触面刚度。接触面刚度与临近土体的剪切模量 G 和接触面单元的长度相关，关系由下式表示

$$K_s = \alpha_1 G/l_s \quad , \tag{4}$$

$$K_t = \alpha_2 G/l_t \quad , \tag{5}$$

式中　l_s 和 l_t 分别为接触面单元在 s 方向和 t 方向的长度。在砂～钢接触面上的简单剪切试验显示，沿接触面方向的滑动位移在接触面屈服前几乎为 0[8]。因此，可以认为接触面的应力－应变关系是刚塑性的。刚塑性的本构关系可由具有足够大的弹性刚度的弹塑性关系来模拟。对于接触面上的剪切应力，假设接触面是各向同性的，因此 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$。研究表明[6]，在 $\alpha = 20$ 时，土中侧向受力的桩的荷载位移关系的初始斜率近似于弹性解答。

本文的分析采用弹塑性的本构关系。本构行为的形式基于塑性理论。采用摩尔－库仑屈服准则定义屈服函数 f 和塑性势函数 g

$$f = \tau - \sigma_n \tan\varphi - c \quad , \tag{6}$$

基金项目：天津大学青年教师基金资助项目（20060157）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

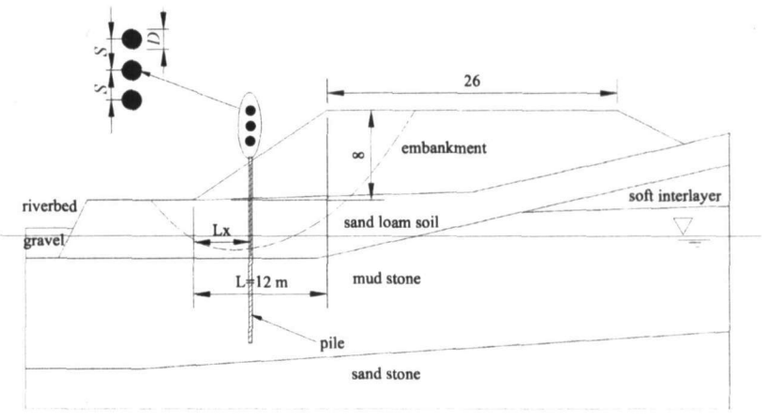


图 1 路堤滑坡断面

表 1 土层分布及其基本物理力学参数

土层	容重γ/(kN·m^{-3})	粘聚力 c/kPa	内摩擦角φ/(°)	扩散角ψ/(°)	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν
路堤	20.0	15	30	0	25500	0.25
亚砂土	17.8	5	15	0	8000	0.3
强风化泥岩	18.6	20	15	0	10000	0.27
强风化砂岩	19.8	50	50	0	75000	0.21

$$g=\tau-\sigma_n\tan\psi \tag{7}$$

式中　τ为剪应力；c为粘聚力；φ为内摩擦角；ψ为扩散角。

2　工程实例分析

本文的分析依托某高速公路工程的路堤滑坡。图 1 给出分析断面的基本情况，土层分布情况如表 1 所示。该处地层出露由上而下为第四系坡积亚砂土和侏罗系暗紫色～紫灰色砂质泥岩和泥质粉砂岩，中间夹有软弱破碎带，上部亚砂土在靠近河床一侧呈软塑状态，厚约 5 m。该处滑坡发生在路堤基本填筑完成后，路基表面出现走向为 N75°E～S255°W 的裂缝，裂缝呈羽状排列，开裂宽度约为 1～3 cm，裂缝靠河岸一侧 10 d 下沉 3～3.5 cm，在路堤坡角外 1 m左右出现宽约 3 cm的裂缝。分析路堤滑动的原因，主要是由于路堤较厚，同时滑坡位于河床阶地，阻滑能力较差，加载导致沿上部软弱土层的滑动。

数值分析采用二维、三维两种模型，二维分析给出的结果比较简洁、直观，三维模型则更能模拟真实情况。三维数值模型的网格划分如图 2 所示。土体采用摩尔－库仑理想弹塑性模型，参数选取如表 1 所示；桩体采用线弹性模型，弹性模量为 2.16×10^7 kN/m^2，泊松比 $\nu=0.2$，容重为 $\gamma=23.6$ kN/m^3，直径 $D=2$ m，下部嵌入到砂岩中；桩土之间设置如前所述的接触面单元。

3　分析结果及讨论

3.1　原状滑坡分析

图 3 给出原状滑坡的位移矢量图，计算得出的安全系数为 1.013。从图中可以看出，由于路堤填筑，导致产生沿下部亚砂土层的滑动趋势，其滑坡的性状与观察到的路堤破坏形式基本一致。

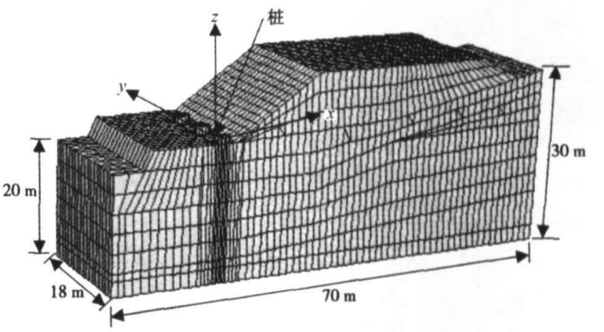


图 2 三维数值模型

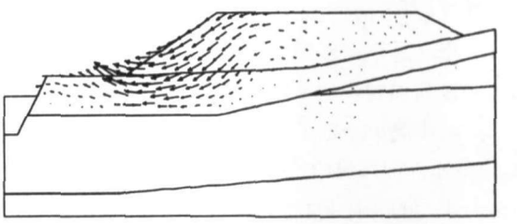


图 3 原状路堤滑坡的位移矢量图

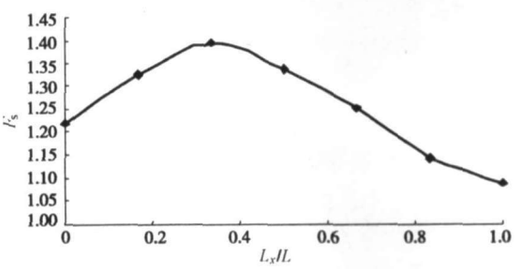


图 4 桩的位置对安全系数的影响

3.2　桩的位置的影响

桩的位置用桩离坡角的水平距离 L_x 和斜坡的水平长

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

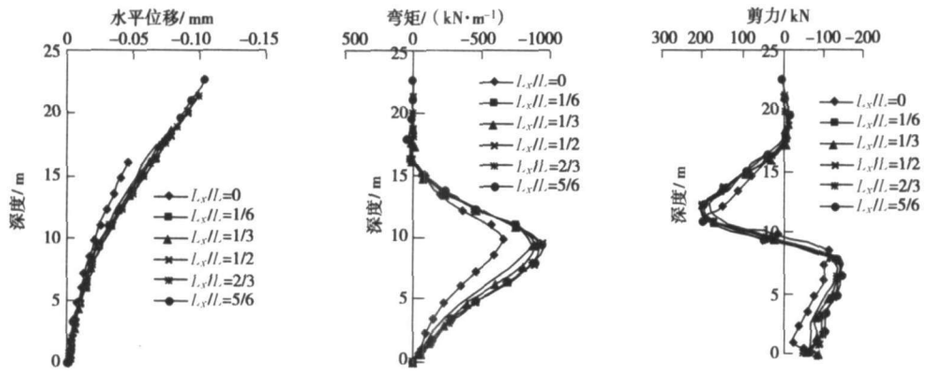


图 5 不同位置时桩的性状

度 L 的比值表示，如图 1 所示。桩间距为 $S=3D$。桩的位置对边坡安全系数的影响如图 4 所示。从图中可以看出，当桩布置在斜坡的下部时安全系数较大，这与均质加筋边坡的计算结果并不一致。对于均质加筋边坡而言，当桩布置在斜坡偏上部[5]或者中部[8]时安全系数最大，这是因为，均质边坡的滑动基本为浅层滑动，滑动面以上桩的长度随着桩的位置的上移而增加，桩提供的抗滑力也随之增大，安全系数也会增大；而路堤滑坡属于深层滑动，最危险滑动面位于路堤以下的软弱土层中，当桩位于边坡的下部时，滑动面以上的桩的长度已经较大，随着桩的位置上移这个长度反而会减小，桩所提供的抗滑力也随之减小，安全系数就会降低。当桩上移到路堤最上部时，甚至会形成破坏面沿桩体的潜在滑动。

桩在各个位置时的变形和受力性状如图 5 所示。从图中可以看出，当桩位于路堤坡角处时，其挠度、弯矩和剪力明显小于位于坡内时；当桩位于坡内时，由于桩的位置改变而引起的变形和受力的变化较小，特别是由于上部路堤力学性质较好，其自稳性较好，对路堤内上部桩体的作用力也较小，这说明：桩的位置位于坡内时，位于路堤内最上部一段桩体的作用并不明显；挠度最大时的桩位于边坡中部，而不是位于边坡上部。

综合分析可以得出，如果从边坡稳定性和桩的受力两方面来考虑，对于不稳定滑坡的治理，抗滑桩布置应根据滑动面的位置、滑动的深浅来确定。对于路堤滑坡治理的工程实践而言，布置于路堤坡角处可以满足安全需要，但在条件允许的前提下，可以将桩的位置适当布置于坡内一段距离。

3.3 桩间距的影响

桩间距大小采用 S/D 表示，如图 1 所示。当桩布置于边坡 $L_x/L=1/6$ 处时，桩间距对土坡稳定安全系数的影响如图 6 所示。

从图中可以看出，减少桩间距可以很明显的增加边坡的安全系数。这是因为桩间距的减少，使得桩更类似于连续的挡土墙，在这种情况下，土体可以产生较大的变形而不会达到极限状态，这种变化还可以从桩的变形反映出来（见图 7）。图 7 给出的桩的性状表明：如果桩的间距太大，这时，桩基本已经失去整体抵抗土体变形的能力，在这种情况下，桩的变形和受力都较小，边坡的安全系数也较小。

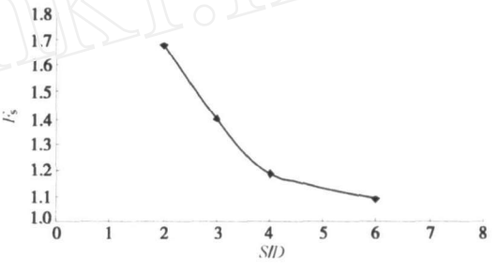


图 6 桩间距对边坡安全系数的影响

桩间距对边坡稳定影响的一个重要表现是土拱效应[1-6]。土拱效应是由于桩后土体的移动在相邻桩体的作用下形成的，其非常明显的体现在桩的整体抗滑作用上，对于维持边坡稳定具有积极的作用。但是，充分发挥土拱效应必须确定一个桩的合理间距，间距太大，则不能产生土拱。分析图 6、图 7 可以看出，在桩间距 $S/D\geq 4$ 的情况下，抗滑桩的整体抗滑效果已不明显，这说明，土拱效应也已经不明显（见图 8）。但是，必须注意到一个事实，土拱效应虽然可以在粘性土和非粘性土中，排水和不排水条件下都可以产生，但其受桩径、土层性质等很多因素影响，不可能得出一个共性的结论。

4 结 论

利用零厚度的弹塑性接触面单元模拟桩土相互作用，采用强度折减法对某一路堤滑坡进行二维和三维数值分析，可以得出如下结论：

(1) 采用抗滑桩可以很好的提高路堤的稳定性，加筋边坡的安全系数明显高于原状路堤边坡。

(2) 桩的布置位置影响加筋路堤边坡的安全系数。最大安全系数时的桩的布置位置与滑动形式有关，对于路堤滑坡而言，布置于坡角处可以满足安全要求。

(3) 桩间距影响加筋路堤边坡的安全系数。适当减小

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

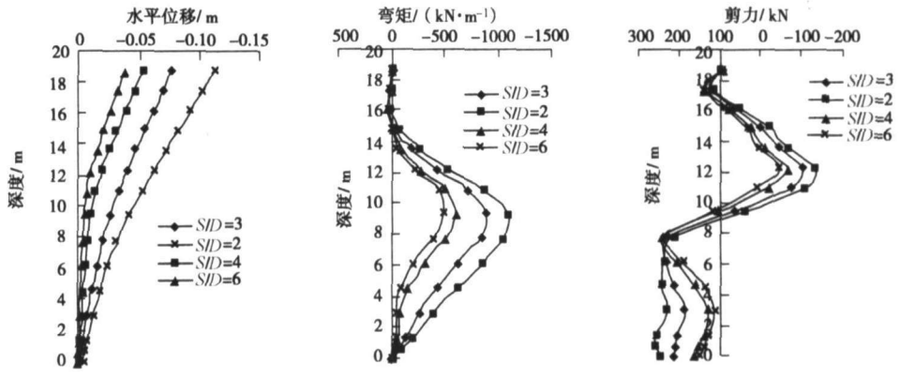


图 7 不同桩间距时桩的性状

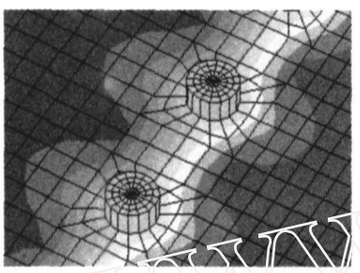


图 8 土拱效应

桩间距可以提高路堤的稳定性，有利于土拱效应的发挥。

(4) 土拱效应受几个因素的影响，其对提高桩的抗滑效果的作用机理需要更加深入的探讨。

参考文献：

[1] 张建华，谢　强，张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2004，**23**(4):699－703.

[2] 周德培，肖世国，夏　雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报，2004，**26**(1):132－135.

[3] 冯　君，吕和林，王成华. 普氏理论在确定抗滑桩间距中的应用[J]. 中国铁道科学，2003，**24**(6):79－81.

[4] 戴自航，沈蒲生，彭振斌. 弹性抗滑桩内力计算的新模式及其有限差分解法[J]. 土木工程学报，2003，**36**(4):99－104.

[6] Chen C Y, Martin G R. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2002, **29**(2):363－386.

[7] Ng C W W, Zhang L M, Ho K K S. Influence of laterally loaded sleeved piles and pile groups on slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(3):553－566.

[8] Fei Cai, Keizo Ugai. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[J]. Soils and Foundations, 2000, **40**(1):73－84.

[9] Ugai K. A method of calculation of global safety factor of slopes by elasto-plastic FEM[J]. Soils and Foundations, 1989, **29**(2):190－195.

[10] 赵尚毅，郑颖人，时卫民. 用有限元强度折减法求边坡的稳定安全系数[J]. 岩土工程学报，2002，**24**(3):343－346.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net