

高速公路路堑边坡施工过程动态稳定性分析

许湘华^{1, 2}, 王 强¹, 方理刚¹

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075;
2. 贵州省交通规划勘察设计研究院, 贵州 贵阳, 550001)

摘要: 结合某山区高速公路路堑边坡工程实例, 采用相当抗剪强度和相当剪应力之比值作为边坡稳定系数 K_s , 通过有限元方法对施工过程中的边坡变形和稳定系数变化规律进行研究。研究表明: 根据边坡稳定系数 K_s 最小原则计算得到的最危险滑动面与现场勘探的边坡岩体内贯通结构面的位置基本吻合; 不同施工阶段的边坡稳定系数 K_s 表明, 需要对边坡的四级台阶均进行加固, 才能保证该边坡的稳定。

关键词: 高速公路; 边坡; 稳定性

中图分类号: U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2006)05-1008-05

Analysis on the stability of expressway slope during construction

XU Xiang-hua^{1, 2}, WANG Qiang¹, FANG Li-gang¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Guizhou Communication Planning Prospecting Design Academy, Guiyang 550001, China)

Abstract: The ratio of relative strength and relative stress was taken as slope stable coefficient, slope deformation and the variational law of stable coefficient were studied combined with engineering practice of a mountainous expressway. The results show that the most dangerous plane calculated is accordance with the position obtained by measurement. In order to ensure the stability of slope, it is necessary to solidify four-step sidestep of slope according to stable coefficient in different construction phases.

Key words: expressway; slope; stability

山区高速公路所经地段往往是地形地貌复杂多变, 地层岩性软弱分布不均, 地质构造发育, 岩体破碎, 地表、地下水充沛等不良地质区域。大量的工程实践表明, 边坡的岩性、地质构造特征是影响路堑边坡稳定性的重要因素^[1], 特别是节理等因素对边坡稳定性的影响极为明显^[2]。在高速公路建设过程中, 需要对不良地质区域的边坡进行施工动态分析, 利用数值分析和实测结果相结合的方法是研究路堑开挖施工过程中边坡变形与破坏特征的有效方法, 为加固边坡奠定了基础^[3~6]。施工开挖边坡

的破坏除与地质因素外, 还与动态施工过程等多种因素有关^[7], 特别是与边坡开挖的几何特征施工方法有关。在此, 作者以广东省某高速公路三断岭路堑为例, 针对该边坡坡体结构特点, 应用数值分析与实测结果相结合的方法, 提出边坡稳定系数 K_s , 并采用该边坡稳定系数对动态施工过程中的边坡变形和稳定系数变化规律进行研究。该高速公路沿线在火成岩分布地区已发生众多自然滑坡和坍塌现象, 在变质岩分布地区局部发育小规模崩塌现象, 据统计, 全线高度高于 30 m 的边坡有约 80

收稿日期: 2006-03-10

基金项目: 交通部西部重点课题资助项目(200331880201)

作者简介: 许湘华(1971-), 男, 贵州贵阳人, 博士研究生, 高级工程师, 从事道路与铁道工程研究

通讯作者: 许湘华, 男, 高级工程师, 博士研究生; 电话: 0851-5815126(0); E-mail: xianghuaadvance@163.com

处,其中高度高于 50 m 的边坡有 20 多处,边坡高度最高达 70 m,边坡的分布密度和规模较大。边坡在开挖施工过程中将出现不同形式的失稳破坏,有些破坏给施工带来巨大损失。

1 坡体结构及其相关特征

三断岭路堑边坡位于广东省某高速公路 LK24+920~LK25+150 段左侧,在径南镇章印村黄蜂窝旅游区附近。边坡全长 230 m,最大开挖高度 57.5 m,中心最大挖深 17.58 m(LK25+070)。该路堑边坡为残坡积层路堑边坡,该边坡的主要工程地质特征是表层为较厚的残坡积块石土,以下为全强风化粉砂岩,下伏基岩为砂岩。岩层破碎,产生崩塌落石堆积在坡麓,形成巨厚岩堆体。块石土含 20%~60% 的碎石,碎石粒径为 2~16 cm,以 2~6 cm 为主。密实状态为稍密至中密,含水量随深度增大而增加。该边坡开挖失稳的控制因素是坡脚岩土强度低,在压应力集中时会造成边坡垮塌。该段的典型边坡体结构如图 1 所示。

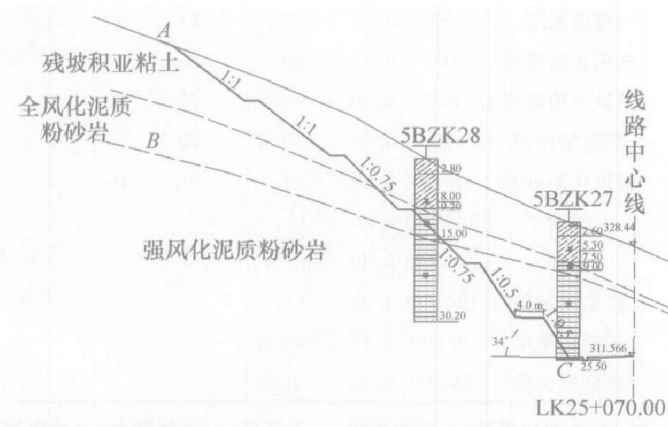


图 1 LK24+920~LK25+150 左侧边坡典型边坡体结构

Fig. 1 Typical structure for left slope from LK24+920 to LK25+150

2 边坡潜在滑面的确定

坡体内存在倾向临空面的贯通结构面,产状为 $20^\circ \angle 36^\circ$ (视倾角为 34°),该构造面走向与线路方向基本一致,边坡开挖后若不加以处理,则必然产生沿该面的滑动变形破坏。据现场地质勘探资料,确定该面为边坡的潜在最危险滑面。

通过钻孔岩芯分析,边坡开挖后,边坡中上部为残坡积土层,边坡下部为强风化半岩半土状粉砂岩,该边坡为类土质边坡。5BZK26 钻孔揭露弱风

化粉砂岩,层顶埋深 16.50 m,但其他钻孔钻深 30 余 m 均未见弱风化岩。

残坡积层及强风化半岩半土状粉砂岩构成边坡的主体,岩土体强度相对较低,边坡开挖后,坡面松弛,应力调整,类土质边坡由于强度较低将产生坍滑变形或圆弧形滑动变形。

自然边坡坡度较陡,开挖后将形成高陡边坡,推测坡脚为半岩半土状强风化岩,强度较低,坡脚应力集中,将产生压碎变形。

变形产生的原因为:边坡开挖后,应力调整,坡体松弛,降水下渗,坡体表层土体及构造面间抗剪强度降低,在地表、地下水的的作用下,产生整体或局部滑动。

3 坡体稳定性动态分析的有限元方法

力学计算分析是边坡动态设计施工中的一个重要环节,其中,有限元方法(FEM)是力学计算分析的一种重要方法。因为通过有限元分析程序可直接计算出边坡坡体内各点的应力与位移分布情况,因而便于直观地分析边坡稳定性^[8-10]。

3.1 研究方法

基于边坡稳定性处理的初步设计方案,每当边坡台阶开挖时,对施工过程中的边坡地表位移、深部水平位移和支护结构内力进行动态监测,得到坡体内位移和支护结构内力以及锚索钻孔地质资料和室内土工试验结果。对建立的边坡模型反复进行边坡有限元分析,直至计算结果与实测结果相吻合为止。这样,便得到了该边坡开挖后的岩体内部应力与位移场,据此进行边坡稳定性评价。当下一级边坡开挖支护完成后,对此时的计算模型进行适当修改,然后继续进行边坡稳定性计算和分析。

3.2 岩土类材料模型的分析

岩土工程问题在本有限元程序中统称为 DP 类材料问题,它采用 Drucker-Prager 本构模型和屈服准则处理此类问题^[7-10]。Drucker-Prager 类材料可以使用相关流动准则,也可以使用不相关流动准则。假定岩体呈理想弹塑性。

根据坡体材料剪切强度屈服准则定义开挖影响范围内不同区域坡体的稳定性系数 K_s ,即将 K_s 定义为剪切强度屈服准则中相当抗剪强度与相当剪应力的比值。

Drucker-Prager 强度屈服准则是广义米赛斯(Mise)准则的一种形式,考虑了体积应力的影响,

其屈服函数为:

$$-\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式(1)用 p 和 q 表示即为:

$$f = q - (\sqrt{3}k - 3\sqrt{3}\alpha p) = 0 \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, \\ q = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/2}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha = \tan \phi \sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}, \\ k = 3c / \sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_1 为第 1 应力不变量; J_2 为第 2 应力偏量不变量; p 和 q 分别为广义正应力、广义剪应力; α 和 k 分别为与岩土材料的内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c 有关的系数; σ_1 , σ_2 和 σ_3 为 1 个点的 3 个主应力; q 为相当剪应力, 而 $\sqrt{3}k - 3\sqrt{3}\alpha p$ 为相当抗剪强度, 于是, 坡体稳定系数 K_s 为:

$$K_s = (\sqrt{3}k - 3\sqrt{3}\alpha p) / q \quad (5)$$

3.3 三断岭路堑边坡稳定性动态分析

采用有限元法, 求出在外荷载作用下边坡的最危险滑面以及相应的稳定系数, 并以参数 K_s 作为边坡稳定性判据。根据计算得出的坡体内各点的水平方向位移, 判断出最危险滑动面, 将沿该滑动面上各点的稳定系数 K_s 最小值作为边坡稳定系数。

3.3.1 力学分析模型

以 K25+ 070 代表性断面为例, 按平面应变问题进行分析。建模时选用 4 节点的平面四边形单元。据现场调查, 坡体内存在倾向临空的贯通结构面, 产状为 $20^\circ \angle 36^\circ$ (视倾角为 34°), 该构造面走向与线路方向基本一致, 倾向临空面。据地质资料, 此构造面正处于残坡积层和下伏粉砂岩的交界面, 因此, 在对该构造面建模时, 采用接触单元。分析模型如图 2 所示。

边坡从上至下的地层依次为: 表层残坡积层、全风化粉砂岩、强风化粉砂岩、贯通结构面、弱风化粉砂岩, 分析模型所选用的物理力学参数见表 1。

3.3.2 三断岭路堑边坡动态分析过程

边坡未加固前, 只考虑边坡自重作用力, 对边坡的力学行为和稳定性进行分析。图 3 和图 4 所示均为最危险滑动面 SLIPSUR, 其位置的确定主要是依据坡体内一系列沿竖直线水平位移 U_x 变化曲线上的拐点。将这些变化曲线上的拐点依次用折线段连接, 即为最危险滑动面。从图 3 和图 4 可知, 该滑动面与贯通结构面基本吻合。根据 Drucker-Prager 强度屈服准则定义的稳定安全系数沿该滑面的变化曲线如图 5 所示。边坡在未加固之前经计算得到

的边坡稳定系数为 0.73, 低于 1.00, 故可判断此时边坡是不稳定的。

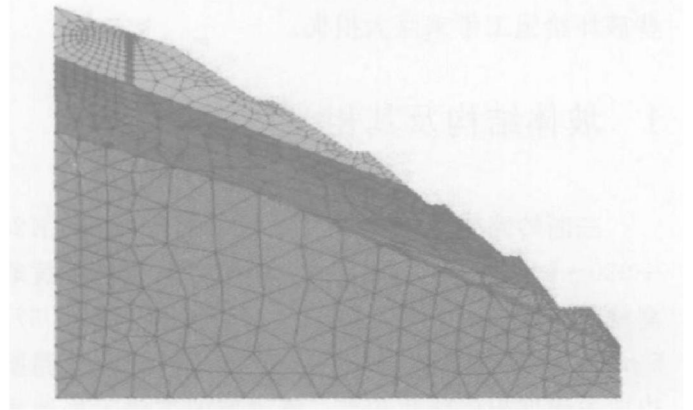


图 2 K25+ 070 断面有限元分析模型

Fig. 2 Model of plane K25+ 070 for FEM Analysis

表 1 计算模型所选用的岩土物理力学参数

Table 1 Geotechnical mechanical parameters for the calculation model

岩土层	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\circ)$	$\phi_f/(\circ)$
残坡积层	60	0.35	18.0	24	26	2
全风化粉砂岩	100	0.35	18.5	28	30	2
强风化粉砂岩	500	0.30	20.0	70	34	3
贯通结构面	20	0.35	19.5	20	24	2
弱风化粉砂岩	1500	0.25	22.0	100	38	4
锚索	300 000	0.30				
锚杆	200 000	0.30				
注浆钢锚管	120 000	0.20				
锚索框架梁	30 000	0.17	25.0			
锚杆框架梁	28 000	0.20	25.0			

注: E 为弹性模量; μ 为泊松比; γ 为容重; c 为粘聚力; ϕ 为内摩擦角; ϕ_f 为节理填充物内摩擦角。

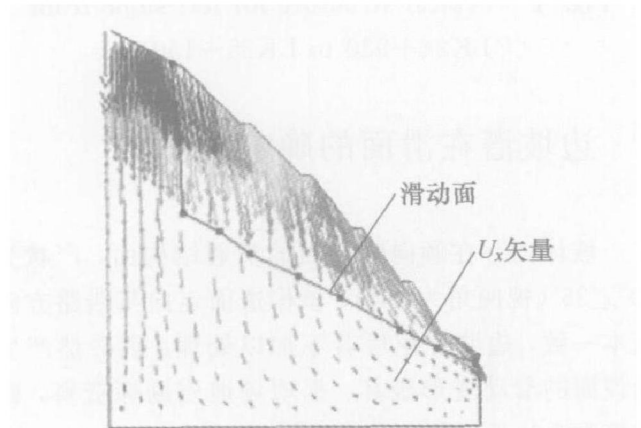


图 3 未加固时坡体水平位移 U_x 矢量图及滑动面确定

Fig. 3 U_x and determination of the sliding surface on natural slope

第 4 级边坡锚索及框架梁施工完成后, 边坡的滑坡体水平位移如图 6 所示, 其边坡的稳定系数如图 7 所示。可以看出, 在第 4 级边坡开挖加固之后, 滑动面稳定系数为 0.82, 低于 1.00, 故可判断此时边坡仍是不稳定的, 仍需要进行下一步加固处理。

按照上述方法, 对第 3, 2 和 1 级边坡支护加固措施完成后进行计算分析。结果表明: 第 3 级边坡

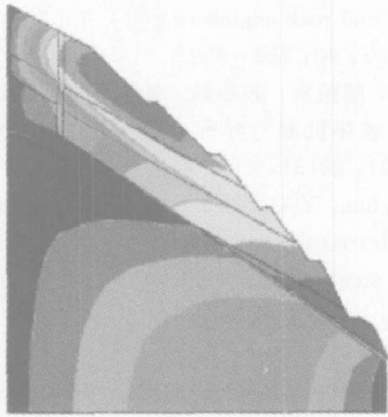


图 4 未加固时坡体水平位移 U_x 梯度线图

Fig. 4 U_x distribution on natural slope

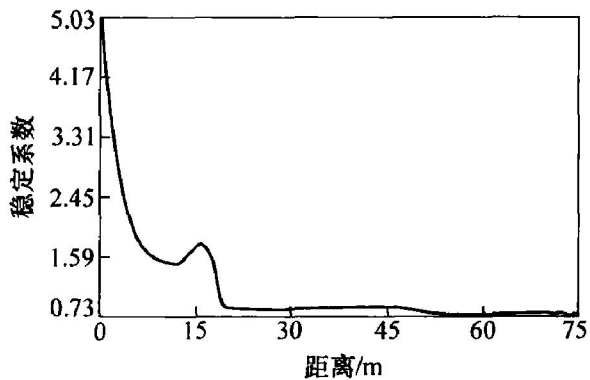


图 5 未加固时坡体内沿最危险滑面的安全系数变化曲线

Fig. 5 Safety factor distribution on natural slope

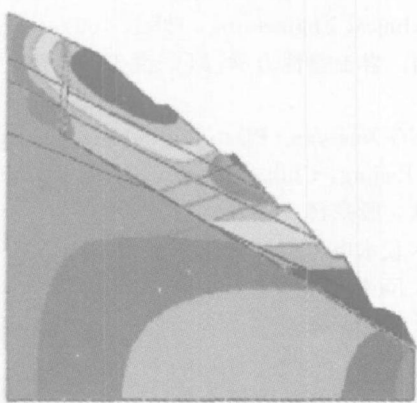


图 6 第 4 级边坡加固后坡体水平位移 U_x 梯度线图

Fig. 6 Horizontal U_x when the fourth grade is reinforced

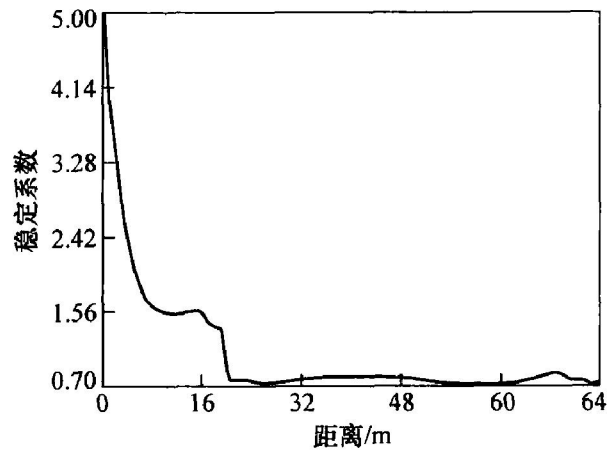


图 7 第 4 级边坡加固后沿滑面各单元安全系数分布曲线图

Fig. 7 Safety factor when the fourth grade is reinforced

完成加固后边坡的稳定系数为 0.96, 低于 1.00, 说明坡体仍不稳定, 仍需对第 2 级边坡进行加固; 而第 2 级边坡完成加固后边坡的稳定系数为 1.08, 低于 1.20, 表明仍不能满足设计所要求的稳定程度, 仍需对第 1 级边坡进行加固处理。

第 1 级边坡锚杆及框架梁施工完成后, 对边坡的力学行为和稳定性进行分析, 结果如图 8~ 9 所示。由图 9 可以看出, 在第 1 级边坡加固施工完成后, 三断岭路堑高坡的稳定系数为 1.22, 高于 1.20, 坡体稳定。因此, 三断岭路堑边坡 K25+ 070 代表性断面经边坡稳定性动态分析后最终的安全系数为 1.22, 满足设计要求。

三断岭路堑边坡 K25+ 070 代表性断面稳定性动态分析中, 各阶段的安全系数以及与现场深部水平位移监测相对应的各路径位移如表 2 所示。同理, 可对该边坡其他断面进行分析, 这样可得到整个坡体稳定性动态分析结果。

表 2 K25+ 070 稳定性动态分析各阶段相关分析结果

Table 2 Analysis results of dynamic stability for K25+ 070

阶段	安全系数	最大水平位移/mm		
		CX-1 路径	CX-2 路径	CX-3 路径
未加固	0.73	9.3	9.9	8.9
第 4 级边坡加固后	0.82	8.7	9.0	8.4
第 3 级边坡加固后	0.96	8.6	8.7	5.5
第 2 级边坡加固后	1.08	8.5	8.3	3.0
第 1 级边坡加固后	1.22	8.5	8.3	3.0

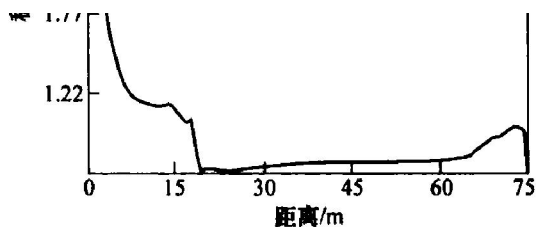


图9 第1级边坡加固后滑面各单元稳定系数分布曲线

Fig. 9 Safety factor distribution on the first reinforced slope

4 结 论

a. 以边坡岩体内的相当抗剪强度和相当剪应力之比作为边坡稳定系数,采用有限元方法,确定了施工边坡潜在最危险滑动面的位置,经计算得到的最危险滑动面与现场勘探的边坡岩体贯通结构面基本吻合,证明了计算方法的可靠性。

b. 对各个不同施工阶段(从第4级边坡施工开始到第1级边坡加固完毕)路堑边坡体稳定性进行分析,结果表明:在第4级边坡开挖加固之后,边坡滑动面稳定系数为0.82,低于1.00,边坡处于不稳定状态,需要对边坡进行下级加固处理;在第3级边坡完成加固后,边坡的稳定系数为0.96,低于1.00,仍然需对第1级边坡进行加固,而第2级边坡完成加固后高边坡的稳定系数为1.08,低于1.20,表明该边坡仍不能满足边坡设计规范的要求;当第1级边坡加固后,路堑坡的稳定系数为1.22,大于1.20,表明此坡体处于稳定状态。因此,

- [4] Hoke E and Londe, P. Surface workings in rock [C]// Advances in Rock Mechanics. Proc 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics. Washington D C: National Academy of Sciences Press, 1974.
- [5] 张有天,周维垣.岩石高边坡的变形与稳定[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
ZHANG You-tian, ZHOU Wei-heng. The deformation and stability of high-steep rock slope [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1999.
- [6] 孙玉科.边坡岩体稳定性分析[M].北京:科学出版社,1988.
SUN Yu-ke. The analysis on the stability of rock slope [M]. Beijing: Beijing Science Press, 1988.
- [7] 王思敬.金川露天矿边坡变形机制及过程[J].岩土工程学报,1982,4(3):45-61.
WANG Si-jing. Deformation mechanisms and processes in open pit mining of Jinchuan [J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(3): 45-61.
- [8] 张学言.岩土塑性力学[M].北京:人民交通出版社,1993.
ZHANG Xue-yan. Plasticity mechanics of geotechnical [M]. Beijing: China Communications Press, 1993.
- [9] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版,北京:中国水利水电出版社,1996.
QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principles and calculation of earthwork [M]. 2nd ed. Beijing: China Waterpower Press, 1996.
- [10] 孙君实.条分法的数值分析[J].岩土工程学报,1984,6(2):1-12.
SUN Jun-shi. Numerical analysis on the slice method [J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(2): 1-12.