

缓倾角红层路堑高边坡应力状态与防护研究

赵建昌^{1, 2}, 李永和¹, 吉随旺³

(1. 上海大学 理学院, 上海 200436; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730073;
3. 四川省交通厅 公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 在公路建设中, 高边坡越来越成为工程界所面临的一大难题。由于其岩体结构的复杂性, 将给边坡稳定性及防护带来一定的困难。以四川红层地区某高速公路建设中的路堑开挖高边坡为原型, 采用有限元数值模拟技术, 研究了高度为 40, 50, 60, 70, 80 m, 坡比分别为 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:1.25, 1:1.5 的开挖路堑高边坡应力状态。研究表明, 边坡开挖后剪应力集中带随边坡的坡率由陡变缓而由坡脚向坡顶方向迁移, 边坡的潜在破坏面随坡度的由陡变缓而向坡体上部迁移, 即当坡体坡比陡于 1:0.75 时坡体剪应力集中在坡脚附近, 当坡体开挖坡比缓于 1:0.75 时剪应力集中位置不在坡脚而在坡体的中上部。依据此结论, 提出红层地区开挖路堑高边坡合理的防护模式, 可供设计者参考。

关键词: 边坡工程; 数值模拟; 缓倾角红层; 路堑高边坡; 坡比; 高边坡防护

中图分类号: U 416.1¹⁺⁴

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5751 - 05

STUDY ON STRESS STATE AND PROTECTION OF EXCAVATED CUTTING OF HIGH SLOPE IN GENTLY INCLINED RED BEDS

ZHAO Jian-chang^{1, 2}, LI Yong-he¹, JI Sui-wang³

(1. School of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200436, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730073, China; 3. Highway Planning Survey Design Research Institute, Sichuan Province Communications Department, Chengdu 610041, China)

Abstract: More and more rock slope problems are met in highway construction. Because of complex structure of rock body, there are many difficulties in calculating and protecting slope stability. The stresses and deformations of excavated cutting of high slope (height 40, 50, 60, 70, 80 m with slope ratio 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:1.25, 1:1.5) are calculated as the prototype in gently inclined red beds natural slope of an expressway in Sichuan province, adopting the numerical simulation technology of finite element method(FEM). The computed results indicate that shearing stress focus zone moves from slope foot to top slope as slope ratio changes from steep to slow and the surface of deformation-failure of slope will also move in this way, i.e., as the excavated slope ratio is greater than 1:0.75, slope body shearing stress is concentrated near the slope foot; when the excavate slope ratio is lower than 1:0.75, shearing stress focus zone is not located near the slope foot, but lie in position on the upper side of the middle of slope body. According to this conclusion, a rational protection pattern of rock slope is presented for reference to engineering design.

Key words: slope engineering; numerical simulation; gently inclined red beds; excavated cutting of high slope; slope ratio; high slope protection

收稿日期: 2003 - 12 - 12; **修回日期:** 2004 - 05 - 25

作者简介: 赵建昌(1962 -), 男, 1983 年毕业于兰州铁道学院铁道工程专业, 现任教授, 主要从事新型预应力混凝土结构、边坡防护工程等方面的教学与研究。E-mail: zhaojchang@163.com。

1 引言

在高速公路建设中遇到的 30 m 以上的高边坡越来越多, 在高边坡防护设计中, 目前可供设计借鉴的研究成果和设计规范较为少见。文[1]指出: 对大于 30 m 的路堑高边坡须作特殊设计。然而, 现阶段高边坡防护设计大多依据经验, 因人而异, 出入较大。造成设计保守浪费或设计防护不当, 边坡防护失败, 引起边坡垮塌破坏, 影响线路正常运营的工程事故时有发生。因此, 对路堑高边坡的稳定性及防护设计研究是目前公路建设中急需解决的问题。在边坡稳定性分析计算中, 多采用极限平衡理论, 即根据潜在的滑面计算滑体的稳定系数, 确定边坡是否稳定。对于岩质高边坡, 由于地质条件的复杂性, 难于确定潜在的滑面, 传统的用于土质边坡稳定性分析的滑动面搜索方法不能用于岩质边坡, 极限平衡理论方法也难于应用, 所以岩质边坡分析计算难度较大^[2~7]。用有限元分析边坡的稳定性, 最早采用局部破坏判别法, 即以应力处于拉破或剪破状态部位为破损区, 按有限元计算得到应力结果对区域内各单元进行强度判别, 根据破损区的范围和分布评价边坡的稳定性^[4]。这一类方法的缺点在于对不出现破损区或破损区很小的稳定边坡难于评价其整体稳定性^[5]。事实上, 边坡岩体是一种复杂的工程岩体, 不仅仅表现在边坡成因、岩性、原生构造与空间组合及其已有变形岩体方面, 而且在内外地质应力, 特别是公路开挖、堆渣、排水等工程活动作用下, 处在不断的风化、卸荷、构造解体与复杂活动之中。有限元计算分析表明: 其模型建立的正确与否往往取决于对地质条件的认识程度, 其模拟结果取决于边坡岩体的力学参数的确定等因素。本文认为, 利用有限元模拟边坡开挖, 虽然存在诸多的不确定因素, 但其结论作为确定岩质边坡防护方案的一种手段是有益的, 而且是完全必要的。

四川盆地丘陵区广布的中生代侏罗系、白垩系岩层, 系一套内陆湖相碎屑岩系, 岩类大多为紫红色砂岩、泥岩, 俗称红层, 岩层产状平缓, 由这种构造组成的岩质边坡, 由于防护方案不当, 已发生规模较大的崩塌滑坡, 给人民生命财产及道路建设带来较大危害。本文通过对四川某高速公路建设中,

线路通过的红层边坡深挖路堑高边坡各种开挖坡比的数值模拟, 在分析了不同坡比下坡体开挖后的应力及变形后, 得出了边坡的潜在破坏面随坡比的由陡变缓而向坡顶迁移的结论。根据这一结论提出了供设计者参考的防护模式。

2 地质条件

本开挖段自然边坡坡度 $35^\circ \sim 45^\circ$, 地形较陡, 相对高差 104 m, 坡体地层为侏罗系蓬莱镇组, 岩性为紫红色的砂岩、泥岩互层, 软硬相间。岩层产状为: $296^\circ \angle 5^\circ$, 在线路走向上视倾角 $2^\circ \sim 3^\circ$, 倾向开挖方向。根据野外调查, 岩层自下而上分为 7 层。其特征自下而上简述如下:

- (1) 深紫红色泥岩夹泥质粉砂岩层($J_{3p}^{3(1)}$);
- (2) 紫褐色长石细砂岩夹泥质粉砂岩($J_{3p}^{3(2)}$);
- (3) 灰褐色粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩层($J_{3p}^{3(3)}$);
- (4) 褐紫红色细砂岩层($J_{3p}^{3(4)}$);
- (5) 泥岩夹泥质粉砂岩层($J_{3p}^{3(5)}$);
- (6) 紫红色~灰褐色细砂岩层($J_{3p}^{3(6)}$);
- (7) 泥质粉砂岩层($J_{3p}^{3(7)}$)。

岩层分布如图 1 所示。

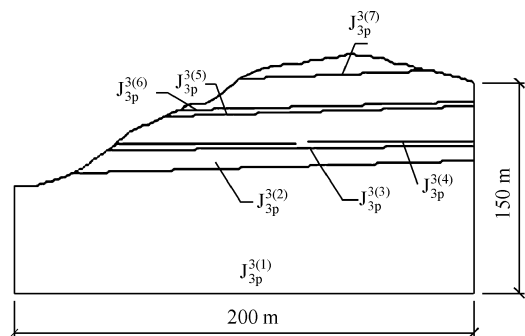


图 1 岩层分布图

Fig.1 Rock stratum distribution

3 计算模型

边坡开挖前, 岩体处于初始的自重应力场环境中, 由于岩体开挖导致开挖边界法向上的应力释放, 从而引起岩体的应力场和位移场发生变化。根据野外地质调查槽探及钻探资料, 将本路堑开挖段的地质剖面进行了地质概化, 建立按工程地质岩组分 3 类 7 层的地质模型(见图 1)。选择主剖面作为计

算剖面，计算范围水平方向为 200 m，竖直方向 150 m，均大于 2 倍的开挖影响带，符合有限元计算精度要求。为了研究岩体在自重应力作用下，边坡开挖后应力场和位移场的特征变化，计算模型以地表为自由边界，其余三边均采用光滑面法向约束，计算模型见图 2。计算中按弹塑性力学模型，屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则，分析计算使用国内外广泛采用的 2D- σ 程序进行。根据试验值和工程地质类比法得出计算中采用的岩土材料物理力学参数，如表 1 所示。

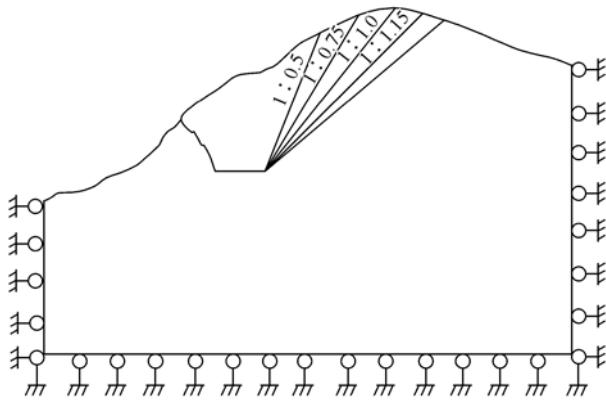


图 2 有限元计算模型

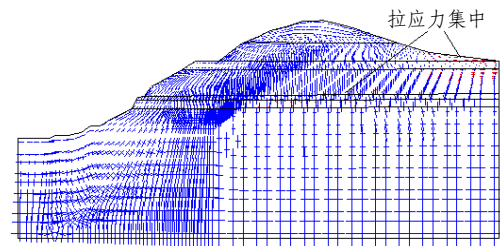
Fig.2 FEM model for computation

4 应力状态与稳定性分析

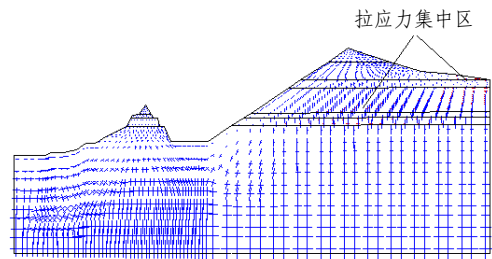
为了研究不同开挖坡比下，岩体内应力状态，特别是影响坡体稳定的拉、剪应力的分布情况，本次有限元模拟分析对路堑边坡开挖的左侧坡度控制在 1:0.5，右侧开挖(以 1:1 放坡后的高度为标准)按不同的高度(40, 50, 60, 70, 80 m)下，一次开挖，分别计算了 1:0.5, 1:0.75, 1:1 和 1:1.5 四种不同的坡比，对包括天然状态下的坡体在内的 21 种情况进行了计算。

大量的研究表明，边坡的破坏首先从剪应力集中部位开始，然后按集中程度及破坏点的应力释放结果逐步扩展，最终形成破裂面^[7-10]，边坡岩体沿破裂面产生滑移变形。因此从边坡的应力状态研究边坡的变形破坏以致失稳是稳定性分析的前提。本次有限元模拟分析结果表明：

(1) 深挖路堑段边坡在天然状态下，由于岩层的产状倾向临空面，在沟谷卸荷和自重应力的长期作用下，在坡体第 2 层和第 4 层砂岩(底部)产生拉应力集中，使得局部岩体长期处于拉应力作用状态。出现这种现象的主要原因是由于泥岩和砂岩软硬岩层相间的近水平岩层地质结构在重力作用下，向临空方向产生差异变形引起的。剪应力在第 4 层砂岩与第 3 层泥岩的接触坡脚处形成集中带(见图 3(a))。



(a) 开挖前



(b) 开挖后

图 3 边坡应力矢量图

Fig.3 Scheme of stress vector for slope

表 1 岩土物理力学参数

Table 1 Rock physico-mechanical parameters

序号	层位	E /MPa	μ	c /MPa	ϕ /(°)	$c_{残余}$ /MPa	$\phi_{残余}$ /(°)	γ /(MN·m ⁻³)	R /MPa
1	J _{3p} ³⁽¹⁾	900.0	0.245	0.60	42.9	0.4	16.5	0.023 85	0.8
2	J _{3p} ³⁽²⁾	5 150.0	0.220	3.55	39.9	1.0	18.5	0.023 10	1.6
3	J _{3p} ³⁽³⁾	900.0	0.245	0.60	42.9	0.4	16.5	0.023 85	0.8
4	J _{3p} ³⁽⁴⁾	5 150.0	0.220	3.55	39.9	1.0	18.5	0.023 10	1.6
5	J _{3p} ³⁽⁵⁾	900.0	0.245	0.60	42.9	0.4	16.5	0.023 85	0.8
6	J _{3p} ³⁽⁶⁾	5 150.0	0.220	3.55	39.9	1.0	18.5	0.023 10	1.6
7	J _{3p} ³⁽⁷⁾	1 650.0	0.230	1.55	40.5	0.5	25.5	0.023 60	0.9

(2) 坡体开挖后, 主应力迹线发生明显变化, 靠近临空面的 σ_1 方向基本平行于坡面方向, 而 σ_3 与之正交, 在坡面附近几乎为0, 所以实际上坡面处于单向应力状态(不考虑 σ_2), 向内则变为两向或三向状态(见图3(b))。不同的坡比(1:0.5, 1:0.75, 1:1和1:1.5)开挖应力场分析结果表明, 开挖深度小于70m, 随坡度变陡, 天然条件下所形成的拉应力区呈带状向坡体开挖区逼近, 而大于70m拉应力区迁移方向相反。剪应力集中带位置随坡度的陡缓变化, 坡度较陡时(如1:0.5, 1:0.75)剪应力集中位置在坡脚附近, 且坡度越陡剪应力值越高(见图4); 随坡度变缓(缓于1:1), 剪应力集中带向中上部方向迁移(见图5), 也即随坡体开挖坡比由陡到缓, 潜在滑面的形成由坡角向坡顶方向迁移。当坡体越缓, 潜在滑面的剪出口发生在坡体的中上部而不在坡脚。

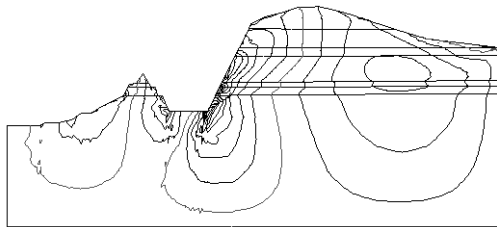


图4 开挖60m, 坡比1:0.5边坡剪应力色谱图
Fig.4 Shear force isopleth chromatogram of slope with cutting depth 60 m and slope ratio 1:0.5

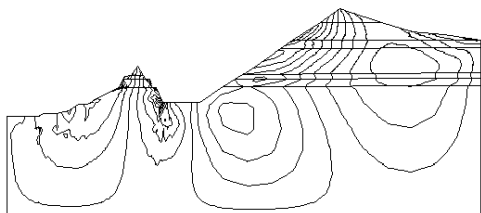


图5 开挖80m, 坡比1:1.5边坡剪应力色谱图
Fig.5 Shear force isopleth chromatogram of slope with cutting depth 80 m and slope ratio 1:1.5

(3) 在坡缘附近, 在一定条件下, 坡面的径向应力和坡顶的切向应力可转化为拉应力, 形成一张力带, 因而这些部位的岩体易被拉裂形成与坡面平行的拉裂面。坡体在拉、剪应力的相互作用下, 坡体的滑移面逐渐形成, 在一定条件下变形失稳。

5 边坡防护方案

公路高边坡的防护设计理论目前处于探索阶段, 大多数采用经验或假定边坡的破坏形态进行极

限平衡分析^[9, 10]。由于岩质高边坡岩体结构的复杂性, 近年来高边坡分析与防护结构设计利用数值分析手段, 取得了一定的效果^[11, 12]。从路堑高边坡开挖后的应力状态可知, 边坡最大主应力在坡面附近平行于坡面, 最小主应力在坡面附近几乎为0。已有的研究认为边坡剪应力主要集中在坡脚附近^[8], 在坡顶坡面附近形成拉应力集中, 因而边坡坡面附近岩体在这种应力状态作用下, 易发生向临空面回弹和变形, 使得坡体上部岩体受拉, 坡脚岩体受剪。上拉下挡边坡防护方式是这一认识的具体体现, 上拉是指上部岩体设预应力锚索或岩体锚栓、锚杆等以增大岩体的抗拉强度和增强沿不连续面的剪切阻力, 从而增加了岩体的强度; 下挡是指下部设挡土墙, 以阻止坡体的剪切变形。虽然这种边坡防护方式已广泛应用于高速公路建设中, 但是由于坡体开挖以后按不同的坡比放坡, 应力集中部位不同, 潜在滑面的剪出口位置不同, 挡土墙位置放置不当使得挡土墙起不到应有的作用, 就会造成潜在的工程隐患。如108国道高速公路泸沽—黄联关段某边坡防护方案不当造成的开挖后在坡体中部出现局部垮塌破坏。垮塌后采用了预应力锚索加固措施。从理论分析和上述工程示例可以看出: 当边坡设置缓于1:0.75时, 由于剪应力集中带不在坡脚, 所以在坡脚处设挡土墙意义不大, 支挡结构应设在潜在滑面剪出口位置。考虑边坡坡脚的冲刷, 可在坡脚处设浆砌片石护坡进行防护。

6 结语

通过对四川红层缓倾角高边坡多个坡比数值模拟分析, 得出了高边坡剪应力集中位置与坡体开挖放坡的坡比有关。当坡体坡比陡于1:0.75时, 坡体剪应力集中在坡脚附近; 当坡体开挖坡比缓于1:0.75时, 剪应力集中位置不在坡脚而在坡体的中上部。这一结论对防护设计具有重要的意义。鉴于岩质边坡地质条件的复杂性, 在高边坡的防护设计中, 除了对高边坡的工程地质条件进行分析研究外, 还应通过对边坡开挖后的应力状态的分析研究, 确定潜在的剪出口准确位置, 最终确定合理的防护方案。

参考文献(References):

- [1] 交通部第二公路勘察设计院. 路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.(The Second Highway Surveying and Designing Institute of

- Ministry of Communications. Subgrade[M]. Beijing: China Communications Press, 1997.(in Chinese)
- [2] 王庚荪. 边坡的渐进破坏及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 29 - 33.(Wang Gengsun. The progressive failure of slope and the stability analyses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 29 - 33.(in Chinese))
- [3] 周萃英. 斜坡岩体复杂性特征及其预测新认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 34 - 38.(Zhou Cuiying. Complexity features of slope rock mass and some new thought about landslide prognosis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 34 - 38.(in Chinese))
- [4] 章青, 卓家寿. 三峡船闸高边坡稳定性分析的界面元法与评判准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 285 - 288.(Zhang Qing, Zhuo Jiashou. Interface element method and criterion for stability analysis of high slopes in three gorges shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 285 - 288.(in Chinese))
- [5] 赵尚毅, 郑颖人. 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.(Zhao Shangyi, Zheng Yingren. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 254 - 260.(in Chinese))
- [6] 钱家欢. 土工原理与计算(上册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. (Qian Jiahuan. Geotechnological Principle and Calculation (Volume One)[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987.(in Chinese))
- [7] 邵龙潭. 有限元边坡稳定分析方法及应用[J]. 计算力学学报, 2001, 23(1): 81 - 87.(Shao Longtan. Slope stability analytical method and application by finite element[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 23(1): 81 - 87.(in Chinese))
- [8] 张孟喜. 边坡稳定分析有限元追逐法[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 35 - 41.(Zhang Mengxi. Slope stability analytical method of finite element chase[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 35 - 41.(in Chinese))
- [9] 崔政权, 李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(Cui Zhengquan, Li Ning. Slope Project—the Theory and Latest Practice Development[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [10] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Analysis and Principle of Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [11] 吉随旺, 张倬元. 缓倾角红层深挖路堑边坡稳定性分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1999, 18(9): 29 - 32.(Ji Suiwang, Zhang Zhuoyuan. The stability numerical analysis of deep excavated cut slope in gently inclined red beds[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1999, 18(9): 29 - 32.(in Chinese))
- [12] 凌荣华, 韩贝传. 某高速公路深挖路堑边坡的稳定性分析研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, (5): 40 - 41, 51.(Lin Ronghua, Han Beichuan. Stability analysis of some express way deep-cuts slope[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996, (5): 40 - 41, 51.(in Chinese))