

文章编号: 1002-0268 (2009) 09-0102-05

# 受偏压隧道影响边坡加固的数值分析

王 军, 曹 平, 林 杭

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 针对隧道工程建设中切坡引起边坡及隧道的变形, 其稳定性受到不同程度的影响, 采用三维有限差分计算程序 FLAC<sup>3D</sup> 分析挖方边坡和坡顶隧道联合稳定性。通过对未开挖、未加固边坡进行数值模拟计算, 得到水平位移和最大、最小主应力分布特征, 分析其潜在滑动面和隧道围岩受拉影响区, 确定其加固范围。根据抗滑桩受力特点, 经比选, 采用单排抗滑桩加固隧道边坡。数值计算结果表明: 有限差分法能获得单排抗滑桩的合理设计和边坡坡脚及坡面受力情况, 同时还能得到隧道围岩拉压应力的分布及优化覆盖层厚度, 数值计算与工程监测数据吻合。

**关键词:** 隧道工程; 边坡加固; 有限差分法; 隧道边坡; 偏压稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

## Numerical Analysis of Slope Reinforcement with Effect of Bias Tunnel

WANG Jun, CAO Ping, LIN Hang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** Aimed at the different influence of slope and tunnel deformation caused by slope cutting on stability of tunnel adjacent slope, the combined stability was analyzed by using 3D finite difference program FLAC<sup>3D</sup>. The distribution characters of horizontal displacement, maximum and minimum principal stresses were calculated by numerical simulation of the slopes without cutting and reinforcement. The potential sliding surface and tensile stress region for tunnel slope without cutting and reinforcement were analysed to determine its reinforcement scope. Based on the mechanical characters of anti-sliding piles, the single-row anti-slide piles were adopted for tunnel adjacent slope reinforcement after comparison. The numerical calculation result shows that (1) reasonable designed parameters can be obtained for single-row anti-sliding piles and mechanical characters can also be markedly improved between toe and surface of slope by finite difference program; (2) distribution of tensile-compressive stress region in wall rock region and optimized roof thickness were obtained in favor of enhanced stability. The numerical calculation is coincident with the monitoring data.

**Key words:** tunnel engineering; slope reinforcement; finite difference method; tunnel adjacent slope; bias stability

## 0 引言

随着交通量的日益增长, 在山区修建公路、铁路处处可见。建设中受开挖影响形成了大量的偏压隧道, 安全隐患不可避免。如何寻找隧道边坡加固的优化方案和数值模拟分析, 势在必行。陈东瑞<sup>[1]</sup>对隧道

边坡治理设计与施工进行了研究, 并用常规的施工方法来加固边坡。王祥秋<sup>[2]</sup>用施工动态监测拱顶位移与有限元模拟来研究高速公路偏压隧道。杨小礼<sup>[3]</sup>采用侧壁导坑法对浅埋偏压隧道的施工工序进行了研究等。尽管如此, 科技工作者对偏压隧道的研究集中在隧道自身稳定性方面, 而对边坡稳定性普遍关心不

收稿日期: 2008-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50774093); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20060533071)

作者简介: 王军 (1978-), 男, 湖南澧县人, 博士研究生, 研究方向为岩土工程数值计算. (wjlin@126.com)

够。因工程的特殊性和复杂性, 本文涉及的是受公路开挖边坡的影响, 坡顶铁路偏压隧道联合稳定性的数值分析, 这在目前的数值实例研究中并不多见。在此, 作者在上述研究的基础上<sup>[4-9]</sup>, 以福建境内某偏压隧道边坡联合加固为工程背景, 利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>, 通过分析计算提出加固的最优化方案。其结果对工程实践和学术研究有一定的参考价值。

1 未开挖未加固有限差分分析

利用专门求解岩土力学问题的三维显式有限差分计算程序 FLAC<sup>3D</sup> 模拟求解该工程。此软件由美国 Itasca 公司研制开发<sup>[10]</sup>, 具有良好的前后处理功能, 计算时三维网格自动被划分为块体单元, 每个单元体都有自己的材料模型, 材料可以在力的作用下屈服流动, 网格也随着材料的变形而改变 (大应变模式), 同时程序对差分方程解迭代的精确性和收敛性进行了优化, 计算时间和计算结果都能满足要求。对于岩土材料来说, 显式方法很容易引入材料的非线性本构关系, 能真实的模拟工程计算。利用 FLAC3D 内嵌的 FISH 语言功能, 笔者进行隧道边坡抗滑桩加固的程序开发, 并进行模拟计算, 分析位移和应力场的分布特征, 可以得到隧道边坡联合稳定性分析的计算流程, 如图 1 所示。

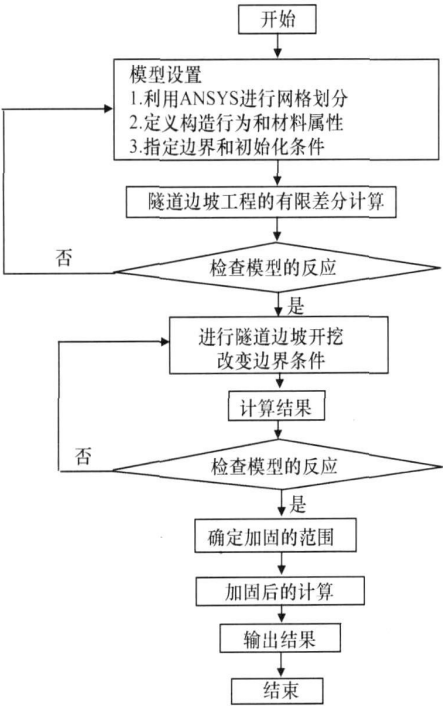


图 1 隧道边坡数值计算流程图

Fig 1 Flow chart of numerical calculation process of tunnel adjacent slope

三维快速拉格朗日法以节点为计算对象, 将力和质量均集中在节点上, 然后, 通过运动方程在时域内进行求解。节点运动方程可表示为如下形式:

$$\frac{\partial u_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t)}{m^l}, \tag{1}$$

式中,  $u_i$  为速率分量; 上标  $l$  为节点的变量;  $F_i^l(t)$  为在  $t$  时刻节点的在  $i$  方向的不平衡力分量;  $m^l$  为  $l$  节点的集中质量, 可由虚功原理导出。

$m^l$  在分析动态问题时采用实际的集中质量, 而在分析静态问题时则采用虚拟质量以保证数值稳定, 对于每个四面体, 其节点的虚拟质量为:

$$m^l = \frac{a_1}{9V} \max\{[n_i^{(i)} S^{(l)}]^2, i = 1, 3\}, \tag{2}$$

式中,  $V$  为四面体的体积;  $s$  为四面体的外表面;  $n_i$  为外表面的单位法向向量分量;  $a_1 = K + \frac{4}{3G}$ ;  $K$  为体积模量;  $G$  为剪切模量。

式(2)的前提是计算时步  $\Delta t = 1$ , 任一节点的虚拟质量为包含该节点的所有四面体对该节点的贡献之和。将式(2)左端用中心差分来近似, 则可得到:

$$\dot{u}_i^l \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \dot{u}_i^l \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \frac{F_i^l(t)}{m^l} \cdot \Delta t. \tag{3}$$

福建漳泉铁路烧水坑隧道边坡工程主要为岩质挖方路堑边坡, 其坡脚下连接正在修建的安剑公路, 属一级公路。铁路隧道位于边坡坡顶。边坡典型地质破面高 60 m, 表层为全风化岩, 中下部主要由强、弱风化岩组成, 岩石力学性质较差。其组成地层厚度及相关力学参数如表 1 所示, 边坡地质剖面情况如图 2 所示。

表 1 岩质挖方边坡地层力学参数及厚度

Tab 1 Layer thickness and mechanical parameters of

rock cut slope

| 地层         | 层厚/<br>m | 容重/<br>$\gamma$ (kN·m <sup>-3</sup> ) | 体积<br>模量<br>$K$ /MPa | 剪切<br>模量<br>$G$ /MPa | 泊松比<br>$\mu$ | 粘结力<br>$c$ /MPa | 内摩<br>擦角<br>$\varphi$ (°) | 抗拉<br>强度<br>$\sigma_t$ /MPa |
|------------|----------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|
| 全风化<br>岩石  | 5.5      | 21.4                                  | 30                   | 18                   | 0.28         | 0.08            | 22                        | 0.8                         |
| 强弱风<br>化岩石 | 见图 1     | 23.3                                  | 380                  | 243                  | 0.22         | 1.2             | 32                        | 2.4                         |

分析前, 首先对未开挖未加固边坡的情况, 搜索潜在滑动面, 以该面的位置来确定加固的范围。计算模型共划分为 26 924 个单元, 6 898 个节点, 采用四面体实体单元, 本构模型为 M-C 模型。边界条件为底部固定, 左右两侧水平约束, 上部为自由边界。网格划分见图 3。

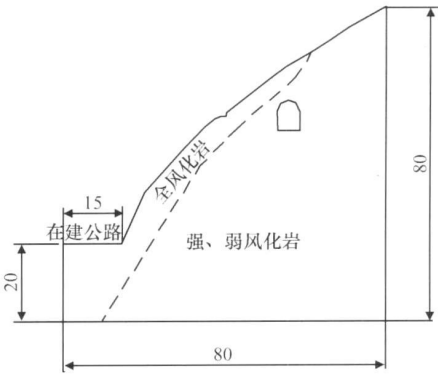


图 2 隧道边坡地质剖面图 (单位: m)  
Fig 2 Geological profile of tunnel adjacent slope (unit: m)

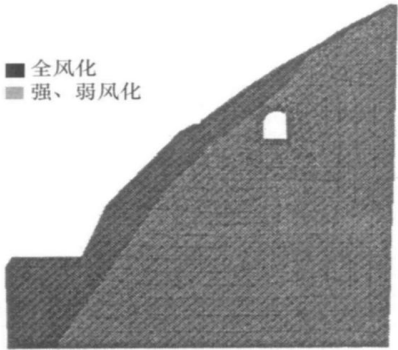


图 3 网格划分图  
Fig 3 Finite element mesh

将表 1 的相关参数输入到模型中, 运行程序, 得到位移等值线图 and 应力等值线图, 见图 4~ 图 6 所示。

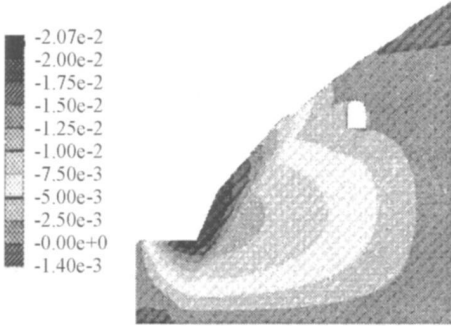


图 4 水平位移等值线图 (单位: m)  
Fig 4 Horizontal displacement contour chart (unit: m)

水平位移主要为指向坡外的负位移, 最大位移在坡脚处其值在 2.2 cm 以上。边坡中下部位移很小。隧道水平收敛位移较小, 但在偏压隧道外侧表现出较大的位移 1 cm 左右, 内侧位移比外侧偏小。竖直位移主要为指向下方的负位移, 范围在 1~ 4 cm, 本文

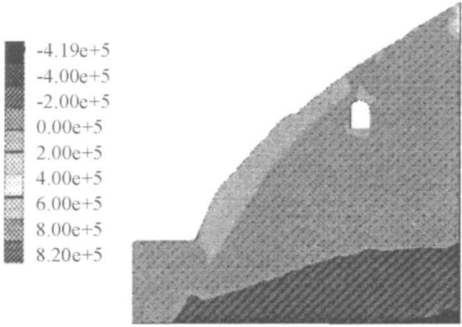


图 5 最大主应力图 (单位: Pa)  
Fig 5 Maximum principal stress contour chart (unit: Pa)

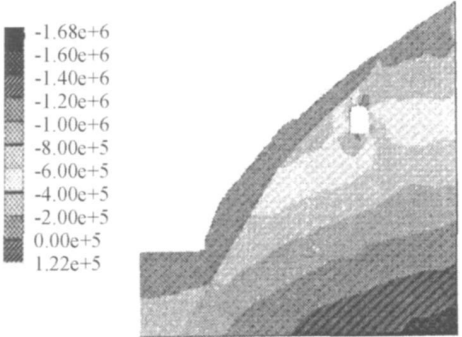


图 6 最小主应力图 (单位: Pa)  
Fig 6 Minimum principal stress contour chart (unit: Pa)

暂不分析。边坡主要表现为指向坡脚浅层的滑动。

主应力等值线图可看出, 最大主应力主要表现为沿边坡坡面浅层的拉应力, 其值在 0.2 MPa 左右, 边坡中下部为压应力, 范围在 0.2~ 0.5 MPa。最小主应力沿坡面浅层的压应力, 其值在 0.2 MPa 左右, 表现出较小的压应力。深部为较大的压应力, 范围在 0.8~ 2 MPa 左右。隧道拱顶左侧比右侧的压应力偏大, 且隧道周围压应力分布不均匀, 是偏压所致, 应重点防范。以上计算没考虑地震, 水和施工开挖等影响, 计算得到的边坡在重力作用下是较稳定的。

岩土介质的流变特性是岩土类材料重要的力学性质之一, 隧道边坡在自重作用下, 长时间也能表现出一定程度的塑性变形, 如图 7 所示。该工程的塑性变形主要分布在隧道周边、坡面浅层和坡脚以及坡顶的局部位置。这也是该隧道边坡加固范围的重点所在。

## 2 开挖加固有限差分分析

### 2.1 抗滑桩加固

因公路建设需要, 目前边坡坡脚已受到大量开挖, 加上几天的雨水冲刷, 边坡出现不同程度的溜坍

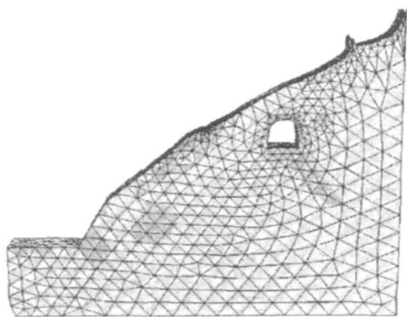


图 7 隧道边坡破坏图

Fig 7 Breakage of unreinforced tunnel adjacent slope

和滑动, 影响施工进度。现场调查发现, 隧道左侧衬砌有两条干燥横向裂纹, 右侧完好, 隧道安全已受到了严重的影响。由于公路边坡的开挖引发坡上偏压隧道的变形甚至破坏, 这方面的事例在工程中并不常见。笔者综合比较, 最后选用抗滑桩加固隧道边坡的治理方案。抗滑桩的截面尺寸为  $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ , 桩长  $30\text{ m}$ , 单排间距为  $4\text{ m}$ , 采用 C25 混凝土。本文仅分析单排桩的情况 (因篇幅有限多排桩和锚索综合加固及其他方案比较见其他文献), 主要以水平位移、最大主应力和最小主应力为分析要素, 对边坡加固后进行了数值计算, 结果见图 8~ 图 10。

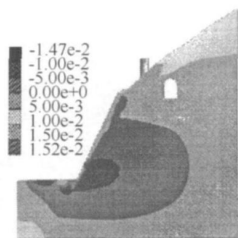


图 8 水平位移等值线图 (单位: m)

Fig 8 Horizontal displacement contour chart (unit: m)

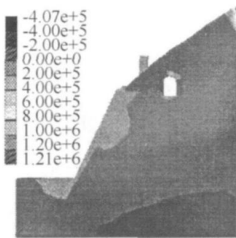


图 9 最大主应力图 (单位: Pa)

Fig 9 Maximum principal stress contourchart (unit: Pa)

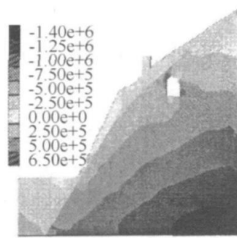


图 10 最小主应力图 (单位: Pa)

Fig 10 Minimum principal stress contourchart (unit: Pa)

经加固后边坡浅层和坡脚的水平位移得到控制, 其值在  $0.5 \sim 1.2\text{ cm}$ , 中深部位移也只有几毫米。隧道周围位移分布均匀, 位移在安全范围内, 得到控制。

边坡表层的最大主应力在  $0.2\text{ MPa}$  左右, 主要表现为压应力, 因开挖范围有所减小。隧道拱顶仍有拉应力存在, 但数值很小在强度安全范围以内。抗滑桩受力均匀且顶端受力较小, 满足自身强度和设计要求。从图 8 可知, 边坡最小主应力的拉应力范围也有所减小, 坡脚拉应力区范围很小, 已不够成威胁。隧道周边也主要为压应力, 为  $0.25 \sim 1\text{ MPa}$ , 无拉应力区。抗滑桩的治理效果很明显。

## 2.2 实际工程情况

边坡加固中, 设计单位最终采用的是单排抗滑桩和坡面封闭综合治理措施, 并对局部进行了调整。工程施工期间和竣工后, 经过 3 个月的边坡坡脚、抗滑桩顶端以及隧道周边水平位移的监测, 具体数据见图 11 所示 (本文只给出了坡脚和抗滑桩顶的监测数据)。坡脚的位移值稳定在  $1.7\text{ cm}$  左右, 比数值模拟  $1.5\text{ cm}$  计算高了  $0.2\text{ cm}$ , 误差在  $12\%$  以内, 在允许范围以内。抗滑桩顶的位移为  $0.53\text{ cm}$ , 比数值模拟  $0.5\text{ cm}$  计算高了  $0.3\text{ cm}$ , 误差在  $6\%$  以内, 也在允许的范围以内。实测结果比数值计算结果略偏大, 主要

是雨水下渗引起的, 但都在允许误差范围内, 数值模拟计算满足工程的要求, 为进一步增加稳定性, 建议对坡顶小范围进行简单的削坡、排水和封闭。

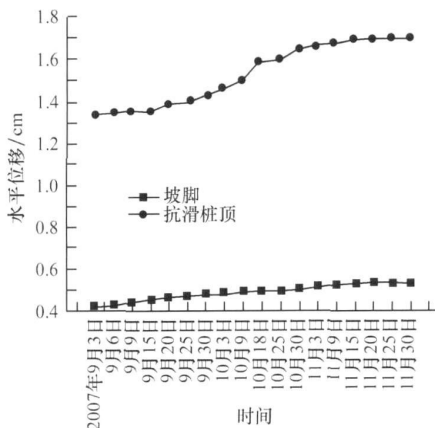


图 11 水平位移监测图

Fig 11 Horizontal displacement monitoring curve

## 3 结论

- (1) 通过三维数值分析, 得出了单排抗滑桩加固隧道边坡的设计参数, 结合监测数据, 其计算结果合理, 方便应用。
- (2) 抗滑桩加固隧道边坡可明显地改善坡脚受力

状况,减小坡面拉应力区和坡面水平位移,使其得到很好的控制。

(3) 文中的单排抗滑桩加固,可以改善隧道偏压带来的不利影响,隧道受拉区和应力集中也得到明显的控制,允许隧道覆盖层局部削减,即加固了隧道又使边坡得到稳定达到安全与经济双赢的综合治理效果。

(4) 至于抗滑桩的优化设计以及隧道边坡覆盖层的最小厚度有待进一步研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [ 1 ] 陈东瑞. 隧道边坡治理方案设计与施工 [ J ] . 铁道建筑, 2005 ( 3 ): 45- 48.  
CHEN Dongrui. Design and Construction of Treatment Scheme for Side-slope Adjacent to Tunnel Portal [ J ] . Railway Engineering, 2005 ( 3 ): 45- 48
- [ 2 ] 王祥秋, 杨林德, 高文化. 高速公路偏压隧道施工动态监测与有限元仿真模拟 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2005, 24 ( 2 ): 284- 289.  
WANG Xiangqiu, YANG Linde, GAO Wenhua. Dynamic Monitoring and FEM Simulation Analysis of an Expressway Tunnel with Unsymmetrical Loadings [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 ( 2 ): 284- 289
- [ 3 ] 杨小礼, 眭志荣. 浅埋小净距偏压隧道施工工序的数值分析计算 [ J ] . 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38 ( 4 ): 764- 770.  
YANG Xiaoli, SUI Zhirong. Numerical Simulation of Construction Sequence for Shallow Embedded Bias Tunnels with Small Clear Distance [ J ] . Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38 ( 4 ): 764- 770.
- [ 4 ] 张玉芳, 李奇平, 张治平. 预应力锚索抗滑桩工程中锚索拉力实测与分析 [ J ] . 中国铁道科学, 2003, 24 ( 3 ): 22- 26.  
ZHANG Yufang, LI Qiping, ZHANG Zhiping. Measuring and Analyzing Tension Force of Anchor Cable in Anti-slide Pile with Pre-stressed Anchor Cable [ J ] . China Railway Science, 2003, 24 ( 3 ): 22- 26
- [ 5 ] 晏启祥, 何川, 姚勇. 软岩小净距隧道施工力学效应研究 [ J ] . 地下空间与工程学报, 2005, 1 ( 5 ): 693- 697.  
YAN Qixiang, HE Chuan, YAO Yong. Study on Mechanical Effect of Small-distance Tunnels Located at Soft Ground [ J ] . Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 ( 5 ): 693- 697.
- [ 6 ] 徐银龙. 桩板墙加固隧道及路堑施工技术 [ J ] . 铁道工程学报, 1996 ( 3 ): 101- 105.  
XU Yinlong. Construction Technique for Strengthening Tunnel and Side Slope of Cut by Retaining Wall with Piles and Concrete Plates [ J ] . Journal of Railway Engineering Society, 1996 ( 3 ): 101- 105.
- [ 7 ] 靳晓光, 刘伟, 郑学贵. 小净距偏压公路隧道开挖顺序优化 [ J ] . 公路交通科技, 2005, 22 ( 8 ): 61- 64.  
JIN Xiaoguang, LIU Wei, ZHENG Xuegui. Optimization of Excavating Sequence for Closely Spaced Bias Double-tube Tunnels [ J ] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 ( 8 ): 61- 64.
- [ 8 ] 王汉鹏, 李术才, 郑学芬. 高速公路分岔隧道施工过程稳定性分析与监测研究 [ J ] . 公路交通科技, 2008, 24 ( 2 ): 106- 112.  
WANG Hanpeng, LI Shucai, ZHENG Xuefen. Stability and Monitoring on Construction Process of Expressway Forked Tunnel [ J ] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 24 ( 2 ): 106- 112.
- [ 9 ] 陈强, 韩军, 艾凯. 某高速公路山体边坡变形监测与分析 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2004, 23 ( 2 ): 299- 302.  
CHEN Qiang, HAN Jun, AI Kai. Monitoring and Analysis of Slope Deformation along a Speedway [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 ( 2 ): 299- 302.