

# 隧道塌方区加固后的施工监测与仿真分析

陈秋南<sup>1, 2</sup>, 张永兴<sup>2</sup>, 刘新荣<sup>2</sup>, 王石光<sup>3</sup>, 周应麟<sup>3</sup>, 邱喜华<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 湖南路桥建设集团公司, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 常德—张家界高速公路关口垭隧道右洞 YK73+925~YK73+955 段在施工过程中出现塌方, 分析塌方原因后, 结合工程具体情况, 采用超前小导管预注浆辅以工字钢拱架处理塌方区, 在处理段增设 2 个监测断面, 并利用有限元法进行数值模拟分析, 现场监控量测和有限元计算得到隧道收敛位移和拱顶下沉规律基本一致, 且小于规范允许值, 表明超前小导管预注浆方法处理塌方区效果良好。

**关键词:** 隧道工程; 隧道塌方; 超前小导管注浆; 现场监测; 有限元模拟

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)01 - 0158 - 04

## IN-SITU MONITORING AND FEM SIMULATION ANALYSIS OF CONSOLIDATION FOR A COLLAPSED HIGHWAY TUNNEL

CHEN Qiu-nan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yong-xing<sup>2</sup>, LIU Xin-rong<sup>2</sup>, WANG Shi-guang<sup>3</sup>, ZHOU Ying-lin<sup>3</sup>, QIU Xi-hua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Hunan Provincial Communications Planning Survey and Design Institute, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Because of continuous precipitation and cracked surrounding rock, collapse of tunnel was found in the section YK73+955 - YK73+925. According to engineering geology and in-situ construction condition, ahead ductile grouting method was applied to the surrounding rock consolidation of the tunnel. In order to investigate consolidation effect, two cross-sections of collapse zone measurement were increased; and finite element simulation analysis was applied to a cross-section. Measurement and calculation results of convergence displacement and vault subsidence show that tunneling collapse zone was consolidated by ahead ductile grouting method successfully.

**Key words:** tunneling engineering; collapsed tunneling; ahead ductile grouting method; in-situ monitoring; finite element simulation

## 1 引言

常德—张家界高速公路关口垭隧道左洞全长 880 m, 右洞全长 700 m。按双向车道高速公路分 2 座独立的隧道设计, 隧道建筑限界按 100 km/h 行车速度确定, 隧道净空宽度 11.10 m, 净空高度 7.10 m。

右洞 YK73+936~YK73+945 段原设计为 IV 类围岩, 埋深浅(25~30 m), 因岩石节理裂隙、层理较发育, 主要节理有 2 组: (1) 倾向 SW40°, 倾角 70°~85°; (2) 倾向 SE60°, 倾角 70°~85°。节理裂隙面受区域构造影响产生扭曲变形, 且裂隙面闭合, 仅受风化影响而开裂, 裂隙间距一般为 2~3 cm, 连通性较好, 且有泥质夹层, 整体性和稳定性较差,

**收稿日期:** 2004 - 08 - 15; **修回日期:** 2004 - 12 - 20

**基金项目:** 湖南省教育厅资助项目(03C509); 湖南交通科技创新资助项目(2005015)

**作者简介:** 陈秋南(1968 -), 男, 博士, 2005 年于重庆大学获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩土与隧道工程方面的教学与研究工作。E-mail: cqndoc@163.com。

开挖以后掌子面有少量渗水，主要为裂隙水和地表水。经业主、设计院及监理共同研究决定，上分层开挖后按 II~III 类围岩进行初期支护。

2004 年 5 月 29 日中午因连降暴雨以及支护不及时导致右洞 YK73+936~YK73+945 段上台阶围岩失稳而塌方，且塌方不断发展，向外(张家界端)已延伸到 YK73+955 位置，向内(常德端)延伸至 YK73+925 位置，塌方高度为 10 m 以上。

## 2 小导管法加固塌方区及现场监测

### 2.1 小导管法加固隧道塌方区

综合分析塌方区的规模及现场揭露的地质情况，结合洞内施工条件及施工情况，拟提出超前小导管预注浆法加固隧道塌方区。采用  $\phi 42$  mm 超前小导管，壁厚 3.5 mm，长度 6.0 m，纵向间距 1.0 m，环向间距 15 cm，仰角  $12^{\circ}\sim 16^{\circ}$ 。注浆用浆液水灰比 0.5~1.0，注浆压力 1~2 MPa，必要时在孔口设置止浆塞。注浆前先对掌子面喷混凝土进行封闭，并辅以 I18 工字钢架加强处理，工字钢架纵向间距 0.5 m，塌方区加固示意图如图 1 所示。

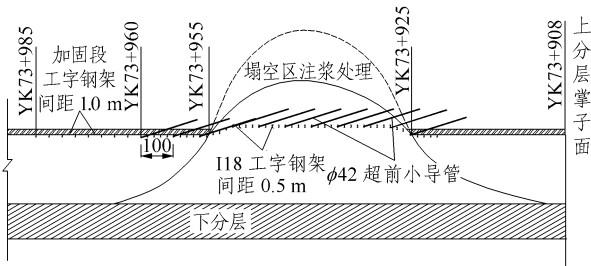


图 1 塌方区加固示意图

Fig.1 Sketch of collapsed zone consolidation

### 2.2 塌方区加固后监控量测成果分析

新奥法量测工作的目的主要是利用量测结果修改设计并指导施工，对量测数据进行分析处理与必要的计算和判断后，作出预测与反馈，以保证隧道施工安全和围岩稳定<sup>[1~4]</sup>。为了正确判断塌方区处理后围岩的稳定性情况，按照要求增设了 YK73+950，YK73+955 两个监控量测断面，分别量测隧道拱顶下沉量和收敛位移，其测点布置见图 2。

#### (1) YK73+950 断面量测成果分析

图 3，4 分别为 YK73+950 断面收敛位移和拱顶下沉量与时间的关系曲线。由量测成果可知，隧道的相对收敛位移最大值为 0.38%，拱顶相对下沉量是中间测点最大，为 0.40%，规范规定隧道在 III

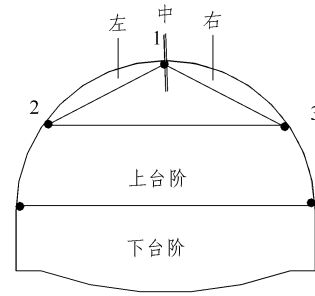


图 2 监控量测点布置

Fig.2 Distribution of measuring points

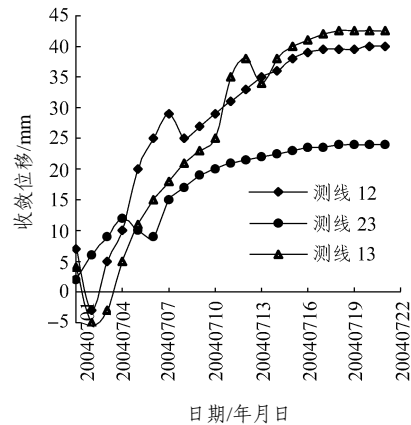


图 3 YK73+950 断面收敛位移与时间的关系曲线

Fig.3 Curves of convergence displacement and time in the section YK73+950

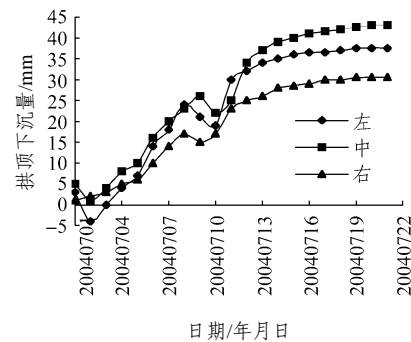


图 4 YK73+950 断面拱顶下沉量与时间的关系曲线

Fig.4 Curves of subsidence displacement and time in the section YK73+950

类围岩中埋深在 50 m 以下的允许相对位移值为 0.10%~0.50%<sup>[3]</sup>，因此满足规范要求。

#### (2) YK73+955 断面量测成果分析

图 5，6 分别为 YK73+955 断面收敛位移和拱顶下沉量与时间的关系曲线。由量测成果可知，隧道的相对收敛位移最大值为 0.33%，拱顶相对下沉量是中间测点最大，为 0.38%，而规范规定隧道在 III 类围岩中埋深在 50 m 以下的允许相对位移值为 0.10%~0.50%<sup>[3]</sup>，因此满足规范要求。

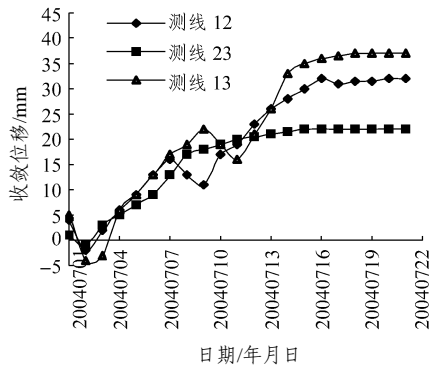


图5 YK73+955 断面收敛位移与时间的关系曲线

Fig.5 Curves of convergence displacement and time in the section YK73+955

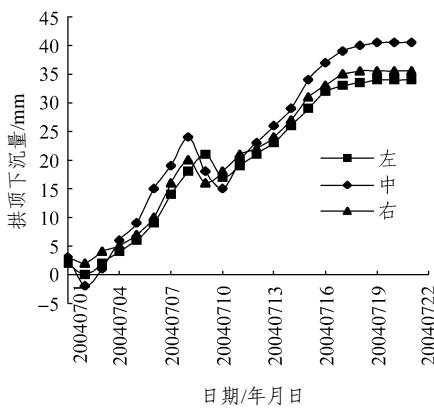


图6 YK73+955 断面拱顶下沉量与时间的关系曲线

Fig.6 Curves of vault subsidence displacement and time in the section YK73+955

### 3 有限元计算原理与模型

隧道塌方区处理结果采用有限元法进行仿真模拟分析:

#### (1) 屈服准则

根据隧道围岩的工程地质条件与力学性态, 采用平面弹塑性有限元方法进行模拟计算, 其屈服条件<sup>[5~7]</sup>可表示为

$$F(\sigma) = K(k) \tag{1}$$

式中:  $F(\sigma)$  为由围岩应力状态决定的函数,  $K(k)$  为材料常数。有限元计算中采用 D-P 屈服准则。

#### (2) 计算模型

一般在距掌子面较远的一些围岩, 其应力和位移变化很小, 在 3 倍洞跨处其应力变化一般为 5% 以下。为减小有限元模型中边界约束条件对计算结果产生不利的影 响, 模型边界计算范围在水平方向及隧道底部方向均取 3 倍洞跨, 因隧道为浅埋隧道, 故上部取至地表。

计算时将不同地层的岩体视为均匀介质, 围岩和初期支护都采用平面等参单元模拟; 二次衬砌采用梁单元模拟<sup>[8~10]</sup>。

#### (3) 围岩及支护结构的参数

隧道塌方区地层是弱风化页岩, 节理裂隙、层理较发育, 主要为 III 类围岩, 围岩及支护结构的参数见表 1。对于锚杆加固围岩的作用, 作为安全储备不予考虑。而初期支护中钢架、二次衬砌中配筋, 采用等效折算法, 将其力学指标都折算到混凝土中去, 这样可以简化计算。

表 1 围岩及支护结构的参数

Table 1 Parameters of rockmass and support structure

材料类型	弹性模量 /GPa	容重 /(kN · m <sup>-3</sup> )	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
页岩	1.50	25.8	0.23	1 800	44.4
混凝土喷层	22.00	25.0	0.22	2 050	38.0
锚杆	23.00	78.0	—	—	—
钢拱架	23.00	78.0	—	—	—

## 4 塌方区加固后数值模拟分析

### 4.1 有限元计算结果

应用有限元模拟计算塌方区 YK73+ 950 断面上台阶开挖支护后的垂直方向、水平方向的最终位移, 有限元网格模型见图 7。隧道塌方区经小导管注浆, 取样进行室内试验得到围岩加固后的参数见表 2。各关键点的最终位移结果见表 3。

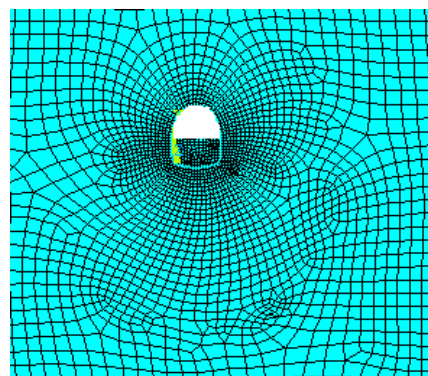


图7 有限元网格模型

Fig.7 Finite element meshing model

表 2 围岩加固后的参数

Table 2 Mechanical parameters after consolidation

材料类型	弹性模量 /GPa	容重 /(kN · m <sup>-3</sup> )	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
页岩	1.74	26.8	0.23	2 360	46.2

表 3 各关键点最终位移

Table 3 Ultimate displacements of various key points

最终位移/mm				拱顶最终下沉量/mm		
左拱脚	左拱腰	右拱脚	右拱腰	左	中	右
11.87	13.56	12.32	14.01	37.58	46.63	30.51

## 4.2 计算结果分析

由表 3 可知, 拱顶中的最终下沉量最大, 达到 46.63 mm, 比现场的量测值稍大, 其相对位移值为 0.42%, 小于规范允许值。另外, 有限元计算出的拱脚、拱腰处的位移值和拱顶左右两侧的下沉量与现场监控量测的结果相一致。

由现场监控量测和有限元计算结果可知, 隧道塌方区采取锚杆和小导管注浆的措施进行加固后, 隧道围岩结构稳定, 围岩变形符合规范要求。表明小导管注浆法加固隧道塌方区取得了成功, 因而可供类似工程参考。

## 5 结 论

(1) 对于节理裂隙、层理较发育的 III 类围岩隧道, 若施工过程中遇连降暴雨, 则必须及时支护, 以确保隧道围岩的稳定性。

(2) 采取小导管注浆措施加固隧道塌方区后, 可采用现场监控量测和有限元计算联合评价加固效果。

### 参考文献(References):

- [1] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(Guan Baoshu. Construction Outline for Tunnel Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))
- [2] 李晓红. 隧道新奥法及其监控量测技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.(Li Xiaohong. NATM and in-situ Monitoring Technology of Tunneling[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 夏才初, 刘金磊. 相思岭连拱隧道中墙应力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 1 115 - 1 119.(Xia Caichu, Liu Jinlei. Study on the middle wall stress of Xiangsiling in double arch-tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 1 115 - 1 119.(in Chinese))
- [4] 陈秋南, 张永兴. 连拱隧道设计施工理论及其修建关键技术的探讨[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(增): 173 - 177.(Chen Qiunan, Zhang Yongxing. Design theory and key technology in construction for double-arch highway tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(Supp.): 173 - 177.(in Chinese))
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路隧道设计规范(JTJ026 - 90)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Design Specification for Highway Tunnel(JTJ026 - 90)[S]. Beijing: China Communications Press, 1990.(in Chinese))
- [6] 周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679 - 683.(Zhou Yuhong, Zhao Yanming, Cheng Chongguo. Optimum analysis of the construction process for joint arch tunnels in partial pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 679 - 683.(in Chinese))
- [7] 潘昌实. 数值力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.(Pan Changshi. Numerical Mechanics and Numerical Method[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [8] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(Xu Gancheng, Bai Hongcai, Zheng Yingren, et al. Supporting Structure for Underground Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [9] 冯卫星. 铁路隧道设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.(Feng Weixing. Tunneling Design for Railway[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998.(in Chinese))
- [10] 陈秋南. 非对称连拱隧道动态施工力学模拟研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2005.(Chen Qiunan. Study on observable construction mechanics simulation for non-symmetry arch tunnel in highway[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.(in Chinese))