

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0514-07

隧道塌方段施工方案优化及效果评价

王迎超^{1,2,3}, 尚岳全³, 靖洪文^{1,2}, 蔚立元^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008;
3. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 对于隧道塌方地段, 选取合适的施工方案是关键问题。结合乌竹岭隧道塌方工程实际条件, 采用非线性有限元方法对两种施工方案进行模拟分析。计算结果表明, 双侧壁导坑施工方案相对于上弧形导坑施工方案, 能够更好地控制围岩位移、改善其受力状况、减小初期支护受力, 且围岩破坏区范围较小, 可见双侧壁导坑施工方案更适合于隧道塌方段的施工。通过现场监控量测分析, 隧道断面净空收敛变形和拱顶下沉稳定速度较快, 最终变形值较小, 隧道主体稳固, 没有任何变形, 说明所选处治方案对抑制隧道塌方段效果良好。

关 键 词: 隧道工程; 塌方; 双侧壁导坑法; 上弧形导坑法; 超前支护; 效果评价

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Optimization of construction scheme of tunnel collapse and treatment effect

WANG Ying-chao^{1,2,3}, SHANG Yue-quan³, JING Hong-wen^{1,2}, YU Li-yuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: At the region of tunnel collapse, it is important to select appropriate construction scheme. Based on the engineering condition of tunnel collapse in Wuzhuling, two different construction schemes are simulated by the nonlinear finite element method. Compared with annular drift method, double-side-drift method can better control the displacements of surrounding rock, improve the force status of surrounding rock, decrease the force of primary support and make the range of plastic zone smaller. Therefore, double-side-drift method is more suitable for tunnel collapse treatment. Then, the analysis of site monitoring measurement shows that convergence displacement and vault crown settlement tend to stable condition quickly and the deformation value is smaller. The subject of tunnel is in stable state and has no deformation. It is shown that the treatment effect of double-side-drift method which is selected to through tunnel collapse is significant.

Key words: tunneling engineering; collapse; double-side-drift method; annular drift method; advanced support; effect evaluation

1 引 言

塌方是大跨度公路隧道施工过程中常见的工程地质灾害之一, 一旦发生往往造成重大经济损失和人员伤亡。如果在塌方段施工方案选择不好, 往往导致塌方范围进一步扩大, 不仅延误工期, 而且会大幅度提高工程费用。因此, 合理的施工方案, 对于快速、安全通过隧道塌方段显得尤为重要。

目前对于隧道塌方问题的研究, 多集中在隧道塌方的原因分析和处治技术方面^[1-8]。处治技术主要

包括管棚、超前小导管、地表注浆等工程措施。这些辅助工法只有配合合理的施工工法才能发挥较好作用。隧道塌体多为软弱破碎岩土体, 宜选用分步开挖工法^[9-16]施工。分布开挖工法有很多种, 如台阶法、单侧壁导坑法、双侧壁导坑法、CD 法、CRD 法等。采用不同的施工工法在隧道塌方段施工时, 对其稳定性影响是不同的, 因此, 有必要对各施工工法进行比较, 以选取最优方案。目前, 对穿越隧道塌体的施工方案的优化分析研究还比较少。

本文结合乌竹岭隧道右洞塌方工程案例, 通过

收稿日期: 2011-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51074162); 中国博士后科学基金; 中国矿业大学力建学院青年科技基金项目 (No. lj2010qnjj03); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室博士后基金 (No. PD1105); 中国矿业大学人才引进科研启动项目。

第一作者简介: 王迎超, 男, 1982 年生, 博士后, 讲师, 主要从事隧道工程方面科研与教学工作。E-mail: wych12345678@126.com

数值仿真分析,对穿越该隧道塌方段的施工方案进行优化,并结合现场监测,对施工效果进行评价。

2 工程概况

乌竹岭隧道位于浙江省诸(暨)永(嘉)高速公路金华段第 1 合同段,属于分离式隧道。右洞起讫桩号为 K58+355~K58+990,长为 635 m,为三车道大跨度单线隧道,净宽为 14.25 m,净高为 7.69 m。2005 年 10 月 29 日下午 14 时 30 分,当掌子面开挖至 K58+713.5 时,受断层破碎带 F8 的影响,发生大规模冒顶塌方。根据工程地质勘察报告,隧道 K58+738~K58+713 段上部分布残坡积碎石,下部为强风化凝灰岩。随着时间的推移,坍塌范围逐步扩大,最终塌体堆积范围为 K58+733~K58+713.5。塌方处原地面也出现了塌陷,地表形成长为 10.3 m、宽为 6.5 m、深为 15 m 的凹形塌穴。塌方处断面如图 1 所示。

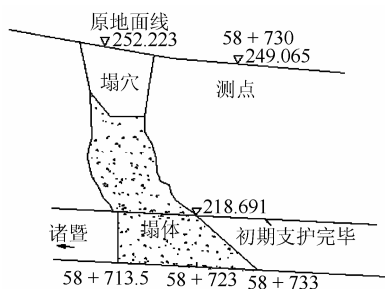


图 1 塌方处纵断面图(单位: m)

Fig.1 Vertical profile of tunnel collapse(unit: m)

塌方发生后,指挥部邀请多位隧道工程专家、设计、监理与施工等单位代表到现场勘查、商讨如何处理该隧道塌方,并对多种施工方案进行比较、论证。针对该隧道塌方实际情况,各位专家与代表主要提出了 2 个方案:(1)超前管棚支护、掌子面局部注浆,双侧壁导坑开挖法;(2)管棚支护、全断面注浆,上弧形导坑法开挖法。

乌竹岭隧道右洞属于大跨度隧道,且塌体范围比较大,两种施工方案各有优缺点,文献[17]中进行了初步对比分析。本文采用非线性有限元理论对两种方案进行进一步论证,分别分析其对围岩稳定性的影响,选取较优施工方案,以保证隧道塌方段的安全顺利施工。

3 数值模型建立及施工方案

3.1 数值模型建立

采用大型有限元计算程序 ANSYS,选取隧道 K58+720 典型断面(埋深 30 m)进行分析。模型水

平方向取为隧道宽度的 10 倍,隧道下方取为隧道洞径的 5 倍,上部取至地表。计算模型的边界条件除上部为自由边界外,其余侧面和底面均采用法向约束边界。有限元计算模型如图 2 所示。

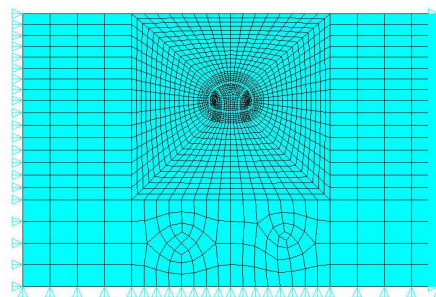


图 2 有限元计算模型(双侧壁导坑法)

Fig.2 Finite element model (double-side-drift method)

采用平面 4 节点等参元模拟隧道塌体和二次衬砌,初期支护采用梁单元模拟,并考虑钢拱架的作用,即根据抗压刚度相等的原则,将钢架的弹性模量折算给初期支护。对于大管棚和超前小导管,其作用是在隧道拱部形成加固层和起到“抬梁作用”,防止隧道顶部因变形过大而发生局部坍塌,可以将超前加固范围内的围岩级别提高一级来模拟^[15]。中空锚杆的作用通过提高加固区域围岩的物理力学参数模拟。根据现场实测、室内试验和公路隧道设计规范(JTG D70-2004)^[18],得到隧道围岩和支护结构的物理力学参数,如表 1 所示。在有限元计算中选用理想弹塑性本构模型和 Drucker-Prager 屈服准则进行非线性静力分析。

表 1 围岩与支护结构的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock and lining

结构类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
围岩	1.0	0.42	16.0	50	21
超前支护加固区	6.0	0.35	20.0	350	29
中空锚杆加固区	4.0	0.38	18.0	125	27
喷射混凝土	28	0.2	22.0		
二次衬砌	30	0.2	25.0		

3.2 施工工法模拟

本文对双侧壁导坑施工方案和上弧形导坑施工方案进行模拟,其模拟步骤如图 3、4 所示。

双侧壁导坑法:①初始应力场计算;②拱部超前支护施作;③左侧壁导坑开挖,施作初期支护、临时支撑;④右侧壁导坑开挖,施作初期支护、临时支撑;⑤主洞上半断面开挖,施作拱部初期支护;⑥主洞下半断面开挖,施作仰拱初期支护;⑦拆除

临时支撑;⑧施作二次衬砌。

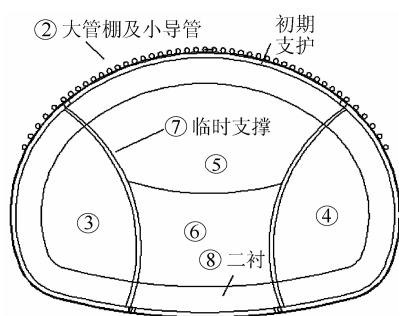


图3 双侧壁导坑施工顺序示意图

Fig.3 Construction sequence of double-side-drift method

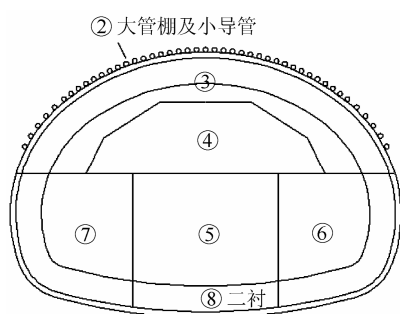


图4 上弧形导坑施工顺序示意图

Fig.4 Construction sequence of annular drift method

上弧形导坑法:①初始应力场计算;②拱部超前支护施作;③弧形导坑开挖,拱部初期支护施作;④核心土开挖;⑤下半断面中槽开挖,仰拱初期支护施作;⑥右侧边墙开挖,右侧边墙初期支护施作;⑦左侧边墙开挖,左侧边墙初期支护施作;⑧施作二次衬砌。

4 数值计算结果分析

4.1 位移分析

4.1.1 特征点位移变化

隧道拱顶和拱底的沉降随施工步而变化(如图5所示)。由图可知,上弧形导坑法引起的拱顶下沉要大于双侧壁导坑法。上弧形导坑法在弧形导坑开挖后引起的拱顶下沉最大,占总沉降值的95%;双侧壁导坑法在主洞上半断面开挖后引起的拱顶下沉最大,占总沉降值的53%。在隧道开挖过程中,隧道都有一定的底鼓。且施工过程中,上弧形导坑法隆起量始终大于双侧壁导坑法,底板最大隆起量偏高49%。通过上面分析可知,双侧壁导坑法较上弧形导坑法对围岩的位移具有较好地控制效果,上弧形导坑施工方案会引起过大的拱顶下沉和底鼓,易造成松散岩土体的进一步坍塌。

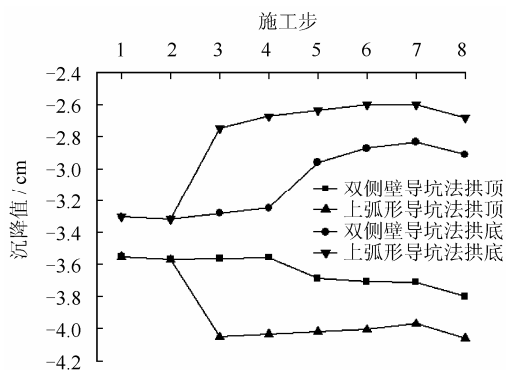


图5 特征点沉降随施工步变化曲线

Fig.5 Curves of settlements of feature points vs. construction steps

4.1.2 围岩深部位移分析

图6为不同路径 F 围岩的深部位移变化。沿路径1,竖向位移随距洞壁距离增大不断减小,上弧形导坑法引起的拱顶下沉量约为双侧壁导坑法的2倍;沿路径2,竖向位移随距洞壁距离的增大而减小,上弧形导坑法引起的底板隆起量要大于双侧壁导坑法;沿路径3,围岩水平位移较小,距洞壁附近一定距离(双侧壁导坑法距洞壁0.9m,上弧形导坑法距洞壁约2.0m)内围岩向临空方向变化,而后向背离临空方向位移。随着距洞壁的距离增大,水平位移先增大后减小,在距洞壁约5m处达到峰值。上弧形导坑法引起的水平位移量约为双侧壁导坑法的1.82倍。

4.1.3 地表沉降分析

图7为两种施工方案施工完毕后地表沉降曲线。从图中可以看出,隧道中心线方向沉降量最大,往两侧逐渐减小,与Peck理论沉降曲线相符。上弧形导坑法引起的最大地表累积沉降量为4.06cm,与双侧壁导坑法(3.85cm)相比,偏高5.2%,说明双侧壁导坑法对于控制地表沉降更为有利。

4.2 应力分析

4.2.1 围岩受力分析

表2中列出了两种施工方案围岩的最大拉、压和剪应力值。从表中可以看出:采用上弧形导坑法,最大拉应力出现在边墙部位,最大值为0.43MPa;采用双侧壁导坑法,最大拉应力出现在拱底外侧,最大值为0.15MPa;减小了近65%;最大压应力均出现在拱脚部位,双侧壁导坑法比上弧形导坑法减小2.8%;最大剪应力均出现在拱腰内侧,双侧壁导坑法比上弧形导坑法减小17.7%。从围岩的受力对比容易看出,双侧壁导坑法可以改善围岩的受力特征,利于围岩的稳定。而上弧形导坑法对围岩的受力控制是不利的,塌方段上部为松散体,在受力

不利情况下，极容易发生破坏。

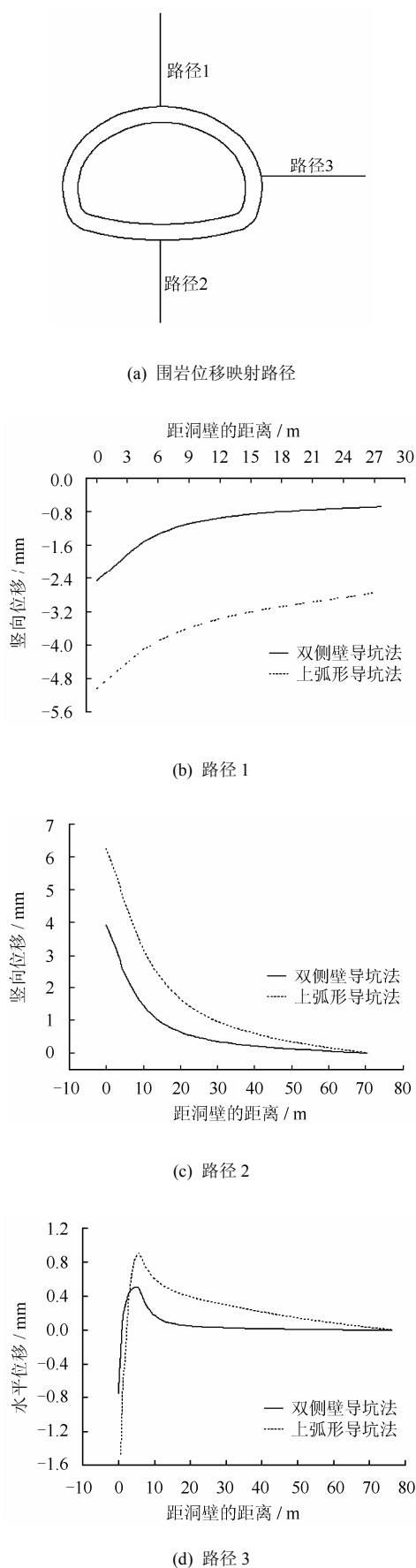


图 6 围岩深部位移变化

Fig.6 Variation of deep displacements of surrounding rock

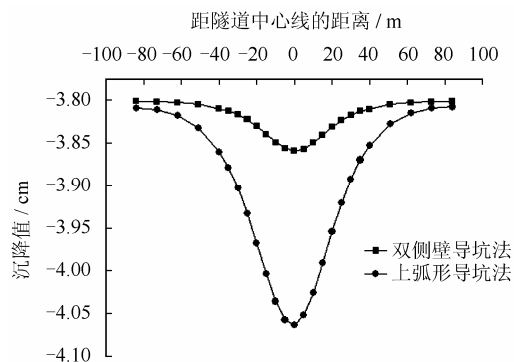


图 7 地表沉降曲线对比

Fig.7 Comparison of surface settlements

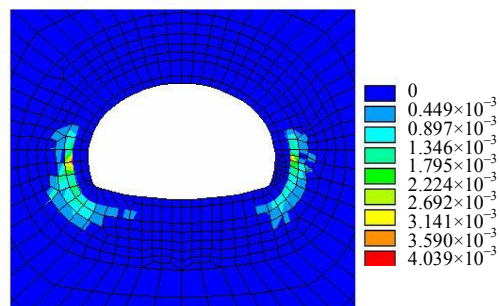
表 2 围岩受力分析对比表

Table 2 Mechanical analysis of surrounding rock

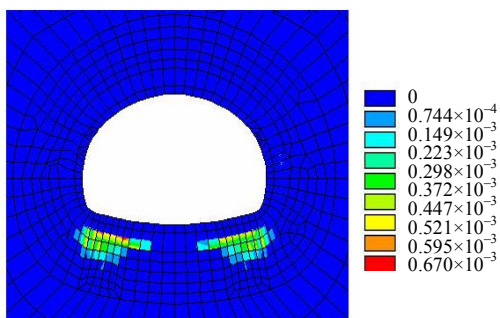
施工方案	最大拉应力		最大压应力		最大剪应力	
	位置	数值/MPa	位置	数值/MPa	位置	数值/MPa
双侧壁导坑法	拱底 外 s 侧	0.15	拱脚	2.10	左拱腰 内侧	0.72
上弧形导坑法	边墙	0.43	拱脚	2.16	左拱腰 内侧	0.85

4.2.2 围岩破坏区对比分析

图 8 为采用两种不同施工方案时最终的围岩破坏区分布情况。从图中可以看出，上弧形导坑法围岩破坏区的范围比双侧壁导坑法稍大。前者破坏区主要集中在边墙和拱脚部位，后者主要出现在拱底。



(a) 上弧形导坑法破坏区



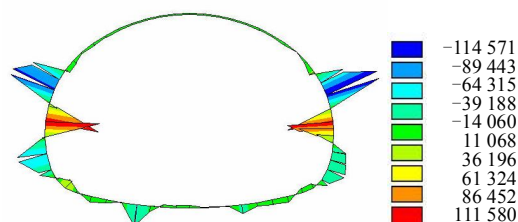
(b) 双侧壁导坑法破坏区

图 8 围岩破坏区对比图

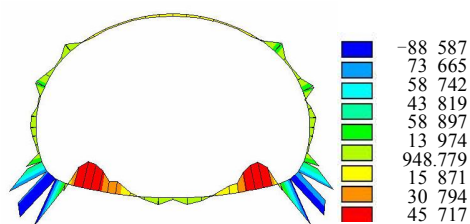
Fig.8 Comparison of failure zones

4.2.3 初期支护结果分析

图 9、10 分别为采用两种不同方案得到的初期支护弯矩图和轴力图。从图 9 可以看出, 采用上弧形导坑法, 最大负弯矩为 $114.571 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 出现在拱腰, 最大正弯矩为 $111.580 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 出现在左右边墙; 采用双侧壁导坑法, 最大负弯矩为 $88.587 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 出现在拱底, 最大正弯矩为 $45.717 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 出现在拱脚。从初期支护的弯矩图对比可以看出, 双侧壁导坑法较上弧形导坑法, 能使初期支护所受的正负弯矩大大降低。从图 10 可以看出, 采用双侧壁导坑法, 除了拱底出现轴向拉力, 为 415.135 kN , 其余部位受

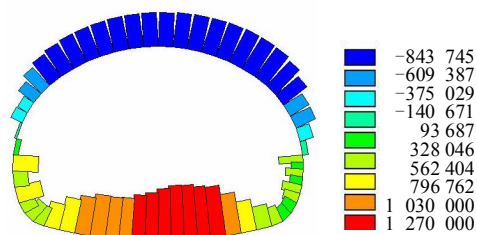


(a) 上弧形导坑法弯矩

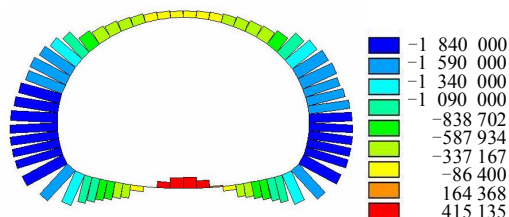


(b) 双侧壁导坑法弯矩

图 9 初期支护弯矩图 (单位: $\text{N}\cdot\text{m}$)
Fig.9 Bending moment diagrams of initial support (unit: $\text{N}\cdot\text{m}$)



(a) 上弧形导坑法轴力



(b) 双侧壁导坑法轴力

图 10 初期支护轴力图 (单位: N)
Fig.10 Axial forces diagrams of initial supports(unit: N)

压, 最大轴向压力出现在边墙, 为 $1\,840 \text{ kN}$; 采用上弧形导坑法, 边墙以上为轴向压应力, 最大值为 843.745 kN ; 边墙以下为轴向拉力, 最大值 $1\,270 \text{ kN}$ 。采用上弧形导坑法, 可以使初期支护所受的轴向压力减小, 但却大大增加了轴向拉力, 这对于抗压能力远大于抗拉能力的初期支护结构是不利的。

5 施工方案效果评价

5.1 监测数据分析

从上述分析可知, 无论从控制围岩变形、改善围岩的受力特征、减小支护结构的受力, 双侧壁导坑法都要优于上弧形导坑法, 因此, 在乌竹岭隧道右洞的塌方段施工过程中采用了双侧壁导坑法施工方案。隧道塌方处治后的监测^[19-20]很重要, 因为通过监测可以正确判断隧道施工后围岩的稳定性情况, 以防坍塌灾害的再次发生。在乌竹岭隧道右洞 K58+720 设置了监测断面, 进行洞周水平收敛和拱顶下沉监测, 测点布置如图 11 所示。

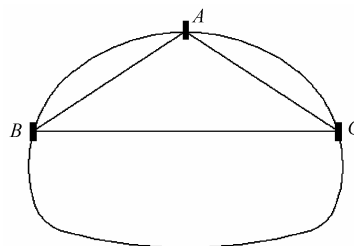


图 11 测点布置图

Fig.11 Disposal of measured points

图 12 是 K58+720 断面的收敛位移和拱顶下沉随时间的变化曲线, 从图 12(a)中可以看出, 围岩的收敛速度很快, 20 d 左右基本完成收敛变形, 且收敛位移比较小, 最大收敛变形约 2.0 mm 。从图 12(b)中可以看出, A、B、C 测点拱顶下沉变化规律基本一致, 在前 10 d 约完成拱顶下沉总量的 60%, 20 d 左右基本完成拱顶下沉。拱顶下沉比较小, 最大位移约为 2.5 mm 。通过分析可以看出, 采用双侧壁导坑法施工方案通过隧道塌方段后, 围岩很快趋于稳定, 且位移较小, 说明所选用的施工方案是合理的。

5.2 现场治理效果分析

在隧道施工过程中, 严格按设计中双侧壁导坑法施工步骤进行, 开挖时加强支护, 严格控制开挖进尺, 每循环进尺 $0.5\sim 1.0 \text{ m}$ 。为保证开挖过程中塌体的稳定。超前支护采用大管棚配合小导管注浆预先加固围岩, 采用偏向钻具扩孔同步带进钢管的钻进技术安装大管棚, 管棚分节长度为 $2\sim 3 \text{ m}$ 一节, 管棚间设联接管, 管棚规格 $\phi 108 \text{ mm}\times 6 \text{ mm}$,

环向间距 0.4 m, 共 49 根, 管棚仰角为 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$; 小导管采用 $\phi 42\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 钢管, 与大管棚间隔布置, 长为 3.5 m, 搭接长度为 1.5 m, 每 2.0 m 施作一环。根据实际情况采用塌体喷混凝土和掌子面局部注浆, 及时封闭工作面, 从而保证了掌子面的稳定, 图 13 为塌方治理现场。实践证明, 采用双侧壁导坑法开挖, 并配合管棚、超前小导管、注浆等工程措施, 在隧道塌方段施工过程中, 未出现掌子面失稳和洞顶坍塌事故, 从而保证了施工的安全顺利进行。

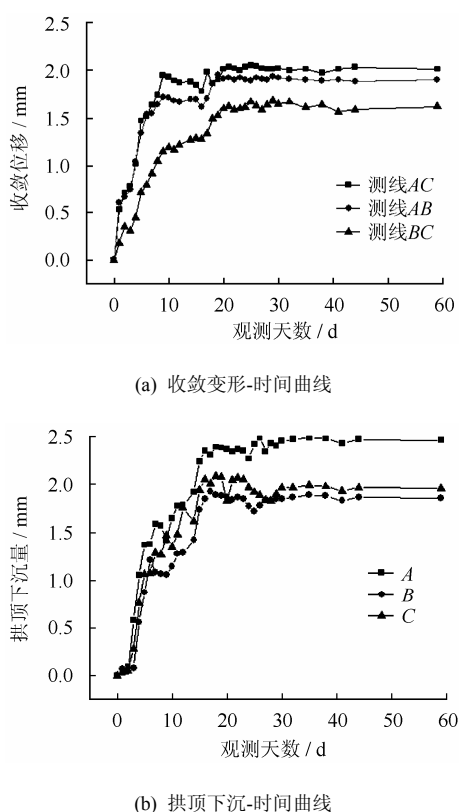


图 12 K58+720 断面监测曲线

Fig.12 Monitoring curves at section K58+720



图 13 塌方现场治理

Fig.13 In-situ treatment of tunnel collapse

到 2006 年 3 月 10 日, K58+693~733 段隧道已通过采取双侧壁导坑方案成功地对塌方体进行二次开挖与初期支护。由于雨季地表水浸润, 2007 年

7 月塌方体空腔顶部地表突然发生沉陷, 在原塌腔孔位置出现长约 10 m、宽 9 m、深约 10 m 的空穴, 陷塌土石方约 900 m^3 , 但隧道塌方段的隧道主体工程依然稳固如初, 没有任何变形。后经过对塌腔孔的回填和永久性防水处理, 通过观察, 至 2008 年 12 月 30 日隧道通车前, 没有发现隧道主体和洞顶塌腔有任何变化, 因此, 也证明在实际施工中采用的处治方案是安全、稳定和有效的。

6 结 论

(1) 采用双侧壁导坑法开挖配合超前管棚支护和掌子面局部注浆的施工方案的穿越乌竹岭隧道右洞塌方段是可行的, 该方案无论从控制围岩变形、改善围岩的受力特征、减小支护结构的受力都要优于上弧形导坑开挖方案。

(2) 数值计算结果表明: 上弧形导坑法引起的拱顶下沉量约为双侧壁导坑法的 2 倍, 前者引起的最大地表累积沉降量比后者偏高 5.2%。采用上弧形导坑法, 最大拉应力出现在边墙部位; 采用双侧壁导坑法, 最大拉应力出现在拱底外侧, 减小了近 65%; 最大压应力均出现在拱脚部位, 双侧壁导坑法比上弧形导坑法减小 2.8%; 最大剪应力均出现在拱腰内侧, 双侧壁导坑法比上弧形导坑法减小 17.7%。双侧壁导坑法较上弧形导坑法, 能使初期支护所受的正负弯矩大大降低。采用上弧形导坑法, 可以使初期支护所受的轴向压力减小, 但却大大增加了轴向拉力, 对初期支护不利。

(3) 通过对施工后的拱顶下沉和收敛位移监测数据分析发现, 围岩的收敛速度很快, 20 d 左右基本趋于稳定。当 2007 年 7 月塌方体空腔顶部由于雨季地表水浸润, 地表突然发生沉陷时, 隧道塌方段的隧道主体工程依然稳固如初, 没有任何变形, 证明在实际施工中采用的施工处治方案效果良好。

(4) 乌竹岭右洞塌方施工方案的优化分析思路和所得结论对今后处治类似大跨度山岭隧道塌方工程具有较好的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 李志勇, 晏莉, 阳军生. 浅埋偏压连拱隧道中导洞塌方数值分析与处治[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 102-106.
LI Zhi-yong, YAN Li, YANG Jun-sheng. Numerical analysis and treatment of a collapsed middle drift for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 102-106.
- [2] DAY M J. Karstic problems in the construction of

- Milwaukee's deep tunnels[J]. **Environmental Geology**, 2003, 45(6): 859—863.
- [3] 陈秋南, 赵明华, 周国华, 等. 复杂层状岩层隧道塌方原因分析与加固后信息化施工技术[J]. **岩土力学**, 2009, 30(3): 650—653.
- CHEN Qiu-nan, ZHAO Ming-hua, ZHOU Guo-hua, et al. Cause analysis of complex layered rock tunnel collapse and information construction technology after consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 650—653.
- [4] 周建民, 金丰年, 王斌, 等. 洞室交叉部位塌方的处理技术[J]. **地下空间与工程学报**, 2005, 1(2): 278—282.
- ZHOU Jian-min, JIN Feng-nian, WANG Bin, et al. Techniques of settling collapse at grotto's intersection[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(2): 278—282.
- [5] 马涛. 浅埋隧道塌方处治方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(增刊 2): 3976—3981.
- MA Tao. Treatment method for collapse treatment of shallow-buried tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3976—3981.
- [6] 霍玉华. 浅埋公路隧道施工塌方事故的预防与整治技术研究[J]. **中国安全科学学报**, 2005, 15(7): 84—100.
- HUO Yu-hua. Study on prevention of collapse accident in shallow buried highway tunnel and its countermeasure[J]. **China Safety Science Journal**, 2005, 15(7): 84—100.
- [7] 冯秀国. 采用地表注浆方法使隧道穿越坍塌区[J]. **铁道建筑**, 1998, (2): 28—30.
- FENG Xiu-guo. Using the method of surface pregrouting to passes through collapse[J]. **Journal of Railway Structure**, 1998, (2): 28—30.
- [8] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(11): 2309—2315.
- LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2309—2315.
- [9] 陈立保. 三台阶法在客运专线山岭隧道软弱围岩中的推广应用[J]. **铁道工程学报**, 2008, (12): 72—74.
- CHEN Li-bao. Application of three bench method in reinforcing weak surrounding rock of railway mountain tunnel of passenger dedicated line[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2008, (12): 72—74.
- [10] 李慎文. 采用双侧壁导洞法通过断层破碎带[J]. **铁道建筑技术**, 2000, (1): 40—43.
- LI Shen-wen. Excavation with lateral pilots through fault broken zone[J]. **Railway Construction Technology**, 2000, (1): 40—43.
- [11] 唐颖. 公路隧道软弱围岩施工方法的探讨[J]. **现代隧道技术**, 2007, 44(4): 67—72.
- TANG Ying. Construction techniques of highway tunnels in weak surrounding rocks[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2007, 44(4): 67—72.
- [12] 李术才, 王汉鹏, 郑学芬. 分岔隧道稳定性分析及施工优化研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(3): 447—457.
- LI Shu-cai, WANG Han-peng, ZHENG Xue-fen. Forked tunnel stability analysis and its construction optimization research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 447—457.
- [13] 汪立新. 大跨度隧道单-双侧壁导坑法施工力学分析[J]. **西部探矿工程**, 2007, (10): 170—173.
- WANG LI-xin. Construction mechanics analysis of one-cheek and two-cheek pilot method of large span tunnel[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2007, (10): 170—173.
- [14] 许崇帮, 夏才初, 朱合华. 双向八车道连拱隧道施工方案优化分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(1): 66—73.
- XU Chong-bang, XIA Cai-chu, ZHU He-hua. Optimum analysis of construction scheme of multi-arch tunnel with eight traffic lanes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 66—73.
- [15] 谢旭强, 王玉富. 大跨隧道双侧壁导坑法施工力学行为研究[J]. **北方交通**, 2008(7): 146—149.
- XIE Xu-qiang, WANG Yu-fu. Research on mechanical properties of construction by double lateral wall heading method for tunnel with long span[J]. **North Transportation**, 2008(7): 146—149.
- [16] 黄伦海. 双洞八车道公路隧道施工方案研究[J]. **公路**, 2005, (9): 206—211.
- HUANG Lun-hai. A study on construction schemes of highway twin tunnel with eight traffic lanes[J]. **Highway**, 2005, (9): 206—211.
- [17] 张春林. 乌竹岭隧道塌方处理方案[J]. **公路交通技术**, 2008, (5): 109—112.
- ZHANG Chun-lin. Treatment schemes for landslide in Wuzhuling Tunnel[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2008, (5): 109—112.
- [18] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] 陈秋南, 张永兴, 刘新荣, 等. 隧道塌方区加固后的施工监测与仿真分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(1): 158—161.
- CHEN Qiu-nan, ZHANG Yong-xing, LIU Xin-rong, et al. In-situ monitoring and FEM simulation analysis of consolidation for a collapsed highway tunnel [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 158—161.
- [20] 王立忠, 胡亚元, 王百林, 等. 崩塌松散围岩隧道施工稳定分析与监控[J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, 22(4): 589—594.
- WANG Li-zhong, HU Ya-yuan, WANG Bai-lin, et al. Stability analysis and monitoring for tunnel in loose soils during construction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 589—594.