

浅埋隧道塌方处治方法研究

马 涛

(铁道第四勘察设计院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 根据工程塌方处治实例, 探讨了浅埋隧道塌方处治中超前支护系统的作用原理, 利用有限元手段分析了二次衬砌结构的内力情况, 给出了塌方处治方案, 根据处治效果可得出: (1) 管棚注浆法作为一种行之有效的辅助工法, 其力学效应是显著的; (2) 处于浅埋顺层围岩条件下的隧道, 围岩的变形往往带有突然性; (3) 施工中及时构筑二次衬砌, 早日形成封闭式支承体系, 加快围岩变形稳定过程, 可有效地抑制围岩过度变形及塌方事故。

关键词: 隧道工程; 浅埋隧道; 塌方处治

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3976 - 06

TREATMENT METHOD FOR COLLAPSE TREATMENT OF SHALLOW-BURIED TUNNEL

MA Tao

(The Fourth Survey and Design Institute of China Railway, Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: Based on an engineering case, the mechanism of the pre-support system applied in treatment for the collapse of shallow-buried tunnel is discussed. Moreover, the internal force of the second lining is analyzed by means of FEM and the procedure to treat the collapse of shallow-buried tunnel is given. Some conclusions can be drawn based on the treatment effectiveness: (1) shed-pipe grouting technology is an effective assistant construction method, and the mechanical effect is significant; (2) the deformation of the tunnel bedding wall rock often has some abruptness; and (3) the second lining should be constructed in time so as to form the closed-end supporting system earlier, which can accelerate the stabilization process of the deformation of surrounding rock and prevent the excessive deformation of surrounding rock and tunnel collapse.

Key words: tunneling engineering; shallow-buried tunnel; collapse treatment

1 引 言

我国是一个多山而地貌复杂的国家, 75%左右的国土是山地或丘陵, 随着我国铁路建设事业的蓬勃发展, 隧道的建设规模越来越大, 隧道施工过程中围岩稳定性问题也更加突出。塌方事故在浅埋隧道施工过程中时有发生, 已成为造成工期延误和人们生命财产损失的一个重要安全隐患。本文以宜万

铁路石院子隧道塌方处治为例, 通过现场调研及理论分析, 讨论了浅埋隧道塌方处治的方法。

2 工程概况

隧道位于宜昌长阳县榔坪境内, 设计为双线隧道, 全长 596 m, 隧道埋深为 2.5~35.0 m, 属浅埋隧道^[1]。线路近平行穿行于长阳背斜北西翼山前单斜缓坡地段, 岩层产状 $355^\circ \angle 52^\circ$, 岩层走向与洞

收稿日期: 2006 - 05 - 31; **修回日期:** 2006 - 07 - 01

作者简介: 马 涛(1980 -), 男, 硕士, 2002 年毕业于长沙交通学院河海工程系岩土工程专业, 主要从事隧道工程方面的设计与研究工作。E-mail: mataolove@163.com

轴基本平行，倾向右侧，岩体顺层。主要发育两组节理：(1) 产状 $316^\circ \angle 82^\circ$ ，张节理，延伸长度 $>5\text{ m}$ ，5 条/m；(2) 走向 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的垂直节理，延伸长 $1 \sim 2\text{ m}$ ， $1 \sim 3$ 条/m。

山坡表层为粉质黏土，褐黄色，硬塑，局部夹有泥质灰岩、灰岩成分的碎、块石，厚 $8 \sim 26\text{ m}$ ；下伏页岩：上部为强风化，灰黑色，节理、裂隙发育，岩芯多呈碎块状，厚 $2.4 \sim 9.0\text{ m}$ ；下部为弱风化，节理裂隙发育，岩芯多呈短柱状。山坡土壤孔隙水及基岩裂隙水较发育，埋深 $1.5 \sim 19.4\text{ m}$ ，受降雨影响明显，隧道地质纵剖面图见图 1。

3 隧道坍塌过程及稳定性评价

2005 年 5 月 24 日洞口边仰坡开挖防护完毕后采用从出口单口掘进方式开挖上台阶进洞施工，6 月 19 日洞口边仰坡出现局部开裂，到 8 月 9 日，隧道上台阶累计开挖 86 m ，初期支护后的监控量测显示围岩处于变形速率约 2 mm/d 的缓慢变形情况下，8 月 9 日 07: 00: 00 监测变形速率异常为 12 mm/d ，至当日 18: 30: 00，变形速率达到 52 mm/d 并在隧道拱顶发现一条细小裂纹，到 8 月 10 日 07: 00: 00 监测变形速率达到 110 mm/d ，其裂纹宽度发展到 32 mm ，至 10: 00: 00 洞内发生坍塌并扩展到距洞口约 20 m 的地方，未坍塌段初期支护和边仰坡已严重变形且有掉块现象，地表纵向裂缝最宽处达 20 cm ，5 d 后洞口段也全部坍塌，塌方量约 $6 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

从隧道坍塌后的地表勘察看，地表裂缝主要集中在在线路左侧 30 m 至右侧 20 m 范围内，平行洞轴为主，贯通最长的 45 m ，最大张开 20 cm 。从地表变形开裂现象分析，地表变形开裂的主要原因是由于隧洞洞体坍塌后，洞体以上一定范围内的岩体发生破坏沉陷，导致地表变形开裂、形成纵横裂缝，若不及时采取有效措施进行加固处理，则可能诱发堆积层的滑移失稳，甚至于可能危及整个山体的稳定，对工程安全造成极大的威胁。

4 超前支护作用分析

由于塌方波及地表，导致隧道上方围岩发生整体性沉陷，大体积的坍塌体已基本丧失自稳能力，因此有必要对围岩进行预加固措施，为顺利进洞施工创造条件。根据塌方情况，预加固措施拟采用管棚注浆法。

管棚是地下结构工程浅埋暗挖时通常采用的一种超前支护技术，在拟开挖的地下隧道或结构的衬砌拱圈埋弧线上，预先设置惯性力矩较大的厚壁钢管，起临时超前支护作用，防止土层坍塌和地表下沉，以保证掘进和后续支护工艺安全运作^[2, 3]。当遇到断层破碎带及松散坍塌体时，管棚结合超前帷幕注浆可成为有效的施工方法(管棚注浆法)。由于该工法具有不需要大型机具设备、工艺简单、见效快等特点，因而在地下工程松软地层开挖中被广泛采用。

采用管棚注浆法进行超前预加固时，加固圈将起到“承载拱”的作用，承载拱上部的岩层重量，使拱内围岩与支护系统处于免压状态，拱内部围岩与支护系统受到的力仅是由于拱向隧洞方向的变形引起的形变压力。当管棚为惯性力矩较大的厚壁钢管，且沿隧道开挖轮廓周边密布时，加固圈的变形较小，因此，隧道支护结构所承受的上部荷载大大减小。

5 二次模筑衬砌有限元计算

隧道塌方处治时，二次衬砌预计会承受较大的围岩徐变压力^[4, 5]，因此有必要验证拟定二次衬砌结构的安全性。二次衬砌的设计通过荷载—结构模型计算分析后确定。考虑到虽然初期支护担负着一定的围岩荷载，管棚注浆法加固也有利于减少围岩压力，但是出于隧道长期运营安全的考虑，二次衬砌按照承受 70% 坍塌荷载考虑。

本文采用 SAP84 V6.5 软件进行计算，二次模筑

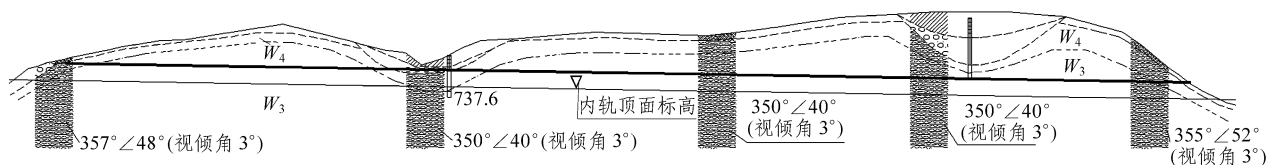


图 1 隧道地质纵剖面图
Fig.1 Geological longitudinal plan of tunnel

衬砌拟定为 70 cm 厚 C30 钢筋混凝土，坍塌体容重 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ，摩擦角 $\varphi = 35^\circ$ ，弹性反力系数 $K = 150 \text{ MPa/m}$ ，高度 $H = 33 \text{ m}$ ，列车荷载 38.6 kPa，荷载计算方法参照相关规范^[6]，围岩弹性抗力采用压弹簧模拟^[7]。

通过计算，隧道二次衬砌弯矩图、轴力图分别见图 2, 3。计算显示：隧道二次衬砌的拱顶、拱侧及墙脚是受力薄弱部位，最大弯矩与轴力均发生在墙脚处，分别为 961.2 kN·m，3 884 kN。二次衬砌弯矩主要发生在拱部与墙脚处，边墙及仰拱处的弯矩值较小；二次衬砌轴力分布相对比较均匀，最小的轴力出现在拱顶，最大轴力出现在拱脚。

6 塌方处治

根据隧道段坍塌情况及该段工程地质、水文地质条件，采取下述处理措施。

6.1 地表及洞口

地表裂缝采用黏土夯填堵塞，并用水泥砂浆进行封闭；地表设置截排水沟，将地表水引排至沟谷，

以防地表水下渗形成危害。为防止隧道洞口边仰坡发生二次滑坍，确保施工安全，隧道开挖前进行边仰坡加固。边仰坡加固采用坡面小导管注浆及网喷混凝土的加固措施。

6.2 洞内

(1) 管棚注浆法超前支护措施

为充填坍塌体内部空隙及裂缝，降低岩土渗透性，改善坍塌体的力学性能，增强其整体性，设计采用上半断面周边超前帷幕注浆方式对隧道坍塌体及受坍塌影响周壁围岩进行加固，周边注浆孔分为两种，外插角分别为 30° ， 15° ，交错布置，每循环注浆长度为 12 m，环与环搭接 2 m，预加固范围为隧道开挖轮廓线外 6~8 m 内所有坍塌体，以在隧道拱部形成稳固的加固圈。为加强坍塌体的支撑，在超前注浆完成后采用超前长管棚预支护，管棚使用 $\phi 108 \text{ mm}$ 热轧无缝钢管，在钢管内设置钢筋笼以加强管棚刚度。管棚在隧道拱部 180° 范围内设置，其环向间距为 30 cm，纵向间距为 25 m(每环管棚长 30 m，水平搭接长度 5 m)，管棚注浆法正视图见图 4。

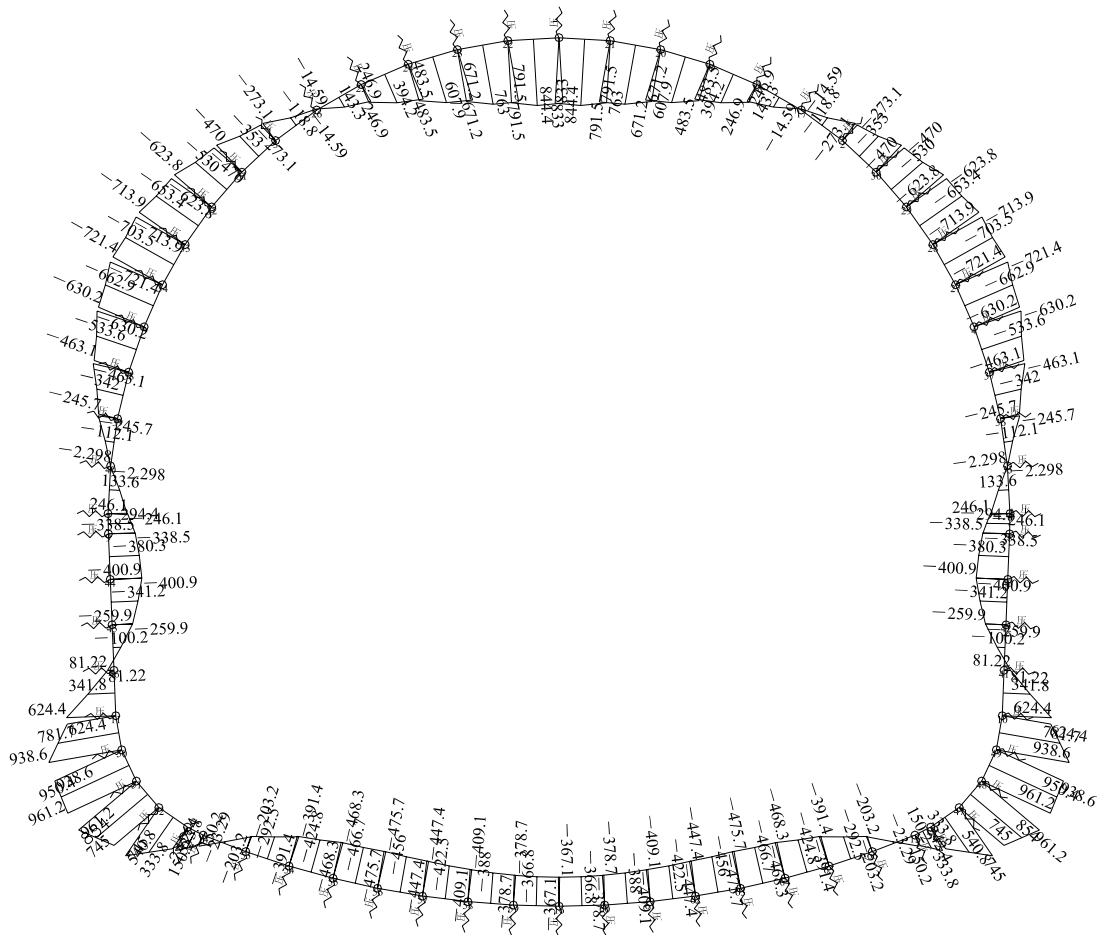


图 2 二次衬砌计算弯矩图(单位: kN·m)

Fig.2 Bending moment diagram of secondary lining computation(unit: kN·m)

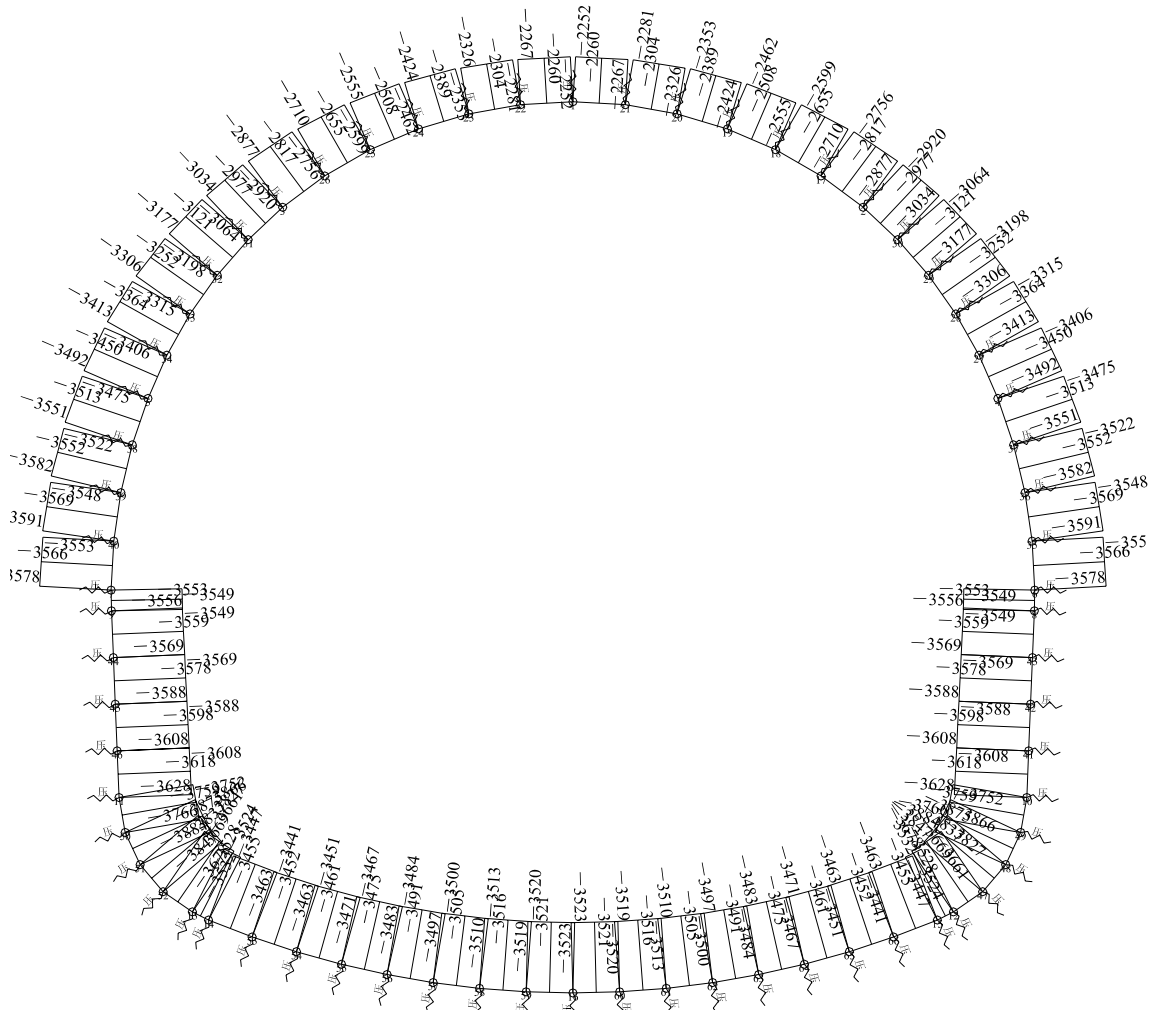


图 3 二次衬砌计算轴力图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig.3 Axial force diagram of secondary lining computation(unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

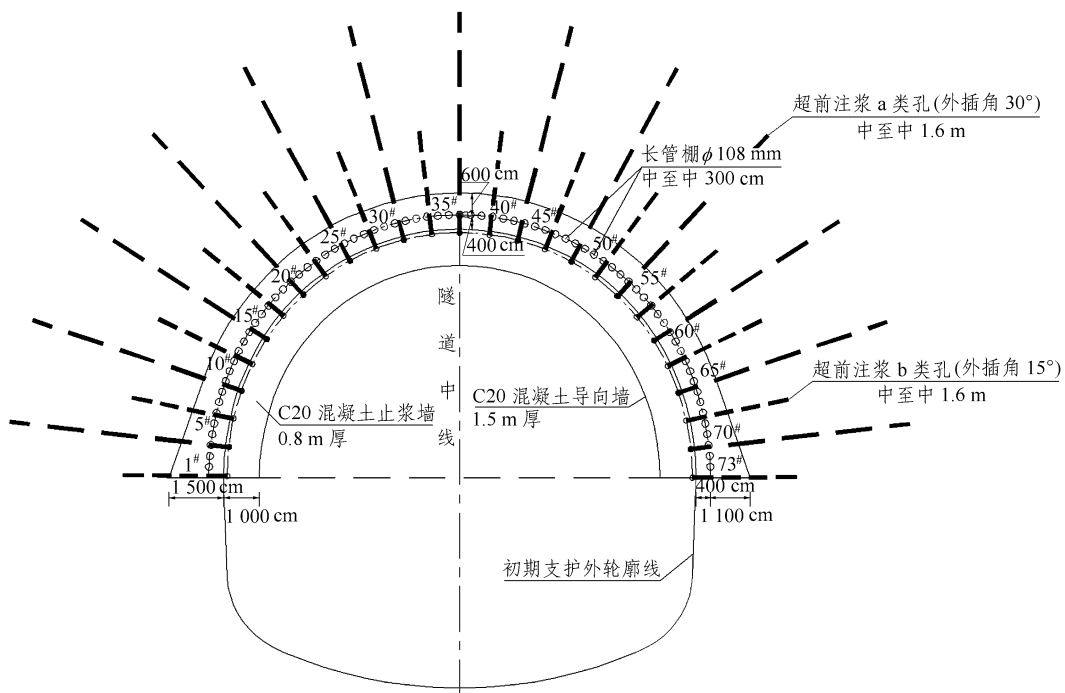


图 4 管棚注浆法正视图

Fig.4 Front profile of shed-pipe grouting technology

(2) 隧道支护及结构

由于坍塌荷载比较大，因此增强了隧道初期支护的整体刚度：采用 30 cm 厚 C20 网喷混凝土(设双层钢筋网)，系统锚杆采用 $L = 4\text{ m}$ ， $\phi 25\text{ mm}$ 中空注浆锚杆，间距 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，边墙设置(考虑到拱部已经施作了管棚，锚杆仅在边墙设置)，钢架采用 I 20 a 工字钢架，间距 0.5 m 一榀布置，为保证钢架的稳定，在其拱脚、墙角处设置锁脚锚管固定；二次衬砌采用 70 cm 厚钢筋混凝土结构，并对原衬砌断面外轮廓进行了优化，使其更符合隧道结构受

力特征。隧道坍塌前后所采用衬砌断面对比如图 5 所示。

6.3 处治效果

根据现场施作情况及监控量测结果表明管棚注浆法能够很好的起到预先加固坍塌体、形成加固圈创造进洞条件的作用。洞内监测结果显示围岩变形得到较好的控制，趋于稳定，达到施作二次衬砌的要求。根据地表及山体监测结果，山体堆积层没有因为隧道的再次开挖发生滑移，隧道塌方处治效果较好。

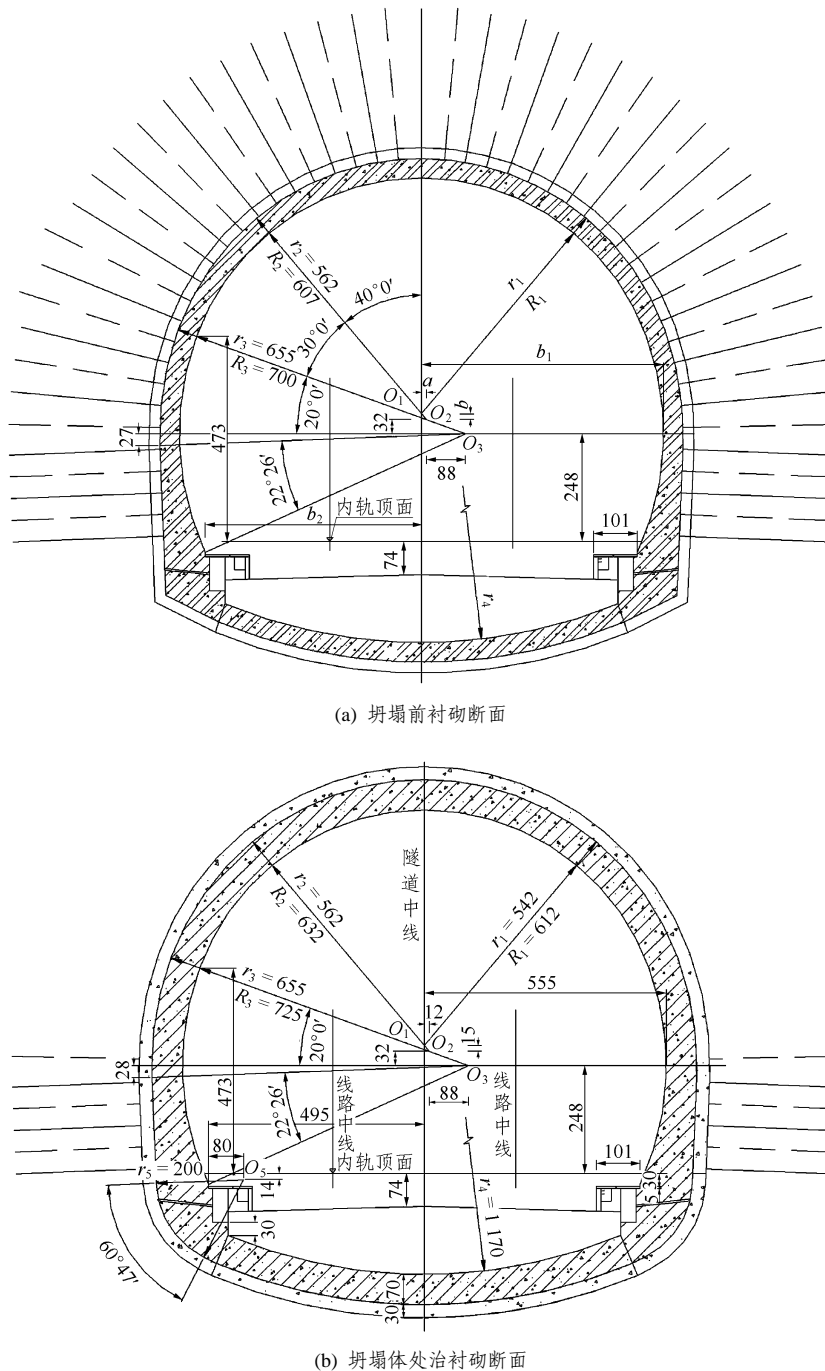


图 5 隧道坍塌处治衬砌断面对比(单位: cm)

Fig.5 Lining section before and after tunnel collapse treatment(unit: cm)

7 结 论

通过对浅埋隧道围岩塌方事故的分析及处治方案的研究,得出以下结论:

(1) 隧道塌方源于多因素的共同作用,具有外因诱发、适时突发及多期发生的特点^[8, 9]。浅埋隧道如围岩条件较差,塌方一般会波及地表,坍塌荷载很大,对施工安全及周围环境影响较大,对浅埋隧道塌方处治应根据隧道埋深、坍塌情况,采取不同的处理方案。

(2) 管棚注浆法作为一种行之有效的辅助工法,其力学效应是显著的^[10],特别是在浅埋隧道破碎围岩地段,由于围岩自承能力很弱,施工中需要对围岩施加强支撑,才能保证施工及隧道结构的安全,但是实际施工中对其施工及维护质量必须严格要求。

(3) 对于处于浅埋顺层围岩条件下的隧道,围岩的变形带有突然性,一旦变形速率变大,隧道可能很快会出现塌方事故,设计及施工中应加强初期支护的刚度及监控量测工作。

(4) 从结构受力角度考虑,上下台阶距离不易过长,及时构筑二衬及仰拱,早日形成封闭式支承体系,加快围岩变形稳定过程,可有效地抑制围岩过度变形及塌方事故。

参考文献(References):

- [1] 铁道第四勘察设计院. 宜万铁路宜昌至万州段新建工程施工资料[R]. 武汉: 铁道第四勘察设计院, 2005.(The Fourth Survey and Design Institute of China Railway. Construction information of Yichang—Wanzhou new railway engineering[R]. Wuhan: The Fourth Survey and Design Institute of China Railway, 2005.(in Chinese))
- [2] 伍振志, 傅志锋, 王 静, 等. 浅埋松软地层开挖中管棚注浆法的加固机制及效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1 025 - 1 029.(Wu Zhenzhi, Fu Zhifeng, Wang Jing, et al. Study on support mechanism effect of shed-pipe grouting technology for tunneling construction in shallow-buried soft stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1 025 - 1 029.(in Chinese))
- [3] 张 川, 杨春满. 松软地层水平管棚工艺参数的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 607 - 609.(Zhang Chuan, Yang Chunman. Study on the art parameters of horizontal barrel vault advanced support in the soft rock[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 607 - 609.(in Chinese))
- [4] 徐干成, 白洪才, 郑颖人. 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. Support Structure in Underground Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [5] 李术才, 朱维申. 弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 466 - 470.(Li Shucai, Zhu Weishen. Application of elastoplastic large displacement finite element method to the study of deformation prediction of soft rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 466 - 470.(in Chinese))
- [6] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路隧道设计规范(TB10003 - 2005, J449 - 2005)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Design on Tunnel of Railway(TB10003 - 2005, J449 - 2005)[S]. Beijing: China Railway Press, 2005.(in Chinese))
- [7] 北京大学. SAP84 微机结构分析通用程序用户手册(版本 6.5)[R]. 北京: 北京大学, 2005.(Peking University. The user manual of SAP84 microcomputer structure analysis currency program(V6.5)[R]. Beijing: Peking University, 2005 (in Chinese))
- [8] 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 Yuhua. Study on prevention of collapse accident in shallow buried highway tunnel and its countermeasure[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(7): 84 - 100.(in Chinese))
- [9] 王立忠, 胡亚员, 王百林, 等. 崩塌松散围岩隧道施工稳定分析及监控[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 589 - 595.(Wang Lizhong, Hu Yayuan, Wang Bailin, 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 - 595.(in Chinese))
- [10] 罗田郎, 崔子春, 赵梦晨, 等. 黄荆坝隧道 DK254+790~DK254+810 处塌方处理[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 51 - 56.(Lou Tianlang, Cui Zichun, Zhao Mengchen, et al. Countermeasure for the ground collapse during the excavation of Huangjingba Tunnel DK254+790 - DK254+810[J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(3): 51 - 56.(in Chinese))