

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.008

山岭隧道塌方处理加固措施及 FLAC3D 模拟对比分析

张联志, 陈伟, 陈贺

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 由于在山岭隧道的修建过程中, 经常出现塌方事故, 结合工程具体情况, 从围岩层状分布、雨水侵蚀作用等方面, 分析了隧道拱顶出现塌方的原因以及所采用加固措施的有效性; 并对塌方周边断面加固前后围岩位移和支护结构应力进行了监测。监测结果表明, 隧道拱顶塌方处加固措施行之有效, 围岩变形及结构应力得到了较好控制。再利用 FLAC3D 软件对隧道塌方段进行数值模拟分析, 得到的结果与现场监测结果基本一致, 这表明加固措施对塌方的处理效果良好。

关键词: 隧道; 数值模拟; 监控量测; 塌方

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)03-0036-05

Comparative Analysis on the Reinforcement Measures of Mountain Tunnel Collapse and FLAC3D Simulation

Zhang Lianzhi, Chen Wei, Chen He

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Construction process of mountain tunnel often encounters tunnel collapse. The causes of tunnel vault collapse and the effectiveness of reinforcement measures are studied from the aspects of rock layer distribution, rain erosion etc. The surrounding rock displacement of tunnel section near collapsed zone before and after reinforcement and the supporting structure stress are monitored. The result shows that the reinforcement measure of tunnel vault is practicable and the surrounding rock deformation and the structure stress are well controlled. In addition, FLAC3D simulation analysis was applied to tunnel collapse zone, and the obtained result is basically consistent with the field monitoring result. It indicates that the reinforcement measures are effect on the treatment of tunnel collapse.

Keywords: tunnel; numerical simulation; monitoring and measurement; collapse

0 引言

在修建山岭隧道时, 由于多种因素的影响, 拱顶塌方事故较为常见, 严重影响了施工安全和施工质量。特别是在复杂地质条件下, 长、大隧道工程的施工中,

对支护结构及其施工方法仍有待进一步的研究^[1]。

本文结合贵州省江口县镇江乡太平河 1 号隧道开挖过程中出现的拱顶塌方事故, 分析了隧道开挖过程中拱顶塌方的原因及其加固方案, 通过对隧道现场进行拱顶沉降、周边收敛位移、锚杆轴力及钢

收稿日期: 2013-03-12

基金项目: 湖南科技大学研究生创新基金资助项目 (S120005)

作者简介: 张联志 (1988-), 男, 江苏徐州人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为隧道工程,

E-mail: 1269798059@qq.com

拱架应力的测量,以及对加固前后应力变化及围岩变形情况的监测,得到了塌方段加固前后隧道围岩及支护结构的受力和变形规律。将塌方段现场观测的结果与运用FLAC3D软件数值模拟分析得到的结果进行比较,以此来评价隧道拱顶塌方后的加固措施,以确保隧道围岩稳定和施工安全。本文所研究问题的方法和所得结论以期能为类似工程的设计和施工提供参考和借鉴。

1 工程概况

1.1 隧道总体概况

太平河1号隧道位于贵州省江口县镇江乡,呈近东西走向。设计为分离式单行曲线隧道,左幅隧道起讫桩号为ZK62+870~ZK63+896.5,全长1 026.5 m;右幅隧道起讫桩号为YK62+842~YK63+900,全长1 058 m。隧道建筑限界按100 km/h行车速度确定,隧道净空宽度11.25 m,建筑限界净空高度6 m。隧道ZK区属于低山地貌,山体形态不规则,山体主脉总体呈近东北走向,洞身大角度斜穿山体,山坡植被较发育,沟谷发育。在ZK63+700处有冲沟,切割深度20~50 m,地面高程最高海拔734.8 m,最低海拔390.1 m,相对高差344.7 m。大兴端为沟谷,地形切割强烈,地面自然坡脚40°。隧道区地层岩性主要为寒武系中统高台组灰岩、白云质灰岩。岩石节理裂隙较发育,主要节理有:267°∠82°,348°∠66°,110°~150°∠8°~18°,层理面平均间距0.1~0.5 m。隧道采用普通钻爆法施工,洞身III级围岩采用全断面开挖,IV级围岩采用上下台阶法开挖。

1.2 隧道塌方现场概况

2012年6月18号下午因连续暴雨太平河1号隧道进口左线开挖至ZK63+738段时,拱顶突然发生失稳塌方,拱顶三榀工字钢严重变形。由于支护不及时,塌方区继续向隧道内纵向发展,延伸至ZK63+741段,见图1。在随后支护过程中,发现掌子面局部呈粉土夹薄层粘土填充,其粉土填充体土质较均匀,填充体较湿,且掌子面及拱顶处有渗水。

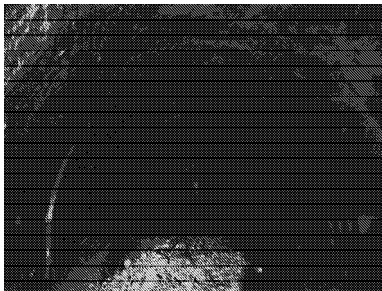


图1 塌方现场
Fig. 1 Tunnel collapse in-situ

2 塌方原因分析

2.1 地质因素

隧道发生塌方时,破坏力学模型主要有4种,分别为顶板弯折模型、底板鼓起模型、斜顶鼓起模型、边墙弯曲-溃屈模型^[2-7]。

太平河1号隧道围岩主要为强、弱风化白云质灰岩,层理构造明显,节理裂隙发育。在产生拱顶塌方段ZK63+738的地表处有一冲沟。受隧道开挖过程扰动影响,岩层产生了向隧道内的变形,同时未能做出及时有效的约束,岩层间的节理首先破坏,进而岩层中相互增长的变形导致围岩最终产生了剪切破坏。

2.2 雨水侵蚀因素

太平河1号隧道进口左线ZK63+720~800,地表有冲沟,碎石土,植被茂盛,雨量丰富。塌方区为ZK63+738~741,7月以来连续暴雨,而地表没有及时采取排水措施,该段由最初扰动范围较小,地表水渗透困难,转变为土质松动圈扩大。在雨季,大量地表水贯通水力通道之后,形成较大水力坡度,携带大量土颗粒汇入掌子面,并在地表形成面积约300 m²,深达1 m的沉陷区,见图2。

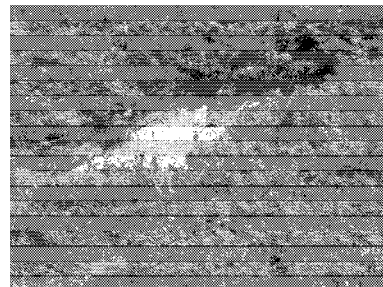


图2 塌方段地表岩层

Fig. 2 Top stratum of tunnel collapse

2.3 地质勘察因素

根据地质勘察资料,太平河1号隧道进口左线ZK63+720~800段为III级围岩,设计采用全断面开挖。但在隧道开挖过程中,发现局部有粉土夹薄层粘土填充,并伴有涌水现象,应为V级围岩。由于施工人员过于相信已设计的施工方案,未根据现场实际情况对施工方案作出及时更正和调整,锚杆、钢拱架的刚性强度均未达到支护要求,最终导致隧道拱顶围岩失稳塌方。

3 隧道塌方处理方案

为防止更大的塌方,确保施工安全,尽快封闭围岩并采取相应支护措施,见图3。

1) 在塌方处喷射混凝土喷层,对塌腔进行封闭,形成封闭环。

2) 在 ZK63+738 处原有的钢拱架内侧再加一道临时钢拱架支撑并设置排水管道, 以防塌方的再次发生或扩大。

3) 对于塌腔部分采用混凝土进行喷射填满, 再进行水泥注浆, 以达到加固防渗的目的。

4) 拱顶中支撑用 2 根工 18 型钢焊接, 同时在支撑两侧距离约 2.5 m 处各设一道侧向支撑; 在拱顶沿环向间隔 20 cm、纵向间隔 1 m 设置 $\Phi 42$ mm, 长度为 5 m, 壁厚为 3.5 mm 的超前小导管, 其设置角度与水平方向成 $13^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 。

5) 隧道开挖方案由最初的全断面法变更为台阶法, 同时堆土回填, 并将土体回填至掌子面上的台阶, 以防止土体进一步坍塌。

6) 由于临时钢拱架支撑已经侵入二衬限界, 因此对原支护设计作适当变更。将原设计工 18 型钢支撑改为工 20 型钢支撑, 换拱时两侧加强竖向支撑, 支撑采用 $\Phi 200$ mm, 壁厚 12 mm 的钢管。

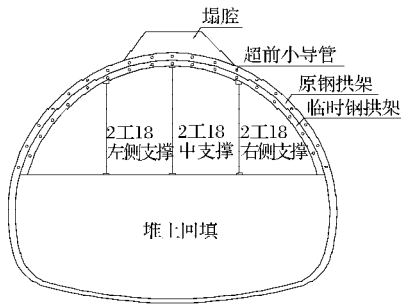


图3 塌方围岩处理示意图

Fig. 3 Sketch of sealed rock at collapsed zone

4 塌方段加固后监控量测

为了确保塌方段拱顶支护的有效性, 需要在塌方区周围进行监测, 以便采取积极支护措施, 保证隧道施工安全和围岩稳定。监测项目有: 洞内拱顶沉降、洞内周边收敛、锚杆轴力及拱架应力等。监控量测项目及位置如图 4 所示。

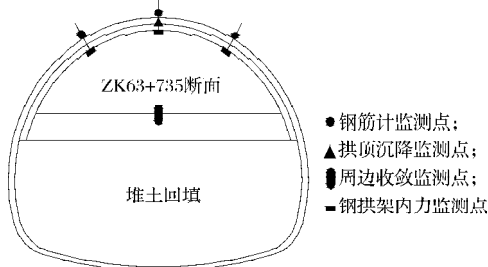


图4 ZK63+735 段监控量测点布置

Fig. 4 Sketch of monitoring points at section ZK63+735

4.1 围岩位移监测结果

将围岩位移监测结果绘制成拱顶沉降-时间曲线和收敛位移-时间曲线, 如图 5~6 所示。从图可以

看出, ZK63+735 所受影响最大, 这主要是断面距离塌方区最近所导致的。2012 年 6 月 18 日, 拱顶沉降急剧下降, 日沉降量达到 10 mm, 经过紧急支护后沉降有所回缓。距塌方区较近的断面 ZK63+735 和 ZK63+730 下沉量明显, 分别达到 26 mm 和 18 mm。其他断面的拱顶沉降变化值基本稳定在 16 mm 左右。同时, 收敛位移 ZK63+735 段最大, 当日收敛值达 5.5 mm, 稳定后最终达 14 mm。其他断面受塌方区影响稍小, 收敛值最终稳定在 10 mm 左右。

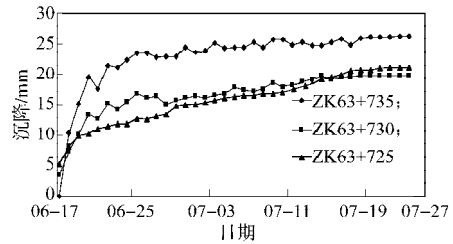


图5 塌方段各断面拱顶沉降-时间曲线

Fig. 5 The vault settlement-time curves of monitored points of collapsed zone

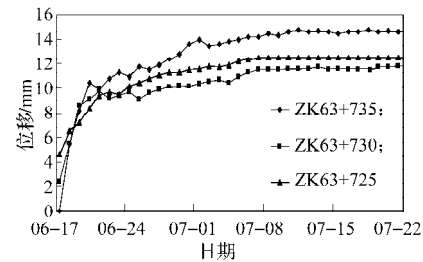


图6 塌方段各断面收敛位移-时间曲线

Fig. 6 Convergence-time curves of monitored points of collapsed zone

4.2 锚杆轴力监测结果

图 7 为 ZK63+735 断面各测点锚杆轴力-时间曲线。从图可以看出, 锚杆均是受拉, ZK63+735 段当日锚杆轴力变化量分别达到了 16.5, 21.4, 14.2 kN, 经过紧急加固后, 轴力变化基本处于稳定状态, 而拱顶处略有增加, 随后也逐渐趋于稳定。

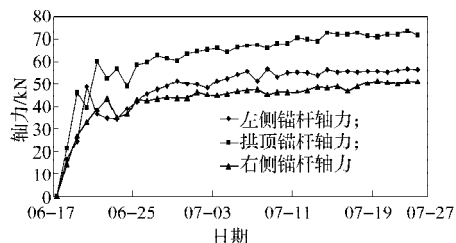


图7 各测点锚杆轴力-时间曲线

Fig. 7 Bolt stress-time curves of monitoring points

4.3 钢拱架应力监测结果

图 8 为 ZK63+735 断面工字钢内侧应力-时间曲线。从图可以看出, 应力最大的位置出现在拱顶处, 这与隧道发生塌方所导致应力急剧增大有关, 左拱

腰、拱顶、右拱腰测点的应力最大值分别为112.36, 159.76, 128.77 MPa。经过紧急支护处理后, 各测点的应力值逐渐稳定。施工单位根据现场情况以及预报信息及时采取了有效的支护措施, 防止了隧道坍塌的再次发生。

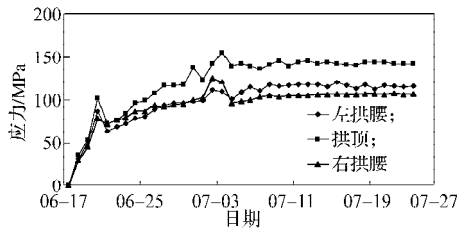


图8 各测点钢拱架应力-时间曲线

Fig. 8 Steel arch stress-time curves of monitoring points

5 有限元数值模拟分析

5.1 数值模拟隧道开挖模型的建立

根据太平河1号隧道设计参数, 采用FLAC3D软件对隧道塌方区进行开挖模拟, 围岩及支护结构参数见表1。

表1 围岩及支护结构参数

材料	弹性模量 / MPa	容重 / (kN · m ⁻³)	泊松比	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
粉质粘土	2.3	12.4	0.24	8	26.8
混凝土喷层	1.5e7	25.8	0.22	2 000	37.6
锚杆	4.5e7	78.0	-	-	-

根据隧道围岩的工程地质勘察情况, 塌方段均为粉土充填, 有限元计算采用摩尔-库仑准则。为减少在有限元模型计算过程中, 边界约束条件对其产生的不利影响, 模型边界宽度在水平方向及隧道底部方向取3倍洞径。锚杆采用cable单元模拟, 计算时将不同地质岩体视为均匀介质。同时, 采用等效折算法, 将加固配筋的力学指标折算到混凝土中去。

5.2 数值模拟结果及分析

用FLAC3D软件对塌方区ZK63+738断面支护前后进行数值模拟, 得到拱顶竖向位移模拟结果, 见图9~10。塌方区经加固后, 取现场试样进行室内试验, 得到围岩加固后的参数, 见表2。

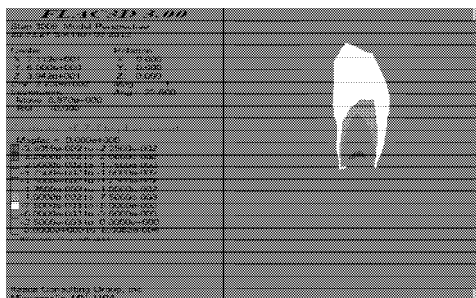


图9 塌方段拱顶垂直方向位移分布图

Fig. 9 Distribution of vault vertical displacements of collapsed zone

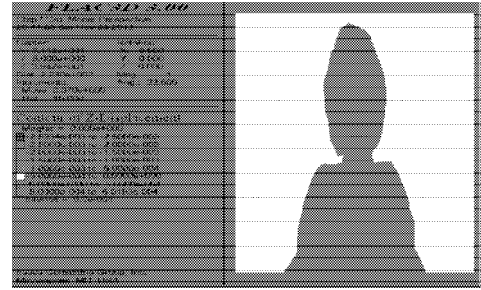


图10 塌方段加固后拱顶垂直方向位移分布图

Fig. 10 Distribution of vault vertical displacements of collapsed zone after reinforcement

表2 围岩参数

弹性模量 / MPa	容重 / (kN · m ⁻³)	泊松比	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
2.8	13.4	0.24	8.7	29.8

由图9~10和表2分析可知, 对隧道塌方区采取加固措施后, 模拟结果与监测结果相符, 围岩趋于稳定。

用FLAC3D软件对隧道开挖塌方过程进行数值模拟, 得ZK63+738断面各点位移见表3。

表3 FLAC3D模拟各点最终位移

拱顶沉降	左拱腰沉降	右拱腰沉降	水平收敛位移
24.05	18.4	16.8	12.35

由表可知, 模拟隧道开挖塌方过程中, 拱顶最大沉降量为24.05 mm, 水平收敛位移最大值为12.35 mm。此外, 模拟计算出拱顶两侧的下沉量及锚杆轴力的变化量均与现场监控量测结果一致。同样, 对隧道塌方区采用支护等措施加固后, 模拟出的结果与监测值相符。

以上监测和模拟结果表明, 对隧道塌方后的加固措施行之有效, 因而可供类似工程参考。

6 结论

结合太平河1号隧道塌方事故, 分析了引起塌方的原因, 研究了受塌方影响隧道段的围岩变形和钢筋受力变化情况, 采取了正确的加固处理措施从而保证了塌方段的稳定并可继续施工。由此可得如下结论:

- 1) 因地制宜、综合治水, 对地表沉降区做好截水、疏导、遮挡等处理工作。对于施工中突遇暴雨, 必须及时做出支护, 尽可能减少地表水下渗, 防止土体进一步失稳。
- 2) 根据塌方加固后的监测数据可以看出, 位移变化距离塌方区越近越明显, 最终趋于稳定状态, 且

总沉降量在可控范围之内；轴力属于受拉状态，起始时应力急剧增大，经过紧急加固处理后，轴力变化基本处于稳定状态，而拱顶处略有增加，随后也逐渐趋于稳定；钢拱架应力变化最大的位置出现在拱顶处，这主要与隧道发生塌方所导致内力急剧增大有关，且最终基本处于稳定状态，拱顶处略有增加，随后也逐渐趋于稳定。

3) 分析土体特征，采用可靠的注浆方案，稳定隧道周边土体，形成封闭环。并将现场监控量测与有限元计算相结合评价隧道支护效果。

参考文献：

[1] 陈秋南. 隧道工程[M]. 北京：机械工业出版社，2007：146-208.
Chen Qiunan. Tunnel Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 146-208.

[2] 韩同春, 黄福明, 郑俊清, 等. 隧道拱脚塌方施工加固及监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3343-3349.
Han Tongchun, Huang Fuming, Zheng Junqing, et al. Reinforcement Construction and Monitoring Analysis of Arch Spring Collapse of Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock

Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3343-3349.

[3] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京：人民交通出版社，2003：248-271.
Guan Baoshu. Key Points of Tunnel Construction[M]. Beijing: Peoples Communication Press, 2003: 248-271.

[4] 周应麟, 邱喜华. 层状岩层围岩隧道稳定性的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 345-348.
Zhou Yinglin, Qiu Xihua. Study on Stability of Stratified Rock Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 345-348.

[5] 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(增刊1): 173-177.
Chen Qiunan, Zhang Yongxing. Design Theory and Key Technology in Construction for Double-Arch Highway Tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(S1): 173-177.

[6] 陈秋南. 非对称连拱隧道动态施工力学模拟研究[D]. 重庆：重庆大学，2005.
Chen Qiunan. Study on Observation Construction Mechanics Simulation for Non-Symmetry Arch Funnell in High-Way[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.

(责任编辑: 邓光辉)

(上接第 15 页)

出版社, 1979: 193-214.
Jing Qicheng, Jiao Shulan, Yu Bolin, et al. Chromaticity [M]. Beijing: Science Press, 1979: 193-214.

[6] Hohenbegr P, Kohn W. Inhomogeneous Electron Gas[J]. Phys. Rev., 1964, 136(3B): 864-871

[7] Kohn W, Sham L J. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects[J]. Phys. Rev., 1965, 140(4A): 1133-1138.

[8] Perdew J P, Burke K, Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple[J]. Phys. Rev. Lett., 1996,

77(18): 3865-3868.

[9] Hammer B, Hansen L B, Nørskov J K. Improved Adsorption Energetics Within Density-Functional Theory Using Revised Perdew-Burke-Ernzerhof Functionals[J]. Physical Review B, 1999, 59(11): 7413-7421.

[10] 焦其祥. 电磁场与电磁波[M]. 北京：科学出版社，2004：239-310.
Jiao Qixiang. Electromagnetic Field and Electromagnetic Wave [M]. Beijing: Science Press, 2004: 239-310.

(责任编辑: 邓光辉)