

破碎岩体隧道塌方预测及台阶工法调整技术研究

杨志刚¹, 肖伯强¹, 杨 钊¹, 陈培帅^{1,2}, 田洪铭³

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:塌方是破碎岩体隧道较易发生的工程事故,主要发生在掌子面和未支护段,塌方预测及工法适时调整是避免事故发生的有效途径。依托某塌方隧道工程,提出塌方预测及台阶工法调整流程:首先对未支护段进行塌方预测,采用拱顶岩体稳定理论评估上台阶高度,确定极限矢跨比,并采用数值计算进行验证,选择合理的台阶数目;其次对掌子面稳定性进行评估,基于地质素描对掌子面稳定性进行塌方初判,采用数值计算对掌子面稳定性进行二次评估。鉴于核心土对掌子面稳定的重要作用,对台阶施工预留核心土工法的必要性也进行了分析。最终提出了基于拱顶岩体稳定理论的塌方预测和上台阶极限矢跨比计算方法,以及基于地质素描与数值计算的掌子面稳定性分析方法,相关研究思路可为类似工程提供借鉴和参考。

关键词:塌方预测; 预留核心土; 三台阶工法; 隧道开挖

中图法分类号: T

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.11.015

随着我国隧道建设的快速发展,复杂地质高风险隧道越来越多,在施工过程中,易因围岩条件突变、地质超前预报不深入、监控量测不及时、设计阶段地质勘察深度不够、施工应对措施不到位等原因,造成塌方甚至冒顶事故^[1-2]。

未支护段及掌子面是塌方预测及工法调整的重点关注区域:未支护段为已完成开挖但尚未进行初支的区域,在压力拱应力调整过程中,若其自稳能力较强,即使掌子面发生塌落,也不会发生较大范围塌方;掌子面在开挖卸荷引发的应力重新调整过程中,会发生挤出变形,极易发生破坏,造成更大面积的无支护围岩暴露,因而掌子面稳定性控制是预防塌方的关键环节之一^[3-5]。

由塌方发生的区域范围可知,施工工法对预防塌方具有重要作用,台阶法开挖是隧道施工最常用的工法。针对隧道塌方的台阶工法优化,主要涉及台阶数目和开挖顺序,实现支护施作时机及围岩应力状态的科学调整。

本文对某隧道塌方原因进行分析,提出基于拱顶

岩体稳定性理论的塌方评估方法,确定台阶开挖矢跨比限值,并采用数值计算进行验证。基于地质素描对掌子面稳定性进行塌方初判,采用数值计算对掌子面稳定性进行二次评估,鉴于掌子面稳定对塌方控制的关键作用,对预留核心土的必要性进行分析,确定合理的隧道开挖工法。

1 工程概况

1.1 塌方情况

图 1 为该隧道全线地质断面图(埋深约 155 m),该隧道在 IV 类围岩条件下采用两台阶开挖工法,上台阶高度为 5 m,开挖矢跨比为 0.405;下台阶高 5.1 m。施工过程中发生了不同程度小规模塌方,主要包括未支护段岩块塌落和掌子面挤出大变形破坏。由于塌方范围较小,未引起足够重视,后续开挖也未进行塌方预测及工法调整。

2014 年底,掌子面推进至 K61+977,上台阶开挖完成后,在钢拱架架设过程中突然发生大规模塌方,拱顶出现较大的空腔,塌腔尺寸为 4 m×9 m×4 m,塌方

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057906)

作者简介: 杨志刚,男,高级工程师,主要从事隧道与桥梁相关的技术与施工管理工作。E-mail: zgyang_sneb@126.com

范围包括上台阶拱顶、掌子面及掌子面塌方后的拱顶暴露岩体,塌方导致超前小导管全部悬空,钢拱架发生扭曲变形(见图 2),塌落体为典型的风化页岩,破坏体岩面粘结性较小。

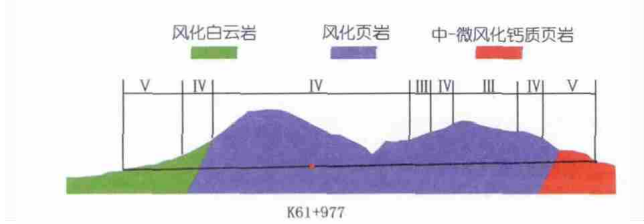


图 1 隧道地质断面

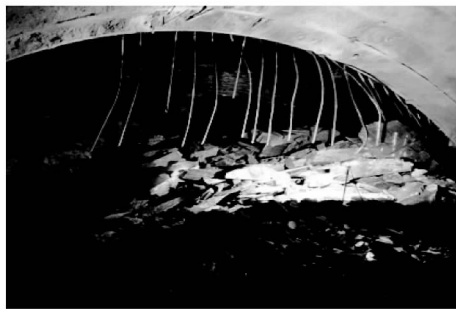


图 2 现场塌方

1.2 基于塌方预测的施工工法优化

针对现场塌方情况,分别对未支护段和掌子面进行分析,首先分别采用理论计算和二维数值计算开展未支护段岩体稳定性分析,进行塌方预测,计算上台阶极限矢跨比,从而确定台阶数量;其次根据地质素描和三维数值计算,评价掌子面稳定性,分析预留核心土的必要性。

2 未支护段拱顶岩体稳定性分析

采用台阶法开挖时,上台阶对隧道稳定性影响最大,拱顶岩体虽有一定的自稳能力,但若上台阶开挖高度过大,在地层应力突然释放过程中,极易发生岩体破坏。学者们曾就上台阶开挖对隧道变形的影响进行评估,发现上台阶开挖后隧道变形占总变形的 70% 以上^[6],因而采用上台阶极限矢跨比作为塌方预测指标是较为合理的。本节分别采用拱顶岩体理论和有限元电算化方法计算上台阶极限矢跨比,实现塌方预测和台阶数比选。

2.1 拱顶岩体稳定性理论评估

如图 3 所示,采用经验公式对岩体隧道拱顶节理块体稳定性进行分析^[7],计算公式为

$$F_s = 2(c_1L_1 + c_2L_2)(\cos\alpha + \cos\beta) / (\gamma L_3^2) \quad (1)$$

式中, L_1 和 L_2 分别为节理结构面长度; L_3 为节理松动块体的宽度; c_1 和 c_2 分别为节理面 L_1 和 L_2 的凝聚力,

按地勘报告取 200 kPa; α 和 β 分别为节理面 L_1 和 L_2 的倾角; γ 为岩体重度,取 20 kN/m³。

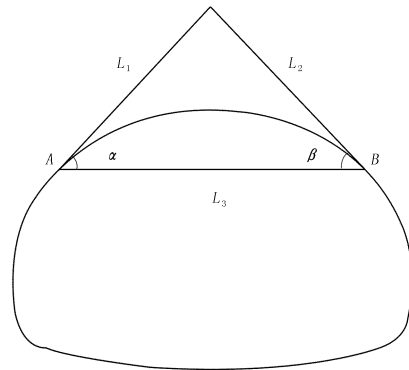


图 3 拱顶块体稳定性计算

拱顶块体稳定性控制标准为:当 $F_s \geq 2$ 时,块体稳定;当 $F_s < 2$ 时,块体不稳定。

编制电算化计算程序,假定拱顶为对称破坏,即 $L_1 = L_2$,设定拱顶无支护角度为定值,无支护角度范围工况包括 60°,70°,80°,90°,100°,110°,120°,130°,140°和 150°。通过调整块体边长 L_1 ,得出该角度范围内的稳定性系数最小值。图 4~6 分别为 60°,120°和 150°工况下的稳定性系数变化趋势。

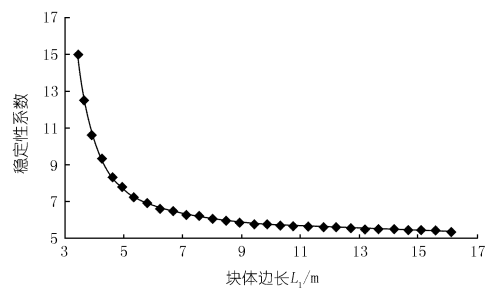


图 4 拱顶 60°范围无支护

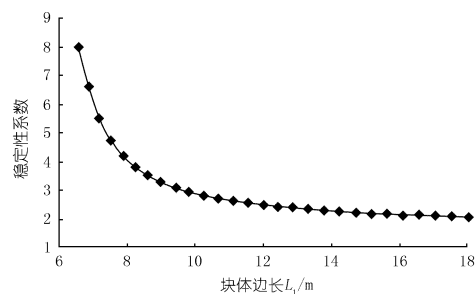


图 5 拱顶 120°范围无支护

拱顶无支护条件下的稳定性系数统计值如表 1 所示,可以看出:120°范围无支护是拱顶岩体稳定临界值,对应稳定性系数为 2.05。由隧道断面设计图可知,该处对应上台阶高度为 3.6 m,隧道跨度为 11.32 m,故极限矢跨比为 0.318,因而上台阶高度应控制在 3.6 m 以下,考虑下台阶高度较大,应采用三台阶开挖

工法。

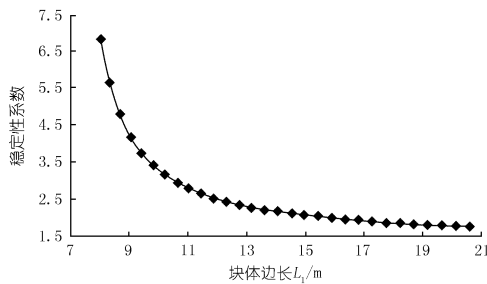


图6 拱顶 150°范围无支护

表1 岩体稳定性系数

拱顶未支护范围/(°)	稳定性系数	拱顶未支护范围/(°)	稳定性系数
60	5.36	110	2.24
70	4.16	120	2.05
80	3.39	130	1.91
90	2.86	140	1.82
100	2.50	150	1.76

2.2 拱顶岩体稳定性有限元计算复核

采用二维有限元模型对拱顶岩体理论评估结果进行验证,如图7所示。两台阶工法对应上台阶高度为5 m;三台阶工法对应上台阶高度为3.6 m。计算参数按照地勘取: $E = 1 \text{ GPa}$, $c = 200 \text{ kPa}$, $\varphi = 21^\circ$ 。模型顶部埋深50 m,上部施加105 m岩体等效重力荷载,采用摩尔库伦本构模型。

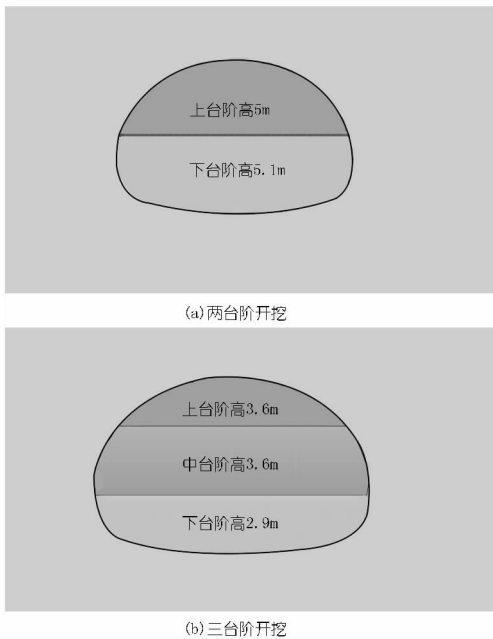


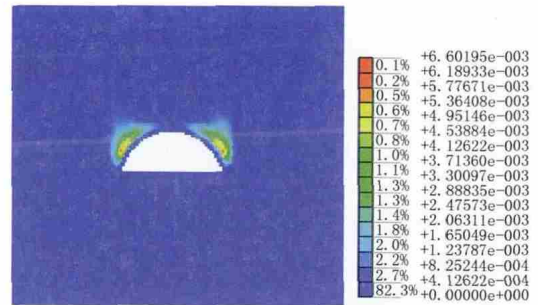
图7 计算模型

隧道开挖完成后塑性区分布如图8所示。

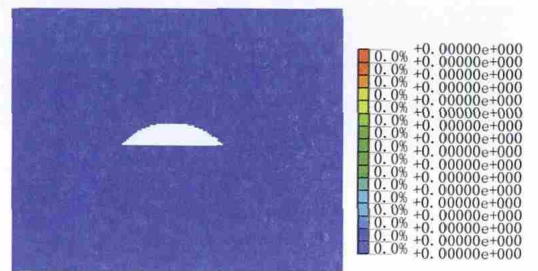
(1) 采用两台阶工法时,上台阶开挖完成后,未支护条件下,拱顶上部出现较大范围的塑性区,由于该隧道岩体节理发育且岩层粘结性较差,可能会发生较大

范围的拱顶塌方。

(2) 采用三台阶工法时,上台阶开挖完成后,未支护条件下,拱顶上部未出现塑性区,岩体自稳态势较好,在后续施工中,若可以及时进行初支施工,并对上台阶钢拱架进行锁脚锚杆加固^[8-9],可避免隧道发生塌方风险。



(a) 两台阶开挖



(b) 三台阶开挖

图8 塑性区分布

3 掌子面稳定性分析

现场塌方情况表明,工程前期出现较多掌子面塌方,可以预见的是,掌子面垮塌后,会暴露更大范围的拱顶无支护区域,引发拱顶塌方连锁反应。

3.1 基于地质素描的掌子面稳定性分析

掌子面节理、裂隙等地质构造是掌子面稳定性的重要参考依据之一,图9为K61+977掌子面地质素描图,可以看出:掌子面两侧完整度较差,岩层较破碎,中间存在较多节理裂隙带,节理裂隙整体倾向已开挖段(见图10),在爆破震动及上部岩层压力作用下,极易发生垮塌。因而,应对掌子面的稳定性进行进一步的判别。

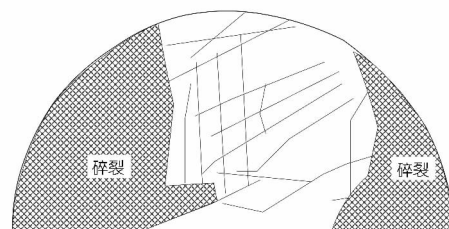


图9 K61+977掌子面素描图

3.2 掌子面稳定及核心土必要性分析

采用数值计算对掌子面稳定性开展进一步研究, 由于上节已确定三台阶开挖是拱顶岩体稳定的基本要求, 因而本节掌子面稳定分析以三台阶为基础。鉴于掌子面地质素描核心土掌子面稳定的重要作用^[10], 计算时重点分析正三台阶和三台阶预留核心土两种工况, 开挖步序如图 11 所示。

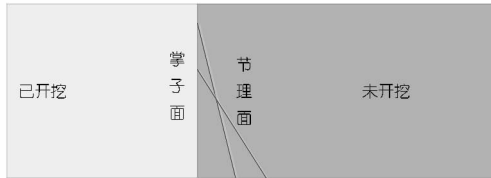


图 10 掌子面节理倾向

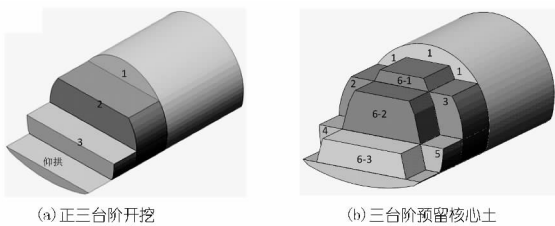


图 11 开挖步序

如图 12 所示, 计算分析时, 考虑初支结构的影响, 喷射混凝土厚度 22 cm, 锚杆长 3 m, 钢拱架为 I16@80 cm。仍以 K61 + 977 段进行分析, 计算模型如图 13 所示。

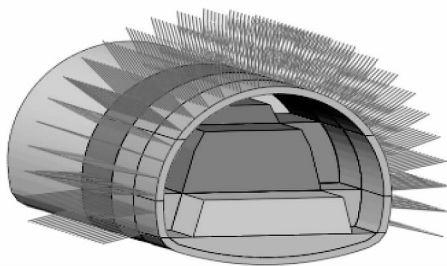


图 12 支护结构

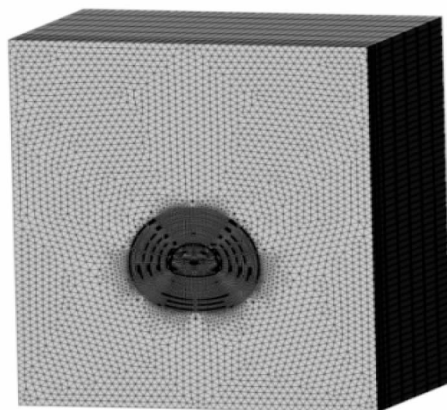
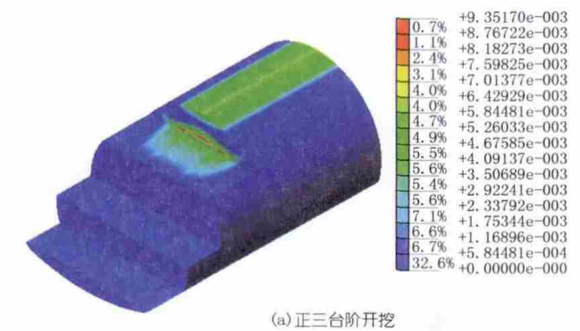


图 13 计算模型

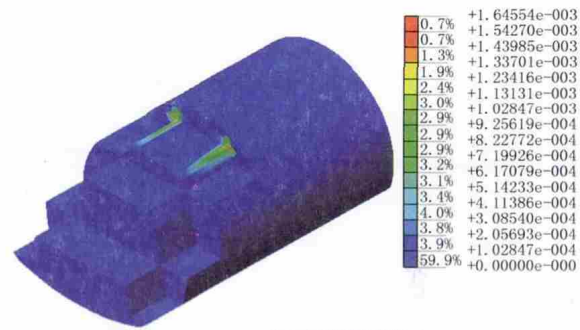
开挖完成后塑性区分布及整体位移如图 14 所示。

(1) 采用正三台阶工法时, 在开挖面卸荷及隧道应力 redistribution 过程中, 掌子面及前方出现较大范围的塑性区, 结合地质素描结果可知, 掌子面极易出现不稳定破坏。

(2) 采用三台阶预留核心土工法时, 在核心土作用下, 掌子面仅出现较小范围塑性区, 且在掌子面前方未出现连通塑性区, 掌子面稳定性较好, 为保证掌子面稳定, 应采用三台阶预留核心土工法。



(a) 正三台阶开挖



(b) 三台阶预留核心土

图 14 掌子面塑性区分布

4 结论

针对隧道塌方预测及工法调整技术难点, 本文采用理论计算、数值分析及地质素描等手段, 对依托工程未支护段岩体和掌子面稳定性进行分析, 提出了台阶法施工塌方预测及工法调整流程, 主要结论如下。

(1) 塌方预测及工法调整应重点应关注未支护段及掌子面稳定两个方面。

(2) 通过理论分析与二维有限元模型验证, 得出基于拱顶岩体稳定理论的塌方预测与工法调整分析手段是有效的。采用该方法对依托工程进行分析, 得出 120° 范围无支护是拱顶岩体稳定的临界值, 对应的上台阶高度为 3.6 m 左右, 应采用三台阶工法。

(3) 地质素描是评判掌子面稳定性的重要参考因素, 可采用地质素描对掌子面塌方进行初评, 并采用有限元等手段进行进一步判别。依托工程掌子面地质素

描结果表明,掌子面两侧完整度较差,岩层较破碎,中间存在较多节理裂隙带,节理裂隙整体倾向已开挖段,掌子面稳定性较差,通过正三台阶工法与三台阶预留核心土工法对比,确定了预留核心土对掌子面稳定具有重要作用。

(4) 本文研究成果在工程应用中效果较好,避免了后续塌方事故,验证了其在破碎岩体隧道中的应用价值,由于塌方预测采用的是通用力学理论,因而该方法在土质隧道仍然有效。

参考文献:

- [1] 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):651-653.
- [2] 乔春江,陈卫忠,王辉,等.浅埋破碎地层隧道施工方法研究[J].岩土力学,2011,32(2):455-462.
- [3] 张爽,刘庆新,胡力耀,等.广巴高速某隧道不同岩性围岩变形特征分析[J].现代隧道技术,2011,48(1):17-21.
- [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):345-348.
- [5] 孟云伟,肖世洪,柴贺军,等.隧道开挖中破碎带支护的颗粒离散元模拟研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(4):673-677.
- [6] 牟丹.公路隧道台阶法施工地层变形分析[J].山西建筑,2012,38(19):208-209.
- [7] 常士骝.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [8] 罗彦斌,陈建勋.软弱围岩隧道锁脚锚杆受力特性及其力学计算模型[J].岩土工程学报,2013,35(8):1520-1525.
- [9] 张涛.软弱围岩隧道锁脚锚杆(管)支护特性研究[D].西安:长安大学,2011.
- [10] 皇甫明,孔恒,王梦恕,等.核心土留设对隧道工作面稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):521-525.

(编辑:胡旭东)

Collapsing prediction of broken rocky tunnel and adjustment of step excavation method

YANG Zhigang¹, XIAO Boqiang¹, YANG Zhao¹, CHEN Peishuai^{1,2}, TIAN Hongming³

(1. CCCG Second Harbour Engineering Co. Ltd, Wuhan 430040, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Tunnel collapsing is a common engineering accident in broken rocky tunnel excavation, which mainly occurred in the working face of tunnel and rock section without supporting. Timely construction method adjustment and advanced collapsing prediction are the effective methods to avoid the accidents. With a collapsing tunnel as the case, the process of collapsing prediction and adjustment of construction method are proposed. Firstly, the collapsing prediction needs to be carried out against rock section without supporting. The upper step height can be assessed by arch rock stability theory and the span limit of tunnel can be determined. The analysis results can be verified by numerical calculation method, and then a reasonable step number can be selected. Secondly, the initial prediction of tunnel working face should be carried out based on geological sketch and numerical calculation are used to carry out secondary assessment. In the light of the important influence of core soil on the stability of tunnel working face, the necessity of method of reserved core soil in step excavation is analyzed. The collapsing prediction and upper step limit vector calculation method based on arch rock stability theory, and the working face stability analysis method based on geological sketch and numerical calculation are proposed.

Key words: collapsing prediction; reserved core soil; three steps excavation method; tunnel excavation

