

水平、垂直节理发育条件下的隧道稳定性分析

桑运龙¹ 李军² 刘学增³

(1 上海同岩土木工程科技有限公司,上海 200092;2 内蒙古交通设计研究院,呼和浩特 010010;

3 同济大学测绘与地理信息学院,上海 200092)

摘要 文章依托内蒙古呼和浩特市窑沟隧道工程实例,对典型断面所在区段的节理特征参数进行了采集,得到了实际地层中存在的近水平、垂直发育节理的详细参数;通过综合运用现场监测、室内模型试验、数值模拟手段,分析了隧道开挖后的上覆岩层运动行为与结构受力特征,研究了该类地层中围岩的变形特征与失稳模式,为后续的支护设计及其优化提供了参考。研究结果表明,在窑沟隧道所处的典型地层,即近水平、垂直节理发育工况下:(1)无支护开挖时,地层稳定性极差,塌落区与松动区集中分布于拱顶上方,最大塌落高度为 0.48 倍洞宽,塌落面积为 0.51 倍断面面积,拱顶等效荷载为 0.084 MPa,松动区延伸至地表,近似呈三角形分布;(2)按设计方案施作初期支护后,地层松动范围明显缩减,高度降为 1.1 倍洞宽,拱顶最大沉降为 7.7 mm,边墙收敛为 3.4 mm,结构安全储备足够。

关键词 隧道 围岩变形 节理特征 稳定性 模型试验

中图分类号:U451.2 **文献标识码:**A

1 前言

节理的发育,势必影响岩体的力学参数与变形特性,进而威胁地下洞室的稳定性。因此,针对节理发育地层,展开节理特征对隧道稳定性的研究很有必要性^[1]。目前,对隧道围岩稳定性分析的方法主要有:基于块体理论的分析方法——如张发明、庞正江等(2011)^[2]运用块体理论分析层状岩体隧道地下洞室开挖的稳定性,并提出了块体稳定性分析方法;模型试验的方法——如徐营、张子新(2010)^[3]通过物理相似模型试验研究了不同倾角层理下,块裂岩体中的地下洞室上覆岩层的运动行为和松动区变化规律,并初步建立数学模型,以确定其松动范围;数值分析的方法——如周应麟、邱喜华(2006)^[4]利用有限元程序对不同倾角岩层围岩分析了其支护结构受力特点。通过不同的研究手段,国内外学者已取得了不少的研究成果,掌握了节理发育特征与围岩变形特征、失稳模式之间的对应关系^[5,6]。但其研究工况偏于理论,与实际存在一定差异,且不同地域的地质条

件差异较大,已有的研究成果无法直接应用于实际工程施工与支护设计的指导。

本文拟依托内蒙古窑沟隧道,针对近水平、垂直节理发育的典型地层,通过现场监测、模型试验、数值模拟不同的手段,研究该类地层中进行隧道开挖时,围岩的变形特征与失稳模式,并对原设计支护方案进行评价,为后续施工与支护设计提供指导,并为类似工程提供一定参考价值。

2 围岩节理特征与现场监测

荣乌高速十七沟至大饭铺段窑沟隧道围岩岩性主要为灰岩、硬质岩,属 V 级围岩;存在近水平、垂直两组发育节理,部分有充填物,呈剪性;出口段埋深约为 22.18 m,断面高 9.31 m,宽 12.62 m,如图 1 所示。

通过对 ZK54+510~ZK54+370 区段内共 22 个断面进行节理特征的观测、统计,得到发育节理的详细参数。发现水平节理的倾角与间距分布较密集,离散性小,而垂直节理倾角与间距波动范围相对较广,

修改稿返回日期:2015-01-10

作者简介:桑运龙(1988-),男,硕士,主要从事隧道及地下建筑工程新型监测检测技术、风险评估、结构安全评价及加固设计理论等领域的研究工作,E-mail:hiker_1@163.com.

离散性大,如表1所示。图2为监测断面ZK54+380的CAD重构图。

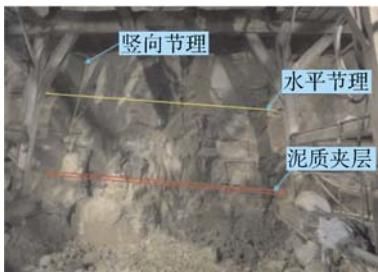


图1 隧道围岩现场实况

Fig.1 Field situations of surrounding rock

表1 优势节理特征参数

Table 1 Characteristic parameters of dominant joint

类别	近水平节理		近垂直节理	
	倾角/(°)	间距/m	倾角/(°)	间距/m
加权平均值	4	0.5	83	1.5
波动范围	3~8	0.32~0.65	72~90	0.9~1.7
方差	0.50	0.72	2.50	3.25

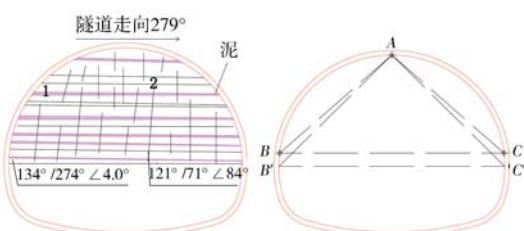


图2 CAD 重构图与监测方案布设示意
围岩为强风化灰岩,为V级围岩,地下水匮乏,基本上无基岩裂隙水,节理主要是水平方向1型节理和竖直方向的2型节理,1型节理有泥质夹层,泥夹层的厚度为2~4cm。

图2 CAD 重构图与监测方案布设示意

Fig.2 CAD restructuring graph and monitoring layout

为便于与后续模型试验、数值模拟结果对比验证,笔者对监测数据进行统计,统计结果如表2所示。

表2 现场监测数据统计

Table 2 Statistics of monitoring data at the site

断面		断面1	断面2	断面3	断面4
净空 收敛 /mm	△AB	1.48	1.39	2.55	1.5
	△AC	2.84	2	2.51	2.74
	△BC	1.76	2.39	2.73	2.54
拱顶围岩压力/MPa	0	0.02	0.01	0.02	

3 基于模型试验的地层变形分析

3.1 试验方案

参考相关文献[7,8],展开模型试验,装置如图3所示。



图3 试验装置示意

Fig.3 Testing apparatus

综合考虑依托工程地质条件与现有试验条件(模具尺寸等),取几何相似比 $C_L=50$,石膏块规格为 $1\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 。随后就基于此相似比展开模型试验,研究隧道开挖时的地层变形与失稳模式。

围岩节理与隧道模型如图4所示,通过抽出隧道模型模拟洞室开挖,利用拍照与玻璃板网格素描的方式,获取围岩松动范围及变形情况。

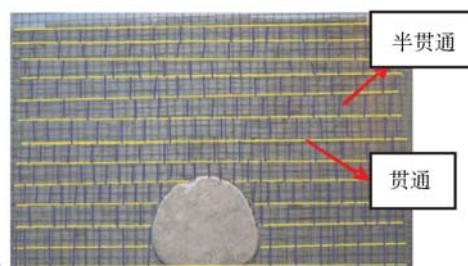


图4 现场实际节理特征模拟

Fig.4 Simulation of actual joint characteristics at the site

3.2 试验结果

观察试验现象可知,隧道开挖后,塌落区域和变形区域主要分布于拱顶正上方;最大塌落高度为0.48倍洞宽,塌落面积为0.51倍断面面积,松动区宽0.58倍洞宽,高约0.56倍洞宽,呈三角形,如图5所示。

参照塌落面积换算拱顶荷载等效高度,进而估算拱顶最大围岩压力;此外,按照深埋隧道压力拱理论^[9],计算拱顶压力理论值,并将上述值与现场监测数据对比分析,计算结果如表3所示。



图 5 模拟现场工况的开挖结果

Fig.5 Excavation results under the simulated conditions

表 3 不同手段得到的围岩压力对比值

Table 3 Comparison of the surrounding rock pressures obtained by different methods

方法	塌落面积	荷载等效高度/m	拱顶最大压力/MPa
试验值	0.51S	3.52	0.084
理论计算	-	3.93	0.094
监测值	-	-	0.02

注:S表示洞室断面面积。

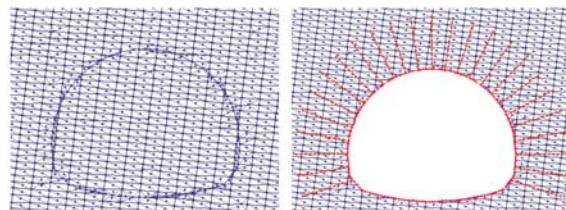
从表 3 中可知,试验值与理论值接近,且明显大于监测值。经分析,笔者认为:模型试验中石膏块间粘聚力为 0,即将地层视为无粘聚力的松散体,与普氏压力拱理论相近,故两者计算结果应大致相同;而实际工程中,岩体之间存在一定的粘聚力,且初期支护的施加,约束了地层的变形,使得直接作用于衬砌的围岩面积大幅减小,衬砌背后压力应远小于理论值,与计算结果相符。

从提高地下结构安全储备方面考虑,模型试验结果对隧道初期支护设计具有较好的指导意义与参考价值。

4 基于数值模拟的地层变形分析

4.1 计算模型

借助于离散元软件 UDEC,建立二维计算模型,进一步研究隧道开挖时的地层变形特征与失稳模式^[10,11]。地层范围取值如下:上边界取至地面,下边界取 2 倍洞宽,两边界取 5 倍洞宽,即地层高 45 m,宽 65 m。左右两侧施加 x 向固定约束,底侧施加 y 向固定约束。节理模型选取库伦滑动材料模型。为便于建模,同时考虑结构的安全储备,将地层简化为两组贯通节理,无支护开挖与有支护开挖模型如图 6 所示。



(a) 无支护开挖 (b) 有支护开挖

图 6 计算模型示意

Fig.6 Calculation model

地层为 V 级围岩,节理面力学参数依照蒋坤博士的论文^[12]取值:剪切刚度、法向刚度分别为 0.98 GPa/m 和 2.99 GPa/m,摩擦角为 30°,粘聚力为 0.1 MPa;依照设计资料,施作锚喷支护,喷混凝土初期支护厚度为 0.26 m,锚杆单根长度为 3.5 m,环向间距为 1.0 m,其力学参数如表 4 所示。

表 4 混凝土和锚杆力学参数

Table 4 Mechanical parameters of concrete and anchor bolts

名称	密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/kPa	抗压强度/kPa	抗拉强度/kPa	残余强度/kPa
混凝土	2 500	0.15	2.95e7	17 000	2 000	1

名称	截面积/m ²	密度/(kg/m ³)	极限拉应变	抗压极限/N	抗拉极限/N	弹性模量/kPa
锚杆	4.9e-4	7 500	0.01	1.15e6	1.15e6	2.1e8

4.2 计算结果

无支护开挖时隧道围岩的变形云图如图 7 所示。计算结果表明,拱顶上方出现大范围坍塌(图中红色曲线所示),高约 0.5 倍洞宽,宽约 0.7 倍洞宽。



图 7 无支护情况下隧道围岩的变形云图

Fig.7 Deformation contour of the surrounding rock without support

与模型试验相比,地层失稳模式相同,但因数值计算过程中考虑了节理面的粘聚力,围岩塌落范围略微减小。为了验证这一点,现将数值模拟中节理面的粘聚力取为0,所得计算结果如图8所示。围岩出现更大范围的坍塌,甚至直通地表。由此可见,数值模拟和试验结果的差异主要是因为粘聚力不同。

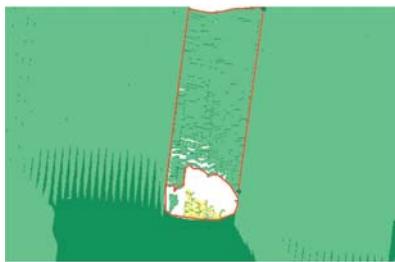


图8 节理面无粘聚力时隧道围岩的变形云图

Fig.8 Deformation contour of the surrounding rock with no cohesion of the joint surface

依照设计资料,施作初期支护后,地层稳定性得到明显改善,主要表现为:拱顶岩层未出现塌落现象;松动区范围明显减小,宽约1倍洞宽,高约1.1倍洞宽,如图9所示。

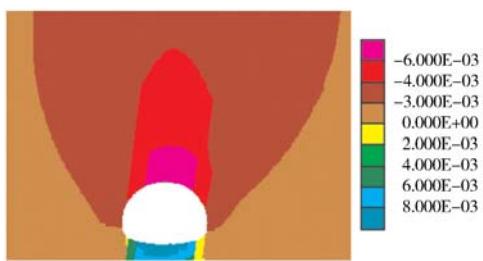


图9 锚喷支护情况下隧道围岩变形云图

Fig.9 Deformation contour of the surrounding rock under anchor bolt and shotcrete support

依照计算结果统计支护结构变形特征,并与现场监测值对比,如表5所示。

表5 支护结构变形统计

Table 5 Statistics of support structure deformation

类别	断面净空收敛值/mm		
	$\triangle AB$	$\triangle AC$	$\triangle BC$
计算值	3.1	2.2	3.4
监测值	1.8	2.5	2.3
差值占比	-41.9%	13.6%	-32.4%

理论上,数值计算时将实际地层弱化为两组贯通节理,且未考虑支护结构沿隧道轴向的分布密度,其变形值应略大于监测值,与表5统计数据相吻合。两者最大差异为41.9%,在工程接受范围内,故可以取数值计算的结果,对初期支护的效果进行评价以及后续优化设计的指导,为结构提供较高的安全储备。

5 结 论

针对窑沟隧道出口段节理发育特征重点分析了近水平、垂直节理发育条件下地层变形特征与失稳模式,得到了如下结论:

(1) 无支护开挖工况下,塌落区与松动区集中分布于拱顶上方:最大塌落高度为0.48倍洞宽,塌落面积为0.51倍断面面积,拱顶等效荷载为0.084 MPa;松动区近似呈三角形分布,延伸至地表,底边约0.58倍洞宽。

(2) 依照设计方案施作初期支护后,松动范围明显缩减,高度降为1.1倍洞宽,最大变形值约6.2 mm;支护结构拱顶沉降为7.7 mm,边墙收敛为3.4 mm,表明原设计支护方案加固地层是有效的。

参 考 文 献

References

- [1] 刘学增,刘文艺,索超峰.节理倾角对公路隧道围岩塌落拱影响分析[J].现代隧道技术,2014,51(6):73-77
Liu Xuezeng, Liu Wenyi, Suo Chaofeng. Effects of the Joint Dip Angle on the Collapsed Arch of Surrounding Rock Around a Highway Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6):73-77
- [2] 张发明,庞正江,郭丙跃,李晶,朱晟.层状岩体开挖洞室围岩块体稳定分析及锚固方法[J].水文地质工程地质,2005,(5):39-43
Zhang Faming, Pang Zhengjiang, Guo Bingyue, Li Jing, Zhu Sheng. Stability Analysis and Anchor Methods for Blocks of Underground Layered Rock Mass in Cavern Excavation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, (5):39-43
- [3] 徐营,张子新.块裂结构岩质地下洞室松动特征试验研究[J].岩土工程学报.2010, 32(2):216-223
Xu Ying, Zhang Zixin. Experiment Study on Loose Characteristics of Underground Excavation in Block-Fractured Rock Mass[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2):216–223
- [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] 王文, 朱维申. 节理岩体隧道的稳定性分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6):66–72
Wang Wen, Zhu Weishen. Stability Analysis of Tunnels in Jointed Rock Masses [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6):66–72
- [6] 石益东, 李志忠, 李军, 等. 两组耦合节理工况下隧道变形的数值研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6):89–93
Shi Yidong, Li Zhizhong, Li Jun, et al. Numerical Research on Tunnel Deformation Under Two Sets of Coupling Joints [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6):89–93
- [7] 陈国柱. 节理特征对隧道变形的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2012
Chen Guozhu. Study on the Effect of Joints to Tunnel Deformation[D]. Shanghai: Tongji University, 2012
- [8] 陈国柱, 段群苗. 节理特征对隧道变形影响的数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2012, (S):89–93
Chen Guozhu, Duan Qunmiao. Numerical Simulation for Effects of Joints Characteristics on Tunnel Deformation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012,(S):89–93
- [9] 中华人民共和国行业标准. JTGT D70—2010 公路隧道设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010
The Professional Standards of the People's Republic of China. JTGT D70—2010 Guidelines for Design of Highway Tunnel [S]. Beijing: China Communication Press, 2010
- [10] Itasca Consulting Group Inc. UDEC—Universal Distinct Element Code—user's manual [R]. Minneapolis USA, 2005
- [11] 胡威东. 离散单元法在岩石隧道开挖中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2008
Hu Weidong. A Study on the Application of Discrete Element Methods in Rock Tunnelling [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008
- [12] 蒋坤. 节理岩体中特大断面小净距隧道围岩稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 2010
Jiang Kun. Study on Surrounding Rock Stability of Highway Tunnel with Super—Large Section and Small Spacing in Jointed Rock Mass [D]. Shanghai: Tongji University, 2010

Stability Analysis of Tunnels Under Horizontal and Vertical Joint Developments

Sang Yunlong¹ Li Jun² Liu Xuezeng³

(1 Shanghai Tong Yan Civil Engineering Ltd., Shanghai 200092; 2 Inner Mongolia Transport Design and Research Institute, Hohhot 010010; 3 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract In this paper, based on the construction of the Yaogou tunnel in Hohhot, the characteristic parameters of approximate horizontal and vertical developed joints are collected for areas of the typical section; additionally, the kinematic behaviors and force characteristics of the overlaying rock are analyzed and the deformation and instability patterns of the surrounding rock are studied by adopting field monitoring, a laboratory model test and numerical simulation. The results show that: 1) without support, the stability of the strata is very poor during construction with the caving and loosening zones concentrated above the vault, of which the maximum caving height is 0.48 times the tunnel width, the caving area is 0.51 times the section area, the equivalent load of the vault is 0.084 MPa and the loosening zone extends to the ground surface in an almost triangular distribution; and 2) with a primary lining, the loosening range of the strata is significantly reduced, with a maximum caving height of 1.1 times the tunnel width, and the maximum settlement of the vault is reduced to 7.7 mm and the sidewall convergence becomes 3.4 mm.

Keywords Tunnel; Surrounding rock deformation; Joint characteristics; Stability; Model test