

将军山隧道节理特征对围岩稳定性的影响及锚杆支护机理研究^{*}

谢尚邨¹, 吴建勋², 陈亮²

(1.宁波市北仑区交通工程建设管理中心, 浙江 宁波 315800; 2.上海同济检测技术有限公司, 上海 200092)

摘要: 节理岩体隧道破坏与节理属性密切相关。文中依托将军山大跨隧道, 分析节理特征对隧道围岩稳定性的影响, 阐述节理岩体隧道围岩失稳机理和锚杆支护机理, 提出节理岩体隧道锚杆支护设计建议。结果表明, 块体塌落区分布在两组节理与隧道相切形成的三角区, 为围岩失稳关键区域; 节理张开区、剪切滑移区由拱腰延伸到拱脚、拱肩, 向围岩深部发展, 呈蝶形分布, 为围岩失稳潜在区域; 节理岩体失稳机理为开挖应力平衡打破—应力降低区出现—节理面剪切滑移—节理面张开—块体塌落; 节理岩体锚杆作用机制为对节理面施加法向应力以增加节理面摩擦阻力、锚杆轴力提供抗滑力、锚杆抗剪能力限制节理面相互错动。

关键词: 隧道; 围岩稳定性; 节理特征; 锚杆支护

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0169-05

岩体在生成过程中经受各种复杂地质作用, 发育着断层、节理和各种裂隙, 使其物理力学性质十分复杂, 而岩体的节理特性是隧道围岩破坏的重要因素。陈高奎、高峰、赵景彭等采用 UDEC 研究了节理岩体隧道在不同节理参数、块体参数下的破坏机理; 王余岩等采用 UDEC 分析了锚杆支护对节理岩体隧道围岩稳定性的影响, 验证了锚杆支护的可行性; 索超峰、王永甫等采用相似试验研究了不同倾角、不同间距、多组节理情况下隧道开挖后围岩的塌落和松动范围, 分析了节理岩体稳定性及破坏机理。目前针对节理岩体隧道失稳模式及量化的稳定性大多从块体塑性区、变形角度进行分析, 事实上, 节理岩体稳定性受优势结构面控制, 节理面极大地削弱了岩体力学性质及其稳定性, 节理面变形与强度性质往往对于工程岩体稳定性起着关键控制性作用。因此, 重点关注节理面变形和破坏, 以块体塌落区、节理张开区、剪切滑移区作为表征节理岩体稳定性判定指标更具说服力。该文以将军山大跨隧道为依托, 基于围岩节理信息精细化描述, 采用 UDEC 离散元软件研究节理特征对隧道围岩稳定性的影响, 分析节理岩体隧道围岩失稳机理和锚杆支护机理。

1 工程概况

将军山隧道为分离式双向六车道大跨度隧道,

全长 1 375 m, 净空断面宽度为 16.80 m, 高度为 10.85 m。隧址区地形起伏较大, 岩石风化强烈, 覆盖层为第四系残积土和坡洪积碎石、含砾石粉质黏土, 下伏为强~微风化晚侏罗统西山头组凝灰岩, 节理断层发育。存在 6 条对隧道开挖有一定影响的次级断层和节理密集带, 受区域断裂及次级断层的影响, 隧址区内节理、裂隙较发育。图 1 为左幅洞口段工程地质纵断面。

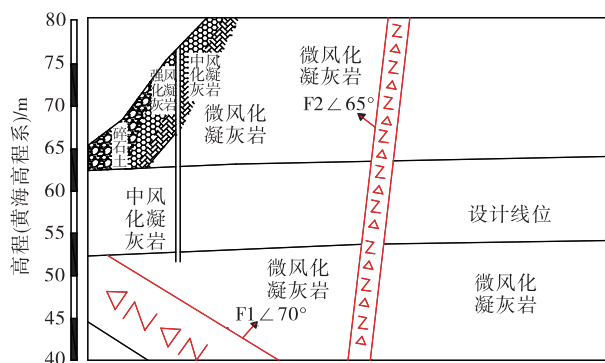


图 1 将军山隧道左幅洞口段工程地质纵断面

根据 JTG C20-2011《公路工程地质勘察规范》、JTG D70-2010《公路隧道设计细则》中的围岩分类方案及钻探与岩样试验资料、地面调查资料、地质勘察报告, 结合工程经验, 对隧道围岩进行综合分级, 结果见表 1。

^{*} 基金项目: 宁波市交通运输科技项目(201406); 深圳市交通公用设施建设中心交通建设工程课题(20160318002B)

表1 将军山隧道围岩分类及工程特征

岩土名称	节理发育程度	岩石质量指标/%	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和抗压强度/MPa	岩体完整性指标	围岩基本质量指标	围岩级别
碎石土	—	—	—	—	—	—	V
含砾粉质黏土	—	—	—	—	—	—	V
强风化凝灰岩	极发育	0	1 910~2 226	—	0.1	≤ 250	V
中~微风化凝灰岩	发育~较发育	20~80	500~3 738	25~70	0.4~0.7	265~475	III~IV

采用 DQY-1 地质罗盘仪对现场节理特征(倾角、倾向、迹长、间距)进行采集,结合数据统计分析、地质素描(见图 2),实现对地质特征信息的精细化描述。隧道掌子面见图 3,Ⅲ、Ⅳ级围岩优势节理分布特征见表 2。

2 节理围岩失稳机理模拟分析

2.1 模型建立

基于将军山隧道Ⅲ、Ⅳ级围岩节理发育特征,采用 UDEC 离散元软件建模。模型尺寸为:洞室左右各取 $2.5D$ (D 为洞径),下边界至洞底取 $1.5D$ (试算发现下边界范围对结果影响不大,考虑到上部岩体为主要研究区域及计算效率问题,下边界取 $1.5D$),上边界延伸至地表,至洞顶高度约 $3.0D$ (深埋隧道)。边界条件为左右边界水平约束、下边界垂直约束、上边界为自由边界。块体和节理均服从 M-C 破坏准则。计算模型见图 4。

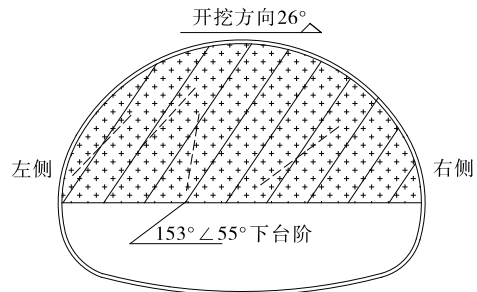


图2 将军山隧道地质素描



图3 将军山隧道掌子面

表2 将军山隧道Ⅲ、Ⅳ级围岩断面优势节理面空间参数分布

围岩级别	倾角正态拟合分布参数		倾向正态拟合分布参数		迹长正态拟合分布参数		间距正态拟合分布参数	
	$\theta/(^\circ)$	$\sigma_\theta/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	$\sigma_\theta/(^\circ)$	L/m	L_A/m	D/m	D_A/m
Ⅲ	50	7.8	147	9.6	2.96	1.23	0.93	0.35
Ⅳ	55	8.0	153	6.9	3.02	1.73	0.89	0.36

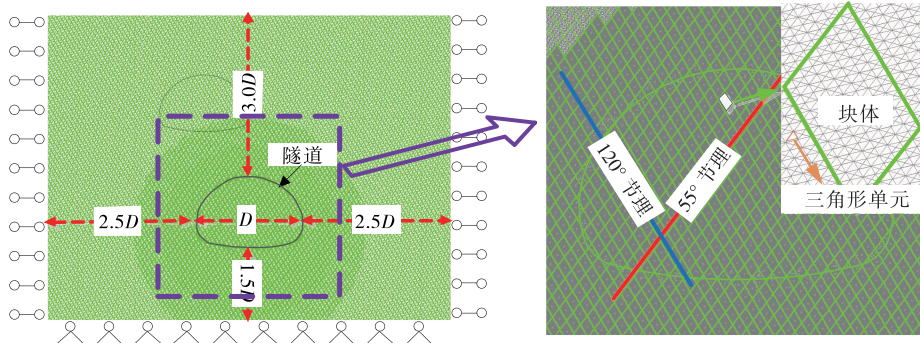


图4 将军山隧道计算模型

2.2 参数选取

块体和节理力学参数按 JTG D70-2011《公路

隧道设计细则》给定参数取值范围的均值选取(见表 3、表 4)。

表 3 块体物理力学参数

围岩级别	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	剪胀角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
Ⅲ	9.85×10^9	5.07×10^9	2 400	1.00	45	5	3.0
Ⅳ	3.57	1.37	2 150	0.45	33	0	1.5

表 4 节理物理力学参数

围岩级别	法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	粘聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	抗拉强度/MPa
Ⅲ	16.48	5.3	139	41.0	0
Ⅳ	3.30	1.2	87	34.5	0

2.3 计算结果与分析

























2.3.1 节理倾角

依据现场节理特征精细化描述,Ⅲ级围岩优势节理倾角为 50° ,呈贯通状,间距为 0.93 m;Ⅳ级围岩优势节理倾角为 55° ,呈贯通状,间距为 0.8 m。

通过设置优势节理组倾角不变,改变另一组节理(贯通)倾角,研究节理倾角对围岩稳定性的影响。不同节理倾角下隧道稳定性分区对比见表 5,围岩塌落面积见图 5。

从表5、图5可看出:1)隧道开挖后,块体塌落

表 5 不同节理倾角组合下节理张开区、剪切滑移区对比

节理倾角/ $^{\circ}$	Ⅲ级围岩稳定性分区对比			Ⅳ级围岩稳定性分区对比		
	块体塌落区	节理张开区	节理剪切滑移区	块体塌落区	节理张开区	节理剪切滑移区
0						
90						
120						
150						

区分布在两组节理倾角与隧道轮廓相切形成的三角区;节理剪切滑移区、张开区由拱腰延伸到拱脚、拱肩,在拱肩、拱脚向围岩深部发展,呈蝶形分布;剪切滑移区范围>张开区范围>块体塌落区范围。2)节理倾角组合相同时,Ⅲ级块体塌落区、节理张开区和剪切滑移区范围小于Ⅳ级围岩。3)随着第二组

节理倾角的增大,块体塌落区、节理张开区和剪切滑移区范围先增大后减小。

2.3.2 节理间距

第二组节理倾角为 120° 时,设置优势节理间距不变,改变第二组节理间距,研究节理间距对围岩稳定性的影响。不同节理间距下隧道稳定性分区对比

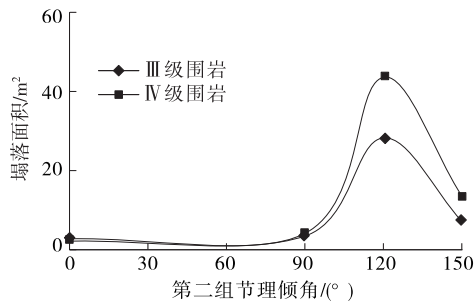


图5 不同节理倾角下围岩塌落面积

见表6,围岩塌落面积见图6。

从表6、图6可看出:1)同等围岩级别下,随节理间距增大,块体塌落区范围逐渐减小,表现为三角区宽度、高度减小;节理张开区、剪切滑移区分布范围逐渐减小,表现为蝶形区延伸长度减小。2)相同节理间距下,IV级围岩块体塌落区、节理张开区和剪切滑移区范围大于III级围岩。

2.3.3 节理岩体失稳机理

隧道开挖打破了原有应力平衡,临空面岩体由

表6 不同节理间距下节理张开区、剪切滑移区对比

III级围岩稳定性分区对比				IV级围岩稳定性分区对比			
节理间距/m	块体塌落区	节理张开区	节理剪切滑移区	节理间距/m	块体塌落区	节理张开区	节理剪切滑移区
0.8				0.4			
1.0				0.6			
1.2				0.8			

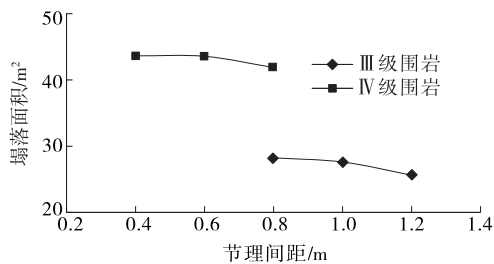


图6 不同节理间距下围岩塌落面积

三向应力状态转换为二向应力状态,应力向围岩深部转移,使浅部岩体应力下降,导致节理面法向应力降低(见图7),进而使节理面之间的摩擦阻力(抗滑力)降低。当重力作用下块体沿节理面的下滑力大于节理面抗滑力时,块体沿节理面发生剪切滑移,节理逐渐张开,张开继续发展,最终导致块体产生脱落,围岩失稳。

节理岩体失稳机理可归纳为开挖应力平衡打破—应力降低区出现—节理面剪切滑移—节理面张开—块体塌落,验证了节理剪切区范围>节理张开

区范围>块体塌落区范围,与计算结果吻合。

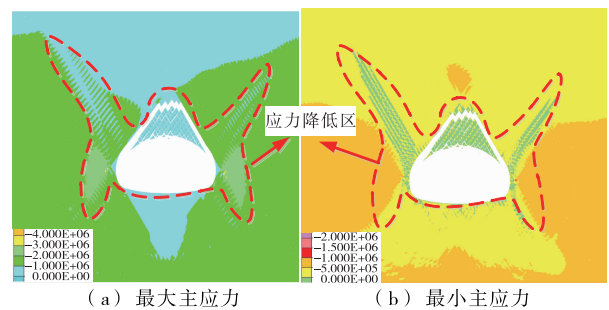


图7 围岩主应力云图(第二组节理倾角为120°)

围岩塌落区内松散岩块发生脱落,可直观表征围岩失稳模式;节理张开区内节理面之间法向应力、法向力均为零,即岩块处于脱落临界状态,属潜在塌落区域;开挖引起节理面间发生相对剪切滑移,形成塌落和张开潜在区域,为围岩失稳、发生破坏前存在的共有形态,是围岩发生渐进性破坏的主要原因。

应力降低区分布模式与节理倾角相关,应力降

低区分布范围与节理间距、围岩级别相关,验证了数值计算中节理特征与节理剪切滑移区、节理张开区、块体塌落区的对应关系。

3 节理岩体隧道锚杆支护机理

3.1 全长粘结式锚杆受力模式

3.1.1 全长粘结式锚杆作用原理

采用先灌后锚方法,运用风动灌浆器向锚杆孔内灌入早强水泥砂浆,然后插入锚杆杆体使之与围岩粘结在一起,让杆体牵制围岩的变形,达到增强围岩稳定性和减少围岩变形的目的(见图 8)。

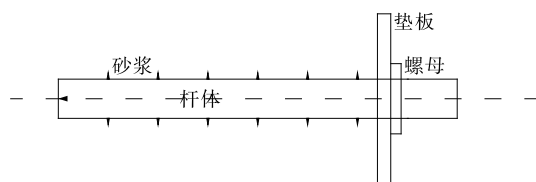


图 8 全长粘结式砂浆锚杆支护示意图
(第二组节理倾角为 120°)

3.1.2 全长粘结式锚杆受力模式

开挖后围岩应力大于围岩强度时,隧道周边围岩发生破坏并向深部转移,靠近隧道表面的锚杆因阻止破裂岩体径向变形其表面产生指向围岩自由面的剪应力,另一段锚杆因受到拉拔作用其表面剪应力指向岩体内部,指向相反的分界点,该点剪应力为零(称为中性点),而轴向力最大(见图 9)。

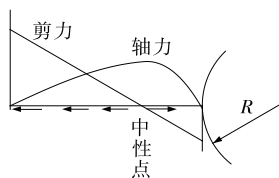


图 9 全长粘结式锚杆受力示意图(第二组节理倾角为 120°)

3.2 围岩节理面的锚杆作用机制

根据前面的分析,节理剪切滑移区为形成节理张开区、块体塌落区的潜在区域,是围岩发生渐进性破坏的主要原因。因此,针对节理岩体稳定性控制的主要目的是减少节理面的剪切滑移,从根源上杜绝围岩失稳发生。

节理岩体沿围岩节理面发生滑移主要是由于层面抗滑阻力不足以抵抗下滑力。设置锚杆,可增强薄弱层面的抗剪性能,制止或延缓层间错动。主要表现在:1)当岩层沿节理面剪切位移时发生剪胀扩容,锚杆拉伸,对节理面施加法向应力,增加节理面

的摩擦阻力;2)当锚杆与滑动方向成锐角时,锚杆轴力直接分解部分抗滑力;3)借助杆体本身的抗剪能力限制节理面的相对错动,即“销钉”作用。

3.3 节理岩体锚杆支护设计建议

(1) 锚杆长度不能太短,需穿过松动圈,端部宜锚固在弹性区内,当松动圈范围过大端部无法触及弹性区时,也可布置在相对完整的塑性区内。

(2) 锚杆布设范围不能过小,重点覆盖两组节理与隧道相切形成的三角区和拱肩—拱脚延伸形成的蝶形区。

(3) 锚杆打设角度应根据关键节理倾角确定,尽量与节理面垂直打设。

(4) 锚杆间排距应根据围岩节理发育程度确定,节理越发育,锚杆间排距应适当减小,关键失稳区域锚杆应加密。

总之,应确保锚杆能处于一定受力状态,且锚杆整体受力相对较合理(锚杆轴力峰值尽量出现在锚杆中部,不能出现在锚杆两端部),切实有效地对节理面起到抗剪阻滑作用,实现节理岩体隧道围岩稳定性控制。

4 结论

(1) 围岩塌落区可直观表征围岩失稳模式,主要分布在两组节理倾角与隧道相切形成的三角区;节理张开区处于脱落临界状态,属于潜在塌落区域;剪切滑移区为形成塌落和张开潜在区域,由拱腰延伸到拱脚、拱肩,在拱脚、拱肩向围岩深部发展,呈蝶形分布。

(2) 节理岩体失稳机理可归纳为开挖应力平衡打破—应力降低区出现—节理面剪切滑移—节理面张开—块体塌落。

(3) 节理岩体锚杆作用机制为:对节理面施加法向应力,增加节理面摩擦阻力;锚杆轴力分解为部分抗滑力;借助杆体的抗剪能力限制节理面的相对错动。

参考文献:

- [1] 陈高奎,刘成禹,张哲凌,等.节理岩体隧道破坏机理分析[J].土工基础,2013,27(3).
- [2] 高峰,唐星,李星,等.基于 UDEC 离散元法的隧道塌方特征分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(1).

应根据施工计划重新设计计划施工循环时间,并合理调整资源配置。

(2) 围岩过于坚硬会给施工带来很大困难,将导致开挖初次爆破不能达到计划效果,需增加补炮工序,造成工序接替混乱并引起时间增加。应合理调整爆破方案,提高初次爆破效果,尽量避免补炮。

(3) 在造成施工误时的各因素中,非人为因素所占比例远大于人为因素。非人为因素主要为外界因素,可通过具体分析,采取协调等多种手段降低外界因素的干扰程度。人为因素主要为设备管理,可通过加强施工管理降低或消除其影响。

参考文献:

- [1] 李有兵.长大隧道机械化配套安全快速施工技术[J].现代隧道技术,2012,49(5).
- [2] 方勇,符亚鹏,杨志浩,等.公路隧道下穿煤层采空区开挖过程相似模型试验[J].土木工程学报,2015,48(2).
- [3] 董兆昆.乌鞘岭特长隧道快速施工管理研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- [4] 方勇,符亚鹏,周超月,等.公路隧道下穿双层采空区开挖

过程模型试验[J].岩石力学与工程学报,2014,33(11).

- [5] 张金夫.东秦岭隧道快速施工技术[D].成都:西南交通大学,2007.
- [6] 张燕婷.复杂条件下超长隧道快速施工技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2013.
- [7] 梁胜国.长大隧道快速施工综合技术探讨[J].科技传播,2010(21).
- [8] 陈炳祥,易国华.长大隧道快速施工管理技术应用研究[J].铁道工程学报,2004(3).
- [9] 崔戈,方勇,徐晨,等.公路隧道下穿3层采空区施工模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(增刊2).
- [10] 蒋肃.大别山隧道快速施工技术及其问题探讨[J].铁道工程学报,2009,26(11).
- [11] 李自强,于丽,王明年,等.深埋硬岩特长隧道快速掘进技术研究[J].隧道建设,2015,35(3).
- [12] 方勇,何川.全长粘结式锚杆与隧道围岩相互作用研究[J].工程力学,2007,24(6).
- [13] 黄成俊.秦岭终南山特长公路隧道钻爆法快速施工技术探讨[D].成都:西南交通大学,2003.

收稿日期:2018-01-15

(上接第173页)

- [3] 赵景彭.节理倾向对层状岩体大断面隧道稳定性研究[J].铁道建筑,2011(9).
- [4] 王余岩.节理岩体中大跨度隧道的离散元法分析[D].重庆:重庆大学,2014.
- [5] 索超峰,石益东,李军.节理特征对破碎围岩稳定性影响的模型试验[J].公路交通科技,2013,30(4).
- [6] 王永甫,唐晓松,郑颖人,等.岩体节理对隧道开挖稳定性影响的数值分析[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2).
- [7] 彭双喜.节理岩体隧道的稳定性分析及破坏机理[J].公路工程,2014,39(5).
- [8] 张志强,何本国,关宝树.节理岩体隧道围岩稳定性判定指标合理性研究[J].现代隧道技术,2012,49(1).
- [9] JTG C20-2011,公路工程地质勘察规范[S].

- [10] JTG D70-2010,公路隧道设计细则[S].
- [11] 姚杨.基于现场监控量测的隧道围岩稳定性分析[J].公路与汽运,2017(1).
- [12] 凌同华,李毅,欧阳磊,等.底部隐伏溶洞隧道施工阶段围岩稳定性分析[J].公路与汽运,2017(4).
- [13] 叶英.岩溶隧道施工超前地质预报方法研究[D].北京:北京交通大学,2006.
- [14] 邓超,郑卫华,吴琼,等.锚杆锚固质量检测试验研究及应用[J].公路与汽运,2018(2).
- [15] 姚杨.基于现场监控量测的隧道围岩稳定性分析[J].公路与汽运,2017(1).
- [16] 刘江昊.岩溶隧道围岩节理分布特征对围岩变形影响研究[D].成都:成都理工大学,2014.

收稿日期:2017-11-25

(上接第183页)

- 制办法[S].
- [4] JTG/T B06-02-2007,公路工程预算定额[S].
- [5] JTG/T B06-03-2007,公路工程机械台班费用定额[S].
- [6] DB 43/T 858-03-2014,公路养护工程预算编制办法及定额[S].

- [7] 刘哲.高速公路养护预算定额编制及原始数据分析研究[D].西安:长安大学,2012.
- [8] 李冠平.《公路养护工程预算定额》测算与分析[J].湖南交通科技,2005,31(1).

收稿日期:2017-12-28