

节理岩体中交通工程支护结构力学特征分析

王卫平

中铁一局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 063004

[摘要] 为了实现节理岩体中交通工程支护结构力学行为特征分析, 采用数值模拟的方法, 对风险较高的地铁隧道暗挖施工过程中超前支护结构的实际作用效果进行了计算与分析。研究过程中, 首先根据工程设计图纸建立了全尺寸数值计算模型, 然后根据工程现场的 CRD 开挖方式, 进行了虚拟开挖模拟, 根据计算结果对比分析了不同支护条件下工程施工后的竖向位移云图及塑性区分布图, 验证了遍布节理岩体环境中隧道支护结构的支护效果。在此过程中, 提出了超前支护措施的模拟方法及其主要施工参数设计方法, 为类似的节理岩体环境中地铁隧道等交通工程建设的相关研究提供了参考。

[关键词] 节理岩体; 交通工程; 支护结构; 有效性分析

DOI: 10.33142/aem.v5i2.7902

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

Mechanical Characteristics Analysis of Supporting Structure of Traffic Engineering in Jointed Rock Mass

WANG Weiping

China Railway First Group Second Engineering Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063004, China

Abstract: In order to realize the analysis of the mechanical behavior characteristics of traffic engineering support structure in jointed rock mass, the numerical simulation method is adopted to calculate and analyze the actual effect of the over-front support structure during the construction of metro tunnel with high risk. In the process of research, the full-size numerical calculation model is established according to the engineering design drawings, and then the virtual excavation simulation is carried out according to the CRD excavation method at the project site. According to the calculation results, the vertical displacement nephogram and plastic zone distribution map after the project construction under different support conditions are compared and analyzed, and the support effect of the tunnel support structure in the environment of jointed rock mass is verified. In this process, the simulation method of advanced support measures and the design method of its main construction parameters are proposed, which provides a reference for the relevant research of subway tunnel and other traffic engineering construction in similar jointed rock environment.

Keywords: jointed rock mass; traffic engineering; support structure; effectiveness analysis

引言

相对于完整的岩体环境, 在节理岩体中进行交通工程建设时, 工程支护结构的作用机理及其力学行为特征更加复杂。因此近年来关于节理岩体的研究被广泛关注。既有研究取得了有益的效果, 但是研究成果多针对于明挖工程或者地上工程, 地下岩土工程建设的风险显然更高, 例如地铁等交通工程建设过程中, 其隧道支护结构在节理岩体环境中的力学行为特征是支护结构有效性直接反应。本文在既有研究成果的基础上, 采用数值计算方法, 基于离散元本构模型分析了采用 CRD 法进行开挖施工隧道的支护结构力学行为特征, 为类似工程建设的稳定性分析提供了参考。

2 数值计算模型建立

选取某隧道的间典型区段, 该区段隧道洞身经过围岩等级为 VI 级围岩, 此段岩体较为破碎, 岩体完整性差, 节理裂隙发育。根据工程实况, 利用 Phase 软件建立石劳区间隧道有限元模型, 隧道模型尺寸来源于工程设计图纸, 下边界取 3 倍车站跨度, 模型左右边界取车站跨度 3 倍以上, 边界竖直向上取至地表, 整体模型尺寸为 67.6 ×

68.6m, 尺寸比例按照地质勘察报告给出的数据进行模拟, 其中模型共有六层土层, 第一层为素填土, 第二层为粉质黏土, 第三层为碎石, 第四层为全风化板岩, 第五层为强风化板岩, 第六层为中风化板岩。围岩采用摩尔库伦准则, 板岩节理采用 Barton-Bandis 模型, 模型围岩参数如表 1 所示, 整体模型图如图 1 所示。CRD 法开挖步骤如图 2 所示。

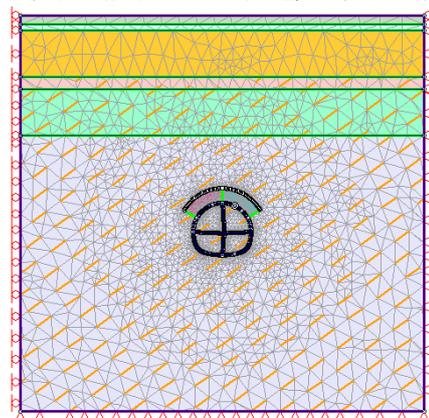


图 1 数值计算模型图

表 1 基本围岩力学参数

围岩	E/MPa	μ	$\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi /(^{\circ})$
素填土	8	0.4	17	10	15
粉质黏土	20	0.35	20.4	17.4	44.9
碎石	30	0.28	21.5	8	30
全风化板岩	100	0.35	19	30	18
强风化板岩	300	0.27	22	60	30
中风化板岩	600	0.23	26.9	170	38

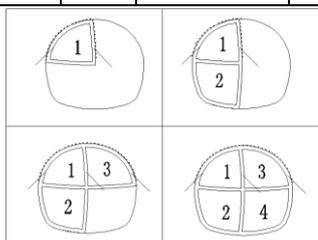


图 2 CRD 法开挖步骤

3 隧道施工顺序及计算参数

隧道开挖前,先对围岩进行超前小导管注浆加固,然后按图 2 方式进行挖掘,第 1 部分开挖后立即安装钢筋网片,钢拱架和喷射混凝土,第 2、3、4 部分依次进行。具体施工步序为:第 S0 步(原始状态)、第 S11 步(超前小导管注浆加固)、第 S12 步(左上部开挖)、第 S13 步(安装钢筋网片)、第 S14 步(设立钢拱架并达到喷射混凝土厚度);第 S21 步(左下部开挖)、第 S22 步(安装钢筋网片)、第 S23 步(设立钢拱架并达到喷射混凝土厚度);第 S31 步(超前小导管注浆加固)、第 S32 步(右上部开挖)、第 S33 步(安装钢筋网片)、第 S34 步(设立钢拱架并达到喷射混凝土厚度);第 S41 步(右下部开挖)、第 S42 步(安装钢筋网片)、第 S43 步(设立钢拱架并达到喷射混凝土厚度)。上述为隧道开挖和初期支护流程,其中数值分析过程中将钢筋网与钢拱架做为两层加强混凝土结构依次安装,两层混凝土结构厚度为喷射混凝土总厚度。节理计算参数如表 2 所示。喷射混凝土计算参数如表 3 所示。

表 2 节理强度参数

滑动准则	JCS/MPa	JRC/($^{\circ}$)	$\Phi /(^{\circ})$	法向刚度 $K_n /(\text{MPa}/\text{m})$	切向刚度 $K_s /(\text{MPa}/\text{m})$
Barton-Bandis	50	10	25	12000	10000

表 3 初衬参数

类型	厚度(m)	弹性模量 (MPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)
钢筋网片+混凝土	0.08	25000	0.2	1	15
钢拱架+混凝土	0.3	28000	0.2	2	20

4 超前支护

4.1 小导管超前支护

本研究中,石劳区间采用的超前支护方式为小导管注

浆支护。超前支护就是在隧道开挖之前,根据工程所处环境等情况,选择较为妥当的施工方式加固地层,确保围岩不塌方、不沉陷,保证隧道掘进过程中掌子面稳定。实践表明超前支护体系能够有效地限制地面沉降,并全面地保持自然地层在稳定状态下开挖隧道。

超前小导管注浆支护技术,是在隧道开挖面掘进之前,先用喷射混凝土将开挖面和一定范围内的坑道进行封闭,然后沿着坑道周边打入带孔的纵向小导管,由上而下的向小导管内压浆,浆液即有导管渗透到地层中,待浆液硬化后,即在坑道周围形成一个加固圈,在此圈防护下即可进行安全的开挖。

在隧道开挖之后,一方面,超前小导管在开挖之前插入围岩中,会起到支撑梁和锚杆的作用,能抑制隧道的变形;另一方面,小导管注浆改变了岩体的力学参数,主要 E、 μ 、C、 ϕ 值的变化,使 E、C、 ϕ 值提高, μ 值减小,这样就提高了围岩本身的自稳能力。通过这两方面的作用,使得隧道在开挖时,围岩塑性区出现的时间得到延缓并使围岩的塑性区减小。

4.2 小导管注浆等效模拟

对石劳区间典型断面进行超前小导管注浆,根据工程所提供信息,小导管直径为 $\Phi 42\text{mm}$,壁厚 3.25mm,长 3.5m,环向布置间距为 0.3m。布置范围为隧道上方 120° 范围。超前支护参数如表 4 所示。

超前小导管注浆后,改变了岩体的力学参数,本研究主要把小导管注浆后小导管和浆液对岩体的加固作用等效为岩体力学参数的改变。主要是将土体与浆液等效为浆土体后,再将小导管与浆土体等效,等效方法采用均一化原理,将导管作用平均等效到浆土体的力学参数上。小导管本身对围岩参数 C、 ϕ 、E 的影响可按以下公式计算:

$$\phi^* = \phi^0 C^* = C^0 + \frac{0.6R_t A}{e \cdot i} \quad (1)$$

$$E^* = E^0 \left(1 + \frac{A}{e \cdot i} \right) \quad (2)$$

式中, R_t 为抗拉强度设计值,A 为导管的截面积,e,i 为导管群的纵横间距。假设浆土体与小导管牢固的粘接在一起,引入变形与平衡条件,从而推出浆土体与导管的等效本构方程:

$$\sigma^{eq} = D^{eq} \varepsilon^{eq} \quad D^{eq} = \left(\eta^1 D^1 N^1 + D^2 \{ I - \eta^1 N^1 \} \right) \quad (3)$$

式中,I 为单位矩阵,上标 eq 表示等效, D^{eq} 为局部坐标系下的等效本构矩阵。变换为

整体坐标系下的等式:

$$\sigma = \bar{D}^{eq} \varepsilon \quad \bar{D}^{eq} = T^{-1} D^{eq} T \quad (4)$$

T, T-1 为坐标转换矩阵及其逆矩阵。

综上可确定,使用小导管加固后的参数及岩体参数如表 5 所示。

表 4 超前支护参数

材料	E/GPa	μ	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi / (^{\circ})$
小导管	200	0.3	7800	-	-
浆液	3	0.3	2400	25	35

表 5 加固后岩体力学参数

类型	E/MPa	μ	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi / (^{\circ})$
中风化板岩	600	0.23	26.9	170	38
小导管+注浆加固区	1800	0.2	27.5	343	41

4.3 超前小导管主要参数设计

(1) 超前小导管外插角度

根据计算和试验确定注浆半径后,可由下式确定小导管的外插角大小:

$$\alpha = \arcsin(r/L) \quad (5)$$

式中: α 为小导管外插角($^{\circ}$); r 为注浆半径(m); L 为小导管长度(m)。

从式(5)可以看到,小导管的外插角跟小导管的长度和注浆半径有直接联系,因此小导管外插角一般在确定其长度和注浆半径之后确定。

(2) 导管布置范围

根据勘察资料,本研究主要选取隧道上方注浆加固布置范围为 120° 。

(3) 导管布置间距

在进行围岩预加固施工时,若岩体非常破碎,比如碎石土,砂卵石层,则采用密排的原则,取 $2d$ (d 为小导管的直径),在断裂破碎带地段取 30cm 左右。间距太大时,小导管的棚架作用很难体现,但在现场必须考虑其施做的可能性。

超前小导管及超前管棚的间距的确定只需要满足每组导管之间的围岩稳定即可。每组导管之间的荷载确定按照土体破坏准则确定。

(4) 小导管直径

根据小导管注浆技术特点,为满足施工现场的要求,小导管的直径一般在 $\Phi=32\sim 60\text{mm}$ 范围内。管径太小,一方面刚度达不到要求,一方面不能发挥浆液通道作用,此时可考虑采用地层注浆法;当管径达到 60mm 仍不能满足要求时,应考虑采取超前管棚工艺进行超前支护设计施工。本研究选取导管直径为 42mm 。

(5) 小导管长度。

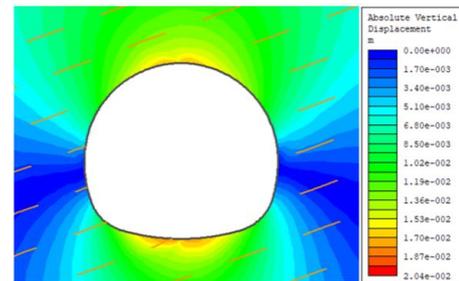
小导管的长度一般为 $2\sim 6\text{m}$ 之间,太短起不到有效的支撑作用,太长则容易造成浪费。一般来讲,小导管的长度会根据开挖方式和围岩条件综合确定。本研究选取小导管长度为 2.5m 。

5 模拟结果分析

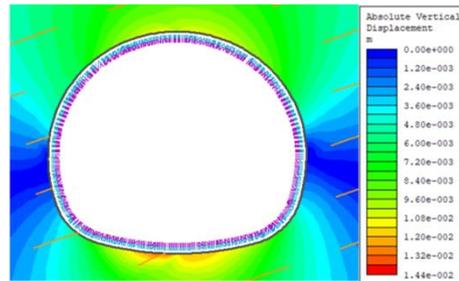
根据工程实际,并模拟开挖过程,分别对毛洞开挖、初期支护、小导管超前支护加初期支护三种方式进行比较其位移和塑性区,结果如 3、图 4 所示。

从图 3 中可以看出,毛洞开挖后,竖向沉降位移达到 17mm ,初期支护后拱顶沉降位移为 12.56mm ,初期支护加超前加固后沉降位移为 7.8mm ,三种加固方式对比可以看出,超前加固后,隧道沉降位移明显降低,说明超前加固对提升隧道围岩稳定性有很大作用。

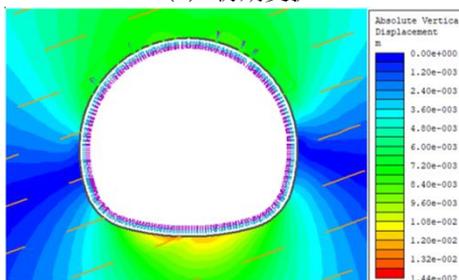
从图 4 可以看出,毛洞开挖后,屈服单元所占百分比为 26% ,初期支护后屈服区所占百分比为 25% ,初期支护加超前加固后,屈服区所占百分比为 21% ,从三种加固方式可以看出,超前加固后塑性区明显减弱,证明超前加固额能够明显的提升隧道围岩的稳定性。



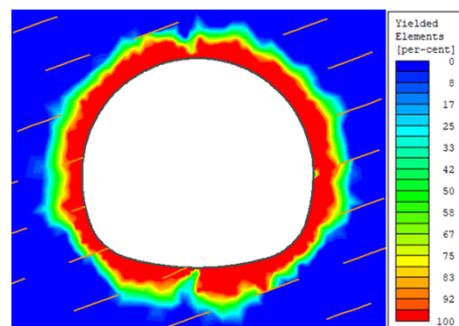
(a) 毛洞开挖



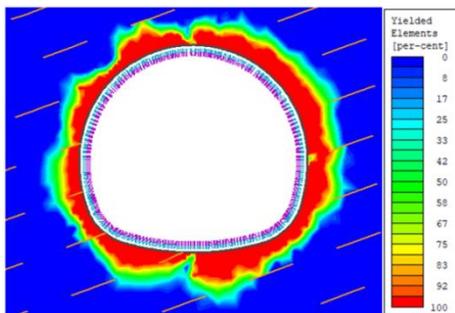
(b) 初期支护



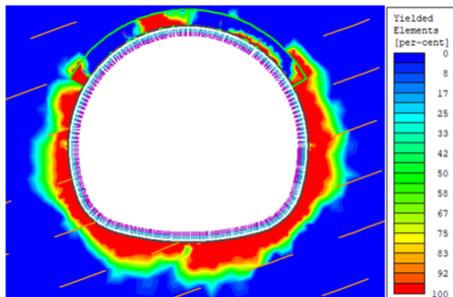
(c) 初期支护加超前加固

图 3 不同支护方式竖向位移云图


(a) 毛洞开挖



(b) 初期支护



(c) 初期支护加超前加固
图4 不同支护方式塑性区云图

6 结论

本文研究根据工程设计图纸建立了全尺寸数值计算模型,然后根据工程现场的CRD开挖方式,进行了虚拟开挖模拟,根据计算结果对比分析了不同支护条件下工程施工后的竖向位移云图及塑性区分布图,验证了遍布节理岩体环境中隧道支护结构的支护效果。在此过程中,提出了超前支护措施的模拟方法及其主要施工参数设计方法,为类似的节理岩体环境中地铁隧道等交通工程建设的相关研究提供了参考。

[参考文献]

[1] 赵俊峰. 基于 TSP 超前地质预报与监控量测信息的隧

道围岩亚级分级方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

[2] 周宗青, 李术才, 李利平, 路为, 石少帅. 围岩超前优化分级的属性识别模型及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1611-1619.

[3] 耿耘. 地下工程围岩变形的支持向量机预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[4] 赵洪波. 支持向量机在隧道围岩变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 24(4): 649-652.

[5] 赵洪波. 基于进化支持向量机的滑动面参数识别[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 541-544.

[6] 赵洪波. 基于 GA 与 SVM 的最危险滑动面识别[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2011-2014.

[7] 姜谟男. 基于 POS-SVM 非线性时序模型的隧洞围岩变形预报[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1176-1180.

[8] 贺鹏, 李术才, 李利平, 张乾青, 许振浩. 基于数据挖掘的隧道围岩变形响应预测与动态变更许可机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(43): 87.

[9] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 聂利超, 钟世航, 苏茂鑫, 李貅, 许振浩. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.

[10] 赵帮轩. 隧道施工阶段围岩快速分级方法研究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2016, 16(4): 82-83.

[11] 张浪. 公路隧道设计规范[M]. 重庆: 人民交通出版社, 重庆交通科研设计院主编, 2004.

[12] 何延兵, 刘辉. 红层蠕变特性及隧道围岩位移 PSO-SVM 预测研究[J]. 公路工程, 2016, 41(2): 75-79.

作者简介: 王卫平(1983.7-), 男, 工程师, 主要从事交通岩土建设管理及其稳定性分析研究。