不同 TBM 掘进速率下洞室围岩开挖扰动区研究

冷先伦,盛 谦,朱泽奇,张勇慧

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071)

摘要: 在不同卸荷速率下三轴加卸载室内试验成果的基础上,以 Hoek-Brown 经验强度准则为依据,拟合出在不同卸荷速率下板岩的力学参数(黏聚力和内摩擦角)。在分析 TBM 掘进特点的基础上,提出能反映其特点的数值模拟方法,并在 FLAC^{3D} 程序中引入加卸载准则,对不同掘进速率下隧洞围岩的开挖扰动效应进行数值模拟研究。 结果显示: 掘进速率越快,围岩开挖扰动效应越小,围岩越稳定;隧洞围岩在开挖后变形较为均匀;在隧洞的径向,位移和应力变化较为明显的呈现为 3 个区域,即强变化区、弱变化区和平稳区;最大主应力随着洞径方向逐渐由单向应力状态向二向应力状态和三向应力状态转变,第二偏应力不变量在隧洞轴向方向形成一闭合的应力集中区域,称为"应力墙",该区域在 TBM 掘进过程中对刀头切割岩体达到破岩的效果极为有利;隧洞围岩开挖扰动区随 TBM 掘进速率变化较大,当掘进速率增加一倍后,其扰动区由 1.1 m 降低到 0.4 m,减小了 64%。 关键词: 岩石力学;开挖扰动区;TBM 掘进速率;TBM 模拟方法;加卸载准则;三轴加卸载试验 中图分类号: TU 45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 2 - 3692 - 07

STUDY ON EXCAVATION DISTURBED ZONE IN SURROUNDING ROCK OF TUNNEL WITH VARIOUS TBM DRIVING RATES

LENG Xianlun, SHENG Qian, ZHU Zeqi, ZHANG Yonghui

(State Key Laboratory of Soil Mechanics and Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: On the basis of results of the loading and unloading triaxial tests with various unloading rates, Hoek-Brown empirical strength criteria is used to fit slate mechanical parameters including cohesion and friction angle. The numerical simulation method of the TBM driving process is put forward by studying driving characteristics of TBM. The FLAC^{3D} program, which contains loading and unloading criteria, is adopted to analyze the excavation disturbed zone and stability in surrounding rock of tunnel with various TBM driving rates. The results show that when driving rate is greater, the excavation disturbed zone in surrounding rock is smaller, and the surrounding rock is more stable; the deformations of surrounding rock are uniformly distributed after excavation including strongly varied zone, weakly varied zone and stable zone; along the tunnel radial direction, the maximum principal stress gradually changes from uniaxial to biaxial and triaxial, and the second deviatoric stress invariant forms a closed stress concentration zone which is called "stress dike", which is helpful to rock breaking; the excavation disturbed zone of tunnel varies with TBM driving rates. When the speed increases 100%, the excavation disturbed zone decreases 64%, from 1.1 m to 0.4 m.

Key words: rock mechanics; excavation disturbed zone; TBM driving rate; numerical simulation method of TBM driving; loading and unloading criteria; loading and unloading triaxial tests

收稿日期: 2009 - 05 - 20; 修回日期: 2009 - 07 - 06

基金项目: 国家科技支撑计划课题子题(2006BAB04A06); 院方向性项目(KZCX2 - YW - 109 - 3)

作者简介:冷先伦(1980-),男,博士,2009年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位,现任助理研究员,主要从事岩石力学洞 室稳定性研究方面的工作。E-mail: lengxianlunl@tom.com

1 引 言

随着 TBM 隧洞掘进机在国内外的广泛使用, 国内外众多学者专家对深埋长隧道全断面掘进过程 中产生的相关问题和技术难点进行了专门研究。如: 钱七虎院士对深埋长隧道全断面掘进机(TBM)在中 国地下工程中的应用做了系统的回顾,分析了此技 术应用中可能出现的问题及发展趋势,并对其在中 国的应用前景进行了展望^[1]; M. Sapigni 等^[2]应用岩 石力学分级的方法, 建立了 RMR 系统与 TBM 在隧 道掘进过程中速率的关系,建议通过较为详实的地 质勘测,建立较准确的 RMR 系统,确定掘进速率, 以保证围岩的稳定性; Q. M. Gong 等^[3]运用离散元 方法(UDEC),模拟了 TBM 在掘进时岩体破裂发展 形态及其和掘进速率的关系,深入解释了裂隙形成 和发展的3个阶段;黄润秋等^[4]分析研究了高地应 力、高地温、涌水、强震等深埋长隧道地质灾害问 题的发生机制和形成条件;何发亮等^[5]探讨了隧道掘 进机施工条件下隧洞围岩的分类方法。这些研究主 要集中在岩石分级方法对 TBM 掘进的影响,而针 对 TBM 掘进条件下,围岩开挖扰动的研究较少, 特别是在能反映 TBM 掘进特点及其不同掘进速率 的数值模拟分析研究方面。鉴于此,本文将在研究 TBM 掘进特点的基础上,提出能反映 TBM 掘进特 点的数值模拟方法;通过不同围压和不同卸荷速率 的室内三轴加卸载试验,找出板岩在不同卸荷速率 下的屈服后特性;以南水北调西线第一期工程为背 景^[6],应用加卸载判断准则,通过数值模拟方法研 究隧洞围岩在不同 TBM 掘进速率下的开挖扰动区 问题。

2 板岩力学特性研究

为了探索不同 TBM 掘进速率下洞室围岩的力 学特性,开展了不同围压、不同卸荷速率下的三轴 加卸载试验,试验在中国科学院武汉岩土力学研究 所 MTS815.03 型压力试验机上完成。

2.1 三轴加卸载试验研究

试样以约 0.5 MPa/s 的速率加载到预定围压值, 然后在轴向仍然以均 0.5 MPa/s 的速率加载到预定 轴压值,最后以给定的速率降低围压直到试样破坏, 在卸围压过程中以应力差为控制参数。在此共进行 了 8 次试验,试验方案如表 1 所示。图 1 为板岩在 围压为 24 MPa 和 40 MPa 时的轴向应力与围压关系 曲线。线 *a* 是施加围压到固定值,即围压 24 MPa; 线 *b* 是施加轴压达到固定的应力差,同时保持应力 值,其值为 166 MPa 时;线 *c* 是保持应力差不变降 低围压过程;线 *d* 是岩样的破坏过程。从图 1 可知, 板岩试样在卸荷过程中主要以脆性破坏为主;在不 同的卸荷速率下,试样破坏时的围压也不同,卸荷 速率越快,破坏时的围压越小。

表 1 试验方案 Table 1 Scheme of tests

		ruore r	benefite of tet		
试验 编号	围压 /MPa	偏应力 /MPa	卸载速率 /(MPa・s ¹)	破坏时 的轴压 /MPa	破坏时 的围压 /MPa
B1	24	166	0.5	193.3	18.6
B2	24	166	1.0	169.2	4.1
В3	24	166	2.0	167.0	2.4
B4	40	180	0.5	195.6	18.8
В5	40	180	1.0	192.2	12.2
B6	40	180	2.0	182.1	3.2
B7	32	175	0.5	178.5	5.1
B8	32	175	2.0	178.1	4.3



2.2 岩体力学参数研究

将表 1 中岩样按不同卸荷速率分类,并用 RocLab 程序(Hoek-Brown 经验强度准则)来拟合,得 到在 Mohr-Coulomb 准则下板岩在不同卸荷速率下 破坏时的岩体力学参数见表 2,其 Mohr-Coulomb 包络线见图 2。由拟合的岩体力学参数可知,在不 同卸荷速率下,岩体黏聚力和内摩擦角不同,直接 反映了破坏时的屈服面不同,从而对隧洞开挖后围 岩稳定的影响亦不相同。

表 2 岩体力学参数 Table 2 Mechanical parameters of rock

荷载形式	加卸载速率/(MPa•s ⁻¹)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
卸载	0.5	1.64	26.11
卸载	1.0	2.44	28.95
卸载	2.0	3.58	31.76
加载	0.5	3.16	40.68
32 30 28 26 24 22 20 18 16 14 14 12 10 8 6 4 4 20 0 0 2 4 最小主人	understanding (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10)	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	12 14 16 18 MPa



3 TBM 掘进下隧洞研究条件分析

3.1 加卸载准则选取

隧洞开挖是一个典型的卸载过程,采用传统的 加载条件下的模拟方法与开挖时产生的大面积卸载 条件不相符合,其计算结果与实际情况有较大出入, 在此本文将借鉴何江达等^[7]提出的加卸载判断准 则:

(1) 对于一般加卸载准则,在应力空间中,屈 服函数为

$$\varphi(\sigma_{ij}, \sigma_{ij}^{P}, k) = 0 \tag{1}$$

其加卸载状态判断为

$$d\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \begin{cases} <0 (卸载) \\ =0 (中性变载) \\ >0 (加载) \end{cases}$$
(2)

式(1),(2)中: σ_{ij} 为应力张量;k为与岩体抗剪强度 参数c, ϕ 有关的系数。

(2) 对于 Mohr-Coulomb 准则,该加卸载判断准 则为

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} d\sigma_1 + \frac{\partial f}{\partial \sigma_3} d\sigma_3 = 0.5(A_1 d\sigma_1 - A_3 d\sigma_3) \quad (3)$$

其中,

 $A_{1} = \cos \varphi - (1 - \sin \varphi) \tan \varphi$ $A_{3} = \cos \varphi + (1 + \sin \varphi) \tan \varphi$

3.2 TBM 掘进模拟方法研究

王敏强和陈胜宏^[8]以接触单元的方法来模拟盾 构机的掘进开挖过程,研究中通过单元的生死设置 和接触单元的向前滑移,即单元刚度的迁移法原理 来实现盾构机的掘进开挖。而 TBM 掘进破裂岩石 是靠安装在 TBM 刀盘上的刀具旋转来完成的,掘 进机掘进时,刀盘上的滚刀绕刀盘中心轴公转,并 绕自身轴线自转,滚刀切割岩石的同时,岩体表面 裂隙逐渐加深、扩大形成宏观裂纹,岩石成片被剥 落^[9,10]。因此,假设刀头是分布在多条刀盘直径上, 然后旋转刀头的位置来实现刀盘旋转掘进效果;在 此提出在刀头作用的区域内施加 3 个方向的速度来 模拟掘进过程,即轴向速度(Z 向)模拟刀盘的顶推作 用,X 向速度和 Y 向速度的矢量合成得到切向速度 (R 向)来模拟刀头的切割作用如图 3 所示,并假定岩 体在达到塑性剪切状态时认为岩体被开挖掉。



图 3 TBM 刀头布置图 Fig.3 Layout of TBM cutting head

3.3 数值模拟分析条件

在此将针对不同 TBM 掘进速率,对洞室围岩 开挖扰动区展开研究。选择南水北调西线第一期工 程泥曲河—杜柯河段的隧洞围岩为研究的对象,数 值模拟模型图见图 4, 材料参数见表 2, 按卸荷快 慢即掘进速率和不同本构关系共设计了4种研究方 案,见表3,表中的"1000开挖步"为FLAC^{3D}的 机械计算步,通过在一定计算步内 TBM 沿掌子面 方向的掘进深度来模拟 TBM 的掘进速率,并与室 内不同卸荷速率的三轴加卸载试验相对应,该对应 关系表现为定性对应。开挖模拟方法按节 3.2 中 TBM 掘进的数值模拟方法, 隧洞开挖半径为 3.6 m, 支护厚度为 0.5 m,每次掘进沿 Z 向延伸 0.5 m。模 型采用法向约束,施加埋深为600m的地应力场, $\sigma_{zz} = \rho gh$, 侧压力系数^[11]为: $k_x = 1.21$, $k_z = 1.06$, TBM 掘进5m深度,TBM 向前掘进1m 后支护洞 室围岩。模型本构选用 Mohr-Coulomb 弹塑性准则, 并将节 3.1 中的加卸载准则引入 FLAC^{3D} 程序的 Mohr-Coulomb 弹塑性准则中^[12],用两者共同来模 拟隧洞围岩在 TBM 掘进后的开挖扰动区,其流程 见图 5。



图 4 数值模拟模型图 Fig.4 Model of numerical simulation

表	3	研究方	ī案
Table 3	Re	esearch	schemes

研究方案	每开挖步轴向掘	每1000开挖步 TBM	荷载	加卸载速率
编号	进量/m	掘进速率/m	形式	/(MPa • s ⁻¹)
A1	0.5	0.25	加载	0.5
A2	0.5	0.25	卸载	0.5
A3	0.5	0.33	卸载	1.0
A4	0.5	0.50	卸载	2.0



图 5 数值模拟流程图 Fig.5 Flow chart of numerical simulation

4 TBM 掘进下隧洞研究结果分析

在此将通过对变形,应力和开挖扰动区的分析, 来研究在不同 TBM 掘进速度下,洞室围岩的开挖 扰动效应^[13, 14]。

4.1 变形分析

由图 6 可知,围岩变形在径向上较为明显的分为 3 个区域,即位移强变化区(范围约为 0.65 m)、位移弱变化区(范围约为 8 m)和位移平稳区;其位移 值大小表现为:方案 A2 计算的位移大于方案 A3 大于方案 A4 大于方案 A1,由此可知 TBM 掘进速 率越快,围岩变形越小,其开挖扰动也越小。由图 7 可知,围岩变形在洞室轴向方向的影响区域约为 2 m,随着 TBM 掘进深度的增加,变形也随之沿轴 线方向延伸。



4.2 应力分析

最大主应力在洞室径向较为明显的分为 3 个区 域分别为应力强扰动区、应力弱扰动区和应力未扰 动区;而最小主应力分为 2 个区域,即应力扰动区 和应力未扰动区。应力强扰动区域大小约为 0.8 m,



应力弱扰动区域大小约为6m,如图8所示。图9, 10分别为方案A3的X=0剖面第一主应力不变量 图和第二偏应力不变量图。由图9,10可知,第一 主应力不变量过渡较为平缓,仅在2个交角处出现 应力集中现象,说明隧洞掘进过程中,围岩变形总 体来说较为平稳;而第二偏应力不变量则出现较 为明显的集中带,且形成闭合的应力集中区域, 称之为应力墙,其应力值约为10 MPa,其大小约为 3.5 m,该区域的岩体容易达到塑性破坏,对 TBM 掘进较为有利,能帮助提高 TBM 的掘进效率。由



Fig.8 Axial principal stress curves of tunnel



Fig.9 The first principal stress invariant nephogram of section X = 0 (scheme A3)





图 11 可知,沿着洞室径向,围岩的应力由单向应力 向二向应力和三向应力逐渐过渡。



图 11 主应力椭球沿洞室径向变化图(方案 A3)

4.3 开挖扰动区分析

在此研究的开挖扰动区在形式上表现为岩体的 塑性区,在引入节 3.1 的加卸载判断准则后,得到 了考虑开挖卸荷效应的塑性区,在此将此塑性区称 为开挖扰动区。图 12 为开挖扰动区随掘进深度发



Fig.11 The tunnel radial variation of main stress ellipsoid (scheme A3)

展图(方案 A3)。由图 12 可知,开挖扰动区成圆台 形状,随着掘进深度的增加,圆台逐渐向环向扩展 和沿撑子面方向延伸,在撑子面方向延伸距离约为 1.5~2.0 m。图 13 为 TBM 掘进完成后 Z=0 剖面的 开挖扰动区图。由图 13 可知,方案 A2 计算的扰动 区大于方案 A3 大于方案 A4 大于方案 A1。说明 TBM 掘进过程中,掘进速率越快,围岩扰动区越小, 其开挖扰动效应也越小。图 14 为开挖扰动区大小柱 状图。由图 14 可知,当 TBM 掘进速率增加一倍后, 其扰动区由 1.1 m 降低到 0.4 m,减小了 64%。







5 结 论

本文以不同卸荷速率下的三轴加卸载室内试验

成果为基础,以 Hoek-Brown 经验强度准则为依据, 拟合出在不同卸荷速率下岩体的力学参数(黏聚力 和内摩擦角)。以 FLAC^{3D}程序为手段,并在程序中 引入加卸载准则判断标准,研究了在不同掘进速率 下隧洞围岩的开挖扰动特征,得到以下结论:

(1) TBM 掘进后,隧洞围岩变形在径向上较为 明显的分为3个区域,即位移强变化区、位移弱变 化区和位移平稳区,TBM 掘进速率越快,围岩变形 越小,其开挖扰动也越小;

(2) TBM 掘进后,隧洞围岩主应力在洞室径向 亦分为3个区域,即应力强扰动区、应力弱扰动区 和应力未扰动区,最大主应力方向沿着洞室径向逐 渐由单向应力状态向二向应力和三向应力转变;

(3) TBM 掘进后,隧洞位移和应力在洞室径向 的变化表现出开挖扰动效应的变化,即强变化区对 应围岩的开挖强扰动区,弱变化区对应围岩的开挖 弱扰动区,平稳区对应围岩的开挖未扰动区;

(4) TBM 掘进后,隧洞围岩的第二偏应力不变 量在隧洞轴向方向形成了一闭合的应力集中区域, 称为应力墙,该区域在 TBM 掘进过程中对刀头切 割岩体达到破岩的效果极为有利;

(5) TBM 掘进后,隧洞围岩开挖扰动区随 TBM 掘进速率变化较大,当掘进速率增加一倍后,其扰动区由 1.1 m 降低到 0.4 m,减小了 64%。

综上所述,TBM 掘进速率对隧洞围岩开挖扰动 效应影响明显,掘进速度越快,围岩开挖扰动效应 越小,洞室围岩越稳定。

参考文献(References):

- [1] 钱七虎,李朝甫,傅德明.全断面掘进机在中国地下工程中的应用现状及前景展望[J].建筑机械,2002,(5):28 35.(QIAN Qihu, LI Chaofu, FU Deming. Application situation and outlook of tbm in underground project in China[J]. Construction Machinery, 2002, (5): 28 35.(in Chinese))
- [2] SAPIGNIA M, BERTIB M, BETHAZC E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 771 – 788.
- [3] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(20): 183 - 191.

- [4] 黄润秋,王贤能,唐胜传,等.深埋长隧道工程开挖的主要地质 灾害问题研究[J].地质灾害与环境保护,1997,18(1):50-69.
 (HUANG Runqiu, WANG Xianneng, TANG Shengchuan, et al. Research on the main geological hazards of deep-lying long tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 18(1): 50-69.(in Chinese))
- [5] 何发亮,谷明成,王石春. TBM 施工隧道围岩分级方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1350-1354.(HE Faliang, GU Mingcheng, WANG Shichun. Study on surrounding rockmass classification of tunnel cut by TBM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9):1350-1354.(in Chinese))
- [6] 张 辉, 刘振红, 张绍民. 南水北调西线一期工程区主要断裂特 征及其工程地质问题[C]// 南水北调西线工程岩石力学与工程 地质探索. 北京: 科学出版社, 2007: 55 - 62.(ZHANG Hui, LIU Zhenhong, ZHANG Shaomin. Major fracture characteristics and engineering geological problems of project area in the South-to-North Water Transfer 1st project[C]// Exploration of Rock Mechanics and Engineering Geological in West Route of South-to-North Water Transfer Project. Beijing: Science Press, 2007: 55 - 62.(in Chinese))
- [7] 何江达,谢红强,范景伟,等. 卸荷岩体脆弹塑性模型在高边坡 开挖分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(7):1082-1086.(HE Jiangda, XIE Hongqiang, FAN Jingwei, et al. Brittle elastoplasticity model of rockmasses during unloading and its application to high slope excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1082-1086.(in Chinese))
- [8] 王敏强,陈胜宏.盾构推进隧道结构三维非线性有限元仿真[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2):228-232.(WANG Minqiang, CHEN Shenghong. Three-dimensional non-linear finite element simulation of tunnel structure for moving-forward shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 228-232.(in Chinese))

- [9] 朱齐平,潘存治. 全断面掘进机刀盘驱动转矩的确定[J]. 煤矿 机电,2006, (4): 33 - 37.(ZHU Qiping, PAN Cunzhi. The determination of tbm cutter head driving torque[J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology, 2006, (4): 33 - 37.(in Chinese))
- [10] 吕 强,傅德明. 土压平衡盾构掘进机刀盘扭矩模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增1):3137-3143.(LU Qiang, FU Deming. Research on torque of cutter head for earth pressure balance shield with simulating experimental[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3137-3143. (in Chinese))
- [11] 刘亚群,罗超文,李海波,等.南水北调西线工程区地应力测量及地应力场特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20): 3 620 - 3 624.(LIU Yaqun, LUO Chaowen, LI Haibo, et al. Study on in-situ stress measurements and characteristics of in-situ stress field in west route of south-to-north water transfer project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 620 - 3 624.(in Chinese))
- [12] Itasca Consulting Group, Inc.. Fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions(version 3.0), user's manual[R]. [S. l.]: Itasca Consulting Group, Inc., 2003.
- [13] 吉小明. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析[J]. 岩石力学与工程学 报, 2002, 24(10): 1 697 - 1 702.(JI Xiaoming. Study on mechanical and hydraulic behavior of tunnel surrounding rock masses in excavation-disturbed zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 24(10): 1 697 - 1 702.(in Chinese))
- [14] 刘振红,王学潮,王泉伟,等.南水北调西线工程隧洞围岩分类和变形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):3625-3628.
 (LIU Zhenhong, WANG Xuechao, WANG Quanwei, et al. Classification and deformation analysis of tunnel surrounding rock in West Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3625-3628.(in Chinese))