

文章编号:1000-582X(2011)02-136-06

适于全断面岩石掘进机的围岩分类方法

卢 瑾¹, 吴继敏², 廖小帆³

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京, 210098;
3. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都, 610061)

摘 要:为了研究影响全断面岩石掘进机(TBM)掘进速率的地质因素,利用三维离散元程序 3DEC 建立 TBM 滚刀破岩三维仿真模型,分析不同的地质条件对 TBM 掘进速率的影响,根据 TBM 在围岩中的可钻性对南水北调西线工程中的围岩进行分类。分析结果表明:TBM 掘进速率与岩石物理力学性质及岩体中的节理条件密切相关,在一定范围内,围岩强度越低,节理分布越密集,TBM 掘进速率越高;而围岩强度越高,节理间距越大,使得 TBM 掘进速率大大降低。

关键词:全断面岩石掘进机;围岩强度;节理;掘进速率;离散元;围岩分类

中图分类号:TU457

文献标志码:A

Rock classification method for tunnel boring machine

LU Jin¹, WU Ji-min², LIAO Xiao-fan³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, Sichuan, P. R. China;
2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, P. R. China;
3. Sichuan Electric Power Design and Consulting Co., LTD, Chengdu 610061, Sichuan, P. R. China)

Abstract: In order to study the geological factors which impact penetrating rate of tunnel boring machine (TBM), this paper uses three-dimensional discrete element model 3DEC to build simulated models on rock fragment by TBM cutter. It analyzes the influence of different geological conditions on TBM penetrating rate and classified the surrounding rock in west route of south-to-north transfer project according to the drill ability of TBM in surrounding rock. The results show that the penetrating rate of TBM is closely related to the mechanical properties of rock and joint conditions in rock mass. In certain extent, TBM penetrating rate will be increased with the decrease of rock strength or closely distributed joints. TBM penetrating rate will be decreased with the increase of rock strength or rarely distributed joint. Another result is that the surrounding rock by TBM penetrating can be divided into three classes based on the drill ability of TBM in surrounding rock, which can guide the TBM penetrating.

Key words: tunnel boring machine (TBM); rock strength; joint; penetrating rate; discrete element model; rock classification

近年来,由于全断面隧道掘进机(TBM)施工法具有速率快、对围岩扰动小、经济等优点,已被广泛应用于国内外长隧洞施工中,以下简称 TBM 法^[1-3]。围岩分类是 TBM 施工的基础,为快速、经

济、安全地完成掘进提供依据。目前应用较多的围岩分类方法有 Barton 的 Q 系统、Bieniawski 的 RMR 系统,《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287—99)中的 T 系统以及《工程岩体分级标

收稿日期:2010-09-21

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A06)

作者简介:卢瑾(1983-),女,博士,主要从事地下洞室及滑坡的研究,(E-mail)youha917@163.com。

准》(GB50281-94)的 BQ 分级等^[4-8]。这些分类方法都是针对钻爆法施工条件下隧洞围岩稳定性等级而划分的,难以满足 TBM 施工的需要,TBM 施工条件下应针对围岩的可钻性即 TBM 的掘进速率进行围岩分类,考虑影响 TBM 施工的各种地质因素。文中依据三维离散元程序 3DEC 建立 TBM 滚刀破岩三维仿真模型,寻找 TBM 掘进速率与隧洞围岩条件之间的关系,提出一种新的围岩分类方法。

1 影响 TBM 掘进速率的主要地质因素

影响 TBM 掘进速率的主要地质因素有岩石硬度、岩性条件和地质灾害 3 个方面,可表现为岩石的可钻性、边壁的稳定性、掌子面的稳定性和岩爆等^[9-13]。文中从岩石物理力学性质和岩体中节理面的分布两个方面来分析。

1.1 岩石物理力学性质

与 TBM 掘进速率相关的岩石物理力学参数可用岩石单轴抗压强度、弹性模量和泊松比几个指标来表示^[6,14-16]。影响刀具切入深度最重要的因素是岩石单轴压缩作用下的力学行为,旋转刀具必须施加一个大于岩石强度的应力才能有效地切入岩石,因此 TBM 掘进速率与岩石单轴抗压强度密切相关。在一定范围内,岩石单轴抗压强度越小,TBM 掘进速率越高;岩石单轴抗压强度越大,TBM 掘进速率越低,但是岩石单轴抗压强度太小时,围岩自稳能力下降,易造成坍塌,降低 TBM 的掘进速率。TBM 在坚硬耐磨岩石中掘进时,刀具磨损和刀圈消耗较快,严重影响 TBM 的掘进速率。因此,岩石硬度越低,TBM 掘进速率越高;岩石硬度越高,TBM 掘进速率越低,但当岩石硬度太低时,容易造成围岩失稳,反而会影 响 TBM 的掘进速率。

1.2 节理面的方向

岩体中节理面的方向对 TBM 掘进速率有一定的影响。从已有的工程经验得知,隧洞掘进方向与节理面的夹角越大,TBM 掘进速率越高;隧洞掘进方向与节理面的夹角越小,TBM 掘进速率会降低;而当隧洞掘进方向与节理面夹角过大时,在 TBM 掘进时岩体容易造成失稳,也会使 TBM 掘进速率大为降低。

1.3 节理面的间距

岩体中节理面的发育程度对 TBM 掘进速率也有着一定的影响^[17-20]。从已有的工程实践数据可知,岩体中节理分布越密集,TBM 掘进速率越高,岩体中节理的间距越大,TBM 掘进速率会越来越低,而当岩体中节理分布过于密集时,即节理的间距非常小时,TBM 在岩体中的掘进会造成岩体的失稳,

反而会使 TBM 掘进速率大为降低。

2 TBM 滚刀破岩过程三维模拟

以南水北调西线一期工程中泥曲-杜柯河引水线路为例,根据室内岩石试验所得到的岩石力学参数选取模型中所用到的岩石物理力学参数,进行 TBM 刀具破岩作用三维仿真分析。泥曲-杜柯河引水线路位于四川省甘孜县和壤塘县境内,各比选线路主体工程均为深埋长隧洞,平均埋深一般在 300~800 m,最大埋深 1 190 m。线路区出露地层岩性主要有三叠系浅变质砂板岩,裂隙发育程度受岩性、岩性组合、岩石单层厚度影响,一般板岩比砂岩发育,薄层比厚层发育,随深度增加,裂隙发育程度亦相应减弱。以下利用离散元程序 3DEC 进行 TBM 刀具破岩三维仿真分析,寻找围岩条件对 TBM 掘进速率的影响规律。

2.1 建立三维仿真模型的基本假定

为合理地模拟 TBM 破岩作用力及岩体中的节理,在进行离散元计算时,假设岩体及岩体中的节理为线弹性材料,且在同一地层单位为各向同性材料;假定围岩受到剪力作用时,岩石材料不发生膨胀;刀盘及刀具为线弹性材料,且假设刀具与岩石间是不透水的;节理遵循库仑滑动准则,且节理选用 Barton-Bandis 节理模型。依据 TBM 开挖的影响范围选取 100 m×100 m×100 m 的开挖区域。图 1 为 TBM 开挖隧洞三维仿真模型。为了合理地分析 TBM 刀具破岩过程,在隧道开挖范围内选择一个较小的模型(10 m×10 m×10 m),将主要研究对象集中在刀头上,分析 TBM 破岩时岩体的破裂过程。

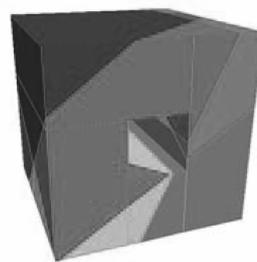


图 1 TBM 开挖隧洞三维仿真模型

2.2 所选取的岩石力学参数

在利用 3DEC 离散元程序模拟 TBM 刀具切割岩石的过程中,从试验数据中选取 15 组不同的岩石力学参数,建立 TBM 刀具破岩三维仿真模型,不断地修改模型中的岩石力学参数,进行离散元计算与分析。计算中所选取的 15 组岩石力学参数如表 1 所示。

2.3 所选取的节理参数

为了分析节理方向及间距对 TBM 破岩时掘进速率的影响,选取了 10 组不同的节理方向及 10 组不同的节理间距,对比节理条件不同时 TBM 掘进速率大小的不同,分析岩体中分布的节理对 TBM 掘进速率的影响。所选取的不同节理方向为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° ;所选取的不同节理间距为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mm。

2.4 计算结果分析

在 TBM 刀具破岩过程三维仿真中,分别根据修改岩石力学参数和修改节理方向及间距大小,计算得到不同的围岩条件下 TBM 掘进速率的大小分布。以下是计算结果分析。

1) TBM 掘进速率与岩石力学参数关系分析

假设岩体中节理方向为 60° 、节理间距为 50 mm,选取 15 组不同的岩石力学参数,建立不同的力学模型,三维仿真 TBM 刀具破岩时的切削力,通过计算得到 TBM 在岩石力学参数不同时的掘进速率,并进行比较分析,找出 TBM 掘进速率随岩石力学参数变化的规律。

表 1 所选取的岩石力学参数

组数	岩石单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	31.5	13.3	0.51
2	33.1	15.7	0.46
3	43.6	23.6	0.45
4	45.7	30.1	0.43
5	51.6	35.3	0.38
6	55.7	39.1	0.35
7	58.3	41.2	0.29
8	67.3	43.5	0.26
9	78.5	46.5	0.22
10	92.7	47.5	0.21
11	101.5	49.3	0.21
12	105.6	51.2	0.18
13	107.1	60.3	0.16
14	111.3	71.8	0.16
15	117.0	84.1	0.15

图 2~图 4 分别为 TBM 掘进速率与岩石单轴抗压强度关系曲线图、TBM 掘进速率与岩石弹性模量关系曲线图、TBM 掘进速率与岩石泊松比关系曲线图。

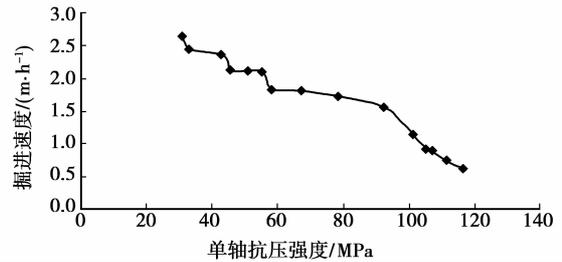


图 2 TBM 掘进速率与岩石单轴抗压强度关系曲线图

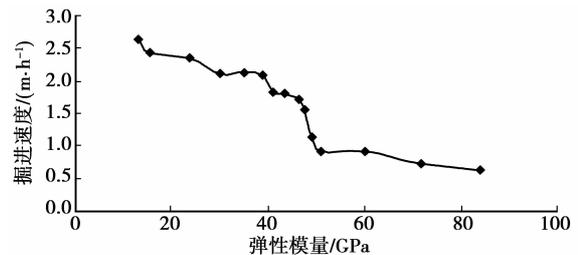


图 3 TBM 掘进速率与岩石弹性模量关系曲线图

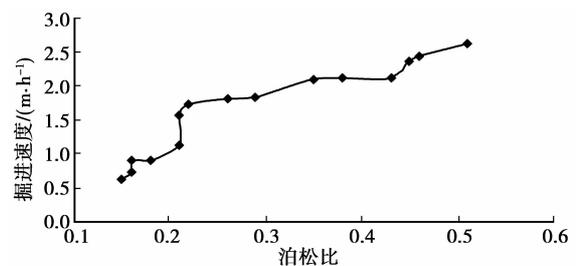


图 4 TBM 掘进速率与岩石泊松比关系曲线图

从图 2~图 4 可以看出,在一定范围内,TBM 掘进速率随着岩石单轴抗压强度的增大而降低,而随着岩石泊松比的增大而增高。图 2 和图 3 所示的曲线形态类似于斜率为负值的直线,图 4 所示的曲线形态类似于斜率为正值的直线。因此,可利用最小二乘法把这 3 条曲线拟合成直线。

最小二乘法的思路如下:

①用 Y 表示 TBM 掘进速率, X 表示岩石物理力学参数;

②假设 Y 与 X 关系式为: $Y = X * a + b$,其中 a 和 b 为 2 个未知参数;

③已知 15 组不同的 Y 值和 X 值,用最小二乘法求出 a 和 b 2 个参数,从而得到 Y 和 X 之间的关系式。

图 5~图 7 分别为用最小二乘法拟合出的 TBM 掘进速率与岩石物理力学参数线性关系图。

由以上图表分析可以看出,TBM 掘进速率与岩石物理力学性质存在着一定的关系,用最小二乘法拟合出的 TBM 掘进速率与岩石物理力学参数线性关系为下面基于 TBM 掘进速率的围岩分类提供了定量的分析。

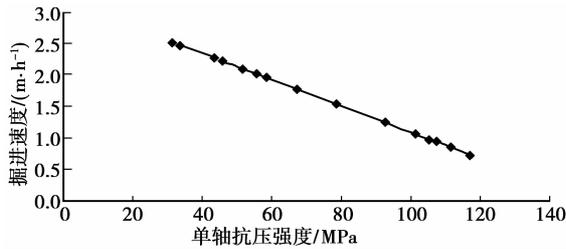


图 5 TBM 掘进速率与岩石单轴抗压强度线性关系图

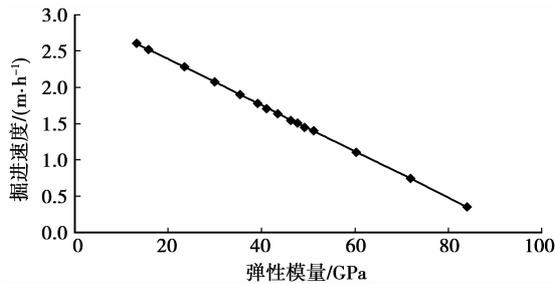


图 6 TBM 掘进速率与岩石弹性模量线性关系图

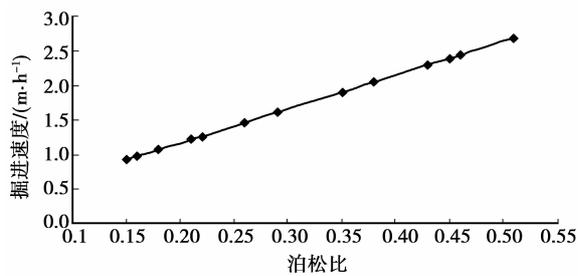


图 7 TBM 掘进速率与岩石泊松比线性关系图

2) TBM 掘进速率与节理方向关系分析

假设岩石物理力学参数一定时,岩石单轴抗压强度选为 60 MPa,岩石弹性模量选为 40 GPa 及岩石泊松比选为 0.3 时,选取不同的节理方向,建立不同的 TBM 破岩三维力学模型,通过计算得到 TBM 在节理方向不同时的掘进速率,并进行比较分析,找出 TBM 掘进速率随节理方向变化的规律。具体分析如下:假设节理间距为 30 mm 时,节理方向与隧洞掘进方向夹角分别为 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°、90°时,建立 10 个不同的 TBM 刀具破岩力学模型,计算得到不同节理方向条件下 TBM 掘进速率的变化。图 8 为 TBM 掘进速率随节理方向不同变化曲线图。同样,也利用上述的最小二乘法把图 8 所示的曲线拟合合成直线。图 9 为 TBM 掘进速率与节理方向线性关系图。

从图 8 和图 9 可以看出,当节理方向与隧洞掘进方向的夹角小于 60°时,TBM 掘进速率随着其夹角的不断增加而增高,而当节理方向大于 60°后,TBM 掘进速率又随着节理方向与隧洞掘进方向的

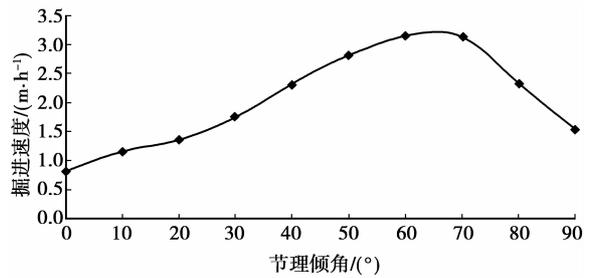


图 8 TBM 掘进速率随节理方向不同变化曲线图

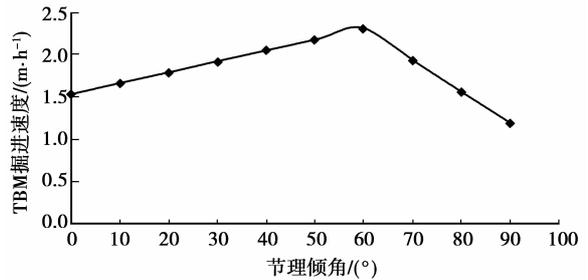


图 9 TBM 掘进速率与节理方向线性关系图

夹角的增加而有所降低。

3) TBM 掘进速率与节理间距关系分析

假设岩石物理力学参数一定且节理方向与隧洞掘进方向夹角为 60°时,节理间距分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mm 时,建立 10 个不同的 TBM 刀具破岩力学模型,计算得到不同节理间距条件下 TBM 掘进速率的变化。

图 10 为 TBM 掘进速率随节理间距不同变化曲线图,图 11 为用最小二乘法拟合出的 TBM 掘进速率与节理间距线性关系图。

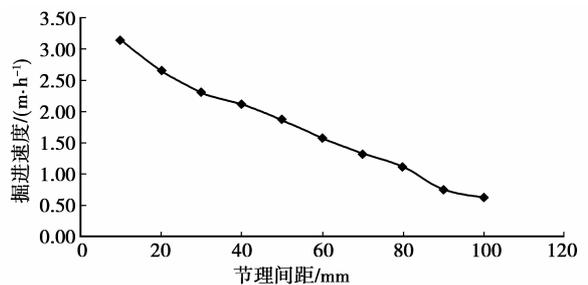


图 10 TBM 掘进速率随节理间距不同变化曲线图

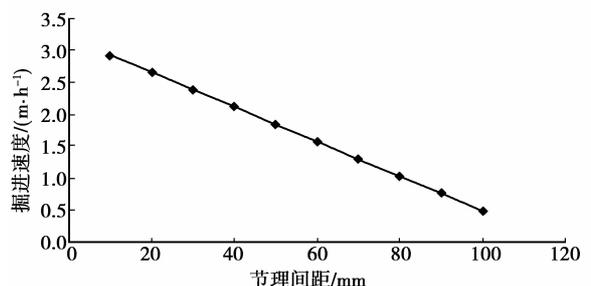


图 11 TBM 掘进速率与节理间距线性关系图

由图 10 和图 11 可以看出,在一定范围内,TBM 掘进速率随着节理间距的不断增加而减小。因此,岩体中分布密集的节理有助于 TBM 向前掘进。以上用最小二乘法拟合出的 TBM 掘进速率与围岩中节理条件的直线图是 TBM 掘进中围岩分类的基础。

3 基于 TBM 掘进速率的隧洞围岩分类

根据上一节拟合出的 TBM 掘进速率与岩石物理力学性质及节理条件的公式,可对 TBM 在围岩中掘进的适宜性作出以下分类。

当岩石三轴抗压强度在 30~60 MPa 之间、弹性模量在 15~40 GPa 之间时,且岩石泊松比在 0.3~0.5 之间时,TBM 在此类围岩中掘进速率较快,因此 TBM 适宜在此类围岩中掘进;而当节理倾角在 30°~60°之间、节理间距在 10~30 mm 之间时,TBM 掘进速率也较快。

当岩石三轴抗压强度在 60~100 MPa、弹性模量在 40~60 GPa,岩石泊松比在 0.18~0.3 之间时,TBM 掘进速率适中,因此 TBM 较适宜在此类围岩中掘进;而当节理倾角在 60°~80°之间、节理间距在 30~60 mm 之间时,TBM 掘进速率也较快。

当岩石三轴抗压强度小于 30 MPa、弹性模量小于 40 GPa,且岩石泊松比大于 0.5 时,岩石自稳能量降低,TBM 掘进速率大为降低,掘进时会增加成本,所以 TBM 不宜在此类围岩中掘进;而当岩石三轴抗压强度大于 100 MPa、弹性模量大于 60 GPa,且岩石泊松比小于 0.18 时,围岩硬度较大,会增加 TBM 掘进的难度,所以 TBM 也不宜在此类围岩中掘进。

当节理倾角在 0~30°之间或 80°~90°之间时,TBM 掘进速率大为降低,因此在此类围岩中不宜使用 TBM 掘进;而当节理间距大于 60 mm 时,TBM 掘进难度大大增加;当节理间距小于 10 mm 时,由于节理分布比较密集,所以岩体自稳能力降低,TBM 在掘进时容易造成围岩崩塌,其掘进速率会受到严重的影响,因此,TBM 也不宜在此类围岩中掘进。

由以上分析可以看出,根据 TBM 掘进的适宜性可以将隧道围岩分为 3 类:

- 1) I 类围岩适宜于 TBM 施工;
- 2) II 类围岩较适宜于 TBM 施工;
- 3) III 类围岩不宜于 TBM 施工。

基于 TBM 掘进速率的隧洞围岩分类见表 2。

表 2 基于 TBM 掘进速率的隧洞围岩分类

围岩类型	TBM 掘进	岩石物理力学参数			岩体节理分布	
		UCS/MPa	E/GPa	λ	节理倾角/(°)	节理间距/mm
I	适宜	30~60	15~40	0.3~0.5	30~60	10~30
II	较适宜	60~100	40~60	0.18~0.3	60~80	30~60
III	不宜	<30 或 >100	<15 或 >60	>0.5 或 <0.18	0~30 或 80~90	<10 或 >60

4 结 语

1) 隧洞中围岩的物理力学性质影响着 TBM 掘进速率。围岩强度越低,TBM 掘进速率越高;但当围岩强度过低时,由于其自稳能力下降,在 TBM 开挖过程中容易出现坍塌现象,所以 TBM 掘进速率也会受到严重的影响;围岩强度越高,会给 TBM 掘进带来困难,其掘进速率会降低。

2) 岩体中节理的分布也会影响 TBM 掘进速率。隧洞中节理方向与 TBM 掘进方向之间的夹角越大或节理分布越密集,TBM 掘进速率越高,而当隧洞中节理方向与 TBM 掘进方向之间的夹角过大或节理分布过于密集时,岩体自稳能力下降,在 TBM 开挖过程中要做好防护措施,因此也会对 TBM 掘进速率造成一定的影响;隧洞中节理方向与 TBM 掘进方向之间的夹角越小或节理间距越大时,

会增加 TBM 掘进的难度,其掘进速率也会降低。

3) 根据 TBM 掘进速率与隧洞围岩地质条件的关系可将隧洞围岩分为 3 类: I 类围岩适宜于 TBM 施工; II 类围岩较适宜于 TBM 施工; III 类围岩不宜于 TBM 施工。此种围岩分类方法可为以后的 TBM 掘进起到指导作用。

参考文献:

- [1] 王学潮,伍法权. 南水北调西线工程岩石力学与工程地质探索[M]. 北京:中国人民大学出版社,2007.
- [2] 王学潮,陈书涛,张辉,等. 南水北调西线工程地质条件研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.
- [3] 王学潮,杨维九,刘丰收. 南水北调西线一期工程的工程地质和岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):3603-3613.
WANG XUE-CHAO, YANG WEI-JIU, LIU FENG-SHOU. Engineering geology and rock mechanical problems in west route of south-to-north water transfer pro-

- ject[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3603-3613.
- [4] 王梦恕,李典璜,张镜剑,等. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218-94 工程岩体分级标准[S]. 北京:中国计划出版社,1994.
- [6] 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 FA-LIANG, GU MING-CHENG, WANG SHI-CHUN. Study on surrounding rockmass classification of tunnel cut by TBM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1350-1354.
- [7] BIENIAWSKI Z T. 工程岩体分类[M]. 吴立新,王剑锋,刘殿书,等译. 徐州:中国矿业大学出版社,1993.
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50287-99 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
- [9] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(2): 183-191.
- [10] GONG Q M, JIAO Y Y, ZHAO J. Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(1): 46-55.
- [11] INNAURATO N, OGGIERI C, ORESTE P P, et al. Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(5): 429-451.
- [12] TARKOY P J. Predicting raise and tunnel boring machine performance: state of the art [J]. Atlanta, Georgia, 1979, 5(8): 333-352.
- [13] RIEHARD J. Tunneling machines in hard rock[J]. Civil Engineering for Underground Rail Transport, 1990, 10(2): 121-123.
- [14] MOVINKELT J O. Geological parameters for hard rock tunnel boring [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(4): 425-437.
- [15] HEER B, ESSEX R, YOUNG D. Manapouri second tailrace tunnel design and construction considerations [J]. Rapid Excavation and Tunneling Conference, 1997, 13(8): 132-133.
- [16] ZHU H, BRUMMER R, ANDRIEUX P. Joint rock mass numerical computation and application method and discussion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3444-3449.
- [17] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of himalayan schists[J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 3-23.
- [18] 徐则民,黄润秋,张倬元. TBM 刀具设计中围岩力学参数的选择[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 230-234.
XU ZE-MIN, HUANG RUN-QIU, ZHANG ZHUO-YUAN. The mechanical parameters of surrounding rocks consideration in TBM cutter design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 230-234.
- [19] LIU W, ZHOU J. Prototype tests and particle flow numerical simulation of under-reamed piles on uplift loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 201-206.
- [20] OKAZAKI K, ITO Y, AGUI K, et al. Risk management for the new tunneling construction using other tunnel records and helicopter borne survey in certiorari complex[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(5): 123-130.

(编辑 陈移峰)

(上接第 129 页)

- [10] 周凌远,李乔. 基于 UL 法的 CR 列式三维梁单元计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(6): 690-695.
ZHOU LING-YUAN, LI QIAO. Updated lagrange corotational formulation for geometrically nonlinear FE analysis of 3-D beam element[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(6): 690-695.
- [11] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L. The finite element method for solid and structural mechanics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [12] FREIREA A M S, NEGRAO J H O, LOPES A V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges[J]. Computers and Structures, 2006, 84(31/32): 2128-2140.
- [13] BONET J, WOOD R D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
- [14] 童育强,向天宇,赵人达. 基于退化理论的空间梁单元有限元分析[J]. 工程力学, 2006, 23(1): 33-37.
TONG YU-QIANG, XIANG TIAN-YU, ZHAO REN-DA. A degenerated 3D beam element for finite element analysis[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(1): 33-37.
- [15] 康澜,张其林. 三维退化纤维梁单元的非线性有限元分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 13-17.
KANG LAN, ZHANG QI-LIN. Linear and nonlinear finite element analysis of a degenerated 3D beam element [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 13-17.

(编辑 陈移峰)