

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.05.023

位移释放率对双护盾 TBM 护盾压力的影响研究

程建龙¹, 杨圣奇¹, 李兴华², 潘玉丛³, 赵维生¹, 田文岭¹

(1.中国矿业大学 深部岩土与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221008;
3.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: 为了研究隧洞纵向位移 (LDP) 释放率对双护盾隧洞掘进机 (TBM) 围岩变形及护盾压力的影响, 在 FLAC^{3D} 中采用应力释放法对 LDP 曲线实现了较好的控制, 并指出采用计算时间步控制的缺陷, 在考虑护盾与围岩之间不均匀间隙情况下, 详细分析了应力释放率对 TBM 掘进中国岩 LDP 曲线变化规律、护盾所受挤压力及围岩塑性区的影响。得出了以下结论: (1) 不同岩体力学参数下, LDP 曲线受应力释放率的敏感程度不同; (2) 随着应力释放率的逐渐增加, 围岩 LDP 曲线特征及与 TBM 护盾相互接触的部位有所不同, TBM 护盾接触挤压力和所受摩擦阻力逐渐增大; (3) 护盾外围塑性区的形状与应力释放率和护盾与围岩之间的不均匀间隙有关, 当在较大的应力释放率下, 塑性区呈现自上而下逐渐减小的特征。

关 键 词: LDP 曲线释放率; 双护盾 TBM; 不均匀间隙; 围岩变形特征; 护盾压力

中图分类号: TD 263.3; TD 313

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 05 - 1399 - 10

Impact of longitudinal displacement profile relaxation on contract force acted on double shield TBM in squeezing ground

CHENG Jian-long¹, YANG Sheng-qi¹, LI Xue-hua², PAN Yu-cong³,
ZHAO Wei-sheng¹, TIAN Wen-ling¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: A complete 3D numerical simulation, by using FLAC^{3D}, is developed to investigate the influence of longitudinal displacement profile (LDP) relaxation on ground deformation and contact force acted on the shield in squeezing ground excavated by a double shield tunneling boring machine (TBM). The shapes of LDP curves using the stress relaxation are well controlled and the defect of control method by time step is represented in comparison with the stress method. The model is based on the real geometry and considers the nonuniform gap between the shield and ground. The characteristics of the LDP curves, the contact force and the plastic zone on the cross-section of tunnel are studied. Some useful conclusions are drawn as follows: 1) The sensitivity of LDP curves to the stress relaxation is not uniform for various rock mass parameters. 2) The contact pressure and frictional resistance acted on the shield increase gradually with the increasing stress release rate, and the corresponding behavior of LDP curve of ground and the contact area on the shield are also different. 3) The shape of plastic zone outside the shield is closely related to the stress release rate and the non-uniform gap between shield and ground. The plastic zone will gradually reduce from top to bottom when the stress release rate reaches a relatively large value.

Keywords: the relaxation of LDP curves; double shield TBM; non-uniform gap; ground deformation; contact force acted on the shield

1 引 言

双护盾 TBM 挤压地层掘进中常出现由于围岩

大变形而导致的卡机现象^[1]。现阶段由于护盾外围岩体不能进行围岩位移及护盾外表面接触压力监测, 也未做到全部可视化, 因此, 数值模拟成为研

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2014CB046905); 江苏省高校研究生科研创新计划项目 (No. KYLX15_140)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046905) and the Innovation Foundation of Jiangsu Provincial University For Postgraduate (KYLX15_140).

第一作者简介: 程建龙, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事深部复合地层力学行为以及 TBM 与围岩相互作用控制机理的研究工作。

E-mail: yangsqi@hotmail.com

通讯作者: 杨圣奇, 男, 1978 年生, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事深部岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: yangsqi@hotmail.com

究护盾式 TBM 与围岩相互作用机制的重要工具。目前,关于 TBM 三维数值模拟在已有文献中极少,当采用数值软件模拟 TBM 开挖时,三维模型中典型的隧洞洞壁围岩纵向剖面上径向位移曲线(以下简称 LDP 曲线)的释放程度对于 TBM 护盾挤压力的影响尚未有学者进行研究。这是因为在 FLAC^{3D} 静力学模块中不能反映与时间相对应的应力-应变关系(不考虑蠕变模块),因此,在考虑护盾与围岩之间不均匀间隙的条件下计算求解时不同求解程度下的 LDP 曲线特征和作用在护盾上的接触挤压力会有所不同。Ramoni 等^[2-5]研究了二维隧道纵向平面内在不同超挖量及不同护盾长度条件下 LDP 曲线特征,但没有考虑位移释放对其影响,而且二维平面模型不能真实地反映岩体实际开挖的空间效应。Zhao 等^[6-7]详细分析了 TBM 与围岩之间的环向不均匀间隙,并采用 3D-FEM (Midas GTS) 研究了 TBM 与围岩之间的相互作用,但并没有考虑 LDP 曲线释放程度对护盾压力的影响。Hasanpour 等^[8-9]考虑了不均匀间隙,并采用 FLAC^{3D} 研究了隧洞圆周 LDP 曲线变化规律,提到了三维模型中的应力释放率,但并没有说明该应力释放率的具体含义和相关作法,也没有研究不同应力释放率对 TBM 作用下 LDP 曲线的影响。国内学者刘泉声等^[10]率先采用 FLAC^{3D} 研究了深部高地应力挤压性地层卡机机制,但没有考虑 TBM 与围岩间的不均匀间隙,也没有详细分析 LDP 曲线的形态特征。关于 TBM 掘进时围岩应力释放率的影响因素,主要与岩体力学参数、TBM 掘进速率 AR 有关。因此,本文将重点阐述 LDP 曲线释放程度的控制方法以及对 TBM 护盾挤压力的影响和 TBM 作用下 LDP 曲线特征,这对于研究 TBM 与围岩之间的相互作用及后续预测卡机有重要意义。

2 二维与三维模拟中位移释放率的区别

图 1(a)是 LDP 示意图, X_0 为开挖面位置, X_0 前方 S_1 为预变形区, X_0 后方 S_2 为受掌子面支撑效应影响的洞壁围岩变形区^[11]。由此, LDP 曲线上任意一点的位移都受相邻单元节点的约束作用(例如,单元 B 受单元 A 和 C 的约束),不同的本构关系对应的约束条件也有所差异。

为了详细说明 2D 与 3D 位移释放的联系和区别,首先定义 2D 模型洞壁围岩横断面上(可以认为是二维平面应变)任意一点的位移释放率为

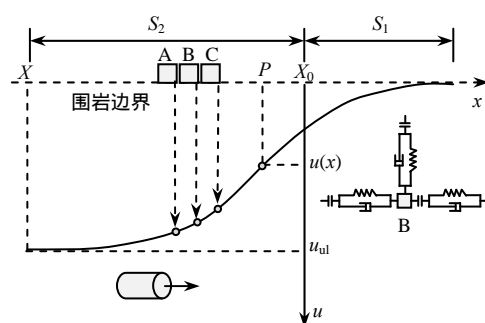
$$\delta_{2D}(\xi) = \frac{u(\xi)}{u(\xi_0)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\delta_{2D}(\xi)$ 为横截面洞壁任意一点的位移释放率; $u(\xi)$ 为应力释放系数为 ξ 时对应的位移值; $u(\xi_0)$ 为应力释放系数为 100% 时对应的位移值。

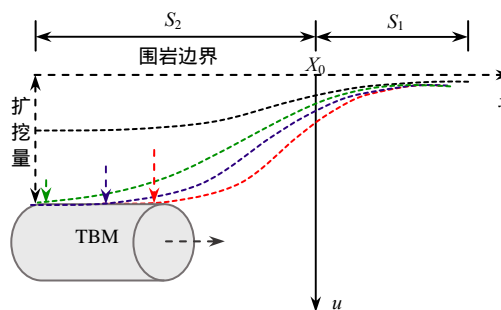
3D 模型 LDP 曲线上任意一点 P 处的位移释放率定义为

$$\delta_{3D}(x) = \frac{u(x)}{u_{ul}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\delta_{3D}(x)$ 为 LDP 曲线上 P 点的位移释放率; $u(x)$ 为 P 点的径向位移; u_{ul} 为不受开挖面影响的最终位移值。



(a) LDP 示意图



(b) 不同 LDP 曲线形态下护盾压力示意图

图 1 围岩纵向剖面位移示意图 (LDP)

Fig.1 Profile of longitudinal displacement of surrounding rock (LDP)

因此,在 2D 数值模拟中当采用某一横断面分析洞壁变形时,需要在洞壁施加虚拟的支撑反力 F ,并通过逐级释放支撑反力来控制洞壁位移的最终收敛(见图 2),以实现与 3D 条件下通过 LDP 曲线上任意一点处的横截面上的位移相对应,即满足 $\delta_{2D}(\xi) = \delta_{3D}(x)$ 。可以看出,2D 是通过限制横断面上的位移释放程度来建立 3D 掌子面后方指定距离处围岩变形关系的,而限制位移的方法是采用应力控制的。若采用三维模型,则可以反映上述围岩中的“约束-收敛”问题,即在 3D 条件下,不需要采

用应力释放率对某一横截面上的位移加以控制。

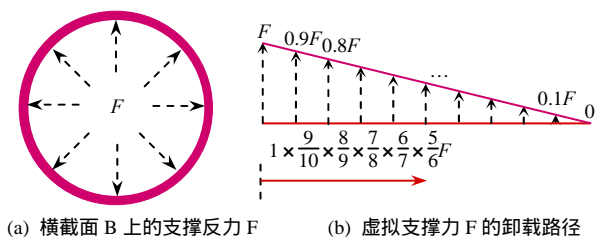


图 2 隧洞横断面应力释放方法 (LDP)

Fig.2 Stress release method on cross-section of tunnel (LDP)

然而,在城市土压盾构或岩石类 TBM 掘进中,由于护盾与围岩之间存在预留间隙,这种间隙是由安装在刀盘上的专用扩挖刀具形成的,尤其在挤压地层或塑性变形显著的洞段,预留变形量的作用十分重要。TBM 与围岩的相互作用从几何角度上分析,其本质就是要弄清所有围岩 LDP 曲线在空间构成的曲面与 TBM 机身柱面的空间接触关系,因此,研究 LDP 的曲线形态特征和释放程度对于 TBM 机型设计、预测围岩与护盾接触位置、护盾压力及 TBM 卡机具有重要意义。

关于三维 LDP 曲线的逐级控制目前未见相关文献有阐述这一问题。本文采用 FLAC^{3D} 模拟 TBM 开挖,尝试分析不同 LDP 曲线形态对 TBM 与围岩之间相互作用的影响(见图 1(b))。首先,洞壁围岩的变形过程是随掌子面的不断推进而逐渐完成的,当 TBM 连续掘进且速度较快时,隧道纵向围岩位移不会完全释放,即当 TBM 移开当前开挖岩体时,此处围岩还有继续向空间内变形的能力,因此,使用位移控制来反映 TBM 掘进时围岩变形的时间效应,而位移控制的方法本质上也是采用应力控制。在此定义 LDP 曲线的位移释放率为

$$\delta_{3D}(\omega) = \frac{u_{ul}(\omega)}{u_{ul}(\omega_0)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\delta_{3D}(\omega)$ 为 3D 应力释放率为 ω 时的 LDP 曲线位移释放率; $u_{ul}(\omega)$ 为应力释放率为 ω 时不受掌子面影响的最终位移; $u_{ul}(\omega_0)$ 为应力释放率为 100% 时不受掌子面影响的最终位移。

显然,式(2)与式(3)的区别在于,前者是针对同一条 LDP 曲线上不同点而言的,而后者是针对多条不同形态和位置的 LDP 曲线中不受掌子面影响的最终位移而言的。

FLAC^{3D} 中控制 LDP 曲线的逐渐释放过程可通过设置求解时间步^[12]和采用应力释放率来控制围岩纵向变形程度,下面将阐述两者的差异性。

3 计算时间步和应力释放率对不同岩体 LDP 曲线及不平衡力的影响

某引水隧洞埋深 800 m 并处于均匀应力场中,铅直应力分量为 20 MPa,初步拟定 4 种不同地层,其物理力学参数见表 1。在此先分析无支护条件下计算时间步和应力释放率对围岩 LDP 曲线的影响,经测试,均匀应力场无支护圆形隧洞沿洞线方向开挖并计算至平衡状态时,拱顶、边墙及仰拱处具有相同的位移变形量及变形规律,在此仅选取拱顶位移曲线进行分析。

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rockmass

岩性	单轴抗压强度 / MPa	弹性模量 / GPa	密度 / (kg/m ³)	泊松比	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	剪胀角 / (°)
地层 A	5	1.1	2 460	0.32	1.2	19	5
地层 B	12	2.6	2 500	0.25	1.9	24	6
地层 C	65	18.0	2 780	0.21	9.0	25	8
地层 D	150	40.0	2 730	0.20	16.0	46	16

3.1 采用计算时间步控制 LDP 曲线的缺陷

计算时间步是用于迭代求解运动方程而人为设定的,这里拟定一次开挖全部和逐步开挖两种开挖方式(见表 2),其目的是用于比较时间步对以上两种开挖方式下的 LDP 曲线的区别。

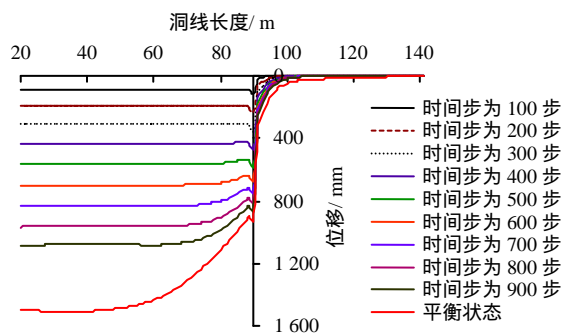
表 2 两种开挖方式比较

Table 2 Comparison of two kinds of excavation method

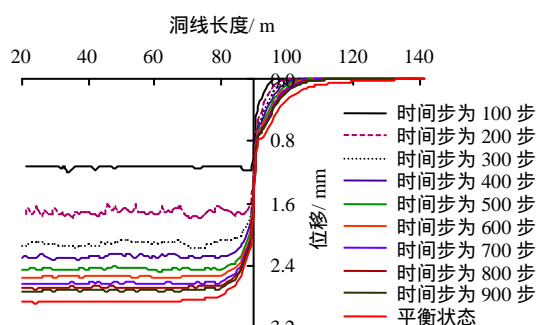
工况编号	开挖总长度 / m	开挖方式
1	90	一次开挖全部
2	90	每次开挖 1 m

图 3 为工况 1 中计算时间步对 LDP 曲线的影响。限于篇幅,这里仅列举地层 A 和地层 D 的 LDP 变化,在地层 A 中 100~900 步之间控制得较好,但所需时间步事先未知,而且需要设置很多间隔;地层 D 中(中硬岩),曲线出现锯齿形波动,而且时间步对位移控制不均匀。图 4 为工况 2 中每次开挖 1 m,计算若干时间步进行下一循环的 LDP 曲线变化规律。首先,地层 A 和地层 D 中每开挖 1 m 计算 100、600 步,甚至平衡状态时的 LDP 曲线整体上没有太大差别,如果需要再现 LDP 曲线的逐渐释放过程,需要设置更小的时间步,而且未知时间步设置为何值时才能达到预期的 LDP 曲线形态,对于

最终的收敛结果也有一定的影响。



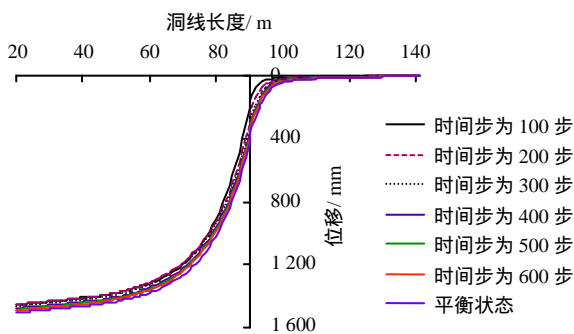
(a) 地层 A



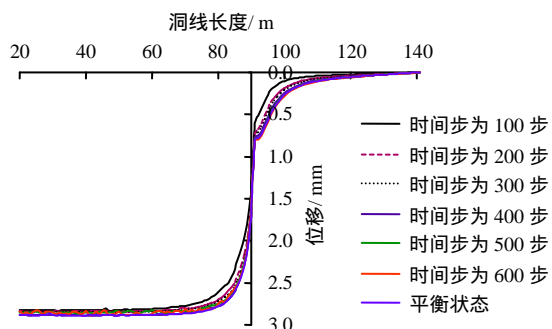
(b) 地层 D

图 3 工况 1 中时间步对 LDP 曲线的影响

Fig.3 Impact of step on the LDP curves in case one



(a) 地层 A



(b) 地层 D

图 4 工况 2 中时间步对 LDP 曲线的影响

Fig.4 Impact of step on the LDP curves in case two

由以上分析可以得出,采用时间步作为控制 LDP 曲线位移的标准存在诸多缺陷:首先,对于不同岩性,相同时间步下位移响应不同,对不平衡力的影响也不同,其与岩体力学参数有关;其次,计算至平衡状态所需步数事先未知,而当大于平衡所需时间步时对 LDP 曲线影响甚微;最后,当在硬岩中开挖隧洞未计算至平衡状态时,时间步的设置对于 LDP 曲线的光滑程度有显著影响,尤其在开始计算初期影响最大,原因是迭代求解运动方程时由迭代算法中不平衡力的不均匀分配导致的,所以要尽可能的计算至平衡状态。

3.2 应力释放率对 LDP 曲线的影响

为了再现位移逐渐释放的过程,采用应力释放法对围岩加以控制,具体作法为每开挖下一进尺岩体时,计算一步以获取不平衡力,提取围岩单元中由于当前开挖掉的单元所暴露出的所有节点不平衡力作为反向荷载,特别注意,这里包括洞壁、掌子面及两者衔接处的所有节点。

根据上一节中地层 C 与地层 D 的岩体力学参数属于较硬岩层,最终位移小于 7 mm,对于 TBM 作用下不会造成卡机影响,为节约工作量,仅以软弱地层为例探讨不同应力释放率对围岩 LDP 曲线的影响。图 5 是不同应力释放率下地层 A 的 LDP 曲线,可以看出,采用应力释放法可以较好地反映 LDP 曲线的逐渐释放过程。

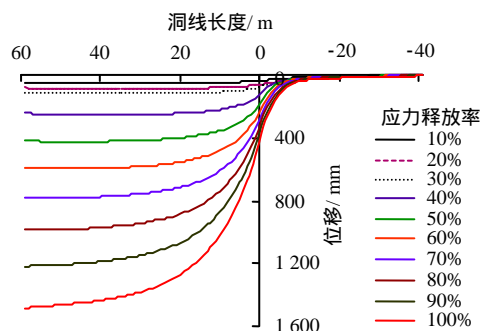


图 5 不同应力释放率对 LDP 曲线的影响

Fig.5 Impact of different relaxations of stress on the LDP curves

为了进一步观察应力释放率对位移值的敏感度,同时能够让不同岩性之间具有可比性,需要消除应力释放率差值下对应的位移差值影响,故将其无量纲化,结果见图 6。

由图可知 地层 A 中当应力释放率小于 30% 时,对 LDP 位移比的影响很小,当应力释放率超过 30% 时,随着应力释放率的不断增加位移比也在逐渐上升,所以应重点关注 30% ~ 100% 之间 LDP 曲线的

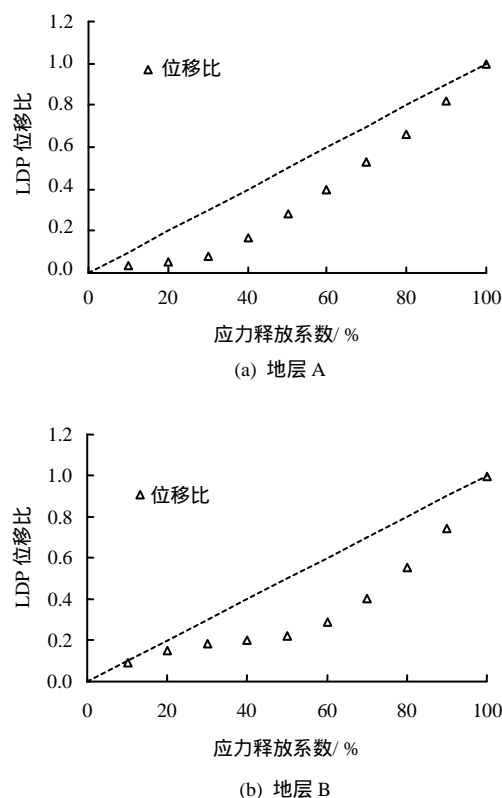


图6 应力释放系数对位移释放系数的影响

Fig.6 Impact of different relaxations of stress on the displacement relaxation coefficient curves

变化。同理 地层 B 应重点关注应力释放率在 50% ~ 100% 之间的 LDP 曲线变化规律。

目前, 应力释放率的取值主要凭借经验去设定, 但也不是盲目的, 应根据特定地质条件下的工程岩体变形监测作为依据。例如, 隧洞可以在钻爆法施工段或支洞监测位移, 然后通过位移值反推应力释放率大小, 进而可以通过模拟分析工程中不易获得的其他信息。关于应力释放率的释放值大小与岩体力学参数、开挖直径和地应力密切相关, 还需要进一步研究。

4 双护盾 TBM 建模方法

4.1 TBM 几何尺寸和主要技术参数

双护盾 TBM 机身外部结构主要包括刀盘、前盾(外伸缩盾)及后盾(内伸缩盾+撑靴盾+尾盾)。

本文中的 TBM 机型引自文献[6], 刀盘采用偏心设计, 刀盘轴线偏离护盾轴线 25 mm, 以增大上部围岩与护盾之间的间隙, 刀盘上装有扩挖刀具可扩大开挖直径, 这些设计理念均可作为围岩变形预留更多的变形空间, 有利于在断层破碎带、膨胀岩及软岩塑性变形洞段掘进。TBM 的几何尺寸及各部件技术参数详见表 3。

表3 双护盾 TBM 几何尺寸及技术参数^[6]

Table 3 Geometric and technical parameters of the double-shield TBM

开挖直径	刀盘直径	前盾直径(外)	后盾直径(外)	管片直径(外)	成洞直径	刀盘长度	前盾长度	后盾长度	护盾厚度	管片宽度	管片厚度	最大刀盘推力	TBM自重	主推进油缸最大推力	辅助油缸最大推力
/m	/m	/m	/m	/m	/m	/m	/m	/m	/m	/m	/m	/MN	/MN	/MN	/MN
9.4	9.3	9.24	9.18	9	8.1	0.75	5	6	0.03	2	0.45	17	1.3	50	80

为了清晰地反映护盾与围岩之间的空间位置关系, 图 7 给出了前盾及后盾处的横断面图, 前、后护盾圆周虽然同心, 但由于刀盘采用偏心设计并装有扩挖刀具, 从而导致前、后护盾几何中心与隧道开挖断面形心不重合, 进而与围岩表面之间产生不均匀间隙, 其特征是拱顶间隙大于两帮间隙, 两

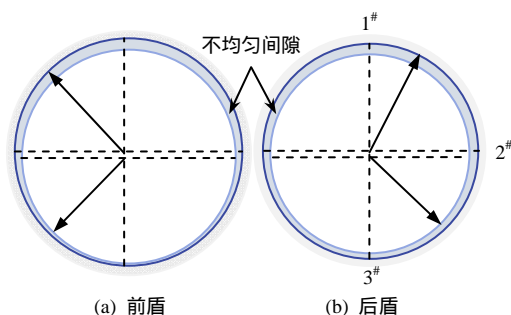


图7 护盾与围岩之间的不均匀间隙

Fig.7 Nonuniform gap between shield and ground

帮间隙大于底板间隙。为方便后文叙述, 拱顶、边墙及仰拱洞壁表面位置分别用 1# ~ 3# 参考点标记。

4.2 创建双护盾 TBM 模型的方法与关键步骤

设隧洞直径为 D , 模型沿隧道轴线方向 (Y) 的长度为 $8D$ ($D=9.44$ m), 圆形外边界直径 $12D$, 模型尺寸足以保证计算时不受边界影响。图 8 中 ~ 分别为刀盘、前盾、后盾、衬砌管片、回填软化及回填硬化所在位置。因刀盘、前、后护盾与围岩之间均存在空隙, 所以必须使用大变形计算模式, 而且在围岩内表面及前、后护盾外表面分别添加 Interface 界面, 主要用于防止围岩变形网格贯入和监测护盾上的接触压力。

位移边界条件: 对于岩体而言, 在圆形外边界施加水平方向 X 和垂直方向 Z 位移约束; 在通过隧洞轴线的对称面上仅施加水平方向 X 位移约束, 即允许围岩节点在 YZ 平面内运动, 保证与实际情况

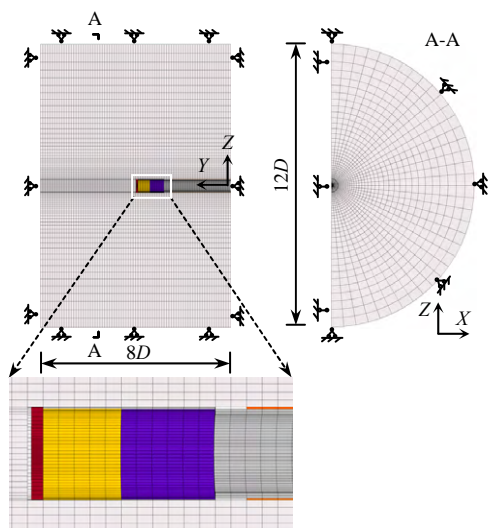


图8 TBM 模型尺寸及边界条件
Fig.8 Geometry of the TBM model and boundary conditions

相符；在模型前、后 XZ 端面仅施加轴向 Y 位移约束。对于刀盘及护盾而言，仅固定对称面上所有节点水平方向 X 位移，其余边界不施加任何应力和位移约束，这样做的目的是允许刀盘和护盾上下浮动（实际工程中 TBM 常常上浮或机头下沉），同时也允许刀盘和护盾产生微小变形。详细模拟步骤阐述如下：

（1）按照应力及位移边界条件进行地应力初始化以达到初始应力平衡状态。

（2）启动刀盘开始掘进。

（3）前盾进洞：沿隧道轴线方向每次步进 1 m，并在开挖面施加刀盘推力，其值为 0.25 MPa（刀盘推力除以开挖面面积），并只赋予进入洞中的 TBM 材料参数，然后计算至平衡状态。刀盘推力在每次步进循环中都要施加推力。这里假定作用在掌子面上的推力为均匀分布力，因为采用滚刀破岩，相对于浅埋土压盾构或泥水盾构作用在掌子面上的线性分布略有不同，而且刀盘推力在每次步进循环中都要施加，滚刀破岩所需的切向切削力、撑靴的支撑力，作用在盾尾管片衬砌上的油缸推力均没有考虑。特别注意，当下开挖岩体的后方为空模型，但网格依旧存在，一旦将空模型改变成其他模型，这些网格便会显示出来，而先前施加的掌子面推力仍然存在，所以在每次步进之前应移除后方网格上的推力，认识这一点非常重要。

（4）后盾进洞：模拟方法与前盾基本相同。

（5）衬砌安装与回填硬化：当后盾完全进入岩体时，在盾尾处安装衬砌管片，管片与围岩之间的空隙用豆砾石回填并灌浆。

上述过程一直推进到不受边界效应影响的位置，本文中 TBM 推进 42 m，步骤（2）~（5）全部实现连续自动控制。

材料参数：岩体本构关系采用 Mohr-Columb 模型，刀盘和前后护盾材料为钢，预制衬砌管片为混凝土材料，灌浆材料使用不同的弹性模量分别代表在软化和硬化阶段的强度特征。假定回填区域前 2 m 内的注浆材料为软化阶段，其余部分为硬化阶段。同时，假定上述材料为线弹性材料。考虑到 TBM 大件，如刀盘、主轴承、主梁等，重量极大，所以 TBM 的自重应给予考虑。TBM 自重采用等效密度，即 TBM 真实重量除以模型中各部件体积。这是因为在建模时，护盾为空心薄壁形状，而内部部件没有考虑，故换算成等效重度。针对后方的拖车后配套和出渣运料系统等部件的重量主要通过提高预制管片的重度来实现，TBM 主要部件的具体物理力学参数见表 4。

表4 双护盾TBM主要部件技术参数^[6]
Table 4 Technical parameters of the major TBM components

主要部件或不同阶段	弹性模量 / GPa	泊松比	密度 / (g/cm ³)	等效密度 / (g/cm ³)
刀盘（钢）	200.0	0.3	7.6	31.2
前后护盾（钢）	200.0	0.3	7.6	141.28
管片（混凝土）	36.0	0.2	2.5	3.0
回填灌浆软化阶段	0.5	0.3	2.4	2.4
回填灌浆硬化阶段	1.0	0.3	2.4	2.4

5 TBM 掘进下应力释放率对围岩 LDP 曲线及护盾压力的影响

5.1 应力释放率对围岩 LDP 曲线的影响

图 9 是地层 B 在应力释放率为 50% ~ 90% 条件下的 LDP 曲线变化规律。当应力释放率为 50% 时，1[#] ~ 3[#] LDP 曲线均未与 TBM 发生接触；当应力释放率自 50% 增加至 80% 时，1[#] LDP 并没有与 TBM 发生接触，原因是拱顶不均匀间隙值最大，预留间隙没有闭合，2[#] LDP 在应力释放率为 80% 时与前护盾发生接触，其他条件下并没有发生接触，3[#] LDP 逐渐与前、后盾接触（图中发生转折的部位）；当应力释放率为 90% 时，拱顶与 TBM 护盾仍未接触，而 2[#] 已经与前盾发生接触，3[#] 与前、后盾均发生接触，但变形量非常特殊，随应力释放率的增加反而降低，这是因为当在较大应力释放率的条件下，围岩迅速向预留间隙内收敛，腰部及以上区域与 TBM 发生接触并产生挤压，限制了 TBM 的上浮导致的。

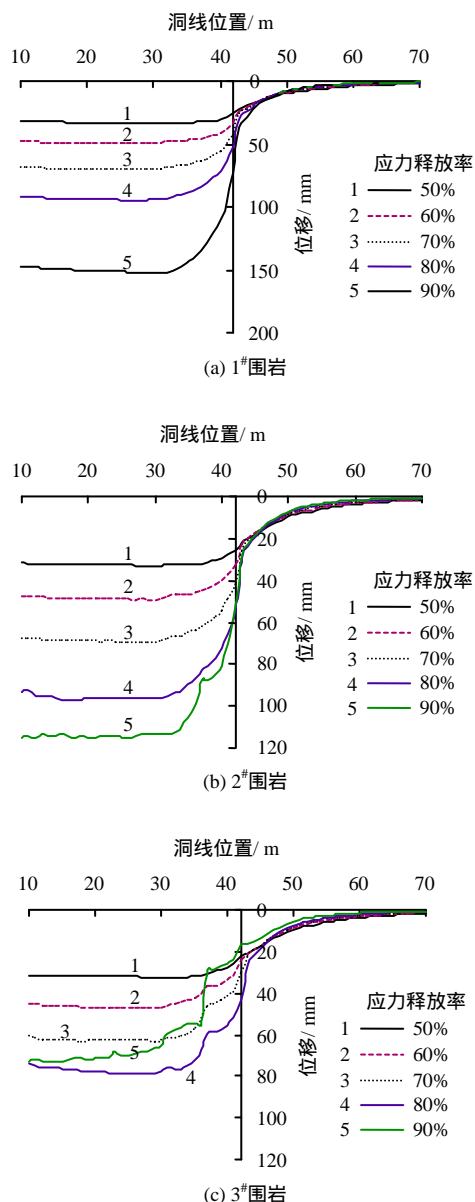


图9 不同应力释放率对围岩1#~3#LDP曲线的影响

Fig.9 Impact of different relaxations of stress on the #1-3 LDP curves

5.2 应力释放率对护盾压力的影响

模拟中护盾所受挤压力 F_N 可用下式计算：

$$F_N = \int_0^L F_{n_i} dl = \sum_{i=1}^k F_{n_i} = \sum_{i=1}^k f_{n_i} A_i \quad (4)$$

式中： F_{n_i} 为护盾与围岩之间每个接触面节点上的接触压力，其值由接触面节点的法向应力 f_{n_i} 和节点特有面积 A_i 乘积获得； k 为接触面节点总数。

图 10 给出了应力释放率对护盾压力的影响规律，当应力释放率由 50% 增至 80% 时，作用在刀盘、前盾、后盾上的挤压力和总压力呈线性逐渐增加，但增长幅度并不是很大；当应力释放率由 80% 增至 90% 时，挤压力急剧增加，尤其是前盾和后盾上的挤压力变化较大，而刀盘增幅最小。由图还可以看

出，在各种应力释放率下，作用在前盾上的力要大于后盾上的力。

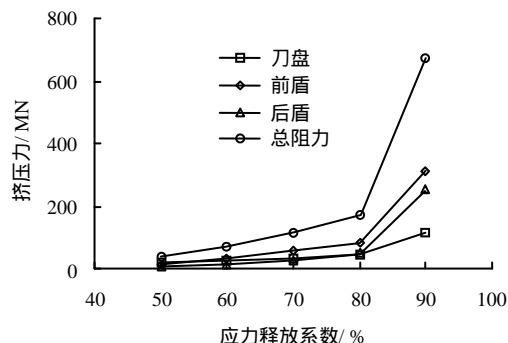


图10 不同应力释放率对 TBM 挤压力的影响

Fig.10 Impact of different relaxations of stress on the contract force acted on TBM

当算出接触挤压力时，只需乘以摩擦系数即可计算出 TBM 所受摩擦阻力，则护盾所受摩擦阻力为

$$f = \mu \int_0^L F_{n_i} dl = \sum_{i=1}^k \mu F_{n_i} A_i \quad (5)$$

式中： μ 为滑动摩擦系数，取 0.3。关于摩擦系数，Ramoni 等^[2]指出，在滑动摩擦情况下通常可取 0.15 ~ 0.30，静摩擦状态下通常可取 0.25 ~ 0.45（例如长期停机后重新启动），其中小值均指在使用润滑剂条件下。

图 11 是不同应力释放率对护盾摩擦阻力的影响。可以看出，变化规律基本与作用在 TBM 上的接触挤压力相同。根据 TBM 主推进和辅助推进油缸的技术指标，可以看出，当应力释放率小于 80% 时，TBM 所受阻力小于主推进油缸推力 50 MN；当应力释放率大于 80% 时，TBM 所受阻力大于辅助油缸推力 80 MN，所以 TBM 有卡机风险。

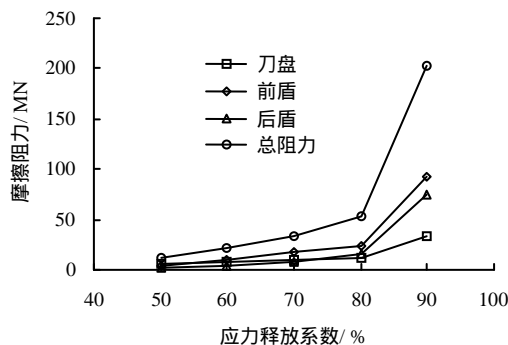


图11 不同应力释放率对 TBM 摩擦阻力的影响

Fig.11 Impact of different relaxations of stress on frictional resistance acted on the shield of TBM

5.3 应力释放率对围岩主应力的影响

图 12 是应力释放率对 1#~3#围岩最大主应力

的影响规律, 掌子面前方, 最大主应力出现应力峰值并逐渐过渡到原岩应力, 随着应力释放率的增加, 掌子面后方围岩中的主应力明显减小, 1[#]、2[#]参考点处都出现了两次应力跌落, 第 1 次 (41 m 处) 是由于刀盘与前盾之间存在高度差, 第 2 次 (30 m 处) 是由于后盾盾尾与充填体连接处存在空隙。当应力释放率为 80% ~ 90% 时, 在 2[#]位置前盾区域出现了主应力增加的现象, 这是因为在此处与护盾表面发生接触并产生挤压导致的。底板 3[#]主应力变化最为复杂, 当应力释放率为 50% ~ 60% 时, 底板 LDP 曲线刚刚与前护盾接触, 图中表现出主应力稍有增大。

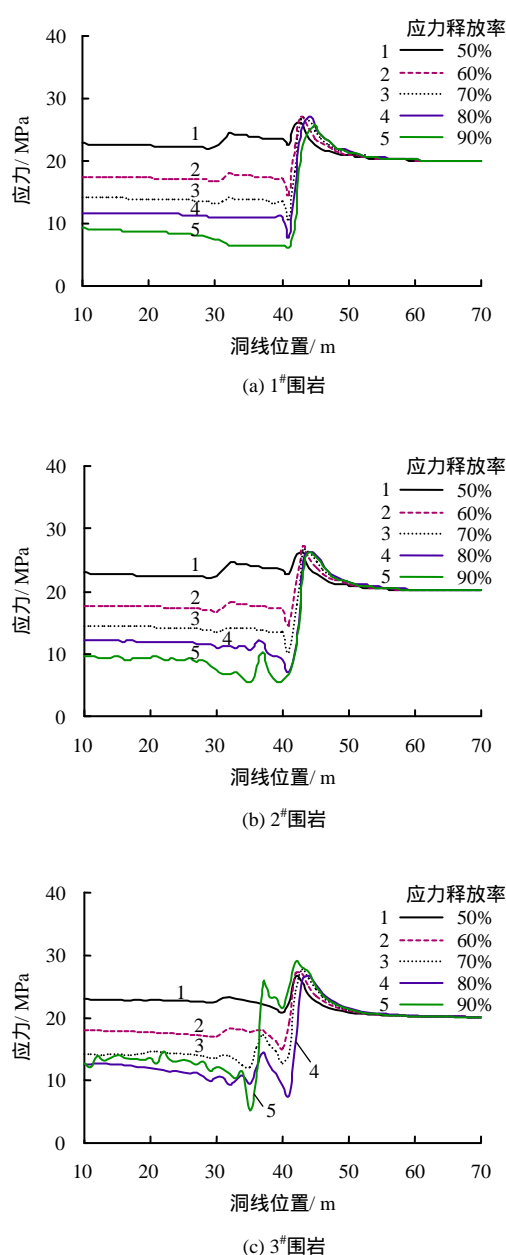


图 12 应力释放率对 1[#] ~ 3[#]最大主应力的影响
Fig.12 Impact of relaxation of stress on the maximum principal stress of reference points #1-3 on surrounding rock

当应力释放率为 70% ~ 90% 时, 在 36 m 出现应力跌落是由于前、后护盾之间的锥度导致的, 随后与后盾后方发生接触, 应力又有所上升。

图 13 是应力释放率对 1[#] ~ 3[#]围岩最小主应力的影响规律, 在掌子面前方, 随着距掌子面距离的不断增加, 应力不断升高并过渡到原岩应力; 在掌子面后方, 1[#] ~ 3[#]变化规律与最大主应力变化规律类似, 这里不赘述。

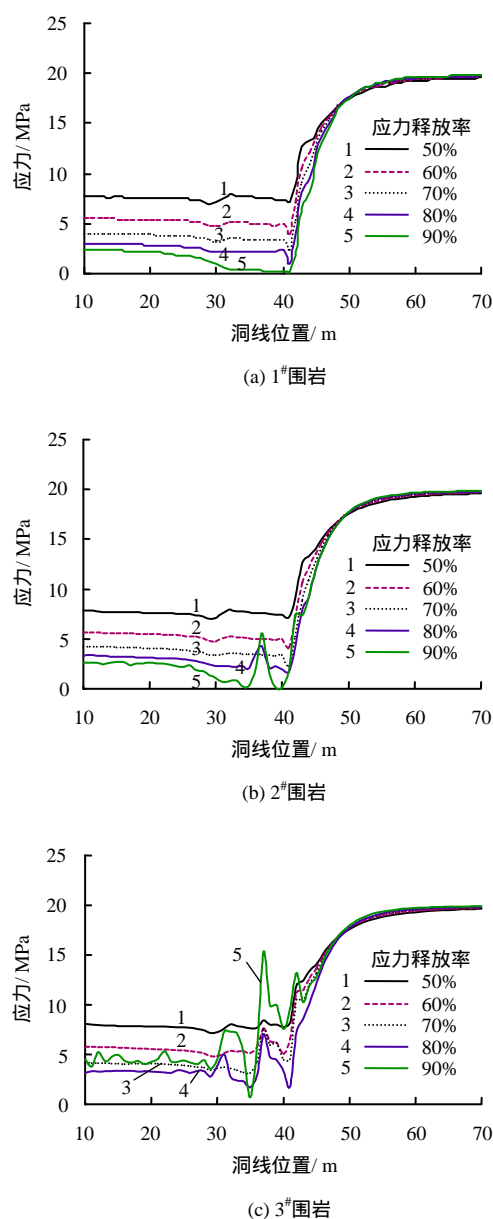


图 13 应力释放率对 1[#] ~ 3[#]最小主应力的影响
Fig.13 Impact of relaxation of stress on the minimum principal stress of reference points #1-3 on surrounding rock

图 14 是应力释放率对 TBM 前盾盾尾及后盾盾尾围岩塑性区的影响, 当应力释放率逐渐增大时, 围岩塑性区范围也将逐渐扩大。当应力释放率为

80% ~ 90% 时, 围岩塑性区表现出明显的自上而下逐渐减小的形状, 而且应力释放率越大越明显。出现这一现象的原因与护盾与围岩之间不均匀间隙自

上而下逐渐减小的特征密切相关。因为拱顶间隙值最大, 拱顶的位移自然要大于腰部和仰拱的位移, 进而导致塑性区的范围也要扩大。

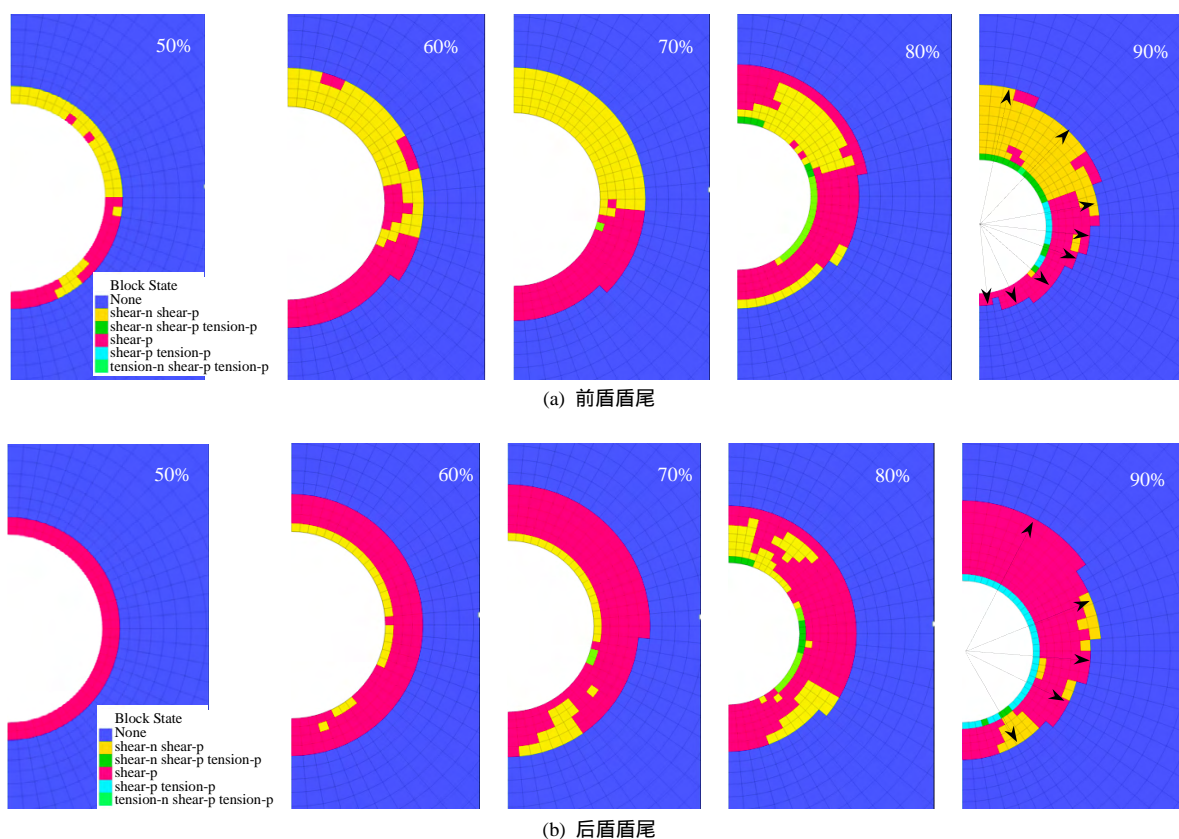


图 14 不同应力释放率下前后盾尾横截面塑性区分布

Fig.14 Impact of relaxation of stress on the plastic zone on cross-section of front shield and rear shield, respectively

6 结 论

(1) 采用计算时间步控制 LDP 曲线的释放存在诸多缺陷, 而应力释放法可以较好地反映 LDP 曲线的逐渐释放过程。

(2) 不同岩体力学参数下 LDP 曲线对应力释放率的敏感程度不同, 应事先做预分析。

(3) 随着应力释放率的逐渐增加, 围岩 LDP 曲线特征及与 TBM 护盾相互接触的部位和接触程度有所不同, 而 TBM 护盾接触挤压力和所受摩擦阻力逐渐增大。

(4) 护盾外围塑性区的形状与应力释放率和护盾与围岩之间的不均匀间隙有关, 当在较大的应力释放率下, 塑性区呈现自上而下逐渐减小的特征。

参 考 文 献

[1] 尚彦军, 杨志法, 曾庆利, 等. TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,

26(12): 2404 - 2411.

SHANG Yan-jun, YANG Zhi-fa, ZENG Qing-li et al, Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (12): 2404 - 2411.

- [2] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2011, 44(1): 37 - 61.
- [3] RAMONI M, LAVDAS N, ANAGNOSTOU G. Squeezing loading of segmental linings and the effect of backfilling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(6): 692 - 717.
- [4] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. The effect of consolidation on TBM shield loading in water-bearing squeezing ground[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2011, 44(1): 63 - 83.

- HUANG Zhi-huai, LI Guo-wei, WANG Si-jing, et al. Monitoring and evaluation high slope K35 of Yue-Gan Expressway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2783 - 2788.
- [4] 沈强, 陈从新. 高速公路失稳高边坡动态设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 283 - 286.
- SHEN Qiang, CHEN Cong-xin. Dynamic design for unstable high slope along expressway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.2): 283 - 286.
- [5] 周平. 从边坡破坏特点谈高速公路勘察应注意的几个问题[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 304 - 306.
- ZHOU Ping. Some aspects for survey of expressway depending on the characteristics of several slope failure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.2): 304 - 306.
- [6] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土力学, 2004, 24(1): 1 - 15.
- BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 24(1): 304 - 306.
- [7] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1957 - 1962.
- XU Han, HU Yi-wen, CAI Yuan-qi. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1957 - 1962.
- [8] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(7): 577 - 596.
- [9] 李宁, 许建聪. 基于场变量的边坡稳定分析有限元强度折减法[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 314 - 318.
- LI Ning, XU Jian-cong. Strength reduction FEM for slope stability analysis based on field variable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 314 - 318.
- [10] 胡龙生. 基于传感器和无线模式的广乐高速公路边坡自动监测系统[D]. 南京: 河海大学, 2012.
- HU Long-sheng. Auto-monitoring system of Guangle Highway engineering slope based on electronic sensors and wireless mode[D]. Nanjing: Hohai University, 2012.
- [11] 李国维, 李临生, 占斯文, 等. 一种固定式测斜仪系统[P]. 中国专利: CN103063197A, 2013-04-24.
- LI Guo-wei, LI Lin-sheng, ZHAN Si-wen, et al. A fixed inclinometer system[P]. Chinese Patent: CN103063197A, 2013-04-24.
- [12] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44 - 50.
- XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 44 - 50.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- The ministry of communications of PRC. Specifications for design highway subgrades[S]. Beijing: People's Traffic Press, 2004.

上接第 1407 页

- [5] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. Tunnel boring machines under squeezing conditions[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(2): 139 - 157.
- [6] ZHAO KAI, JANUTOLO MICHELE, BARLA GIOVANNI. A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2012, 45(4): 475 - 497.
- [7] ZHAO KAI, BONINI MARIACRISTINA, DEBERNARDI DANIELE, et al. Computational modelling of the mechanised excavation of deep tunnels in weak rock[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 66: 158 - 171.
- [8] ROHOLA HASANPOUR. Advance numerical simulation of tunneling by using a double shield TBM[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 57(2): 37 - 52.
- [9] ROHOLA HASANPOUR, ROSTAMI JAMAL, ÜNVER BAHTIYAR. 3D finite difference model for simulation of double shield TBM tunneling in squeezing grounds[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2014, 40(2): 109 - 126.
- [10] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 深部挤压性地层TBM掘进卡机孕育致灾机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊 1): 75 - 82.
- LIU Quan-sheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Jamming mechanism of full face tunnel boring machine in over thousand-meter depths[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(Supp.1): 75 - 82.
- [11] 程建龙, 杨圣奇, 杜立坤, 等. 复合地层中双护盾 TBM 与围岩相互作用机制三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 511 - 523.
- CHENG Jian-long, YANG Sheng-qi, DU Li-kun, et al. Three-dimensional numerical simulation on interaction between double-shield TBM and surrounding rock mass in composite ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(3): 511 - 523.
- [12] Itasca Consulting Group Inc. FLAC-3D Manual: Fast Lagrangian analysis of continua in 3 Dimensions-Version 3.0[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc., USA, 2012.