

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.011



公路隧道衬砌裂纹扩展机理

丁浩¹, 李科¹, 周小平², 毕靖², 练焱坚², 徐潇²

(1. 国家山区公路工程研究中心, 重庆 400060; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:公路隧道衬砌裂缝作为公路隧道的主要病害,其问题日益突出,尤其是带裂纹工作衬砌的等级评价略显不足。为研究公路隧道带裂缝二次衬砌在受荷载作用下裂纹扩展规律,用离散元PFC软件对衬砌裂纹扩展规律进行数值模拟研究,揭示隧道衬砌中裂纹开裂的灾演机理,根据衬砌开裂状态进行病理灾害分析,并建立了相应的预测模型。衬砌的整体安全性受预置裂纹的影响,预置裂纹处往往是衬砌中较危险的位置;预置裂纹的深度对裂纹贯通时间有较大影响,随着预置裂纹深度的增加,预置裂纹贯通衬砌的时间逐渐减小;预置裂纹的深度对裂纹张开度的变化有较大影响,随着预置裂纹深度的增加,预置裂纹张开度逐渐增大,并在贯通衬砌时有明显的突变,这样便于确定衬砌治理时机。

关键词:公路隧道;衬砌裂纹;PFC;扩展机理;宽度

中图分类号:U458.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)05-0086-06

Numerical investigation on the fracture propagation mechanism of highway tunnel lining

Ding Hao¹, Li Ke¹, Zhou Xiaoping², Bi Jing², Lian Yanjian², Xu Xiao²

(1. National Engineering and Research Center for Mountainous Highways, Chongqing 400060, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: As the major flaw of highway tunnels, lining cracks of highway tunnels is increasingly seriously. In order to study the mechanism of crack propagation in highway tunnels under loading, this article conducts numerical simulation on the crack propagation with discrete element software PFC, demonstrating the disaster mechanism of crack propagation in highway tunnels, and establishing the corresponding prediction models. The results showed that: integral safety of lining is subject to pre-existing flaws, and the positions of pre-existing flaws are generally relatively more dangerous in lining; the depth of pre-existing flaws plays an important role in the timing of crack coalescence, i. e., the deeper the pre-existing flaws are, the less time is needed to achieve

收稿日期:2017-06-15

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0802201);国家自然科学基金(41601574);重庆基础科学与前沿技术研究重点项目(cstc2015jcyjBX0118);西藏自治区自然科学基金(2016XZ01G31)

作者简介:丁浩(1978-),男,主要从事隧道工程研究,E-mail:dinghao@cmhk.com。

周小平(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhouxiaoping@sina.com。

Received:2017-06-15

Foundation item: National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0802201); National Natural Science Foundation of China (No. 41601574); Key Program of Basic Science and Advanced Technology Research of Chongqing (No. cstc2015jcyjBX0118); National Natural Science Foundation of Tibet (No. 2016XZ01G31)

Author brief: Ding Hao(1978-), main research interest: tunnel engineering, E-mail: dinghao@cmhk.com.

Zhou Xiaoping(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhouxiaoping@sina.com.

crack coalescence in the lining; the depth of pre-existing flaws has a great influence on the variation of crack opening, i. e. the deeper pre-existing flaws are, the increasing opening those fracture apertures will be, and there is an obvious abrupt change when the flaws coalesce.

Keywords: highway tunnels; cracks of lining; PFC; mechanism of crack propagation

据截止 2013 年底,中国公路隧道已有 11 359 座,总长度达 9 609 km。虽然,隧道在建成之后很长时间内的安全问题是可预见的,但是,在日本、台湾、新西兰和中国,一些隧道由于受到蠕变、岩石风化、滑坡和地下水渗流作用,还是产生了很多不可预计的变形和裂缝^[1-7]。

衬砌裂纹是公路隧道主要的病害之一^[8-10],隧道衬砌开裂会降低隧道承载能力,破坏隧道结构安全可靠性和稳定性,影响隧道正常使用,甚至会危及行车和人身安全。目前,专家们对于隧道损伤破坏做了大量研究,方利成等^[11]将现场实际裂缝通过图文直观地表示出来,为隧道裂纹的研究提供了基础。Charpentier 等^[12]认为地下工程开挖导致初始应力的重分布并诱发裂隙,实验研究了开挖隧道内近场微裂纹的形成机理。李占海等^[13]研究了侧压力系数对马蹄形隧道围岩损伤破坏的影响,认为侧压力系数明显影响隧道围岩的损伤机制,当侧压力系数较小时,初始损伤分布以拱脚、拱肩和拱顶位置为主;当侧压力系数较大时,初始损伤以拱顶的拉伸损伤为主;拱顶垂直方向的位移随侧压力系数的增大而减小,且随埋深的增加而增大。杨建平等^[14]研究了二衬支护时机对小净距隧道稳定性的影响。方建勤等^[15]研究了隧道埋深对二衬支护时机的影响。周勇^[16]提出了确定隧道二衬支护时机的数值计算方法。在现场监测方面,文献^[16-18]提出利用现场监测来选择合理的支护时机。来弘鹏等^[19]通过相似模型试验研究了不同地应力作用下公路隧道不同衬砌断面形式的受力性状,并分析了地应力以及不同衬砌断面形式对衬砌结构受力性状产生的影响。

另有研究表明,偏压荷载极易造成隧道衬砌开裂。周晓军等^[20]基于相似理论,以渝怀铁路渔塘湾隧道为模型,结合其所处的地质顺层偏压特点,对地质顺层岩体应用于隧道衬砌结构上的偏压荷载进行模拟,初步得到地偏压隧道周围岩石压力的分布特征及其与顺层倾角之间的关系,并探讨了顺层岩体隧道结构的形式和相应的支护措施。认为与顺层岩层下盘接触的隧道边墙与拱肩部位最易破坏。肖林萍等^[21]基于广州—惠州高速公路小金口双连拱隧道工程,在 II、III 类围岩条件下,运用试验手段研究

了双连拱隧道的施工方法、结构内力样式及围岩稳定性,发现隧道二次衬砌的内力分布规律为:对于轴力而言,随着上部荷载的增加,二次衬砌的轴力增大,仰拱与边墙结合处所受到的轴力最大,仰拱与拱顶所受的轴力其次。同时,仰拱与边墙结合处所受的弯矩也是最大,拱肩与边墙脚处受拉,仰拱、边墙及仰拱受压,并由此提出“中导坑扩展法”这种新的施工方法,对双连拱隧道的设计与施工具有重要参考价值。在隧道衬砌抗冻方面,谢红强等^[22]基于鹧鸪山隧址区水文、地质条件,结合现场对隧道主体结构及围岩温度的监测测试研究及结构和围岩的热力试验与数值模拟。得到寒冷地区隧道结构及围岩温度场的变化规律,从而为隧道的抗防冻设计提供参考。Zhou 等^[23-25]针对隧道围岩裂纹损伤演化进行了大量的理论与数值研究。

上述成果较为系统地研究了隧道衬砌的稳定性。但是,并没有针对带裂纹衬砌不同预制深度条件下裂纹扩展机理进行研究。本文利用 PFC 离散元颗粒流软件,基于隧洞开挖卸荷效应^[26-28]揭示了公路隧道含裂隙的二衬中应力分布规律和裂纹的扩展机理,并对初始裂纹不同预制深度条件下裂纹扩展规律进行了对比分析,揭示了带裂纹衬砌的损伤演化规律。

1 颗粒流概述

颗粒离散元(PFC)是一种基于离散元理论和显示差分算法而开发出来的计算机技术。其从基本粒子微观结构角度出发,认定粒子之间接触状态决定介质的基本特性。

颗粒流模拟材料的本构模型是通过接触本构模型来实现的,接触本构模型分为以下 3 种:1)接触刚度模型;2)接触滑动模型;3)黏结模型。接触本构模型是接触本构关系中最基本的一种模型,它是在颗粒接触力与相对位移之间规定弹性关系。接触刚度模型由两种接触模型构成,线性模型和简化的 Hertz-Mindlin 非线性接触模型。简化的 Hertz-Mindlin 非线性接触模型仅适用于模拟颗粒体系无黏结、小变形和只受压应力的情况。除了以上几种情况,通常情况一般使用线性模型。因此,本文主要介绍线性刚度模型。线性刚度模型由两个接触实体

(球体与球体或者球体与墙体)的法向刚度和切向刚度定义,认为两个接触实体的刚度串联在一起相互作用。采用此方法可以模拟材料中拉伸裂纹和剪切裂纹的起裂、扩展和连接过程。

2 试样生成与参数选取

在 PFC 中,通过对细观颗粒合成材料赋予变形和强度等参数,可以得到任意物理力学特征的模型,比如变形特性、强度特性等。为了得到模型符合期望的宏观物理力学行为,就必须联系模型某种力学特性和一系列与之有关系的材料参数特征即细观物理参数。这样就可以在固定颗粒尺寸和边界条件前提下,通过单轴、双轴或者巴西劈裂等数值模型试验标定细观与宏观的近似关系,如图 1 所示。本文采用单轴压缩试验拟合岩石的宏观参数(杨氏模量、单轴抗压强度和泊松比),从而确定颗粒和黏结的微观参数。

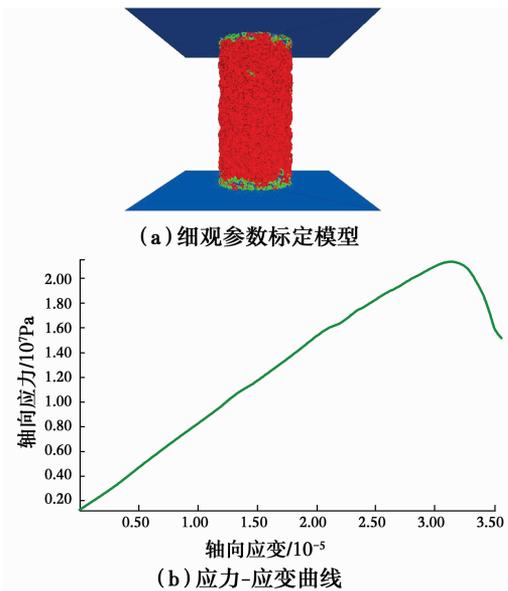


图 1 模型细观参数标定过程

Fig. 1 Calibration process of mesoscopic model parameters in PFC

图 2 为模拟衬砌裂纹扩展试验的示意图, PFC

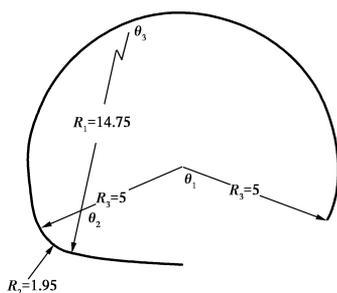


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of the Model

中生成的数值试样如图 3 所示。模型长 13 m,宽 12 m,颗粒微观参数见表 1。衬砌尺寸如图 3 所示,初衬厚度为 20 cm,二衬厚度为 55 cm,混凝土强度等级为 C30。

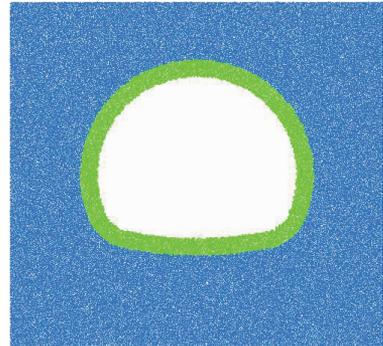


图 3 PFC 数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model in PFC2D

表 1 计算模型采用的细观参数

Table 1 Parameters of the particles in the numerical model

颗粒半径/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒等效弹性模量/GPa	摩擦系数	刚度比	平行粘	平行粘
					结抗张强度/($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	结内聚力/($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)
0.03~0.05	2 040	0.7	30	0.577	1	2.01×10^7 / 15×10^6

3 数值模拟分析

在数值模型的建立过程中,先建立由四面 wall 构成的 box 空间,然后,设置颗粒的半径和摩擦系数和孔隙比,在 box 的空间内生成颗粒小球,待模型稳定后,赋予颗粒黏结强度,采用平行黏结,隧道围岩采用点黏结,然后进行开挖,实现开挖卸荷条件下隧道衬砌中裂纹的扩展过程模拟。

建模完成后,由于隧道衬砌易在拱腰处产生裂纹,采用 fish 语言建立初始裂纹,针对带裂缝衬砌损伤演化进行数值模拟,位置如图 4 所示。预置了 3 种裂纹,其宽度为 2 mm,深度分别为 300、400、500 mm。在隧道的埋深为 27 m,隧道围岩为 V 级,混凝土等级为 C30 条件下,根据公路隧道衬砌设计规范计算竖向荷载为 464.17 kPa,水平荷载为 114.52 kPa。

图 5 表示预置裂纹的宽度为 2 mm,深度为 400 mm 的裂纹扩展规律和衬砌的破坏过程。其中,黑线表示预设裂纹,红线为扩展的拉伸裂纹(未出现剪切裂纹)。由图 5 可知:在计算步达到 163 000 时,隧道衬砌右侧拱肩处开裂,然后向衬砌深部扩展,并

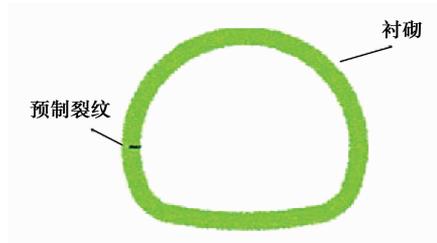


图4 预制裂纹的衬砌数值模型

Fig. 4 Position of the pre-existing crack on the lining in the numerical model

在 176 000 计算步时贯通衬砌。当计算步达到 187 000 步时,预置裂纹起裂,随着计算步的增加,裂纹与水平方向夹角大致呈 40° 向衬砌深部扩展,并在 198 000 计算步时发生贯通。当计算步达到 218 000 和 243 000 时,分别在衬砌拱顶及拱脚处出现贯通裂隙,并且裂隙数目稳定,不再继续增加。

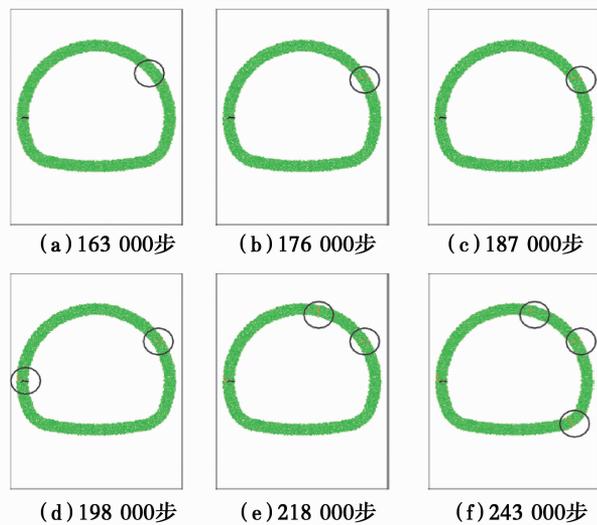


图5 不同计算步时裂纹扩展过程

Fig. 5 Growth process of the crack at different time step

由上述分析可知,拉应力导致拉伸裂纹(图5黑圈处)的产生,算例中并未出现剪切裂纹,说明衬砌破坏的主要原因为拉应力。首先,初始裂纹的起裂并未发生在预置裂纹的尖端,说明衬砌拱肩内侧是拉应力最大的位置。其次,受到预置裂纹的影响,左侧拱腰处也是较为危险的位置,在针对衬砌裂纹治理时,应予以重点考虑。

本文研究的内容是针对含裂隙的衬砌,经过计算,获得了裂隙张开度随计算步的变化曲线(见图6)。

图6为裂隙张开度为 2 mm,深度分别为 300、400、500 mm 时,裂隙张开度随时间的变化曲线。当预置裂隙深度为 300 mm 时,裂隙张开度在 6 000 计算步时开始增加;随着计算的进行张开度逐渐增大并稳定在 0.4 mm 左右,最后,在裂隙发生贯通时并

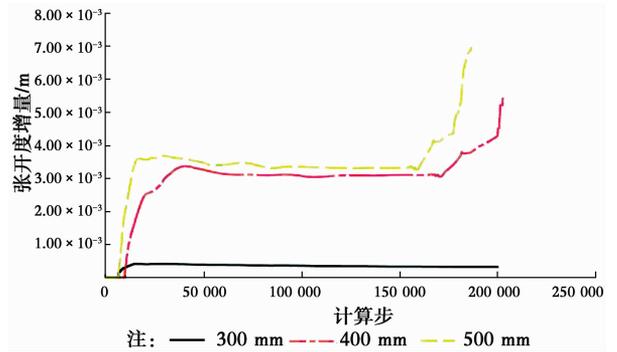


图6 裂纹张开度增量变化曲线(初始张开度 2 mm)

Fig. 6 Curve of expansion gap of different cracks (The initial value is 2 mm)

未产生张开度的跳跃式发展。当裂隙深度为 400 mm 时,裂隙张开度在 10 000 计算步时开始缓慢增加,没有明显的突变;在 187 000 计算步时,预置裂纹开始扩展,张开度明显增加;在 198 000 计算步时,预置裂纹贯通衬砌,产生跳跃式变化。与深度为 300 mm 的预置裂纹的张开度随计算步的变化曲线对比分析可知,当预置裂隙深度为 400 mm 时,衬砌的安全性有较大幅度的降低。当预置裂隙深度为 500 mm 时,预置裂隙的张开度在 6 000 计算步时开始增加,并且有较明显的突变;在 167 000 计算步时,预置裂纹开始扩展,张开度明显增加;在 178 000 计算步时,预置裂纹贯通衬砌,产生跳跃式变化,且增量值明显大于上述两个算例。图6表明,预置裂纹深度对衬砌破坏的时间和裂隙的张开度有较大影响,在实际工程中应予以重视,并在裂隙贯通衬砌前进行修复处理,以保证隧道安全。对比李治国等^[30]对裂纹的判定标准可知,本文案例中裂纹深度的扩展规律及对隧道衬砌张开度的影响规律与判定标准中的基本一致。

4 结论

1) 衬砌破坏的主要原因为拉应力,初始裂纹起裂并未发生在预置裂纹尖端,而是发生在衬砌拱肩内侧,说明衬砌拱肩内侧是拉应力最大的位置,受预置裂纹的影响,左侧拱腰处也是较为危险的位置。

2) 预置裂纹的深度对裂纹贯通时间有较大影响,随着预置裂纹深度的增加,预置裂纹贯通衬砌的时间逐渐减小。

3) 预置裂纹的深度对裂纹张开度的变化有较大影响,随着预置裂纹深度的增加,预置裂纹张开度逐渐增大,并在贯通衬砌时有明显突变,这样便于确定衬砌治理时机,对公路隧道安全评价有较好的理论支持。

参考文献:

- [1] AYDAN O. Crustal stress changes and characteristics of damage to geoenvironment structures induced by the Great East Japan Earthquake of 2011 [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2015, 74: 1057-1070.
- [2] CHIU Y C, WANG T T, HUANG T H. Investigating continual damage of a nineteenth century masonry tunnel [J]. *Proceedings of the Ice-Forensic Engineering*, 2014, 167: 109-118.
- [3] LEE C H, CHIU Y C, WANG T T, et al. Application and validation of simple image-mosaic technology for interpreting cracks on tunnel lining [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2013, 34(1): 61-72.
- [4] LEE C H, WANG T T. Invert anomalies in operational rock tunnels: appearance, causes, and countermeasures [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(3): 04015048.
- [5] PHILLIPS J. A quantitative evaluation of the sustainability or unsustainability of three tunnelling projects [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 51: 387-404.
- [6] WU H N, HUANG R Q, SUN W J, et al. Leaking behavior of shield tunnels under the Huangpu River of Shanghai with induced hazards [J]. *Natural Hazards*, 2014, 70(2): 1115-1132.
- [7] AMORIM D L N D, PROENCA S P B, FLOREZ-LOPEZ J. Simplified modeling of cracking in concrete: Application in tunnel linings [J]. *Engineering Structures*, 2014, 70(9): 23-35.
- [8] BIAN K, LIU J, XIAO M, et al. Cause investigation and verification of lining cracking of bifurcation tunnel at Huizhou Pumped Storage Power Station [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2016, 54(27): 123-134.
- [9] RICHARDS J A. Inspection, maintenance and repair of tunnels: international lessons and practice [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 1998, 13(4): 369-375.
- [10] ULUSAY R, AYDAN O, GENIS M, et al. Stability assessment of avanos underground congress centre (Cappadocia, Turkey) in soft tuffs through an integrated scheme of rock engineering methods [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1303-1321.
- [11] 方利成, 杜彬, 张晓峰. 隧道工程病害防治图集[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 53-72.
- FANG L C, DU L, ZHANG X F. Atlas of disease prevention and control of tunnel engineering [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001: 53-72. (in Chinese)
- [12] CHARPENTIER D, TESSIER D, CATHELIN M. Shale microstructure evolution due to tunnel excavation after 100 years and impact of tectonic paleo-fracturing: Case of Tournemire, France [J]. *Engineering Geology*, 2003, 70(1/2): 55-69.
- [13] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(Sup2): 441-448, 468.
- LI Z H, ZHU W C, FENG X T, et al. Effect of lateral pressure coefficients on damage and failure process of horseshoe-shaped tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Sup2): 441-448, 468. (in Chinese)
- [14] 杨建平, 陈卫忠. 小净距公路隧道支护时机对围岩稳定性影响研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 483-490.
- YANG J P, CHEN W Z. Effect of supporting time on stability of small spacing roadway tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 483-490. (in Chinese)
- [15] 方建勤, 夏才初. 隧道埋深对二衬合理支护时机影响分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(2): 263-268.
- FANG J Q, XIA C C. Analysis on relationship between tunnel depth and supporting time of secondary liner [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(2): 263-268. (in Chinese)
- [16] 周勇. 岩体流变情况下隧道合理支护时机的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2012, 33(1): 268-273.
- ZHOU Y. Numerical simulation for appropriate lining time of tunnel considering rock mass rheological conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1): 268-273. (in Chinese)
- [17] 李晓红, 靳晓光. 初期支护对软岩隧道围岩稳定性和位移影响分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(8): 1207-1210.
- LI X H, JIN X G. Discussion on influence of initial support to stability and deformation of surrounding rock mass in soft rock tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1207-1210. (in Chinese)
- [18] 刘宁. 深埋隧洞开挖围岩应力演化过程监测及特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(9): 1729-1737.
- LIU N. Monitoring and characteristics study of stress evolution of surrounding rock during deep tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1729-1737. (in Chinese)
- [19] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 公路隧道衬砌断面型式模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(6): 740-744.
- LAI H P, XIE Y L, YANG X H. Model test study on sectional form of highway tunnel lining [J]. *Chinese*

- Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6):740-744. (in Chinese)
- [20] 周晓军, 高杨, 李泽龙, 等. 地质顺层偏压隧道围岩压力及其分布特点的试验研究[J]. 现代隧道技术, 2006 43(1):12-21.
- ZHOU X J, GAO Y, LI Z L, et al. Experimental study on the uneven rock pressure and its distribution applied on a tunnel embedded in geologically bedding strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43 (1):12-21. (in Chinese)
- [21] 肖林萍, 赵玉光, 申玉生. 双连拱隧道结构内力样式及围岩稳定性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 24(23): 4346-4351.
- XIAO L P, ZHAO Y G, SHEN Y S. Model experimental study on style of structural internal force and stability of surrounding rock in double-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 24(23): 4346-4351. (in Chinese)
- [22] 谢红强, 何川, 李永林. 寒区隧道结构抗防冻试验研究及仿真分析[J]. 公路, 2006(2): 184-188.
- XIE H Q, HE C, LI Y L. A Study on frost resistance test of tunnel structure in cold areas and numerical simulation [J]. Highway, 2006 (2): 184-188. (in Chinese)
- [23] BI J, ZHOU X P. Numerical simulation of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel under dynamic unloading [J]. International Journal of Computational Methods, 2015, 12(3): 1550020.
- [24] ZHOU X P, BI J. Zonal disintegration mechanism of cross-anisotropic rock mass around a deep circular tunnel under dynamic unloading [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2012, 60(1): 15-22.
- [25] ZHOU X P, BI J, QIAN Q H. Numerical simulation of crack growth and coalescence in rock-like materials containing multiple pre-existing flaws [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3): 1097-1114.
- [26] 侯羽. 基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 2915-2924.
- HOU G Y. Numerical analysis of subway tunnel construction process based on excavation unloading effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1):2915-2924. (in Chinese)
- [27] 高峰. 隧道开挖模拟的支撑荷载法研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 70-77.
- GAO F. Research on support load method in simulation of tunnel excavation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 70-77. (in Chinese)
- [28] 李治国, 张玉军. 衬砌开裂隧道的稳定性分析及治理技术[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(1):26-31.
- LI Z G, ZHANG Y J. Stability analysis for tunnels with cracked linings and the techniques for repairing the cracked linings [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(1):26-31. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)