

双护盾隧道掘进机施工试验段 隧道结构力学性能研究^{*}

韩超¹ 张柯² 李春华³

(1. 河南建筑职业技术学院土木工程系, 450064, 郑州; 2. 中国科学院武汉岩土所, 430071, 武汉;
3. 中铁隧道局集团有限公司, 511458, 广州//第一作者, 讲师)

摘要 依托深圳地铁6号线梅林关站—翰林站区间隧道工程,通过现场试验,对双护盾隧道掘进机施工段的管片结构的围岩压力、轴力和弯矩进行了研究。研究结果表明:管片围岩压力变化主要分为下部注浆、上部注浆、缓慢变化和趋于稳定4个阶段,整体表现为上下大、左右小的“鸭蛋”形不均匀分布;管片轴力均为负值,即管片处于受压状态,整体表现为左上方大、右下方小的不均匀分布,管片承受偏压荷载,轴力最大值为112.87 kN,位于左拱腰处;衬砌环弯矩均为正值,即管片外侧受拉,衬砌环弯矩呈现上下大、左右小的分布规律,其弯矩最大值为11.68 kNm,位于隧道拱底处。

关键词 地铁隧道; 现场试验; 双护盾隧道掘进机; 围岩压力; 管片轴力; 衬砌环弯矩

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.008

Research on Double Shield TBM Construction Section Tunnel Structure Mechanical Behavior Based on Field Test

HAN Chao, ZHANG Ke, LI Chunhua

Abstract Based on the tunnel project from Meilinguan Station to Hanlin Station of Shenzhen Metro Line 6, the surrounding rock pressure, axial force and bending moment of segment structure in the construction section of double shield TBM are studied using field test. Research results show that the radial pressure variation of segment is mainly divided into four stages: lower grouting, upper grouting, slow change and tendency to stability, and the overall performance is uneven distribution of 'duck egg' shape, as in vertically large and horizontally small pattern. The axial force of the segments is negative, meaning that the segment is under compression, and the overall distribution is uneven, with the upper left being larger and the lower right being smaller. The segments bear bias load, with the maximum axial force of 112.87 kN and the displacement at

left arch waist. The lining ring bending moments are all positive, meaning that the bending moments of segment outer side are in tension, and lining ring bending moments in the whole ring are distributed in vertically large and horizontally small pattern. The maximum bending moment is 11.68 kNm, located at the bottom of the tunnel arch.

Key words metro tunnel; field test; double shield TBM (tunnel boring machine); surrounding rock pressure; segment axial force; lining ring bending moment

First-author's address Department of Civil Engineering, He'nan Technical College of Construction, 450064, Zhengzhou, China

目前,不同地质条件下城市轨道交通项目隧道工程的结构力学性能尚不能完全统一,管片结构力学机制尚不够清晰。针对管片结构力学性能的研究主要通过理论与试验的方法开展,例如:文献[1]分别通过建立有限元三维数值模型,结合施工工序、注浆材料与管片接头特性研究管片受力特征;文献[2]针对地铁工程,通过现场测试研究管片外围压力和管片应力的变化规律。在针对水下工程隧道结构的研究上,文献[3-5]研究了管片在生命周期内的结构力学特性。此外,文献[6-7]仅针对软岩地层大直径隧道工程开展了研究,分析研究了管片结构内力的变化特征。

以上研究大多依托盾构隧道工程,而对于双护盾TBM(隧道掘进机)施工的隧道管片结构力学性能研究甚少。为此,本文依托深圳地铁6号线梅林关站—翰林站区间隧道工程开展管片结构力学性能研究,以期城市轨道交通工程的设计与施工提供参考。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51478125);中国中铁股份有限公司研究开发计划项目(2019-重点-73)

1 工程概况

深圳地铁 6 号线二期工程北起深圳北站,南至科学馆站,线路全长约 11.8 km。梅林关站—翰林站隧道区间工程沿线穿越南坪快速路、东江供水干线隧道、厦深铁路、新彩隧道等,全长约 2 312 m,其

中,双护盾 TBM 施工段长度为 1 965 m。如图 1 所示,该隧道工程的最大埋深为 137 m,上覆人工填土、残积土及粉质黏土,下伏全风化至中风化花岗岩,隧道围岩等级为Ⅱ—Ⅴ级,平均饱和单轴抗压强度为 180 MPa。双护盾 TBM 施工段连续掘进距离长,沿途有局部破碎带、软弱地层等不良地质。

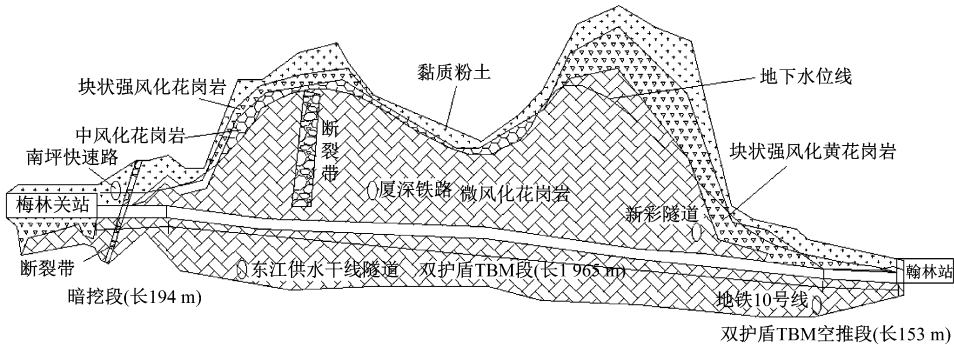


图 1 梅林关站到翰林站隧道区间地质剖面图
Fig. 1 Geological profile of tunnel interval from Meilinguan Station to Hanlin Station

2 现场试验

2.1 试验方案设计

如图 2 所示,该隧道的管片外径为 6.2 m,厚度为 0.4 m,宽度为 1.5 m。每环管片由 3 个标准块(A1、A2、A3)、2 个邻接块(B、C)和 1 个楔形块(K)组成,拼装时采用弯螺栓连接,管片背后采用豆砾石注浆回填。

土应变计。管片浇筑混凝土前,将监测仪器绑扎或焊接固定在钢筋笼上,现场施工实景如图 3 所示。

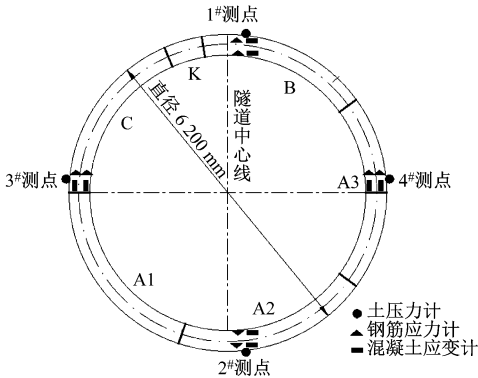


图 2 隧道管片监测仪器布置图

Fig. 2 Layout of tunnel segment monitoring instrument

本文选取在埋深 62 m 处的隧道断面进行测试,该断面位于微风化花岗岩地层。将监测仪器分别安装在隧道断面上下左右对称的位置,即在拱顶处设 1#测点、拱底处设 2#测点、左边墙设 3#测点、右边墙设 4#测点。在每块管片的外侧安装 1 个土压力计,在内外侧各安装 1 个钢筋应力计和 1 个混凝土

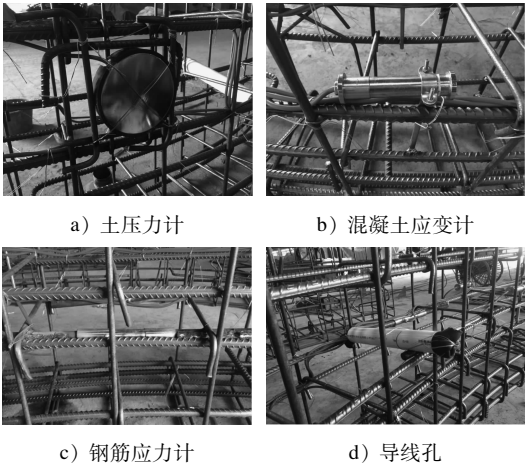


图 3 将测量仪器安装在钢筋笼上

Fig. 3 Installation of measuring instrument on the reinforcement cage

2.2 监测仪器设备

本文选用的监测仪器如表 1 所示。采用多通道振弦式采集仪进行长期跟踪,以读取并记录数据。

3 试验结果及分析

3.1 围岩压力

图 4 为围岩压力随时间变化曲线。受管片注浆压力的影响,围岩压力主要经历了下部注浆、上部注浆、缓慢变化、趋于稳定 4 个变化阶段。由图 4 可

表 1 监测仪器及其参数

Tab. 1 Monitoring instrument and its parameters			
仪器名称	型号	测量误差/%	可测量的最大值
土压力计	HR-TYJ2020	>0~0.05	6 MPa
钢筋应力计	GXR-1011	>0~0.05	100 MPa
混凝土应变计	YXR-4050	>0~0.02	±1 500 $\mu\varepsilon$

注： $\mu\varepsilon = 10^{-6} \varepsilon$ ， ε 为应变。

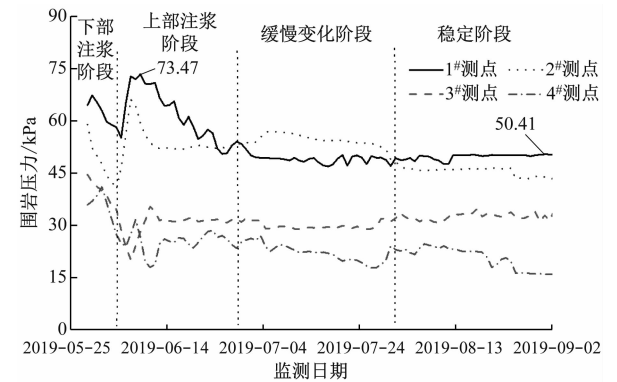


图 4 围岩压力随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of surrounding rock radial pressure changing with time

知,围岩压力在变化阶段的最大值为 73.47 kPa,位于隧道拱顶处;变形稳定后的最大值为 50.41 kPa。在整个变化过程中,围岩压力较小,岩石地层隧道环外压力主要为充填注浆引起的压力。

从图 5 的围岩压力分布图可以看出,不同测点处围岩压力的变化情况不同,1#测点和 2#测点处围岩压力较大,3#测点和 4#测点处的围岩压力则相对较小,围岩压力整体表现为上下大、左右小的“鸭蛋”形。

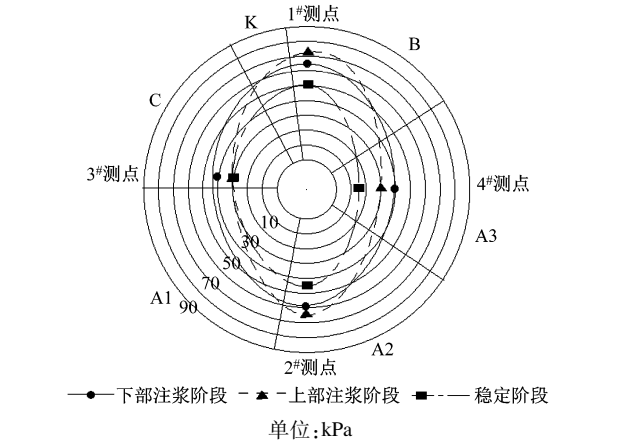


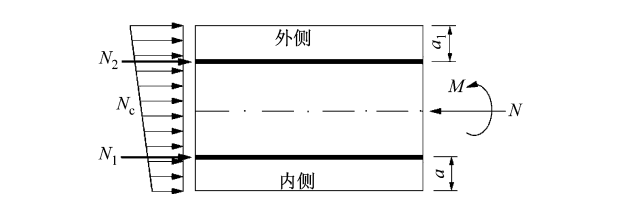
图 5 围岩压力分布图

Fig. 5 Radial pressure distribution

3.2 管片结构内力

沿管片圆环切线方向取 1 个计算单元,建立矩

形单元力学模型,如图 6 所示。



注： N ——管片轴力； M ——衬砌环弯矩； N_c ——混凝土轴力； N_1 ——内侧钢筋轴力； N_2 ——外侧钢筋轴力； a ——内侧钢筋保护层厚度； a_1 ——外侧钢筋保护层厚度。

图 6 管片的矩形单元力学模型

Fig. 6 Rectangular unit mechanical model of segment

对管片环向受力进行偏心受压计算,得到钢筋混凝土管片力的平衡方程为:

$$N = N_s + N_c = n(N_1 + N_2) + bh \frac{\sigma_{c1} + \sigma_{c2}}{2} \quad (1)$$

$$M = M_s + M_c = n \left[N_2 \left(\frac{h}{2} - a_1 \right) - N_1 \left(\frac{h}{2} - a \right) \right] + bh^2 \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{12} \quad (2)$$

式中:

- N_s ——钢筋轴力;
- n ——管片主筋数量;
- b ——管片幅宽;
- h ——管片厚度;
- σ_{c1} ——内侧混凝土应力;
- σ_{c2} ——外侧混凝土应力;
- M_s ——钢筋弯矩;
- M_c ——混凝土弯矩。

根据钢筋和混凝土的协调变形机制,可得:

$$\sigma_s/E_s = \sigma_c/E_c \quad (3)$$

式中:

- σ_s ——钢筋应力;
- σ_c ——混凝土应力;
- E_s ——钢筋弹性模量;
- E_c ——混凝土弹性模量。

根据管片设计,管片环向内外侧钢筋均为 12 根 (即 $n = 12$), $a = 40 \text{ mm}$, $a_1 = 50 \text{ mm}$, $h = 0.4 \text{ m}$, $b = 1.5 \text{ m}$, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $E_c = 3.45 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。将上述数据代入式 (1) ~ (3), 可计算得到管片的轴力 N 和弯矩 M , 其中, 取弯矩外侧受拉为正, 轴力受拉为正。

3.2.1 管片轴力

图 7 为管片轴力随时间变化曲线。由图 7 可

知:管片轴力均为负值,且呈现不均匀受压状态;管片拼装完成后,在豆砾石注浆回填层及围岩压力作用下,前 11 d(2019-05-29 至 2019-06-08)轴力增长速度最快,其最大增长速率达 2.82 kN/d;前期注浆与二次补浆完成后,即管片拼装完成后约 70 d(2019-08-07),管片轴力变化基本趋于稳定。从各阶段管片轴力的变化情况看,注浆阶段管片轴力的增长速率较大,其最大轴力为 104.38 kN(位于 3#测点处),管片轴力整体呈现左上方大、右下方小的不均匀分布特征。在缓慢变化阶段,管片轴力的变化速率较小,3#测点处的最大轴力为 112.87 kN;稳定阶段 3#测点处的最大轴力值为 109.83 kN。

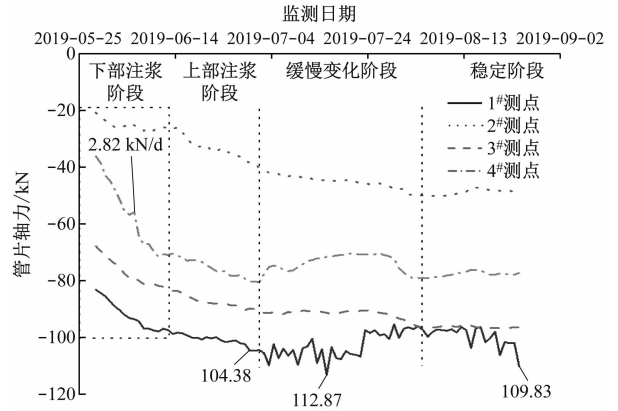


图 7 管片轴力随时间变化曲线

Fig. 7 Curve of segment axial force changing with time

如图 8 所示,在不同施工阶段管片轴力的分布不均匀,呈现出左上方大、右下方小的分布特征,此时管片承受偏压荷载,这对管片的结构及隧道安全不利。因此,在管片设计及拼装施工时,应尽可能减少左上部管片错台,同时应提高接缝处的防水性能。

3.2.2 衬砌环弯矩

图 9 为衬砌环弯矩随时间变化曲线。由图 9 可知:弯矩均为正值,即管片外侧受拉;在注浆阶段,受管片拼装和注浆压力的影响,衬砌环弯矩呈总体现逐渐增大的趋势;在注浆压力影响消散后,弯矩变化缓慢,最后趋于稳定,其变化规律与管片轴力的变化规律相似。

从整环管片看,衬砌环弯矩呈现上下大、左右小的分布规律,如图 10 所示。因此,在施工与后续线路运营过程中,应密切关注隧道上下方管片结构挤压破损等病害,以及及时发现隧道安全隐患。

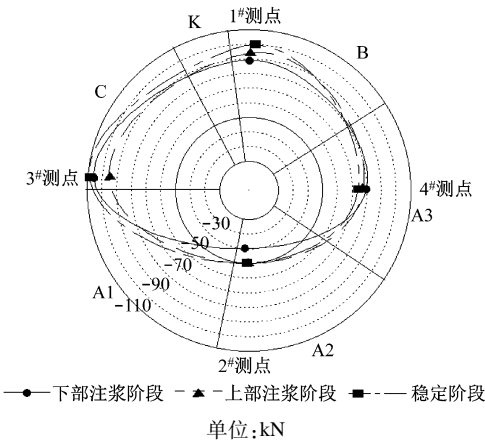


图 8 管片轴力分布图

Fig. 8 Axial force distribution of segment

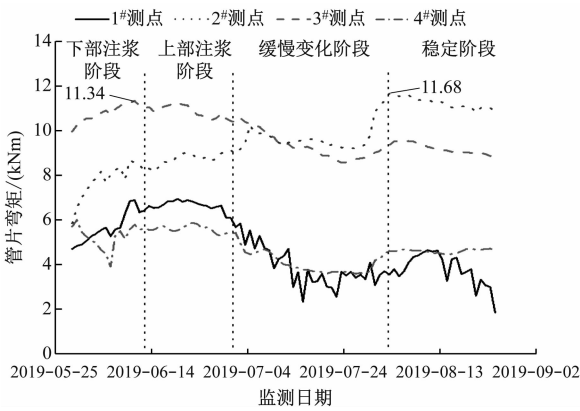


图 9 衬砌环弯矩随时间变化曲线

Fig. 9 Curve of lining ring bending moment changing with time

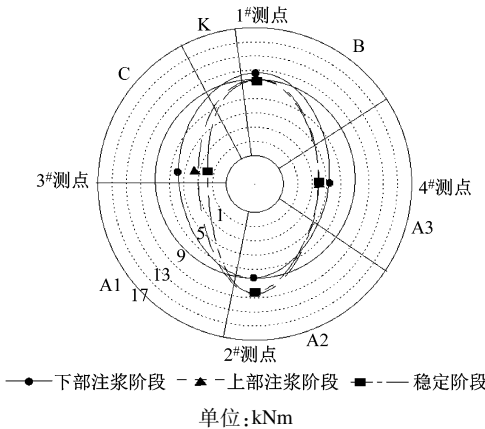


图 10 衬砌环弯矩分布图

Fig. 10 Lining ring bending moment distribution

4 结语

1)管片围岩压力变化主要分为下部注浆、上部

(下转第 46 页)

- [2] 李风华. 城市轨道交通 CBTC 系统区域控制器的研究与仿真[D]. 兰州:兰州交通大学,2011.
LI Fenghua. Research and simulation on zone controller of the CBTC system for urban rail transit[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011.
- [3] 吴晓琴, 黄文培. Hadoop 安全及攻击检测方法[J]. 计算机应用, 2020(增刊1):118.
WU Xiaolin, HUANG Wenpei. Hadoop security and attack detection methods[J]. Journal of Computer Application, 2020(S1):118.
- [4] 李剑. 信息安全产品与方案[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2008:267.
LI Jian. Information security products and solutions[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Publishing House, 2008:267.
- [5] 杨茂云. 信息与网络安全实用教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:200.
YANG Maoyun. Practical course of information and network security[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007:200.
- [6] 刘帅, 李智, 龚建村, 等. 基于奇异谱分析的空间环境数据插补方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016(4):829.
LIU Shuai, LI Zhi, GONG Jiancun, et al. Gap filling method for space environment data based on singular spectrum analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016(4):829.
- [7] 王林鸿. 数控工作台非线性动态特性的辨识研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
WANG Linhong. Research on nonlinear dynamic characteristics identification of NC table[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [8] 刘攀峰. 安全相关软件的设计方法研究及应用[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
LIU Panfeng. Research and application of the safety-related software design method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [9] 徐万里. 城市轨道交通列车控制系统集成项目的风险管理[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
XU Wanli. Risk management of urban transit train control system integration project[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [10] 巩林明, 张振国. 入侵检测 ID 技术的探讨[J]. 南北桥, 2008(11):25.
GONG Linming, ZHANG Zhenguo. Discussion on ID technology of intrusion detection[J]. South North Bridge, 2008(11):25.
- (收稿日期:2021-05-21)

(上接第 42 页)

注浆、缓慢变化和趋于稳定 4 个阶段。围岩压力整体表现为上下大、左右小的“鸭蛋”形不均匀分布,在管片设计时应应对隧道上下方进行局部加强。

2)管片轴力均为负值,即管片处于受压状态,其中左拱腰处的轴力最大。管片轴力整体呈现左上方大、右下方小的不均匀分布规律,在管片拼装施工时应可能减少左上部管片错台。

3)衬砌环弯矩均为正值,即管片外侧受拉,其弯矩最大值位于拱底处,衬砌环弯矩呈现为上下大、左右小的分布规律,在施工与后续运营中应密切关注隧道上下方管片结构挤压破损等病害。

参考文献

- [1] 林荣安, 刘伯莹. 富水淤泥质软土地层盾构隧道管片受力特征研究[J]. 中国公路学报, 2018(9):112.
LIN Rongan, LIU Boying. Mechanical characteristic investigation of shield tunnel segment in water-rich mucky soft stratum[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018(9):112.
- [2] 张君禄, 段峰虎, 廖文来, 等. 湛江湾跨海盾构隧道管片现场监测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(增刊1):2878.
ZHANG Junlu, DUAN Fenghu, LIAO Wenlai, et al. Field monitoring experimental study of sea-crossing shield tunnel segment in Zhanjiang Bay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(S1):2878.
- [3] 周济民, 何川, 肖明清, 等. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析[J]. 铁道学报, 2012(7):115.
ZHOU Jimin, HE Chuan, XIAO Mingqing, et al. Field test and numerical simulation of mechanics of segment lining of Shiziyang underwater shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012(7):115.
- [4] 梁禹, 苏文辉, 方理刚, 等. 大直径江底盾构隧道衬砌结构受力现场测试与分析[J]. 隧道建设, 2014(7):637.
LIANG Yu, SU Wenhui, FANG Ligang, et al. Field test and analysis on stress of lining of large-diameter river-crossing shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2014(7):637.
- [5] 唐孟雄, 陈如桂, 陈伟. 广州地铁盾构隧道施工中管片受力监测与分析[J]. 土木工程学报, 2009(3):118.
TANG Mengxiong, CHEN Rugui, CHEN Wei. Stress monitoring and internal force analysis of Guangzhou metro shield tunnel segment during construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(3):118.
- [6] 叶冠林, 王吉云, 王建华, 等. 超大断面盾构隧道管片施工荷载现场监测研究[J]. 现代隧道技术, 2010(5):85.
YE Guanlin, WANG Jiyun, WANG Jianhua, et al. In-situ monitoring of construction loading acting upon segments of a super large shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010(5):85.
- [7] 张恒, 陈寿根, 谭信荣, 等. 不同地层盾构隧道管片力学行为研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015(4):845.
ZHANG Heng, CHEN Shougen, TAN Xinrong, et al. Research on mechanical behaviour of segmental structure of shield tunnel in different strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015(4):845.

(收稿日期:2020-12-08)