

软硬不均地层及不同开挖顺序下双顶管隧道施工 对管片及地层的影响*

刘明友¹ 韦宏业² 么晓辉¹ 马少坤² 尉强¹ 刘草平¹ 邵羽^{3**}

(1. 中铁上海工程局集团第五工程有限公司, 530100, 南宁; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 530004, 南宁;

3. 广西交通设计集团有限公司, 530029, 南宁//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 双顶管隧道穿越软硬不均地层时往往会导致周围地层变形、管片受损等一系列问题。为防止这些问题发生, 应深入开展双顶管施工时地层的软硬程度、不同施工顺序对周围地层及管片的影响。方法: 以南宁市平花河排水干渠顶管工程为背景, 采用数值模拟方法, 建立了三维有限元隧道开挖模型, 分别研究了左右线同步开挖、先左线后右线两种开挖顺序下隧道横截面中黏土面积占比 r_1 不同取值的 5 种工况, 并对双顶管穿越不同软硬组合地层对周围土体变形及管片应力进行了分析。结果及结论: 双顶管隧道穿越不同软硬组合地层所致地面沉降差异显著, 地面沉降随 r_1 的增大而增大, 同步开挖工况下全断面黏土层的地面沉降最大值约为全断面石灰岩的 2.2 倍; 双隧道先后开挖所致地面沉降值约为左右线同步开挖时的 1.1 倍; 当隧道顶管机在监测断面往前开挖 2 倍隧道直径距离后, 监测断面的地表沉降基本上不再发生变化; 管片最大 Mises 应力随 r_1 的增大而增大。

关键词 双顶管施工; 开挖顺序; 隧道横截面中黏土面积占比; 地面沉降; 管片 Mises 应力

中图分类号 U455.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.025

Impact of Double Jacking Tunnel Construction on Pipe Segments and Strata under Uneven Soft-Hard Soil Conditions and Different Excavation Sequences

LIU Mingyou, WEI Hongye, ME Xiaohui, Ma Shaokun, WEI Qiang, LIU Caoping, SHAO Yu

Abstract Objective: Double-top tube tunnels crossing uneven soft and hard strata often lead to a series of problems such as deformation of surrounding strata and damage to pipe segments. In order to prevent these problems from occurring fre-

quently, it is necessary to carry out in-depth investigation into the softness and hardness of strata as well as the effect of different construction sequences on the surrounding strata and pipe segments. **Method:** Based on the drainage channel pipe jacking project of Pinghua River in Nanning City, a three-dimensional finite element tunnel excavation model is established using numerical simulation methods. Five different working conditions are selected based on the proportion of clay area r_1 in the tunnel cross-section under two excavation sequences: synchronous excavation of the left and right lines, and excavation of the left line first and then the right line. The deformation of the surrounding soil and the stress of the pipe segments during the double culvert crossing through different soft and hard soil combinations are analyzed. **Result & Conclusion:** The ground settlement caused by the double jacking pipe crossing various soft-hard strata is significantly different, which increases with the increase of r_1 , and the maximum of the entire cross-section clay layer under synchronous excavation is about 2.2 times that of the entire cross-section limestone. The ground settlement caused by the excavation of the double jacking pipe in sequence is about 1.1 times that of the synchronous excavation of the left and right lines. When the tunnel jacking machine excavates forward 2 times the diameter distance of the tunnel at the monitoring section, the ground surface settlement does not change significantly. The maximum Mises stress of the pipe increases with the increase of r_1 .

Key words construction of double pipe jacking; construction sequence; proportion of clay area in the tunnel cross-section; surface subsidence; segment Mises stress

First-author's address The Fifth Engineering of Shanghai Civil Engineering Group Co., Ltd., 530100, Nanning, China

* 国家自然科学基金项目(41362016); 中国博士后科学基金项目(2019M663874XB); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD20238069); 广西自然科学基金重点项目(2020GXNSFDA238024)

** 通信作者

在实际工程施工中,地层往往因风化程度的不同形成软硬地层。当隧道穿越风化程度不同形成的软硬地层时,施加施工荷载造成围岩受力不均匀,进而导致周围土层变形过大,甚至导致管片因应力过大发生破损的情况^[1]。国内外专家针对软硬地层中隧道开挖对周围环境的影响开展了相关研究。文献[2]采用室内试验和离散元的手段,对比分析了单一土层和软硬地层中盾构隧道开挖所致地面沉降及深层土体沉降槽形态特征;文献[3]采用有限元法,对双护盾 TBM(隧道掘进机)穿越上软下硬、上硬下软等 4 种不同组合地层时 TBM 与围岩间的相互作用机理进行了探讨;文献[4]对不同复合比地层中盾构隧道施工引起的地层沉降差异进行研究,提出了隧道穿越软硬复合地层时的施工控制措施;文献[5]采用离散元法,对硬岩面积占掌子面总面积不同比例时隧道掘进对周围地层的影响进行了研究;文献[6]以实际工程为背景,对上软下硬地层中地铁隧道设计、施工中的重难点进行了讨论。上述文献均为单隧道穿越软硬地层工况下的研究,而平行双隧道穿越软硬地层施工时对管片结构和地层的影响鲜有研究。

本文以广西壮族自治区南宁市的平花河上游段排水干渠顶管工程为背景,对双顶管施工所致地层变形及管片应力分布进行研究,着重分析不同软硬组合地层、不同施工顺序下地层变形及管片应力的影响规律。

1 工程概况

平花河上游段排水干渠顶管工程为双顶管施工,沿线地层复杂多样,其中有长度为 126.1 m 的区间段穿越上部为黏土、下部为中风化石灰岩的复合地层。该复合地层上、下部土体物理力学参数差异大,施工所致的地层变形较难预测。该工程顶管管片内径为 4.0 m,外径为 5.0 m,每环管片长度为 2.5 m。隧道覆土厚度为 9.0 ~ 13.5 m,2 个顶管隧

道平行布置,隧道间净距为 5.0 m。

2 双顶管掘进的数值模拟

2.1 模型构建

隧道开挖的影响范围一般为 3~5 倍隧道直径范围^[7],因此,本文构建的模型尺寸为 100 m(长)×100 m(宽)×50 m(高),如图 1 所示。其中: $y=0$ 为隧道始发井位置; y 向以顶管开挖方向为正向。

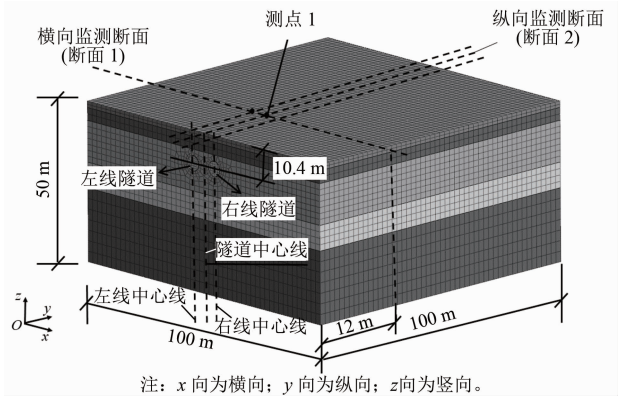


图 1 整体模型网格划分

Fig. 1 Overall mesh of numerical simulation model

隧道注浆层厚度为 0.02 m,左线隧道、右线隧道的中心到地面的距离为 10.4 m,地下水位位于地面以下 2.0 m 处。模型的土体及注浆层采用三维实体单元,盾壳及管片采用板单元模拟,通过改变注浆层的材料属性来实现注浆效果。左右线隧道均开挖 10 环,每环长度均为 2.5 m。隧道开挖涉及到掘进压力、注浆压力及千斤顶推力 3 个参数。

2.2 模型参数值的选取

文献[8-9]提出了三轴试验割线模量、固结试验切线模量、卸载再加载试验的卸载再加载模量 3 个参数的设定方法。本文的土体本构模型采用修正的摩尔-库伦模型,基于文献[8-9]提出的方法,设定模型各土层的物理力学参数值如表 1 所示,结构材料属性参数值如表 2 所示。

表 1 模型中各土层的物理力学参数取值

Tab. 1 Values of physical-mechanical parameters for each soil layer in the model

土层名称	重度/ (kN/m^3)	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa	孔隙比	三轴试验割线 模量/ MPa	固结试验切线 模量/ MPa	卸载再加载试验的卸载 再加载模量/ MPa
素填土①	18.0	5.0	10.0	0.95	15.0	15.0	45.0
含砂砾石黏性土②	18.4	9.3	33.4	1.03	30.0	30.0	90.0
黏土④ ₁	19.7	9.0	36.8	0.82	31.2	31.2	80.6
石灰岩⑤ ₁	23.0	20.0	80.0		75.0	75.0	225.0
石灰岩⑤ ₂	24.0	30.0	100.0		75.0	75.0	225.0

表 2 结构材料属性的参数取值

Tab.2 Parameters values for structure material properties

项目	弹性模量/GPa	重度/(kN/m³)	泊松比
管片	38	25	0.20
盾壳	250	78	0.20
注浆层	30	20	0.25

2.3 计算模拟方案

有限元模型模拟的顶管施工步骤与实际施工步骤相同,采用激活和钝化单元模拟顶管的掘进过程。以全断面黏土层工况计算采用的掘进参数值为例,根据文献[10],掘进压力取隧道掌子面中心处的侧向主动土压力,通过计算得到掘进压力为120 kPa,注浆压力为150 kPa,千斤顶推压力为120 kPa。设 S_1 、 S_2 分别为黏土、石灰岩在横截面上的面积,黏土面积占比 $r_1=[S_1/(S_1+S_2)]\times 100\%$ 。根据不同的 r_1 ,本文考虑双顶管采用两种不同的开挖顺序,每个开挖顺序下均设计了五种不同的复合地层工况,分析各工况下对周围土层和管片结构的影响。其模拟工况如表3所示。

表 3 数值模拟工况

Tab.3 Numerical simulation of working conditims

开挖顺序	工况序号	$r_1/\%$
左右线同步开挖	1	100
	2	75
	3	50
	4	25
	5	0
先左线后右线开挖	6	100
	7	75
	8	50
	9	25
	10	0

3 数值模拟结果分析

3.1 横向地面沉降

图2为断面1各工况下的横向地面沉降图,横轴取往右线隧道方向为负。

1) 如图2 a)所示,左右线同步开挖下,当 r_1 从0增至100%时,断面1的地面沉降最大值从1.24 mm增加到2.78 mm,其增幅随 r_1 的增加而增加,沉降槽宽度不变。全断面黏土层(工况5)地面沉降最大值约为全断面石灰岩(工况1)的2.2倍。

2) 如图2 b)所示,先左线后右线开挖下,地面沉降值随 r_1 的增大而增大,左线开挖完成后地面沉降最大值达到1.78 mm;后续右线施工完成后地面沉降最大值增至2.92 mm。

3) 先左线后右线开挖引起的地面沉降最大值

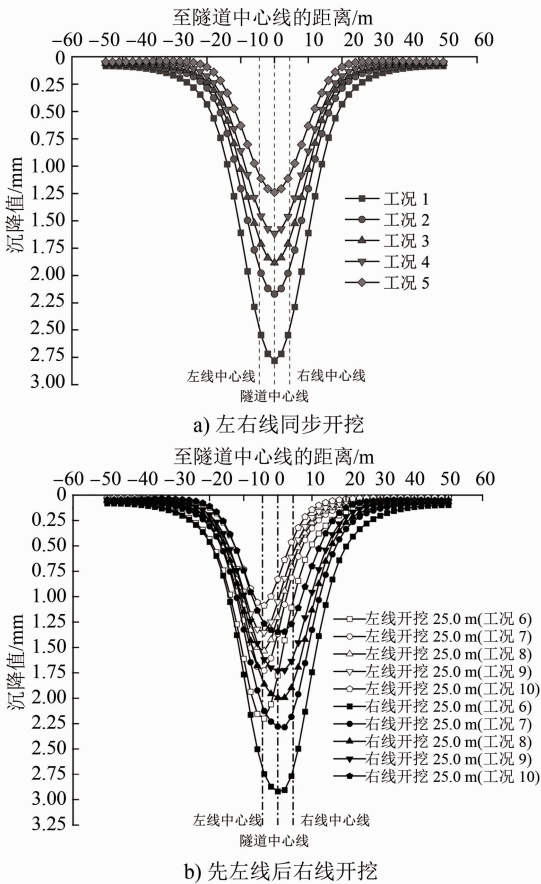


图 2 断面 1 各工况下的横向地面沉降图

Fig. 2 Lateral ground settlement maps of section 1 under various working conditions

约为左右线同步开挖引起的地面沉降最大值的1.1倍。这主要是由于后行隧道施工造成了先行隧道周围土体的二次扰动,打破了土体的稳定状态,应力重新分布。

3.2 纵向地面沉降

图3为断面2各工况下的纵向地面沉降图。由图3可知,横轴=0处(即图1中 $y=0$ 处)为始发井,横轴以顶管开挖方向为正向。在隧道掌子面($y=25$ m处)前方5倍隧道直径距离($y=50$ m)处,其地面沉降接近于0,隧道开挖的影响可以忽略不计;先左线后右线开挖所致的纵向地面沉降较左右线同步开挖大; r_1 越大,双隧道开挖所致的纵向地面沉降越大。

3.3 测点 1 的地面沉降

图4为测点1的地面沉降变化曲线。由图4可知:左右线同步开挖下,双顶管通过测点1所在断面($y=12$ m)时,测点1的地面沉降变化速率最大;通过测点1所在断面后,地面沉降变化速率逐渐减小。先左线后右线开挖下,测点1的地面沉降变化速率

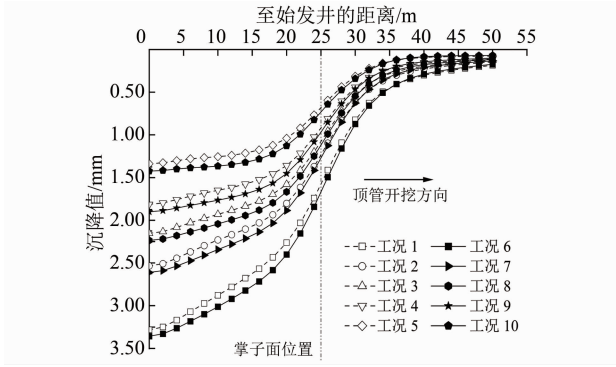


图 3 断面 2 各工况下的纵向地面沉降图

Fig. 3 Longitudinal ground settlement map of Section 2 under various conditions

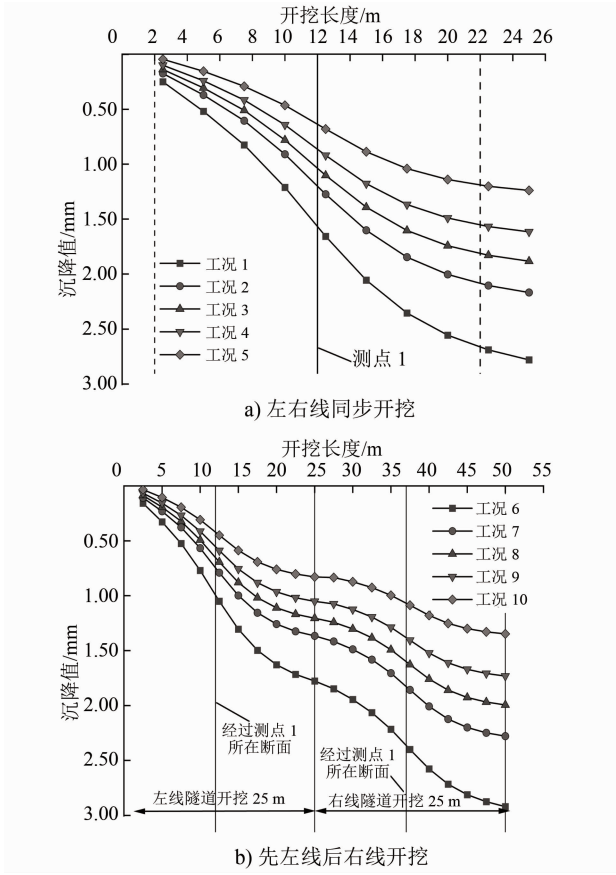


图 4 测点 1 各工况下的地面沉降变化曲线

Fig. 4 Ground settlement curves of point 1 under various working conditions

可分为先增加后减小的两个变化阶段。在两种开挖顺序下,随着开挖的进行,测点 1 的地面沉降随 r_1 的增加逐渐增大;当顶管机在监测点往前开挖 2 倍隧道直径距离 ($y=22\text{ m}$ 处)后,测点 1 上方土体已完成固结沉降。

3.4 断面 1 地面水平位移

图 5 为断面 1 各工况下的地面水平位移变化曲

线,水平位移取向右线隧道移动为正。由图 5 可知:不同开挖顺序下,隧道周围土体主要呈现向双隧道中间处的水平位移;随着掌子面中 r_1 的增大,地面水平位移也在增大;由于后开挖隧道对已施工隧道的扰动作用,先左线后右线工况下的地面水平位移比左右线同步开挖工况要大。

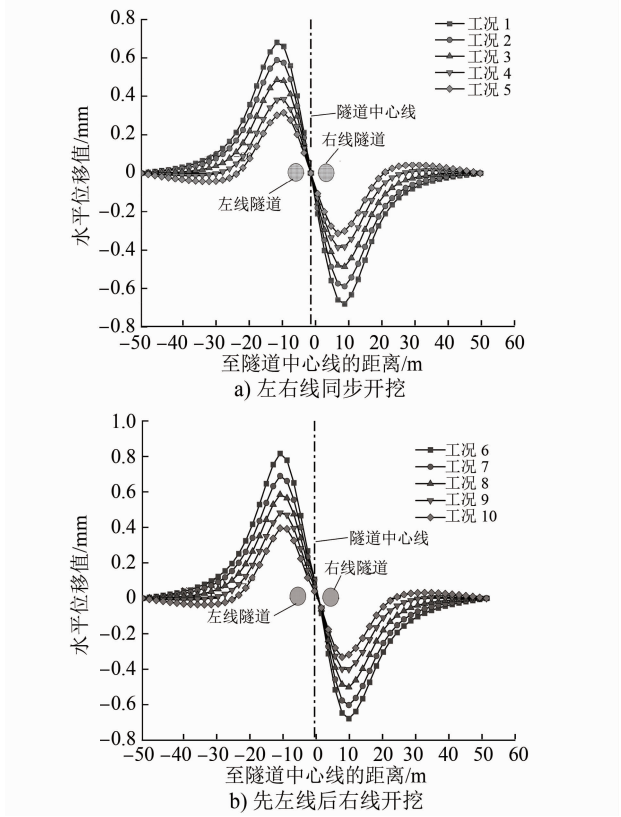


图 5 断面 1 各工况下的横向地面水平位移变化曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves under various conditions of section 1

3.5 管片应力

图 6 为各工况下左线管片的最大 Mises 应力变化曲线图。由图 6 可知:掌子面处 r_1 对管片应力有显著影响;软硬地层工况下,管片最大应力随 r_1 的增大而增大,其主要原因是受隧道施工所致的地层损失影响;与黏土相比,岩层承担了更多因隧道施工所致的附加应力,从而使管片承担了相对较小的附加荷载;施工顺序对管片应力的影响显著,先左线后右线开挖所致的最大 Mises 应力($1\,278\text{ kPa}$)约为左右线同步开挖所致的最大 Mises 应力($1\,148\text{ kPa}$)的 1.1 倍。

4 结论

1) 不同软硬组合地层对顶管施工所致地面沉降影响显著,其地面沉降随掌子面 r_1 的增大而增大。

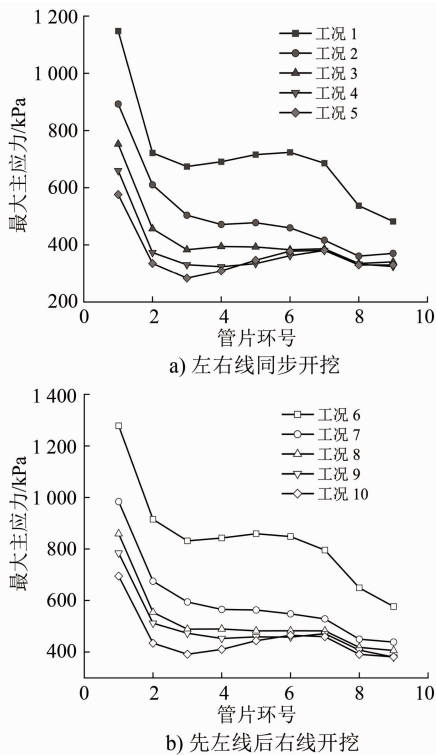


图6 各工况下左线管片的最大 Mises 应力变化曲线

Fig. 6 Maximum Mises stress curves in the left line segment under various working conditions

2) 双隧道不同施工顺序对地面沉降影响显著。在同一软硬组合地层(即 r_1 相同)时,双隧道先后开挖所致地面沉降值约为同步开挖的1.1倍。

3) 随着隧道的开挖,监测点的地面沉降受 r_1 的影响逐渐变大。当隧道顶管机在监测断面往前开挖两倍隧道直径距离后,监测断面的地表沉降基本不再发生变化。

4) 地面土体产生向两隧道中心线的水平位移,其位移随 r_1 的增大而增大,先后开挖所致地面水平位移比同步开挖的大。

5) 软弱地层组合、开挖顺序均对管片应力有显著的影响,先后开挖所致的最大 Mises 应力约为同步开挖的1.2倍,且随 r_1 的增加而增大。

参考文献

- [1] 何金峰. 土石交界地层隧道开挖围岩与支护结构稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- HE Jinfeng. Stability analysis of surrounding rock and supporting structure in tunnel excavation in soil-rock interface stratum [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [2] 王俊, 何川, 胡瑞青, 等. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 953.

WANG Jun, HE Chuan, HU Ruiqing, et al. Soil disturbance induced by EPB shield tunnelling in upper-soft and lower-hard ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 953.

- [3] 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.
- CHENG Jianlong, YANG Shengqi, DU Likun, 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.
- [4] 周力军, 张孟喜, 王维, 等. 广州上软下硬复合地层中盾构隧道施工影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10): 113.
- ZHOU Lijun, ZHANG Mengxi, WANG Wei, et al. Analysis of the influence of mixed stratum of up soft and down hard on shield tunnel construction in Guangzhou[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10): 113.
- [5] 何祥凡. 盾构隧道穿越上软下硬地层扰动机理及应对措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- HE Xiangfan. Research on the disturbance mechanism and counter measures of shield tunnel crossing upper-soft lower-hard stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [6] 张亚洲, 温竹茵, 由广明, 等. 上软下硬复合地层盾构隧道设计施工难点及对策研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 669.
- ZHANG Yazhou, WEN Zhuyin, YOU Guangming, et al. Difficulties and countermeasures in design and construction of shield tunnels in upper-soft and lower-hard stratum[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 669.
- [7] 张云军, 宰金珉, 王旭东. 隧道开挖对周围土体的影响分析[J]. 建筑结构, 2006, 36(增刊1): 833.
- ZHANG Yunjun, ZAI Jinmin, WANG Xudong. Research on influence of soil due to tunnel excavation[J]. Building Structure, 2006, 36(S1): 833.
- [8] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766.
- WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1766.
- [9] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHOU Enping. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [10] 路平. 基于模糊理论的盾构掘进参数对周围土体变形影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LU Ping. A fuzzy theory-based study on the influence of driving parameters to the surrounding soil deformation in shield tunnelling [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

(收稿日期: 2021-05-05)