

掘进坡度对地面出入式盾构法隧道结构受力变形的影响

刘智辉, 朱叶艇

(上海城建隧道装备有限公司, 上海 200137)

摘要:为揭示地面出入式盾构法隧道掘进坡度对隧道结构纵向受力与变形分布规律的影响,依托上海市龙水南路过江隧道工程,建立三维有限元模型,对隧道结构力学行为规律进行分析。研究表明:1)作用于隧道的环向土压力受掘进坡度变化引起的埋深变化和土压力分解角度变化的共同作用;2)相同埋深下,随掘进坡度的增加,隧道结构竖向收敛变形逐渐减小,但纵向收敛变形差异加剧;3)掘进坡度的增加使得隧道结构环向受力更为均匀,并逐渐趋于静水压力状态;4)环间刚度不同将提升掘进坡度对隧道纵向差异收敛变形的影响。本文研究成果可为地面出入式盾构隧道在不同掘进坡度下的衬砌形变控制提供一定的借鉴与参考。

关键词:地面出入式盾构法; 掘进坡度; 数值模拟; 管片错台; 纵向变形

中图分类号:TD926.4

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)03-0017-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.03.031

Influence of driving slope on mechanical deformation of tunnel structure of ground access shield method

LIU Zhihui, ZHU Yeting

(Shanghai Urban Construction Tunnel Equipment Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In order to reveal the influence of the driving slope of the ground access shield method on the longitudinal force and deformation distribution of the tunnel structure, the cross-river tunnel project of Longshui South Road in Shanghai is taken as an example to analyze with the mechanical behavior laws by establishing a three-dimensional finite element model. The results show that: 1) The circumferential earth pressure acting on the tunnel is affected by the change of burial depth caused by the change of driving slope and the change of earth pressure decomposition angle. 2) With the increase of driving slope at the same buried depth, the vertical convergence deformation of the tunnel structure gradually decreases, but the longitudinal convergence deformation difference increases. 3) The increase of the driving slope makes the circumferential stress of the tunnel structure more uniform, and gradually tends to the hydrostatic pressure state. 4) The difference in stiffness between rings will increase the influence of the driving slope on the longitudinal difference convergence deformation of the tunnel. The results can provide some references for the lining deformation control of surface access shield tunnels under different driving slopes.

Key words: ground access shield method; driving slope; longitudinal deformation; segment misalignment; numerical simulation

地面出入式盾构法(ground penetrating shield technology, GPST)是一种从地面始发和到达的快速穿越掘进施工工法^[1]。由于避免了深大竖井的

选址施工,将地下道路段与地表和地下道路连接段一体化建造,相比传统盾构施工工法,GPST具有显著的时间、经济、环保、技术优势,在城市

收稿日期:2023-02-17

作者简介:刘智辉(1972—),男,正高级工程师,从事盾构及地下工程施工新工法方面的研究工作。

通信作者:朱叶艇(1987—),男,高级工程师,从事盾构隧道装备与盾构施工工法方面的研究工作。

地下立交、综合管廊等工程中应用前景广阔。GPST 盾构隧道一般具有超浅埋、大坡度等施工特点,在施工中面临结构变形大、隧道上浮、盾构掘进姿态难控等问题,国内仅在南京机场线秣将区间成功应用^[2-3]。

针对上述 GPST 工法应用难题,目前学者们的研究焦点主要集中在超浅覆土、负覆土导致的土体变形和地表沉降、隧道结构上浮问题与抗浮措施、注浆压力的控制、管片受力和施工对周围环境的扰动等。张旭等^[4]以负覆土-零覆土-浅覆土工况作为研究对象,建立三维数值模型,揭示了衬砌结构在不同覆土厚度、不同地层条件下的受力变形特征;滕丽^[5]依托南京至高淳城际快速轨道南京南站至禄口机场段 TA01-2 标工程,对负覆土和浅覆土工况下的管片结构和周围土压进行监测;张子新等^[6]依托大型模型试验和数值仿针,对浅覆土和负覆土工况下地面出入式盾构的姿态和上浮问题进行了分析研究,并提出隧道内增加配重进行上浮控制的建议;高昂等^[7]通过对南京机场线工程施工过程中的土压力等关键数据进行监测和分析,提出了合理有效的注浆参数;魏纲等^[8]在考虑盾构轴线与水平夹角的前提下,对地面出入式盾构法隧道施工引起的土体垂直变形计算方法进行研究,并对林存刚公式进行了结果比对;高守栋等^[9]基于非线性有限元方法,对负覆土、零覆土、浅覆土段在不同工况下隧道穿越时的地层位移以及孔隙水压力变化进行分析,并与监测数据进行对比;陈峰军等^[10]基于物理模型试验,对静水压力作用下地面出入式盾构隧道衬砌结构变形特征和土压力响应规律进行了多工况研究。

然而,既有研究成果^[11-12]发现,基于 TBM 隧道,掘进坡度对地层变形有较大影响,掘进坡度可能造成隧道纵向收敛变形差异而产生严重的错台问题,进而导致隧道环缝的渗漏水灾害及环间接头受力性能弱化等问题。GPST 工法在始发和接收区段可能存在较大的纵向坡度,易对隧道结构的纵向受力变形造成不利影响。本文以拟建的上海龙水南路越江隧道工程为背景,通过建立数值模型,对不同隧道掘进坡度下沿掘进方向隧道结构受力与变形的差异性变化规律开展研究,分析掘进坡度对隧道结构环间接头和纵向不均匀变形的影响,以期 GPST 盾构隧道施工过程中的环间接头和连续变形控制提供理论支撑。

1 工程背景

龙水南路越江隧道新建工程是中心城南部地区重要的越江通道,分为南北线路设置,其中北线隧道总长度为 1 140 m,南线隧道总长度为 1 298 m,项目为双管双向四车道,圆隧道衬砌外径为 11.36 m。龙水南路越江隧道拟采用开挖直径为 11.79 m 的土压平衡盾构,如图 1 所示。圆隧道衬砌外径为 11.36 m,内径为 10.36 m,管片厚度为 500 mm,环宽为 1 500 mm,管片采用 C60 钢筋混凝土浇筑,掘进坡度范围为 $-4.99\% \sim 5.90\%$,如表 1 所示。隧道顶覆土厚度最小约为 0.982 m,最大约为 23 m。北线接收段由于坡度 5.9% 最大,埋深 0.982 m 最小,因此被选择作为数值模拟的背景工况,其穿越地质纵断面如图 2 所示。

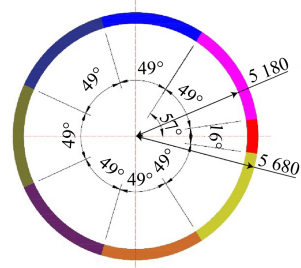


图 1 衬砌管片

mm

表 1 隧道纵向坡度

标段	始发段		接收段	
	坡度/%	埋深/m	坡度/%	埋深/m
北线	-4.99	8.7	5.9	0.982
南线	-4.2	4.95	4.8	2.943

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

为避免土体边界效应的影响,建立距离北线盾构机接收井 30 m、隧道断面两侧宽度各 22.5 m、高度 30 m 的三维有限元模型,如图 3 所示。土体、衬砌与螺栓均为实体单元,网格类型为 C3D8R。

2.2 材料本构模型与参数

2.2.1 土体本构

为确保数值模拟结果的准确性,上海地区软黏土本构常采用修正剑桥(modified cam-clay, MCC)模型,砂土采用摩尔库伦模型。根据地质勘察报告以及修正剑桥模型计算公式,各土层本构模型对应的参数如表 2 所示。

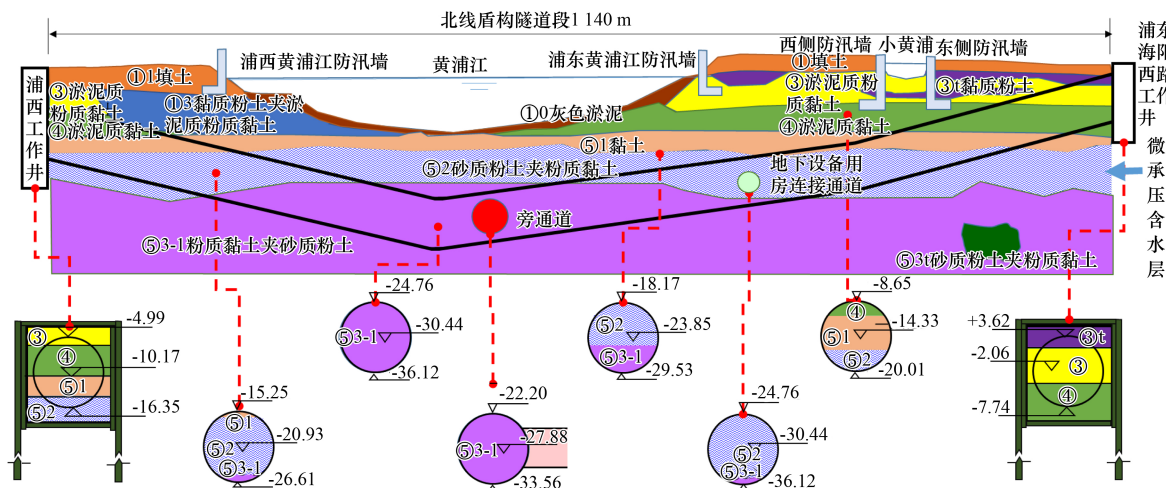


图2 龙水南路北线隧道穿越地质纵断面

m

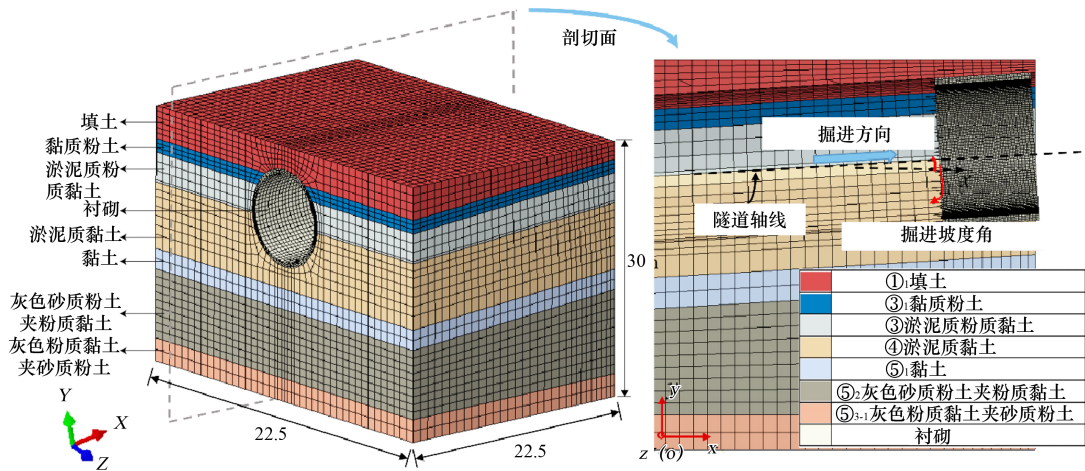


图3 总体数值模型

m

表2 土体本构参数

土层	土体重量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	厚度/ m	杨氏模量/ kPa	有效黏 聚力/kPa	有效内 摩擦角	泊松比	临界状态 应力比	压缩 指数	回弹 指数	初始 孔隙比	渗透系数/ ($10^{-7}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
① ₁ 填土	18.7	2.10	1 500	23	18.0	0.34	1.19	0.116 5	0.009 7	1.214	1.00
③ ₁ 黏 质粉土	17.4	1.60	1 750	12	17.0	0.34	1.19	0.116 5	0.009 7	1.214	1.00
③淤泥 质粉土	17.4	5.75	3 500	6	26.5	0.34	1.19	0.116 5	0.009 7	1.214	1.00
④淤泥 质黏土	16.8	5.76	5 250	12	12.0	0.40	0.89	0.131 3	0.010 9	1.416	0.04
⑤ ₁ 黏土	17.2	2.40	5 250	13	13.5	0.40	0.89	0.131 3	0.010 9	1.416	0.04
⑤ ₂ 砂质 粉土夹粉 质黏土	18.3	9.90	1 200	7	29.5	0.32	1.30	0.109 0	0.091 0	0.899	10.00
⑤3- ₁ 灰色 粉质黏土夹 砂质粉土	17.9	7.70	8 180	15	20.0	0.32	1.30	0.109 0	0.091 0	0.899	10.00

2.2.2 隧道衬砌

由于浅覆土荷载较小,材料发生塑性屈服或破坏的可能性较小,为简化计算模型,管片与钢螺栓采用线弹性本构模型。采用均质圆环模拟管片,考虑纵缝接头对结构刚度的影响,对管片结构弹性模量进行相应的折减,折减系数取 0.8。为分析纵向螺栓对于错台的影响,分别建立不考虑纵向螺栓和采用与设计一致的螺栓设置模型进行对比分析,模型如图 4 所示。衬砌和螺栓的材料参数如表 3 所示。

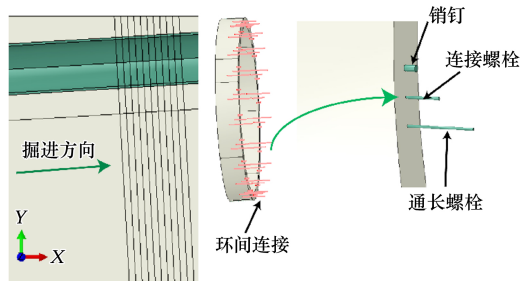


图 4 环缝接头模型

表 3 衬砌和螺栓材料参数

材料	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
衬砌	25.0	35.5	0.175
螺栓	78.5	210.0	0.210

2.2.3 接触关系与边界条件

隧道衬砌与土体、衬砌与衬砌设置为面面接触,接触关系设置法向为“hard”硬接触,切向摩擦系数为 0.2。螺栓和销钉与衬砌的接触关系为“Embedded”嵌入式约束。模型的底部边界完全固结,前后面限制位移和相应转动,左右面限制位移和相应转动。

2.3 模拟工况

为研究不同掘进坡度下盾构隧道衬砌结构受力变形的变化规律,以背景工程龙水南路最大掘进坡度 $i = 5.9\%$ 为基准,增大或减小掘进坡度;同时,考虑环缝接头连接形式的影响。模拟工况如表 4 所示。

3 模拟结果分析

3.1 掘进坡度对隧道纵向不均匀变形的影响

为研究隧道衬砌纵向收敛变形随掘进坡度的变化情况,在工况 1~6 条件下,以圆心埋深为 10 m

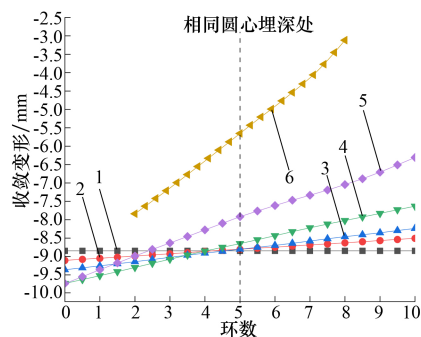
的断面为中心截取其前后各自 3~5 环的衬砌收敛变形,结果如图 5 所示。

表 4 模拟工况

工况	掘进坡度
1	0
2	0.5 <i>i</i>
3	<i>i</i>
4	2 <i>i</i>
5	4 <i>i</i>
6	8 <i>i</i>
7	<i>i</i>

注:工况 1~6 不含环缝螺栓接头;工况 7 含螺栓接头。

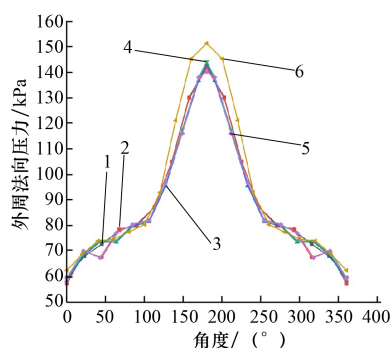
由图 5 可知:在第五环,即圆心埋深相同断面处,隧道的竖向收敛变形随坡度的增大而减小。同时,随着掘进坡度的增加,在隧道纵向上的收敛变形曲线斜率增大,并逐渐表现出一定的非线性变化。因此,掘进坡度的增加虽然有利于减小隧道的收敛变形,但会加剧隧道沿纵向的收敛变形差,从而引起更为不利的错台现象。



工况: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6。

图 5 不同掘进坡度隧道竖向收敛变形随埋深的变化

隧道收敛变形差异的变化与作用于隧道外部水土压力与隧道掘进坡度的变化密切相关。外部水土荷载的变化受坡度和埋深变化的共同作用,即随着隧道掘进坡度增加,竖向土压力在隧道衬砌外表面产生的法向应力分量的分解角度逐渐减小;同时,同一衬砌环首尾截面的埋深变化也随着掘进坡度增加而增大。因此,在隧道纵向上的隧道收敛变形的非线性变化随着掘进坡度的增加也更加明显。为进一步分析验证应力分量变化与埋深变化的影响,提取单环同一圆心埋深为 10 m 断面的法向应力分布,如图 6 所示。



工况: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6。

图 6 同等埋深不同掘进坡度下的单环衬砌外周法向压力

由图 6 可知: 从拱顶(0° 、 360°)的压力变化趋势看出, 当坡度从 0 增加到 $0.5i$ 时, 法向应力略微减小, 说明此时竖向应力沿法向分量减小起控制作用; 当坡度变化范围为 $i \sim 8i$ 时, 随着坡度的增加, 法向应力逐渐增大, 法向应力受埋深的影响超过了竖向应力沿衬砌法向分量减小的影响。总体而言, 在坡度变化范围较小($0 \sim 4i$)时, 管片外周的法向应力变化差值很小。

为进一步分析掘进坡度对隧道衬砌外部水土荷载分布变化的影响, 以圆心埋深为 10 m 的衬砌环为中心向前和向后各截取 3~5 环, 分别绘制隧道顶部与两腰所受压力沿纵向的分布情况, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知: 当隧道坡度变化范围较小时, 隧道顶部与两腰的压力沿隧道纵向基本保持随埋深线性变化。在同一埋深工况下, 当埋深较深时, 衬砌所受法向压力随掘进坡度的增大而增加; 随着埋深的减小, 衬砌所受法向压力随着掘进坡度的增大先减小后增大, 且增大和减小分界坡度随

着埋深的减小而增大。拱顶法向压力随埋深的非线性变化要大于隧道两腰位置。

3.2 掘进坡度对衬砌内力的影响

根据工况 1~6 在圆心同等埋深为 10 m 处的衬砌环数值模拟结果, 计算该断面的衬砌弯矩, 结果如图 8 所示。由图 8 可知: 随着坡度的增大, 隧道顶部、底部与两腰弯矩的峰值减小, 弯矩分布更加均匀, 不同位置弯矩差异逐渐减小, 隧道更加接近静水压力状态。

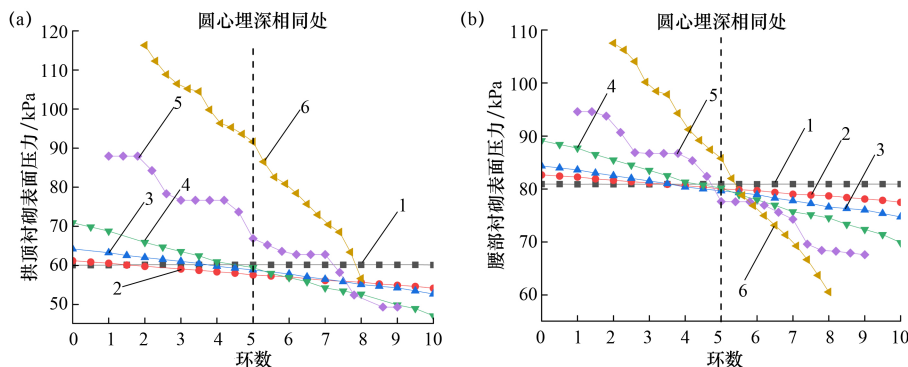
3.3 环间刚度对隧道纵向不均匀变形的影响

隧道纵向的荷载变化和差异变形会直接导致环间错台和环间螺栓的受力增大。在工况 7 条件下, 研究环缝、坡度为 5.9% 的隧道沿纵向的收敛变形, 结果如图 9 所示。由图 9 可知: 由于该模型同时考虑了纵缝接头, 相较不考虑环间和块间接头的工况, 其收敛变形值较大。在掘进 7.5 m (5 环) 的工况下, 收敛变形量的差值为 1 mm, 平均每环间收敛变形差值为 0.2 mm, 而不考虑环间接头坡度为 5.9% 的工况 5 环产生的收敛变形差值约为 0.6 mm。因此, 环缝的存在使得坡度对隧道纵向差异收敛变形的影响增大, 可能出现更为明显的错台情况。

4 结 论

(1) 同一埋深隧道结构随掘进坡度的增加, 受竖向水土压力在衬砌外表面的法向应力分量的分解角度不断减小的影响, 隧道竖向收敛变形将不断减小, 但纵向收敛变形差的加剧将不利于隧道结构错台的控制。

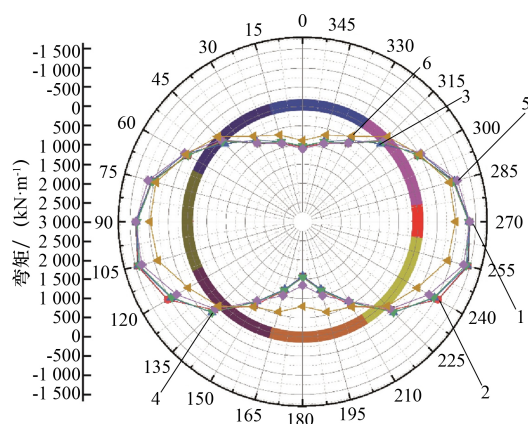
(2) 当隧道坡度变化范围较小时, 隧道顶部、



(a) 拱顶; (b) 两腰

工况: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6。

图 7 不同掘进坡度隧道不同位置压力沿纵向分布



工况: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5; 6—6。

图 8 不同掘进坡度的隧道衬砌弯矩

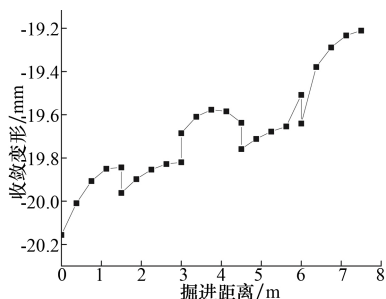


图 9 工况 7 的衬砌竖向收敛变形

底部与两腰的压力沿隧道纵向基本保持随埋深线性变化的特征;当掘进坡度增大较多时,隧道顶部和底部压力沿着纵向的非线性特征开始加剧。

(3) 随着掘进坡度的增大,隧道顶部、底部与两腰弯矩的峰值减小,衬砌结构环向受力逐渐接近静水压力状态。

(4) 环缝刚度大小不同将显著提升掘进坡度对隧道纵向收敛变形差异的影响。

参考文献:

[1] 吴惠明. 地面出入式盾构隧道结构变形特性及控制

研究[D]. 上海:上海大学,2014.

- [2] 吴惠明,周文波,滕丽. 地面出入式盾构法隧道新技术[J]. 隧道建设,2014,34(1):67-72.
- [3] 余浩强,魏纲,吴海峰. 地面出入式盾构法隧道施工技术综述[J]. 低温建筑技术,2017,39(9):96-98.
- [4] 张旭,叶冠林,吴惠明,等. 地面出入式盾构隧道受力变形特性数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2):436-441.
- [5] 滕丽. 地面出入式盾构法隧道技术(GPST)施工变形监测与分析研究[J]. 中国市政工程,2016(3):100-103;129.
- [6] 张子新,胡文,刘超,等. 地面出入式盾构法隧道新技术大型模型试验与工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(11):2161-2169.
- [7] 高昂,张孟喜,蒋华钦,等. 地面出入式盾构法隧道施工同步注浆工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(9):149-161.
- [8] 魏纲,姜鑫,张鑫海,等. 地面出入式盾构法隧道施工引起的土体垂直变形[J]. 岩土力学,2018,39(3):993-1001.
- [9] 高守栋,刘超,张子新,等. 地面出入式盾构隧道施工对周边地层扰动研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(3):903-914.
- [10] 陈峰军,宗军良,王祺,等. 地面出入式超浅埋盾构隧道静力响应模型试验研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2022,4(2):66-72.
- [11] 郑雯,邱琼,段灿,等. 不同坡度下 TBM 隧道施工对围岩及地表影响分析[J]. 现代城市轨道交通,2021(7):74-81.
- [12] 张稳军,王博达,张高乐. 错台对盾构隧道接缝受力及防水性能的影响分析[J]. 土木工程学报,2020,53(S1):63-68.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。