

考虑管片参数的复合地层盾构隧道力学特性研究*

康潇月^{1,2} 孟庆军³ 贾少东³ 徐 飞³ 何 川² 姚超凡² 王士民²

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 400067, 重庆; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都;

3. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁)

摘 要 [目的] 盾构隧道设计时常忽略复合地层条件下地层纵向差异对隧道结构产生的影响,造成了结构设计尽管在短期内可满足建设要求而长远来看很难达到服役年限的问题。对此,有必要开展考虑在纵向地层差异条件下管片结构参数变化的隧道力学特性研究。[方法] 依托南宁地铁5号线复合地层盾构隧道工程,建立三维纵向数值模型,计算复合地层下的隧道结构力学响应,分析管片幅宽、纵向螺栓强度及螺栓数量对隧道力学特性的影响。[结果及结论] 地层突变对隧道力学行为的影响范围与隧道的整体纵向刚度有关。增加管片宽度和纵向螺栓数量会扩大隧道力学行为的影响范围,但螺栓等级对此影响不大。大幅宽管片能有效减小结构整体纵向刚度,但会增大内力响应;与提高螺栓等级相比,增加纵向螺栓数量对隧道结构整体纵向刚度的提升更明显,且结构变形更小。

关键词 盾构隧道; 复合地层; 管片参数; 力学响应

中图分类号 U452.2; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.026

Study on Mechanical Characteristics of Shield Tunnels in Composite Strata Considering Segment Parameters

KANG Xiaoyue^{1,2}, MENG Qingjun³, JIA Shao-dong³, XU Fei³, HE Chuan², YAO Chaofan², WANG Shimin²

(1. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., 400067, Chongqing, China; 2. Institute of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. Nanning Rail Transit Co., Ltd., 530029, Nanning, China)

Abstract [Objective] The influence of longitudinal stratum differences on tunnel structure under complex strata conditions is often ignored in shield tunnel design, resulting in the problem that although the structural design may meet construction requirements in the short term, it is difficult to achieve service life in the long term. Therefore, it is necessary to study the

tunnel mechanical properties considering the changes in segment structural parameters under longitudinal stratum differences. [Method] Based on a composite strata shield tunnel project of Nanning Metro Line 5, a three-dimensional longitudinal numerical model is established to calculate the mechanical response of the tunnel structure in composite strata, and to analyze the influence of segment width, longitudinal bolt strength and number of bolts on the mechanical characteristics of the tunnel. [Result & Conclusion] The influence range of strata mutation on the tunnel mechanical behavior is related to the overall longitudinal stiffness of the tunnel. Increasing segment width and the number of longitudinal bolts will expand the influence range of the tunnel mechanical behavior, but the bolt grade has little effect on this. A wide segment can effectively reduce the overall longitudinal stiffness of the structure, but increase the internal force response; compared with increasing the bolt grade, increasing the number of longitudinal bolts can more significantly improve the overall longitudinal stiffness of the tunnel structure and result in smaller structural deformation.

Key words shield tunnel; composite strata; segment parameters; mechanical response

盾构隧道穿越复合地层,给施工和结构设计带来了挑战巨大。现场测试和数值计算结果显示,隧道结构变形在地层交界面附近被显著放大^[1],国内外学者对此展开了相关力学响应研究。文献[2]提出了全断面土岩复合地层管片环向错台和地层沉降的控制措施。文献[3]分析了单、双层衬砌盾构隧道在软硬不均复合地层中的力学特性。文献[4]通过壳-弹簧接触模型揭示了纵向变形引起的管片结构附加内力特点。可见,已有的隧道结构受力特性分析仅考虑了单一因素作用,而在复杂的地下环境中,这样的考虑显然使得隧道结构设计存在应用性限制。对此,本文提出在盾构隧道设计时考虑复合地层条件下地层纵向差异对隧道结构的影响,依

* 国家自然科学基金重大项目(51991394)

托南宁地铁 5 号线五一立交站—新秀公园站区间(以下简称“五新区间”)隧道工程,采用数值计算研究管片参数对隧道结构力学特性的影响,并对地层突变引起的隧道结构变形进行分析。

1 工程概况

五新区间隧道全长 2 098.1 m,其中越江段长 405.6 m,采用泥水/土压双模盾构施工。该隧道施工范围内的各地层物理力学参数如表 1 所示。地质勘探报告显示,隧道纵向穿越软硬不均的圆砾层和泥岩层。

表 1 五新区间隧道施工范围内的各地层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of various strata within the construction scope of Wu-Xin interval tunnel

地层	密度/(kg/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	静止侧压力系数	渗透系数/(m/d)	压缩模量/MPa	泊松比
素填土① ₂	1 970	11.0	8	0.60	0.300	5.65	0.25
黏土② _{2,1}	1 810	8.0	6	0.61	0.001	9.27	0.38
粉质黏土② _{3,2}	1 940	25.0	11	0.39	0.020	8.07	0.28
粉土③ ₂	1 960	10.5	15	0.43	0.300	9.67	0.30
圆砾⑤ _{1,1}	2 000	0	35	0.33	70.000		0.25
泥岩及粉砂质泥岩⑦ _{1,3}	2 110	80.0	20	0.30	0.001	15.00	0.23

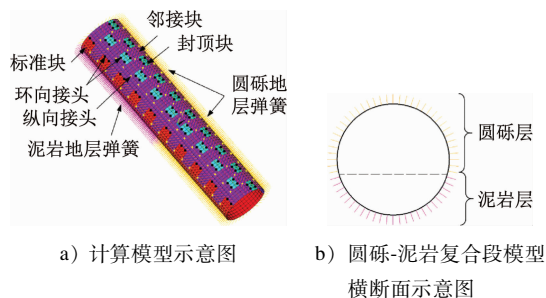


图 1 纵向壳-弹簧接触模型

Fig.1 Longitudinal shell-spring contact model

采用 shell43 单元对“3 标准块+2 邻接块+1 封顶块”的管片环进行模拟,并将钢筋混凝土管片视为均质材料,采用线弹性本构关系。管片接头使用 combin7 三维销钉铰链单元进行模拟并忽略接头刚度非线性变化。管片接头刚度根据文献[7]取值,如表 2 所示。

表 2 管片接头刚度取值

Tab.2 Stiffness values of segment joints

接头	抗剪刚度/(MN/m)	抗压刚度/(GN/mm)	抗弯刚度/(MNm/rad)
环向接头	13 000	3 500	400
纵向接头	40 000	1 200	130

2 建立三维纵向数值模型

2.1 纵向壳-弹簧模型

若将管片简化为梁单元,便难以在纵向上准确反映衬砌环间的结构性能^[5]。考虑到管片厚度与幅宽之比一般小于 1/5,采用壳-弹簧模型能更准确地反映隧道结构的变形特性^[6]。对此,本研究采用 ANSYS 有限元分析软件建立纵向壳-弹簧接触模型,如图 1 所示。为避免边界效应影响,该模型纵向长度设置为 5 倍洞径(30 m)。

采用荷载-结构法,沿管片外缘全周布置径向弹簧和切向弹簧,以模拟管片与围岩间的力学作用。其中,径向弹簧设置为仅受压的 link10 单元,切向弹簧设置为 combin14 单元,且切向弹簧刚度近似取径向弹簧刚度的 1/2^[8]。设定弹簧刚度系数均固定不变,单根地层弹簧刚度按温克尔假定计算,相关公式参见文献[8]。为确保模型符合平面应变假设,地层弹簧自由端施加全方向固定约束,模型两端面约束轴向位移。计算模型中:管片的混凝土强度等级为 C50,密度为 2 600 kg/m³,弹性模量为 34.5 GPa,泊松比为 0.2;圆砾地层抗力系数为 45 MPa,泥岩地层抗力系数为 100 MPa。

2.2 荷载计算断面和地层荷载

五新区间地质纵断面图如图 2 所示。分别选取隧道穿越单一圆砾地层处的典型断面(图 2 中里程 DK9+984.6 处)和穿越圆砾-泥岩复合地层处的典型断面(图 2 中里程 DK10+013.1 处)作为荷载计算断面,相应地层分布见图 3。由于两个荷载计算断面的上覆土层厚度均大于 1.5 倍洞径,故采用太沙基理论公式^[2]计算隧道上覆地层荷载及侧向荷载。计算结果见表 3。

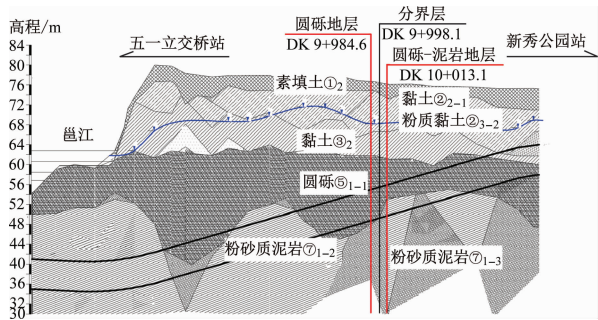


图 2 五新区间地质纵断面图
Fig. 2 Geological longitudinal section diagram of Wu-Xin interval

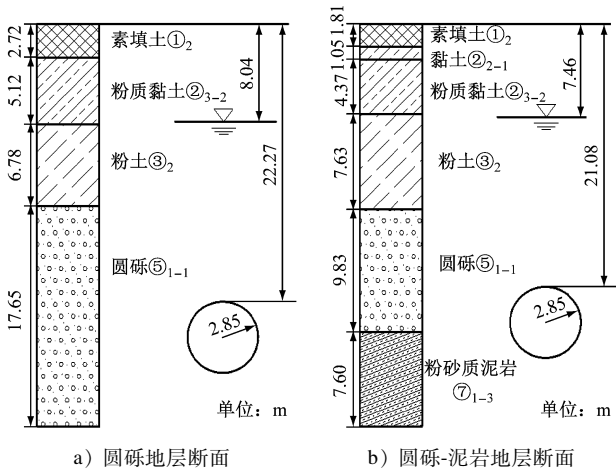


图 3 荷载计算断面处的地层分布
Fig. 3 Strata distribution at the load calculation sections

表 3 地层荷载计算结果
Tab. 3 Strata load calculation results

地层	顶部荷载 p_1/kPa	底部荷载 p_2/kPa	隧顶水平 荷载 q_1/kPa	分界处水 平荷载 q_0/kPa	隧底水平 荷载 q_2/kPa
圆砾	279.8	304.3	139.9		227.6
圆砾-泥岩	278.7	303.2	139.3	215.9	201.1

3 复合地层下的隧道结构力学响应

文献[9]指出,地层软硬交界面附近的隧道结构力学响应有显著变化。为便于结果描述,沿掘进方向对管片进行编号,如图 4 所示。

对比分析埋设于均一圆砾地层和纵向软硬不均复合地层的隧道结构力学响应的异同,并忽略线路坡度引起的地层荷载变化。规定轴力以受拉为正,弯矩以管片内侧受拉为正。计算得到在均一地层及复合地层中的结构力学响应,分别如图 5 及图 6 所示。

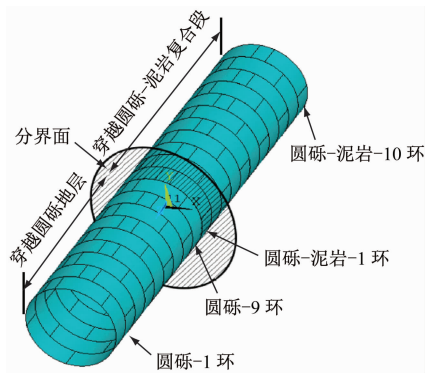


图 4 五新区间隧道的管片编号
Fig. 4 Segment numbers of Wu-Xin interval tunnel

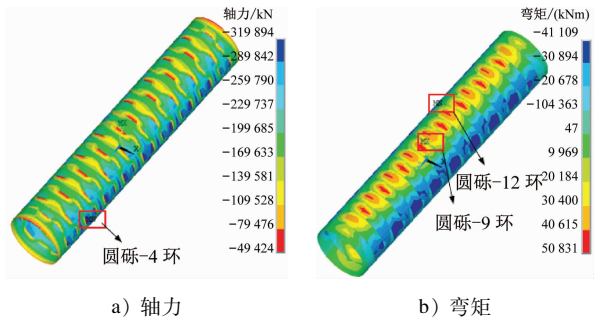


图 5 均一地层管片内力图
Fig. 5 Internal force diagram of segments in homogeneous stratum

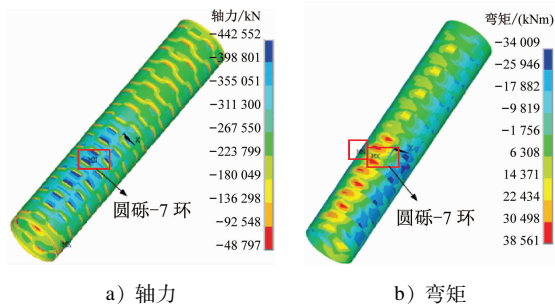


图 6 复合地层管片内力图
Fig. 6 Internal force diagram of segments in composite strata

图 6 显示的计算结果与文献[9]中复合地层盾构隧道内力响应规律一致,均表现出隧道内力在地层分界面附近发生明显的突变。可见,本文所使用的纵向壳-弹簧接触模型计算结果准确,具有可靠性。此外,软硬不均复合地层中的内力突变并非出现在地层分界面处,可见地层突变对结构的力学响应存在一定的影响范围。

4 管片参数对隧道力学特性的影响

为研究复合地层条件下隧道力学特性的规律,本文着重分析与管片纵向刚度相关的管片幅宽、纵

向螺栓等级及螺栓数量 3 个关键参数的影响。

4.1 管片幅宽对隧道力学特性的影响

管片环间采用 10 个 8.8 级螺栓均匀布设,按管片幅宽分别取 1.0 m、1.2 m、1.5 m 及 1.8 m,计算每延米管片的内力,并以 1.0 m 幅宽为基准计算内力增大比例 η ,有:

$$\eta = \frac{X_i - X_{1.0}}{X_{1.0}} \quad (1)$$

式中:

$X_{1.0}$ ——幅宽为 1.0 m 时的内力绝对值;

X_i ——幅宽为 i 时的内力绝对值, i 取 1.2 m、1.5 m、1.8 m。

相关计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着幅宽的增大,接头数目和拼装次数减少,进而削弱了结构整体纵向刚度,从而产生较大的内力响应。为消除边界约束影响,不考虑计算模型两端管片环,若某环管片的变形量与前 1 环管片变形量的差值超过该环的 10%,则认为该环位于地层突变的影响范围内。则不同幅宽时的隧道结构变形曲线如图 8 所示。

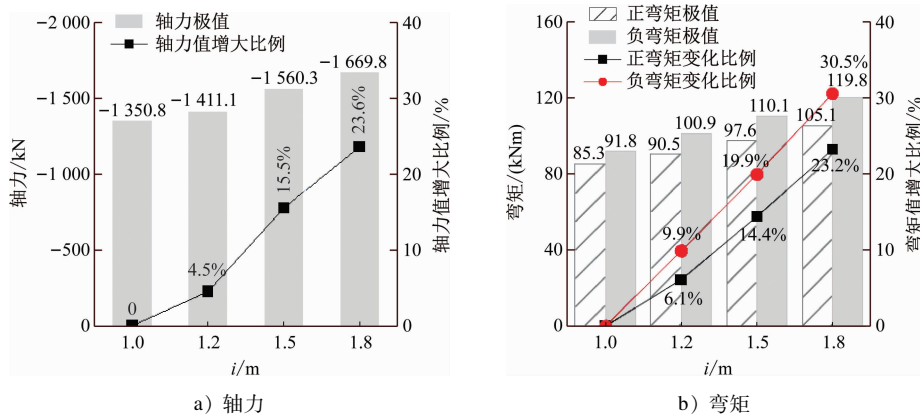
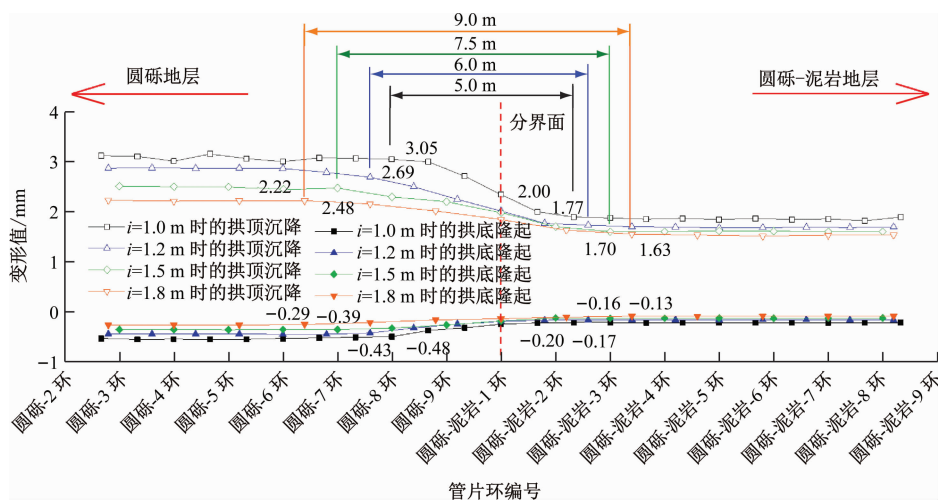


图 7 不同幅宽管片内力极值

Fig. 7 Internal force extreme values of segments with different widths



注:变形值为正表示沉降,为负表示隆起。

图 8 不同幅宽下的隧道结构变形曲线

Fig. 8 Deformation curves of tunnel structures with different widths

图 8 显示,在地层突变影响范围内,与幅宽为 1.0 m 时相比,幅宽为 1.2 m、1.5 m 及 1.8 m 时的拱顶竖向变形值分别减小了 11.8%、18.7% 和 27.2%。可见,管片幅宽越大,隧道结构抵抗地层变形的能力越强。

对比分析圆砾段和圆砾-泥岩复合段中的隧道结构变形差异可知:当幅宽为 1.0 m 时,全断面圆砾段拱顶沉降为 3.05 mm,圆砾-泥岩复合段拱顶沉降为 2.00 mm,变形差异为 34.4%;当管片幅宽增至 1.5 m 时,地层突变引起的竖向变形差异下降至

31.4%,可见增加管片幅宽会使结构变形更为连续,能有效降低竖向变形差异带来的结构损伤。然而随着管片幅宽增大,隧道结构整体纵向刚度增大,结构内力响应越剧烈,内力峰值差越大,故地层突变影响范围也随之变宽。

4.2 螺栓等级对隧道力学特性的影响

在管片幅宽均为1.5 m,并在环间均设置10个连接螺栓的情况下,分别采用8.8级螺栓和10.9S级螺栓,计算隧道结构内力,结果如图9所示。

由图9可知:螺栓强度等级的变化并未改变隧道结构力学响应形式;随着螺栓等级提升,结构弯

矩差异明显。可见,提高纵向螺栓等级对隧道结构刚度有一定的提升。

此外,随着纵向螺栓等级提高,隧道结构变形量逐渐减小。在地层突变影响范围内,与采用8.8级螺栓相比,采用10.9S级螺栓时,隧道在圆砾地层及圆砾-泥岩复合地层的变形均有不同程度的减小,拱顶沉降减小约2.0%,拱底隆起量减小约16.0%。然而,不同螺栓等级下的地层突变影响范围并未发生明显改变(均为5环幅宽长度,7.5 m)这可能与提高螺栓强度等级仅加强了连接处的点刚度,导致隧道结构整体纵向刚度提升并不明显有关。

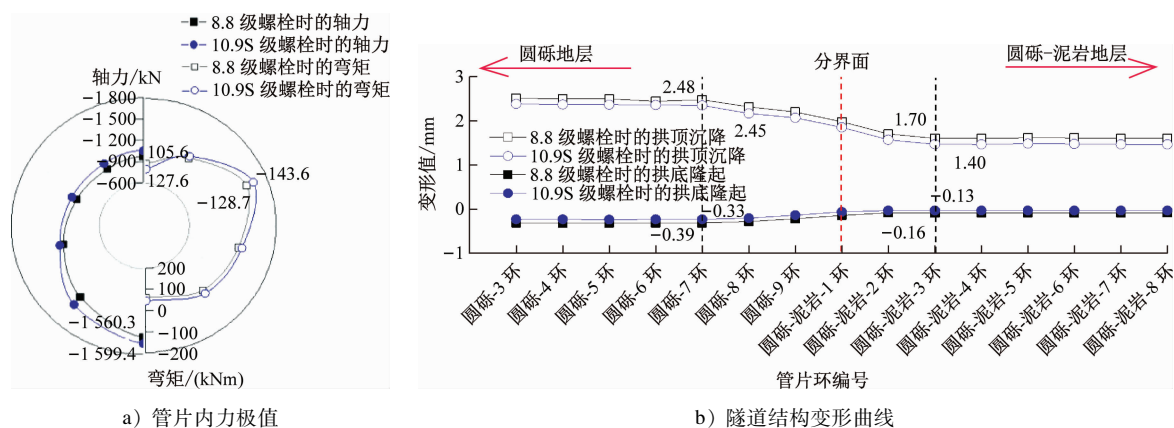


图9 不同纵向螺栓强度的管片内力极值及隧道结构变形曲线

Fig. 9 Extreme values of segment internal force and tunnel structure deformation curves under different longitudinal bolt strengths

4.3 螺栓数量对隧道力学特性的影响

在管片幅宽均为1.5 m的情况下,考虑管片布

置情况,在环间分别均匀布设10个及16个8.8级连接螺栓,计算管片内力,结果如图10所示。

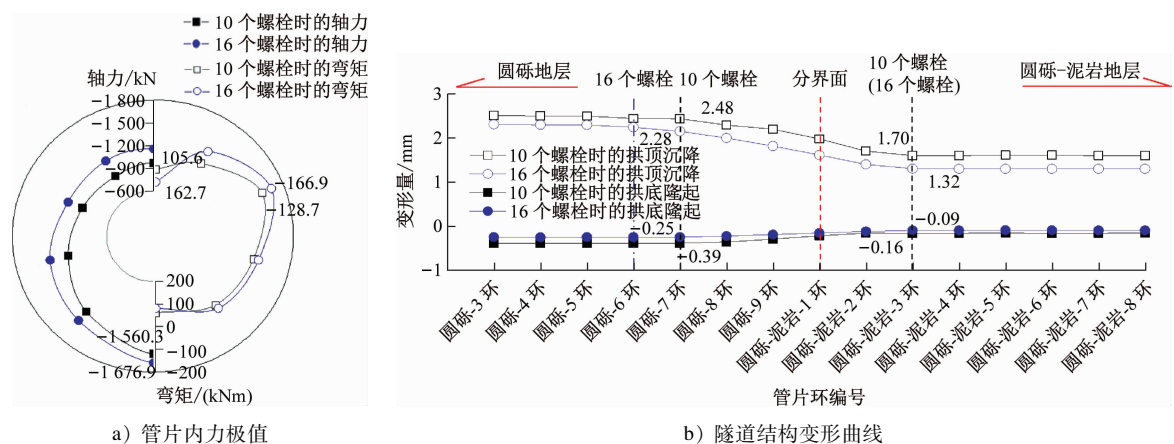


图10 不同纵向螺栓数量下的管片内力极值及隧道结构变形曲线

Fig. 10 Extreme values of segment internal force and tunnel structure deformation curves under different longitudinal bolt numbers

从管片内力的变化趋势可以看出,增加螺栓数量提升了隧道结构的整体纵向刚度,使管片各部位内力均出现增长。与提高螺栓等级相比,增加螺栓

数量对结构刚度的提升更为明显。从图10右侧的变形趋势来看,隧道结构变形随着螺栓数量增加而减小,而增加纵向螺栓数量强化了管片环间的连接

作用,隧道结构刚度增大,抵抗地层变形能力更强。

此外,增加管片纵向螺栓数量也使地层突变的影响范围发生改变。当环间纵向螺栓数量由 10 个增至 16 个时,地层突变的影响范围扩大至 6 环(共 9.0 m)。可能的原因是增加螺栓数量使得螺栓间距减小,大量螺栓连接导致隧道结构的整体性更强,扩大了地层突变影响的传播范围。地层突变影响范围的大小反映了隧道结构整体纵向刚度的强弱。提高纵向螺栓等级并未使影响范围明显变化,而增加纵向螺栓数量后,地层突变影响范围扩大了 20%,可见在加强管片环间连接方面,增加螺栓数量比提升螺栓等级的效果更好,对隧道结构的整体纵向刚度提升更明显。

5 结论

1) 地层突变的影响范围与隧道的整体纵向刚度相关。刚度越大,内力响应越剧烈,影响范围也越宽。增加管片宽度和纵向螺栓数量会扩大影响范围,而提升螺栓强度对此影响不大。

2) 随着幅宽的增大,接头数目和拼装次数减少,进而削弱了结构整体纵向刚度,减小结构变形并产生较大内力响应。

3) 增加纵向螺栓数量和提高螺栓强度均能提升隧道结构整体刚度。在考虑管片布置条件下,与提高螺栓强度相比,增加纵向螺栓数量对隧道结构整体纵向刚度的提升更明显,结构变形也更小。

参考文献

- [1] 曹利强. 盾构掘进影响下复合成层地层及环境的力学响应及其控制[D]. 北京:北京交通大学,2020.
CAO Liqiang. Mechanical responses and safety control of composite multi-layered ground and built environment due to shield tunnelling in urban areas [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [2] 肖明清,邓朝辉,赵勇. 高速铁路水下隧道研究与设计[M]. 北京:中国铁道出版社,2015.
XIAO Mingqing, DENG Zhaohui, ZHAO Yong. Research and design of underwater tunnel for high-speed railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.
- [3] 何川,郭瑞,肖明清,等. 铁路盾构隧道单、双层衬砌纵向力学性能的模式试验研究[J]. 中国铁道科学,2013,34

(3): 40.

HE Chuan, GUO Rui, XIAO Mingqing, et al. Model test on longitudinal mechanical properties of single and double layered linings for railway shield tunnel[J]. China Railway Science, 2013, 34 (3): 40.

- [4] 苏宗贤,何川. 盾构隧道纵向变形附加内力的壳-弹簧-接触模型数值分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(6): 70.
SU Zongxian, HE Chuan. Shell-spring-contact model based numerical analysis of additional internal forces induced by the longitudinal deformation of a shield tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(6): 70.
- [5] 朱伟,黄正荣,梁精华. 盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(8): 940.
ZHU Wei, HUANG Zhengrong, LIANG Jinghua. Studies on shell-spring design model for segment of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 940.
- [6] 苏宗贤,何川. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用[J]. 工程力学,2007,24(10): 131.
SU Zongxian, HE Chuan. Shell-spring-contact model for shield tunnel segmental lining analysis and its application[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 131.
- [7] 梁敏飞,张哲,李策,等. 盾构隧道双层衬砌结构三维力学分析模型及验证[J]. 岩土工程学报,2019,41(5): 892.
LIANG Minfei, ZHANG Zhe, LI Ce, et al. Three-dimensional mechanical analysis model and verification of shield tunnels with double-layer linings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 892.
- [8] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟,译. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
Japanese Civil Society. Tunnel standard specifications (shield) and interpretation [M]. ZHU Wei, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [9] 王祖贤,施成华,曹成勇,等. 非均质地基中盾构隧道的纵向变形分析[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(6): 2222.
WANG Zuxian, SHI Chenghua, CAO Chengyong, et al. Analysis on the longitudinal deformation of shield tunnels in heterogenous foundation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2222.

· 收稿日期:2023-01-25 修回日期:2024-11-06 出版日期:2025-04-10

Received:2023-01-25 Revised:2024-11-06 Published:2025-04-10

· 第一作者:康潇月,硕士研究生,island8492@163.com

通信作者:王士民,教授,wangshimin@swjtu.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license