

地表堆载作用下盾构隧道结构变形规律及安全控制限值

卞荣, 吴冰, 孙永军, 翁天赐, 熊勇林

Deformation and safety control limits of shield tunnel under surface loading effects

BIAN Rong, WU Bing, SUN Yongjun, WENG Tianci, and XIONG Yonglin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响

Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area

潘涛 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 101-108

深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析

An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling

付钊, 柯宁静, 卢康明, 郭萧阳, 张孟喜 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 44-54

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148-152

斜井盾构掘进时富水围岩变形特性模拟分析

A study of the rich-water ground rock deformation features as shield tunneling along with inclined shaft

马君伟, 王贤能, 林明博 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 126-131

盾构施工与波浪荷载耦合作用后软土力学特性

Mechanical properties of soft clay after coupling between shield construction and wave loading

刘浩旭, 朱剑锋, 饶春义, 潘斌杰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 97-103

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland

郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182-191



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312034

卞荣, 吴冰, 孙永军, 等. 地表堆载作用下盾构隧道结构变形规律及安全控制限值 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 114-124.
BIAN Rong, WU Bing, SUN Yongjun, et al. Deformation and safety control limits of shield tunnel under surface loading effects[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 114-124.

地表堆载作用下盾构隧道结构变形规律及安全控制限值

卞荣¹, 吴冰¹, 孙永军¹, 翁天赐², 熊勇林²

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000;
2. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 地表堆载是地下盾构隧道管片破损、接缝张开和错台等病害的主要诱因之一, 这些病害对盾构隧道的安全运行构成了严峻挑战。以往的研究往往集中于某一特定堆载方式, 且在分析时未能充分考虑管片接头间的力学特性。基于此, 文章利用 ABAQUS 有限元软件, 构建了一个包含管片、螺栓和土层的多尺度精细化三维有限元模型。该模型充分考虑了隧道管片和螺栓的材料非线性特性, 以及隧道管片与土体之间的复杂相互作用。通过对足尺管片加载模型试验进行模拟分析, 首先验证了所采用的隧道管片模型的准确性和可靠性。随后, 利用所建立的三维精细化模型, 开展了不同堆载荷载大小及其形式(包括中心堆载、半偏心堆载和偏心堆载)对地下管片结构的数值模拟分析, 结果表明: (1) 地表堆载作用下盾构隧道纵向沉降变形呈现非连续性和非均匀性, 其中地表堆载范围内隧道的沉降量较大, 在堆载的边缘处隧道错台量和张开量较大; (2) 综合分析了不同堆载形式下盾构隧道结构变形、张开量及错台量之间的关系, 得到了盾构隧道管片张开量与结构变形及收敛率之间的关系。研究结果及所提出的相关公式可为工程施工提供参考。

关键词: 地表堆载; 盾构隧道; 精细化建模; 数值模拟; 安全限值

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0114-11

Deformation and safety control limits of shield tunnel under surface loading effects

BIAN Rong¹, WU Bing¹, SUN Yongjun¹, WENG Tianci², XIONG Yonglin²

(1. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 2. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Surface loading is a primary cause of damage to underground shield tunnel segments, leading to issues such as cracking, joint opening, and misalignment. These damages pose significant challenges to the safe operation of shield tunnels. Previous studies often focused on specific loading modes and have not adequately addressed the mechanical interactions between segment joints during analysis. Therefore, this study utilized ABAQUS finite element software to construct a multi-scale refined three-dimensional finite element model containing segments,

收稿日期: 2023-12-21; 修订日期: 2024-04-09

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY220008)

第一作者: 卞荣(1970—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事线路电气设计、标准化研究应用等方面工作。E-mail: bianrong1@163.com

通讯作者: 熊勇林(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土材料本构模型及数值分析等方面工作。E-mail: xiongyonglin@nbu.edu.cn

bolts, and soil layers. The model accounts for the material nonlinearity of tunnel segments and bolts, as well as the complex interaction between tunnel segments and soil. Through simulation analysis of full-scale segment loading model tests, the accuracy and reliability of the adopted tunnel segment model were verified. Using the established three-dimensional refined model, numerical simulation were then conducted to analyze the effects of different loading magnitudes and forms (including central loading, semi-eccentric loading, and eccentric loading) on underground segment structures. The results show that under surface loading, the longitudinal settlement deformation of shield tunnels exhibits discontinuity and non-uniformity. The settlement within the range of surface loading is relatively large, with greater misalignment and opening at the edges of the loading. A comprehensive analysis of the relationship between tunnel structure deformation, opening amount, and misalignment under different loading forms was conducted, and then the relationship between the opening amount of shield tunnel segments and structural deformation and convergence rate was obtained. The proposed formulas can provide valuable insights for engineering applications.

Keywords: ground surface surcharge; shield tunnel; refined modeling; numerical simulation; safety control limits

随着城市地下空间开发规模的快速扩张,邻近既有隧道的施工作业将无法避免,其中地面堆载所诱发的盾构隧道病害案例已屡次发生^[1-3]。当隧道上部地表出现堆载时,下方土体会产生附加沉降,使得既有盾构隧道的纵向出现较大范围的差异性沉降,同时横向出现收敛变形,导致隧道环缝和纵缝张开,接缝处渗漏水。若情况严重,将导致管片裂缝增多、螺栓断裂等病害,对隧道的正常运营构成威胁^[4-5]。

目前许多学者已对邻近既有盾构隧道的地表堆载问题进行了相关研究,其中主要的研究方法包括理论解析法^[6-9]、模型试验法^[10-12]、现场实测分析法^[13-15]和有限元分析法^[16-22]。由于理论解析法具有计算简单、耗时短等优点,所以经常被用于对隧道变形进行初步分析。王涛等^[7]把隧道简化成欧拉-伯努利(Euler-Bernoulli)梁,用 Winkler 地基模型来模拟地下土体,并根据该模型对地铁隧道的挠度微分方程进行求解,从而得出地铁隧道的变形。Wang 等^[8]提出了一种在大范围地表荷载作用下,对地铁盾构隧道的侧向应力与变形进行简化分析的解。康成等^[9]将盾构隧道简化为置于 Winkler 地基上的 Timoshenko 梁,并对已建盾构隧道在地面荷载作用下的结构变形与受力进行了分析。当荷载接近隧道时,会使浅埋隧道管片产生较大变形,增加地基土反力系数及等效抗弯刚度,能有效降低隧道的沉降量。由于盾构隧道的变形问题一般涉及多环甚至几十环的管片,且隧道为非连续结构,受计算复杂度的影响,理论解析法难以兼顾隧道整体变形和局部管片失效的计算。

张明告等^[11]通过缩尺(1:10)模型试验,对地铁

盾构隧道在地表荷载作用下的变形与周边土压力变化规律及影响因素进行了分析,发现隧道上部土体中土压力存在显著差异,且隧道上部土压力显著大于两侧土压力。邵华等^[14]调研了上海一条地铁区间盾构隧道上部出现的大量堆土,最大的土层高度达到了 7 m,导致隧道出现了严重的渗水和结构破坏,其中最大的土层变形达到 210 mm 以上,一些管片甚至出现顶端的混凝土块掉落和螺栓断裂现象,对隧道的安全运行产生严重威胁。

在数值计算方面,Huang 等^[15]采用均质连续壳单元对地铁盾构隧道进行数值仿真,并应用 FLAC3D 软件对不同堆积荷载作用下浅埋地铁盾构隧道的变形机理进行分析。魏纲等^[16]采用 MIDAS 软件,建立了单根管片环三维精细计算模型,分析了偏压堆载下管片环的侧向变形演变规律,揭示了管片连接部位由于应力集中引起的混凝土先于螺栓失效现象。孙廉威等^[17]将地铁盾构隧道看成是一个由管片环缝在纵向上连接起来的圆环,利用 ABAQUS 有限元分析方法,对地面堆载下地铁盾构隧道管片和环缝节点的变形和破坏进行了数值模拟。阮恒丰等^[18]用管片间接头刚度矩阵近似代表管片间接头单元来研究管片结构的受力演化机制。桑运龙等^[19]采用非线性弹簧模拟管片间接头,研究不同差异沉降下隧道纵向沉降分布、张开和错台量等。杨茜等^[20]利用 ADINA,在传统摩尔-库伦土体本构关系的基础上,构建了盾构隧道三维数值模型,并对其进行了数值模拟,分析了地表堆积引起的相邻盾构隧道变形。谢家冲等^[21]提出了一种将岩土模块和结构模块结合在一起的平面应变有

隧道结构及接头螺栓的受力演化机制。

计算模型如图3所示。模型采用地层结构法,其宽度、深度和长度分别为50, 30, 63 m。隧道的埋深为 $1D$ (D 为隧道直径, $D=6.2$ m), 隧道中轴投影线为隧道中轴线在土体表面的投影, 堆载中轴线为堆载横向范围内的中心轴线, 定义堆载中轴线与隧道中轴投影线间的距离为偏心距。堆载工况分为中心堆载、半偏

心堆载和偏心堆载, 其偏心距分别为0、 $0.97D$ 和 $1.61D$ 。在模型中, 采用实体单元对管片进行模拟并且为了减少管片与螺栓等接触处的应力集中过大, 对整个模型接触部位进行了网格加密^[25], 这造成了模型单元数量的激增, 为了提高计算效率, 本文网格类型选择C3D8R。采用梁单元模拟管片螺栓的受力特性, 网格类型为B31。

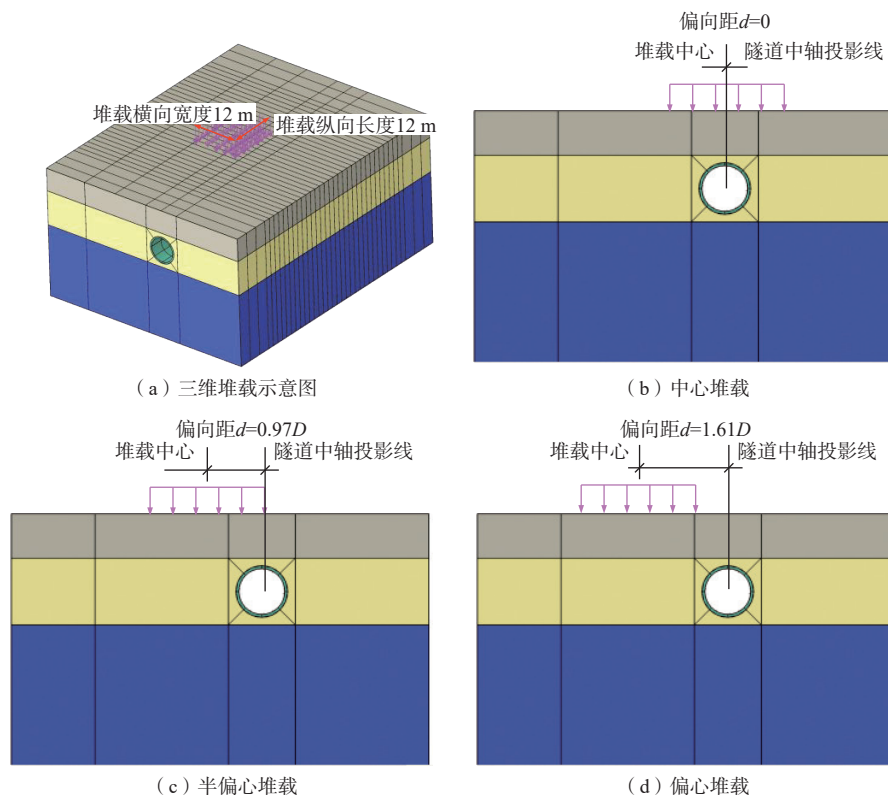


图3 盾构隧道堆载工况示意图

Fig. 3 Tunnel under surface loading

将隧道管片环分为封顶块K(21.5°)、封顶块两侧两个相邻块体B(68°)和三个标准块体A(67.5°)。为了提高计算效率, 采用多尺度建模, 隧道两端各采用3环厚度为350 mm, 环宽为3 m的顶管隧道管片, 隧道中间30环采用厚度为350 mm, 环宽为1.5 m的盾构隧道管片, 总共36环, 外径和内径分别为6.2 m和5.5 m, 本文主要研究中间30环管片。管片采用错缝拼装, 一环管片间的接头包括16个环向螺栓和12个纵向螺栓, 详见图4, 模型总计920个螺栓。

数值计算模型共由188 520个六面体实体单元和3 680个梁单元组成。梁单元采用的是两节点的线性单元, 一般来讲, 多节点的梁单元插值函数会更加灵活, 没有线性单元那么刚硬, 但即便采用线性单元, 也可以通过细分网格来达到同样的目的。整个模型底部

边界的位移固定, 模型侧向边界的法向位移受限, 地表堆载作为均布荷载施加于模型上表面, 采用ABAQUS默认的线性幅值曲线来模拟荷载的线性增加过程。本文考虑的是堆载作用对既有盾构隧道的作用, 故忽

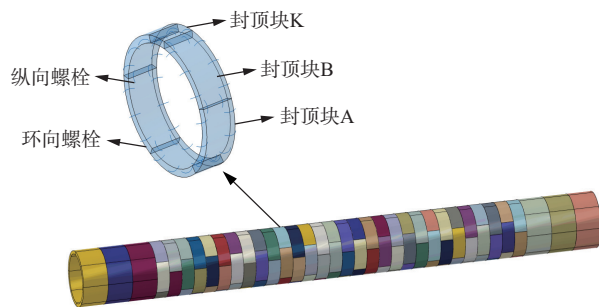


图4 盾构隧道管片及螺栓

Fig. 4 Shield tunnel segments and bolts

略盾构隧道开挖的过程,采用 ODB 导入地应力的方法,在完成初始地应力平衡后,直接在表堆载区域进行荷载施加,计算隧道模型的结构变形。

2.2 接触设置

计算模型中管片和土体之间的接触关系如图 5 所示。在此基础上,采用非线性接触分析方法,对管片接缝处的应力和变形特性以及隧道管片与土体之间的相互作用进行分析。接触面设置为采用 ABAQUS 中的主从面接触,该算法利用接触区域内的有限滑动进行主从接触跟踪,适用于两个已定义的界面。整个模型的接触面有 395 个。

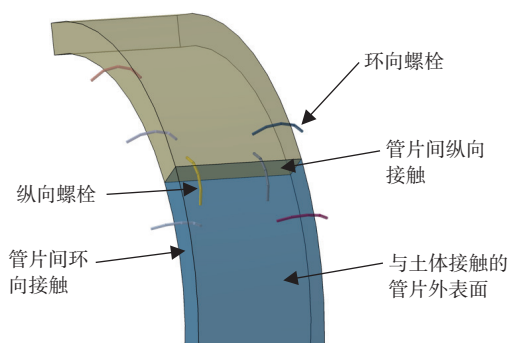


图 5 管片接触设置

Fig. 5 Segment contact setting

螺栓采用 ABAQUS 中的“embed region”约束,将螺栓整个嵌入到相应的管片单元中,不仅可以模拟接头的拉伸、压缩和剪切的力学性能,还可以表现管片在不同受力条件下的变形和位移状态。

管片接缝在法向使用“硬接触”,也就是说,在接触面之间没有限定接触应力的幅度。在接触应力为 0 或者负的情况下,两个接触表面脱离,对应的结点接触约束解除。在切向上,使用库伦摩擦力进行计算。设管片与土体之间的摩擦系数为 0.3,管片间的摩擦系数为 0.2。计算公式如下:

$$\tau = \mu F_{\text{con}} \quad (1)$$

式中: τ ——临界剪应力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$);

μ ——管片接合处的摩擦系数;

F_{con} ——法线方向的接触压力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)。

同时,当接触切向力达到临界剪应力之前,摩擦面之间不发生相对滑移。

2.3 堆载工况分类

如图 3 所示,堆载分为中心堆载、半偏心堆载及偏心堆载三种工况。堆载的纵向长度为 9, 12, 15 m, 横向宽度为 8, 12, 16 m, 堆载大小的范围是 100 ~ 450 kPa,

以 50 kPa 为差值逐级增加。

2.4 本构模型以及材料参数

本研究以沿海地区地下电缆隧道为研究对象,将土层简化为三大类,分别为素填土、淤泥黏性土、砂质黏性土,相应的土层厚度为 5.3, 8.0, 16.7 m。土体力学特性采用摩尔库仑本构模型进行模拟,螺栓则采用线弹性本构模型,所用的土体及螺栓材料参数详见表 3。而混凝土管片采用混凝土损伤本构,详细参数见表 1 和表 2。

表 3 土体及材料参数表

Table 3 Soil and material parameter

材料名称	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
杂填土	0.3	1 800	35	20	15
淤泥黏性土	0.3	1 600	25	10	5
砂质黏性土	0.3	1 800	50	25	20
螺栓	0.3	7 850	210 000		

3 计算结果与分析

地表堆载作用下盾构隧道的变形按方向可以分为两类:隧道纵向变形和横向变形。在纵向变形中,隧道整体变形呈现正态分布形式,由于局部荷载的差异,隧道拱顶和拱底会出现环间错台和环间张开;管片的横向变形收敛主要集中在地表堆载作用范围内,它主要由单环隧道内管片的变形和张开引起。本文采用的三维精细化盾构隧道模型的计算结果能有效地描述地表堆载作用下隧道的整体变形和局部变形,如图 6 所示。

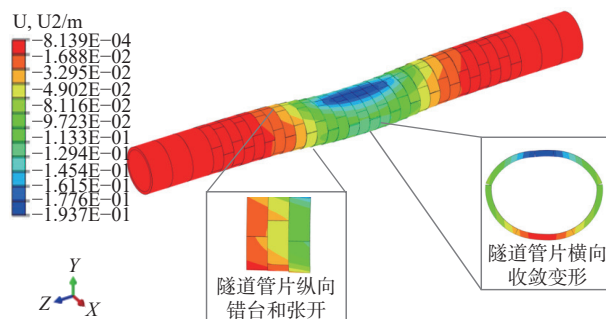


图 6 中心堆载 450 kPa 作用下盾构隧道位移云图

(堆载范围 12 m × 12 m)

Fig. 6 Distribution of displacement for the tunnel under 450 kPa surcharge load which size is 12 m × 12 m

3.1 盾构隧道整体纵向变形规律

3.1.1 隧道纵向沉降规律

图 7 为中心堆载 450 kPa 时,不同堆载范围下隧道

沉降曲线图。该图的沉降数据选自每环管片顶部前后 2 个节点的位移结果。盾构隧道纵向变形整体呈正态分布,隧道沉降量主要集中于堆载范围内,堆载中心沉降量最大。随着堆载范围的增大,隧道的沉降量增加。从图 7 细节放大图中可以看出,隧道纵向变形主要由两部分组成,一是单环管片的形变,二是相邻管片之间的错动。在隧道总沉降中,单环管片的变形占据主导。值得注意的是,基于本文数值模型计算得到的曲线能够很好地反映节点处的不连续变形,表现为曲线的非光滑特征(环间错台),这一特点也与 Cao 等^[26]计算结果一致。这是因为本文考虑了管片环纵向间接接触关系,因而能够描述模型环间接头的刚度弱化效应。

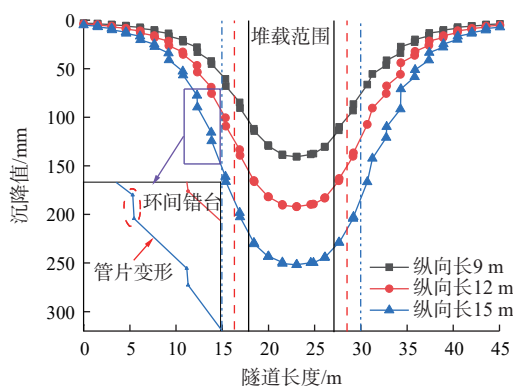


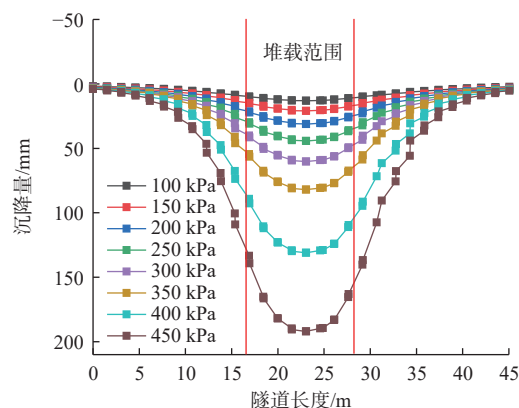
图 7 不同堆载纵向长度下中心堆载隧道沉降曲线图 (横向宽度 12 m)

Fig. 7 Settlement distributions of centrally-loaded tunnel under different longitudinal widths of surcharge (the transverse width is 12 m)

图 8 (a) 描述了隧道纵向沉降随堆载大小变化的关系,由图可知,随着堆载荷载的增大,隧道沉降逐渐增大,这与梁荣柱等^[27]揭示规律一致。当地面堆载值小于 300 kPa 时,隧道纵向的沉降变形较为缓慢;当堆载值持续增大,隧道的沉降变形急剧增加。当堆载值达到 450 kPa 时,隧道纵向最大沉降达到 195 mm。引起沉降变形急剧增加的原因是堆载范围内的混凝土管片受荷发生塑性损伤,如图 8(b)所示,同时接头螺栓进入塑性阶段,隧道管片连接处强度降低结构变形加剧。

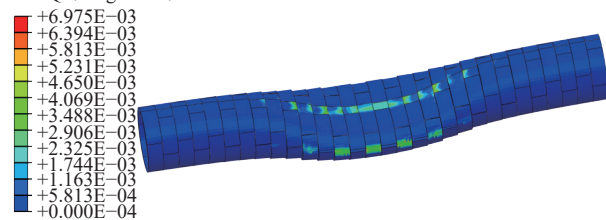
3.1.2 隧道纵向错台变形规律

由图 9 所示,中心堆载工况下管片的错台量明显增加,这种接缝变形会削弱盾构隧道的防水性能,由于管片是错缝拼装,两端的错台量会有差异。同时由图可以发现,纵向管片的错台量在堆载的两个边缘处达到最大值,其值最大可达到 28 mm。产生这一原因



(a) 中心堆载工况、不同堆载大小下隧道的沉降分布曲线

PEEQ (Avg: 75%)



(b) 中心堆载 450 kPa 工况下隧道管片等效塑性云图

图 8 中心堆载工况下隧道沉降分布曲线和等效塑性云图 (堆载范围 12 m×12 m)

Fig. 8 Settlement distributions and equivalent plastic strains of tunnel lining under the central surcharge load which size is 12 m × 12 m

是由于地表堆载正下方管片环间接头几乎不承受剪切作用,而堆载荷载边缘处则相反,将承受剪切变形,如图 7 所示。这一结果与文献 [17] 的结果有相似的规律,验证了本文模型的可靠性。

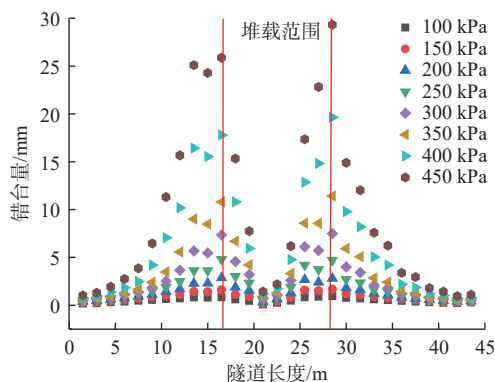


图 9 中心堆载工况、不同堆载大小下隧道错台量分布曲线 (堆载范围 12 m×12 m)

Fig. 9 Distributions of tunnel dislocation under the central surcharge load which size is 12 m × 12 m

3.1.3 纵向张开变形规律

为研究堆载范围和区域对隧道纵向张开量的影响,按形式和区域共设置 9 种堆载工况,盾构隧道纵

向环间最大张开量如表 4 所示。模型计算的结果显示:随着堆载横向宽度的增加,隧道纵向最大张开量逐步增大;同时随着堆载范围的中心远离隧道,其最大张开量逐渐减小。值得注意的是,隧道纵向最大张开量所在管片与环间最大错台一致,均处于地表堆载范围的边缘处,纵向环间的最大张开量大于单环管片横向最大张开量。

图 10 为不同堆载形式下隧道管片纵向最大张开量与堆载大小之间的关系曲线,从图中可以看出隧道的最大张开量与堆载大小呈非线性关系。当地表堆载较小时,管片接头螺栓处于弹性阶段,隧道纵向张开量较小。随着堆载的增大,接头螺栓发生屈服,管片张开量开始激增。通过对比图 10 (a)(b)(c),可以

表 4 盾构隧道纵向环间最大张开量
Table 4 Maximum opening size of tunnel on the surcharge load

堆载形式	最大张开量/mm		
	横向宽 8 m	横向宽 12 m	横向宽 16 m
中心(偏心距=0)	13.540	14.39	15.34
半偏心(偏心距=0.97D)	5.767	6.50	6.90
偏心(偏心距=1.61D)	2.870	3.17	3.88

看出在相同荷载条件下中心堆载形式所对应的管片接头螺栓最先进入塑性阶段,同时隧道管片张开量最大。研究结果表明:接头螺栓作为隧道管片之间的连接件,它的受力情况对盾构隧道结构的稳定性起着至关重要的作用,同时堆载与盾构隧道的间距大小对接头螺栓受力影响较大。

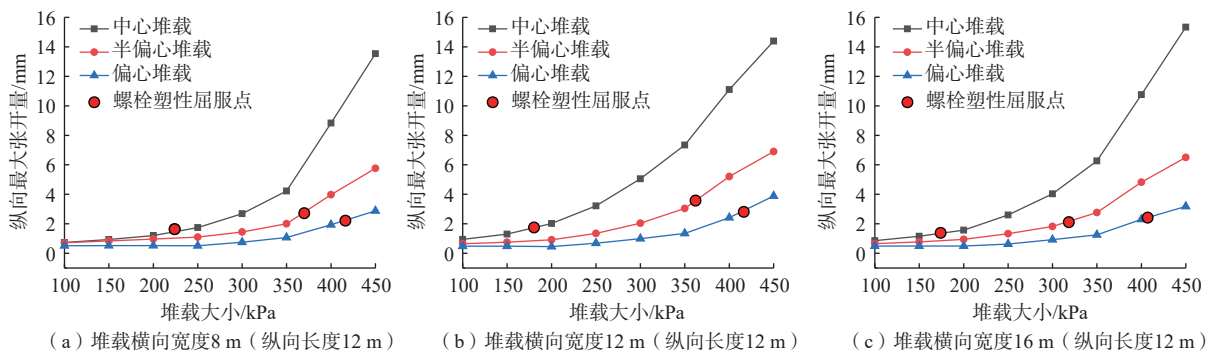


图 10 不同堆载工况下隧道最大张开量与堆载大小曲线图

Fig. 10 Maximum tunnel openings and surcharge loads under different surcharge conditions

3.2 盾构隧道横向变形规律

在研究盾构隧道横向变形规律时,隧道管片的变形形式和收敛率是两项重要的指标。根据已有的研究^[14],在地表堆载作用下,隧道管片变形的最终形式为椭圆形,隧道附加荷载较大的一侧,隧道直径减小为椭圆短轴,附加荷载较小的一侧为椭圆长轴。

由图 11 所示,由中心、半偏心及偏心堆载产生的横向变形的最终形式是不同的,随着地表堆载区域远离隧道,隧道拱顶的附加应力逐渐减小,而侧向压力逐渐增大,从而导致椭圆的短轴发生偏转。在极端堆载条件下,混凝土管片会出现裂缝,在管片上形成所谓的“塑性铰”^[28-29],此时隧道管片将不再承受弯矩作用,同时附近的接头螺栓也将进入屈服。

隧道最大收敛率作为评价盾构隧道结构安全的重要指标,它的计算公式如下:

$$c = \Delta D / D \quad (2)$$

式中: c ——隧道最大收敛率;

ΔD ——隧道的最大收敛值/m。

地表堆载大小与隧道横向最大收敛率之间的关系曲线如图 12 所示,当地表堆载较小时,隧道的最大收敛率与堆载成线性关系;当隧道管片中的接头螺栓出现屈服时,隧道的收敛变形急剧增大。在 3 种不同

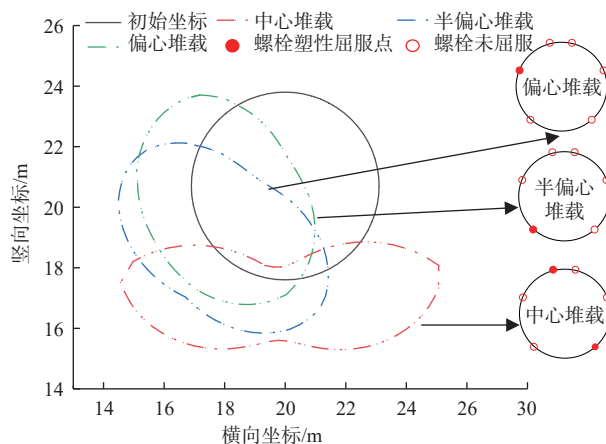


图 11 不同堆载作用下隧道管片横向变形特征

Fig. 11 Characteristics of transverse deformation of tunnel segment under surcharge load

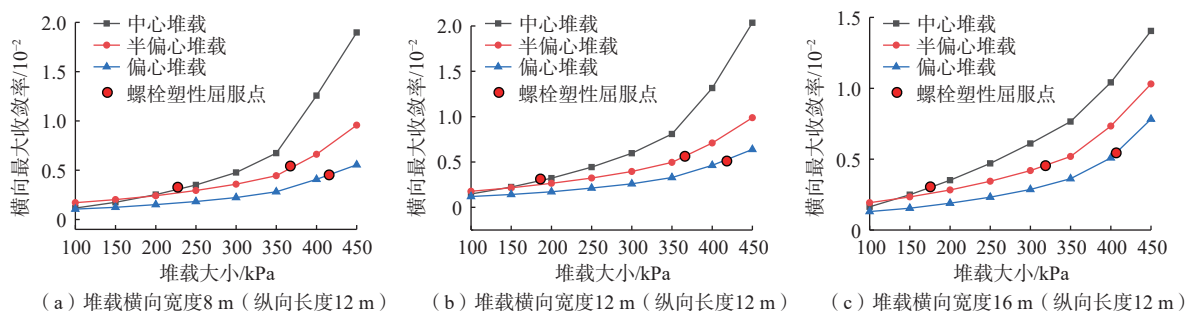


图 12 不同堆载工况下隧道横向最大收敛率与堆载大小曲线图

Fig. 12 Maximum convergence rates and surcharge loads of tunnel under different surcharge conditions

的堆载形式中,中心堆载对隧道最大收敛率的影响最大。综合隧道纵向张开量与最大收敛率的计算结果表明:当接头螺栓进入屈服阶段时,隧道的变形值应作为评价隧道结构变形安全的控制值。

3.3 隧道变形安全控制值划分

综合不同堆载工况中盾构隧道纵向最大沉降量和最大张开量,横向最大收敛率和最大张开量的计算结果,采用最小二乘法,可拟合得出隧道结构变形之间的关系。如图 13 所示,在地表堆载下,隧道纵向最大张开量与隧道纵向最大沉降量之间呈线性关系,其拟合公式见式(2)

$$u_L = -11.98x_1 - 6.56 \quad (3)$$

式中: u_L ——隧道最大沉降量/mm;

x_1 ——隧道纵向最大张开量/mm。

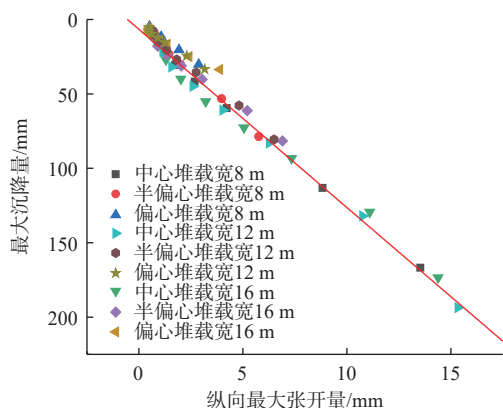


图 13 隧道纵向最大张开量与最大沉降量拟合图

Fig. 13 Relationship between longitudinal maximum opening and maximum settlement of tunnel

盾构隧道横向最大收敛率与纵向最大沉降量的拟合曲线如图 14 所示,拟合公式为:

$$u_L = -10\,575.56c + 13.98 \quad (4)$$

盾构隧道横向最大收敛率与横向最大张开量(x_2)之间的拟合曲线如图 15 所示,拟合公式如下:

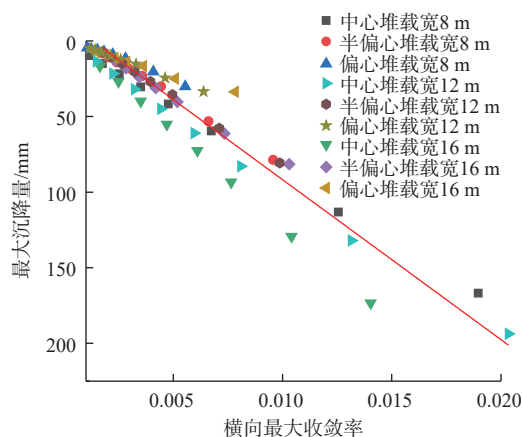


图 14 隧道纵向最大沉降与横向最大收敛率拟合图

Fig. 14 Relationship between maximum settlement and maximum convergence rate of tunnel

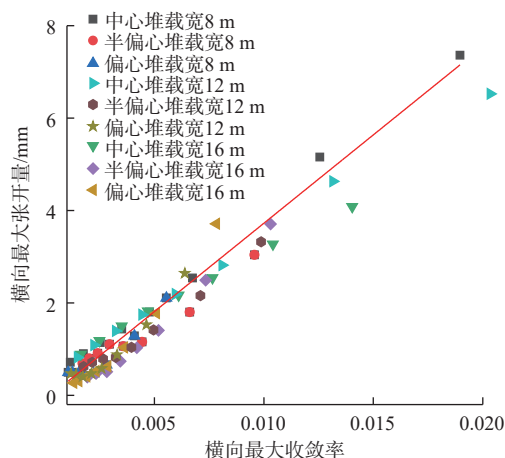


图 15 隧道横向最大收敛率和横向最大张开量拟合图

Fig. 15 Relationship between maximum lateral convergence rate and maximum lateral opening of tunnel

$$x_2 = 382.26c - 0.097 \quad (5)$$

根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[30]和文献[19]中隧道的临界状态值,其中:1)接缝螺栓达到屈服强度 640 MPa;2)管片接缝张开量达到 2 mm;3)管片接缝防水临界张开

量 6 mm, 并结合本文所提出的式(2)~(4), 可以初步得到盾构隧道变形发展规律, 并为实际工程提供参考。

4 结论

(1) 通过与管片加载试验进行对比分析, 验证了所建立的三维精细化有限元盾构隧道模型, 能够考虑管片和接头螺栓的非线性特征, 重现管片与螺栓在外荷载作用下的变形特征。

(2) 盾构隧道模型纵向变形呈现正态分布形式, 由于堆载边缘处的外荷载发生突变, 导致下部相邻两环隧道的变形差异较大, 盾构隧道的最大错台量和最大张开量均位于堆载边缘。通过合理的堆载放坡能降低堆载突变对隧道变形的影响。

(3) 隧道横向收敛变形率和管片转角与地表堆载区域有关。通过对比不同堆载方式下隧道结构的横向变形, 发现中心堆载(正上方堆载)对既有盾构隧道横向收敛变形的影响较大。

(4) 基于不同堆载条件下盾构隧道结构最大变形量与管片最大张开量之间的关系, 提出了可统一描述两者之间关系的经验公式。结合盾构隧道结构设计防水性能以及接头螺栓受力极限值, 该研究成果可初步快速判断盾构隧道的安全变形控制限值, 为实际工程施工提供相应参考。

参考文献 (References):

- [1] 戴宏伟, 陈仁朋, 陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 312 - 316. [DAI Hongwei, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 312 - 316. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 马忠政, 罗志华, 张静, 等. 地面堆载对地铁盾构隧道变形影响规律研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊 2): 573 - 578. [MA Zhongzheng, LUO Zhihua, ZHANG Jing, et al. Study on influence of ground surcharge on deformation of subway shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(Sup 2): 573 - 578. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 徐平, 杨益新, 朱志豪. 运营地铁盾构隧道基底沉降的影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 157 - 166. [XU Ping, YANG Yixin, ZHU Zhihao. Analysis on settlement factors of shield tunnel foundation

for operating metro[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 157 - 166. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 魏纲, 张佳, 洪文强. 地面堆载对临近既有盾构隧道影响的研究综述[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(6): 79 - 82. [WEI Gang, ZHANG Jia, HONG Wenqiang. A review of the research on the impact of ground load on adjacent existing shield tunnel[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2017, 39(6): 79 - 82. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 徐成华, 何政宇, 刘刚, 等. 南京江北新区地铁盾构开挖引发地面沉降三维数值模拟预测. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(4): 1316 - 1325. [XU Chenghua, HE Zhengyu, LIU Gang, et al. Three dimensional numerical simulation of ground settlement caused by metro shield excavation in Jiangbei New District, Nanjing, China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1316 - 1325.]
- [6] 梁荣柱, 王理想, 李忠超, 等. 地表堆载对既有盾构隧道纵向变形影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 130 - 141. [Liang Rongzhu, Wang Lixiang, Li Zhongchao, et al. The influence of surface surcharge on the longitudinal deformation of existing shield tunnels[J]. Journal of Architectural Science and Engineering, 2023, 40(3): 130 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王涛, 李浩, 徐日庆. 上方大面积加(卸)载引起盾构隧道的变形分析[J]. 现代交通技术, 2008, 5(3): 29 - 31. [WANG Tao, LI Hao, XU Riqing. Analysis of deformation of shield tunnel when vertical loading and unloading[J]. Modern Transportation Technology, 2008, 5(3): 29 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG H N, CHEN X P, JIANG M J, et al. The analytical predictions on displacement and stress around shallow tunnels subjected to surcharge loadings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 403 - 427.
- [9] 康成, 梅国雄, 梁荣柱, 等. 地表临时堆载诱发下既有盾构隧道纵向变形分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4605 - 4616. [KANG Cheng, MEI Guoxiong, LIANG Rongzhu, et al. Analysis of the longitudinal deformation of existing shield tunnel induced by temporary surface surcharge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4605 - 4616. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吴庆, 杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 57 - 66. [WU Qing, DU Shouji. Model test on influence of

- ground heaped load on existing shield tunnel structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 57 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张明告,周顺华,黄大维,等.地表超载对地铁盾构隧道的的影响分析[J].岩土力学,2016,37(8):2271 – 2278. [ZHANG Minggao, ZHOU Shunhua, HUANG Dawei, et al. Analysis of influence of surface surcharge on subway shield tunnel under[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2271 – 2278. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 柳献,张浩立,鲁亮,等.超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J].地下工程与隧道,2013(4):10 – 15. [LIU Xian, ZHANG Haoli, LU Liang, et al. Experimental study on load bearing capacity of shield tunnel structure under overload condition[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2013(4): 10 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 徐志发,王颖轶,董越鹏,等.地面超载对大型盾构施工扰动位移的影响[J].交通建设与管理,2010(5):175 – 180. [XU Zhifa, WANG Yingyi, DONG Yuepeng, et al. Influence of ground overload on disturbance displacement of large shield construction[J]. Transportation Construction & Management, 2010(5): 175 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 邵华,黄宏伟,张东明,等.突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1036 – 1043. [SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1036 – 1043. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HUANG Hongwei, ZHANG Dongming. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301 – 312.
- [16] 魏纲,洪文强,魏新江,等.偏心堆载作用下盾构隧道横断面变形规律及其控制限值[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(3):750 – 757. [WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Deformation law and control limit of shield tunnel cross-section under eccentric surcharge load[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(3): 750 – 757. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 孙廉威,秦建设,洪义,等.地面堆载下盾构隧道管片与环缝接头的性状分析[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(8):1509 – 1518. [SUN Lianwei, QIN Jianshe, HONG Yi, et al. Shield tunnel segment and circumferential joint performance under surface surcharge[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(8): 1509 – 1518. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 阮恒丰,梁荣柱,康成,等.地表突发堆载作用下地铁盾构隧道变形机制三维精细化数值模拟研究[J].安全与环境工程,2023,30(1):35 – 45. [RUAN Hengfeng, LIANG Rongzhu, KANG Cheng, et al. Three-dimensional elaborate numerical modelling analysis on the deformation mechanism of metro shield tunnel induced by sudden surface surcharge[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(1): 35 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 桑运龙,刘学增,张强.基于螺栓-凹凸榫连接的地铁盾构隧道管片环缝接头刚度分析及应用[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):19 – 27. [SANG Yunlong, LIU Xuezheng, ZHANG Qiang. Stiffness analysis and application of segment annular joint based on bolt-concave and convex tenon connection in metro shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 19 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 杨茜,张顶立,刘志春.局部荷载作用下软土盾构隧道纵向沉降数值分析[J].北京工业大学学报,2012,38(8):1220 – 1224. [YANG Qian, ZHANG Dingli, LIU Zhichun. Numerical simulations of longitudinal settlement of shield tunnel under local loading[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1220 – 1224. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 谢家冲,王金昌,黄伟明.地面堆载作用下盾构隧道管片开裂行为分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):162 – 171. [XIE Jiachong, WANG Jinchang, HUANG Weiming. Nonlinear structural analysis on cracking behavior of shield tunnel segment under surface loading[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 162 – 171. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王如路,张冬梅.超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J].岩土工程学报,2013,35(6):1092 – 1101. [WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092 – 1101. (in Chinese with

- English abstract)]
- [23] 闫鹏飞, 蔡永昌. 网格无关的盾构管片面-面接触模型及接缝力学行为研究 [J/OL]. 工程力学, (2023-04-10) [2023-12-21]. [Yan Pengfei, CAI Yongchang. Study on mesh-independent one-sided-surface contact model and joint mechanical behavior of shield pipe [J/OL]. Engineering Mechanics, (2023-04-10) [2023-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230410.0945.004.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Concrete structure design code: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Building and Construction Press, 2024. (in Chinese)]
- [25] SHI Chenghua, CAO Chengyong, LEI Mingfang, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 51: 175 – 188.
- [26] CAO Shian, LIANG Rongzhu, KANG Cheng, et al. Analytical prediction for longitudinal deformation of shield tunnel subjected to ground surface surcharge considering the stiffness reduction[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2024, 48(4): 925 – 950.
- [27] 梁荣柱, 曹世安, 向黎明, 等. 地表堆载作用下盾构隧道纵向受力机制试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 736 – 747. [LIANG Rongzhu, CAO Shian, XIANG Liming, et al. Experimental investigation on longitudinal mechanical mechanism of shield tunnels subjected to ground surface surcharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 736 – 747. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 董新平. 盾构衬砌整环破坏机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 417 – 426. [DONG Xiping. Failure mechanism of the full-ring for segmented tunnel lining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 417 – 426. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 柳献, 张雨蒙, 王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 118 – 128. [LIU Xian, ZHANG Yumeng, WANG Rulu. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 118 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for protection structure of urban rail transit: CJJ/T 202—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]

编辑: 刘真真