

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211212001

文章编号:1674-599X(2024)06-0074-08

引用格式:周惠聪,黄阜,聂波浪,等.基坑开挖诱发邻近盾构隧道管片开裂机理研究[J].交通科学与工程,2024,40(6):74-81.

Citation: ZHOU Huicong, HUANG Fu, NIE Bolang, et al. Mechanism of adjacent shield tunnel segment cracking induced by foundation pit excavation[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(6): 74-81.

基坑开挖诱发邻近盾构隧道管片开裂机理研究

周惠聪,黄阜,聂波浪,罗跃龙

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了研究基坑开挖诱发邻近既有盾构隧道管片的开裂机理和裂缝分布特征,利用ABAQUS软件构建既有地铁盾构隧道周边新建基坑工程的有限元模型,并基于扩展有限元理论分析了基坑与隧道之间的距离、基坑开挖深度以及基坑与隧道的相对位置等因素对盾构隧道管片裂缝分布规律的影响。研究表明:随着基坑与隧道之间距离的缩小以及基坑开挖深度的增加,盾构隧道管片的裂缝长度和数量呈增长趋势,且开裂区域逐步扩大;相较于其他工况,当基坑位于盾构隧道上方时,基坑施工诱发盾构隧道管片开裂的情况更为严重。

关键词:基坑开挖;邻近盾构隧道;管片开裂;扩展有限元

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

Mechanism of adjacent shield tunnel segment cracking induced by foundation pit excavation

ZHOU Huicong, HUANG Fu, NIE Bolang, LUO Yuelong

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To study the mechanism of adjacent shield tunnel segment cracking induced by foundation pit excavation and crack distribution characteristics, this paper establishes the finite element model of the new foundation pit project around the existing subway shield tunnel with ABAQUS software. Based on the extended finite element theory, the paper analyzes the influences of the distance between the foundation pit and the tunnel, the excavation depth of the foundation pit, and the relative position between the foundation pit and the tunnel on the crack distribution of the shield tunnel segment. The results show that with the decrease of the distance between the foundation pit and the tunnel and the increase of the excavation depth of the foundation pit, the length and number of cracks of the shield tunnel segment are increasing, and the cracking area expands gradually. The shield tunnel segment cracking induced by foundation pit construction is more serious when the foundation pit is located above the shield tunnel, compared with that under other working conditions.

Key words: foundation pit excavation; adjacent shield tunnel; segment cracking; extended finite element

随着“十四五”规划中“完善新型城镇化战略 提升城镇化发展质量”的提出,我国城市化进程迈入

快车道。而城市化进程加速导致城市地表建设用地越来越紧张,开发和利用地下空间就成为了新型

收稿日期:2021-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51878074);湖南省自然科学基金项目(2021JJ30714)

通信作者:黄阜(1983—),男,副教授,主要从事城市轨道交通工程和隧道工程方面的研究工作。E-mail:hfsu0001@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

城镇化战略的必然选择。地铁作为城市轨道交通的主要形式之一,具有不占用地表资源的优势,成为了我国各大城市解决交通拥堵和建设用地紧张等问题的首选方案。修建地铁不仅是解决各种“城市病”的有效途径,而且提升了地铁沿线地块的商业价值。因此,许多新建商业建筑或者居民区都沿地铁线修建。而高层建筑的修建需要开挖深大基坑,这必然会威胁周边既有地铁隧道的安全。因此,对新建基坑开挖诱发邻近既有盾构隧道的变形机理和破坏模式开展研究具有重要的工程价值^[1-4]。

目前,许多学者已经对基坑开挖诱发邻近既有隧道变形开展了较为深入的研究^[5-14]。岳云鹏等^[7]结合工程案例建立三维数值模型,获得了基坑不同开挖方式对盾构隧道变形的影响,并提出利用坑底土体加固来抑制隧道的竖向变形。许军平^[8]为研究软土地区深基坑坑内的竖向加固形式,依托温州新世纪商务大厦基坑工程,依次分析了不同竖向加固高度和宽度对基坑坑底隆起、地表土体沉降以及基坑围护结构变形的影响。张治国等^[9]通过构建三维数值模型,分析得到了双基坑与既有隧道在垂直布置和平行布置两种工况下既有隧道的水平位移和竖向位移。伍尚勇等^[10]结合广州某紧邻隧道的基坑工程,分析得到了双侧深基坑在不同开挖工序下对邻近既有盾构隧道的的影响规律。杜建强等^[11]利用有限元软件得到了深基坑在开挖过程中其下卧隧道的变形趋势以及不同保护措施对隧道上浮的抑制效果。ZHANG等^[12]针对基坑的开挖深度、基坑与隧道的相对位置对邻近既有隧道衬砌结构的影响,通过计算土压力,得到了用于计算邻近既有隧道隆起量的半解析法。ATTEWELL等^[13]利用文克尔地基梁理论计算了邻近管线的位移及应力,在此基础上获得了不同参数条件下隧道施工对邻近既有管线应力、应变的影响规律。陈郁等^[14]通过明德林经典理论推导出了基坑开挖卸荷引起隧道衬砌结构隆起的附加应力,在此基础上,利用弹性梁地基理论获得了隧道隆起量的计算方法。但是,已有成果大多研究的是新建基坑开挖所导致的邻近既有隧道的变形。盾构隧道采用拼装式管片作为衬砌结构,隧道一旦发生变形,容易造成管片错台甚至开裂。目前,对于基坑开挖导致邻近既有盾构隧道管片开裂的研究较少,有必要对其发生机理和裂缝扩展模式展开进一步的研究。因此,本文基于扩展有限元法,构建地铁盾构隧道周边新建基坑的

有限元模型,通过模拟基坑开挖卸荷过程中管片开裂区域和裂缝的分布规律,获得基坑开挖诱发邻近既有盾构隧道管片的开裂机理,研究成果可为基坑开挖诱发邻近既有盾构隧道管片开裂处治方案的优化提供一定的参考。

1 衬砌裂缝扩展有限元

扩展有限元作为单位分解法的一个特例,可以将其与多种有限元软件结合后进行计算。本文利用有限元软件ABAQUS中的扩展有限元(XFEM)版块对裂缝扩展机理展开研究。XFEM在解决模型的非连续性问题方面具有较大优势,同时能有效避免网格依赖,保持非连续场与网格边界相互独立、裂缝产生范围内原有网格不变,极大地减少了计算时间。XFEM的本质是单位分解,而单位分解法^[15-16]的基本思路是任何函数 $\Psi(x)$ 均可通过域内一组局部函数 $N_I(x)\Phi(x)$ 来表示:

$$\Psi(x) = \sum_I \beta_I N_I(x) \Phi(x) \quad (1)$$

式中: $N_I(x)$ 为满足单位分解的形函数, $\sum_I N_I(x) = 1, I$ 为所有节点的集合; $\Phi(x)$ 为扩充函数; β_I 为引入的待定参量,其可对式(1)进行调整,得到 $\Psi(x)$ 的最佳近似解。

XFEM是在标准场有限元近似的基础上通过添加扩充项来对复杂未知场进行准确描述的。结合式(1),未知场 $u^{(h)}$ 可表示为:

$$u^{(h)} = \sum_I N_I(x) u_I + \sum_J N_J(x) \Phi(x) q_J \quad (2)$$

式中: $\sum_I N_I(x) u_I$ 为标准有限元近似; $\sum_J N_J(x) \Phi(x) q_J$ 为扩充项近似; q_J 为多余自由度; u_I 为标准节点的自由度。

2 三维数值模型的建立

2.1 模型参数的选取

本文依托的是南京宁华世纪置业有限公司NO.2014G34地块项目中的E地块基坑工程。为简化计算以及方便研究极限状态下既有盾构隧道管片的开裂形态特征,本文不考虑实际工程中抗拔桩的影响,并将基坑形状简化为矩形基坑。基于ABAQUS软件构建的基坑周边既有盾构隧道的三维

有限元模型参数有:基坑与邻近隧道所处区域的土体共有5层,各土层的参数见表1;盾构隧道管片混凝土的强度等级为C50,混凝土抗拉强度为1.89 MPa,断裂能 $G_I = G_{II} = G_{III} = 150 \text{ N/m}$ 。地下连续墙和底板所用混凝土均为C30,内支撑为规则C25混凝土支撑,各材料参数见表2。

表1 围岩中各土层的参数

Table 1 Parameters of each soil layer in the surrounding rock

| 名称 | 重度/(kN·m ⁻³) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 弹性模量/MPa | 泊松比 |
|------|--------------------------|---------|----------|----------|------|
| 杂填土 | 19.0 | 12.00 | 15.00 | 120 | 0.35 |
| 素填土 | 19.5 | 3.00 | 25.00 | 150 | 0.35 |
| 黏性土 | 19.5 | 20.00 | 10.00 | 73 | 0.30 |
| 淤泥质土 | 18.4 | 12.00 | 8.00 | 18 | 0.30 |
| 粉砂 | 19.3 | 5.70 | 34.10 | 200 | 0.25 |

表2 围护结构材料参数

Table 2 Enclosure material parameters

| 围护结构 | 重度/(kN·m ⁻³) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|-------|--------------------------|----------|-----|
| 管片 | 24.2 | 27.6 | 0.2 |
| 地下连续墙 | 23.7 | 30.0 | 0.2 |
| 内支撑 | 23.7 | 28.0 | 0.2 |
| 底板 | 23.7 | 30.0 | 0.2 |

2.2 计算模型

为避免模型边界条件设置不当给计算结果带来较大误差,结合基坑实际尺寸,将所构建的整体三维有限元模型的尺寸设置为200.0 m×80.0 m×180.0 m,如图1所示。所构建的三维数值模型中基坑的尺寸为70.0 m×50.0 m,开挖深度为20.0 m;盾构隧道外直径为6.2 m,管片厚350.0 mm,基坑边界与盾构隧道之间的最小距离为15.0 m,基坑与盾构隧道之间的相对位置关系如图2所示;地下连续墙的埋深为30.0 m,宽度为1.0 m;基坑内共架设四道混凝土支撑,支撑的间距为7.0 m;底板厚0.6 m。

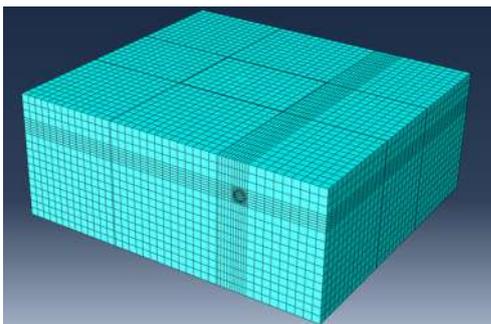


图1 整体三维有限元模型

Fig. 1 The overall three-dimensional finite element model

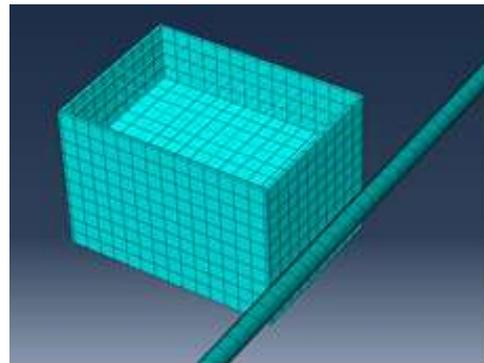


图2 基坑与隧道的相对位置

Fig. 2 Relative position of foundation pit and tunnel

土体采用各向同性的摩尔-库伦本构模型;盾构隧道管片和基坑各支护结构均使用线弹性本构模型;混凝土支撑采用beam单元进行模拟。墙、土之间的接触通过设置面-面有限滑移来实现。盾构隧道管片与土、底板与土、土与墙之间的接触均采用tie约束。

2.3 数值计算过程

基坑分步开挖和支护结构施工工序的模拟过程为:1) 构建基坑开挖初始三维有限元模型,将各个结构分别赋予参数,进行地应力平衡;2) 开挖盾构隧道,施作管片结构;3) 施作围护结构,设置墙、土接触关系;4) 架设第一道混凝土支撑;5) 开挖至地表以下5.0 m;6) 架设第二道混凝土支撑;7) 开挖至地表以下10.0 m;8) 架设第三道混凝土支撑;9) 开挖至地表以下15.0 m;10) 架设第四道混凝土支撑;11) 开挖至地表以下20.0 m。至此基坑土方开挖完毕,而后在基坑坑底进行底板施工。

3 管片开裂的关键因素分析

3.1 基坑与既有隧道之间的距离

基坑内土体的开挖卸荷会打破原有土层的平衡,使得基坑周边土体产生位移,进而使得管片结构发生变形开裂。由此可知,在对近接既有盾构隧道的基坑进行开挖时,基坑位置的选取十分重要。因此,本文选取基坑与既有隧道之间的距离分别为10.0、15.0、20.0 m的三种工况进行建模,分析基坑与既有隧道之间的距离对盾构隧道管片开裂的影响。计算结果如图3~4所示。

由图3~4可知,在三种不同距离工况下盾构隧道管片均出现了开裂,开裂区域均位于管片拱顶内表面,这些内表面裂缝大致平行于隧道纵向并呈抛

物线形。在距离为 20.0 m 时,裂缝长度约为 20.0 m;在距离为 15.0 m 时,裂缝长度约为 30.0 m;在距离为 10.0 m 时,裂缝长度约为 45.0 m。由此可知,随着基坑与既有隧道之间距离的不断减小,裂缝产生区域不断扩大,裂缝长度及数量不断增加,内外表面裂缝的两端皆有向既有基坑方向延伸的趋势。因此,基坑与隧道之间的距离是影响既有盾构隧道管片开裂的重要因素之一。若要在基坑开挖过程中使盾构隧道管片不出现裂缝,就必须保证基坑与既有盾构隧道之间有足够距离,否则,就需在新建基坑与既有盾构隧道之间施作隔离桩或隔断墙,以防止既有盾构隧道管片结构发生开裂破坏。

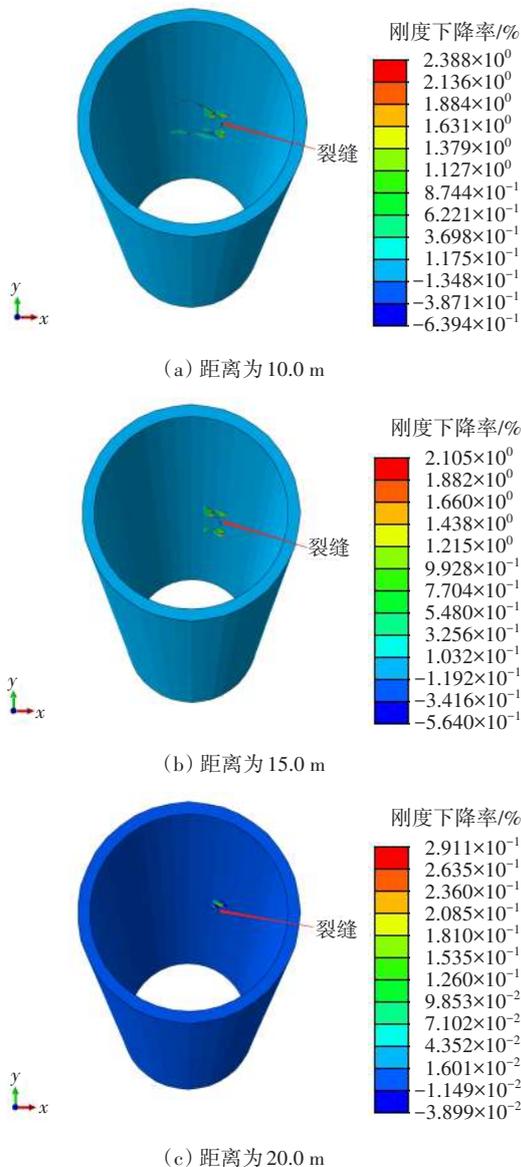


图 3 不同距离下管片裂缝的分布

Fig. 3 The distribution of segment cracks at different distances

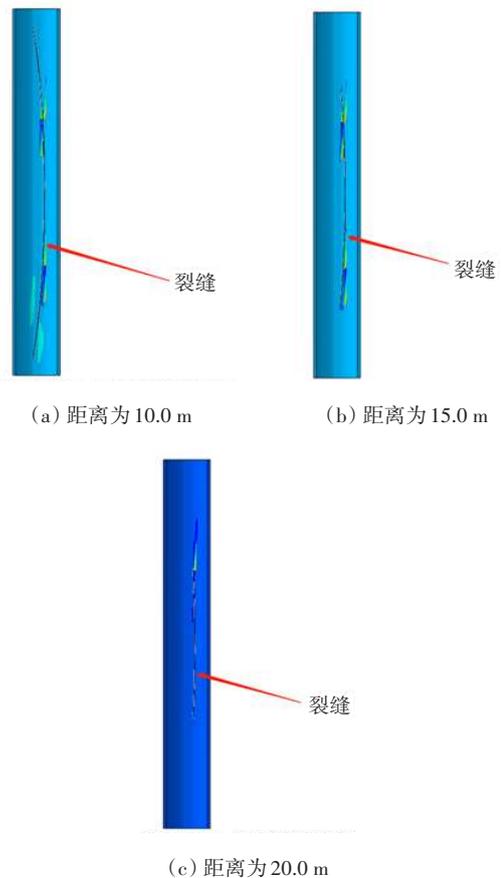


图 4 不同距离下管片裂缝的形态

Fig. 4 Morphology of segment cracks at different distances

3.2 基坑开挖深度

在实际工程中,不同建筑物基坑的开挖深度存在较大差别,基坑围护结构的变形和坑外土体的位移会随着开挖深度的不断增加而增大。为分析基坑开挖深度对既有盾构隧道管片开裂的影响,本文选取基坑开挖深度分别为 5.0、10.0、15.0、20.0 m 的四种工况进行建模,计算结果如图 5~6 所示。

由图 5~6 可知,在基坑开挖深度为 5.0、10.0 m 的两种工况下盾构隧道管片未发生开裂;在基坑开挖深度为 15.0、20.0 m 的两种工况下盾构隧道管片上出现了裂缝,开裂位置都位于盾构隧道管片拱顶的内表面上,这两种深度下的裂缝扩展方向以及裂缝形态均相近,但不同开挖深度下盾构隧道管片的裂缝长度存在差别。当开挖深度为 20.0 m 时,盾构隧道管片上的裂缝长约 30.0 m;当开挖深度为 15.0 m 时,盾构隧道管片上的裂缝长约 20.0 m。由此可知,基坑开挖深度越大,管片上越有可能产生裂缝,深度一旦达到或超越临界值,管片上就会产生裂缝。因此,基坑的开挖深度也是影响既有盾构隧道

管片开裂的重要因素之一,若新建基坑周边存在既有隧道,就需严格控制基坑的开挖深度,否则就会造成既有盾构隧道管片开裂。

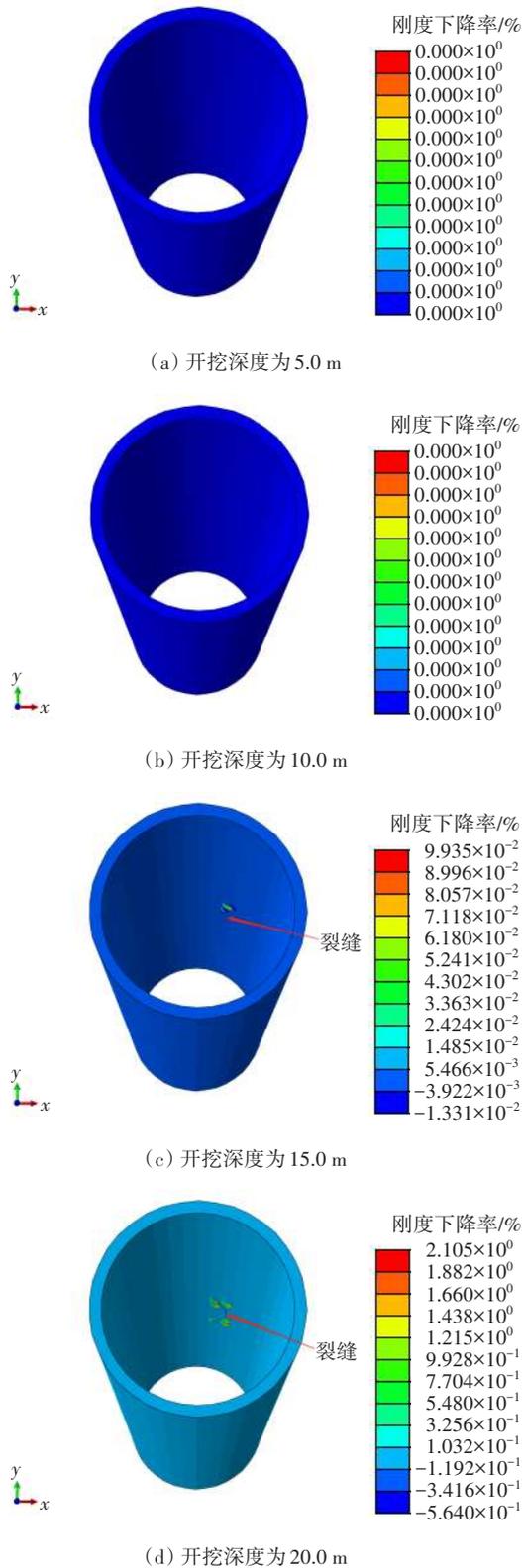


图5 不同深度下管片裂缝的分布

Fig. 5 The distribution of segment cracks at different depths

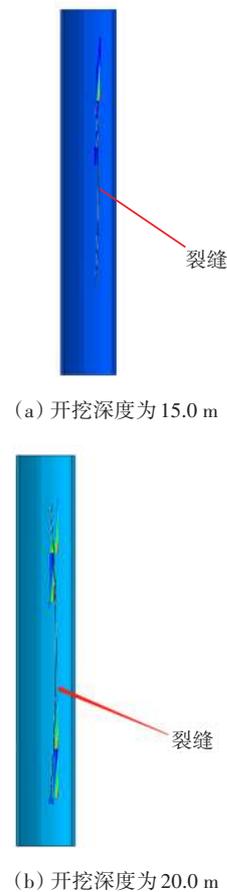


图6 不同深度下管片裂缝的形态

Fig. 6 Morphology of segment cracks at different depths

3.3 基坑与既有隧道的相对位置

基坑与隧道的相对位置大致可分为两种:基坑紧邻或上跨地铁盾构隧道^[17-20]。为分析基坑与隧道的相对位置对盾构隧道管片开裂的影响,本文选取基坑紧邻隧道左侧、基坑上跨隧道、基坑位于隧道右上方和基坑长边与隧道纵向平行四种工况分别进行建模,计算结果如图7~11所示。

由图7~11可知,基坑与盾构隧道的相对位置对盾构隧道管片裂缝扩展以及裂缝形态具有重要的影响。当基坑紧邻盾构隧道左侧开挖时,盾构隧道管片内表面出现抛物线形裂缝,裂缝沿隧道纵向扩展,长度约为30.0 m;当基坑上跨既有盾构隧道开挖时,盾构隧道管片上出现了内外贯通的裂缝,裂缝沿纵向贯穿整条隧道;当在隧道右上方开挖基坑时,管片上裂缝的分布情况与基坑上跨隧道时的基本一致;当基坑长边与隧道纵向平行时,基坑开挖导致盾构隧道管片上出现沿隧道纵向扩展的类似抛物线形的裂缝,其长度约为45.0 m。

与基坑紧邻隧道左侧相比,当基坑长边与隧道

纵向平行时,盾构隧道管片的裂缝更长,产生裂缝的区域更大;当基坑上跨隧道以及基坑位于隧道右上方时,盾构隧道管片产生贯通裂缝,裂缝更长,管片开裂情况也更为严重。这是因为基坑开挖卸荷使坑底土体隆起,土体位移传至下卧隧道,进而盾构隧道管片发生开裂。因此,在确定基坑与隧道相对位置时,要尽量避免基坑上跨隧道、基坑位于隧道右上方、基坑长边与隧道纵向平行,以防止盾构隧道管片发生开裂。

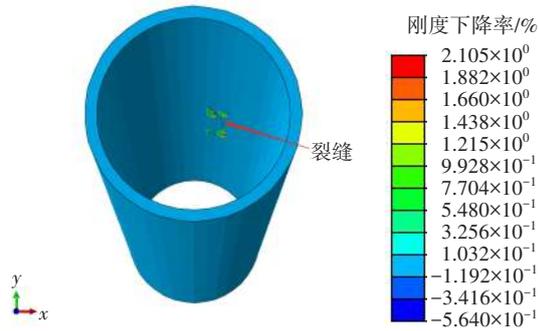
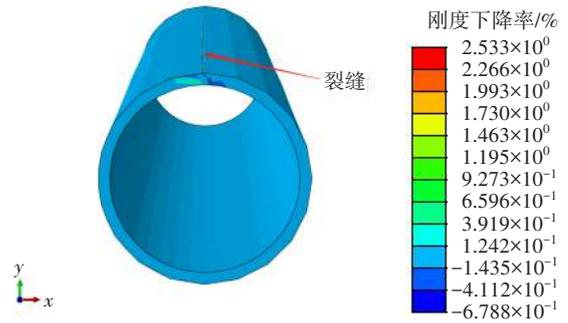
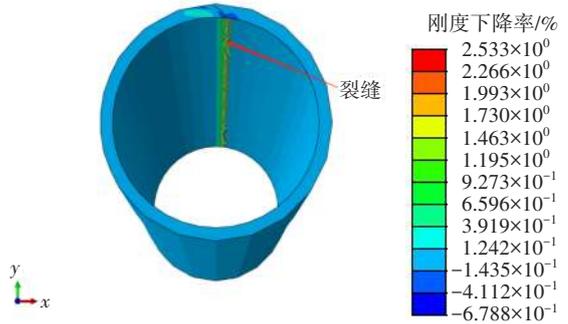


图 7 基坑紧邻隧道左侧时管片拱顶的裂缝分布

Fig. 7 The crack distribution of the segment vault when the foundation pit is close to the left side of the tunnel



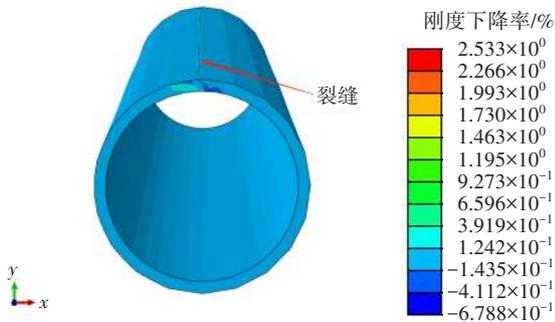
(a) 管片拱顶外表面



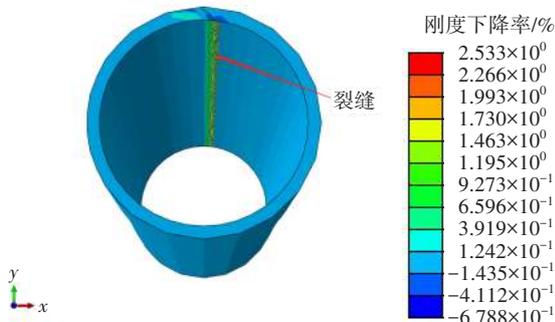
(b) 管片拱顶内表面

图 9 基坑位于隧道右上方时管片拱顶的裂缝分布

Fig. 9 The crack distribution of the segment vault when the foundation pit is at the upper right of the tunnel



(a) 管片拱顶外表面



(b) 管片拱顶内表面

图 8 基坑上跨隧道时管片拱顶的裂缝分布

Fig. 8 The crack distribution of the segment vault when the foundation pit crosses over the tunnel

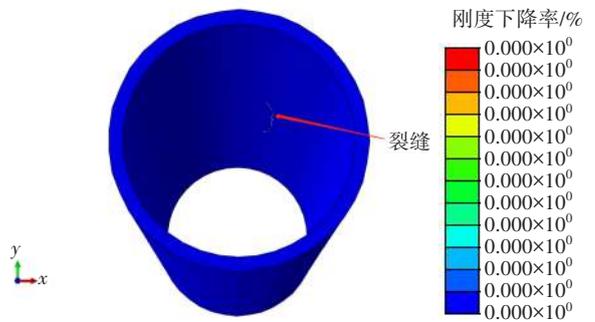
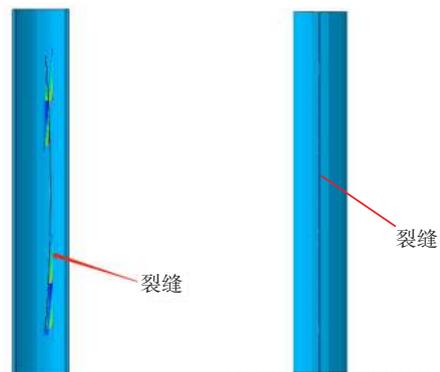


图 10 基坑长边与隧道纵向平行时管片的裂缝分布

Fig. 10 The crack distribution of the segment when the long side of the foundation pit is parallel to the longitudinal direction of the tunnel



(a) 基坑紧邻隧道左侧

(b) 基坑上跨隧道

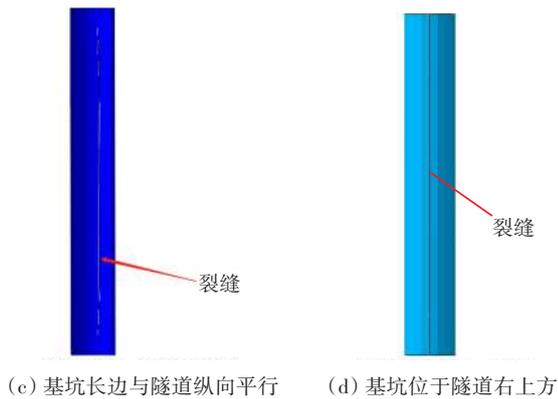


图 11 不同相对位置下管片表面裂缝的形态

Fig. 11 Morphology of cracks on segment surface under different relative positions between foundation pit and tunnel

4 结论

本文基于 ABAQUS 软件建立三维数值模型,通过分析基坑开挖诱发邻近既有隧道管片开裂的发生机理和裂缝分布特征,得出以下结论:

1) 基坑与隧道之间的距离和基坑的开挖深度是影响管片开裂区域和裂缝形态的重要因素。随着基坑与隧道之间距离的缩小以及基坑开挖深度的增加,既有盾构隧道管片的裂缝长度和数量有所增加,裂缝产生区域迅速扩大。

2) 基坑与隧道的相对位置也是影响盾构隧道裂缝扩展以及裂缝形态的重要因素。相比基坑紧邻隧道开挖,当基坑上跨盾构隧道时管片更易出现贯通裂缝,开裂情况也更为严重。当新建基坑位于既有隧道上方时,需要采取防治措施,以避免新建基坑施工诱发其下部盾构隧道管片开裂。

参考文献(References):

[1] 左殿军, 史林, 李铭铭, 等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 391-395. DOI: 10.11779/CJGE2014S2068.
ZUO Dianjun, SHI Lin, LI Mingming, et al. Numerical analysis of influence of deep excavations on adjacent subway tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(sup 2): 391-395. DOI: 10.11779/CJGE2014S2068.

[2] 高芬. 基坑开挖对周围埋地管线及土体变形影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
GAO Fen. Analysis of the influence of foundation pit excavation on the deformation of surrounding buried pipelines and soil [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[3] 李平, 杨挺, 刘汉龙, 等. 基坑开挖中既有下穿地铁隧道隆起变形分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011(5): 480-485. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.201105014.
LI Ping, YANG Ting, LIU Hanlong, et al. Heave deformation of existing tunnels under new tunnel excavation [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011(5): 480-485. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.201105014.

[4] 王春国. 新建隧道下穿对既有隧道稳定性影响研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 62-66. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.010.
WANG Chunguo. Influence of underpass of new tunnel on stability of existing tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 62-66. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.010.

[5] 贺炜, 邓子君, 刘剑锋, 等. PVC板桩支护结构的长期变形特性及设计方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(3): 41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.03.006.
HE Wei, DENG Zijun, LIU Jianfeng, et al. Study on long-term deformation characteristics and design method of PVC sheet pile support structure [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(3): 41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.03.006.

[6] 胡恒, 朱厚喜, 贾立宏. 基坑开挖对邻近地铁结构基础的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 116-119.
HU Heng, ZHU Houxi, JIA Lihong. Effect of pit excavation on subway foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(sup 1): 116-119.

[7] 岳云鹏, 刘晓玉, 张龙云, 等. 基坑分块开挖对下卧盾构隧道的变形影响分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(9): 113-119. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201910050002.
YUE Yunpeng, LIU Xiaoyu, ZHANG Longyun, et al. Study on the influence of partitioned excavation of foundation pit on the deformation of subterranean shield tunnel [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(9): 113-119. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201910050002.

[8] 许军平. 软土地区深基坑坑内土体竖向加固形式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
XU Junping. Study on different forms of vertical reinforcement in deep excavated pit in soft-clay area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[9] 张治国, 费思异, 邢李. 双基坑开挖对邻近隧道结构变形影响分析[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(2): 176-181. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.2017.02.014.
ZHANG Zhiguo, FEI Siyi, XING Li. Analysis on the influence of adjacent double foundation pit excavation on tunnel deformations [J]. Journal of University of

- Shanghai for Science and Technology, 2017, 39 (2) : 176-181. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.2017.02.014.
- [10] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 3452-3458. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.z1.115.
- WU Shangyong, YANG Xiaoping, LIU Tingjin. Analysis of influence on deformation of adjacent subway tunnel due to bilateral deep excavations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (sup 1) : 3452-3458. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.z1.115.
- [11] 杜建强, 朱兆荣, 吴红刚. 深基坑开挖对下卧近距地铁盾构隧道的影响分析与保护技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 236-245. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.S2.030.
- DU Jianqiang, ZHU Zhaorong, WU Honggang. Influence of deep foundation pit construction on near subway shield tunnel and its protection technology [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (sup 2) : 236-245. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.S2.030.
- [12] ZHANG J F, CHEN J J, WANG J H, et al. Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 36: 24-33. DOI: 10.1016/j.tust.2013.01.011.
- [13] ATTEWELL P B, WOODMAN J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil [J]. Ground Engineering, 1982, 15 (8) : 13-22, 36.
- [14] 陈郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91-94. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2005.01.020.
- CHEN Yu, LI Yongsheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 (1) : 91-94. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2005.01.020.
- [15] SUKUMAR N, PRÉVOST J H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method Part I: computer implementation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(26) : 7513-7537. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.08.002.
- [16] MELENK J M, BABUŠKA I. The partition of unity finite element method: basic theory and applications [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139(1-4) : 289-314. DOI: 10.1016/S0045-7825(96)01087-0.
- [17] 赵朋. 基坑开挖对零距离下卧盾构隧道的影响[J]. 中外公路, 2023, 43(6) : 253-260. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.040.
- ZHAO Peng. Influence of foundation pit excavation on zero-distance underlying shield tunnel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43 (6) : 253-260. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.040.
- [18] 晏莉, 赵宇佳, 濮义. 新建盾构隧道近距离正交上跨既有隧道的施工影响研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3) : 128-134. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.027.
- YAN Li, ZHAO Yujia, PU Yi. Study on the construction influence of the newly-built shield tunnel crossing the existing tunnel at close range and orthogonal [J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40 (3) : 128-134. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.027.
- [19] 蒋超, 曹前, 蔡光伟, 等. 红层盾构隧道交叠下穿运营地铁隧道影响分析[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3) : 64-71. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.008.
- JIANG Chao, CAO Qian, CAI Guangwei, et al. Analysis on the influence of shield tunnels in red stratum overlapping and underneath passing existing subway tunnels [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38 (3) : 64-71. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.008.
- [20] 李辉, 王怀东, 王洋, 等. 紧邻围护结构超小净距盾构施工数值分析[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6) : 101-110, 122. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022033023121981.
- LI Hui, WANG Huaidong, WANG Yang, et al. Numerical analysis of ultra-small interval shield receiving construction near envelope structure [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (6) : 101-110, 122. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022033023121981.

(责任编辑:石月珍)