

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0103

邻近基坑开挖对盾构隧道结构影响的精细化数值分析

吴冰¹, 陈科技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 310008;

2. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在邻近隧道进行基坑工程时, 开挖作业所引起的卸荷效应将破坏隧道与土体之间原有的受力平衡, 从而在隧道结构中产生附加应力, 严重时可能导致管片破损、接缝张开和错台以及渗漏水等情况的发生. 利用 ABAQUS 有限元分析软件, 在充分考虑盾构隧道管片的非连续特征及其与螺栓和土层之间相互作用的基础上, 构建了一个三维精细化模型来分析邻近开挖下盾构隧道结构力学行为规律. 研究重点在于分析不同隧道埋深和隧道与基坑之间的距离对既有盾构隧道结构的响应. 结果表明: 首先, 通过与实验数据及现场监测数据的对比分析, 证实了所建立的盾构隧道模型的准确性和适用性; 其次, 基坑开挖引起的卸荷作用会导致盾构隧道在纵向上产生非均匀且非连续的水平位移, 特别是在基坑开挖影响范围内, 隧道的水平位移更为显著, 而在基坑边缘处则可能出现较大的错台现象. 此外, 研究基于大量的工况模拟结果, 利用参数拟合技术, 建立了盾构隧道横向与纵向变形间的关联模型. 最后, 依据盾构隧道的设计规范和控制标准, 确定了隧道的最大水平位移应控制在 17.39 mm 以内, 而横向的最大收敛率应不超过 0.237%, 以确保隧道结构的稳定性和安全性.

关键词: 基坑开挖; 盾构隧道; 精细化建模; 数值模拟

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 06-0010-10

近年来, 随着城市地下空间的进一步开发, 既有地铁盾构隧道旁侧基坑开挖工程越来越常见, 其中基坑开挖卸载会改变周围土体原有位移和应力场, 产生新的附加应力和变形, 并通过土体传递引起邻近隧道结构的位移和应力发生相应变化. 隧道产生过大的不均匀变形不仅会导致管片接缝张开和错台, 若情况严重, 会造成接缝处渗漏水、螺栓断裂等危害, 导致隧道进一步损坏^[1].

目前探讨基坑开挖卸荷作用对邻近盾构隧道影响的研究可归结为四大类: 理论解析^[2-8]、模型试验^[9-11]、现场实测^[12-13]及数值计算^[14-17]. 理论分析基坑开挖对既有隧道的影响主要分为两个阶段: 首先, 分析基坑开挖卸荷后土体产生的附加应力和位移场; 其次, 在已有隧道上施加附加应力和位

移场, 分析其受力和变形的变化规律. 张治国等^[2]使用 Mindlin 解得出基坑开挖卸荷过程中产生的附加应力场和位移场, 并利用 Winkler 弹性地基梁理论进行地层与隧道结构相互作用分析, 进而求出隧道变形. 2017 年, 梁荣柱等^[3]基于 Timoshenko 梁理论及 Mindlin 弹性解, 利用有限差分方法求解深基坑开挖过程中的竖向变形, 其计算结果与工程实例的实测数据能有效对应, 验证了其理论的可靠性. 2018 年, 周泽林等^[4]考虑天然地层的非均匀性, 将其与隧道的变形进行耦合分析, 建立了一套适合于基坑施工对邻近隧道影响的解析表达式, 并与两阶段分析法的计算结果进行对比, 发现本方法具有计算较简便且精度较高的特点, 而且更加贴近实际. 何小龙等^[5]在 Pasternak 弹性基础梁

收稿日期: 2024-01-02.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY220008).

第一作者: 吴冰, 高级工程师, 主要研究方向: 电力基建、电网工程数字化. E-mail: wu_bing@zj.sgcc.com.cn

*通信作者: 熊勇林, 博士/副教授, 主要研究方向: 岩土材料本构模型及数值分析. E-mail: xiongyonglin@nbu.edu.cn

模型中引入管-土分离模型, 给出了一种用于求解基坑工程引起的相邻管道的变形分析方法, 通过与实际工程观测资料的比较, 发现在考虑了管-土分离的情况下计算结果更准确。

Huang 等^[9]通过离心机模型实验, 分析了不同埋深对既有隧道变形的影响。研究发现, 基坑开挖对下卧隧道的抬升效应主要出现在基坑开挖面和坑外 2.5 倍开挖宽度内, 且随着基坑与隧道垂直距离的增大, 隆起量以指数形式降低, 在超过 1.5 倍深的情况下, 开挖卸荷对下卧隧道的影响较小。魏少伟^[10]采用离心机模型实验方法, 研究了不同位置、不同土层的弹性模量等因素对隧道内力以及变形的影响, 结果表明: 隧道的变形和内力随深度的增加而减小; 通过增加土体的弹性模量, 可以有效地降低隧道的变形和内力。张治国等^[12]通过对上海某邻近隧道的基坑工程监测资料的分析, 研究了基坑施工过程中, 基坑和隧道变形的规律, 发现地面沉降呈抛物线状, 围护结构向基坑侧移动, 同时隧道的水平变形也呈现出向外伸展的趋势, 且与地面沉降和支护结构的变形基本一致。

高广运等^[14]利用 FLAC 3D 软件, 对上海某邻近的地下隧道进行了动态仿真研究, 发现单向开挖卸荷可导致隧道产生非均匀变形, 通过二次加固和逆向施工可显著降低其变形量。Shi 等^[15]考虑了盾构隧道衬砌的非连续性以及隧道管段、围岩和道床三者之间的相互作用, 以某既有盾构隧道为对象, 研究了基坑水平开挖影响下盾构隧道管片和节点的受力变形特征。伍尚勇等^[16]采用 MIDAS GTS 软件, 在不同的施工条件下, 对基坑开挖过程中周边土体和隧道影响进行仿真, 并与现场实测数据进行比较, 验证所得结论的准确性。

盾构法施工在隧道建设中扮演着重要角色, 然而, 大量管片的拼接以及高强度螺栓的连接使得管片接缝区域往往成为结构的薄弱环节, 对变形尤为敏感。目前的研究多集中于探究基坑开挖引起的卸荷作用对盾构隧道整体受力状态和变形行为的影响。

本研究则从管片与连接螺栓的非线性力学特性入手, 在综合考虑了管片横向与纵向的非连续特性以及地连墙和钢管支撑等围护结构作用的基础上, 构建了一个三维精细化的地层结构模型。通

过设置不同隧道埋深和隧道与基坑之间的距离, 揭示了基坑开挖卸载过程对既有盾构隧道管片接缝及接头螺栓变形性能的具体影响。此外, 通过拟合分析确定了隧道管片横向及纵向变形的关键参数, 并提出了合理的隧道变形安全控制限值。研究结果不仅丰富了盾构隧道结构变形分析的理论基础, 同时也为类似隧道工程的安全设计与施工提供了重要的参考依据。

1 模型介绍

1.1 盾构隧道模型

为研究基坑开挖对邻近既有盾构隧道结构的影响, 本文建立三维精细化隧道计算模型, 研究基坑开挖作业时盾构隧道结构受力演化机制。

如图 1 所示, 盾构隧道单环管片是由 3 种管片组成, 分别为: 封顶块 K (21.5°)、2 个相邻块体 B (68°) 和 3 个标准块体 A (67.5°)。每环管片厚度为 350 mm, 环宽为 1.5 m, 外径为 $D=6.20$ m。隧道管片之间采用螺栓锚固。

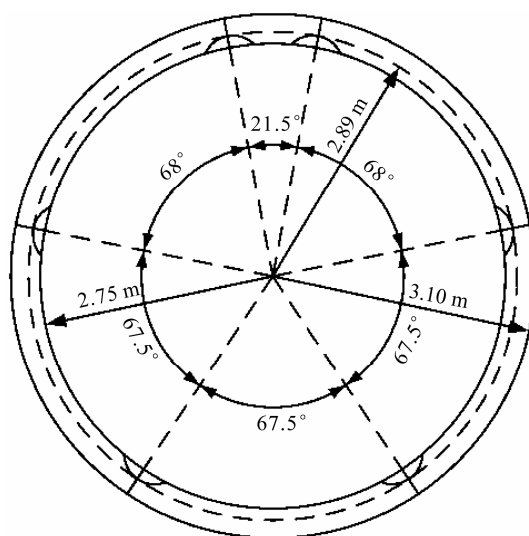


图 1 盾构隧道单环管片模型

图 2 展示了盾构隧道三维模型, 隧道长度均考虑为 45 m, 整体采用多尺度建模方法, 隧道总共 38 环管片, 中间 30 环采用精细化建模, 考虑了隧道的接缝和连接螺栓, 每环管片之间的接头包括 16 个环向螺栓和 12 个纵向螺栓, 模型总计螺栓 952 个。为了提高计算效率并节约计算资源, 隧道两端的管片采用了整体式建模方法, 这样既保证了模型的完整性, 又优化了计算过程。

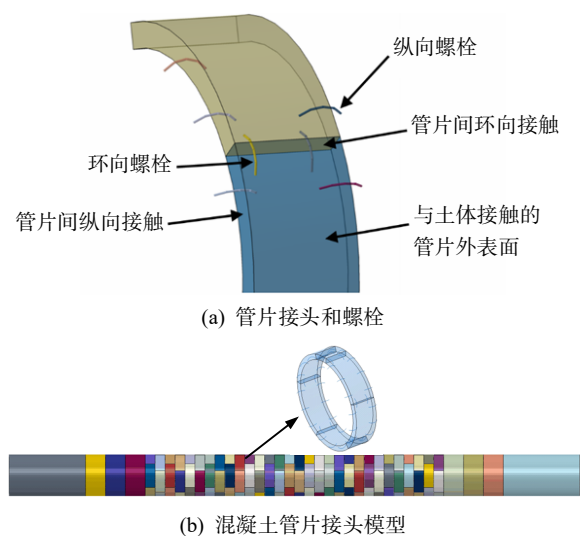


图2 隧道管片及螺栓模型

1.2 基坑模型

如图3所示, 基坑-隧道模型采用了地层结构法进行构建, 土体的尺寸被设定为宽度70 m、深度50 m 以及长度86 m, 以确保模型能够真实反映实际工程条件. 在该模型中, 土体和地连墙的结构通过实体单元 C3D8R 进行模拟, 而螺栓和钢管支撑则通过梁单元 B31 来表示, 整个模型由 295 992 个单元精细组成. 为了确保模型的接触面能够准确地反映实际的物理行为, 管片、土体、地连墙等实体单元的所有接触面均被设定为“硬接触”, 即这些接触面能够传递无限制的接触压力. 当接触压力降至零或成为负值时, 相应的两个接触面将会分离, 并且在对应的节点上移除接触约束, 以模拟实际的脱离情况. 此外, 本模型采用了摩尔-库伦模型来精确模拟接触面的摩擦特性, 这一模型在文献[18-19]中有详细的描述和应用. 借助这些精细化建模, 模型能够为基坑开挖与隧道相互作用的复杂力学行为提供深入的分析 and 理解.

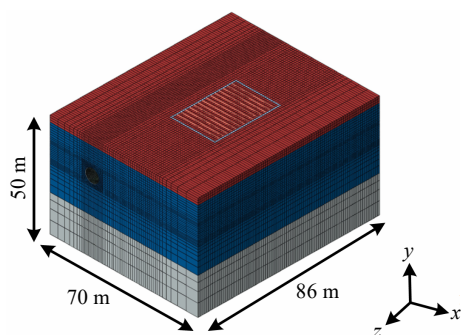


图3 基坑三维模型

如图4所示, 基坑的横向宽度为20 m, 纵向长度为30 m, 深度为18 m. 地下连续墙作为基坑的建筑围护结构, 其厚度为0.8 m, 总深度为32.4 m. 采用钢管作横向支撑. 钢管半径304.5 cm, 厚度16 mm. 横向支撑水平距离为20 m, 竖向距离为3.0 m. 隧道走向与基坑纵向平行.

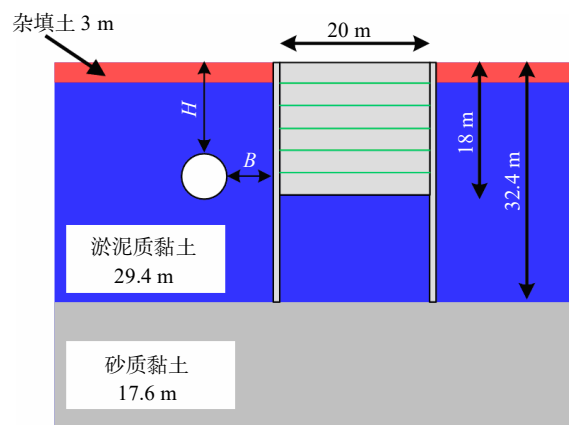


图4 基坑剖面

为了分析不同隧道埋深和隧道与基坑之间的距离对既有盾构隧道结构的响应, 本研究设计的具体的工况分类见表1.

表1 隧道工况

工况	隧道埋深(H)	隧道与基坑间距(B)
HB-11	6.2	6.2
HB-21	12.4	6.2
HB-31	18.6	6.2
HB-12	6.2	12.4
HB-22	12.4	12.4
HB-32	18.6	12.4

1.3 本构模型与材料参数

参照混凝土结构设计规范^[20]给出的钢筋混凝土本构关系, 螺栓采用双折线梁单元模型, 其屈服强度和极限强度分别为640 MPa 和800 MPa, 屈服阶段的弹性模量折减为初始弹性模量的1%. 管片采用三维实体单元 C3D8R 进行模拟, 并引入损伤塑性本构关系来描述其力学特性, 相关参数具体数值见表2和表3.

表2 混凝土材料力学参数

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	抗压强度标 准值/MPa	抗拉强度标 准值/MPa
2 500	35.5	0.2	35.5	2.74

表 3 混凝土塑性损伤模型参数

膨胀角/(°)	流动势偏移量	双轴受压与单轴受压极限强度比	不变量应力比	黏性系数
30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 01

本文以典型软土地区地层为研究对象, 土层简化分为素填土、淤泥和黏性土 3 类土体, 相应的高度分别为 3.0、29.4 和 17.6 m, 土体力学特性采用摩尔库伦本构模型进行模拟, 其参数详见表 4.

表 4 土体及材料参数

材料	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	0.30	1 870	40	22	18
淤泥质黏土	0.30	1 640	35	20	15
砂质黏土	0.30	1 890	45	25	22
接头螺栓	0.25	7 850	210 000		
地连墙	0.20	2 400	30 000		
钢支撑	0.25	7 850	210 000		

2 模型验证

2.1 管片接头模型验证

利用已有的模型试验结果^[21]对混凝土管片接头模型进行验证. 混凝土管片和螺栓接头采用的本构模型及参数见 1.3 节. 数值模型与试验的加载方案一致, 管片模型采取等值加载模式. 如图 5 所示, 首先在模型横向施加轴向力 N 到 $900\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 同时将对应的垂直荷载 P 施加到 $P_0=250\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 以模拟隧道管片的初始受力条件. 在此基础上, 继续增大垂直荷载, 直至 $P_1=521\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$.

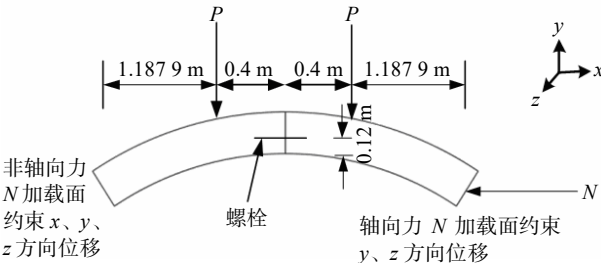


图 5 管片等效加载示意

图 6 展示了有限元计算与试验数据的对比结果, 从图中可知, 当弯矩小于 $100\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 混凝土管片接头的张开量小于 0.2 mm ; 当弯矩超过 $150\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 管片接头处的混凝土首先发生破坏,

随着荷载的持续增加, 螺栓进入塑性, 接头处的张开量急剧上升. 模拟计算结果与试验数据基本一致, 证明了该螺栓接头模型的可靠性.

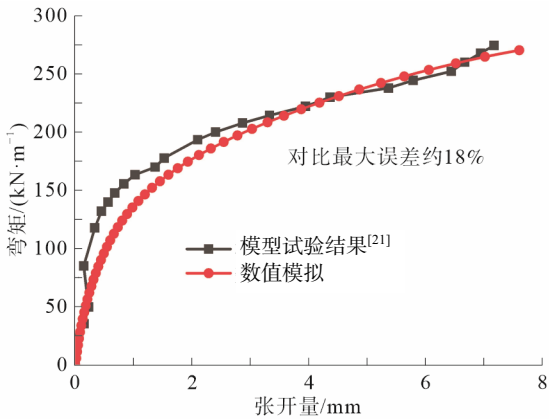
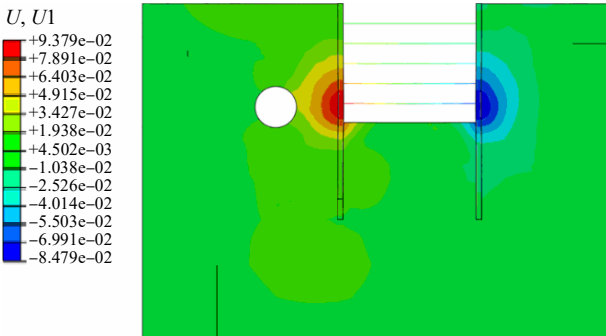


图 6 模拟及试验截面弯矩随张开量变化规律

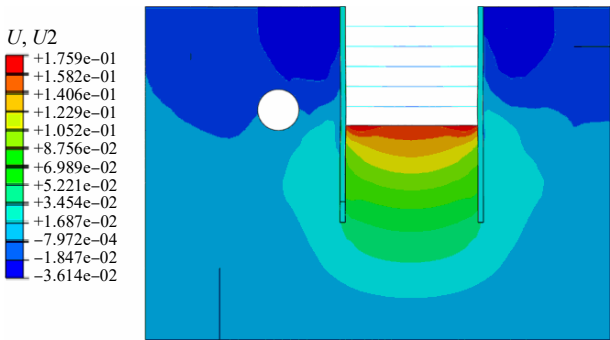
2.2 基坑模型验证

在基坑模型计算中, 采用导入初始应力的方法确定地层的初始地应力, 并采用生死单元技术模拟基坑的开挖与支护过程. 土层的开挖过程为逐层开挖, 每层开挖的深度为 3 m , 纵向和横向宽度分别为 30 和 20 m , 总共开挖 6 层. 每“杀死”一层土体单元的同时需要“激活”相应的连续墙单元和支撑结构单元, 为保证模型的计算连续性和稳定性, 将整个开挖工况分为 6 个计算步进行连续计算, 同时地下连续墙的最终插入比为 $1:0.8$.

图 7 展示了隧道埋深 $2D$ (12.4 m)、间距 $1D$ (6.2 m) 工况的基坑位移云图, 从图 7(a)中可见, 地下连续墙横向位移的最大值出现在基坑底部. 由于上部土层的开挖卸载造成底部土体自重力消散, 同时基坑两侧土体往基坑内部挤压, 使得基坑底部土体隆起, 如图 7(b)所示.



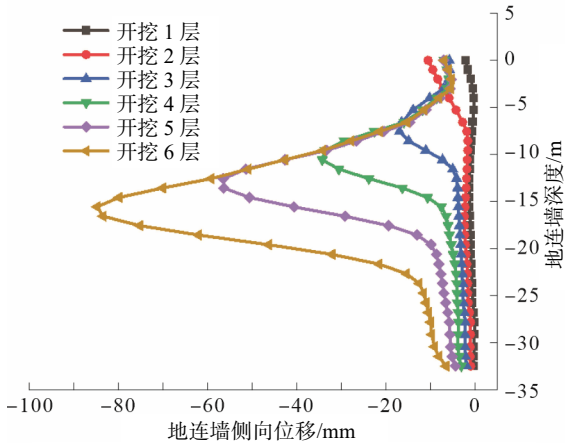
(a) 水平位移



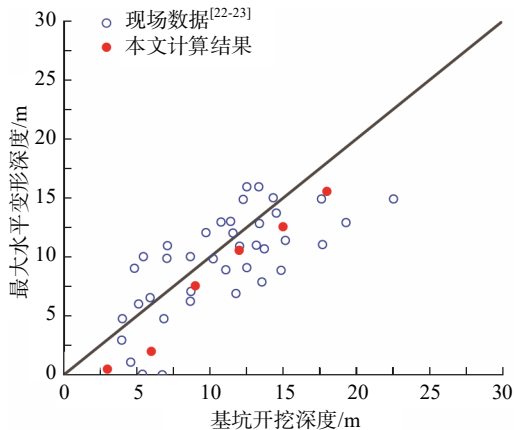
(b) 竖向位移

图7 基坑模型最终位移云图

图8展示了开挖过程中, 远离隧道一侧地下连续墙的变形情况.



(a) 远离隧道一侧地连墙深度与横向位移关系



(b) 基坑开挖深度与地连墙最大变形深度关系

图8 基坑地连墙变形图

从图8(a)中可以看出, 随着开挖的进行, 地下连续墙的水平位移逐步增大, 同时最大位移的区域也逐步下移. 由于基坑维护结构的变形量对邻近隧道结构的影响起到决定作用, 本文将模型的计算结果与36组现场数据^[19-20]进行对比, 从图8(b)

可以看出, 在基坑开挖深度相同的情况下, 模型计算的维护结构变形与现场监测数据相近, 说明本文模型能有效地描述基坑开挖过程中支护结构的变形规律, 这为后续合理讨论基坑开挖对邻近结构变形的影响提供了有效支撑.

根据建筑基坑工程监测技术标准^[24]的要求, 一级基坑支护结构变形控制值为 $0.2\%H_w \sim 0.5\%H_w$, 其中 H_w 为开挖深度. 表5展示了各次基坑开挖时的支护结构变形控制值和模型计算结果. 从表中可以看出, 模型计算结果均满足基坑规范的要求. 值得注意的是, 本文中每个工况模型均满足以上条件.

表5 支护结构变形控制值与计算结果对比

开挖深度/m	规范控制最大值/mm	模型计算结果/mm
3.0	15.0	3.0
6.0	30.0	8.9
9.0	45.0	19.6
12.0	60.0	37.5
15.0	75.0	58.8
18.0	90.0	85.1

3 盾构隧道结构变形规律

3.1 纵向变形规律

图9展示了隧道埋深12.4 m、与基坑间距6.2 m的工况下, 基坑开挖过程中盾构隧道水平位移的变化, 可以看出, 随着开挖深度增加, 开挖范围内的隧道水平位移逐渐增大. 隧道水平位移曲线整体呈正态分布. 由于本文盾构隧道模型采用精细化分离式建模方法, 隧道局部变形为非光滑折线.

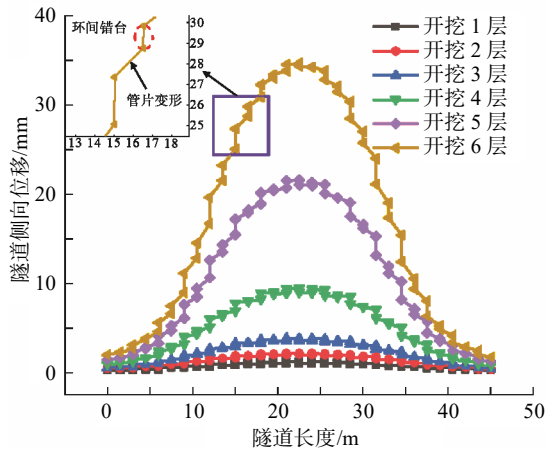


图9 盾构隧道水平位移分布曲线

从图9细部放大图可以看出, 隧道水平变形由两部分组成, 一部分为隧道管片的变形, 另一部分为环间错台变形。

图10展示了隧道埋深12.4 m、与基坑间距6.2 m的工况下, 隧道每环管片之间的错台量。从图中可以看出, 隧道的错台变形整体呈现双峰形状, 由于基坑开挖区域内外两侧的土层附加应力急剧变化, 导致隧道错台量最大值出现在基坑开挖的边缘。隧道中心处的管片错台量较小。同时, 隧道管片错台变形并不连续, 其原因是计算模型采用错缝拼接的方式, 相邻隧道管片的刚度在同一水平位置并不相等。

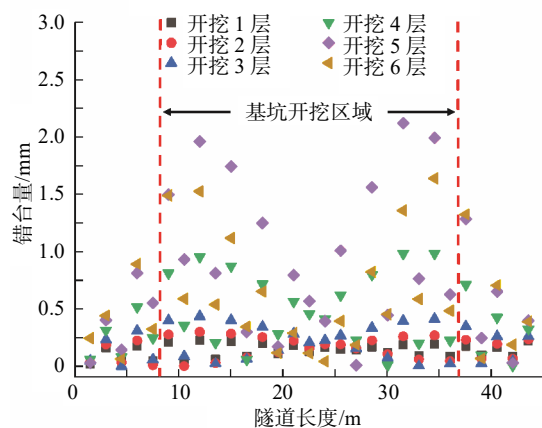


图10 盾构隧道错台量分布曲线

3.2 隧道横向收敛变形

随着基坑开挖变化, 邻近隧道横向变形, 包括: 隧道管片自身的变形和管片旋转变形。仅依靠隧道管片的垂直变形和水平变形去评价隧道结构的收敛变形会导致估计值偏小而无法及时排除安全隐患。

本文采用无约束多元函数最小值优化算法, 对隧道结构的收敛变形进行拟合计算, 操作流程如下:

- (1)提取隧道管片表层有限个数的节点坐标;
- (2)通过无约束多元函数最小值优化算法进行拟合计算, 利用拟合参数得出隧道变形后的椭圆曲线方程;
- (3)通过椭圆方程计算出隧道最大收敛变形值以及隧道最大收敛率。

隧道横向最大收敛率作为评价盾构隧道结构安全性的重要指标, 其计算公式为

$$c = \Delta D / D, \quad (1)$$

式中: c 为隧道横向最大收敛率; ΔD 为隧道横向的最大收敛值; D 为隧道外径。

3.2.1 开挖深度的影响

为研究基坑开挖深度对隧道横向收敛率的影响, 以隧道埋深12.4 m、与基坑间距6.2 m的工况为例进行分析。从图11可以看出, 在侧方卸载作用下, 隧道向基坑方向发生水平位移, 其中靠近基坑一侧的水平位移远大于另一侧的位移, 由于隧道两侧位移的差异导致其发生“横鸭蛋”变形。同时深层土体由于受到坑内卸载回弹的影响, 产生一定的隆起变形, 导致隧道上移。

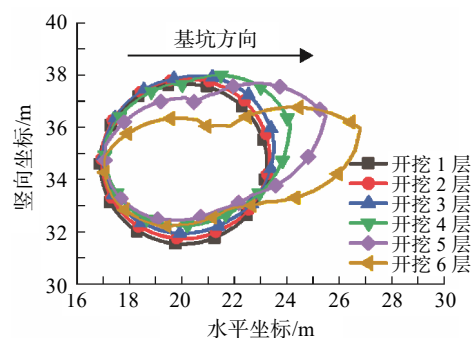


图11 隧道断面变形图(隧道变形放大100倍)

随着开挖的进行, 当开挖面从位于隧道侧上方过渡到位于隧道正侧方时, 地层水平位移、隧道整体位移和水平收敛均明显增大。整个开挖期间, 隧道除了产生指向开挖面的位移外, 自身也发生横椭圆形变形以及一定程度的旋转, 并且椭圆形长轴方向指向开挖面处。

3.2.2 埋深和间距的影响

图12展示了表1所列的6种不同工况下, 隧道管片的横向最大收敛率与基坑开挖阶段之间的关系曲线。从图中可以看出, 在相同埋深条件下, 隧道与基坑之间的距离越小, 隧道结构的横向最大收敛率就越高。在这些工况中, HB-21 工况的收敛变形率是最高的, 特别是在开挖深度达到12 m时, 其横向最大收敛率出现了显著的增长。产生这种现象的原因是在HB-21 工况下, 隧道的埋设深度为12.4 m, 而根据图8所示, 当开挖深度达到12 m时, 基坑围护结构的横向变形将会突然增大, 从而导致邻近隧道结构变形显著增加。此外, 从图12中还可以看出, 当隧道与相邻基坑的开挖距离

相等时,如果基坑的开挖深度接近隧道的埋设深度,那么对隧道结构变形的影响将是最为显著的.因此,在实际工程实践中,应当针对这种情况采取有效的措施来减轻其影响.

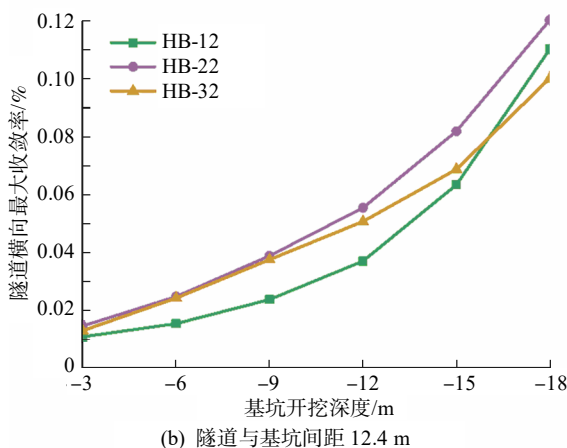
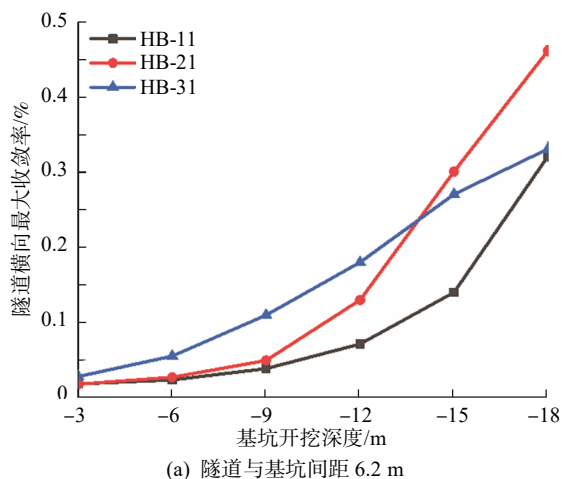


图 12 隧道横向最大收敛率与基坑开挖深度关系

图 13 所示为 6 种不同工况下隧道在横向收敛变形方面的最终形式.从图中可以明显看出,随着既有隧道位置的变动,其横向变形的最终形态呈现出多样性.具体来说,对于埋深为 6.2 m 的工况 HB-11 和 HB-12,隧道的最终位置普遍出现了下沉现象;而对于埋深达到 12.4 m 的工况 HB-21 和 HB-22,隧道主要表现为侧向水平位移;另外,在埋深为 18.6 m 的工况 HB-31 和 HB-32 中,隧道的最终位置则普遍上升.这种现象的产生主要是由于侧方基坑开挖作业导致隧道侧方土压力减小,进而破坏了隧道原本的横向平衡状态,引发了隧道的沉降或上浮变形.这一现象与文献[25]的结论相吻合.综上所述,通过考察隧道埋深与基坑开挖

深度的关系,可以迅速推断出隧道结构可能发生的变形类型(如上浮、下沉或横向移动).这一认识为工程实践中隧道变形的预测和防范提供了重要的经验和理论依据.

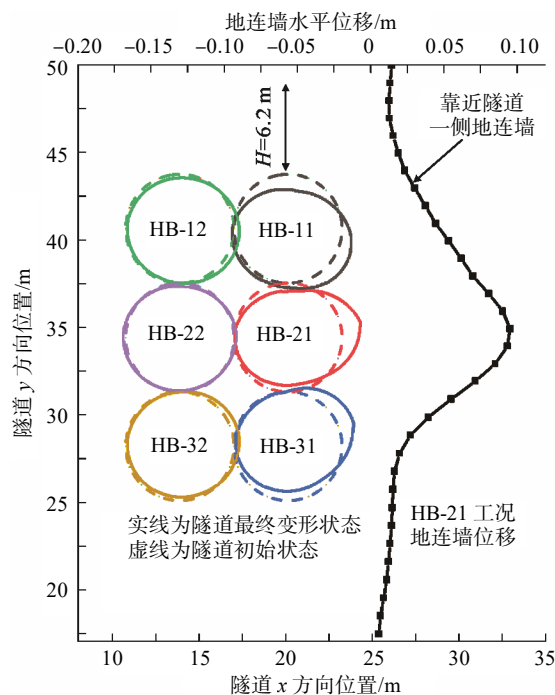


图 13 基坑开挖卸载后隧道最终变形状态

3.3 隧道接缝变形规律

由于隧道为地下建筑,其检修非常困难,其中盾构隧道管片接头处的张开量是判断隧道是否正常工作的重要标准.根据地铁设计规范,要求接缝张开量应小于 0.2 mm.在表 1 中不同隧道埋深和间距的 6 种工况下,本文对隧道管片接缝最大张开量的变化进行分析.

图 14 展示了各种工况中隧道最大张开量与基坑开挖深度之间的关系.对比图 14(a)与(b),可以观察到,隧道与基坑之间的距离对于接缝处的张开量有着比隧道埋深更为重要的影响.在图 14(a)所示的工况 HB-21 和 HB-31 中,基坑开挖初期隧道的最大张开量增长较为和缓.但随着开挖深度逼近隧道埋深,管片在接近开挖面拱腰区域迅速过渡到塑性变形阶段,伴随着螺栓内力的急剧增长,最大张开量随之经历了一个急剧上升阶段.相对地,在图 14(b)展示的 3 种工况中,由于隧道与基坑之间的距离较远,基坑开挖引起的土体卸载对隧道的影响相对较小,因此隧道接缝处的张开量

变化呈现出较为平稳的趋势. 这一对比分析有助于理解在隧道保护工程中, 邻近施工活动与周围地质环境之间的相互作用, 以及如何通过调整施工参数来优化隧道结构的稳定性.

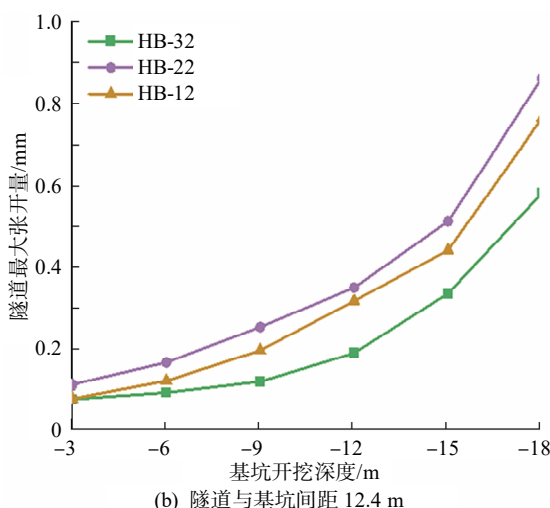
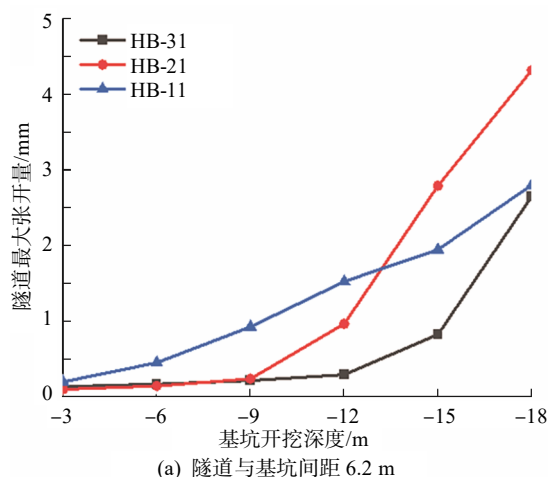


图 14 隧道最大张开量与基坑开挖深度的关系曲线

3.4 隧道变形安全控制值划分

综合不同基坑开挖卸载工况中盾构隧道最大水平位移量、最大张开量和横向最大收敛率的计算结果, 得到盾构隧道横向和纵向结构变形之间的拟合公式和曲线. 如图 15 所示, 在基坑开挖卸载下, 隧道最大张开量与最大水平位移之间呈线性关系, 其拟合公式为

$$u_s = 7.98x_m + 1.43, \quad (2)$$

式中: u_s 为隧道最大水平位移; x_m 为隧道横向最大张开量.

盾构隧道横向最大收敛率与隧道最大水平位移的拟合曲线如图 16 所示, 拟合公式为

$$u_s = 7188.26c + 0.34. \quad (3)$$

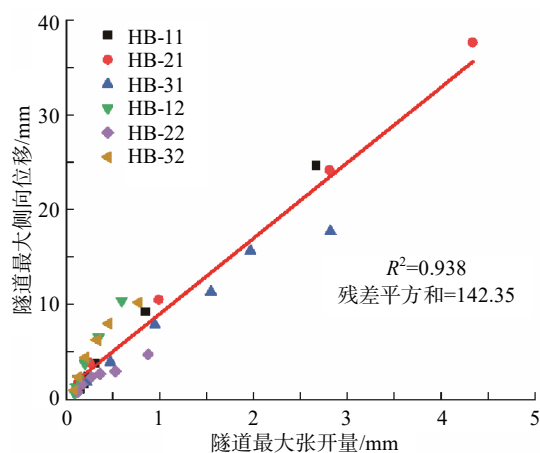


图 15 隧道最大张开量与最大水平位移拟合

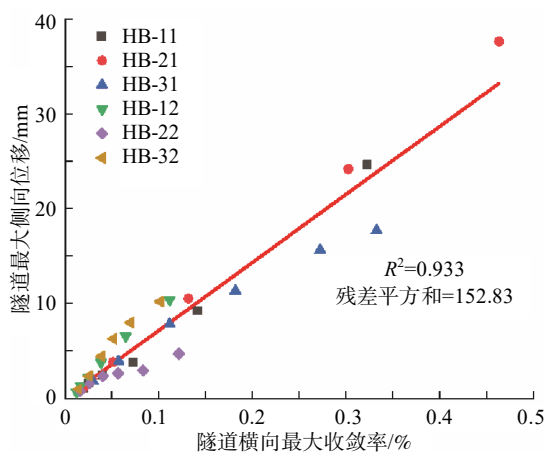


图 16 隧道横向最大收敛率与最大水平位移拟合

根据城市轨道交通结构安全保护技术规范^[26]和文献[27]中的隧道临界状态值, 其中: (1)管片接缝张开量达到 2 mm; (2)管片接缝防水临界张开量 6 mm, 并结合公式(2)和(3), 对盾构隧道变形结果进行划分, 见表 6.

表 6 隧道结构变形安全控制值

临界状态	最大水平位移/mm	横向最大收敛率/%
张开 2 mm	17.39	0.237
张开 6 mm	49.31	0.681

根据表 6, 为满足盾构隧道结构设计要求, 隧道最大水平位移量应小于 17.39 mm, 同时隧道横向最大收敛率为 0.237%.

4 结论

本文通过建立盾构隧道三维精细化数值模型,

研究了不同隧道埋深和隧道与基坑间距对既有盾构隧道结构变形的影响,主要结论如下:

(1)从管片与连接螺栓的非线性力学特征出发,考虑了盾构隧道管片之间的相互作用以及管片的非连续性拼装,建立了三维地层和精细化盾构隧道结构模型,且计算结果能有效反映基坑开挖卸载作用下管片、螺栓和地连墙等构件的变形特征。

(2)基坑开挖卸载作用下盾构隧道整体纵向的水平位移呈正态分布,其中在基坑开挖范围内隧道的水平位移较大;在基坑边缘处隧道错台量较明显。

(3)在隧道与基坑之间的距离保持不变,且隧道的埋深与基坑的开挖深度较为接近的情况下,基坑开挖卸载对邻近盾构隧道的横向收敛变形形态以及管片的偏转方向产生显著影响。当隧道埋深一定时,隧道与基坑间距越小,基坑开挖对邻近隧道结构的影响越大。

(4)通过参数拟合的方法将不同隧道埋深和间距工况下盾构隧道纵向和横向变形规律相互统一;利用所得出的隧道管片变形并结合现有规范控制限值、防水性能控制限值得出相应的安全变形控制限值;隧道最大水平位移应小于17.39 mm,横向最大收敛率为0.237%。

参考文献:

- [1] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4):599-612.
- [2] 张治国,黄茂松,王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5):1373-1380.
- [3] 梁荣柱,林存刚,夏唐代,等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1):223-233.
- [4] 周泽林,陈寿根,涂鹏,等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4):1440-1449.
- [5] 何小龙,杨天鸿,周云伟,等. 考虑管-土分离的基坑开挖引起邻近地下管线位移分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6):9-16.
- [6] 冯国辉,徐长节,郑茗旺,等. 考虑剪切变形下基坑开挖引起下卧既有隧道的纵向变形研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(3):132-141.
- [7] LI P, DU S J, WANG Y H, et al. Timoshenko beam solution for the response of existing tunnels because of tunneling underneath[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(5):766-784.
- [8] ZHANG D M, HUANG Z K, LI Z L, et al. Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108:197-211.
- [9] HUANG X, HUANG H W, ZHANG D M. Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2014, 167(1):3-18.
- [10] 魏少伟. 基坑开挖对坑底已建隧道影响的数值与离心试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] 胡欣. 模型试验模拟不同工况下基坑开挖对既有隧道的影响[J]. 路基工程, 2015(6):151-155.
- [12] 张治国,白乔木,姜蕴娟,等. 邻近隧道及周围地层受深基坑开挖影响的现场监测研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2):177-184.
- [13] 王立峰,庞晋,徐云福,等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7):2004-2010.
- [14] 高广运,高盟,杨成斌,等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3):453-459.
- [15] SHI C H, CAO C Y, LEI M F, 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.
- [16] 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.
- [17] CAO S A, LIANG R Z, KANG C, 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.
- [18] 艾辉军,彭立敏,施成华. 基于三维非连续接触模型的管片接头静动力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11):2023-2029.
- [19] 刘建文,施成华,雷明锋,等. 基于混凝土损伤模型的卸载作用下盾构隧道损伤机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3):758-769.
- [20] GB 50010—2010. 混凝土结构设计规范[S].
- [21] 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]. [2023-11-17]. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.12.1097>.
- [22] 李琳,杨敏,熊巨华. 软土地区深基坑变形特性分析

- [J]. 土木工程学报, 2007, 40(4):66-72.
- [23] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [24] GB 50497—2019. 建筑基坑工程监测技术标准[S].
- [25] 陈仁朋, 刘慕淳, 孟凡衍, 等. 基坑开挖旁侧盾构隧道结构横向受力与变形研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1):24-32.
- [26] CJJ/T 202—2013. 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S].
- [27] 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.

Refined numerical model analysis of the influence of adjacent foundation pit excavation on shield tunnel structure

WU Bing¹, CHEN Keji¹, WENG Tianci², XIONG Yonglin²

(1.State Grid Zhejiang Economic Research Institute, Hangzhou 310008, China;

2.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: During the excavation of the foundation pit near the shield tunnel, the unloading effect caused by excavation operations will disrupt the original stress balance between the tunnel and the soil, thereby generating additional stress in the tunnel structure. This may cause damage to tunnel segments, opening of joints, misalignment, and water leakage. In this study, the ABAQUS finite element analysis software is used to construct a three-dimensional refined model to analyze the mechanical behavior of shield tunnel structures under the influence of nearby excavations, where the discontinuous characteristics of shield tunnel segments and their interaction with bolts and soil layers are taken into full account. The focus of the research is on analyzing the response of existing shield tunnel structures to different tunnel burial depths and distances between the tunnel and the foundation pit. The research findings indicate that: Firstly, through comparative analysis with experimental and on-site monitoring data, the accuracy and applicability of the established shield tunnel model are confirmed. Secondly, the unloading effect caused by foundation pit excavation results in non-uniform and discontinuous horizontal displacements of the shield tunnel longitudinally, especially within the influence range of the excavation, where the horizontal displacement of the tunnel is more significant, and considerable misalignment may occur at the edges of the pit. Thirdly, a correlation model between the lateral and longitudinal deformations of shield tunnels is established, for which numerous working condition simulations and parameter fitting techniques were employed. Finally, based on the design specifications and control standards of shield tunnels, it is determined that the maximum horizontal displacement of the tunnel should be controlled within 17.39 mm, while the maximum convergence rate laterally should not exceed 0.237%, to ensure the stability and safety of the tunnel structure.

Key words: excavation of foundation pit; shield tunnel; refined modeling; numerical simulation

(责任编辑 韩 超)