

基坑开挖对邻近地铁隧道管片变形的影响规律

散骞骞¹ 王长丹^{2,3} 周瑜亮^{2,3}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430061, 武汉; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;
3. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//助理工程师)

摘要 采用 Plaxis 三维有限元分析软件, 建立有限元模型, 模拟基坑开挖施工过程, 研究基坑与邻近地铁隧道距离、基坑开挖深度及盾构隧道管片厚度等参数变化对隧道管片收敛变形的影响。由已知工程的实测数据验证了模型的有效性。研究结果表明: 基坑与隧道距离的影响最大, 管片厚度的影响次之, 基坑开挖深度的影响最小。

关键词 地铁隧道; 基坑开挖; 管片变形; 有限元模拟

中图分类号 U456.3⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.08.027

Influence Pattern of Foundation Pit Excavation on Adjacent Metro Tunnel Segment Deformation

SAN Qianqian, WANG Changdan, ZHOU Yuliang

Abstract By adopting Plaxis 3D finite element analytical software, a finite element model is established to simulate foundation pit excavation construction process. The influence of parameters including the distance between foundation pit and the tunnel, the foundation pit excavation depth, and shield tunnel segment thickness on tunnel segment convergence deformation is studied. The field measured data of existing projects has verified the effectiveness of the model. Research results show that the distance between foundation pit and tunnel has the biggest influence, segment thickness is second to it, and the foundation pit excavation depth the least.

Key words metro tunnel; foundation pit excavation; segment deformation; finite element simulation

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430061, Wuhan, China

由地铁运营经验可知, 在软土地层中, 周边工程活动可能会导致盾构施工的地铁隧道发生严重的结构变形, 引发裂缝、渗水、道床剥离等多种病害, 甚至危害地铁隧道运营安全。因此, 有必要对

邻近基坑开挖过程中地铁隧道管片的变形特性及影响因素进行研究。

目前, 文献[1-3]分别采用能量计算法、地层补偿法, 以及半经验、半理论的方法, 估算坑外土体位移; 文献[4-18]采用有限元软件计算分析基坑工程开挖中基坑尺寸、基坑与隧道位置关系等影响因素对邻近盾构隧道位移变形的影响。上述研究主要针对隧道的位移变化, 较少考虑基坑开挖对邻近地铁隧道管片横断面收敛变形的影响, 且在影响因素的研究中未涉及盾构隧道的管片厚度。

本文以绍兴市地铁 1 号线旁的某大楼基坑工程为原型, 通过 Plaxis 有限元软件, 基于基坑与邻近地铁隧道间的距离(以下简为“坑隧距离”)、基坑开挖深度及隧道管片厚度等参数, 建立基坑与隧道相互作用的三维有限元模型, 模拟基坑开挖施工过程, 进而研究基坑开挖对邻近地铁隧道管片收敛变形的影响。

1 有限元模型计算

1.1 建模方案

大楼的基坑平面图如图 1 所示。基坑内支撑为 0.8 m 高、0.6 m 宽的混凝土支撑, 围护结构采用 $\phi 0.7 \text{ m} @ 1.0 \text{ m}$ 的钻孔灌注桩。基坑范围内主要土层为: ①₁ 碎石填土, ②₁ 黏质粉土, ②₂₋₄ 淤泥质黏土, ③₁₋₂ 淤泥质黏土。

由于隧道埋深越浅受影响越大, 故考虑浅埋隧道的情况, 参考当地典型隧道埋深, 有限元模型中按隧道埋深为 10 m 进行分析。

为了研究基坑与邻近地铁隧道间的距离、基坑开挖深度及隧道管片厚度等参数对地铁隧道管片变形的影响, 需设置不同的参数建立多个数值模型进行计算。隧道管片厚度分别选取 350 mm、375

* 国家自然科学基金项目(51608384, 51778485)

mm、400 mm 和 425 mm;考虑双线隧道同时开挖,左线邻近基坑,隧道线间距 10 m;为更加贴近工程实际探究一般性规律,左线隧道与基坑距离(即坑隧距离)分别取 5 m、10 m、20 m、30 m、50 m 进行计算。将基坑深度、管片厚度和坑隧距离进行组合,得到 40 个计算工况,可较全面地反映出 3 个参数对于基坑开挖引起邻近地铁隧道管片收敛变形的影响。

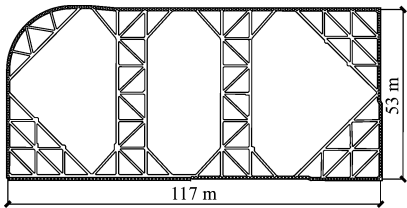


图 1 基坑平面图
Fig. 1 Plan of foundation pit

1.2 有限元计算模型

有限元模型的尺寸为 240 m × 200 m × 40 m。模型所有边界均为位移边界条件,地表为自由边界条件;侧边界侧向水平位移限制为零,竖向自由;底部边界竖向位移限制为零,水平方向自由。有限元模型采用小 HSS(应变土体硬化)本构模型来描述土体的应力应变行为,其余材料采用线弹性模型来

描述。模型中:隧道管片不设分块,管片结构采用壳单元模拟;基坑内支撑采用梁单元模拟;基坑围护结构采用根据等刚度换算后的板单元模拟。

由于基坑形状不是主要影响因素,故将基坑简化为对称的矩形基坑,建立不同层数、不同深度的的基坑模型,基坑尺寸为 117 m × 53 m,围护结构插入比为 1.5:1。二层基坑深度为 8 m,围护结构桩长 20 m,设置 2 道支撑,支撑位置为 -0.5 m 和 -4.5 m(地面为 0,下同);三层基坑深度为 12 m,围护结构桩长 28 m,设置三道支撑,支撑位置分别为 -0.5 m、-5 m 和 -9 m。地层-基坑-隧道模型示意图如图 2 所示。

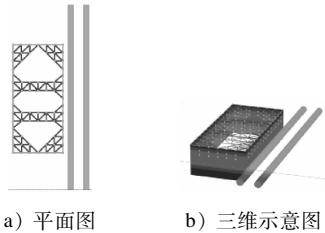


图 2 三维有限元模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of 3D finite element model

根据基坑工程综合勘察报告及工程经验,各土层厚度及有限元模型的主要计算参数如表 1 所示。

表 1 HSS 模型土体参数
Tab. 1 HSS model soil parameters

土层名称	层厚/m	重度/ (kN/m ³)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	参考割线 模量/ MPa	参考切线 模量/ MPa	参考卸载再加 载模量/ MPa	参考初始 剪切模量/ MPa
碎石填土	0.3	15.9	8.0	10.0	5.0	5.0	15.0	20.0
黏质粉土	1.7	18.4	16.0	19.0	8.0	8.0	40.0	80.0
②2-4 淤泥质黏土	3.1	17.0	3.9	7.0	3.6	3.6	25.2	54.0
③1-2 淤泥质黏土	12.9	17.3	3.1	8.2	2.4	2.4	19.2	48.0
粉质黏土	22.0	17.8	23.0	18.0	10.0	10.0	50.0	90.0

2 计算结果分析

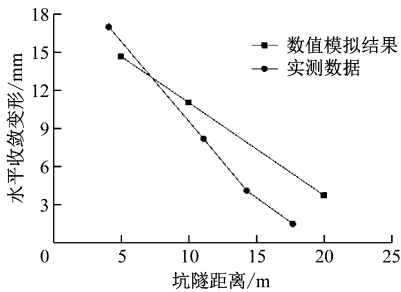
2.1 模拟结果与实测数据对比

基坑开挖造成外侧土体向基坑内变形,引起隧道的侧向力损失,隧道结构受力状态发生变化,导致地铁隧道横断面产生收敛变形。最大变形发生在基坑中心对应的横断面上。因此,本文选取此横断面管片的收敛变形进行分析。由于隧道管片在水平向被拉伸,在竖向被压缩,故水平收敛变形为

正值,竖向收敛变形为负值。
本文搜集类似项目的实测数据来验证本次数值模拟中模型取值的合理性。文献[9]统计了苏州地区邻近地铁隧道的 10 个基坑工程的地铁隧道概况、基坑工程概况及土层条件等信息。这 10 个工程的土层条件接近,基坑的支护形式均为垂直围护加支撑,地铁隧道管片厚度均为 350 mm,有一定的相似性。文献[9]对其中 5 个基坑邻近隧道水平收敛变形进行监测,这些基坑工程与本文数值计算基坑

工程在土层条件、基坑挖深、隧道埋深等方面较为相似,其实测结果对本文具有一定的参考价值。

图3所示为三层基坑开挖对管片厚度350 mm隧道水平收敛变形影响的数值模拟结果与文献[9]中实测数据的对比。由图3可以发现,有限元模型模拟结果与实测数据相比,变化规律较为吻合。这说明本文采用的三维有限元模型能较真实地反映实际的开挖情况,具有较好的准确性。由此,本文用该模型来进一步分析不同坑隧距离下,基坑开挖对不同管片厚度隧道收敛变形的影响。



注:图中实测数据来自参考文献[11]。

图3 实测数据与数值模拟结果对比

Fig. 3 Comparison between measured data and numerical simulation results

2.2 基坑开挖对隧道管片收敛变形的影响

2.2.1 二层基坑

随着坑隧距离逐渐增大,二层基坑开挖对不同管片厚度左线隧道收敛变形的影响如图4 a)所示。当坑隧距离为5 m时,管片厚度为350 mm、375 mm、400 mm和425 mm的隧道水平收敛变形值分别为10.32 mm、8.91 mm、7.78 mm和6.90 mm;当管片厚度相同时,随着坑隧距离增大,管片的水平收敛变形迅速减小;管片厚度越大,收敛变形值越小,坑隧距离对管片收敛变形的影响越小;当坑隧距离大于20 m时,不同厚度管片的水平收敛变形均降至1.50 mm以下,说明基坑开挖对管片水平收敛变形的影响程度随坑隧距离的增大而显著减小。管片的竖向收敛变形与水平收敛变形有相同的变化规律,且竖向收敛变形值略大于水平收敛变形值。

图4 b)所示为右线隧道水平收敛变形。右线隧道管片收敛变形随着坑隧距离的增大逐渐减小,且量值较小,均低于3.00 mm。当坑隧距离为20 m时,右线隧道350 mm管片水平收敛变形值为1.61 mm,左线隧道350 mm管片水平收敛变形值为2.24 mm。这说明左线隧道起到了保护右线隧道的作

用。由此可知,基坑开挖对右线隧道收敛变形的整体影响较小。

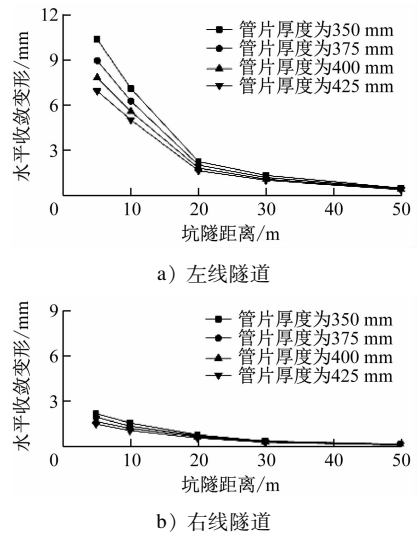


图4 二层基坑开挖时隧道收敛变形随距离的变化
Fig. 4 Variation of convergence deformation of tunnel with distance in two-layer foundation pit excavation

2.2.2 三层基坑

三层基坑开挖对不同管片厚度左、右线隧道管片水平收敛变形的影响如图5所示。三层隧道开挖管片收敛变形的变化规律与二层基坑开挖类似。当坑隧距离为5 m时,管片厚度为350 mm、375 mm、400 mm和425 mm的左线隧道水平收敛变形分别

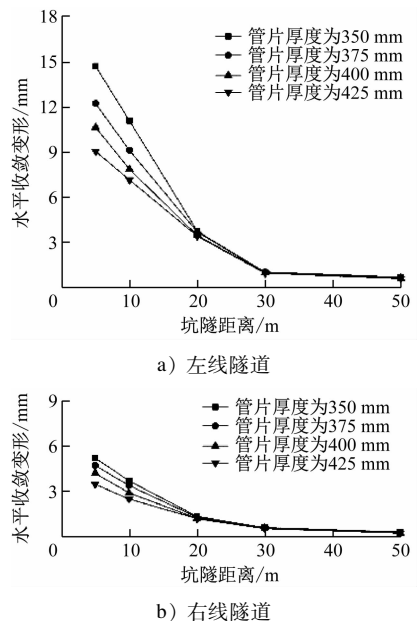


图5 三层基坑开挖时隧道收敛变形随距离的变化
Fig. 5 Variation of convergence deformation of tunnel with distance in three-layer foundation pit excavation

为 14.67 mm、12.19 mm、10.62 mm 和 9.03 mm。三层基坑开挖隧道收敛变形值均明显大于对应二层基坑开挖工况中的变形值。当坑隧距离增大至 20 m 时,左线隧道厚度为 350 mm 的管片水平收敛变形为 3.74 mm,大于相同情况二层基坑开挖时的 2.24 mm;而当坑隧距离增大至 30 m 后,三层基坑开挖对于隧道管片变形的影响不再明显。这说明三层基坑开挖对隧道管片变形的影响程度更大,影响范围更远。

虽然三层基坑开挖对右线隧道管片收敛变形的总体影响较小,但在左线隧道坑隧距离为 5 m、管片厚度为 350 mm 的最不利情况下,右线隧道的水平收敛变形量和竖向收敛变形量仍达到了 6.00 mm。

二层、三层基坑开挖的情况下,基坑开挖过程中左线隧道收敛变形随管片厚度的变化计算结果如图 6 所示。在坑隧距离为 5 m 和 10 m 时,随着管片厚度的增大,收敛变形呈线性减小;相同管片厚度下,随着坑隧距离增大管片的收敛变形有明显的减小。当坑隧距离超过 20 m 之后,管片收敛变形几乎不随管片厚度的增加而变化,且随着坑隧距离的

增加,管片收敛变形减小不再明显。距离基坑较远的右线隧道的收敛变形数值较小,且随着管片厚度的变化,收敛变形的变化并不明显。

三层基坑开挖时管片收敛变形随管片厚度变化的曲线斜率比二层基坑开挖更大。这说明三层基坑开挖时管片厚度变化对于收敛变形的影响更为明显。

3 结论

1) 相同管片厚度的隧道,其水平收敛变形和竖向收敛变形随着坑隧距离的增大而迅速减小,当距离增大到一定值时,影响不再明显;对于不同管片厚度的隧道,管片厚度越大,收敛变形越小。管片竖向收敛变形与水平收敛变形变化规律相似,数值上竖向收敛变形略大于水平收敛变形。右线隧道变形较小,左线隧道对右线隧道具有一定的保护作用。

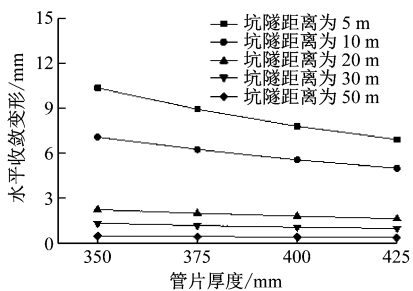
2) 坑隧距离较近时,随着管片厚度的增大,收敛变形呈线性减小;而当距离较大时,收敛变形几乎不随管片厚度的增加而变化。与管片厚度相比,坑隧距离对收敛变形的影响要更大。

3) 基坑开挖深度增加时,与管片厚度相比,坑隧距离对收敛变形的影响更大,隧道收敛变形增大,基坑开挖的影响范围更远。与开挖深度相比,管片厚度变化对收敛变形的影响更为明显。

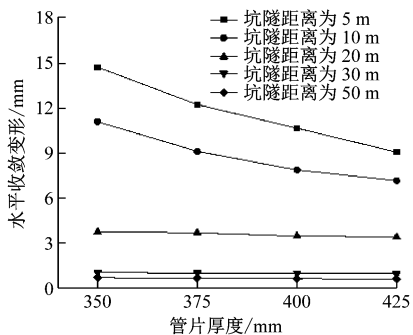
参考文献

- [1] 周顺华,何超,肖军华. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量计算法[J]. 中国铁道科学,2016(3):53.
ZHOU Shunhua, HE Chao, XIAO Junhua. Energy method for calculating deformation of adjacent shield tunnels due to foundation pit excavation considering step between rings[J]. China Railway Science, 2016(3):53.
- [2] 吴才德,许成承,成怡冲,等. 软土地区基坑开挖引起的邻近隧道变形预测[J]. 城市轨道交通研究,2016(10):28.
WU Caide, XU Chengcheng, CHENG Yichong, et al. Prediction of tunnel deformation induced by adjacent excavation in soft soil area[J]. Urban Mass Transit, 2016(10):28.
- [3] 戴博红. 深基坑施工对邻近地铁隧道的影响预测[J]. 城市轨道交通研究,2008(8):62.
DAI Bohong. Prediction of the influence of deep foundation pit on nearby metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2008(8):62.
- [4] 周建昆,李志宏. 紧邻隧道基坑工程对隧道变形影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2010(增刊1):1398.

(下转第 131 页)



a) 二层基坑



b) 三层基坑

图6 基坑开挖时左线隧道收敛变形随管片厚度的变化

Fig. 6 Variation of convergence deformation with segment thickness of left line tunnel in foundation pit excavation