

深厚软土地层地铁盾构换刀区土层加固范围优化

刘培玉¹ 苟学登¹ 杨琛¹ 王纪云¹ 路胜中¹
莫林飞² 李超² 张佳文²

(1. 中国水利水电第四工程局有限公司, 810015, 西宁;

2. 杭州浙科大科技有限公司, 310004, 杭州//第一作者, 高级工程师)

摘要 地铁盾构隧道在城市深厚软土地层中施工时会发生刀盘磨损,须在掌子面前方的土层加固区内进行换刀操作。为研究盾构换刀对掌子面前方土体的影响,以及获得合理的土体加固范围,采用 PLAXIS-3D 有限元软件建立了深厚软土地层地铁盾构隧道掘进三维数值模型,研究了盾构换刀时周围土体的变形规律,在此基础上通过正交试验的方法进行对比分析,并最终确定最优加固土体范围。结果表明:盾构换刀时,盾构隧道周围土体易发生较大变形,其中纵向变形最小,竖向变形次之,横向变形最大;隧道最大竖向变形位于隧道上方,最大横向变形位于盾构掌子面处,约为 22 mm;竖向沉降随时间不断累积,需要通过加固换刀区周围土体来减小土体变形;随着横向加固长度的增加,土体沉降量先减小后缓慢增加,土层横向最优加固长度为 8 m;在确定横向最优加固长度后,随着纵向和竖向加固长度的增加,加固后土体的竖向位移缓慢增加,纵向位移随加固长度的增大而减小,当纵向加固长度增大至 10 m 时,地面土体的纵向位移仅为 0.2 mm;盾构换刀区土层最优加固范围为 10.7 m (纵向)×10.7 m (竖向)×8.0 m (横向)的长方体区域。

关键词 地铁;盾构换刀;土层加固范围;深厚软土地层

中图分类号 U455.49; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.014

Optimization of Soil Layer Reinforcement Range in Deep Soft Soil Stratum Shield Cutter Replacement Zone

LIU Peiyu, GOU Xuedeng, YANG Chen, WANG Jiyun, LU Shengzhong, MO Linfei, LI Chao, ZHANG Jiawen

Abstract Cutter head wear occurs in metro shield tunnel construction in city deep soft soil stratum. The cutter replacement must be completed in the soil layer reinforcement zone in front of tunnel face. To study the influence of shield cutter replacement on soil mass in front of tunnel face and to obtain reasonable soil layer reinforcement range, 3D numerical model of metro shield tunnel excavation in deep soft soil area is built u-

sing PLAXIS-3D finite element software, and the deformation law of surrounding soil during shield cutter replacement is studied. On this basis, the optimal soil layer reinforcement range is finally determined through comparative analysis by orthogonal test method. The results show that during shield cutter replacement, the shield tunnel surrounding soil is prone to large deformation, while the longitudinal one is the least, vertical one the second and transverse one the most; tunnel maximum vertical deformation is on tunnel top, the maximum transverse one is near shield tunnel face, about 22 mm; vertical deformation accumulates over time, the reduction of which requires reinforcement of cutter replacement zone surrounding soil mass; with the increasing transverse reinforcement length, the soil settlement decreases first then increases, and the soil layer transverse optimal reinforcement length is 8 m; after determining the transverse optimal reinforcement length, with the increase of longitudinal and vertical reinforcement length, the vertical displacement of reinforced soil gradually increases, and the longitudinal displacement decreases as the reinforcement length increases, when the longitudinal reinforcement length is increased to 10 m, the longitudinal displacement of ground surface soil is only 0.2 mm; the optimal reinforcement range shield cutter replacement zone soil layer is a 10.7 m (longitudinal) × 10.7 m (vertical) × 8.0 m (transverse) cuboid zone.

Key words metro; shield cutter replacement; soil layer reinforcement range; deep soft soil layer

First-author's address Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., 810015, Xining, China

随着城市轨道交通的快速发展,盾构法以其安全、快速和扰动小等优点成为隧道开挖的主要施工方法。在盾构施工过程中,开舱换刀存在很大的风险,会对周围土体及环境造成不可忽视的影响,因此需要制定有效的处理措施。目前换刀区位置的

选择以及换刀区土层加固是解决这类问题的主要方法,因此完备的土体加固经验与措施是盾构开舱换刀的重要保障^[1-2]。文献[3]针对盾构掘进过程中换刀对地面沉降的影响,研究分析了盾构换刀区土层纵、横向加固影响范围。文献[4]研究了软土地区加固范围对盾构隧道的受力影响。文献[5]通过调整加固体宽度,利用修正 m 值法(m 为桩侧土水平抗力系数的比例系数)研究了被动区土体的最优加固宽度。

上述研究已取得一定的研究成果,但在盾构换刀区土层加固范围选定方面仍有不足。本文研究了盾构换刀对周围环境的影响规律,即通过正交试验研究了在深厚软土地层中满足盾构开挖面处侧向土压力平衡状态下,不同方向上土层不同加固范围对周围土体的影响规律,在此基础上提出了盾构换刀区土层最优加固范围。

1 工程概况

工程位于绍兴市越城区,现有地坪标高约 4.62 ~ 5.72 m,场地整体地形平坦,属于湖沼相沉积平原地貌单元。盾构区间采用盾构法施工,盾构外径为 6.7 m,内径为 6.0 m,衬砌管片厚 0.35 m。沿线区间地貌类型属于湖沼相沉积平原,地势开阔平坦,场地广泛分布厚层状软土。软土地层的天然含水量大于或等于液限,天然孔隙比大于或等于 1.0,具有压缩性高、强度低、灵敏度高、透水性低等特点。

2 深厚软土地层中盾构换刀三维数值模拟

2.1 计算参数

盾构外壳采用板单元模拟,管片采用混凝土材料模拟,在盾构外壳建立正、负向界面。盾构机位于地下 23.4 m,下部紧邻粉质黏土层,属于软弱土层,需要对该土层进行加固来完成开舱换刀操作。拟建模型在盾构隧道开挖 20 m 处进行换刀。

据地质勘查报告可知,深厚软土地层包含杂填土、黏质粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土和含黏性土粉砂等。其物理力学参数见表 1。

2.2 几何模型及其边界条件

地铁盾构隧道三维数值模型如图 1 所示。土体采用摩尔-库伦弹塑性模型,盾构管片为弹性材料。该模型可以较好地反映土体的应力状态。在分析同一土层时,由于使用的是同一个常刚度参数,可以快速预测出土体的变形。

表 1 深厚软土地层土体物理力学参数取值

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil mass in deep soft soil stratum

土层名称	厚度/ m	天然重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
杂填土	5	16.5	27.7	14.7	4.4
黏质粉土	12	16.7	15.7	24.6	9.4
淤泥质粉质黏土	6	14.6	14.3	11.5	3.0
粉质黏土	10	17.2	52.5	17.2	6.3
含黏性土粉砂	11	18.2	3.7	33.6	8.0

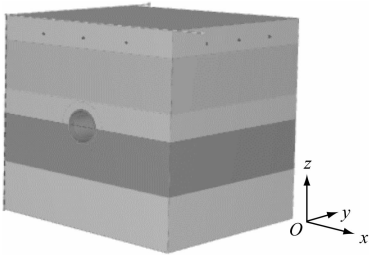


图 1 地铁盾构隧道三维数值模型

Fig. 1 Metro shield tunnel 3D numerical model

地基土层实质上是一个半无限空间体,当模型宽度及厚度达到施工量程的 3 ~ 4 倍时,基本可以消除模型的尺寸效应影响^[6]。土体模型尺寸为 40 m × 40 m × 40 m。模型中粉质黏土和淤泥质粉质黏土设为不排水边界,其余土体均为排水边界。如图 1 所示,设置位移边界为刚性边界;在 x 向(纵向)、 y 向(横向)、 z 向(竖向)等 3 个方向均不设置约束;在模型底部施加固定约束,在盾构开挖面上施加法向压力(即土舱压力),模型顶部为自由面。

2.3 盾构换刀对周围土体的变形影响

开挖面在平衡压力下进行带压换刀操作时,盾构隧道周围土体在 z 、 y 、 x 等 3 个方向上的变形云图如图 2 所示。

由图 2 可知:盾构开挖面土体在平衡压力和侧向土压力的共同作用下,其 z 向最大沉降发生在盾构隧道的正上方,这是由于换刀期间盾构机在自重作用下发生下沉导致土体变形,土层沉降量随土层深度增加而减小,盾构隧道周围土体沉降约为 2 mm,地面沉降约为 1 mm; y 向最大位移发生在盾构开挖面前方区域,最大位移发生在掌子面中心处,且距离掌子面越远位移越小,这是由于开挖面处的平衡压力与外部土压力不均匀引起的,最大位移约 22 mm。

综上,在软弱土层中盾构换刀时周围土体在 x 、

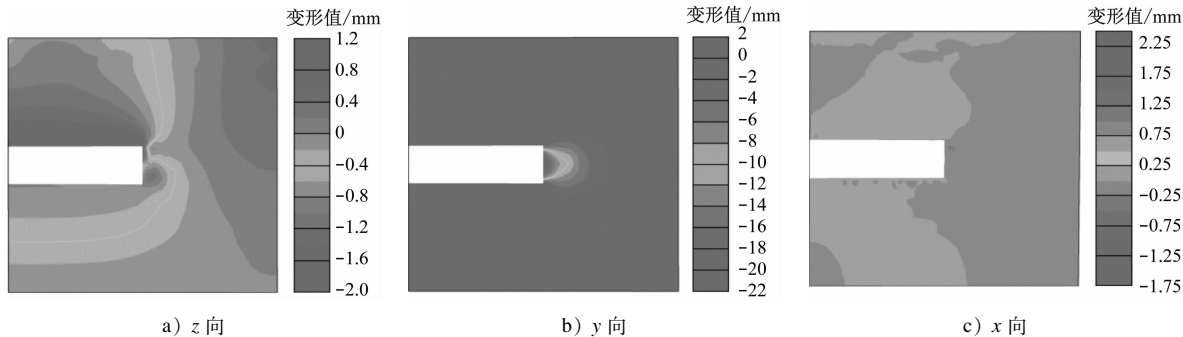


图2 盾构换刀时周围土体变形云图

Fig.2 Nephogram of surrounding soil deformation during shield cutter replacement

y 、 z 向皆发生变形,其中, x 向最小, z 向次之, y 向最大。开挖面处会产生较大的 y 向变形,而 z 向沉降也会随时间不断累积,给换刀操作和周边安全造成巨大隐患。因此,可通过加固开挖面周围土体来增加土体强度、减小变形,且在常压下进行换刀操作。

3 深厚软土地层盾构换刀区土层加固范围优化分析

为确定合理的盾构换刀区土体加固范围,采用

正交试验进行对比分析。取 z 向加固长度等于 x 向加固长度,讨论不同 y 、 x 向加固长度和土层深度下土体各向变形特性,最终选取 y 、 x 和 z 向换刀区最优加固范围。

3.1 盾构换刀区 y 向不同加固长度下的地面最大位移

设定 x 向加固长度为2 m, y 向加固长度分别为2 m、4 m、6 m、8 m、10 m和12 m时地面土体在 z 向、 y 向和 x 向的最大位移见图3。

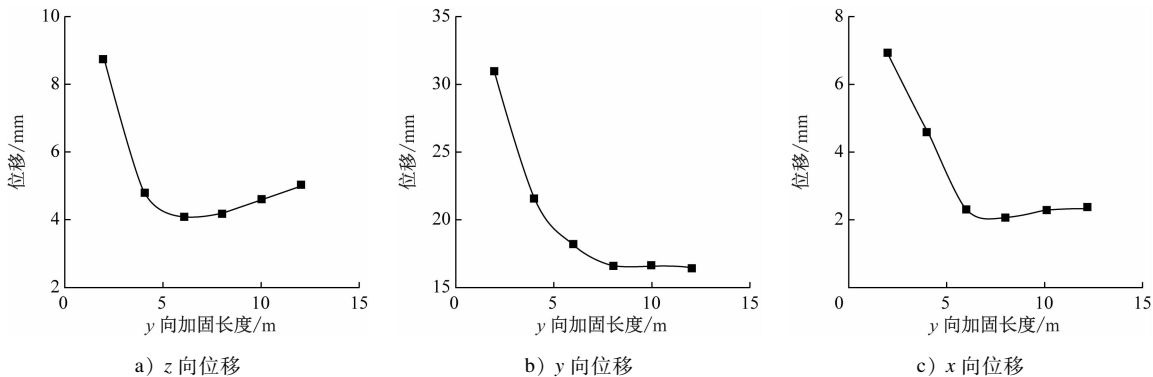


图3 地面最大位移- y 向加固长度关系曲线

Fig.3 Relation curve of ground maximum displacement and y -direction reinforcement length

由图3可见:

1) x 向加固长度不变时,增加 y 向加固长度,地面最大 z 向位移先减小至4 mm(对应 y 向加固长度约为8 m)后增大。这是由于随着加固土体体积增大,加固体受到重力逐渐增加,从而使得沉降再次发生。

2) 在侧向土压力作用下,随着 y 向加固长度的增加,地面最大 y 向位移从34.0 mm逐渐减小至16.5 mm(对应 y 向加固长度约为8 m),表明土体加固对减小 y 向的位移有显著效果。随着 y 向加固长度继续增加,地面土体 y 向位移曲线趋于平缓。

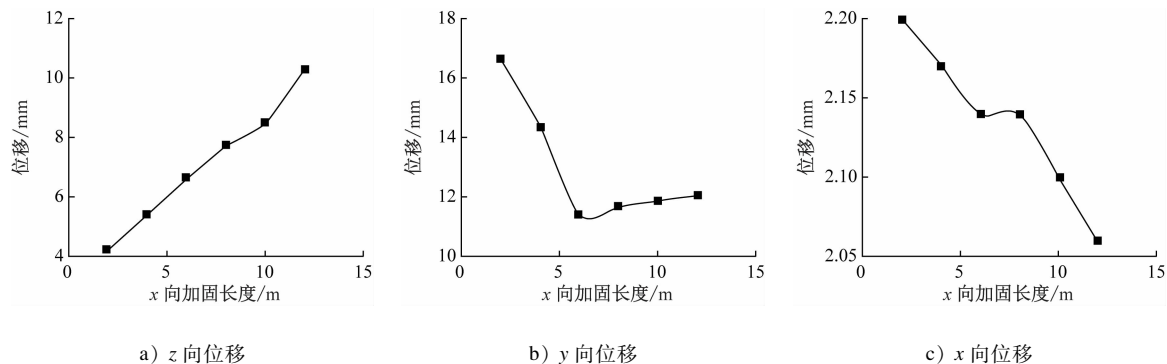
3) 随着 y 向加固长度的增加,地面最大 x 向位移逐渐减小至2.2 mm(对应 y 向加固长度约为7 m),之后曲线趋于平缓并稍有提升趋势。

综上,当 y 向加固长度为8 m时,土体各个方向的位移均能达到最小值,对地面沉降影响较小。

3.2 盾构换刀区 x 向不同加固长度下的地面最大位移

设定 y 向加固长度为8 m, x 向加固长度分别为2 m、4 m、6 m、8 m、10 m和12 m时,地面土体在 z 向、 y 向和 x 向的最大位移见图4。

由图4可见:

图4 地面最大位移- x 向加固长度关系曲线Fig. 4 Relation curve of ground maximum displacement and x -direction reinforcement length

1) 地面土体最大 z 向位移随 x 向加固长度的增大而增大,这是因为增加 x 向加固长度导致加固体自重增加,造成土体沉降增大。

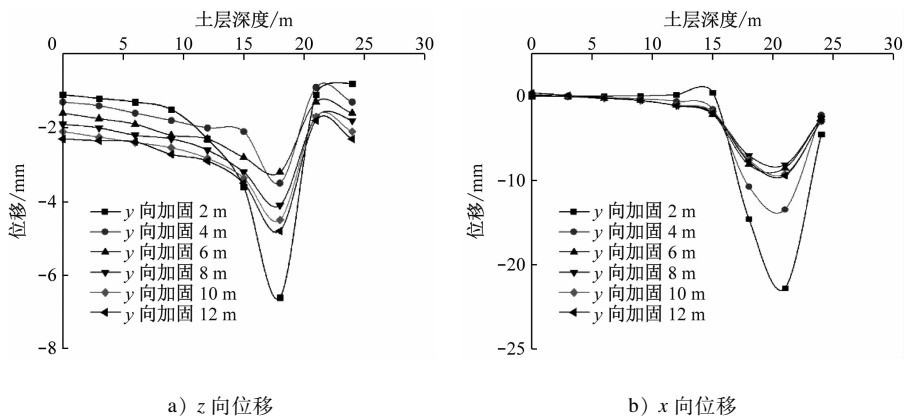
2) 地面土体的最大 y 向位移在增加 x 向加固长度后进一步减小,表明 x 向土体加固起作用。当 x 向加固长度增加至 6 m 时,地面土体的 y 向位移达到最小值(约 11 mm);随着加固长度增加图所示曲线趋于平缓,地面土体的最大 y 向位移甚至出现上升现象。

3) 地面土体的 x 向位移随着 x 向加固长度的增大而减小。当 x 向加固长度增大至 10 m 时,地面

土体的 x 向位移仅为 0.2 mm,其变化可忽略不计。

3.3 盾构换刀区 y 向不同加固长度下的土体节点位移分析

综上,盾构换刀区加固对 z 向和 y 向的位移影响较大,对 x 向影响很小,因此对 z 向和 y 向进行进一步分析。已知土体最大变形发生在盾构开挖面前方区域,选择土层深度分别为 0、3 m、6 m、9 m、12 m、15 m、18 m、21 m 和 24 m 处的位移进行研究。图 5 a)、图 5 b) 分别为不同 y 向加固长度下不同深度处的土体 z 向、 y 向位移。

图5 不同 y 向加固长度下的土体节点位移图Fig. 5 Displacement diagram of soil mass nodes with different y -direction reinforcement lengths

由图 5 可见:

1) y 向加固长度对地面浅层土体位移影响较小,最大沉降发生在盾构隧道处(约地下 18 m);当 y 向加固长度小于 6 m 时,土体节点 z 向最大位移减小;当加固长度大于 6 m 时,隧道各深度处土体节点沉降量均增大。盾构隧道下方土体沉降量较小,且 y 向加固长度对其影响也较小。这是因为土体加固能有效抵抗沉降变形,且加固区土体重量增

加引起土体沉降。

2) y 向加固能有效抵抗土体的 x 向变形,加固长度对盾构隧道上方(地下 15 m 以上)的土体影响较小;在侧向土压力作用下土体最大变形发生在开挖面前端,其下方土体变形很小,且加固长度对其影响不大;开挖面前方土体节点 x 向位移随 y 向加固长度增大而逐渐减小。

3.4 盾构换刀区 x 向不同加固长度下土体的节点位移分析

在选择最优 y 向加固长度后,分析 x 向加固长

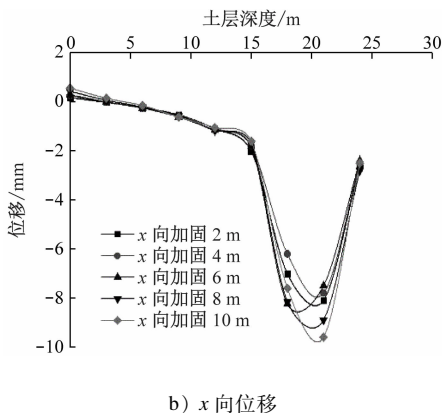
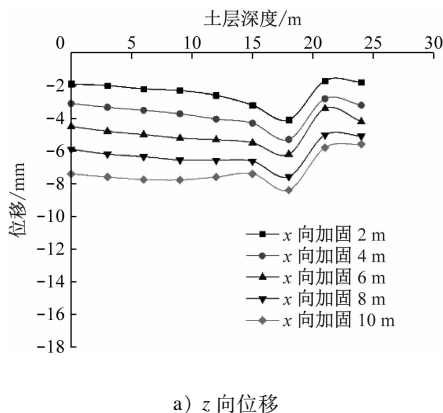


图6 不同 x 向加固长度下的土体节点位移图

Fig. 6 Displacement diagram of soil mass nodes with different x -direction reinforcement lengths

由图6可见:

1) 最优 y 向加固长度为 8 m 时, x 向加固长度的增大对不同深度节点处的 z 向位移影响效果较小; x 向加固长度增加 2 m, 最大沉降增加约 1 mm。地下深度超过 18 m 后, 各土体节点沉降量急剧减小至稳定值, 究其原因主要是加固区土体自重增加导致该区域内土体均产生沉降, 而位于加固区下方土体在沉降后产生回弹变形, 在土体松弛和蠕变作用下发生竖直向上的隆起变形。

2) 土层深度约 15 m 以上时, 土体的 x 向位移受 x 向加固长度的影响很小, 且随土层深度变化也很小; 在隧道深度范围内, 土体各节点的 x 向位移急剧增大, 最大变形发生在开挖面处 (约 20 m), 当加固长度小于 6 m 时, 土体节点最大位移随加固长度增加逐渐减小; 当加固长度大于 6 m 时, 土体节点最大位移随加固长度增加逐渐增大。

3.5 盾构换刀区土层最优加固范围

综上, y 向加固长度选取为 8 m 时能减小开挖面处的土体 y 向变形, 且对 z 向位移影响较小; x 向加固长度对 x 向影响较小。在满足变形要求的条件下, 加固长度选取 2 m (从盾构外径起算) 时 z 向位移最小, 且较为经济。因此, 盾构换刀区土层最优加固范围为 10.7 m (x 向) \times 10.7 m (z 向) \times 8.0 m (y 向) 的长方体区域 (见图 7)。 y 向加固段长度约为 1.2 倍盾构直径, x 向加固段长度约为 1.6 倍盾构直径, 与既有研究结果接近^[7]。

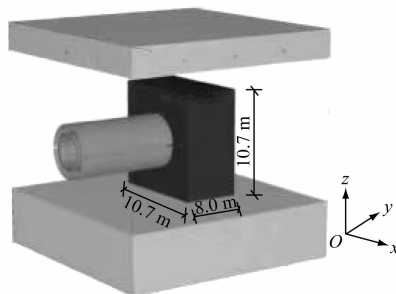


图7 盾构换刀区土层最优加固范围

Fig. 7 Soil layer optimal reinforcement range of shield cutter replacement zone

4 结论

1) 在盾构进行换刀操作时, 盾构隧道周围的土体易发生较大变形。盾构隧道下方土体换刀期间在盾构机自重作用下发生沉降, 最大 y 向位移发生在盾构开挖面前方区域。

2) 随着 x 向加固长度的增加, 盾构换刀区加固后的土体沉降减小到最小值后开始缓慢增加, y 向及 x 向最大变形减小至最小值后趋于稳定; 随着 y 向加固长度的增加, y 向变形减小至最小值后趋于稳定, z 向沉降线性增加但其变化量较小。

3) 盾构换刀区土层最优加固范围为 10.7 m (x 向) \times 10.7 m (z 向) \times 8.0 m (y 向) 的长方体区域, 这与实际工程中由经验法得到的加固范围相比加固取值更小, 能够为类似工程提供参考借鉴。

参考文献

[1] 吕波. 富水风化岩石地层盾构始发加固技术研究[J]. 施工技

- 术, 2014, 43(11): 90.
- LYU Bo. Study on launching strengthening technology of shield for water-rich weathered rock strata [J]. Construction Technology, 2014, 43(11): 90.
- [2] 谢小兵. 滨海盾构工程动压富水砂层换刀加固技术研究[J]. 广东建材, 2020, 36(7): 43.
- XIE Xiaobing. Study on tool-changing reinforcement technology of dynamic pressure water-rich sand layer in coastal shield engineering[J]. Guangdong Building Materials, 2020, 36(7): 43.
- [3] 齐天龙. 盾构掘进过程中换刀对周围土体的稳定影响分析[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2014.
- QI Tianlong. Analysis of the influence of tool change on the stability of surrounding soil during shield tunneling[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2014.
- [4] 刘健美. 深厚软土地基加固范围对盾构隧道受力变形的影响[J]. 施工技术, 2020, 49(7): 33.
- LIU Jianmei. Influence analysis of foundation reinforcement area for shield tunnel stress and deformation in deep soft ground[J]. Construction Technology, 2020, 49(7): 33.
- [5] 杨光华, 张文雨, 陈富强, 等. 软土基坑被扰动区土体不同加固宽度的 m 值计算方法研究[J]. 广东水利水电, 2020(2): 13.
- YANG Guanghua, ZHANG Wenyu, CHEN Fuqiang, et al. Study on M-value calculation method of different reinforcement widths of soil in passive area of soft soil foundation pit[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2020(2): 13.
- [6] 李连祥, 张永磊, 扈学波. 基于 PLAXIS 3D 有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊 1): 254.
- LI Lianxiang, ZHANG Yonglei, HU Xuebo. Element analysis of a pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 254.
- [7] 刘俊杰, 温森, 孔庆梅. 盾构始发端头土体加固合理范围的研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 733.
- LIU Junjie, WEN Sen, KONG Qingmei. Study on reasonable range of soil reinforcement at the initial end of shield[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, 50(6): 733.

(收稿日期: 2021-04-14)

(上接第 76 页)

大、总体滞留时间短的特点, 地铁车站传统的全空气一次回风空调系统能耗较高, 明显不适用于本站的空调方案。因此, 结合 CFD(计算流体力学)方法对建筑气流组织进行数值模拟和分析, 在地下地铁工程中首次采用适宜大空间的分层空调 + 喷口送风系统, 减少热损失, 以达到高效节能的目的。

在防排烟及疏散方案上, 针对彩虹桥站的高大空间, 消防及排烟采用顶部全排 + 自然补风, 同时设置喷淋的模式, 通过烟羽流模型法、换气次数法确定排烟量, 通过 FDS(火灾动力学模拟)校核机械排烟效果。由于大空间具有较强的蓄烟纳热能力, 当发生行李火灾和人为纵火时, 人员可用安全疏散时间基本不低于 10 min。通过人员疏散软件 Path-Finder, 动态模拟车站公共区人员的疏散过程, 验证了火灾时的人员疏散满足消防要求。

在建筑装饰方案上, 结合车站建筑形式, 一方面, 采用符合人体尺度、简洁明了的导向系统, 完善作为公共交通建筑的使用功能; 另一方面, 采用重点照明 + 艺术照明的方式, 在有效提高乘客舒适度的前提下达到节能的目的。

4 结语

通过上述对广州地铁三线换乘车站彩虹桥站的建筑环境剖析, 以地铁建造技术为核心, 将建筑环境与建筑技术构筑的建筑逻辑纳入建筑设计之

中, 揭示建筑逻辑在地铁建设中的重要性, 即在地铁设计初期可按照环境 → 方法 → 形式、功能 → 布局 → 形式两条主线进行分析, 通过逻辑推导出建筑形式, 同时建筑设备、装饰形式可基于对建筑形式、功能的服务等方面进行推导, 服务于建筑形式, 以此为复杂环境下的地铁设计提供借鉴。

建筑的创作活动其实就是一个从提问到找答案的过程, 既要有形象思维, 又要使用逻辑思维^[3]。地铁车站作为地下综合性建筑, 其建筑形式受建筑环境、建造技术的影响尤其明显, 是综合因素逻辑下的产物。地铁车站设计应从基础条件出发, 并在地铁设计过程中层层递进, 采用逻辑来构建设计, 才能建造出合理的、富有逻辑性的建筑。

参考文献

- [1] 王方戟. 观察与思考: 访项秉仁建筑师[J]. 时代建筑, 2001(1): 42.
- WANG Fangji. Inspiration based on observation—an interview with architect XIANG Bingren [J]. Time + Architecture, 2001(1): 42.
- [2] 杨舫, 董春方. 校园建筑形态的逻辑生成[J]. 新建筑, 2002(4): 26.
- YANG Shan, DONG Chunfang. Logic shaping of school building form [J]. New Architecture, 2002(4): 26.
- [3] 李志斌. 建筑创作中对形式逻辑以及造型方面的思考[J]. 四川建筑, 2009, 29(4): 31.
- LI Zhibin. Reflections on formal logic and modeling in architectural creation [J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(4): 31.

(收稿日期: 2020-12-26)