

地铁隧道原位扩建施工方案比选优化分析

Comparison and Optimization Analysis of Construction Schemes for In-Situ Subway Tunnel Expansion

刘广坤

(河南中州路桥建设有限公司, 周口 466000)

摘要: 以某城市地铁隧道为工程背景, 运用 FLAC 3D 有限差分软件构建地铁隧道不同原位扩建数值仿真模型, 采用两台阶法进行扩建施工, 分析不同原位扩建方案下地铁隧道洞周收敛变形、围岩应力、初期支护安全系数, 综合评价不同扩建方案的施工稳定性, 对比确定最优原位扩建方案。结果表明: 双侧扩建在稳定性、应力分布和初支安全性方面均优于周围扩建和左侧扩建 (单侧扩建)。成果可为城市地铁隧道原位扩建设计与施工提供一定参考。

关键词: 地铁隧道; 原位扩建; 方案比选; 数值模拟

中图分类号: U451 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0116-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.021

LIU Guangkun

(Henan Zhongzhou Road & Bridge Construction Co., Ltd., Zhoukou 466000, China)

Abstract: Taking a urban subway tunnel as the engineering background, FLAC 3D finite difference software was employed to establish numerical simulation models for different in-situ expansion schemes. The two-bench excavation method was adopted for construction, and the tunnel convergence deformation, surrounding rock stress, and safety factor of primary support under various expansion schemes were analyzed. A comprehensive evaluation of construction stability was conducted to determine the optimal in-situ expansion scheme. The results indicate that the double-side expansion outperforms the full-ring expansion and left-side (single-side) expansion in terms of stability, stress distribution, and primary support safety. The findings can provide references for the design and construction of urban subway tunnel in-situ expansion projects.

Key words: subway tunnel; in-situ expansion; scheme comparison; numerical simulation

0 引言

伴随城市经济快速发展, 地铁客流压力使既有隧道通行能力面临严峻挑战, 为满足日益增加的交通量需求, 地下空间改扩建势在必行。而此类工程

难点在于如何减小施工对周边环境的扰动, 因此合适施工方案的选择成为关键环节^[1]。近年来, 众多学者于隧道改扩建方面开展了不少研究, 李永山等^[2]以特大断面隧道原位扩建为分析背景, 提出了“核心五步法”的原位扩挖方案, 有效保障了扩挖稳定性; 黄明利等^[3]在单洞双线盾构隧道扩挖成地铁车站的背景下, 对比分析了两连拱扩挖、三连拱扩挖等两种方案, 得出三连拱扩挖方案较为合理; 许学昭等^[4]在大直径盾构隧道扩挖地铁车站的前提下, 提出塔柱式结构扩挖方案, 可有效改善隧道关键节点的受力和变形; 戴世颖^[5]以既有地铁隧道改扩建工

作者简介: 刘广坤 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路桥梁。

收稿日期: 2023-07-18

程为依托，对改扩建断面的力学行为进行分析，优化了扩挖技术方案；刘翠清^[6]为减小市政隧道施工对既有地铁的影响，改建区域岩土体采用三轴搅拌桩进行加固，可有效减小其不利影响；胡秋芳^[7]、王玥等^[8]均强调了在复杂城市环境下进行地铁隧道扩挖时，必须具有针对性的技术方案来确保施工变形；刘小鹏^[9]利用圆形超前导洞扩挖成隧道，对比数值模拟与对比分析发现两台阶扩建方案更为合理；赖勇等^[10]以某高速公路隧道为背景，对比 CRD 法、层层剥皮法、三台阶法等三种原位扩挖方案，发现三种隧道扩挖稳定性差异较小；赵文等^[11]以南岭铁路隧道原位扩建项目为工程背景，构建主洞与竖井交叉段扩挖有限元模型，发现全断面法扩挖对围岩的二次扰动程度较低；仇在林^[12]优化设计了小导洞先行与台阶反扩挖隧道施工方法，并验证了其优秀于传统双侧壁导坑法；刘明辉等^[13]、谢支钢等^[14]、谢宗良等^[15]分别在既有人防隧道、公路隧道以及水工隧道改扩建的基础上，采用现场监控量测与数值模拟方法，对施工控制措施进行优化，保障隧道扩挖稳定性。

以上研究表明，既有成熟的扩挖方案研究多集中于公路、铁路等领域，而地铁隧道扩挖仍以盾构法为主，缺乏针对其特殊断面形式的优化方案。为弥补这一不足，以某城市地铁隧道扩建工程为背景，将公路与铁路隧道中应用的典型扩挖工法引入地铁隧道，借助 FLAC 3D 软件建立单侧扩建、周围扩建

及双侧扩建三种数值模型，以洞周收敛、围岩应力与初支安全系数为核心评价指标，对不同原位扩建方案进行比选与优化分析，从而确定适用于地铁特殊断面的推荐方案，以期对相关工程实践提供更全面的决策依据。

1 区间隧道扩建工程案例概况

某城市地铁区间与联络线交叉口处，受路线与周边环境综合影响且施工工期短与难度大等问题，引入矿山法进行地铁隧道特殊断面扩挖。特殊断面上部区域主要为砂岩、泥岩块石和碎石及黏性土组成的素填土，下部区域岩体主要为砂质泥岩与砂岩。扩挖完成后隧道特征断面埋深 50 m，跨度 14 m，高度 13 m，将初支与钢筋网等进行统一换算，扩建后初支与二衬厚度分别为 20、50 cm，周边岩体与支护结构参数取值见表 1。

表 1 周边岩体与支护材料参数取值					
Table 1 Parameters of surrounding rock mass and supporting materials					
材料	弹性模量 <i>E</i> /GPa	泊松比	容重 γ /(kN/m ³)	黏聚力 <i>C</i> /MPa	内摩擦角 φ / (°)
周边岩体	2.23	0.33	19.5	0.23	26
初支	24.50	0.20	25.3		
二衬	28.30	0.20	26.6		

地铁隧道区间与联络线交叉口特殊断面，可选取不同扩建方案利用两台阶法进行开挖，不同扩建方案工况如图 1 所示。

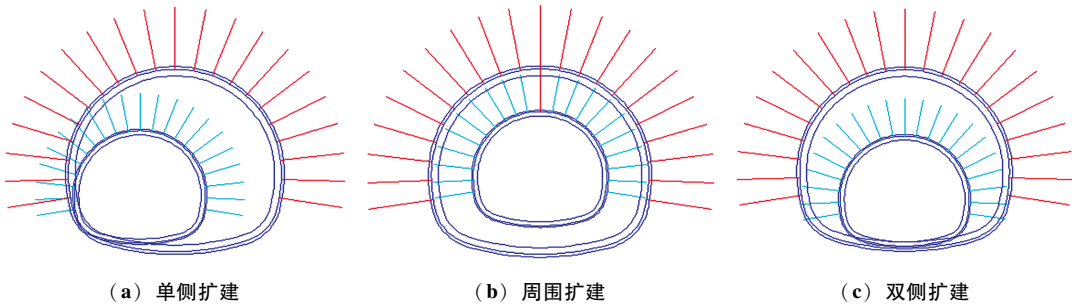


图 1 城市地铁隧道特殊断面扩建方案
Fig.1 Expansion scheme of special section of urban subway tunnel

2 监测点设置与数值模型建立

基于圣维南定理建立 $x \times y \times z$ 为 90 m $\times$ 100 m $\times$ 1 m 网格模型，周边岩体采用摩尔 - 库仑实体单元，初

支与二衬分别采用壳弹性与实体弹性单元，力学边界除上端自由其余边界均为固定约束，三种扩建方案模型如图 2 所示。

道桥技术

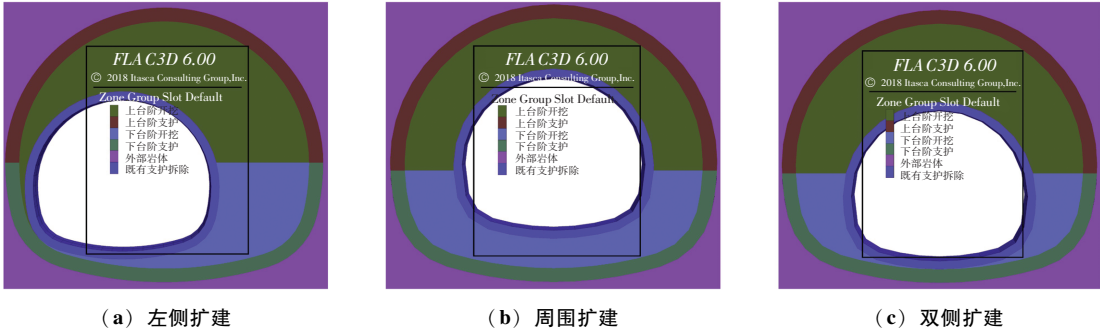


图2 城市地铁隧道特殊断面扩建数值模型
Fig. 2 Special section expansion model of urban subway tunnel

3 数值模拟分析

由于不同扩建方案下的地铁隧道施工非为道路中心线对称,故选择对应部位断面监测点(顶部、左右拱肩、左右拱腰、左右拱脚、底部)洞周收敛变形、围岩应力与初期支护结构受力特征进行分析,计算初支安全系数,结合岩体变形、应力与初支安全系数等方面确定最优原位扩建方案。

3.1 洞周收敛变形分析

隧道扩建将改变既有隧道周边岩体的应力状态,扩挖形成临空面将导致扩建隧道周围发生洞周收敛(水平位移与竖直位移),竖直收敛以顶部沉降与底部隆起为主,水平收敛以腰部水平位移为主。对不同扩建方案下的数值模型隧道特定断面收敛变形进行分析。不同扩建方案下隧道周边收敛变形张量云图如图3所示。

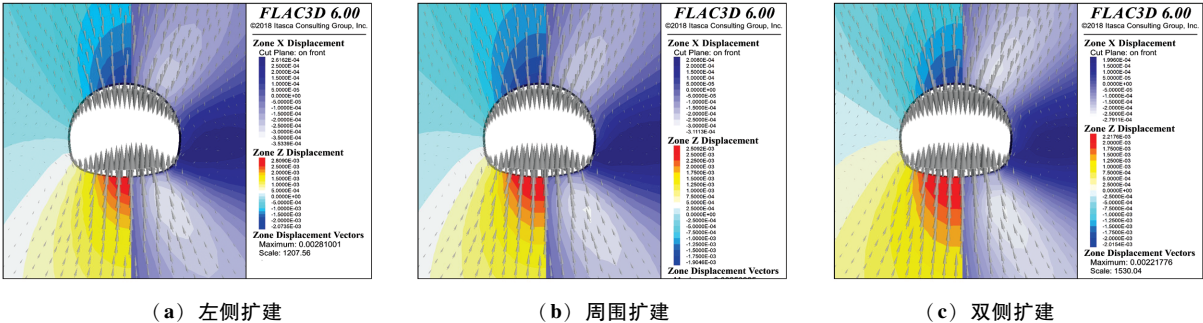


图3 城市地铁隧道洞周收敛张量云图
Fig. 3 Circumference convergence tensor cloud of urban subway tunnel

顶部与底部部位竖直位移最为显著,顶部围岩垂直向下变形,底部围岩垂直向上变形,由于已有隧道周边岩体开挖缺失岩土体,导致临空面位移变形逐渐向内部收敛的趋势。不同扩建方案的底部竖直位移值均高于顶部,说明底部隆起现象优先于顶部沉降。

拱腰部位水平位移较为明显,拱腰左侧围岩水平向右收敛,拱腰右侧围岩水平向左收敛,竖直位移同理。因为临空面扩大水平位移有向内部发生收敛现象,整体水平收敛位移趋于0.1 mm,因此水平位移不作为施工稳定控制性评价标准。

竖直位移可作为施工稳定控制性评价标准,相应位移越小对应扩建方案越合理。左侧、周围与双

侧等三种扩建方案顶部沉降分别为2.1、1.9、2.0 mm,底部隆起分别为2.8、2.5、2.2 mm,结合顶部与底部竖直位移分析得出合理扩建方案优劣性排序:双侧扩建>周围扩建>左侧扩建(单侧扩建)。

3.2 围岩应力分析

针对地铁隧道主应力进行分析,主应力表现形式可为拉应力或者压应力,在有限差分软件FLAC 3D中主应力“+”“-”分别表示拉应力与压应力,代数值较大为最大主应力,反之为最小主应力,不同扩建方案下的地铁隧道围岩主应力如图4所示,特殊断面所处区域岩体抗拉强度1.53 MPa,抗压强度16.60 MPa。

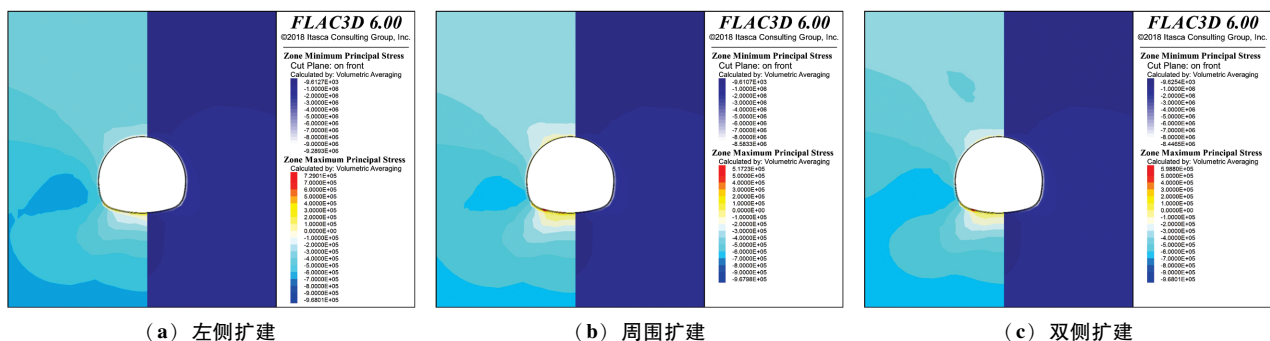


图 4 隧道围岩最大与最小主应力云图

Fig. 4 Maximum and minimum principal stress nephogram of tunnel surrounding rock

扩建完成后隧道周边岩体受应力重新分布导致部分区域存在应力集中现象，远离隧道断面区域应力影响较小，应力集中现象主要发生于拱腰与底部附近；最小主应力均表现为压应力，最大主应力存在拉压应力两种形式，最大主应力中的拉应力主要发生于底部附近，其余部位均为压应力。无论是双侧、周围或是左侧扩建方案，主应力表现为拉应力的峰值均位于底部附近，压应力峰值均位于拱腰附近；左侧、周围、双侧扩建方案的底部附近拉应力峰值分别为 0.73、0.52 与 0.60 MPa，拱腰附近压应力峰值分别为 9.29、8.58 与 8.45 MPa；分析拉压应力峰值得出危险点为底部与拱腰，验算危险点拉压应力峰值均小于 1.53、16.60 MPa，说明扩建完成后岩体强度仍满足要求，结合主应力（拉压应力）角度分析，合理扩建方案优劣性排序：双侧扩建 > 周围扩建 > 左侧扩建（单侧扩建）。

3.3 初支安全系数分析

在扩建过程中，初期支护作用是防止扩挖施工时应力释放过快、过多，导致开挖面发生塌方，其

主要作用是与岩体协同变形，共同承担施工阶段的岩体荷载。有限差分软件中壳单元可直接模拟得出支护结构的轴力与弯矩，图 5 为三种不同扩建方案的初期支护内力图（轴力与弯矩），按照 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》（简称“规范法”）中相应公式计算出各部位初期支护安全系数值，选取素混凝土安全系数取 2.0 作为施工阶段初期支护安全系数界限值，得出不同扩建方案下各部位初期支护安全系数分布，如图 6 所示。

通过对图 5、图 6 分析可知：不同扩建方案的轴力均为压力，轴力峰值与最低值分别位于拱腰与底部，左侧、周围与双侧扩建方案的拱腰轴力峰值分别为 1.40、1.31、1.31 MPa，底部轴力最低值分别为 0.44、0.40、0.33 MPa。不同扩建方案的弯矩有正负之分，正负弯矩峰值均位于拱脚处，发生反号原因是由于拱脚处剪力较大，取弯矩绝对值的最大数值进行分析。左侧、周围与双侧扩建方案下拱脚弯矩绝对值的最大数值分别为 9.71、9.00、8.92 kN·m；综合施工阶段初期支护内力角度分析得出扩建方案

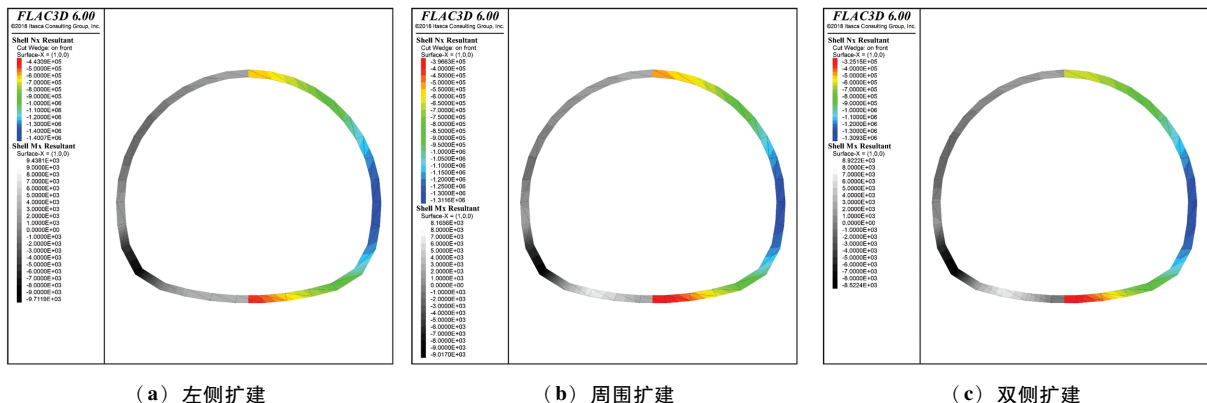


图 5 隧道初期支护轴力与弯矩

Fig. 5 Axial force and bending moment of tunnel primary support

道桥技术

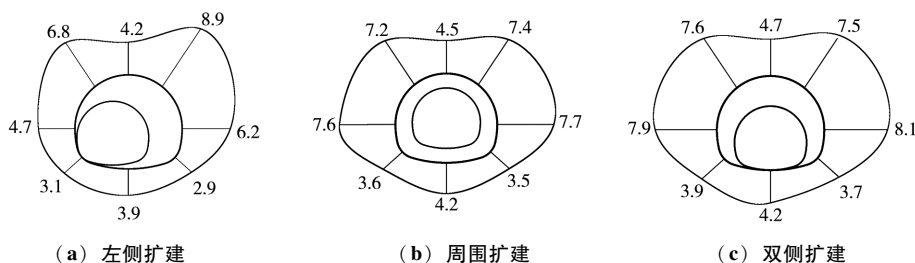


图6 隧道初支安全系数分布图

Fig. 6 Safety factor distribution diagram of tunnel initial support

优劣性排序：双侧扩建 > 周围扩建 > 左侧扩建（单侧扩建）。

初期支护安全系数，除左侧扩建以外，其余两种扩建方案初期支护安全系数基本呈现对称分布规律；左侧扩建由于既有隧道岩土体的缺失导致左侧施工安全性降低，采用单侧扩建施工过程中应改善相应侧初期支护加固措施，周围与双侧扩建方案初期支护安全系数由于对称分布，左右两边拱肩、拱腰与拱脚安全系数相差不大，主要是由于网格划分原因。

初期支护安全系数较小值分布于顶部、拱脚与底部，不同扩建方案各部位初期支护安全系数均高于界限值2，说明隧道在扩建期间处于安全稳定状态；左侧扩建初期支护各部位安全系数明显小于其他两种扩建方案，相比较其他两种方案，双侧扩建更具有优势，因此从初期支护安全系数角度出发，扩建方案优劣性排序：双侧扩建 > 周围扩建 > 左侧扩建（单侧扩建）。

4 结论

以某城市地铁隧道扩建为研究背景，运用FLAC 3D有限元差分软件进行数值仿真，分析采用两阶段法不同扩建方案工况下的洞周收敛变形、围岩应力、初支受力特征与初支安全系数，得到以下主要结论：

(1) 以位移为评价标准，扩建方案的优劣性排序为：双侧扩建优于周围扩建，周围扩建优于左侧扩建（即单侧扩建）。底部隆起现象优先于顶部沉降，拱腰部位的水平位移较为显著。

(2) 综合考虑主应力，底部和拱腰为危险点，扩建方案的优劣性排序为：双侧扩建优于周围扩建，周围扩建优于左侧扩建（单侧扩建）。

(3) 综合初支内力安全系数，左侧扩建的初支

安全系数相对较小，双侧扩建更具优势，扩建方案的优劣性排序为：双侧扩建优于周围扩建，周围扩建优于左侧扩建（单侧扩建）。

参 考 文 献

- [1] 欧予月. 地铁区间隧道原位扩建施工力学行为及扩建参数优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [2] 李永山, 陈良兵, 黄锦春等. 特大断面隧道原位扩建的施工力学特性分析 [J]. 路基工程, 2018, 197 (2): 201-206.
- [3] 黄明利, 申巧凤, 申荣杰. 单洞双线盾构隧道扩挖地铁车站方案研究 [J]. 现代隧道技术, 2017, 54 (6): 15-23.
- [4] 贾磊. 复杂条件盾构区间隧道扩挖力学行为研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [5] 戴世颖. 复杂环境下既有隧道改扩建断面力学行为研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (7): 147-151, 156.
- [6] 刘翠清. 市政隧道改建对邻近地铁结构扰动的影响分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 25-30, 51.
- [7] 胡秋芳. 城市地铁工程隧道扩挖施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2022, 7 (19): 40-42.
- [8] 王玥, 徐启鹏, 马召林. 郑州地铁粉细砂地层区间隧道扩挖注浆方案优化研究与实践 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (12): 2140-2149.
- [9] 刘小鹏. 超前导洞不同扩建方案对隧道稳定性的影响研究 [J]. 北方交通, 2022 (12): 66-69.
- [10] 赖勇, 张帅. 流固耦合作用下隧道原位扩建扩挖方式研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (S1): 311-320.
- [11] 赵文, 王鑫, 柏谦. 原位扩建既有隧道竖井与主洞交叉段施工力学 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (5): 713-719.
- [12] 仇在林. 超大断面隧道小导洞先行与台阶反扩挖施工技术研究 [J]. 公路工程, 2018, 43 (4): 48-52, 56.
- [13] 刘明辉, 殷爱国, 郭伟. 既有隧道扩挖改造的施工控制及数值模拟研究 [J]. 铁道工程学报, 2014, 31 (11): 98-103.
- [14] 谢支钢, 邹大成, 杨俊, 等. 既有公路扩挖隧道初支、二衬受力特性研究 [J]. 南阳理工学院学报, 2022, 14 (06): 86-90.
- [15] 谢宗良, 蒋文帅. 水工隧道改扩建施工安全控制措施 [J]. 水利水电快报, 2022, 43 (S2): 47-48, 54.