

青岛地铁大断面隧道围岩变形特性及施工方案优化^{*}姜志伟¹ 袁长丰¹ 樊延祥² 关辉² 甄卓¹ 秦天庆¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 266525, 青岛; 2. 中铁二十五局集团第五工程有限公司, 266101, 青岛)

摘要 [目的] 大断面隧道由于其形状扁平且跨度较大, 一般采用多台阶多步开挖, 在施工过程中反复扰动围岩和临时支撑, 影响围岩及支护结构稳定性, 故须对其围岩变形特性进行研究, 并优化施工方案。[方法] 以青岛地铁4号线折返区间暗挖隧道为例, 结合现场监测数据, 通过有限元模拟分析现行施工方案中大断面地铁隧道三台阶九步开挖过程中的围岩变形特性, 并与优化后的三台阶五步法做模拟对比。[结果及结论] 模拟比较结果表明, 现行施工方案横向距离隧道中心线26 m范围内的地面沉降较大, 占总沉降量的89.77%; 拱顶和拱肩在开挖后变形大, 沉降量最大达到10.2 mm, 拱顶围岩应力随开挖迅速增加, 随着开挖工序推进, 拱腰上部和墙角出现局部主应力集中。优化后的三台阶五步开挖法可实现快速开挖和支护, 施工工序简化40%, 同时减少了围岩扰动, 其变形可控制在10 mm的合理范围内, 改善了拱顶的应力重分布和墙角的应力集中现象。

关键词 地铁; 大断面隧道; 围岩变形特性; 施工优化

中图分类号 U456.3⁺1; U455.41⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.018

Deformation Characteristics of Large Section Tunnel Surrounding Rock and Optimization of Tunnel Construction Scheme for Qingdao Metro Line

JIANG Zhiwei¹, YUAN Changfeng¹, FAN Yanxiang², GUAN Hui², ZHEN Zhuo¹, QIN Tianqing¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 266525, Qingdao, China; 2. China Railway 25th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., 266101, Qingdao, China)

Abstract [Objective] The large section tunnel, due to flat shape and large span, usually adopts multiple steps and staged excavation. In the process of construction, the surrounding rock and the temporary support are repeatedly disturbed, affecting the stability of surrounding rock and supporting structure. Therefore, the deformation characteristics of the surrounding rock should be studied and the construction scheme should be optimized. [Method] Taking the mined tunnel of Qingdao

Metro Line 4 in turn-back section as the example, based on the on-site monitoring data and using finite element simulation, the deformation characteristics of the surrounding rock in the excavation process of the large-section metro tunnel with three-step and nine-stage method are analyzed, and then compared with the optimized three-step and five-stage method. [Result & Conclusion] The simulation results show that the ground settlement is relatively large caused by the current construction scheme within the horizontal distance of 26m from the tunnel center line, accounting for 89.77% of the total settlement. The arch and the spandrel deform are large after excavation, and the maximum settlement reaches 10.2 mm. The stress of the surrounding rock of the arch increases rapidly with excavation. As the excavation advances, the local principal stress concentration appears in the upper part of the haunch and the corner. The optimized three-step and five-stage excavation method can realize rapid excavation and support, and simplify the construction process by 40%, while reducing disturbance to the surrounding rock and controlling its deformation within a reasonable range of 10 mm. Thus, the stress redistribution of the arch and the stress concentration in the corner are improved.

Key words metro; large section tunnel; deformation characteristic of the surrounding rock; construction optimization

随着大城市交通拥堵问题日益严重, 发展城市轨道交通是解决该问题的有效方案之一。如何快速安全地开挖大尺寸断面隧道, 一直是设计和施工方有待不断优化完善的科学问题。相关学者针对大断面隧道施工方法、施工工序、支护参数、力学特性等开展了广泛研究并取得了许多研究成果^[1-5]。

本文以青岛地铁4号线折返区间大断面隧道为依托, 通过数值模拟, 结合现场监测数据, 分析了该暗挖大断面区间施工采用的三台阶九步开挖法的围岩变形特性, 与优化后的三台阶五步开挖做模拟对比, 研究优化方案是否能减少施工对围岩的扰动次数, 控制围岩变形, 以改善墙角应力集中现象。

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE017); 山东省重点研发计划(公益类专项)项目(2018GSF120005)

1 工程概况

青岛地铁 4 号线大河东站折返区间采用矿山法施工,环形导坑预留核心土三台阶九步法开挖。

该暗挖区间 ZB 段为单洞三线大断面隧道,围岩级别为Ⅲ级,隧道拱顶埋深约为 23 m;开挖宽度约 22 m,开挖高度为 13.4 m;拱顶最薄覆岩厚度为 6 m,净跨度为 19 m。

地质由上至下分别为素填土、粉质黏土、含有机质粉质黏土、中粗砂、粗砾砂、卵石土、中风化花岗岩、微风化花岗岩,局部存在破碎带。

2 数值模拟

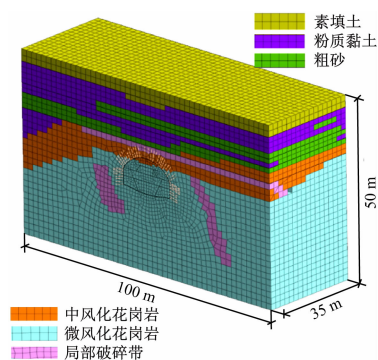
2.1 模型构建

岩体本构采用摩尔-库伦弹塑性模型,为消除边界效应的影响,模型尺寸长 35 m、宽 100 m、高 50 m,各个地层错乱交叉分布。喷射混凝土和二次衬砌采用 2D 板单元模拟,锚杆和临时支撑采用 1D 植入式桁架单元,单元属性为均质弹塑性材料。将三台阶九步开挖法的模拟数据与现场监测数据作对比,最终确定围岩及支护结构参数见表 1,模型尺寸和图层分布如图 1 所示。

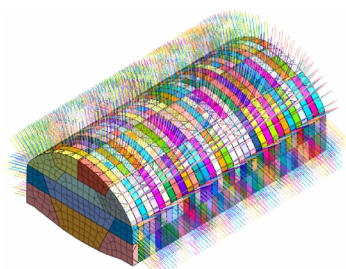
表 1 围岩及支护结构参数

Tab. 1 Parameters of surrounding rock and supporting structure

材料	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	初始孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
素填土	0.3	0.17	21.0	0.50	30	36.0
粉质黏土	41.5	0.32	25.8	0.74	40	17.5
粗砂	180.0	0.30	21.0	0.50	5	0
中风化花岗岩	1 500.0	0.18	25.8	0.74	25	55.0
微风化岩	3 000.0	0.10	21.0	0.50	30	60.0
喷射混凝土	30 000.0	0.20	21.0			
锚杆	210 000.0	0.30	78.5			
二次衬砌	33 500.0	0.30	21.0			



a) 整体模型



b) 模型的隧道施工部分

图 1 三台阶九步开挖法的模型尺寸和土层分布

Fig. 1 Model size and soil layer distribution for 3-step and 9-stage excavation method

2.2 结果分析

三台阶九步开挖法的数值模拟和现场的地面沉降如图 2 所示,洞周收敛如图 3 所示。

从图 2 可以看出,距隧道中心线 ± 44 m 内的地面均有沉降,越靠近隧道中心线的区域,地面沉降值越大,隧道施工对距离隧道中心线 0 ~ 26 m 范围内的地面沉降影响较大,约占总沉降量的 89.77%,距隧道中心线 26 ~ 44 m 范围内的地面沉降相对缓和。三台阶九步开挖法的数值模拟数据和现场监测数据基本一致。

由图 3 可知,拱顶沉降最大值为 10.2 mm,拱顶受较大的重分布应力,围岩不稳定;拱底前期由于预留核心土的平衡作用,隆起量为 4.10 mm;拱顶在开挖 0 ~ 15 m 时发生快速变形,此阶段变形量占总变形量的 69% ~ 77%,掘进深度在达到 15 m 时施作二次衬砌,沉降量逐渐趋于稳定。左拱肩较右拱肩先开挖,收敛值略大于右拱肩,左、右拱肩收敛值分别为 8.42 mm 和 7.22 mm,变形趋势与拱顶沉降相似,在 0 ~ 15 m 范围内发生快速变形而后趋于稳定;由于扁平隧道主要受竖向力的影响,则其侧向变

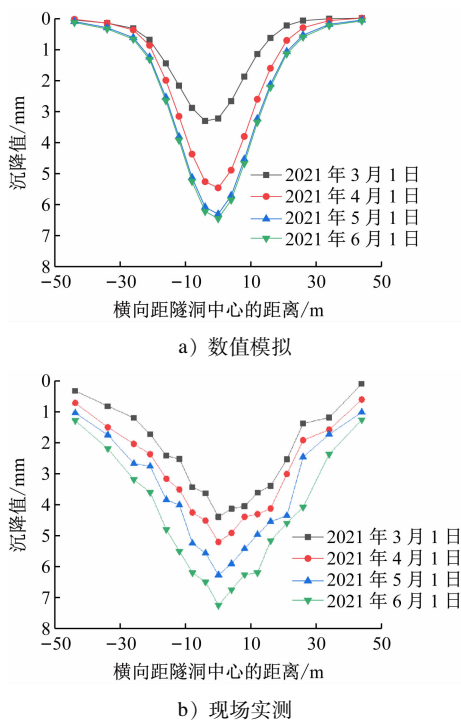


图2 三台阶九步开挖法的地面沉降

Fig. 2 Land subsidence with 3-step and 9-stage excavation method

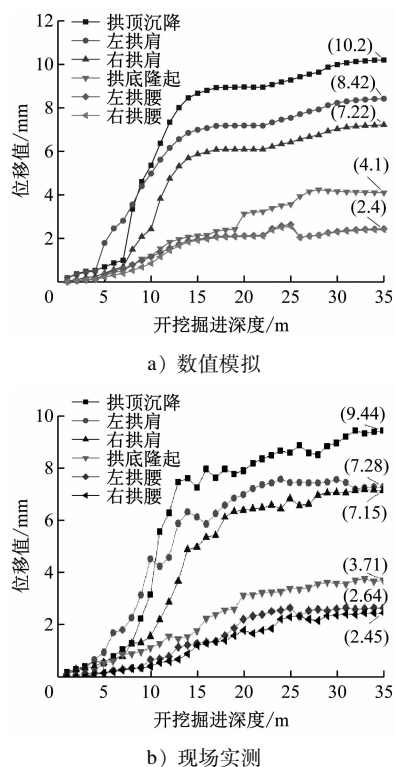
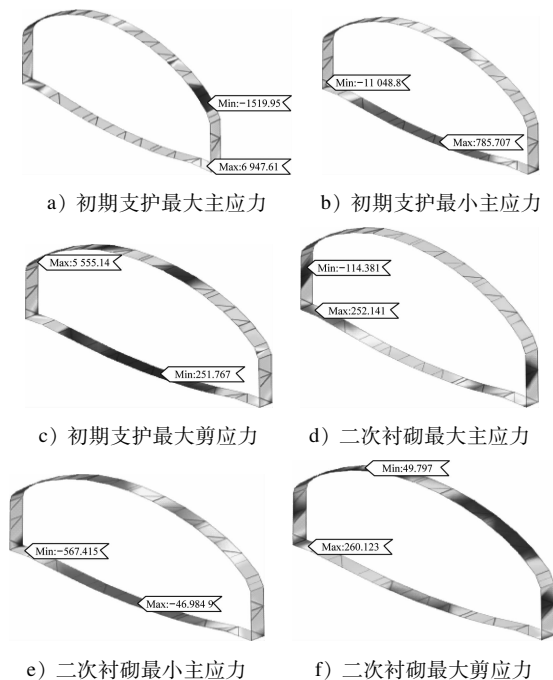


图3 三台阶九步开挖法的洞周收敛

Fig. 3 Convergence of tunnel inner perimeter with 3-step and 9-stage excavation method

形较小,趋势也较为缓和,拱腰的收敛值仅为 2.4

mm,约为拱顶沉降值的 23%;现场洞周收敛值介于拱肩和拱腰之间。三台阶九步开挖法的数值模拟结果与现场监测数据较为吻合,模拟得到的结果具有可信度和参考性,由此得到施工方案的支护结构应力云图,如图 4 所示。



注:min 表示最小值;max 表示最大值;单位为 kPa。

图4 三台阶九步开挖法隧道施工的支护结构应力云图

Fig. 4 Supporting structure force cloud map of the tunnel construction with 3-step and 9-stage excavation method

由图 4 可知,初期支护应力集中现象明显。左拱肩先于右拱肩和核心土开挖,在隧道中心线左右两边形成不平衡应力,拱顶先开挖形成临空面,受到的扰动最大,释放的能量也最大;在开挖卸荷后,拱顶围岩应力随时间增长逐渐增加,随着开挖工序推进,临空面扩大至拱腰,在拱腰上部 and 墙角由于拱形到边墙的形状变化,出现局部主应力集中,由于仰拱形状较为缓和,应力分布较为均匀。

由图 4 a) 初期支护最大主应力云图可知,初期支护最大主应力除两边墙上外均为正值,呈现左右对称分布。其中,墙角处由于应力集中较大,其值达到 6.95 MPa,从拱顶到边墙,主应力逐渐减小,最小值在拱肩处为 -1.50 MPa;而最小主应力的最小值在墙角处为 -11.05 MPa,最大值在仰拱为 0.79 MPa;最大剪应力的最大值在左墙角处为 5.55 MPa,最小值在右拱肩为 0.25 MPa,由此可见墙角处的应力集中现象更显著。

二次衬砌应力分布情况基本与初期支护一致,最大主应力的最大值依然位于墙角,但最小值转移至边墙。由于二次衬砌施作时初期支护已经达到强度要求且已发挥了一部分承载力,围岩释放完一部分应力,而且二次衬砌的厚度和强度都较大,所以二次衬砌的应力相对于初期支护较小,二次衬砌主要是作为安全储备。

以应力集中作用下的左墙角为例,研究其在开挖和支护过程中的应力变化,如图 5 所示。

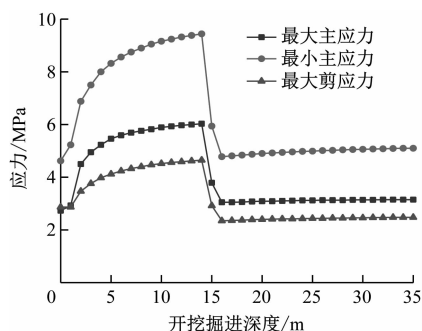


图 5 三台阶九步开挖法隧道左墙角应力曲线模拟图

Fig. 5 Simulated stress curve diagram at the tunnel left wall corner with 3-stage and 9-stage excavation method

从图 5 中可以看出,墙角处的土体在开挖时逐渐卸载,围岩发生应力重分布,附加应力迅速增大,最大主应力和最大剪应力变化相似,最大主应力略大于最大剪应力,而最小主应力绝对值增速较大,应力变化剧烈。在开挖掘进 15 m 后施作二次衬砌,发挥了一部分承载作用并传递了围岩应力,致使墙角应力发生突变,应力绝对值均大幅度减小,并趋于稳定。这种变化反映在受到隧道开挖的影响后,围岩应力场受到扰动而产生应力重分布,产生位移并导致围岩临空面在一定深度范围内形成破碎区,随后应力逐步调整,最后达到新的平衡,施作二次衬砌后围岩又趋于稳定。

2.3 施工方案优化

虽然大断面隧道处在Ⅲ级围岩条件下,但上覆中风化岩体较薄,采用三台阶九步法工序较多,多次爆破使得围岩频繁扰动,强度衰减不断积累,影响工程质量和施工安全,给后期的运营和维护埋下安全隐患。因此,需要进一步优化当前施工方案,减少爆破次数,增大工作面以便快速出渣和支护。优化方案台阶长 5 m,简化为五步开挖,如图 6 所示。

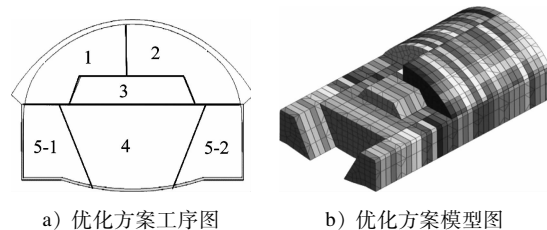


图 6 优化方案

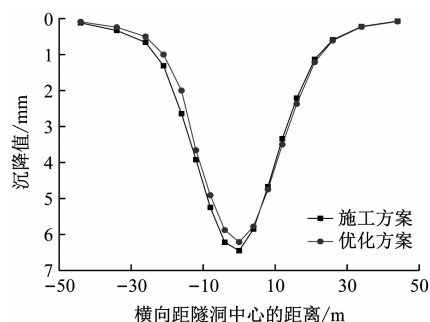
Fig. 6 Optimized scheme

3 两种施工方案模拟对比分析

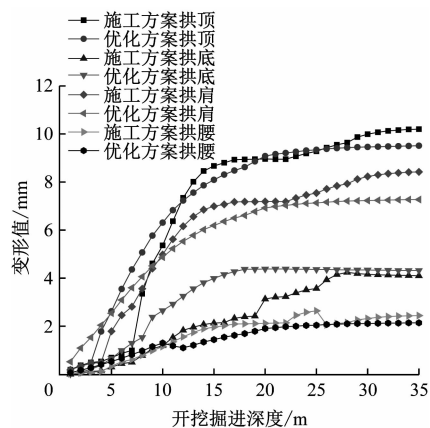
将施工采用的三台阶九步开挖方案与优化后的三台阶五步开挖方案做模拟对比分析。

3.1 地面沉降和洞周收敛对比

岩体在不同工况条件下的应力重分布也不同,两种施工方案开挖引起的地面累计沉降和洞周收敛变形模拟对比曲线如图 7 所示。



a) 地面沉降值对比



b) 洞周收敛变形值对比

图 7 两种施工方案地面沉降和洞周收敛变形对比图

Fig. 7 Comparison diagram of land subsidence and convergence of tunnel inner perimeter under two construction schemes

两种方案引起的地面沉降值差别不大,不同开挖工序对地面沉降的影响较弱。两种方案对围岩

竖向变形的影响不明显,而对拱肩和边墙来说,由于开挖顺序的改变导致相邻土块之间应力发生变化,拱肩和边墙受影响程度稍大一些;两种施工方案的拱底和拱腰变形波动较大,优化后变形曲线较为平稳。优化方案的洞周收敛值均小于施工方案的洞周收敛值。

3.2 应力对比

两种施工方案引起的左墙角应力集中处应力变化如图8所示。

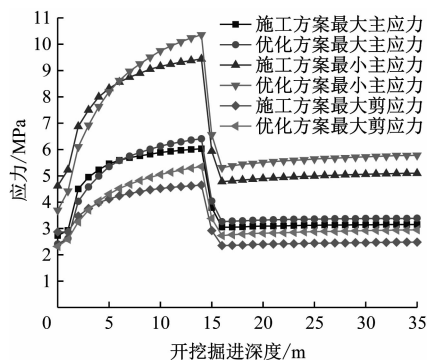


图8 两种施工方案左墙角应力集中处的应力对比图

Fig. 8 Stress comparison diagram of the stress concentration at tunnel left wall corner under two construction schemes

整个开挖和支护过程中,两种方案应力变化趋势接近,开挖掘进0~5 m后的应力迅速响应,以较高的速率增长,优化方案各种应力增长明显较大且增长速率较大,这是由于优化方案中一次开挖面积加大造成应力卸载过快;开挖第4步时中下部核心土一次性移除,应力释放过程中两侧土连续开挖,造成拱部以下围岩应力卸载过大,随着卸载后应力重新分布,应力增长趋于缓和但围岩仍处于较高应力状态。施作二次衬砌后由于其承载能力,应力曲线迅速下降并稳定在较小值。

4 结语

该暗挖隧道横向距隧道中心线26 m范围内的地面沉降较大;拱顶围岩应力随开挖迅速增加,拱顶和拱肩在开挖0~15 m时发生快速变形,水平位移相对竖向位移较小,拱腰上部出现局部主应力集中。当前施工方案由于其工序复杂,不仅对围岩反复扰动,并且施作空间小、出渣慢、支护延迟、效率低,致使围岩卸荷较大,为后期运营和维护阶段的

安全埋下隐患,应在施工期间进一步优化方案。

对于大断面隧道的开挖,采用台阶法施工时,从施工角度的模拟对比发现三台阶五步开挖法更为理想,对围岩扰动程度较小,初支闭合成环较快,能有效控制围岩变形,且施工作业空间大,可以组织机械化快速施工和平行流水作业,故施工进度快。

参考文献

- [1] 冯义. 超大断面地铁隧道的设计方案研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 70.
FENG Yi. Research on design scheme of metro tunnel with super large section[J]. Railway Engineering, 2018, 58(11): 70.
- [2] 姜封国, 白丽丽, 宋敏, 等. 哈尔滨城市地铁大断面隧道施工稳定性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1419.
JIANG Fengguo, BAI Lili, SONG Min, et al. Analysis on construction stability of large section tunnel of Harbin City Metro[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(4): 1419.
- [3] 李波, 魏龙海, 舒恒. 滨海软弱地层超大断面暗挖隧道施工工序研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 283.
LI Bo, WEI Longhai, SHU Heng. Study on construction procedure of super-large cross-section underground excavation tunnel in coastal soft stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 283.
- [4] 叶万军, 魏伟, 陈明. 深埋大断面黄土隧道初期支护受力特征分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(10): 1585.
YE Wanjuan, WEI Wei, CHEN Ming. Mechanical characteristics of primary support of deep-buried large cross-section loess tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(10): 1585.
- [5] 童建军, 刘大刚, 张霄, 等. 大断面隧道机械化施工支护结构设计方法: 以郑万高铁湖北段隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1): 116.
TONG Jianjun, LIU Dagang, ZHANG Xiao, et al. Design method for support structure of large cross-section tunnels in Hubei on Zhengzhou-wanzhou railway constructed by mechanized means[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 116.

· 收稿日期:2021-11-07 修回日期:2021-12-30 出版日期:2024-06-10

Received:2021-11-07 Revised:2021-12-30 Published:2024-06-10

· 第一作者:姜志伟,硕士研究生,1971226065@qq.com

通信作者:袁长丰,教授,yuanchangfeng@qut.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license