

城市轨道交通双线叠交盾构隧道合理竖向净距研究*

温 森^{1,2} 张明旭¹ 周 义¹ 盛桂林^{1,2}

(1. 河南大学岩土与轨道交通工程研究所, 475004, 开封;

2. 河南大学轨道交通智能建造工程技术中心, 475004, 开封//第一作者, 教授)

摘 要 为了确定城市轨道交通双线叠交盾构隧道的合理竖向净距,建立双线叠交盾构隧道数值模型,分析新建隧道与上方既有隧道交角 α 分别为 0° 及 90° ,且其竖向净距 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m共12种工况下,新建隧道施工所引起的既有隧道整体结构产生的位移。以北京新建地铁14号线望京站—阜通站区间隧道工程下穿既有15号线望京站—望京西站区间隧道为例,通过建立三维有限元数值模型,选取15号线既有隧道拱顶监测点,对其进行沉降监测值与模拟值对比。结果表明:当 α 为 0° , L 分别为5 m、6 m时,既有隧道拱底沉降曲线几乎相同且远小于 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时的,而 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时的拱底沉降曲线较为接近,且随着双线隧道开挖结束,拱底沉降曲线整体呈增大趋势;当 α 为 90° , L 为5 m时,新建盾构隧道动态掘进对既有隧道整体影响最小;15号线既有隧道拱顶沉降实际监测值与模拟计算值存在一定偏差,但两者整体规律较为相符。由此可知,新建隧道与上方既有隧道竖向净距为5 m、6 m时较为合理。

关键词 城市轨道交通; 叠交隧道; 双线盾构隧道; 合理竖向净距

中图分类号 U456.3⁺1; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.012

Reasonable Vertide Net Distance of Urban Rail Transit Double-track Overlapping Shield Tunnels

WEN Sen, ZHANG Mingxu, ZHOU Yi, SHENG Guilin

Abstract Aiming to determine the reasonable vertical net distance of urban rail transit double-track overlapping shield tunnels, a numerical model of double-track overlapping shield tunnels is established. Under the total 12 working conditions, with the new tunnel and overhead existing tunnel intersection angle α being 0° and 90° corresponding to six of the vertical net distance L being 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m and 6 m the existing tunnel overall structure displacement caused by the newly-

built tunnel construction is analyzed. Taking the newly-built Beijing Subway Line 14 Wangjing Station to Futong Station interval tunnel engineering under-passing existing Line 15 Wangjing Station to Wangjing West Station interval tunnel as example, by establishing a 3D finite element numerical model and selecting Line 15 existing tunnel vault monitoring points, the settlement monitored and simulated values are compared. The results show that when $\alpha = 0^\circ$ and $L = 5$ m, 6 m, the existing tunnel arch bottom settlement curves are almost the same and significantly smaller than they are when $L = 1$ m, 2 m, 3 m, 4 m, while the arch bottom settlement curves in the above L situation are similar. As the double-track tunnel excavation completes, the arch bottom settlement curve shows an increasing trend in general. When $\alpha = 90^\circ$ and $L = 5$ m, the dynamic excavation of the newly-built shield tunnel has the least overall impact on the existing tunnel. It can be derived that the reasonable vertide net distance between the newly-built tunnel and the existing tunnel is 5 m and 6 m.

Key words urban rail transit; overlapping tunnel; double-track overlapping tunnel; reasonable vertide net distance

First-author's address Institute of Geotechnical and Rail Transport Engineering, Henan University, 475004, Kaifeng, China

随着我国城市地下空间开发利用规模的扩大,新建盾构隧道不可避免地与既有隧道形成叠交穿越的复杂工况。文献[1-8]通过试验、理论分析、数值模拟等方法对叠交隧道盾构法施工等进行了大量研究。目前国内外学者在隧道工程方面有了丰硕的研究成果,但主要是关于单线新建隧道对既有隧道的影响,对于双线隧道叠交工况下新建隧道对既有隧道的变形影响研究相对较少。本文针对双线叠交盾构隧道在不同交角下的合理竖向净距进行全面分析研究。

* 河南省科技发展计划项目(212102310274,222102320415);河南省高等学校青年骨干教师培养计划课题(2020GGJS035)

1 双线叠交盾构隧道不同夹角及竖向净距下的竖向位移分析

1.1 双线叠交盾构隧道数值模型的建立

双线叠交盾构隧道数值模型如图1所示。考虑双线叠交盾构隧道2种不同交角 α (α 分别为 0° 、 90°), 竖向净距 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m、5 m及6 m共12种工况。建立不同 α 、 L 下的三维数值模型。通过分析不同 α 、 L 时新建隧道施工所引起的既有隧道整体结构产生的位移, 从而确定新建隧道与既有隧道的合理净距。

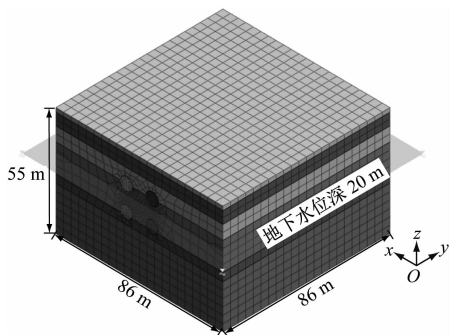


图1 双线叠交盾构隧道数值模型

Fig. 1 Numerical model of double-track overlapping shield tunnels

1.2 α 为 0° 时新建隧道开挖对既有隧道的影响分析

为探讨不同 L 下新建隧道与其上方既有隧道两者间的相互作用, 提取新建隧道动态掘进结束时 (即 $y=86$ m断面处) 既有隧道拱底沉降值并绘制位移曲线, 如图2所示。

从图2 a) 中可发现: L 分别为5 m、6 m时既有左线隧道拱底沉降远小于 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时的拱底沉降; L 为5 m时的最大、最小沉降值分别为4.28 mm、3.89 mm, L 为6 m时的最大、最小沉降值为4.21 mm、3.87 mm, 后者的最大、最小沉降值较前者分别相差9.11%、8.07%, 减少比例较小; 当 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时, 相同 y_d (新建隧道开挖长度) 下拱底沉降最大增长比例为6.69%, 最小增长比例为1.09%; 当 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时, 其拱底沉降曲线较为接近, 盾构动态掘进结束时既有左线隧道拱底沉降曲线整体呈增大趋势, 且其最大值与最小值最大可相差39.03%, 整体扰动影响较大。

从图2 b) 中可发现: L 分别为5 m、6 m时, 既有

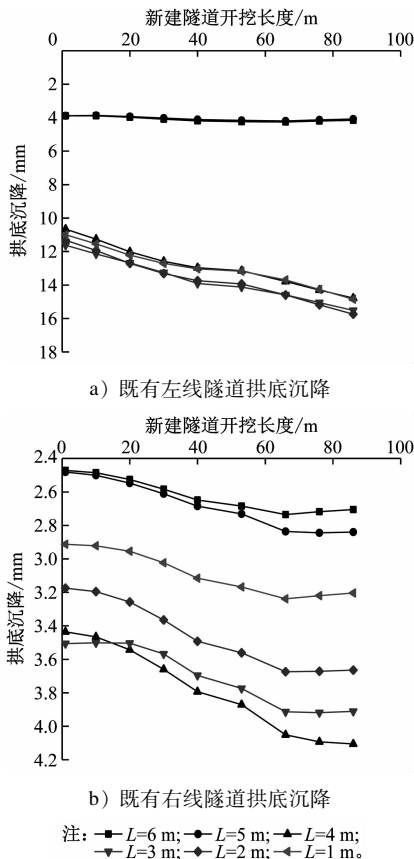


图2 新建隧道开挖结束时上方既有隧道拱底沉降曲线

Fig. 2 Settlement curve of overhead existing tunnel arch bottom after excavation of newly-built tunnel

右线隧道拱底沉降曲线较为接近, 且相同 y_d 下拱底沉降最大增长比例依次为2.50%、3.84%, 相差较小; L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时, 右线隧道拱底沉降曲线较为分散, 且 L 为4 m时隧道整体沉降趋势偏大, 相同 y_d 下拱底沉降最大增长比例为4.66%; L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m时, 拱底沉降曲线整体逐渐增大, 且其最大值与最小值最大可相差19.12%; L 分别为5 m、6 m时既有隧道拱底沉降远小于 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时的拱底沉降; 新建左线隧道施工时, 由于上方既有右线隧道处于新建左线隧道斜上方大于7 m的位置, 使得对其影响减弱而造成不同 L 下既有隧道拱底沉降整体小于位于正上方的既有左线隧道。

1.3 α 为 90° 时新建隧道开挖对既有隧道的影响分析

经分析发现, 当 α 为 90° 、 L 为5 m时新建隧道与上方既有隧道交叠区域的地面沉降值最小, 故在模拟新建隧道盾构施工时其与上方既有隧道的相互影响最小。因此, 选取 α 为 90° 、 L 为5 m的上述

模型,进一步探讨新建隧道与上方既有隧道正交时对既有隧道整体结构的影响。叠交隧道模型观测点布置如图 3 所示。以既有左线隧道为例(既有右线隧道同理),提取新建隧道盾构法掘进时的上方既有左线隧道拱顶、拱底竖向位移并绘制位移曲线,如图 4 所示。

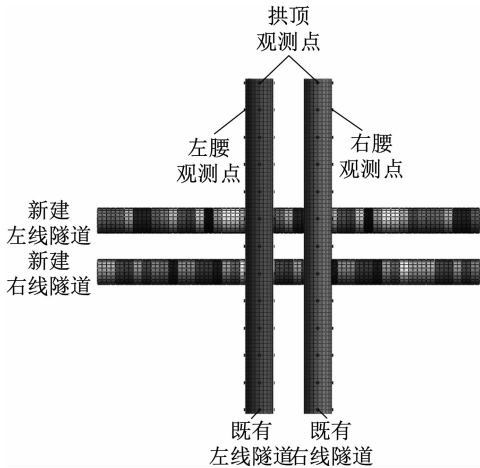


图 3 叠交隧道模型观测点布置图

Fig. 3 Layout diagram of overlapping tunnel model monitoring points

进结束时,新建隧道与既有隧道交叠区域上方观测点处拱顶、拱底沉降最大且向两侧逐渐减小,沉降槽曲线逐渐形成且呈“V”形。这是由于新建盾构隧道掘进结束时,因对其上方土体造成扰动使得既有隧道结构发生沉降,而拱腰和拱肩对拱顶的约束作用使其变形受限,导致既有隧道左线拱顶、拱底沉降曲线呈现单峰状态^[9]。新建右线隧道掘进结束后既有左线隧道沉降均大于新建左线隧道时,这是由于新建隧道开挖时既有隧道沉降累加所致。当新建左线盾构隧道掘进结束后其上方既有左线隧道拱顶、拱底沉降最大值分别为 2.17 mm、2.23 mm,后者较前者相差 2.76%,相差较小。新建右线隧道掘进结束后,既有左线隧道的拱顶、拱底沉降最大值分别为 3.49 mm、3.53 mm,后者较前者增长 1.15%,增长比例较小。由此可见,当 α 为 90° 、 L 为 5 m 时,新建左线、右线隧道开挖结束后对上方既有隧道的影响均较小,尤其是交叠区域的拱顶、拱底沉降最大值仅相差 0.04 mm。根据分析发现,既有右线隧道拱顶、拱底沉降亦呈现此规律。

2 工程案例

2.1 工程概况

北京新建地铁 14 号线(以下简称“14 号线”)望京站—阜通站区间隧道(以下简称“望阜区间隧道”)工程下穿既有 15 号线望京站—望京西站区间隧道(以下简称“望望区间隧道”)。望阜区间隧道双线全长 1 476.01 m,其中:左线里程为 K42 + 637.25—K43 + 377.92,全长 755.34 m;右线里程为 K42 + 657.25—K43 + 377.92,全长 720.67 m。14 号线新建隧道采用土压平衡盾构法施工。新建隧道结构底板标高约为 12.3 ~ 18.3 m,埋深约 19.0 ~ 25.2 m,覆土厚约 12.8 ~ 19.0 m。此外,14 号线望阜区间左、右两线中心线的平均距离为 17.0 m,掘进方向从望京站出发,阜通站接收。盾构外径为 6.0 m、内径为 5.4 m,管片宽度为 1.2 m、厚度为 0.3 m。既有 15 号线隧道结构顶部埋深约 9.9 ~ 10.8 m。之间的交角约为 53° ,竖向最小净距约 1.9 m。14 号线与 15 号线位置关系如图 5 所示。该区段土体物理力学参数如表 1 所示。

2.2 监测结果对比分析

根据本工程的实际情况建立 14 号线下穿 15 号线的三维有限元数值模型,并在既有 15 号线左、右线隧道拱顶布置监测点,如图 6 所示。

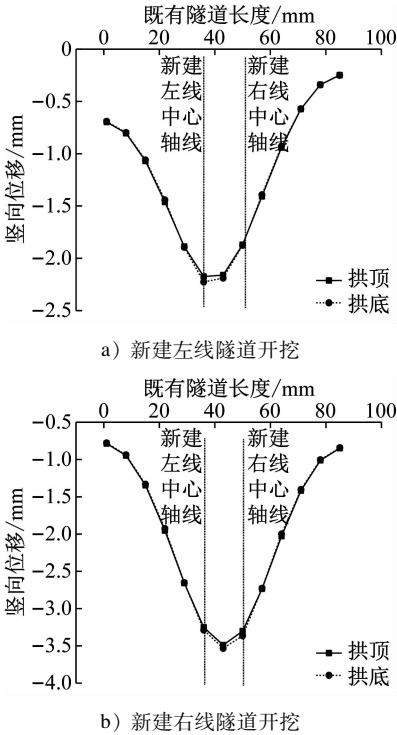


图 4 新建隧道开挖时既有左线隧道拱顶、拱底沉降曲线
Fig. 4 Settlement curve of vault and bottom on existing left line during new tunnel construction

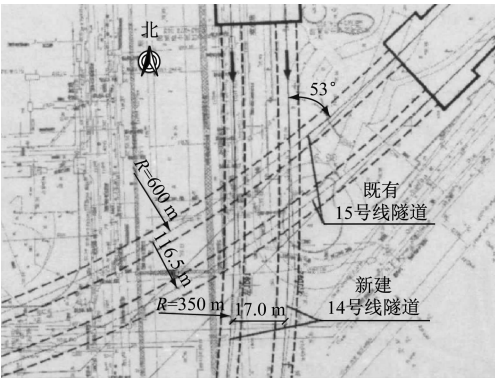


图5 14号线新建望阜区间隧道下穿既有15号线望望区间隧道位置关系示意图

Fig. 5 Location relation diagram of Line 14 newly-built WangFu interval tunnel under-passing existing Line 15 WangWang interval tunnel

表1 土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	天然密度/ (g/cm ³)	压缩模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
杂填土	1.82	7	0.40	8	8
粉土	2.17	20	0.28	30	32
粉质黏土-1	1.93	18	0.40	42	17
粉细砂	1.97	10	0.25	6	29
粉质黏土-2	2.01	21	0.30	47	18

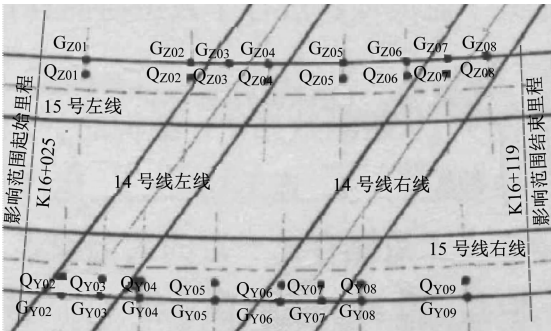


图6 既有15号线左、右线隧道拱顶监测点布置示意图

Fig. 6 Layout diagram of monitoring points at the right and left line tunnel arches of Line 15

选取既有隧道拱顶监测点 Q_{Z02} 、 Q_{Z03} 、 Q_{Z04} 、 Q_{Z06} 、 Q_{Z07} 、 Q_{Z08} ，并对其进行沉降监测值与模拟值对比,如表2所示。

表2显示:既有隧道拱顶沉降实际监测值与模拟计算值存在一定偏差,但两者整体规律较为相符,验证了所得结论的可靠性与正确性。

表2 既有隧道拱顶沉降监测值与模拟值对比

Tab.2 Comparison of existing tunnel arch settlement and simulation values

监测点	既有隧道拱顶沉降/mm	
	监测值	模拟值
Q_{Z02}	3.82	5.55
Q_{Z03}	4.23	6.32
Q_{Z04}	4.02	5.89
Q_{Z06}	4.12	6.22
Q_{Z07}	5.31	7.28
Q_{Z08}	4.33	6.51

3 结论

- 1) 当 α 为 0° 、 L 分别为5 m、6 m时,双线隧道施工结束后上方既有左线隧道拱底沉降曲线几乎相同,且拱底沉降远小于 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m的拱底沉降; L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时,拱底沉降曲线较为接近,随着双线隧道开挖结束,沉降曲线整体呈增大趋势且沉降最大值与最小值最大可相差39.03%,说明在这些工况下新建隧道施工对上方既有隧道影响相对较大;且当 L 为4 m时,既有右线隧道拱底产生的沉降最大。
- 2) 当 α 为 90° 、 L 为5 m时,新建隧道盾构动态掘进对上方既有隧道整体结构的影响最小。
- 3) 无论 α 取多大, L 分别为5 m、6 m时的既有隧道沉降明显小于 L 分别为1 m、2 m、3 m、4 m时的既有隧道沉降。新建隧道与上方既有隧道竖向净距为5 m、6 m时较为合理,这在实际城市轨道交通双线叠交隧道工程盾构法施工时可作为参考。

参考文献

[1] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 942.

HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 942.

[2] 孟庆军. 四线叠交隧道盾构施工地基变形及控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 911.

MENG Qingjun. Study on the deformation and control of foundation in shield construction of four-line overlapped tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 911.

[3] 崔蓬勃,沈彤,丁睿,等. 软土地层地铁叠交隧道施工加固

- 技术研究[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2019, 19(3): 5.
- CUI Pengbo, SHEN Tong, DING Jian, et al. Study on construction reinforcement technology of metro overlapping tunnel in soft soil layer[J]. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, 2019, 19(3): 5.
- [4] AMADOU J. Three-dimensional numerical study of long-term settlement induced in shield tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 88: 221.
- [5] 杨芝璐, 张孟喜, 肖晓春, 等. 超大直径盾构不同角度下穿对既有地铁隧道的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 112.
- YANG Zhilu, ZHANG Mengxi, XIAO Xiaochun, et al. Analysis on the influence on the existing metro tunnel by super-large shield tunneling underpassing at different angles[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 112.
- [6] 江华, 殷明伦, 江玉生, 等. 深圳地铁盾构隧道近距离上跨既有线引起的结构变形研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 194.
- JIANG Hua, YIN Minglun, JIANG Yusheng, et al. Structure deformation caused by shield tunnel excavation above existing tunnels of Shenzhen Metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 194.
- [7] 包小华, 章宇, 徐长节, 等. 双线盾构隧道施工沉降影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 51.
- BAO Xiaohua, ZHANG Yu, XU Changjie, et al. Factors affecting the settlement of double-line shield tunnel construction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(3): 51.
- [8] 高书通. 地铁交叠并行盾构隧道近接施工数值分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 480.
- GAO Shutong. Numerical analysis of approaching construction of overlapping and parallel subway shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 480.
- [9] DAI C, LONG Y, LYU Y, et al. Research on seepage-stress coupling analyses of shallow buried and dug vertical overlapping tunnels[J]. International Journal of Heat and Technology, 2018, 36(3): 817.
- [10] 中国城市轨道交通协会. 2022 年度中国内地城轨交通线路概况[EB/OL]. (2023-01-01)[2023-02-18]. <https://www.camet.org.cn/xxfb/11509>.
- China Association of Metros. Overview of Chinese mainland urban rail transit lines in 2022[EB/OL]. (2023-01-01)[2023-02-18]. <https://www.camet.org.cn/xxfb/11509>.
- [11] 张晓清, 张孟喜, 李林, 等. 多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1133.
- ZHANG Xiaoqing, ZHANG Mengxi, LI Lin, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1133.
- [12] YAN Q, CHEN H, CHEN W, et al. Vibration response and cumulative fatigue damage analysis of overlapped subway shield tunnels[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(2): 156.
- [13] YANG J, LIU C, CHEN Q, et al. Performance of overlapped shield tunneling through an integrated physical model tests, numerical simulations and real-time field monitoring[J]. Underground Space, 2017, 2(1): 45.
- [14] 胡长明, 郭建霞, 梅源, 等. 盾构同步注浆浆液压力影响因素及扩散机理[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 617.
- HU Changming, GUO Jianxia, MEI Yuan, et al. Influence factors and diffusion mechanism of pressure of shield synchronous grouting slurry[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 617.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [16] 马文辉. 北京地铁双线盾构近距下穿既有盾构区间风险控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- MA Wenhui. Risk control research on double-tube shield tunnel closely-underneath-crossing the existing shield tunnel section in Beijing subway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

(收稿日期: 2022-06-06)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com