

DOI: 10.11779/CJGE20231266

联络通道施工盾构机始发对已建盾构隧道影响试验研究

黄大维^{1,2,3}, 陈后宏^{1,2,3}, 徐长节^{*1,2,3}, 罗文俊^{1,2,3}, 耿大新^{1,2,3}, 刘家璇^{1,2,3}

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学, 江西 南昌 330013;
3. 综合立体交通信息感知与融合江西省重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 盾构法联络通道施工过程中盾构机始发对已建盾构隧道受荷变形影响暂不明确问题, 通过设计 1:10 的缩尺模型试验, 开展了盾构机始发对已建盾构隧道影响试验研究。试验结果表明: 盾构法联络通道施工时, 在盾构机顶推反力作用下, 始发端已建盾构隧道在联络通道位置约 1 倍隧道直径范围内发生了横椭圆变形, 而两端则发生了竖椭圆变形; 盾构隧道发生横断面变形时, 水平直径变形约为竖向直径变形的 3~4 倍; 在联络通道位置约 1 倍隧道直径范围内向顶推反力方向发生了水平挠曲变形, 而在其两侧方向上发生了水平挠曲反弯现象; 竖向挠曲变形趋势与水平挠曲变形相同, 且比水平挠曲变形的幅度小; 联络通道位置约 1 倍隧道直径范围内的水平直径增大导致隧道两侧的水平土压力均增大, 竖向直径减小导致隧道顶部与底部的竖向土压力均减小; 盾构隧道周围的土压力变化是盾构隧道横断面变形与纵向挠曲变形共同作用的结果, 在盾构隧道受力分析过程中建议同时考虑其横断面变形与纵向挠曲变形。

关键词: 联络通道; 盾构隧道; 盾构法施工; 顶推反力; 挠曲变形

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)05-0987-08

作者简介: 黄大维(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下铁道与岩土工程相关的研究与教学工作。E-mail: gddthdw@126.com。

Impact of starting of tunnel boring machine during construction of connecting channel on existing shield tunnels

HUANG Dawei^{1,2,3}, CHEN Houhong^{1,2,3}, XU Changjie^{1,2,3}, LUO Wenjun^{1,2,3}, GENG Daxin^{1,2,3}, LIU Jiaxuan^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Comprehensive Stereoscopic Traffic Information Perception and Fusion, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The impact of starting of tunnel boring machine (TBM) on the deformation of the existing shield tunnels under loads during the construction process of connecting passage by the shield tunneling method is currently unclear. By designing a 1:10 scaled model experiment, the experimental researches on the impact of starting of the TBM on the existing shield tunnels are conducted. The results indicate that, during the construction of connecting passage by the shield tunneling method, under the action of the top pushing reaction force of the TBM, the existing shield tunnels at the starting end undergo horizontal elliptical deformation within a range of about 1 tunnel diameter at the position of connecting passage, while the vertical one occurs at both ends. When a shield tunnel undergoes cross-sectional deformation, the deformation of horizontal diameter is about 3~4 times that of the vertical one. The horizontal bending deformation occurs in the direction of upward pushing reaction force within a range of approximately 1 tunnel diameter at the location of the connecting passage, and the horizontal bending phenomenon occurs on its both sides. The trend of the vertical deflection deformation is the same as that of the horizontal one, and its amplitude is smaller than that of the horizontal deflection deformation. The increase in the horizontal diameter within the range of about 1 times the tunnel diameter at the location of the connecting passage leads to an increase in the horizontal soil pressures at both sides of the tunnel, while the decrease in the vertical diameter leads to a decrease in the vertical soil pressures at both the top and bottom of the tunnel. The variation of soil pressures around the shield tunnel are the result of the combined action of cross-sectional deformation and longitudinal deflection deformation of the shield tunnel. It is recommended to consider both the cross-sectional deformation and the longitudinal deflection deformation in the stress analysis process of the shield tunnel.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078213, 52378398); 江西省主要学科学术和技术带头人领军人才项目(20232BCJ22009); 江西省自然科学基金资助项目(20242BAB26077)

收稿日期: 2023-12-25

*通信作者 (E-mail: xuej@zju.edu.cn)

Key words: connecting channel; shield tunnel; TBM construction; top push reaction force; flexural deformation

0 引言

联络通道作为消防疏散的重要逃生通道,一般设置在两条隧道中间,起联通、排水及防火等作用。作为隧道的辅助结构,一般对联络通道进行矿山法施工,采用冷冻法或注浆技术对土体进行加固。但该方法成本较高、危险系数大、施工期较长,以及存在冻胀和融沉等问题,且铺轨等待时间长,线路工后沉降大^[1-4]。为此近年来,顶管法、盾构法等工艺在国内外开始被运用于联络通道^[5]。但在进行联络通道始发施工时,始发端既有盾构隧道受施工的影响暂不明确;且始发施工过程中,隧道易发生过大变形,从而导致管片接头发生破损。因此联络通道在使用盾构法进行始发施工时,为了使始发施工技术可以更加安全可靠,有必要研究已建隧道在受到联络通道始发施工时的影响因素。

目前,关于联络通道施工对既有盾构隧道的影响因素方面的研究,国内外学者主要还是研究矿山法冻结施工联络通道对既有隧道的影响。对于矿山法施工,以管片结构力学、数值仿真与现场监测等研究手段对隧道进行分析。在管片力学方面,文献[6~8]分析了联络通道施工过程中及管片开洞后管片的受力特征和位移特性。在数值仿真与现场监测方面,文献[9]通过数值仿真研究了各种隧道洞口分析方法,提供了计算隧道洞口周围应力模式库;文献[10~12]建立主隧道与联络通道结构模型,探究联络通道T接隧道建设对主隧道结构的影响;文献[13~15]研究了矿山法施工土体刚度对既有隧道受力与变形的影响;文献[16, 17]采用现场实测数据分析、数值模拟等研究方法对联络通道的冻结温度场和位移场的演化规律进行研究。而对于联络通道机械法施工对已建盾构隧道影响方面,文献[18~20]建立了机械法联络通道T接部位数值计算模型,分析了切削洞口为不同强度的正线隧道的变形及受力情况;文献[21, 22]采用足尺试验研究联络通道机械法施工既有隧道开口过程中管片环的收敛变形与内力重分布;文献[23, 24]现场监测主隧道结构的外荷载、收敛变形,得到在整个施工过程中主隧道的结构响应及其变化规律。综上所述,联络通道采用机械法施工时,将对主隧道产生附加荷载,进而影响已建盾构隧道的变形。然而,现有研究尚未涉及这一问题。

联络通道在使用盾构法进行始发施工时,始发端隧道为掘进机械提供顶推反力,在顶推反力的作用下始发端既有隧道将发生纵横向变形,并与周围地层产生复杂的相互作用。为了研究联络通道盾构法始发施

工对已建隧道的变形影响,本文进行了几何相似比为1:10的模型试验,模拟联络通道盾构法始发施工过程,分析了盾构法始发施工时不同大小的顶推反力对始发端已建隧道的受荷变形影响。

1 模型试验简介

1.1 模型盾构隧道

盾构隧道是由管片环拼装而成的,管片环通过纵缝螺栓连接成一整环管片,因此一整环管片的横向刚度相比均质圆环的横向刚度要小。为了使模型管片环的横向刚度满足要求,原型以上海地铁所采用的通缝拼装隧道,其所用管片环的外径为6.2 m、厚度为0.35 m、幅宽为1.2 m。模型管片环通过钢板卷制而成,采用几何相似比为1:10设计模型管片环的外径与幅宽;得到的模型管片环(图1)外径为620 mm、内径为606 mm,模型管片环的幅宽为120 mm。模型管片环的厚度所采用的相似设计方法与参数计算在参考文献[25]中有详细的说明。

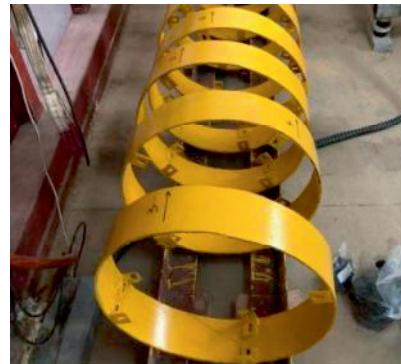


图1 模型管片环

Fig. 1 Model segment rings

盾构隧道是由管片环通过环缝螺栓纵向连接而成的,由于隧道在纵向上存在环缝接头与环缝螺栓,因此其纵向刚度相比均质圆管的要小。为了保证模型隧道的纵向刚度可以满足要求,模型盾构隧道采用螺栓与弹簧通过角码使模型管片环纵向连接,其中螺栓的全长为90 mm,直径为10 mm,安装时使螺栓的预紧力控制在200 N左右;弹簧的全长与直径均为40 mm,压缩刚度为745 N/mm。模型管片环的连接构件、方式与完成拼装的模型隧道如图2所示。对于拼装完成的模型隧道,其纵向刚度通过弹簧压缩刚度进行控制。本次模型试验所用的隧道由31环管片环拼装而成,长度为3720 mm。模型隧道的纵向刚度相似设计方法在参考文献[25]中有具体的介绍。

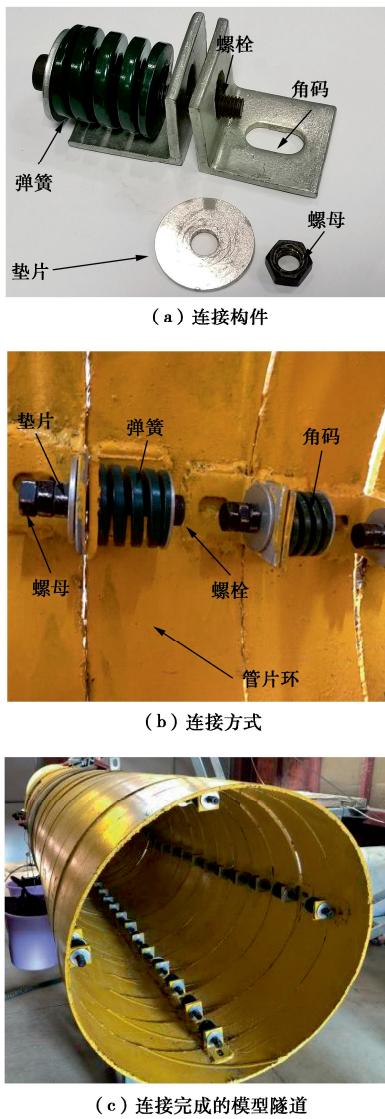


图2 模型隧道拼装

Fig. 2 Assembling of model tunnel

1.2 模型试验装置

模型试验是在长、宽、高分别为4, 3, 3 m的土箱内进行的, 模型隧道放置土箱中, 并用砂土对隧道周围进行填筑, 其中隧道上方的土层厚度为90 cm, 隧道下方的土层厚度为100 cm。土箱内砂土的填筑高度为252 cm, 所用砂土的密度为 1.72 g/cm^3 , 含水率为1.71%, 压缩模量为9.66 MPa。在土箱侧部安装了受拉装置(图3(a)), 受拉装置距土箱底部131 cm。通过手动葫芦对模型隧道施加拉力来模拟始发端已建隧道在联络通道盾构机始发施工时所受到的荷载。

在模型隧道中间所在的管片环(第16环)侧部中间的位置开孔, 并安装钢筋和套上钢管(图3(b)), 试验时通过安装在钢筋上的手动葫芦拉伸钢筋从而来模拟联络通道始发施工时对始发端已建隧道所形成的顶推反力。钢筋末端通过环钩与手动葫芦一端相连, 而手动葫芦另一端则与吊秤一端连接, 吊秤另一端再与受力架端部的环钩连接, 而受力架末端通过脚撑与

土箱相连接。手动葫芦与吊秤通过支撑钢管安装在受力架上来克服自重的影响, 手动葫芦可在受力架上前后移动。手动葫芦拉伸钢筋时, 通过吊秤来读取手动葫芦拉伸钢筋时的受力变化, 再通过钢筋拉动隧道侧部达到模拟联络通道盾构机始发施工时对已建隧道受力变形影响的目的。完成安装的联络通道盾构机始发施工模拟装置如图3所示。

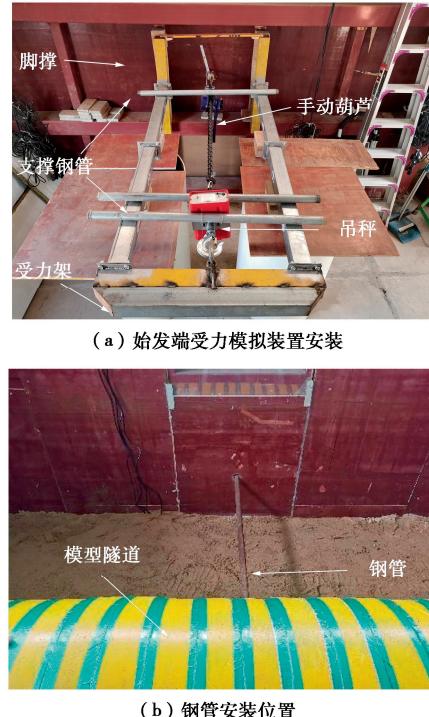


图3 联络通道施工始发模拟装置

Fig. 3 Simulation devices for starting of TBM during construction of connecting channel

在隧道的左右两侧、顶部与底部沿着纵向布设土压力盒来采集隧道周围土体的土压力, 土压力盒布设在距隧道10 cm的位置, 现场具体的布设如图4所示的隧道侧部土压力盒布设。



图4 隧道两侧土压力盒

Fig. 4 Earth pressure cells at both sides of tunnel

土压力盒沿隧道共布设了12处, 为了方便把布设土压力盒的12处位置设为12处断面, 具体布设情况如图5所示(图中“#”代表土压力盒标号)。试验中

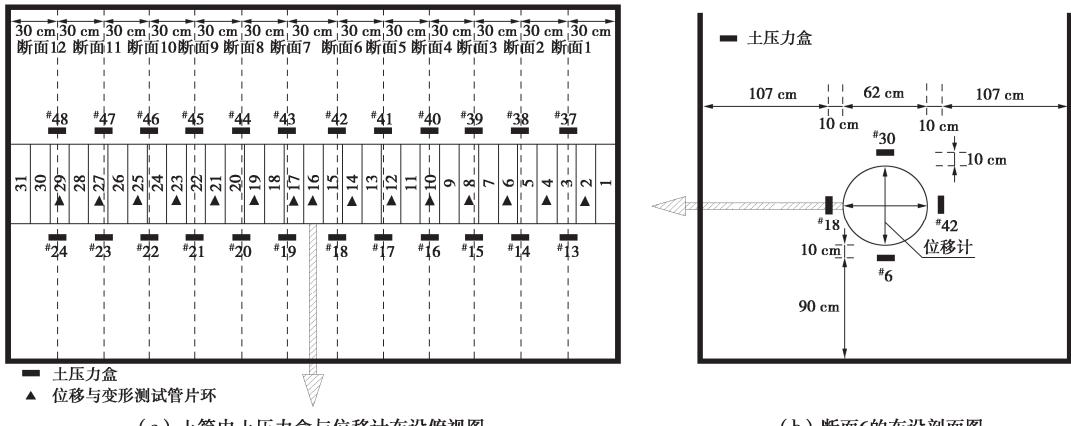


图 5 模型试验测试元件布设示意图

Fig. 5 Layout of elements for model tests

所使用的土压力盒为振弦式土压力盒,其直径、厚度、量程分别为 11.4 cm, 3 cm, 1 MPa。

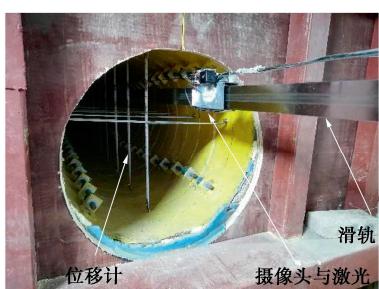


图 6 隧道变形与挠曲量测装置

Fig. 6 Measuring devices for tunnel deformation and deflection

隧道的水平挠曲变形、竖向挠曲变形与横断面变形通过安装在隧道内部的位移计来读取,其布置如图 6 所示。位移计(包括水平位移尺与竖向位移尺)由两根长度适当的尺子组成,尺子的端部与磁铁相连接,通过磁铁把位移尺吸附在钢管片上^[26]。具体的数据读取方法在参考文献[26]中有详细的介绍说明。位移计的布设数量与位置如图 5 中所示的位移与变形测试管片环,共 15 环管片上布设了位移计。

1.3 试验数据采集

试验过程中,通过手动葫芦对钢筋拉伸,每次拉伸通过吊秤来读取当时的受力情况,由于手动转动葫芦对受力的控制难以精确定,每次拉伸后的受力变化不是固定的,只能把每次拉伸后的受力变化控制在 1~2 kN。本次试验拉伸后的最大受力达到 13.4 kN,对隧道纵向与横向变形以及周围土压力共进行 9 次采集试验数据。

2 盾构机始发施工对已建隧道变形影响

2.1 盾构机始发施工对隧道横断面变形影响

图 7 为始发端已建隧道在侧部受到不同大小的顶推反力时,隧道所发生的横断面变形(以隧道水平直径与竖向直径的变形来反映,直径增大为正)。从图 7

(a) 可以看出,随着钢筋不断被拉伸从而导致隧道侧部受到的顶推反力也不断增大,钢筋附近隧道横断面水平直径发生不断增大的变形,最大增大值约为 14 mm;而远离钢筋位置的隧道横断面水平直径则发生不断减小的变形,最大变形的减小值不超过 2 mm。从图 7(b) 中则可知,随着顶推反力的不断增大,隧道中部的竖直径则不断减小,与水平直径发生的变形正好相反,竖直径最大减小值约为 3.4 mm,而隧道两端所发生的竖直径变形则不断增大,最大增大值不超过 0.6 mm。从图 7(a), (b) 也可以看出,隧道的水平直径变形与竖直径变形的影响范围基本相同。

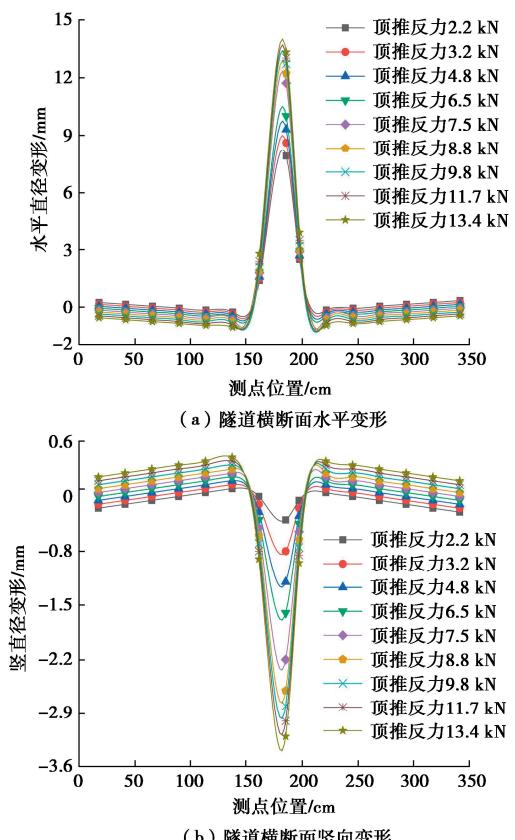


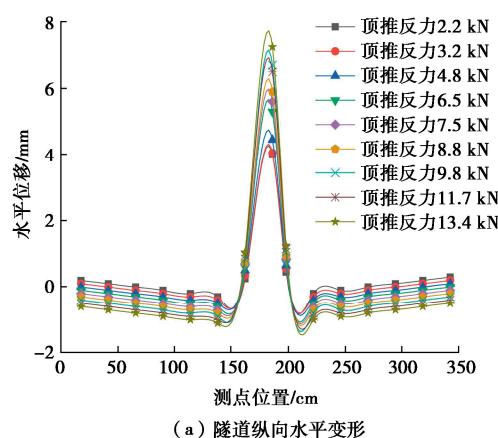
图 7 隧道横断面上所发生的变形

Fig. 7 Deformations of cross-section of tunnel

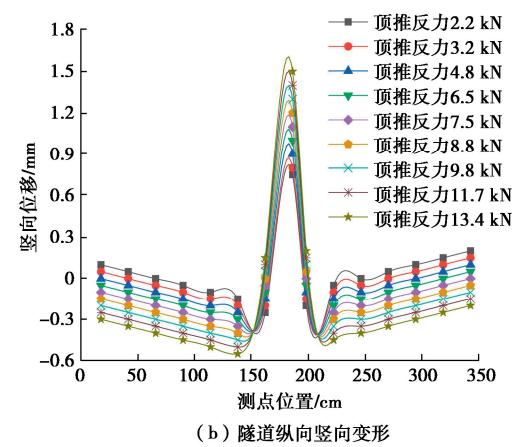
从隧道的横断面变形结果可知, 在钢筋拉伸从而导致隧道侧部受到顶推反力的作用下, 隧道在联络通道位置(隧道中部)约1倍隧道直径范围内发生了横椭圆变形, 而两端则发生了一定的竖椭圆变形。并且从曲线图中可以看出, 在隧道发生横断面变形时, 水平直径变形约为竖向直径变形的3~4倍。在钢筋的拉力作用下, 隧道中部的水平直径增大主要是隧道受力一侧向受力方向的位移大于隧道另一侧的位移; 隧道两端的水平直径减小则是受力与隧道中部的相反, 即隧道受力一侧向受力反方向的位移大于隧道另一侧的位移; 隧道中部的竖向直径减小主要是隧道顶部向下的位移大于隧道底部的位移; 隧道两端的竖向直径增大是隧道顶部向上的位移大于隧道底部的位移。

2.2 盾构机始发施工对隧道纵向变形影响

在盾构机始发施工所产生的顶推反力的作用下, 隧道横向发生了椭圆变形, 在纵向上也发生了挠曲变形。图8为始发端已建隧道在侧部受到不同大小的顶推反力时, 隧道纵向上所发生的挠曲变形。其中隧道的纵向变形以隧道横断面中心发生的水平与竖向位移来表述(水平方向上以向钢筋所在位置产生的位移为正, 竖直方向上以产生向下的位移为正)。从图8(a)可知, 在钢筋受拉所产生的顶推反力作用下, 隧道在水平方向上发生了挠曲变形。隧道在钢筋受拉的位置所发生的水平变形最大, 最大位移值约为7.5 mm, 而在远离钢筋受拉的位置(即隧道两端)则向相反的方向发生了水平变形, 最大位移值约为1.5 mm。从图8(b)则可以看出, 隧道在顶推反力的作用下, 竖直方向上也发生了一定的挠曲变形。隧道在钢筋受拉位置整体稍微呈现向下位移的趋势, 最大位移值约为1.6 mm, 同时隧道在远离钢筋受拉位置则向上发生了稍许位移, 最大位移值约为0.6 mm, 其变形范围与图8(a)所示的水平变形基本一致。



(a) 隧道纵向水平变形



(b) 隧道纵向竖向变形

Fig. 8 Longitudinal bending deformation of tunnel

从隧道在纵向上所发生的变形结果可知, 在盾构机顶推反力作用下, 始发端已建盾构隧道在联络通道位置约1倍隧道直径范围内向顶推反力方向发生了水平挠曲变形, 而在隧道两端则向顶推力方向发生了水平挠曲变形; 因此隧道在顶推反力的作用下形成了水平挠曲反弯现象。隧道在竖向上也发生了一定的挠曲变形, 其变形趋势与水平挠曲变形相同。隧道中部在竖向上发生了向下的挠曲变形, 而两端则是发生了向上的挠曲变形, 但竖向挠曲变形的幅度比水平挠曲变形的幅度要小得多。

3 盾构机始发施工对已建隧道四周土体受力影响

图9为钢筋在受拉过程中产生的顶推反力不断增大时隧道周围土体所受到的附加土压力变化。从图9(a)可知, 联络通道施工盾构机始发时已建隧道受顶推反力一侧受到的压力主要集中在隧道中部约1倍隧道直径范围内(盾构机始发区域), 而隧道在超出始发区域外受盾构机始发施工的影响较小。随着顶推反力的逐渐增大, 隧道在盾构机始发区域内受到的压力也随之增大; 而隧道在远离始发范围仅在顶推反力增大到一定程度时, 在靠近始发区域附近的位置出现了较小波动。由于隧道是埋在砂土中的, 在顶推反力的作用下, 隧道将会与四周土体产生相互作用, 因此在隧道一侧受力时也将导致隧道另一侧受到一定程度的压力, 如图9(b)所示。从图9(a), (b)也可以看出, 隧道两侧的水平土压力变化趋势与范围基本一致。

从图9(c), (d)可以看出, 在顶推反力作用下, 隧道中部区域发生横椭圆变形, 即隧道的水平直径增大, 竖向直径减小, 因此隧道在竖向上受到的压力发生减小。由于隧道竖向直径减小且隧道是处于一定埋深的, 再加上隧道自身重量, 因此隧道顶部的土体发

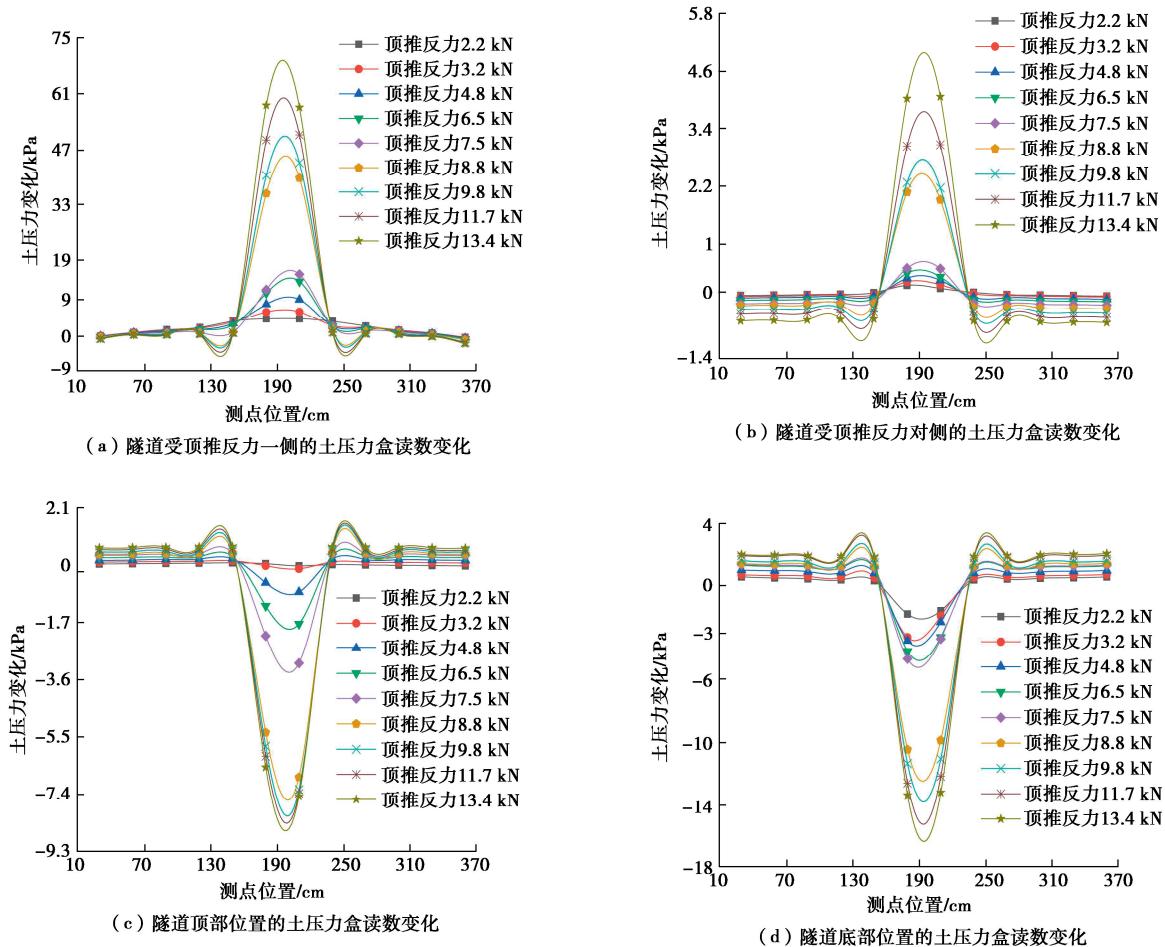


图 9 隧道四周受到的土压力变化

Fig. 9 Change in soil pressure around tunnel

生了一定沉降,由此导致隧道上部土压力减小;而隧道底部土压力出现减小,则是由于隧道底部在顶推反力的作用下产生了一定上移。在盾构机始发区域隧道顶部与底部受到的压力均有减小,而在两端受到的压力均有一定的增大,即隧道中部出现土压力消散向两端转移的现象;其主要原因与隧道在水平方向上受到的顶推反力、隧道自身结构和周围土体有关。

从实测结果来看,在盾构机顶推反力作用下,由于盾构隧道在联络通道位置约1倍隧道直径范围内的水平直径增大,导致隧道两侧的水平土压力均增大,且两侧的水平土压力增量并不相等;其中盾构机始发方向的水平土压力增大幅度比始发反方向的要小得多。隧道竖向上受到的压力也由于竖直径的减小而不相等(在盾构机始发区域内隧道底部受到的压力减小量要大于隧道顶部受到的压力减小量)。结合隧道的变形可知,在联络通道位置隧道受顶推反力对侧的土压力与底部的土压力应该出现减小,而实测数据却出现增大的现象,这与隧道在发生纵向挠曲变形的同时,也发生了横断面变形有关。

通过上述隧道变形与周围土压力的分析可知,在

不同大小的顶推反力作用下,隧道在纵向上发生弯曲变形的同时,在横向上也将发生断面变形,并与周围地层产生复杂的相互作用力。因此在荷载作用下隧道所发生的水平直径变形与竖直径变形不相等时,隧道水平两侧受到的压力变化量也将不相等,且隧道竖向上受到压力变化量也不相等。这也就说明,外部荷载影响下盾构隧道周围土体受到的土压力是隧道横断面变形与纵向挠曲变形共同作用的结果,因此在对既有隧道进行受力变形分析时,需要同时考虑隧道的纵向与横断变形。

4 结 论

(1) 盾构法联络通道始发施工时,在盾构机顶推反力作用下,始发端既有盾构隧道在联络通道位置约1倍隧道直径范围内发生了横椭圆变形,而在两端则发生了竖椭圆变形。盾构隧道发生横断面变形时,水平直径变形约为竖向直径变形的3~4倍。

(2) 在盾构机顶推反力作用下,始发端既有盾构隧道在联络通道位置约1倍隧道直径范围内向顶推反力方向发生了水平挠曲变形,而在其两侧方向上发生

了水平挠曲反弯现象。在竖向上也发生了一定的挠曲变形, 其趋势与水平挠曲变形相同, 但竖向挠曲变形的幅度比水平挠曲变形的幅度要小得多。

(3) 在盾构机顶推反力作用下, 由于盾构隧道在联络通道位置约1倍隧道直径范围内的水平直径增大, 导致隧道两侧的水平土压力均增大, 其中盾构机始发方向的水平土压力增大幅度比始发反方向的水平土压力要小得多; 而由于隧道竖向直径减小, 导致隧道顶部与底部的竖向土压力均减小。

(4) 试验结果表明, 外部荷载影响下盾构隧道周围土体受到的土压力是隧道横断面变形与纵向挠曲变形共同作用的结果; 盾构隧道作为管状结构, 在进行受力分析过程中建议同时考虑隧道的纵向与横断面变形。

参考文献:

- [1] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (ZHU Hehua. Underground Building Structure[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 周顺华, 毛坚强, 王炳龙, 等. 城市轨道交通地下工程计算与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (ZHOU Shunhua, MAO Jianqiang, WANG Binglong, et al. Computational and Analytical Methods in Urban Rail Transit Underground Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese))
- [3] LI Z L, SOGA K, WRIGHT P. Long-term performance of cast-iron tunnel cross passage in London clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 152-170.
- [4] SAINI R G, UNIYAL I. Construction of a cross-passage for a twin tunnel system for Delhi Metro's CC-27 Project[J]. TAI Journal, 2017, 6(1): 15-20.
- [5] 朱瑶宏, 王靖禹, 董子博, 等. 盾构法联络通道密封垫设计及防水试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(1): 110-118. (ZHU Yaohong, WANG Jingyu, DONG Zibo, et al. Design of sealing gasket of connection gallery bored by shield and its waterproofing test[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 110-118. (in Chinese))
- [6] 刘军, 贺美德, 宋旱云. 联络通道施工盾构管片力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 271-275. (LIU Jun, HE Mei-de, SONG Han-yun. Mechanical behaviors of shield tunnel segments due to construction of connecting passages [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 271-275. (in Chinese))
- [7] ATZL G, SORANZO E, MIHAYLOV V, et al. Special segments at the cross passages in the Filder Tunnel-Interpretation of the data from monitoring segments[J]. Geomechanics and Tunnelling, 2017, 10(2): 160-176.
- [8] 段俊萌. 盾构隧道联络通道施工管片力学响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (DUAN Junmeng. Study on Mechanical Response of Segment in Construction of connecting Passage of shield Tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [9] SPYRIDIS P, BERGMESTER K. Analysis of lateral openings in tunnel linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 376-395.
- [10] HAN L, YE G L, LI Y H, et al. In situ monitoring of frost heave pressure during cross passage construction using ground-freezing method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3): 530-539.
- [11] 胡心舟. 不均匀变形对联络通道喇叭口应力的数值分析[J]. 四川建材, 2020, 46(2): 92-93, 96. (HU Xinzhou. Numerical analysis on the stress of the cross passage bell-mouth by uneven deformation[J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(2): 92-93, 96. (in Chinese))
- [12] 张崇, 牛帅, 姜鹏, 等. 联络通道施工对隧道T接结构的受力影响研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(5): 64-70. (ZHANG Chong, NIU Shuai, JIANG Peng, et al. Study on the influence of connecting passage construction on the stress of T-junction structure[J]. Modern Urban Transit, 2023(5): 64-70. (in Chinese))
- [13] SHEN K J, WAN S, ZHANG X C. Effect of cross passage construction on the structural safety of collapse reinforcement segment of existing tunnel[J]. Advanced Materials Research, 2013, 779/780: 538-543.
- [14] LI Z L, SOGA K, WRIGHT P. Three-dimensional finite element analysis of the behaviour of cross passage between cast-iron tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(6): 930-945.
- [15] STRAUSS A, PAPAKONSTANINO S. Cross passages in soil-ground freezing, segment application, excavation and displacement monitoring for segmental lining[J]. Geomechanics and Tunnelling, 2013, 6(5): 494-499.
- [16] 陈冠任, 李栋伟, 陈军浩, 等. 富水地层地铁超长联络通道冻结位移场演化规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 3000-3013. (CHEN Guanren, LI Dongwei, CHEN Junhao, et al. Evolution law of freezing displacement field in ultra-long connected aisle in water-rich stratum[J].

- Journal of Railway Science and Engineering, 2023, **20**(8): 3000-3013. (in Chinese))
- [17] 夏才初, 方杭楠, 赵昊楠, 等. 富水软土地层联络通道冻结温度场分布规律[J]. 地下空间与工程学报, 2023, **19**(4): 1339-1350. (XIA Caichu, FANG Hangnan, ZHAO Haonan, et al. Distribution law of freezing temperature field in connecting channel of water rich soft soil layer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, **19**(4): 1339-1350. (in Chinese))
- [18] 邓建林, 何寨兵, 李海波, 等. 盾构法联络通道 T 接部位受力特性测试研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, **35**(6): 22-27. (DENG Jianlin, HE Zhaibing, LI Haibo, et al. Field measurement on the mechanical characteristics of the T-type intersection during the construction of shield-driven cross passage[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2022, **35**(6): 22-27. (in Chinese))
- [19] 王 儒, 翟五洲, 倪海波, 等. 盾构隧道机械法联络通道破洞施工中管片衬砌洞门结构力学响应的数值模拟研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, **43**(增刊 1): 178-188. (WANG Ru, ZHAI Wuzhou, NI Haibo, et al. Numerical simulation on mechanical response of tunnel portal with segment lining in mechanized construction of cross passage of shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, **43**(S1): 178-188. (in Chinese))
- [20] 张付林, 刘正好, 朱瑶宏, 等. 机械法联络通道 T 接部位受力特性及弱化分析[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊 2): 116-119. (ZHANG Fulin, LIU Zhenghao, ZHU Yaohong, et al. Stress characteristics and weakening analysis of T-joint of connection passage by mechanical excavation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S2): 116-119. (in Chinese))
- [21] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, **40**(1): 9-18. (ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Full-scale experimental study on structural mechanism of T-connected tunnel constructed by shield method[J]. Tunnel Construction, 2020, **40**(1): 9-18. (in Chinese))
- [22] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 顶管法 T 接隧道结构受力足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(9): 1392-1401. (ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Full-scale experimental study on structural mechanism of T-connected tunnel constructed by pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(9): 1392-1401. (in Chinese))
- [23] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力现场试验研究: 以宁波轨道交通 3 号线联络通道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(11): 1759-1768. (ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on Ningbo metro line No. 3[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(11): 1759-1768. (in Chinese))
- [24] 丁剑敏, 董子博, 莫振泽, 等. 顶管法 T 接隧道现场试验研究分析[J]. 隧道建设(中英文), 2020, **40**(1): 28-34. (DING Jianmin, DONG Zibo, MO Zhenze, et al. Field experimental study on T-connected tunnel with pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 2020, **40**(1): 28-34. (in Chinese))
- [25] 黄大维, 徐长节, 罗文俊, 等. 考虑横向与纵向刚度相似的模型盾构隧道设计方法[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(11): 2299-2307. (HUANG Dawei, XU Changjie, LUO Wenjun, et al. Design method for shield tunnel model considering similarities of transverse and longitudinal rigidities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(11): 2299-2307. (in Chinese))
- [26] 黄大维, 陈后宏, 徐长节, 等. 联络通道施工盾构机接收对已建盾构隧道影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(4): 784-793. (HUANG Dawei, CHEN Houhong, XU Changjie, et al. Experimental study on the influence of shield machine reception on the existing shield tunnel in connecting channel construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(4): 784-793. (in Chinese))