

DOI: 10.11779/CJGE20221455

联络通道施工盾构机接收对已建盾构隧道影响试验研究

黄大维^{1,2}, 陈后宏^{1,2}, 徐长节^{*1,2}, 封坤³, 耿大新^{1,2}

(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. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 联络通道机械法施工中盾构机接收对已建盾构隧道受荷变形影响机制暂不明确问题, 通过设计 1:10 的缩尺模型试验, 开展了联络通道机械法施工中盾构机接收对已建盾构隧道影响试验研究。试验结果分析表明: 联络通道机械法施工时, 盾构机开挖面附加水平土压力将导致接收端已建盾构隧道对侧的土压力在中部有显著的增大, 而两端则减小, 即导致顶推对侧发生了水平被动土拱现象; 在中间附加水平土压力作用下, 隧道在中间发生了显著的竖椭圆变形, 而在两端则发生了一定的横椭圆变形; 隧道中间发生竖椭圆变形对上下地层形成挤压, 在竖向上同样形成了被动土拱现象; 隧道纵向挠曲变形时出现了一定的反弯现象。盾构隧道作为地层中的管状结构物, 在地层中纵向变形分析时需要考虑横断面变形的影响。

关键词: 联络通道; 盾构隧道; 机械法施工; 附加土压力; 挠曲变形

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0784-10

作者简介: 黄大维(1984—), 男, 博士, 副教授, 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。

Experimental study on influences of shield machine reception on existing shield tunnels during construction of connecting channels

HUANG Dawei^{1,2}, CHEN Houhong^{1,2}, XU Changjie^{1,2}, FENG Kun³, GENG Daxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-Mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The influence mechanism of shield machine reception on the deformation of the existing shield tunnels under loads during the mechanical construction of connecting channels is not clear. By designing the scale model tests of 1:10, the influences of shield machine reception on the built shield tunnels during the mechanical construction of connecting channels are investigated. The analysis of the test results shows that during the mechanical construction of connecting channels, the additional horizontal earth pressures on the excavation face of the shield machine cause the earth pressures on the opposite side of the built shield tunnels at the receiving end to increase significantly in the middle, while decreasing at both sides. That is to say, the horizontal passive soil arching occurs at the opposite side of the jacking. Under the action of the additional horizontal earth pressures in the middle, the tunnel has a significant vertical elliptical deformation in the middle. At both sides, a certain transverse elliptical deformation occurs. The vertical elliptical deformation in the middle of the tunnel compresses the upper and lower strata, and also forms the passive soil arching phenomenon vertically. A certain reverse bending phenomenon occurs during the longitudinal deflection of the tunnel. As a tubular structure in the strata, the shield tunnel needs to consider the influences of the cross-section deformation when analyzing the longitudinal deformation in the strata.

Key words: connecting channel; shield tunnel; mechanical construction; additional earth pressure; flexural deformation

0 引言

为了满足地铁区间盾构隧道消防疏散要求, 两条单线区间隧道应设联络通道, 相邻两个联络通道之间的距离不应大于 600 m。地铁区间盾构隧道长度一般

在 1000 m 以上, 因此联络通道是连接两条单洞单线

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078213, 52378398, 52238009);
江西省主要学科科学技术带头人领军人才项目(2023BCJ22009)

收稿日期: 2022-11-23

*通信作者(E-mail: xuej@zju.edu.cn)

地铁盾构隧道不可或缺的附属结构。由于目前普遍采用的矿山法联络通道施工技术存在工期长、开挖风险大、冻胀融沉等问题^[1-4], 近年来国内外开始探索机械法联络通道施工技术(即采用顶管法或盾构法施工联络通道)^[5], 但施工过程中对已建盾构隧道的受荷变形影响机制暂不明确, 其控制基准也暂无依据。联络通道机械法施工控制不当易导致隧道变形过大、接头破损, 甚至结构失稳而诱发工程事故。因此为了促进联络通道机械法施工技术的发展, 有必要探明联络通道机械法施工接收过程中已建盾构隧道的受荷变形影响。

目前, 在联络通道施工对已建盾构隧道影响方面的研究中, 主要为联络通道矿山法施工, 基本为数值仿真分析与现场测试结果分析。在数值仿真分析方面, 如文献[6~9]分析了矿山法施工对隧道内力与变形的影响; 文献[10~12]分析了联络通道与盾构隧道的连接部位的内力影响; 文献[13, 14]分析了矿山法施工对地层的影响。在现场监测结果分析方面, 文献[15, 16]对隧道进行了变形监测; 文献[17, 18]对联络通道洞门管片拆除过程中管片局部应力进行了监测与分析。而在机械法施工的研究中, 主要为土体附加应力与已建隧道受力变形方面。在盾构掘进引起的土体附加应力方面, 文献[19]在考虑土拱效应的基础上, 采用弹性带圆孔平板受内压平面应变模型求解土体在注浆压力作用下的应力解析公式; 文献[20]对不同上部建筑荷载对刀盘正面推力以及盾壳摩擦力引起的土体附加应力的分布规律的影响进行分析。对于已建盾构隧道的受力影响方面, 文献[21, 22]采用7环管片错缝拼装, 在四周用千斤顶加载模拟土压力, 试验研究了已建盾构隧道开口过程中管片环的收敛变形与内力重分布, 分析表明, 内支撑拆卸对导致已建隧道内力形成二次重分布不可忽略; 文献[23]对宁波地铁盾构法联络通道施工进行了现场测试, 结果表明, 联络通道施工机械始发顶推力与接收附加荷载对已建盾构隧道影响明显; 文献[24]对无锡地铁顶管法联络通道施工进行了现场测试, 认为联络通道施工时对已建盾构隧道的主要影响因素有盾构推力与内撑顶力。综上所述, 联络通道机械法施工接收前对接收端盾构隧道形成附加荷载, 并直接关系到联络通道施工对已建盾构隧道的受荷变形影响, 而现有研究暂未涉及。

联络通道机械法施工时, 由于刀盘对开挖面形成水平附加荷载, 因此掘进机械接近接收端盾构隧道时对隧道产生附加荷载, 由此导致接收端已建隧道发生纵向挠曲变形与横断面变形, 并使隧道与周围地层形

成相互作用。为了进一步探明联络通道机械法施工过程中对接收端已建隧道受荷变形影响, 本文通过设计1:10的缩尺模型试验开展研究, 成果为促进联络通道机械法施工进一步推广应用具有一定的意义。

1 模型试验简介

1.1 模型管片环设计

以南昌地铁盾构隧道所用管片为原型设计模型管片环, 原型管片环的外直径、中心直径、内直径分别为6.0, 5.7, 5.4 m; 管片厚度为0.3 m, 幅宽为1.2 m。设计采用的几何相似比为1:10, 模型管片环厚度根据相似设计理论及设计方法^[25]有

$$C_t = \sqrt[3]{C_1^4 / C_E} \quad (1)$$

式中: C_t 为模型管片环厚度的相似常数, 即原型与模型管片厚度的比值; C_1 为几何相似常数, 取10; C_E 为模型管片环材料弹性模量的相似常数, 即原型与模型管片材料弹性模量的比值。

模型管片环为钢板卷制而成的修正均质圆环模型。钢板和C55混凝土的弹性模量分别为206.0 GPa和35.5 GPa, 根据式(1)得到 C_t 为38.715, 模型管片环的理论厚度为7.749 mm(不考虑管片环横向刚度折减)。而在实际加工模型管片环时, 采用标识厚度为5 mm, 实测厚度约为4.6 mm的钢板。通过抗弯刚度 EI 与管片厚度 t 的三次方成正比, 可知当模型管片环的厚度为4.6 mm时, 与理论厚度比值为(4.6/7.749); 由此可知在模型管片环理论厚度为7.749 mm时, 其刚度有效率为1, 当模型管片环厚度为4.6 mm时, 刚度有效率 η 为

$$\eta = \left(\frac{4.6}{7.749} \right)^3 = 0.209187877 \approx 0.21 \quad (2)$$

根据文献[26], 足尺试验中4个不同加载阶段得到的管片环横向刚度有效率分别为0.415, 0.212, 0.103, 0.072, 因此对于均质圆环模型, 横向刚度有效率取0.21是可行的。

通过半径取值方法^[27], 采用几何相似比为1:10得到模型管片环的中心直径为570 mm, 对应的外直径为574.6 mm, 为了方便加工外直径取575 mm。因此, 加工好的模型管片环外直径为575 mm, 厚度为4.6 mm, 幅宽为120 mm。

为了测试模型管片环的强度, 对其进行了加载试验(如图1所示), 试验每次加载2 kg(即19.6 N), 共加载25次, 测量得到的管片环各测点位移如图2所示。根据圆环在集中力作用下的变形分析(如图3所示), 得到横向刚度计算公式

$$\begin{aligned}(EI)_{\Delta_1} &= \frac{FR^3}{4\pi\Delta_1}(\pi^2 - 8) \\ &= 0.1488 \frac{FR^3}{\Delta_1}, \quad (3) \\ (EI)_{\Delta_2} &= \frac{FR^3}{4\pi\Delta_2}(4 - \pi) \\ &= 0.0683 \frac{FR^3}{\Delta_2}.\end{aligned}\quad (4)$$

式中： EI 为圆环横向刚度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)； F 为集中荷载 (kN)； R 为圆环外半径 (m)； Δ_1 为竖向变形； Δ_2 为平均水平变形 (m)。

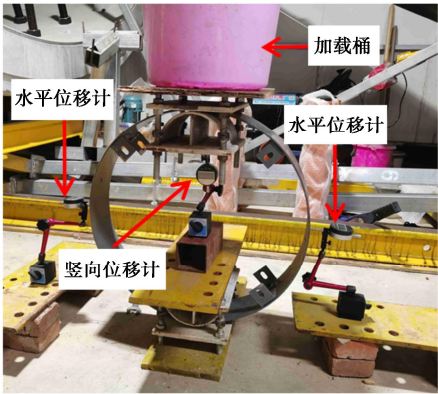


图 1 模型管片环强度测试

Fig. 1 Strength tests on model segment ring

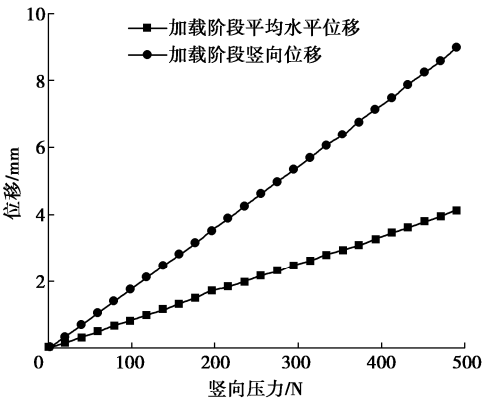


图 2 管片环对压试验的变形位移

Fig. 2 Deformations and displacements of counter pressure tests on segment ring

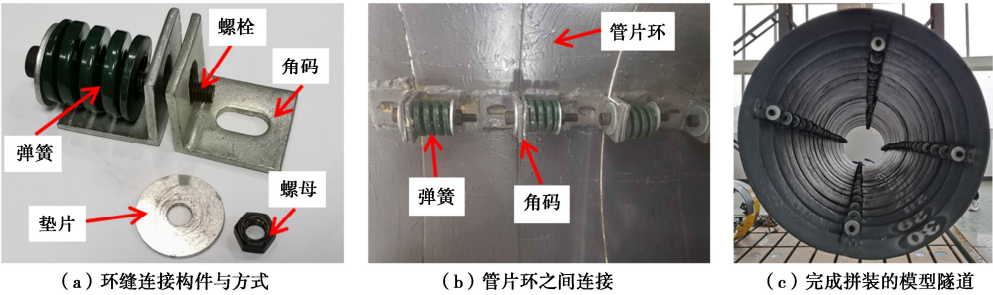


图 4 模型管片环连接

Fig. 4 Connection of model segment ring

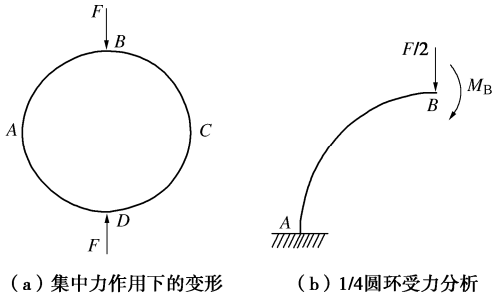


图 3 圆环在集中力作用下的变形分析

Fig. 3 Deformation analysis of ring under concentrated force

结合管片环对压试验的变形实测数据,根据式(3)反算得出管片环的平均横向刚度为 $0.1961 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$, 根据式(4)反算得出管片环的平均横向刚度为 $0.1921 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$, 其平均横向刚度为 $0.1941 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 。钢板的弹性模量为 206.0 GPa , 模型管片环横向截面的惯性矩为 $9.7336 \times 10^{-10} \text{ m}^4$, 因此模型管片环的理论横向刚度为 $0.2005 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 。由此可见, 所加工的模型管片环刚度与理论设计非常接近, 稍有差异主要与钢材的成分及加工工艺有关。

1.2 模型盾构隧道

模型盾构隧道是由 32 环管片环拼接而成, 全长 3 840 mm。管片环之间均匀间隔设置 4 个环缝接头, 通过螺栓和弹簧纵向连接来模拟环缝连接螺栓的纵向弹性, 其构造如图 4 (a) 所示; 其中螺栓的长度 90 mm, 直径 10 mm, 弹簧直径与长度均为 40 mm, 压缩刚度约为 745 N/mm ; 角码厚度为 5 mm, 边长为 50 mm, 开孔宽度为 13 mm, 开孔长度为 25 mm。管片的连接方式如图 4 (b) 所示, 安装时所有螺栓预紧力约为 200 N。拼装完成的模型隧道如图 4 (c) 所示。

采用简支梁法测试模型隧道的纵向刚度, 分析在受到集中荷载作用时的竖向挠曲变形。基于试验场地限制, 试验的模型隧道长 3240 mm (即 27 环管片环拼装而成), 隧道两端支座间的距离为 26 环管片的距离 (即 3120 mm); 并在隧道底部布设了 7 个用于测量隧道纵向挠曲变形的位移计, 模型试验示意图如图 5 所示。图中 G 为加载重力; 室内试验如图 6 所示。

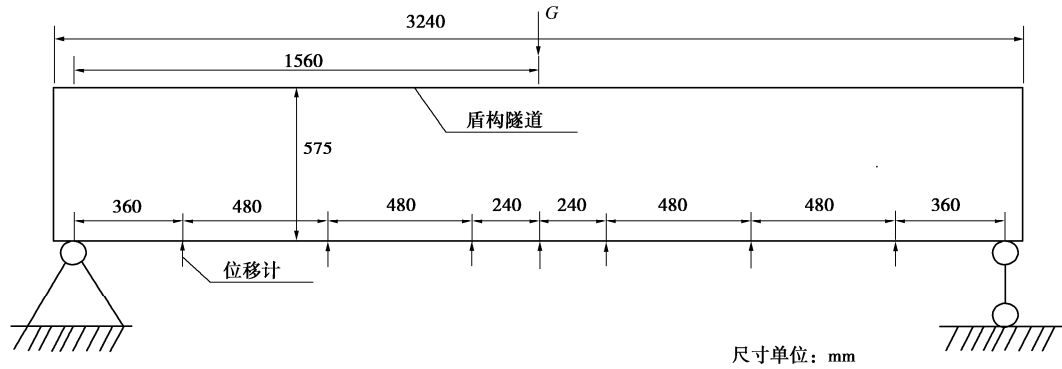


图5 模型隧道刚度测试示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stiffness tests on model tunnel

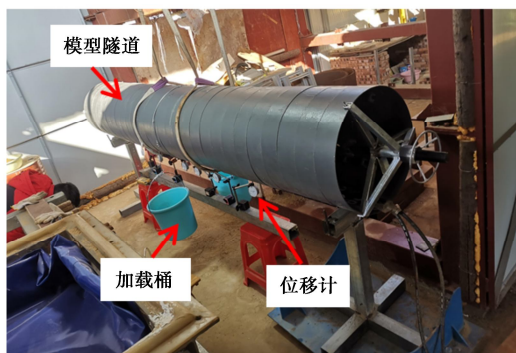


图6 模型隧道刚度测试

Fig. 6 Stiffness tests on model tunnel

简支梁跨中在受集中荷载时，最大挠曲位移与纵向刚度之间的关系为

$$\Delta_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (5)$$

式中： Δ_{\max} 为最大挠曲位移，即试验中的最大竖向位移（mm）； F 为简支梁跨中集中荷载，即加载桶中放入细砂的重量（N）； l 为简支梁两支点间的距离（mm）； EI 为简梁的纵向刚度（ $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ）。

试验每次加载 10 kg（为了方便加载，采用称量好的细砂放入加载桶内），共加载 5 次，测量得到的隧道各测点竖向位移如图 7 所示，采用实线表示。以加载 50 kg 时中间测点的竖向位移作为均匀简支梁的中点竖向挠曲变形，通过式（5）反算得到简支梁的纵向刚度 EI_0 为 $17.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。以 EI_0 计算得到不同加载时均匀简支梁的竖向挠曲变形，采用虚线表示，同一加载级采用的图例符号相同。从图 7 实测与反算结果，可以看出：模型盾构隧道的竖向位移实测值与对应的均匀简支梁的反算值并不完全重合，由此说明，由环缝连接而成的盾构隧道在纵向挠曲变形过程中表现为一定的非线性特性。并且模型隧道与均匀简支梁的竖向位移相差也较大，这是因为模型隧道受力较小时，加载

的作用被螺栓预紧力所抵消，所以模型隧道在逐级加载过程中，由于螺栓预紧力的存在，导致隧道的纵向挠曲变形整体偏小。

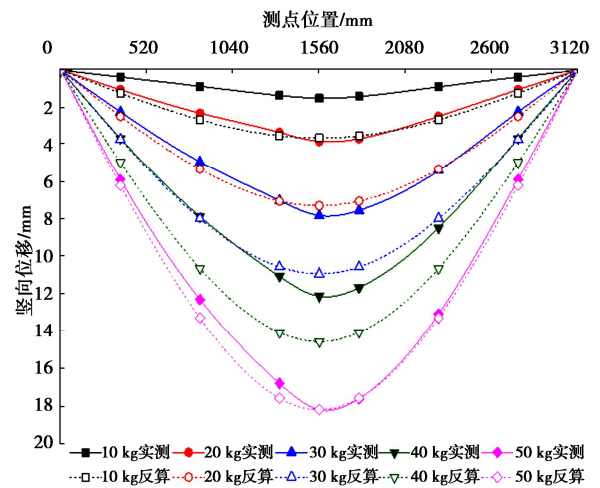


图7 实测与反算得到的竖向位移

Fig. 7 Vertical displacements obtained from actual measurement and back calculation

1.3 试验方案

模型试验是在 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的土箱内进行的，土箱内填土分为 3 层，第一层为 40 cm 厚的砂层，第二层为 60 cm 厚的橡胶粒层，第三层为 140 cm 厚的砂层。砂层所用砂子的含水率为 1.71%，密度为 1.72 g/cm^3 ，压缩模量为 9.66 MPa。模型隧道埋置在橡胶粒层，且隧道底部距土箱底部 40 cm，橡胶粒层用来模拟机械法联络通道在软土地层进行施工，并且橡胶粒的密度为 1.12 g/cm^3 ，压缩模量为 1.33 MPa。

模型试验时通过安装在反力架上的千斤顶顶推钢筒来模拟盾构机施工在已建隧道接收端所形成的附加荷载（如图 8（a）所示），钢筒的直径为 30 cm，钢筒距离隧道侧部 65 cm（如图 8（b）所示）。试验过程中，通过千斤顶对钢筒进行顶推，每顶推 4 cm 后对隧道周

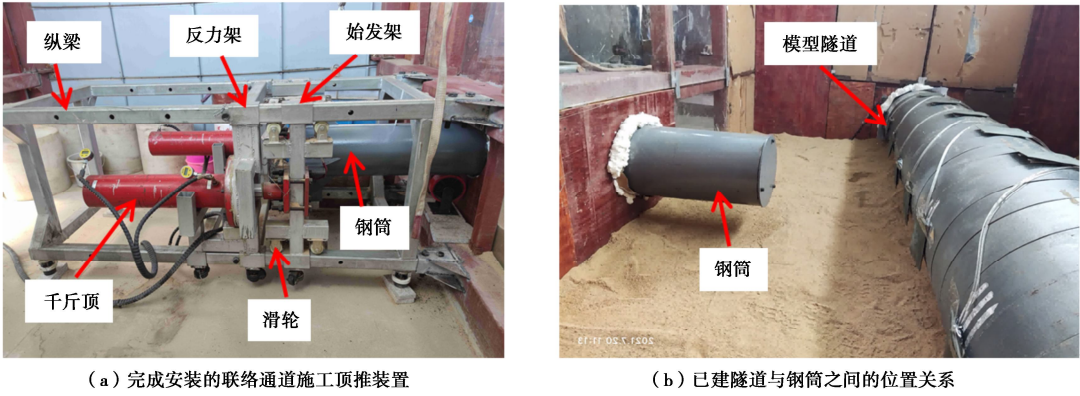


图 8 接收端顶推模拟装置
Fig. 8 Receiver push-back simulation devices

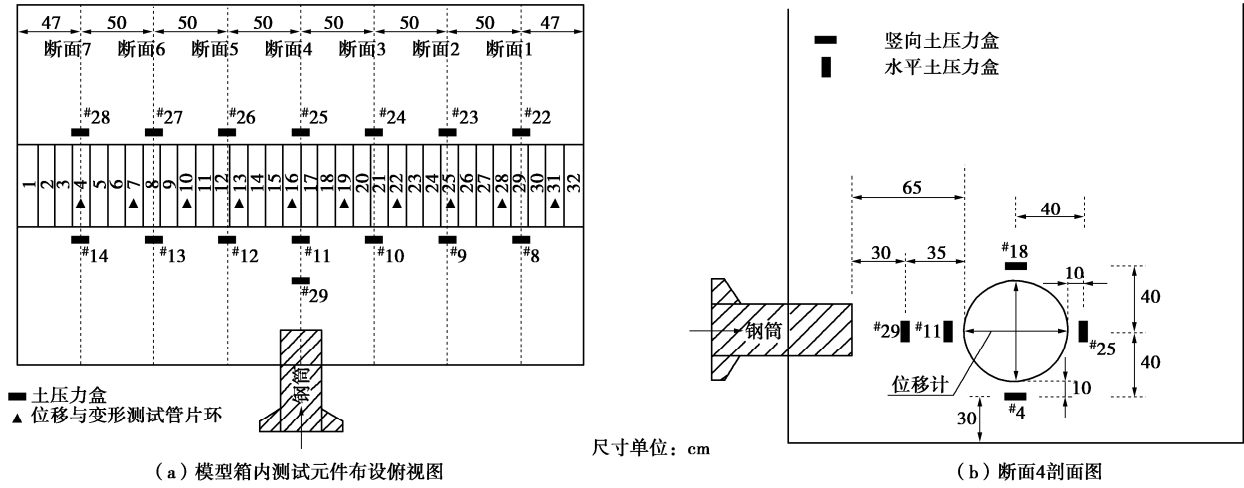


图 9 隧道周围土压力盒与位移计布设示意图
Fig. 9 Layout of earth pressure cells and displacement meters around tunnel

围土压力以及隧道变形进行试验数据采集,顶推 6 次,共 24 cm。

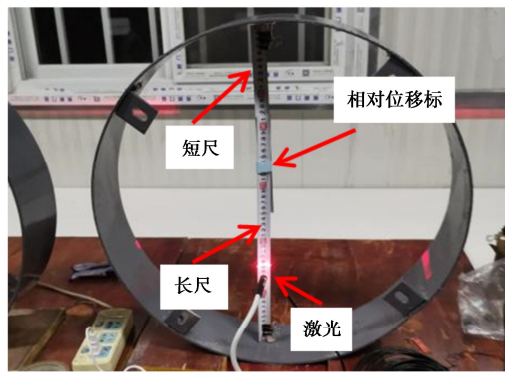
为了测量隧道四周的土压力,通过在隧道四周布设土压力盒来监测施工时的土体压力变化;土压力盒沿隧道上下左右 4 个方位布置,布设的土压力盒离隧道 10 cm。土压力盒布置了 7 个断面,并在靠近顶推装置 30 cm 处布设了 29 号土压力盒,具体布设如图 9 所示。土压力盒直径为 114 mm,厚度为 30 mm,为轴压振弦式土压力盒,其中隧道底部土压力盒布设如图 10 所示。

通过使用量测尺及摄像头来采集隧道的横断面变形及挠曲变形,其构造如图 11 所示,其中测量尺(包括水平测量尺与竖向测量尺)由卷尺剪成合适长度的两根尺子(长尺与短尺)组成,尺子一端与磁铁连接,并吸附在钢管片上;在短尺上粘贴相对位移标,当隧道发生横断面变形时,通过读取相对位移标在长尺上的读数变化即可获取隧道断面变形。通过不动的“一”

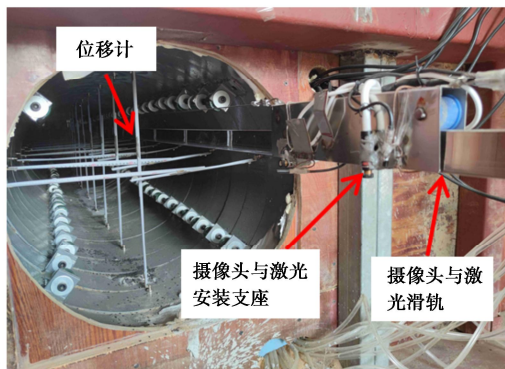
字激光照到长尺上,当隧道发生挠曲时即可读取隧道长尺的磁铁端变形量,从而计算出隧道的挠曲变形。具体的量测尺布置数量与位置如图 9(a) 所示。



图 10 隧道底部土压力盒
Fig. 10 Earth pressure cells at tunnel bottom



(a) 隧道变形与挠曲量测尺



(b) 隧道变形与挠曲量测装置

图 11 模型试验相关测量装置

Fig. 11 Measuring devices for model tests

2 联络通道施工盾构机接收对已建隧道周围土压力影响

图 12 为千斤顶顶推钢筒方向上的水平土压力变化 (为图 9 (b) 中所示的#29、#11、#25 土压力盒实测结果)。从图 12 中可以看出, 随着钢筒向前顶推, #29 土压力盒的土压力增长最大, 其次分别为#11 土压力盒与#25 土压力盒, 土压力近似线性增加。因水平土压力逐渐向周围扩散, 所以#11 土压力盒要明显小于#29 土压力盒, 而#25 土压力盒位于顶推钢筒的对侧, 因模型隧道的一定隔离作用, 在钢筒向前顶推过程中, 其土压力增长相对#29、#11 土压力盒要小得多。

图 13 为侧部水平荷载增长过程导致隧道周围的土压力变化。从图 13 (a) 可以看出, 机械法施工时隧道接收侧受力主要集中在隧道中部 (接收口), 隧道两端 (远离接收口) 受到的压力远小于隧道中部; 随着顶推距离的增大, 隧道中部受到的土压力逐渐增大, 而隧道两端受到的土压力变化波动较小, 在图中各测点基本重合, 且所示曲线基本为一条水平直线。由于隧道处于一定埋深的橡胶粒层, 隧道在受到钢筒的顶推力时, 会与地层产生相互作用, 由此导致隧道顶推

对侧的土压力也发生了显著的变化, 如图 13 (b) 所示。隧道顶推对侧的土压力在中部有显著的增大, 而两端则减小, 即在顶推作用下隧道发生水平挠曲变形, 由此导致顶推对侧发生了水平被动土拱现象。

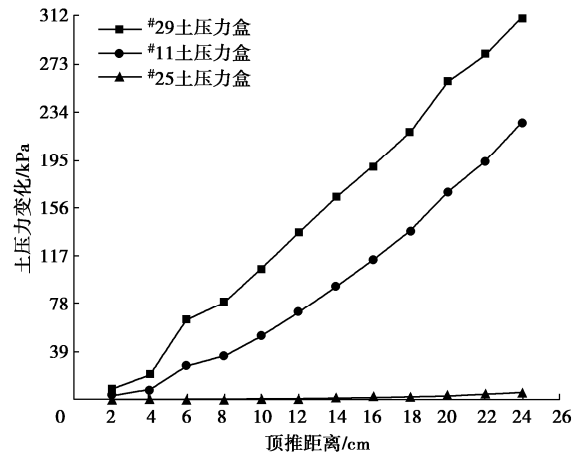
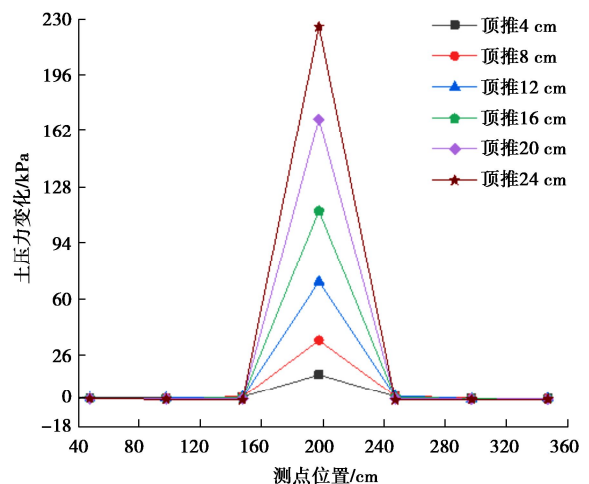
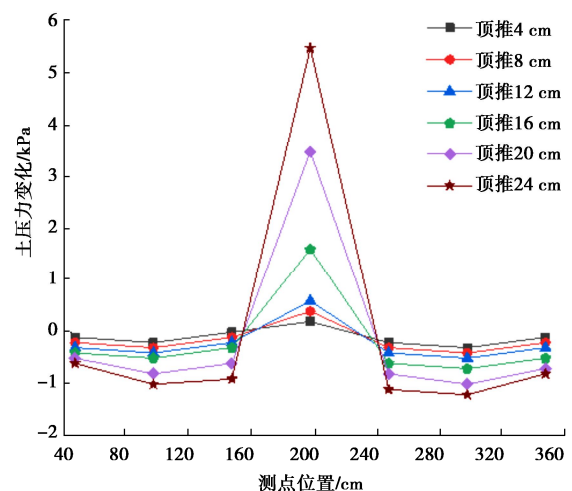


图 12 顶推方向土压力变化

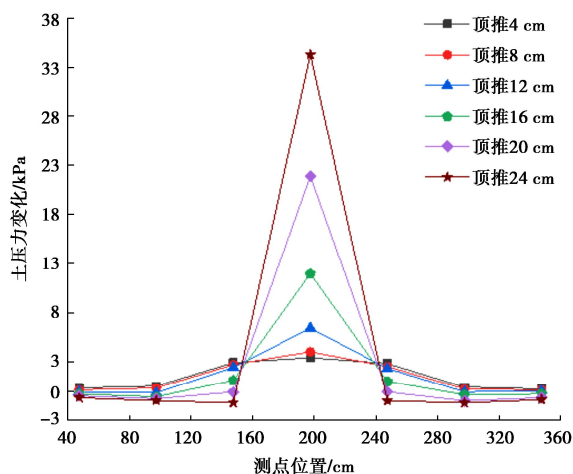
Fig. 12 Change of earth pressure in thrusting direction



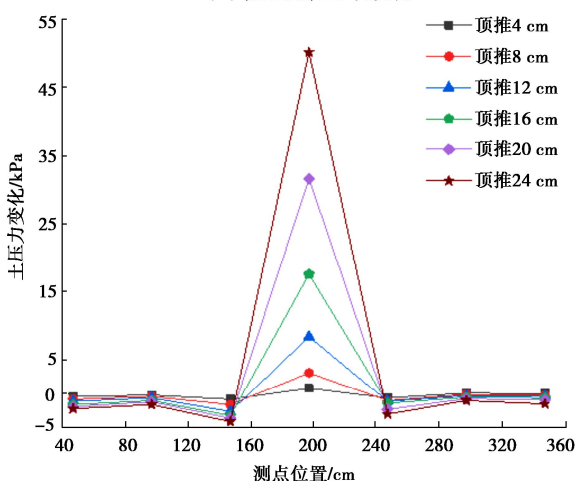
(a) 隧道靠近顶推一侧土压力变化



(b) 隧道顶推对侧土压力变化



(c) 隧道顶部土压力变化



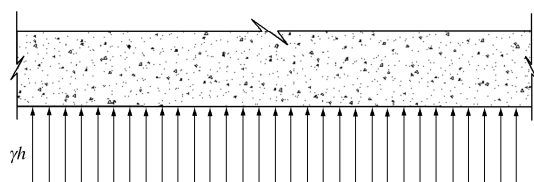
(d) 隧道底部土压力变化

图 13 隧道四周土压力变化

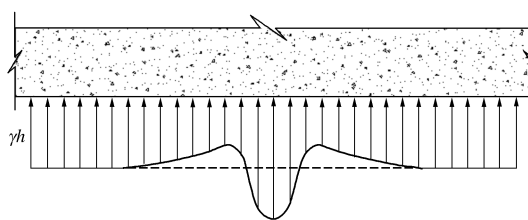
Fig. 13 Change of earth pressure around tunnel

在水平顶推力作用下, 钢筒附近位置因隧道两侧的水平土压力增加, 隧道将发生竖椭圆变形, 因此竖直径增大, 由此导致隧道对上、下土体形成竖向相对挤压, 隧道在竖向上形成地层抗力, 因此在钢筒附近位置隧道顶部与底部的土压力均有明显增大, 而在两端土压力均呈现减小趋势, 其主要原因与隧道在竖向上产生了竖向被动土拱有关, 以隧道顶部竖向土压力为例, 其被动土拱的土压力模式如图 14 所示, 图 14 中 γh 为根据土柱理论得到的竖向土压力。

从实测结果来看, 隧道两侧的水平土压力增量并不相等, 且隧道顶部与底部的竖向土压力也不相等 (在钢筒附近位置隧道底部的竖向土压力增量要大于隧道顶部的竖向土压力增量), 其主要原因与隧道发生纵向挠曲变形时, 隧道受到了地层的摩擦力有关。



(a) 被动土拱发生前



(b) 被动土拱发生后

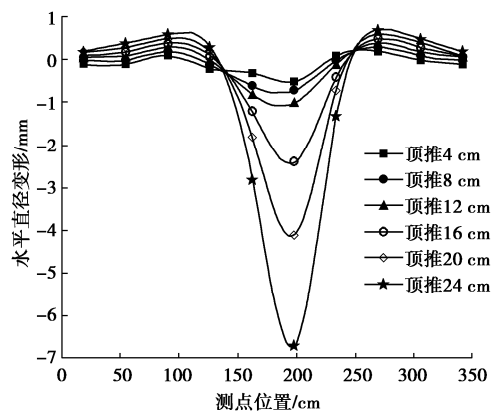
图 14 竖向被动土拱导致土压力分布不均

Fig. 14 Uneven distribution of earth pressure induced by vertical passive soil arching

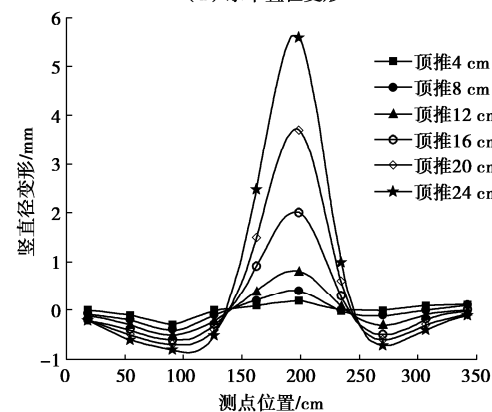
3 联络通道施工盾构机接收对已建隧道变形影响

3.1 联络通道施工对隧道横断面收敛变形影响

图 15 为钢筒顶推不同距离时接收端隧道横断面变形 (以隧道直径增大为正)。从图 15 (a) 可看出, 在钢筒等距离顶推导致侧部水平土压力增长过程中, 隧道在中部的水平直径变形最大减小值约为 6.7 mm; 而在两端的水平直径则有一定的增大, 水平直径最大增大值不大于 1 mm。从图 15 (b) 则可看出, 隧道在中部的竖向直径变形刚好与其水平直径变形相反, 最大竖直径增大变形约为 5.6 mm, 而在两端竖直径则有一定的减小, 竖直径最大减小值不大于 1 mm, 其影响范围与影响趋势与图 15 (a) 基本相同。



(a) 水平直径变形



(b) 竖向直径变形

图 15 隧道横断面变形

Fig. 15 Deformations of cross section of tunnel

从断面变形测试结果可知, 在钢筒顶推导致附加水平土压力作用下, 隧道中间发生了竖椭圆变形, 而两端则发生了一定的横椭圆变形, 其变形结果与图 13 所示的隧道周围土压力变化结果是匹配的。

3.2 联络通道施工对隧道纵向挠曲变形影响

模型盾构隧道在钢筒顶推模拟联络通道施工导致的水平附加荷载作用下, 隧道发生横断面变形的同时, 在纵向也发生了挠曲变形。图 11 (b) 中的滑轨为不动点, 通过滑轨小车上的激光照在刻度尺上即可得到隧道在水平与竖向上的绝对位移。隧道的纵向挠曲变形分别以断面中心的水平位移与竖向位移进行评价, 其中隧道水平挠曲变形以隧道中心向钢筒顶推方向发生水平位移为正; 隧道竖向挠曲变形以隧道中心向上发生竖向位移为正, 其试验结果如图 16 所示。

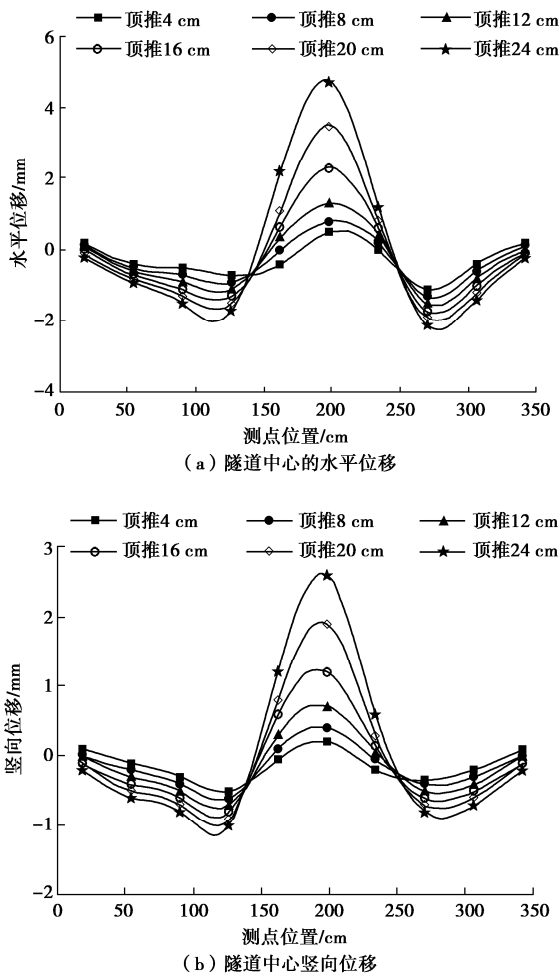


图 16 隧道纵向挠曲变形

Fig. 16 Longitudinal deflection deformations of tunnel

从图 16 (a) 可知, 在钢筒顶推导致的水平附加土压力作用下, 隧道在中部向钢筒顶推方向发生了水平位移, 最大值约为 4.5 mm, 而在两端则向钢筒方向发生了水平位移, 最大值约为 2.1 mm。由此可见, 隧道在受到水平附加土压力作用下发生了反弯现象。

从图 16 (b) 可知, 当隧道受到钢筒顶推导致的水平附加土压力时, 隧道中部总体呈现出一定的上移趋势, 最大上移量约为 2.6 mm, 同时两端呈现出一定的下移, 最大值约为 1.2 mm。因隧道的竖向挠曲变形是以隧道中心的竖向位移进行计算, 隧道中部在发生竖椭圆变形时, 主要是上部向上发生位移为主 (因地表不受约束, 向上变形比向下变形更容易), 隧道两侧受到一定的向下摩擦力, 因此图 13 (d) 中的隧道中间位置的底部竖向土压力要大于 13 (c) 中的隧道中间位置的顶部竖向土压力。因隧道在中间位置向上发生位移, 由此形成了竖向被动土拱, 隧道两端的竖向土压力有一定程度的减小。

通过模拟侧部附加水平土压力对已建盾构隧道的影响, 试验结果分析表明, 盾构隧道作为地层中的管状结构物, 在附加荷载影响下, 隧道不仅发生了横断面变形, 同时发生了纵向挠曲变形, 并与地层形成了复杂的相互作用附加荷载。因隧道横断面变形的存在, 隧道两侧的水平位移并不相等, 隧道顶部与底部的竖向位移也不相等, 因此盾构隧道在地层中纵向变形分析时需要考虑横断面变形的影响。

4 结 论

(1) 联络通道机械法施工时, 盾构机开挖面附加水平土压力将导致接收端已建盾构隧道横断面发生显著的竖椭圆变形, 并使对侧发生水平挠曲变形。

(2) 盾构机开挖面附加水平土压力将导致对侧的土压力在中部有显著的增大, 而两端则减小, 即导致顶推对侧发生了水平被动土拱现象。隧道中间发生竖椭圆变形对上下地层形成相对挤压, 在竖向上同样形成了被动土拱现象。

(3) 在中间附加水平土压力作用下, 隧道在中间发生了显著的竖椭圆变形, 而在两端则发生了一定的横椭圆变形; 隧道纵向挠曲变形时出现了一定的反弯现象。

(4) 盾构隧道作为地层中的管状结构物, 在附加荷载影响下, 隧道同时发生横断面变形与纵向挠曲变形, 并与地层形成了复杂的相互作用附加荷载; 盾构隧道在地层中纵向变形分析时需要考虑横断面变形的影响。

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. 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. 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 for cast-iron tunnel cross passage in London clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **50**: 152-170.
- [4] SAINI R G, UNİYAL 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] 王士民, 何川, 高云龙. 高水压条件下盾构隧道联络通道及集水井施工力学行为研究[J]. 铁道学报, 2012, **34**(7): 108-114. (WANG Shimin, HE Chuan, GAO Yunlong. Construction mechanics behavior of interconnecting aisle and sump pit of shield tunnel under high hydraulic pressure[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, **34**(7): 108-114. (in Chinese))
- [7] 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, **2592**(779/780): 538-543.
- [8] 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.
- [9] STRAUSS A, PAPAKONSTANTINOU 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.
- [10] HAN L, YE G L, LI Y H, XIA X H, WANG J H. 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] 王昆, 叶蕾, 程永龙, 等. 机械法联络通道用掘进机始发接收密封装置研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, **40**(1): 134-142. (WANG Kun, YE Lei, CHENG Yonglong, et al. Sealing device for launching and receiving of tunneling machine for connection gallery with mechanical excavation method[J]. Tunnel Construction, 2020, **40**(1): 134-142. (in Chinese))
- [13] SPYRIDIS P, BERGMEISTER K. Analysis of lateral openings in tunnel linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **50**: 376-395.
- [14] 刘军, 贺美德, 宋早云. 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**(S2): 271-275. (LIU Jun, HE Meide, SONG Hanyun. Mechanical behaviors of shield tunnel segments due to construction of connecting passages[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 271-275. (in Chinese))
- [15] 蔡炜, 岳广学. 地铁工程联络通道与废水泵房合并施工对隧道变形的影响[J]. 北京交通大学学报, 2010, **34**(4): 123-126, 131. (CAI Wei, YUE Guangxue. Influence of combined construction technology to connected aisle and wastewater pump house on tunnel deformation in metro project[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, **34**(4): 123-126, 131. (in Chinese))
- [16] 李大勇, 吕爱钟, 张庆贺, 等. 南京地铁旁通道冻结实测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 334-338. (LI Dayong, LÜ Aizhong, ZHANG Qinghe, et al. Analysis of freezing method for construction of connected aisle in Nanjing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 334-338. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] 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 Jun-meng. Research on the Mechanical Response of Shield Tunnel Segment during the Construction of Cross Passage[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))

- [19] 李 剑, 张 鹏, 李志宏. 顶管施工润滑泥浆压力引起的土体附加应力计算[J]. 地质科技情报, 2016, **35**(2): 23-27. (LI Jian, ZHANG Peng, LI Zhihong. Calculation of soil additional stress induced by lubrication mud pressure during pipe jacking constructions[J]. Geological Science and Technology Intelligence, 2016, **35**(2): 23-27. (in Chinese))
- [20] 武崇福, 魏 超, 乔菲菲. 既有上部建筑荷载下盾构施工引起土体附加应力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(7): 1708-1721. (WU Chongfu, WEI Chao, QIAO Feifei. Analysis of additional soil stress caused by shield construction under existing superstructure loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(7): 1708-1721. (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, 周顺华, 冯青松, 等. 盾构隧道与地层相互作用的模型试验设计[J]. 铁道学报, 2018, **40**(6): 127-135. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Scaled model test design for interaction between shield tunnel and stratum[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, **40**(6): 127-135. (in Chinese))
- [26] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 无缝拼装盾构隧道横向刚度有效率计算方法及其影响因素[J]. 中国铁道科学, 2017, **38**(3): 47-54. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Calculation method for transverse effective rigidity ratio of shield-driven tunnel with straight joint and its influential factors[J]. China Railway Science, 2017, **38**(3): 47-54. (in Chinese))
- [27] 黄大维, 冯青松, 唐柏赞, 等. 圆形盾构隧道水土压力表示与计算半径取值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(1): 57-63. (HUANG Dawei, FENG Qingsong, TANG Baizan, et al. Analysis on expression method of surrounding pressure and value of calculation radius of circular shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(1): 57-63. (in Chinese))