

DOI: 10.11779/CJGE202005018

机械法联络通道施工中主隧道的破洞响应分析

柳 献¹, 高一民¹, 张蛟龙¹, 朱瑶宏²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 为研究盾构主隧道在机械切削过程中的结构响应, 开展了两组平行足尺试验研究。两组试验分别采用钢筋混凝土管片和复合管片, 均放置于七环立式试验架中, 通过 24 个外部千斤顶模拟外部水土压力, 通过内置盾构机和内支撑体系模拟真实施工过程。通过结合试验现象、结构环内变形和内力、环间变形等分析得到主隧道的破洞响应。试验结果表明, 机械法联络通道破洞过程是管片和内支撑共同受力的过程, 结构在开洞拆撑后是安全的。结构响应为环、纵向两个方向的内力重分布, 分布范围和幅度受到衬砌结构性质, 切削推力和内支撑刚度等的影响。在内支撑辅助受力的情况下, 最危险工况为拆撑工况, 弯矩增量达到 40~60 kN·m。始发工况下受到较大影响的为第 4 环的切削侧, 弯矩变化量达到 50 kN·m。危险截面主要集中在第 4 环的切削侧和第 3、5 环的顶部和腰部位置。纵向影响范围基本集中在中间三环到五环。内支撑在切削过程中承担主要的荷载变化。

关键词: 机械切削; 盾构隧道; 复合管片; 足尺试验; 内力重分布

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)05-0951-10

作者简介: 柳 献(1977—)男, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下结构服役行为、相关机理与性能控制方面的研究工作。E-mail: xian.liu@tongji.edu.cn。

Structural response of main tunnel linings during construction of connecting aisle by means of mechanized drilling

LIU Xian¹, GAO Yi-min¹, ZHANG Jiao-long¹, ZHU Yao-hong²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Architecture, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the structural safety of the linings of the main tunnel during mechanized cutting, two full-scale tests on segmental tunnel rings are carried out. The specimen each consists of seven rings. One of them is assembled by reinforced concrete segments, whereas the others by composite segments. 24 hydraulic jacks per ring provide external forces, simulating water and soil pressure. A shield machine is used to cut the segments, simulating the initial process of mechanized drilling of the connecting aisle. The experimental measurements concern the convergence displacements, relative displacements at the joints and strains of concrete and reinforcement. By analyzing the experimental data, the following conclusions are drawn: the tunnel rings together with the inner supports, prescribed before cutting of the segment, carry the additional loads resulting from the cutting process. The structure remains safe after the inner supports are removed. Redistribution of the internal forces occurs in both the longitudinal and circumferential directions. The extent of such a redistribution depends on the type of the segments, cutting thrust and stiffness of the inner supports. The most dangerous load case during the tests refers to removal of the inner supports, and the increment of the bending moment reaches 40~60 kN·m. During the cutting process, the internal forces of the cutting region are greatly changed, and the variable of bending moment reaches 50 kN·m. The most dangerous cross-sections in the longitudinal direction are located at the cutting side of the 4th ring and the top and waist regions of the 3rd and 5th rings. Redistribution of the internal forces in the longitudinal direction basically occurs in a range of three to five rings nearby the 4th ring. The inner support bears the change of the main loads during the cutting process.

Key words: mechanical cutting; shield tunnel; composite segment; full-scale test; redistribution of internal force

0 引 言

隧道中联络通道的施工方法包括明挖法、冻结法以及机械法。由于场地的限制, 目前较为常用的为冻

结法^[1-2]。机械法修建联络通道是近几年新兴的工法,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805004)

收稿日期: 2019-09-02

具有施工周期短，环境污染小等优点^[3]。目前应用的案例包括德国汉堡第四易北河隧道安全通道、墨西哥 Emisor Oriente 隧道旁出支线、香港一屯门至赤鱘角连接路横通道^[4]、南京地铁顶管法联络通道、宁波国内第一条盾构法联络通道^[5]和无锡顶管法联络通道^[6]。在这一施工过程中，最被关注的为开洞后主隧道结构受力的安全问题。

针对隧道开洞后的结构受力问题学者们做了不同的研究。Hsiao 等^[7]通过计算分析了广交中交叉隧道在不同岩土等级下，主隧道的结构响应，得出其与岩层的强度压力比有关。Mayer 等^[8]研究了冰冻法修建联络通道过程，得出了利用复合钢管片有利于增强切削位置的刚度，有利于主隧道的整体稳定的结论。Spyridis 等^[9]进行了隧道开洞的二维和三维分析，讨论了开洞过程的应力影响范围和可能损坏的位置。Li 等^[10]计算了在地铁车站与隧道交叉口隧道的衬砌变形，并研究了应力变化的影响范围。杨平等^[11]进行了软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究，给出了联络通道开挖的现场试验方法。从目前隧道开洞数值研究来看，大多集中于冰冻法研究，尚没有开展机械法隧道开洞数值研究。在现场试验方面，朱瑶宏等^[12]对中国第一条机械法联络通道进行了现场监测，得到了整个施工过程的最不利工况与最不利位置。从目前现场试验来看，受于现场监测的条件限制，对施工过程中结构受力的机理分析尚不足，对影响因素分析较少。

机械法联络通施工中通常采用机械直接切削主隧道，在主隧道上形成与联络通道连通的破洞。为了确保破洞过程中主隧道结构的稳定性，需在隧道内部设置内支撑等辅助设施，在整个切削过程中辅助承力结构与管片共同受力。衬砌结构的响应是受到环向和纵向重分布的共同影响后的结果，针对这两点当前的研究尚未明确其受力性能，缺乏完善的计算理论，在隧道的结构设计、管片力学性能试验等方面欠缺经验。为了解决这一问题，本文拟通过七环足尺室内试验方法分析获得主隧道破洞过程中各环内力重分布机制。

1 试验方案

1.1 加载系统

试验加载系统如图 1, 2 所示。加载系统装置中心高 10.08 m，内径 7.0 m，外径 9.7 m。各钢环梁为 1.35 m 厚的箱型结构，其刚度可保证在计算最大千斤顶反作用下变形忽略不计。液压千斤顶共 24 个，每个间隔为 15° 对称布置，由 PID 控制器，比例放大器，伺服比例阀，液压缸，和压力/位移传感器构成^[13]。本

加载装置利用了荷载位移曲线控制原理。首先通过数值计算和地勘资料确定地层位移和地层抗力之间的关系，将其输入系统。确定此时液压缸顶力和行程，通过迭代调整顶力使得该点位于位移 - 抗力曲线上，该过程在本文中称之为“荷载 - 位移平衡控制模式”。



图 1 加载装置整体示意图

Fig. 1 Overall schematic of loading devices

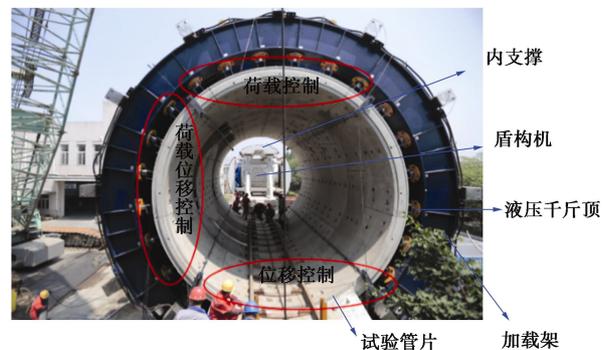


图 2 加载装置局部示意图

Fig. 2 Partial schematic of loading devices

1.2 试验试件

本次试验共进行两组试验，每组试验将七环管片放置于试验加载系统内，七环布置方式如图 3 所示。其中中间 3 环采用通缝拼装，其余 4 环采用错缝拼装。顶部为 0°，远离切削方向为 90°（靠背侧），切削方向为 270°（切削侧）。

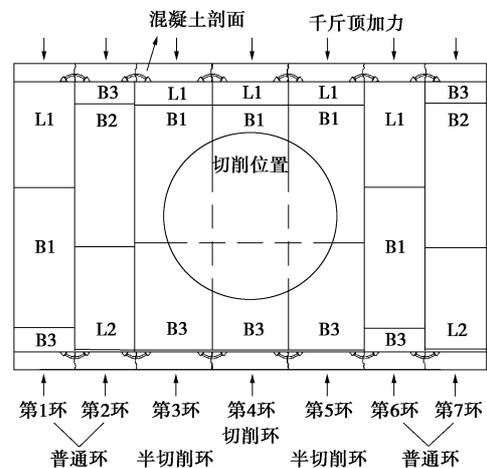


图 3 七环布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of seven-ring layout

两组试验中采用了不同的试件。第一组试验采用钢筋混凝土管片进行加载, 衬砌环外径 6200 mm, 内径 5500 mm, 管片厚度 350 mm。管片混凝土等级为 C55, 钢筋为 HRB400 钢筋。全环由封顶块 (F)、邻接块 (L1, L2)、标准块 (B1, B2, B3) 组成。其中 1/2/6/7 环环宽 1200 mm, 其余环环宽 1500 mm, 环间不设凹凸榫。本试验后文称为钢筋混凝土管片试验。

第二组试验尺寸与第一组试验完全相同, 不同的是中间三环的 B1 和 B3 块 (B1 块和 B3 块的位置参照图 3 所示) 为钢 - 纤维筋混凝土复合管片, 即在开口区域采用纤维筋增强混凝土, 其他区域均采用钢结构, 示意图如图 4 所示。试验中将钢结构内部焊接在一起, 且各环环间设置凹凸榫, 纵间环间凹凸榫的刚度为 60 kN/mm^[14]。本试验后文称为复合管片试验。



图 4 第 4 环复合管片示意图

Fig. 4 Schematic diagram of composite segment

1.3 内支撑体系

内支撑体系是机械法联络通道工法中, 为了保证主隧道结构安全的辅助体系。内支撑体系示意图如下图 5 所示。顶撑正对中间五环顶部 0°, 纵向长度 6900 mm, 顶撑通过 4 组竖向支撑与底板连接; 后撑正对靠背侧, 纵向长度 6900 mm, 前撑正对第 2、第 6 环切削侧, 纵向长度 1200 mm, 前后撑通过四组横向支撑与竖向支撑连接。撑弧度均为 60°。

1.4 加载过程

按照实际工程中的施工工序, 试验加载过程的情况包括初始工况, 预撑工况, 始发工况和拆撑工况。

初始工况模拟运营工况, 加载分两个阶段完成:

①第一阶段将所有千斤顶荷载分级加载至设计荷载, 如图 6 所示 (以第 4 环为例, 其余环荷载根据环宽折减); ②第二阶段, 在结构变形稳定后, 锁定 P_n 的位移, 将 P₁, P₂, P₃ 改为荷载 - 位移平衡控制模式, 直到结构变形稳定。选用这些荷载的依据是根据温克尔局部变形理论, 抗力图形呈一等腰三角形, 抗力范围与水平直径上下呈 45°^[15]。为了确保这一过程的正确性, 试验前利用有限元计算软件进行了相关计算, 保证在施加结束后的内力与修正惯用法计算的内力结果基本一致。

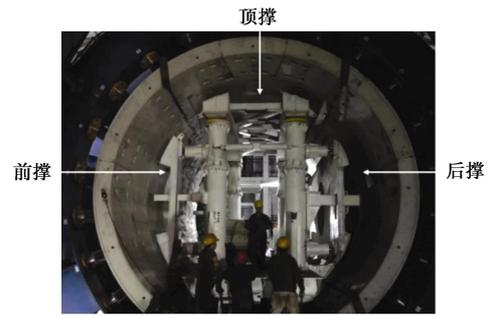
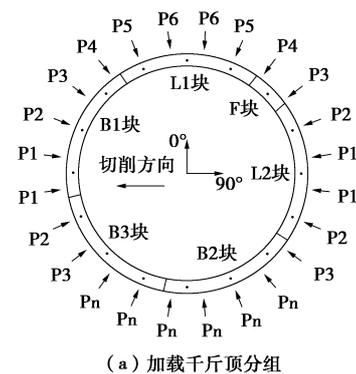
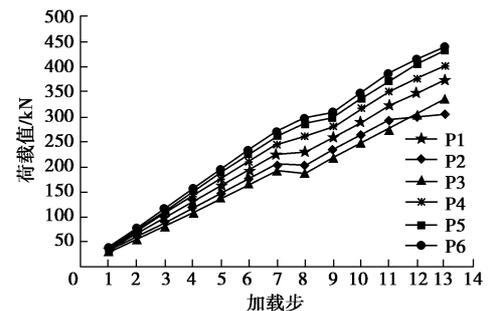


图 5 内支撑示意图

Fig. 5 Schematic diagram of internal supports



(a) 加载千斤顶分组



(b) 千斤顶荷载加载步

图 6 初始工况第一阶段加载示意图

Fig. 6 Schematic sketch of initial loading case at first stage

预撑工况模拟内支撑结构加载至预定支撑力工况。试验中, 将内支撑系统与盾构机移动至盾构机正对切削位置后, 内支撑结构分级加载至预定支撑力工况。每组竖向支撑最终额定值为 700 kN, (取顶撑范围内顶部水土荷载的 50%) 每组横向支撑最终额定值均为 50 kN, 预撑工况中外部千斤顶控制方式不变。

始发工况是指盾构机切削顶进主隧道管片的整个过程, “始发”是指联络通道施工的始发工序。整个过程中盾构机对隧道管片的顶推力如图 7 所示, 始发过程中, 各千斤顶控制方式不变。

拆撑工况用来模拟切削完成后等待水土荷载稳定后进行内支撑卸载的过程。卸载过程分为 10 级进行卸载, 直到内支撑全部撑力卸载及隧道稳定, 卸载过程中保持各外部千斤顶原有控制方法不变。

虽然这一过程有注浆过程, 但是由于其注浆压力的影响范围较小, 主要集中在开洞位置周围的小部分

区域，对于主体结构影响较小，所以在试验中暂时没有考虑这部分压力。

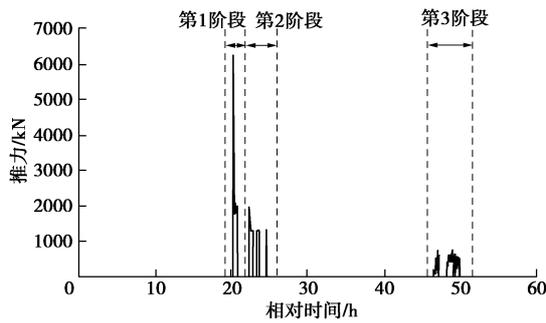
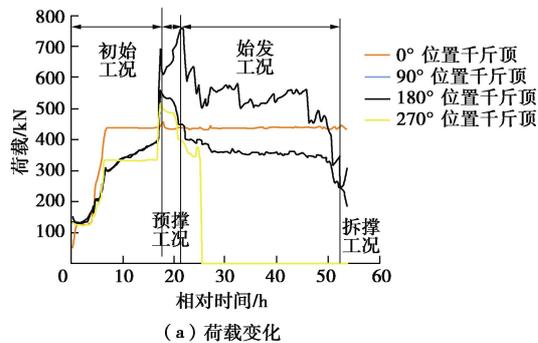


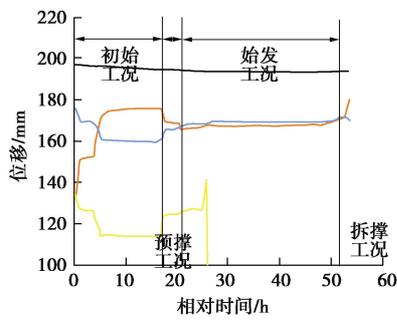
图7 始发工况盾构推力示意图

Fig. 7 Schematic sketch of shield thrust during start load-initiating case

为了阐明不同模式控制的液压缸不同工况下的压力变化曲线，以第4环顶底腰部的千斤顶的荷载和位移进行绘图，如图8所示。



(a) 荷载变化



(b) 位移变化

图8 第4环千斤顶变化图

Fig. 8 Internal forces of 4th ring

“位移”控制的千斤顶主要位于底部180°，采用的是位移锁定，可以看到整个过程中位移基本没有变化，而由于工况的变化，其荷载也相应地在底部6个千斤顶发生内力重分布。

“荷载”控制的千斤顶位于顶部0°，采用的是恒定荷载控制，整个过程中荷载基本没有变化，而随着工况的变化位移有一定变化。

“荷载-位移”控制的千斤顶主要位于腰部（靠背侧90°，切削侧270°）荷载和位移均有相应变化，在预撑工况下，由于腰部收敛增加，即千斤顶位移向

内运动，相应荷载减小。在始发工况下，由于整体向切削侧发生偏移，靠背侧腰部位移向内运动，荷载减小。而切削侧发生了破坏后均没有数据。在拆撑工况下，由于内支撑撤去，腰部收敛向外运动，荷载增大，即完全符合“荷载-位移”控制的千斤顶。

1.5 测试方案

两次试验的测试方案相类似，为探究不同衬砌结构在设计状态下的结构响应，试验过程中量测的内容包括：结构整体位移、主筋应变、混凝土应变、接缝螺栓应变、纵缝内外侧张开和环缝错动，测量位置如图9所示。同时观测初始和结束时管片表面裂缝和接缝破损的发展情况。各物理量测试传感器布置原则如下：

(1) 结构收敛变形，利用拉线位移计分别测量0°，45°，90°，135°，225°，270°，315°的收敛量。由于每环千斤顶可以记录相应的位移，拉线位移计主要用于校检。在整个试验过程中各环由于底部的固定，顶部收敛即为顶底的收敛变形。

(2) 钢筋与混凝土应变，根据有限元预计算结果，在结构正负弯矩最大处以及对应相邻环接缝处的内外侧主筋和管片沿环向布置箔式应变片。由于切削位置应变片会受影响，第4环和第3、5环该位置附近不布置应变片。

(3) 纵缝张开与错动，在每环管片的6个接缝位置处均布置一个纵缝张开与错台的位移计。对应角度为34°，54°，122°，190°，258°，326°。

(4) 环缝错动，在0°，90°，270°位置测量各环环间环缝的错动。

(5) 环缝张开，在135°，225°位置测量中间三环的环缝张开。

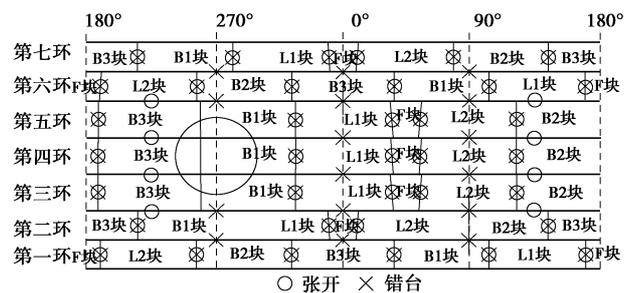


图9 测点布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of arrangement of measuring points

2 试验结果

2.1 钢筋混凝土管片试验结果

(1) 结构裂缝

钢筋混凝土管片试验结束后，对管片裂缝进行观测。管片内侧裂缝如图10所示。第4环管片除开洞位置外，其余部分几乎没有新的裂缝开展。第3环和第

5 环管片在 300° 靠近第 4 环的螺栓位置出现了 30 cm 拉伸裂缝以及混凝土剥落, 0° 顶部螺栓位置出现 20 cm 拉伸裂缝, 且靠背侧和切削侧出现不同程度的压碎裂缝。第 2 环和第 6 环相同位置也出现压碎裂缝。第 1 环和第 7 环没有新增裂缝。

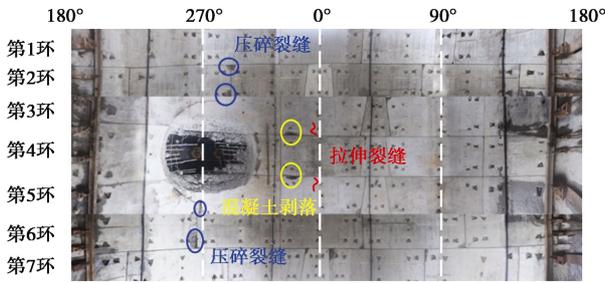


图 10 衬砌结构内弧面裂缝展开图

Fig. 10 Development of inner arc surface crack in lining structure

管片外侧裂缝在第 4 环封顶块位置 55° 出现压碎裂缝, 且在切削侧产生横向裂缝。其余环外部没有出现新增裂缝。

根据裂缝的情况, 可知内力变化明显的部位主要集中在中间三环, 集中的位置主要集中在顶部, 切削侧以及靠背侧。

(2) 结构环内变形

环内变形如图 11 所示。为描述不同工况下的结构变形, 根据顶底收敛变形和衬砌管片被切削深度, 将

始发工况进一步细分为 3 阶段: ①第一个阶段为盾构机切削管片的阶段, 如图 7 中 20 h 左右的时刻, 以下称为始发工况 I; ②第二个阶段为盾构机切削露头主隧道破洞的阶段, 如图 7 中 22~25 h 左右的时刻, 以下称为始发工况 II; ③第三个阶段为切削完成, 如图 7 中 46~50 h 所示, 以下称为始发工况 III。

第 4 环在初始工况下顶部位移收敛 15 mm, 腰部收敛 -5 mm。在预撑工况下, 顶部减小至 10 mm, 腰部收敛减少至 -1 mm; 在始发工况 I, 切削侧向切削侧偏移 2 mm, 顶部收敛增加 1 mm; 在始发工况 II, 靠近开口位置上下管片向内收敛 2 mm, 同时顶部收敛增加 3 mm; 在始发工况 III, 靠近开口位置上下管片继续向内收敛 7 mm, 同时带动顶部收敛增加 2 mm; 在拆撑工况下, 顶部收敛迅速增加, 增量为 10 mm。第 1 环、第 2 环和第 3 环的环内收敛初始工况和预撑工况各环相差较小。始发工况下第 1 环和第 2 环现象不明显, 第 3、5 环在始发工况 III、收敛变形与第 4 环在始发工况 I 的收敛变形相类似。拆撑工况下, 第 3、5 环顶底收敛增加 3 mm, 其余各环增加 2 mm。

(3) 结构内力

根据试验测得到的钢筋与混凝土应变进行内力计算。各工况结构内力分布如图 11 所示。第 4 环初始工

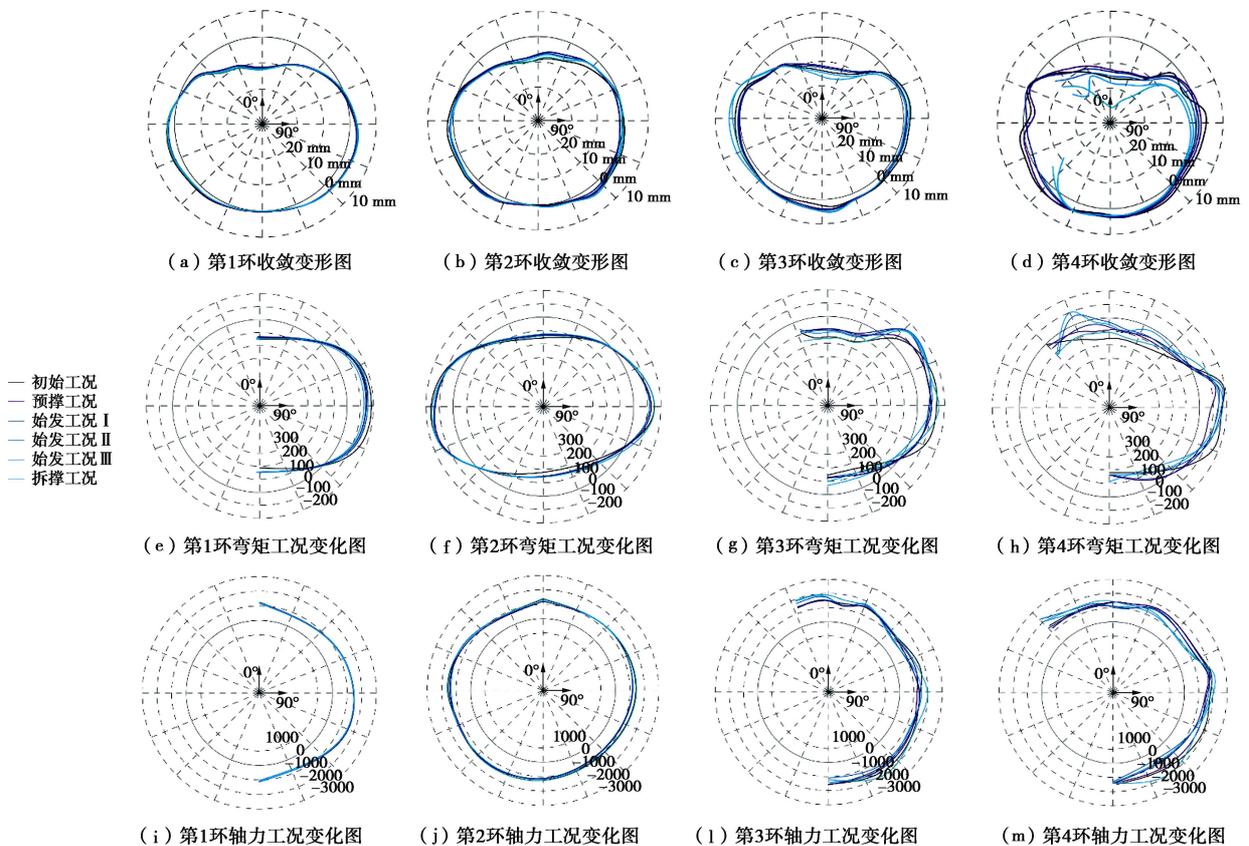


图 11 各环位移及内力变化图

Fig. 11 Displacements and internal forces of rings

况顶底和腰部的弯矩为 170 kN·m。顶底轴力初始工况为 1200 kN，腰部轴力初始工况为 1600 kN。在预撑工况下，第 4 环顶部弯矩减小至 100 kN·m，腰部弯矩减少至 100 kN·m，腰部轴力减少 200 kN。始发工况 I，第 4 环靠近切削侧的顶部弯矩下降 50 kN·m，腰部弯矩增大 30 kN·m，顶部轴力减小 300 kN。在始发工况 II，第 4 环切削侧形成上下两节悬臂端，由于切削位置外部荷载的消失，切削位置上下部分千斤顶对悬臂端向内挤压，使靠近切削位置弯矩减小，靠背侧弯矩增加，定义此效应为悬臂效应。始发工况 III 第 4 环弯矩变化在 10 kN·m，轴力几乎不变。拆撑工况第 4 环顶部弯矩增大 60 kN·m，腰部负弯矩减小 20 kN·m。腰部轴力增加 300 kN，顶部轴力增大 300 kN。始发工况 I，第 3, 5 环腰部弯矩增大 10 kN·m 左右；始发工况 II，内力没有变化。始发工况 III，靠近切削侧顶部弯矩下降 30 kN·m，顶部轴力增加 100kN。拆撑工况下，顶部弯矩增大 40 kN·m，腰部靠背侧负弯矩增大 50 kN·m，顶底轴力增加 100 kN，腰部轴力增加 400 kN。普通环响应主要集中在拆撑工况。环间传力主要集中在拆撑工况。

(4) 结构环间变形

结构的纵向变形分为环缝的错台与张开，环缝错台反应出环间的不均匀收敛变形。各环特殊位置的环内收敛变形如图 12~14 所示，其中前一环收敛大于后一环的错台为正，反之则负。

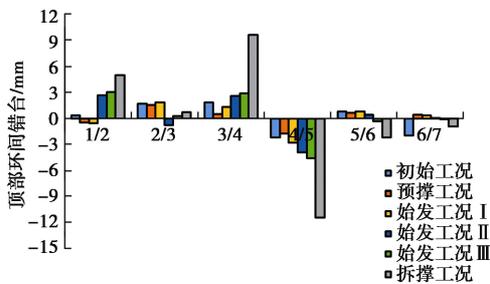


图 12 顶部环间错台变形

Fig. 12 Deformations between top circumferential joints

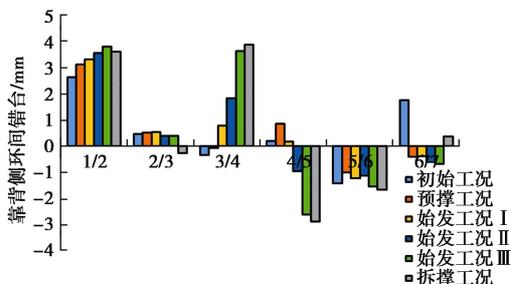


图 13 靠背环间错台变形

Fig. 13 Deformations between rear circumferential joints

顶部的环间错台发生在始发工况 III，主要集中在拆撑工况，第 4 环与第 3, 5 环最终错台超过 10 mm，而第 3, 5 环与普通环的错台在 1 mm 左右。靠背侧环

间错台也集中在始发工况 II，靠背侧第 4 环发生向切削侧位移。切削侧产生的环间错台集中在始发工况 III，第 3、5 环向切削侧移动而第 4 环向内收缩。与结构裂缝对应，可以得到切削侧的环间传力集中在始发工况，而其余位置的环间传力均集中在拆撑工况。

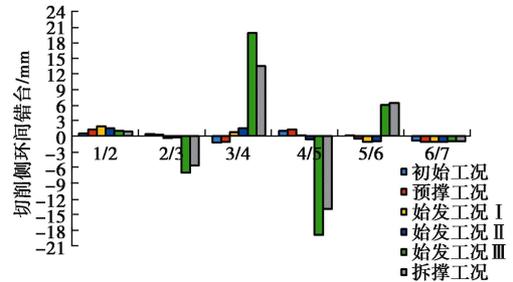


图 14 切削侧下部(即 232.5° 位置)环间错台变形

Fig. 14 Deformations between cut circumferential joints

试验还测量了各环 225° 和 135° 环缝张开，切削侧的 225° 在始发工况 I，第 3, 5 环和第 4 环之间的环缝内外张开 1 mm 左右，始发工况 II 外部张开 1 mm，内部压紧 2 mm。靠背侧的 135° 全过程基本没有变化。七环发生向切削侧纵向弯曲的现象。

2.2 复合管片试验结果

(1) 结构环内变形

复合管片的开洞响应与钢筋混凝土管片结果类似，复合管片由于刚度有所改变，整体收敛较小。环间收敛变形以第 4 环为例，收敛变形如图 15 所示，始发工况 I，收敛变形在 0.5 mm 以下，始发工况 II 除第 4 环的开口位置上下管片向内收敛 1 mm 左右，始发工况 III 收敛变形也在 0.5 mm 以下。拆撑工况第 4 环管片的顶底收敛最大，向外依次递减。整体收敛相对较小。

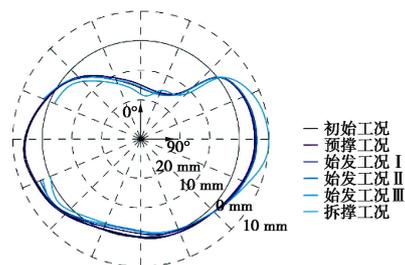


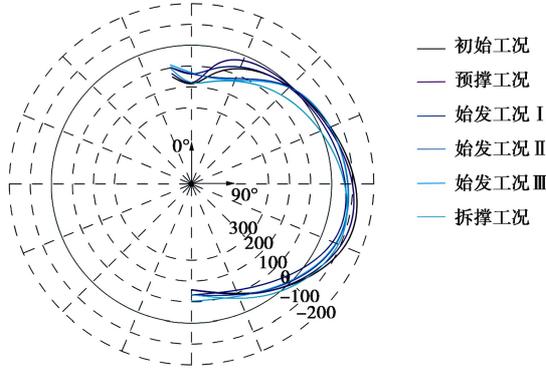
图 15 第 4 环收敛变化图

Fig. 15 Convergence deformations of cutting ring

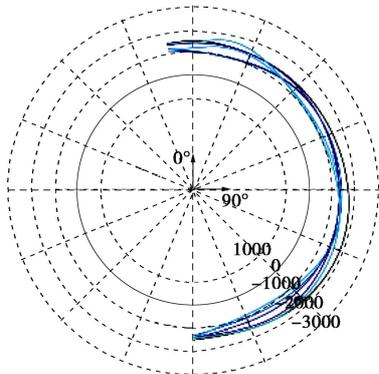
(2) 结构内力

始发工况第 4 环全过程与钢筋混凝土管片结果类似。这里以第 4 环的内力变化为例，如图 16 所示。始发工况 I，第 4 环靠近切削侧顶部弯矩减 30 kN·m，第 3, 5 环顶部弯矩减小 10 kN·m，第 2 环与第 1 环切削侧弯矩增加 10 kN·m。始发工况 II 除第 4 环外其余各环变化均较小，前两阶段弯矩变化占到 20% 以上。始发工况 III，各环的变化规律与钢筋混凝土管片结果类似，主要为第 3, 5 环顶部弯矩减小 20 kN·m 左右，中间三环轴

力增大 100 kN 左右, 其余各环的内力变化均较小。拆撑工况下, 第 4 环顶部弯矩增大 40 kN·m 左右, 腰部弯矩变化较小, 顶部轴力和腰部轴力增大 100~200 kN, 第 3, 5 环顶部弯矩增大 30 kN·m, 腰部弯矩增大 50 kN·m, 顶部轴力和腰部轴力同时增大 200~400 kN, 其余各环基本恢复到预撑工况前的内力状态。



(a) 第4环弯矩工况变化图



(b) 第4环轴力工况变化图

图 16 第 4 环内力工况变化图

Fig. 16 Internal forces of 4th ring

通过本小节分析可知, 钢管片的作用体现在悬臂效应的明显与否。钢筋混凝土管片试验在始发工况的始发工况 II 340° 由于悬臂效应弯矩减小 100 kN·m 左右, 350° 位置弯矩减小 40 kN·m 左右, 10° 位置弯矩增大 10 kN·m 左右。而复合管片试验 350° 位置弯矩变化不明显, 10° 位置弯矩增大 40 kN·m 左右。

(3) 结构环间变形

复合管片各环的特殊位置的收敛变形如图 17~19 所示。顶部的环间错台在拆撑工况产生, 第 4 环与第 3, 5 环最终错台为 2 mm, 第 3, 5 环与第 2, 6 环的错台在 1 mm。靠背侧环间错台集中在拆撑阶段, 靠背侧第 4 环与钢筋混凝土管片结果不同, 向外移动 2 mm。切削侧产生的环间错台集中在始发工况 III。由于环间凹凸榫的存在, 纵向环间作用较强, 产生错台的工况晚于钢筋混凝土管片相同效应的工况, 且现象较为不明显。内支撑结构响应与钢筋混凝土管片试验结果类似, 试验过程在拆撑前的外部荷载有较大部分由内支撑承担。

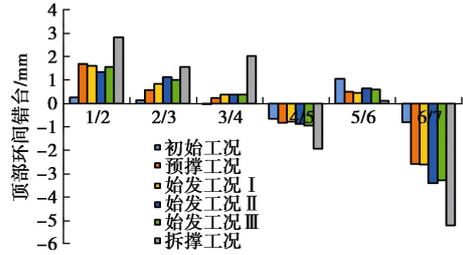


图 17 顶部环间错台变形

Fig. 17 Deformations between top circumferential joints

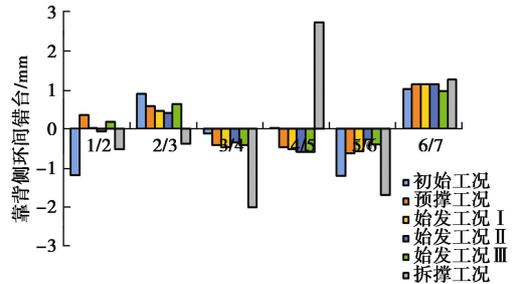


图 18 靠背侧环间错台变形

Fig. 18 Deformations between rear circumferential joints

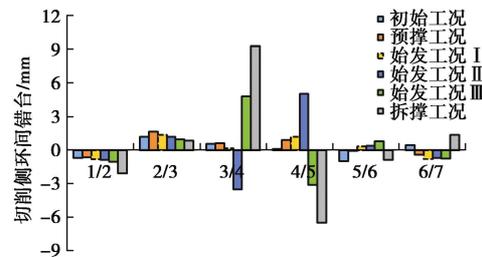


图 19 切削侧环间错台变形

Fig. 19 Deformations between cut circumferential joints

3 全过程受力机制

3.1 始发全过程总结

始发工况的 3 个阶段两组试验的响应相类似。始发工况 I 中, 由于切削侧的顶力由第 4 环单独承担, 而靠背侧的反作用力是由五环共同分担, 两组试验均发生第 4 环向切削侧偏移的现象, 受影响最大的为第 4 环, 两组试验的第 4 环均发生顶部弯矩减少, 轴力增大。不同的是, 钢筋混凝土管片试验主要为第 4 环受到影响, 复合管片试验则传递至第 3, 5 环。

始发工况 II 中, 第 4 环开洞位置上下管片产生了向内收敛的变形, 围绕纵向接缝形成悬臂端并向内压缩。但是由于两组试验的结构材性不同, 悬臂效应现象不同, 钢筋混凝土管片试验结果比复合管片试验结果现象明显。且由于切削影响的减小, 环间错台变化量较小, 两组试验传力均不明显。

始发工况 III 与前两阶段不同, 第 3, 5 环发生的响应与始发工况 I 类似。由于切削位置第 4 环已经切削完成, 这一阶段对第 4 环几乎没有影响。而从普通环的收敛与内力变化来看, 环间新增错台较小, 对临近环 (普通环) 几乎没有影响, 两组试验的结果相近。

3.2 顶进力影响

为了了解不同的盾构机切削力在切削过程中的影响,拟分析在始发工况 I 1300, 2000 kN 切削力下钢筋混凝土管片试验结果,如图 20 所示。

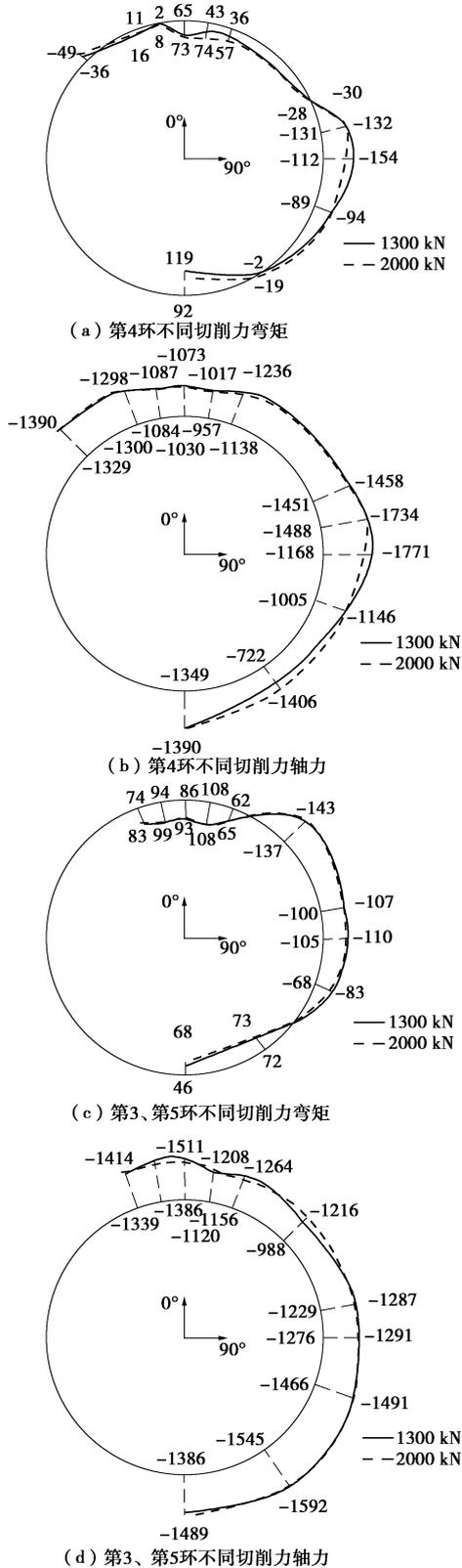


图 20 第 3, 4, 5 环关键工况内力图

Fig. 20 Internal forces of 3rd, 4th and 5th rings in different loading cases

从内力变化来看,第 4 环靠背侧弯矩大顶力工况比小顶力工况减小 30 kN·m, 顶部弯矩增大 10 kN·m 左右,且腰部变化量较大;第 3, 5 环弯矩几乎没有变化;第 4 环靠背侧轴力减小 200 kN;顶部轴力减小 50 kN,第 3, 5 环顶部轴力减小 50 kN,其余变化较小。

在复合管片的试验过程中(具体数值不再绘出),第 4 环顶部弯矩增大 20 kN·m 左右,第 3, 5 环弯矩增大 10 kN·m 左右;第 4 环顶部轴力减小 200 kN 左右,第 3, 5 环顶部轴力减小 100 kN。

从两组的试验来看,对于不同切削力,与始发工况 I 相同,主要受影响的为第 4 环,其余环基本不受影响,主要是由于内支撑体系的存在。

3.3 纵向传递影响范围

为了研究两组试验不同工况下的内力传递影响范围,这里采用不同工况之间的单因素分析^[16]进行分析。本试验可以看成分析不同环的内力变化受到不同工况这一因素的影响。假设不同环内力受到不同工况影响,内力会发生变换。这里将不同工况 A_i 下的试验结果各位置的弯矩 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ 看作来自第 i 个正态总体 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma^2)$ 的样本观测值,计算统计函数 F 的 p 值(即 F 函数的上分位点,保证率的数值),通过 p 值确定原假设成立,即不同环的内力变化是否由这一工况的变化引起。考虑到本文大体量试验存在一定测量误差,本文以保证率达到 95% 作为原假设成立条件,即 p 值小于 0.05 时支持原假设。结果如图 21, 22 所示。

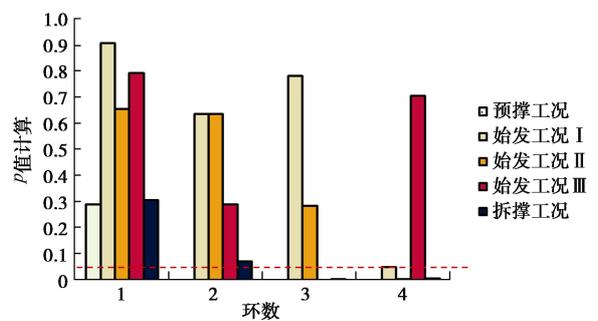


图 21 钢筋混凝土管片试验 p 值计算值

Fig. 21 Calculated values of p of reinforced concrete segments

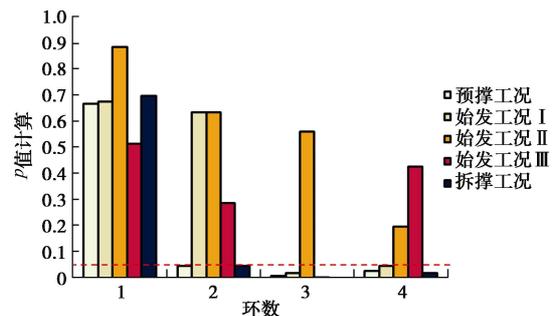


图 22 复合管片试验 p 值计算值

Fig. 22 Calculated values of p of composite segments

钢筋混凝土管片试验中,第4环在预撑工况、始发工况I和始发工况III和拆撑工况,95%概率下均发生了弯矩重分布,第3环在预撑工况、始发工况III和拆撑工况,95%概率下均发生了弯矩重分布。而第1环和第2环的弯矩重分布现象不明显。

同样的方法可以得到复合管片第4环在预撑工况、始发工况I和拆撑工况下发生了弯矩重分布,第3环在预撑工况、始发工况I、III和拆撑工况下发生了弯矩重分布。而第1,2环的弯矩重分布现象不明显。

通过两组试验的计算来看,在钢筋混凝土管片试验中,预撑工况受影响为中间五环;在始发工况I,第3,5环几乎没有传力;拆撑工况的传递范围只集中在中间三环。在复合管片试验中,预撑工况受影响为中间五环;在始发工况I,第3,5环受到影响较大;拆撑工况的传递范围集中中间五环。可以得出钢筋混凝土管片的纵向内力传递范围小于复合管片纵向内力传递范围,这主要是由于复合管片环间作用力较强^[4]。

3.4 破洞全过程结构受力响应

从第4环拆撑前的位移与拆撑后的位移的比值上看,盾构机切削造成的影响主要由内支撑承担。

内支撑的作用以第4环的结果予以说明,如图23所示,假设整个过程中除破洞位置外为弹性结构体。以初始工况顶底收敛为起始,拆撑工况结束后的顶底收敛为结束,可以认为是破洞对结构的作用,而从始发工况结束到拆撑工况结束的顶底收敛水平变化可以认为是内支撑对结构的影响。钢筋混凝土管片试验初始工况顶底收敛13.7 mm,始发工况为15.3 mm,拆撑工况为25.1 mm,内支撑影响部分占比85.96%。复合管片试验初始工况顶底收敛14.8 mm,始发工况后为15.6 mm,拆撑工况后为19.6 mm,内支撑影响部分占比83.33%。

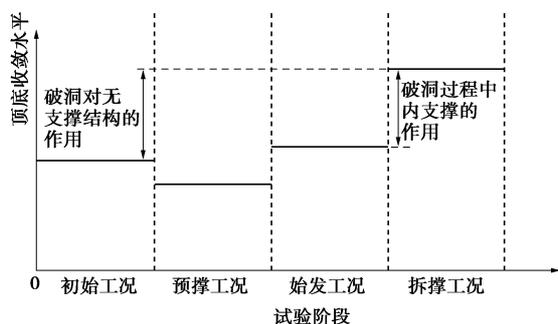


图23 第4环顶底收敛水平

Fig. 23 Top-bottom convergences of 4th ring

4 结 论

(1)机械法联络通道施工全过程中的控制工况为始发工况和拆撑工况。始发工况内力和变形变化较大

的为切削侧和第4环顶部,变化量在20%以上,拆撑工况下第3,4,5环和普通环均受到不同程度的影响。

(2)始发工况I中,发生第4环向切削侧偏移的现象,受影响最大的为第4环,第4环发生顶部弯矩减少,轴力增大。始发工况II中,开洞位置上下管片产生向内收敛,形成悬臂效应。始发工况III受力的主要为第3,5环,效应与第4环类似。对第4环和临近环(普通环)几乎没有影响。

(3)不同的切削力大小会对结构响应造成影响,主要影响的为第4环的收敛与内力,1300 kN顶力与2000 kN顶力影响下,内力变化在10%左右而其他环响应较小。不同的切削力影响较大的为腰部的弯矩,而顶部的弯矩影响较小。

(4)不同的衬砌结构的影响也不同,其中包括:始发工况I下,钢筋混凝土管片试验只有第4环受到影响,而复合管片试验中第3,5环有不同的响应。始发工况II下,悬臂效应的显著与否主要与悬臂端的收敛位移有关。钢筋混凝土管片悬臂效应明显。而复合管片则较为不明显。拆撑工况下,钢筋混凝土管片试验的环间传力主要集中在中间三环,其保证率均在95%以上其他四环影响较小。复合管片试验的环间传力主要集中在中间五环,其保证率均在95%以上,其他两环影响较小,保证率均在95%以下。

(5)通过试验中内支撑的变化来看。全过程为管片与内支撑体系的共同受力的过程,预撑工况下内支撑为衬砌环施加预撑力,内支撑承担受力主要体现在盾构机主动切削管片阶段,用以维持切削过程中的收敛稳定。顶部的竖向支撑吸能结果来看从中间到两边吸能逐渐减少。钢筋混凝土管片试验内支撑承担部分占比85.96%,复合管片占比83.33%。在拆撑工况下,由于内支撑的卸力,第4环的收敛迅速增大,从而带动各环收敛增加,发生纵向的内力传递。

本文研究为下阶段深入分析机械法联络通道施工全过程中的受力机制提供了试验支持。

参考文献:

- [1] 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, 2015: 1 - 10.
- [2] LI Z, SOGA K, WRIGHT P. 3D finite element analysis of the behaviour of cross passage between cast-iron tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 53(6): 249 - 273.
- [3] 朱瑶宏, 董子博, 尹铁锋, 等. 地下空间联络通道微加固机械法T接技术探索[C]//中国土木工程学会2017年学术年

- 会.上海, 2017.(ZHU Yao-hong, DONG Zi-bo, YING Tie-feng, et al. Exploration of micro-reinforced mechanical t-connection technology for underground space connection channel[C]// Proceedings of the 2017 Academic Annual Meeting of China Civil Engineering Society. Shanghai, 2017. (in Chinese))
- [4] 香港屯门—赤鱗角工程全球最大直径盾构已开始掘进[J]. 隧道建设(中英文), 2015, **35**(10): 1081. (Hong Kong Tunmen—Chiliejiao's engineering, the world's largest diameter of shield has been open[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(10): 1081. (in Chinese))
- [5] 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 Yao-hong, GAO Yi-min, DONG Zi-bo, et al. The full-scale experimental study on the structural mechanism of T-connected tunnel structure constructed by pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(9): 1392 - 1401. (in Chinese))
- [6] 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 Yao-hong, GAO Yi-min, DONG Zi-bo, et al. The full-scale experimental study on the structural mechanism of T-connected tunnel structure constructed by the shield method[J]. Tunnel Construction, 2020, **40**(1): 9 - 18. (in Chinese))
- [7] HSIAO F Y, WANG C L, CHERN J C. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**(1): 14 - 21.
- [8] MAYER P, FRODL S, FRIEDEMANN W, et al. Innovative solutions for driving cross passages in bored tunnels with segmental lining[J]. Geomechanics & Tunnelling, 2010, **3**: 295 - 307.
- [9] SPYRIDIS P, BERGMEISTER K. Analysis of lateral openings in tunnel linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **50**: 376 - 395.
- [10] LI Y, JIN X, LÜ Z, et al. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **56**: 22 - 33.
- [11] 杨平, 陈瑾, 张尚贵, 等. 软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(12): 2226 - 2234. (YANG Ping, CHEN Jin, ZHANG Shang-gui, et al. Study on whole range monitoring for temperature and displacement field of the cross-passage by AGF in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(12): 2226 - 2234. (in Chinese))
- [12] 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 Yao-hong, GAO Yi-min, DONG Zi-bo, Liu Xian. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on ningbo metro line no[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(11): 1759 - 1768. (in Chinese))
- [13] 杨振华, 朱瑶宏, 柳献. 模拟土与隧道相互作用的液压加载系统设计与试验应用[J]. 铁道科学与工程学报(待刊). (YANG Zhen-hua, ZHU Yao-hong, LIU Xian. Design and test application of hydraulic loading system to simulate the interaction between soil and tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering(in press). (in Chinese))
- [14] 朱瑶宏, 张宸, 柳献, 等. 错缝拼装通用环管片环缝抗剪性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, **14**(2): 315 - 324. (ZHU Yao-hong, ZHANG Chen, LIU Xian, et al. Experimental study on shear property of circumferential joint in general ring segment under the staggered assembling[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, **14**(2): 315 - 324. (in Chinese))
- [15] 朱合华, 张子新, 廖少明, 等. 地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 245 - 245. (ZHU He-hua, ZHANG Zi-xin, LIAO Shao-ming, et al. Underground Building Structure[M]. Beijing: China Building Architecture and Building, 2016: 245 - 245. (in Chinese))
- [16] 薛毅, 陈立萍. 统计建模与 R 软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 336 - 340. (XUE Yi, CHEN Li-ping. Statistical Modeling and R Software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 336 - 340. (in Chinese))