

盾构法联络通道不同开洞位置对 主隧道管片内力影响

周 萌

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海)

摘 要 [目的]在9 m级大直径盾构中,尚无采用盾构法进行联络通道施工的工程案例,受限界及疏散平台高度影响,联络通道与主隧道之间存在一定偏心距,主隧道结构面临着盾构偏心始发和接收的影响,需研究盾构法联络通道不同开洞位置对主隧道管片内力的影响。[方法]依托某市域铁路工程,采用数值模拟方法,分析不同偏心距下盾构法联络通道施工始发和接收阶段主隧道管片力学响应。[结果及结论]盾构法联络通道施工过程中,最不利阶段为作用在盾构反力架上的推力为0的工况;随着偏心距的增大,主隧道特殊管片收敛变形,以及钢管片、混凝土管片内力逐渐减小,但环缝剪力和纵缝剪力逐渐增大;在开洞侧与特殊管片相邻的普通混凝土管片的内力也会发生显著的增大,需要在结构设计中重点关注。

关键词 市域铁路;联络通道;盾构法施工;管片;偏心距;内力分析

中图分类号 U455.43; U453.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.014

Influence of Different Opening Positions of Shield Method Connecting Passage on Main Tunnel Segment Internal Force

ZHOU Meng

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In the 9 m level large-diameter shield tunneling, there are no engineering cases using shield method for constructing connecting passages yet. Due to the influence of clearance and evacuation platform height, a certain eccentricity exists between the connecting passage and the main tunnel, resulting in the impact of shield launching and receiving with eccentricity for main tunnel structure. It is necessary to investigate the influence of different opening positions of shield method connecting passage on the internal forces of main tunnel segments. [Method] Based on a city railway project, numerical simulation method is used to analyze the mechanical response of main tunnel segments during the launching and receiving stages of above connecting passage construction under

different eccentricity conditions. [Result & Conclusion] During the construction of shield method connecting passages, the most critical stage is when the thrust acting on the shield reaction frame is zero. As the eccentricity increases, the convergence deformation of special segments in main tunnel and the internal forces in steel and concrete segments gradually decrease, while the circumferential and longitudinal shear forces gradually increase. The internal forces in ordinary concrete segments adjacent to the special segments on the opening side also increase significantly, which requires special attention in structure design.

Key words city railway; connecting passage; shield method construction; segment; eccentricity; internal force analysis

机械法联络通道技术是近年来兴起的一种联络通道施工技术,包括盾构和顶管两种工艺。与传统冻结法相比,机械法具有施工安全性高、工期短、环境影响小、无需大面积地层加固等特点^[1],已在6 m级直径的地铁盾构隧道中得到了一定的应用^[2]。文献[3]分析了机械法联络通道施工过程中主隧道的受力情况,研究结果表明盾构切削主隧道后隧道刚度下降,需要采取针对性措施提高结构整体性。文献[4-6]针对顶管法和盾构法联络通道施工,开展了系列足尺试验和现场试验研究,明确了在内支撑等辅助设施协同下主隧道衬砌环的内力重分布特征。文献[7]采用模型试验方法研究了机械法联络通道中盾构接收对既有隧道的影响。文献[8]通过数值模拟,分析了高水压、破碎地层中采用机械法进行联络通道施工过程中的隧道结构力学响应。

目前已有的机械法联络通道均采用中心开洞的方式,但随着市域铁路的快速发展,9 m级盾构隧道的应用越来越广泛。受隧道尺寸、限界、疏散平台的影响,联络通道无法实现中心开洞方式,需要采用偏心开洞的方式(见图1),这使得9 m级主隧道管片的受力体系与传统盾构法施工存在较大不同。

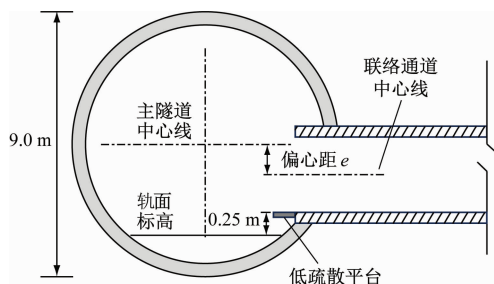


图1 9 m级盾构隧道与联络通道相对位置关系

Fig. 1 Relative position relation between 9 m level shield tunnel and connecting passage

本文主要通过数值模拟方式研究盾构法联络通道不同开洞位置对主隧道管片内力的影响,并提出相应的设计建议,以期在盾构法联络通道技术在市域铁路工程中的应用提供技术支撑。

1 工程背景

某市域铁路盾构隧道外径 9.0 m、厚度 0.45 m 的钢筋混凝土管片,采用 7 分块,混凝土强度等级为 C55。主隧道在联络通道位置处连续 3 环采用特殊管片结构形式,即 4 块混凝土管片(F、L1、L2、B1) + 3 块钢管片(B2、B3、B4),洞门处采用可切削的玻璃纤维混凝土。联络通道外径为 3.65 m,内径为 3.10 m,管片厚度为 0.275 m,混凝土强度为 C50。

由于主隧道直径为 9.0 m,若采用传统内支撑体系则会极大占用隧道空间,因此提出采用无背靠的反拉式始发装置,如图 2 所示。盾构机的始发推力通过拉杆传递到始发钢套筒上,以实现盾构掘进。

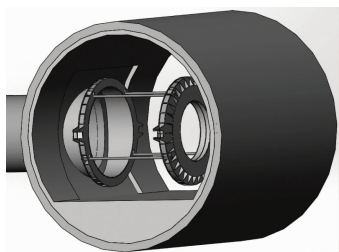


图2 盾构法联络通道反拉式始发装置

Fig. 2 Pull-back originating apparatus of shield method connection passage

2 数值模拟

2.1 计算模型及参数

采用 Midas GTS NX 软件建立主隧道 + 联络通道的三维荷载结构模型,其中主隧道、联络通道、钢套筒均采用壳单元进行模拟,如图 3 所示。隧道在

3 环特殊管片两侧各延伸 10 环普通钢筋混凝土管片,以减小边界条件影响。管片环间和块间考虑螺栓作用,采用壳界面单元连接,连接参数参考实际弹簧刚度。特殊衬砌环中的钢管片在施工前采用等强度焊接环纵缝,因此认为其为一个整体,不考虑接缝作用。洞门可切削混凝土材料参数同混凝土管片,钢管片采用等效抗弯刚度计算等效矩形截面壳单元弹性模量,结构材料参数如表 1 所示。地层参数考虑上海地区典型粉质黏土地层,其基本物理力学参数如表 2 所示。

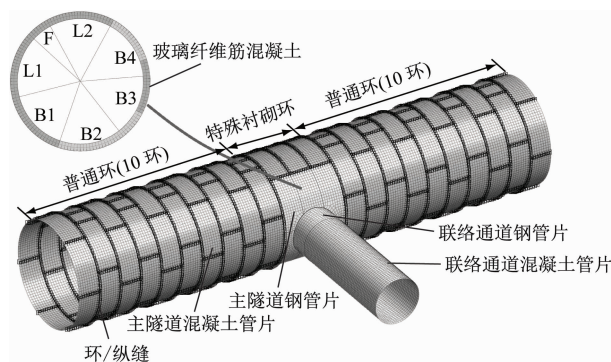


图3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model

表1 结构材料计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of structural materials

| 材料类型 | 重度/(kN/m ³) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|---------|-------------------------|----------|------|
| 混凝土 C55 | 25.0 | 35.5 | 0.20 |
| 混凝土 C50 | 25.0 | 34.5 | 0.20 |
| 钢管片 | 25.0 | 52.3 | 0.25 |
| 钢套筒 | 78.5 | 210.0 | 0.25 |

表2 土体物理力学参数

Tab. 2 Soil physical and mechanical parameters

| 土层类型 | 天然重度/(kN/m ³) | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa | 侧压力系数 | 基床系数/(kN/m ³) |
|------|---------------------------|----------|---------|-------|---------------------------|
| 粉质黏土 | 18.0 | 17.5 | 18 | 0.5 | 30 000 |

2.2 荷载及边界条件

数值计算模型中的各项荷载如图 4 所示。计算埋深 30 m,采用全覆土理论计算竖向土压力,通过在隧道全周设置地基弹簧模拟土与结构的相互作用得到地基反力,且地基弹簧仅受压力,地基弹簧刚度按表 2 中的“基床系数”换算取值。

施工荷载包括掌子面推力和千斤顶反力,根据施工装备的设计参数,确定盾构机推力为 400 ~ 700 t,据此可计算得到作用在掌子面的推力和钢套筒上

的反力。

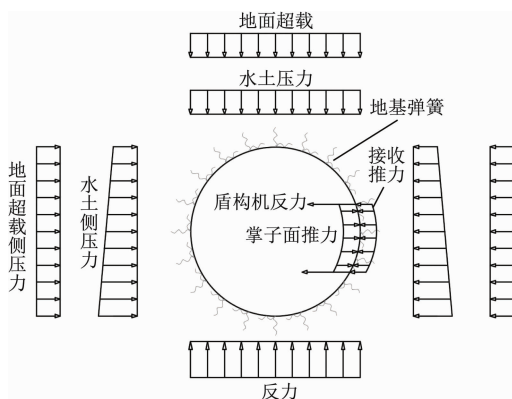


图4 隧道荷载-结构计算模型

Fig. 4 Load-structure calculation model of tunnel

2.3 施工过程模拟

根据机械法联络通道的实际施工过程,将模拟工况分为始发和接收两个阶段,其中始发阶段分为5个工况,接收阶段分为2个工况,各工况简介如表3所示。

表3 施工工况划分

Tab. 3 Division of construction conditions

| 阶段 | 工况 | 工况具体介绍 |
|------|------------|--------------------------|
| 始发阶段 | 工况1:主隧道施工 | 激活主隧道网格、主隧道地基弹簧以及主隧道水土荷载 |
| | 工况2:磨管片 | 激活钢套筒、掌子面推力和盾构机反力 |
| | 工况3:洞门破除 | 钝化洞门网格、洞门地基弹簧及荷载、掌子面推力 |
| | 工况4:盾构反力撤除 | 钝化盾构机反力 |
| | 工况4:联络通道施工 | 激活联络通道、地基弹簧及荷载 |
| 接收阶段 | 工况5:运营阶段 | 钝化钢套筒 |
| | 工况1:主隧道施工 | 激活主隧道网格、主隧道地基弹簧以及主隧道水土荷载 |
| | 工况2:盾构接收 | 激活洞口处的掌子面推力 |

考虑主隧道和联络通道限界及疏散平台高度要求,二者偏心距最大可达1.2 m,因此在数值模拟中共考虑主隧道与联络通道存在5种相对位置关系,即偏心距 e 分别为0 m、0.3 m、0.6 m、0.9 m、1.2 m。每种工况中盾构机推力分别取最大值700 t和最小值400 t进行计算。

3 计算结果分析

3.1 隧道变形分析

通过计算发现,不同偏心距条件下各工况隧道

变形趋势类似,因此以 $e = 300$ mm、推力400 t为例分析管片的变形特征。为重点研究机械法联络通道施工产生的影响,计算中的位移均忽略了主隧道施工产生的初始位移。

不同工况下主隧道各环的最大水平位移、竖向位移如图5所示。由图5可见,在始发过程中,主隧道最大位移出现在盾构反力撤除工况。这是因为在始发阶段,盾构反力对主隧道来说是有利荷载,而随着洞门破除,盾构机进入土体中,掌子面的推力将逐步由联络通道管片与土体间的摩擦力替代,导致盾构反力逐渐降低。因此,当盾构反力为0时,主隧道处于最不利施工状态。而当盾构接收时,隧道位移为负值,表明隧道的椭圆化程度降低,对隧道变形有利。

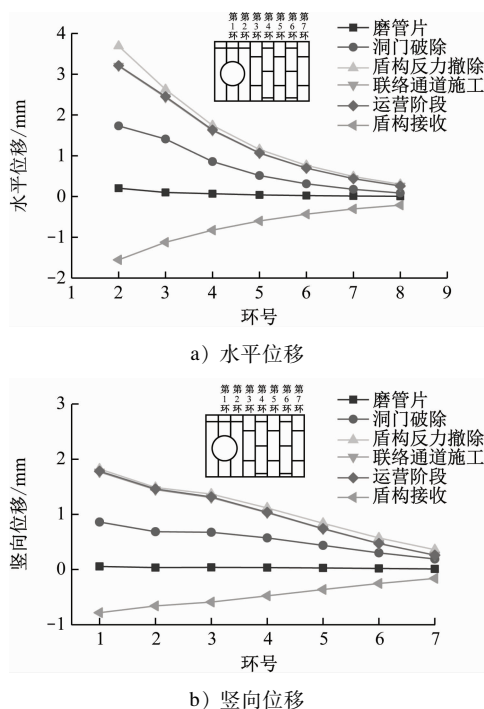


图5 不同工况下各环水平位移和竖向位移

Fig. 5 Horizontal and vertical displacement of each ring under different working conditions

从对不同衬砌环的位移分析可以看出,联络通道施工对主隧道竖向和水平向位移的影响不同。在水平方向上,最大水平位移随环号的增大呈现非线性减小的趋势,主要原因是水平方向上,管片的刚度存在一定差异。除特殊管片第3环外,两侧仍有3环管片受到联络通道施工的影响,水平位移超过1 mm,总影响环数达到9环。在竖向上,竖向位移的收敛随着环号的增大呈线性减小的趋势,因为

在拱顶处,管片刚度均保持一致性;另一方面,竖向位移的影响范围要小于水平方向的,除 3 环特殊管片外,两侧各有 2 环管片受到联络通道施工的影响,竖向位移超过 1 mm。

图 6 为盾构反力撤除工况时的竖向位移和水平向位移云图。由图 6 可知,水平位移最大出现在半开洞环(第 2 环)的 B3 块钢管片的最大开挖直径处,因为此处管片宽度最窄,导致隧道局部刚度最小。竖向最大位移出现在全开洞环(第 1 环)的 L2 块和 B4 块的接缝处。这主要是因为特殊管片 3 环采用的是通缝拼装,而 L2 块和 B4 块的接缝距离拱顶最近,导致此处竖向位移最大。因此,在结构设计时,建议提高特殊管片 L2 和 B4 块的纵缝接头螺栓等级。

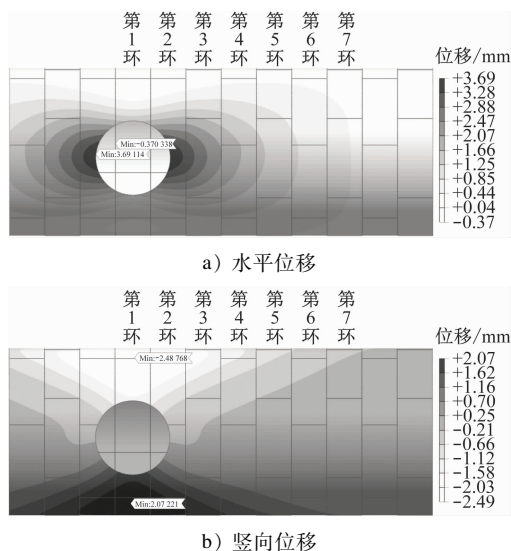


图 6 各环水平位移和竖向位移云图(盾构反力撤除工况)
Fig. 6 Horizontal and vertical displacement nephogram of each ring (in shield reaction force removal condition)

以最大水平位移作为隧道收敛变形指标,统计不同偏心距条件下主隧道特殊管片的最大附加收敛变形,如图 7 所示。由图 7 可见,随着偏心距的增大,机械法联络通道施工引起的主隧道特殊管片附加变形表现出逐渐减小的趋势,且减小的速度随偏心距的增大而增大。当偏心距为 0 mm 时,最大水平向收敛变形为 4.10 mm,竖向收敛变形为 3.04 mm;当偏心距为 1 200 mm 时,最大水平向收敛变形为 3.76 mm,竖向收敛变形为 2.78 mm,分别减小了 9.0% 和 9.2%。主要原因是拱腰处是隧道最大弯矩位置,因此中心开洞对拱腰处的削弱最为明显;而随着偏心距的增大,开洞对拱腰处的影响逐

渐减弱,因而变形也逐渐减小。

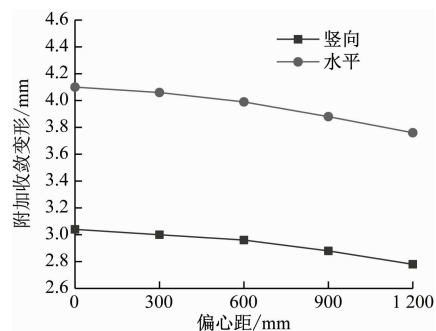


图 7 不同偏心距下主隧道特殊管片附加最大收敛变形
Fig. 7 Additional maximum convergence deformation of main tunnel special segment under different eccentricity conditions

3.2 管片内力

对钢管片来说,其最大轴力和弯矩均出现在半开洞环的 B4 块处,统计不同偏心距条件下钢管片的最大内力如表 4 所示。由表 4 可见:随着偏心距的增大,管片的最大轴力呈现逐渐减小的趋势,但是减小的幅值较小;管片的最大正弯矩是逐渐增大的,从 $e = 0$ mm 的 703 kNm 增大到 $e = 1\,200$ mm 的 767 kNm,和初始值相比较,分别增大了 10.4% 和 20.4%;管片的最大负弯矩是逐渐减小的,从 $e = 0$ mm 的 1 098 kNm 减小到 $e = 1\,200$ mm 的 996 kNm,和初始值相比,分别增大了 129.2% 和 107.9%。从钢管片受力来看,偏心距越大,对整体受力越为有利。从管片受力的角度来看,对于圆形隧道来说,拱腰处弯矩最大,因此当偏心距为 0 时,拱腰处开洞范围最大,导致其弯矩需要由相邻管片承担;随着偏心距增大,开洞范围内的弯矩逐渐减小,因此需要相邻管片承担的弯矩也逐渐减小。

混凝土管片初始状态和不同偏心距下的最大弯矩云图如图 8 所示。由图 8 可见:初始状态下,混凝土管片的最大正弯矩出现在拱底,最大负弯矩出现在拱腰处,开洞侧和非开洞侧弯矩基本呈现对称分布;而联络通道施工时,混凝土管片最大负弯矩出现在和特殊环钢管片相邻的混凝土标准环处,且显著大于初始工况,需要在结构设计时重点关注。

最大弯矩值随偏心距的变化曲线如图 9 所示。由图 9 可见:最大负弯矩随着偏心距的增大而逐渐减小,当 $e = 0$ mm 时,最大负弯矩达 522 kNm,相较初始工况增大了 51.7%;当 $e = 1\,200$ mm 时,最大负弯矩为 465 kNm,相较初始工况仅增大了

表 4 不同偏心距下钢管片最大内力

Tab.4 Maximum internal force of steel segment under different eccentricity conditions

| 偏心距/mm | 最大轴力 | | 最大正弯矩 | | 最大负弯矩 | |
|--------|---------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| | 最大轴力/kN | 增大百分比/% | 最大正弯矩/(kNm) | 增大百分比/% | 最大负弯矩/(kNm) | 增大百分比/% |
| 0 | 7 725 | 127.1 | 703 | 10.4 | 1 098 | 129.2 |
| 300 | 7 727 | 127.2 | 719 | 12.9 | 1 081 | 125.7 |
| 600 | 7 711 | 126.7 | 734 | 15.2 | 1 058 | 120.9 |
| 900 | 7 641 | 124.7 | 750 | 17.7 | 1 032 | 115.4 |
| 1 200 | 7 543 | 121.8 | 767 | 20.4 | 996 | 107.9 |

注：“增大百分比”为与初始工况相比较而增大的百分比。

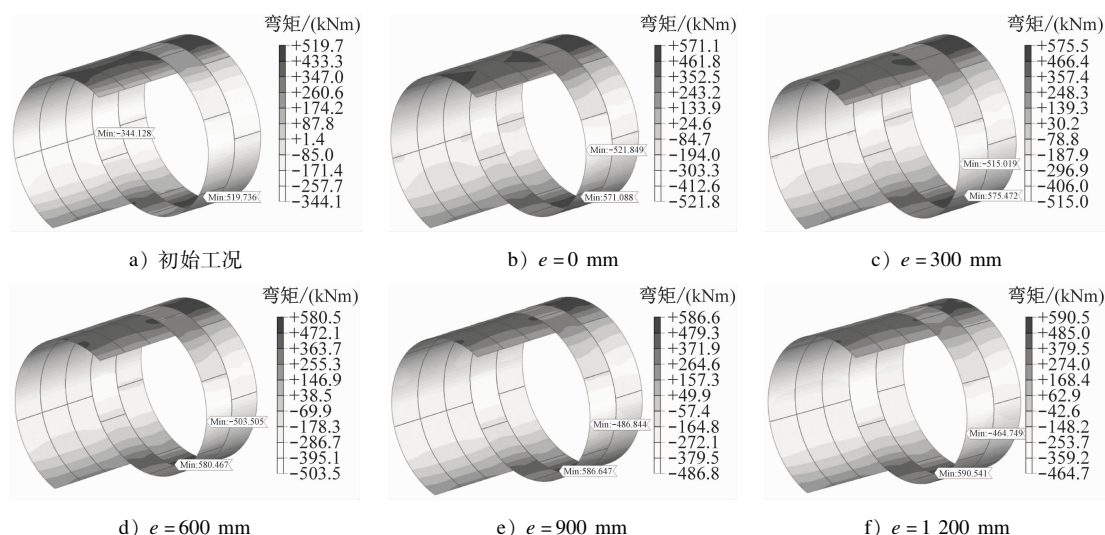


图 8 不同偏心距下混凝土管片最大弯矩云图

Fig. 8 Maximum bending moment nephogram of concrete segment under different eccentricity conditions

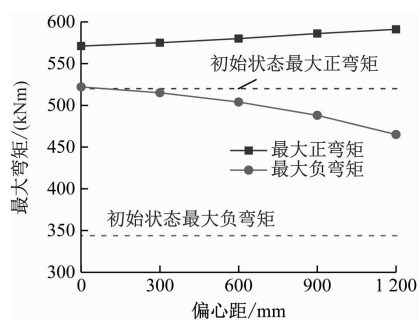


图 9 混凝土管片最大弯矩随偏心距变化曲线

Fig. 9 Curves of concrete segment maximum bending moment changing with eccentricity

35.2%。最大正弯矩相较于初始工况略有增大,且随着偏心距的增大而逐渐增大,增大幅值从 $e=0$ mm 的 9.8% 增长到 $e=1200$ mm 的 12.7%。由于负弯矩表示管片迎土面受拉,其裂缝对管片整体耐久性的影响更为显著,而且负弯矩相较于初始工况弯矩增大幅度要大于正弯矩,因此可以认为随着偏心距的增大,对混凝土管片的受力也是更为有利的。

3.3 接头分析

管片的环纵缝剪力主要通过螺栓传递,因此其大小对管片接头螺栓的设计十分关键。图 10 为不同工况下管片接缝最大剪力随偏心距变化曲线。由图 10 可见,在初始剪力基本保持不变的情况下,各工况下管片接缝的剪力均随着偏心距的增大而增大。其中盾构反力撤除阶段增大的最为显著,当偏心距为 1200 mm 时,接缝最大剪力相较初始工况增大了 97.4%。

盾构反力撤除工况下管片接缝剪力的分布云图如图 11 所示。由图 11 可见,接缝剪力最大位置出现在特殊管片第 3 环与相邻普通混凝土管片的环缝处,集中在 B2、B3 块钢管片。根据对圆形隧道的受力分析可知,正常受力状态下管片剪力最大值就位于水平轴 $\pm 45^\circ$ 区域,恰好是 B2、B3 块管片位置。而当偏心距逐渐增大时,开洞位置更加接近 -45° 位置,导致该处的剪力进一步转移到相邻块的管片接

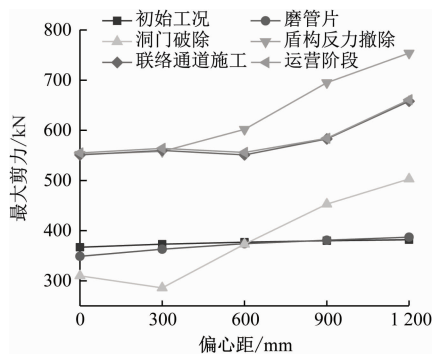


图 10 不同始发工况下接缝最大剪力随偏心距变化曲线

Fig. 10 Curves of segment joint maximum shear force changing with eccentricity under different originating working conditions

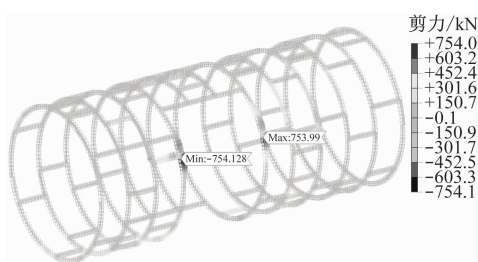


图 11 管片接缝剪力云图(盾构反力撤除工况)

Fig. 11 Nephogram of segment joint shear force (in shield reaction force removal condition)

缝处。这也就解释了为什么偏心距越大,管片接缝剪力越大。

在盾构接收阶段,不同接收推力下接缝最大剪力随偏心距变化曲线如图 12 所示。由图 12 可见,管片接缝最大剪力随着推力的增大而增大,但随着偏心距的增大而逐渐减小。综合始发和接收阶段,在小偏心条件下,盾构接收时的接缝剪力要大于始发阶段的;而在大偏心条件下,盾构接收时的接缝最大剪力要小于始发阶段的。

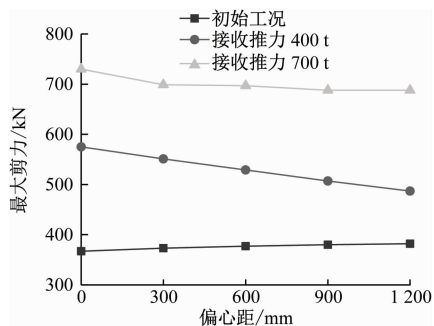


图 12 不同接收推力下接缝最大剪力随偏心距变化曲线

Fig. 12 Curves of segment joint maximum shear force changing with eccentricity under different receiving thrust conditions

4 结语

本文通过数值模拟分析了 9.0 m 级盾构隧道采用反拉式盾构法进行联络通道施工时,不同的开洞位置对主隧道管片结构内力的影响,主要研究结论如下:

1) 采用反拉式盾构法进行联络通道施工时,最不利工况发生在联络通道掘进一定距离后,即盾构反力为 0 的工况。

2) 随着联络通道偏心距的逐渐增大,就特殊管片本身而言,无论从收敛变形,还是从钢管片、混凝土管片结构内力来说都是更为有利的;但对于管片接缝剪力来说,随着偏心距增大,环缝螺栓所需承担的剪力是逐渐增大的,因此在设计过程中需要对二者受力进行平衡。

3) 在施工过程中,除了特殊管片第 3 环外,在开洞侧与特殊管片相邻的普通混凝土管片负弯矩也会显著增大,建议加强与特殊管片相邻的普通混凝土管片的配筋及接头螺栓等级。

参考文献

- [1] 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. 中国土木工程学会 2017 年学术年会论文集. 上海:中国土木工程学会, 2017: 138.
ZHU Yaohong, DONG Zibo, YIN Tiefeng, et al. Exploration on T-joint technology of micro-reinforcement mechanical method for underground space connecting channel [C]// China Civil Engineering Society. Proceedings of 2017 Annual Academic Conference of China Civil Engineering Society. Shanghai: China Civil Engineering Society, 2017: 138.
- [2] 姚燕明,黄毅,周俊宏,等. 宁波轨道交通 4 号线盾构隧道联络通道多种工法实践研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 1007.
YAO Yanming, HUANG Yi, ZHOU Junhong, et al. Construction methods for connecting passages in shield tunnel of Ningbo Rail Transit Line 4[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 1007.
- [3] 沈张勇. 机械法联络通道结构设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(11): 58.
SHEN Zhangyong. Study on structural design of mechanical method liaison tunnel[J]. Modern Urban Transit, 2019(11): 58.
- [4] 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.
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.

- [5] 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.
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.
- [6] 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.
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.
- [7] 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.
HUANG Dawei, CHEN Houhong, XU Changjie, et al. Experi-

- mental study on influences of shield machine reception on existing shield tunnels during construction of connecting channels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 784.
- [8] 张恒忠, 舒卫建, 孟绥宝, 等. 海底隧道联络通道机械法施工的结构稳定性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 181.
ZHANG Hengzhong, SHU Weijian, MENG Suibao, et al. Structure stability analysis of subsea tunnel link passage constructed with shield method[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 181.
- 收稿日期:2024-02-21 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-07-10
Received:2024-02-21 Revised:2024-03-20 Published:2024-07-10
- 通信作者:周萌,高级工程师,zhoumeng@sty.sh.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

(上接第 76 页)

- [6] 罗曼, 邹亚平, 李媛. 地铁装配式车站机电装修一体化设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(增刊 2): 24.
LUO Man, ZOU Yaping, LI Yuan. Research on the integrated design of electromechanical decoration of subway assembled station[J]. Modern Urban Transit, 2022(S2): 24.
- [7] 申樟虹, 乔志忠, 刘潇洋, 等. 城市轨道交通车站机电设备智能运维及能源管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(增刊 2): 131.
SHEN Zhanghong, QIAO Zhizhong, LIU Xiaoyang, et al. Intelligent operation and maintenance and energy management system of

electromechanical equipment in urban rail transit station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(S2): 131.

- 收稿日期:2024-03-02 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-07-10
Received:2024-03-02 Revised:2024-03-20 Published:2024-07-10
- 通信作者:葛世平,正高级工程师,Geshiping6430@163.com
- ©《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

(上接第 80 页)

2) 随着排烟口长度的增加,临界 Froude 数明显减小;当排烟口长度大于 0.100 m 时,进一步增加排烟口长度对临界 Froude 数的影响很小。

3) 临界 Froude 数同排烟口间距与火灾热释放率无关。

参考文献

- [1] LIN P, LO S M, LI T. Numerical study on the impact of gradient on semi-transverse smoke control system in tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44: 68.
- [2] 卢艳艳. 区间隧道火灾半横向排烟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
LU Yanyan. Study on smoke flow with semi-transverse smoke extraction in tunnel fire [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

- [3] 范传刚. 隧道火灾发展特性及竖井自然排烟方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.
FAN Chuangang. Studies on characteristics of tunnel fire development and natural ventilation mode using shafts[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [4] OKA Y, OKA H, IMAZEKI O. Ceiling-jet thickness and vertical distribution along flat-ceilinged horizontal tunnel with natural ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 68.

- 收稿日期:2023-05-05 修回日期:2023-06-29 出版日期:2024-07-10
Received:2023-05-05 Revised:2023-06-29 Published:2024-07-10
- 通信作者:王瑞,工程师,340350388@qq.com
- ©《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