

DOI: 10.11779/CJGE2022S2025

# 机械法联络通道 T 接部位受力特性及弱化分析

张付林<sup>1</sup>, 刘正好<sup>2, 3</sup>, 朱瑶宏<sup>4</sup>, 董子博<sup>5</sup>

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315111; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 5. 宁波用躬科技有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 机械法联络通道 T 接部位受力复杂, 安全问题突出。提出了一种联络通道管片及洞门结构, 采用 ANSYS 有限元软件建立了机械法联络通道 T 接部位数值计算模型, 分析了在 15 m 埋深条件下, 切削洞口为不同强度的正线隧道的变形及受力情况。研究结果表明: 随着切削洞口强度降低, 正线隧道位移最大值和洞口管片位移增大, 隧道应力最大值有所增大, 但影响不大。管片开洞后, 洞口中心上下的管片位移最为危险, 需做加固处理。连接处的受力主要由螺栓承担, 需要特别关注洞口管片之间螺栓连接的安全性。研究结论可为机械法联络通道设计及安全施工提供参考。

**关键词:** 联络通道; 机械法; 数值模拟; T 接头; 复合管片

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0116-04

**作者简介:** 张付林(1973—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程管理及施工技术研究工作。

E-mail: 2406754269@qq.com。

## Stress characteristics and weakening analysis of T-joint of connection passage by mechanical excavation method

ZHANG Fu-lin<sup>1</sup>, LIU Zheng-hao<sup>2, 3</sup>, ZHU Yao-hong<sup>4</sup>, DONG Zi-bo<sup>5</sup>

(1. Ningbo Rail Transportation Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 5. Ningbo Yonggong Intelligent Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

**Abstract:** The forces on the T-joint parts of connection passage by the mechanical excavation method is complex, and their safety problems are severe. A kind of connection massage segment and a portal structure are proposed. The numerical model for the T-joint of connection passage by the mechanical excavation method is established using the ANSYS finite element software. The deformation and stress of the tunnel with portal structures with different strengths at the buried depth of 15 m are analyzed. The results show that with the decrease of the strength of the portal structures, the maximum displacement of the tunnel and the displacement of the segment increase, and the maximum stress of the tunnel increases, but the increase amplitude is slight. After the opening of the segment, the displacements of the segment above and below the centre of the opening are the most dangerous and need to be reinforced. The bolts mainly bear the stress at the joint, and special attention should be paid to the safety of the bolt connection between the hole segments. The research conclusions may provide a reference for designing and safely constructing the connection passage by the mechanical excavation method.

**Key words:** connection passage; mechanical excavation method; numerical simulation; T-joint; composite segment

## 0 引言

T 接头是联接联络通道与主隧道的关键节点之一, 该节点受力复杂, 是整个工程中最薄弱的环节, 极易出现管片裂损、突涌水等严重安全事故<sup>[1]</sup>。传统联络通道多采用冻结法施工, 在围绕冻结法施工联络通道 T 接部位受力特性方面, 相关专家学者已开展了部分研究。林萍等<sup>[2]</sup>以上海长江隧道的旁通道施工为背景工程, 提出采用了一种新型土压力计及监测方法,

监测了大量冻土压力数据。邓建林等<sup>[3]</sup>利用混凝土应变计与土压计, 联合测试装置实测了不同施工阶段接收端主隧道与联络通道的管片弯矩、轴力及土压力。岳丰田等<sup>[4]</sup>在现场测试的基础上, 分析了冻结盐水温、冻土温度、冻胀压力、隧道变形的变化规律。此外, 还部分学者在围绕联络通道抗震性能、施工变形

收稿日期: 2022-12-01

\*通信作者 (E-mail: liuzh-tongji@qq.com)

控制等方面开展了部分现场测试和数值研究<sup>[5-7]</sup>。但已有研究多关注于冻结法施工联络通道。近些年来, 机械法施工联络通道因其优越的安全性、经济性以及技术先进性, 逐渐取代冻结法施工成为轨道交通建设发展趋势。然而, 目前针对机械法联络通道施工阶段 T 接部位管片的力学特性研究较为少见, 施工开挖对机械法联络通道 T 接部位管片力学影响机制不清。因此, 为了更准确地了解机械法联络通道 T 接部位在施工过程中的受力特性, 为机械法联络通道管片及洞门选取提供建议。本文在设计研制的联络通道管片及洞门的基础上, 开展了机械法联络通道 T 接部位受力特性及弱化分析研究, 研究结论可为机械法联络通道 T 接部位设计优化提供参考。

## 1 联络通道管片及洞门结构

### 1.1 钢混复合管片设计

在联络通道主隧道管片及洞门设计中, 开挖切削管片使用预制的钢混复合管片, 管片共计 6 块, 切削部分直径 2.65 m, 为混凝土结构, 无需切削部分为钢制管片构件, 并由玻璃纤维筋连接两部分结构, 组成整体, 其余管片采用钢筋混凝土结构, 如图 1 所示。为确保主隧道在始发及接收位置的线型, 联络通道范围内使用该类型钢混复合管片共 3 环, 不设楔形量。

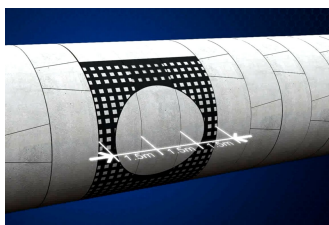


图 1 钢混复合管片示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reinforced concrete composite segment

### 1.2 可切削式洞门结构

在机械法施工中, 采用可切削式洞门结构可以减少加固产生的施工成本。可切削式洞门采用三环环宽 1500 mm 的钢砼结合的复合式管片拼装成盾构始发和接收的洞门, 如图 2 所示, 联络通道掘进机刀盘开挖区域为玻璃纤维筋混凝土结构, 其余为钢隔舱结构, 内置钢内胆采用 Q235B 钢材。施工时盾构机刀盘可直接切削混凝土通过, 不需要进行管片拆除。



图 2 机械法联络通道洞门

Fig. 2 Opening of connection passage by mechanical excavation method

## 2 T 接部位受力特性计算模型

为考虑钢-玻璃纤维混凝土管片强度变化对隧道管片的整体受力影响, 通过改变钢-玻璃纤维混凝土管片的弹性模量和应力-应变关系来模拟钢-玻璃纤维混凝土管片强度变化对隧道管片的整体受力情况的影响。

### 2.1 有限元建模

本节根据复合管片的结构尺寸, 利用 ANSYS 有限元软件进行建模。模型采用荷载结构法, 将土体等效为土体弹簧 combin39, 隧道管片使用实体单元 Solid185 单元, 模型实体单元本构采用多线性随动强化准则对混凝土管片进行定义。为分析隧道管片在土荷载作用下, 整体结构的受力情况, 模型采用分离式建模形式, 将高强混凝土管片和钢-玻璃纤维混凝土管片分别建立, 总模型共建立 5 个隧道管片, 再利用接触单元 conta173 和目标单元 target169 将其连接到一起, 进而分析管片之间的相互作用影响。

### 2.2 边界条件

模型采用非线性弹簧单元 combin39 取代实体土层的方式, 建立四周土体对隧道管片的边界位移约束, 为更好地模拟出两端管片对模型管片的约束影响, 对隧道两端的管片边界上采取固定约束的形式。在确保实体不变的前提下, 施加等效土体压力, 如图 3 所示。

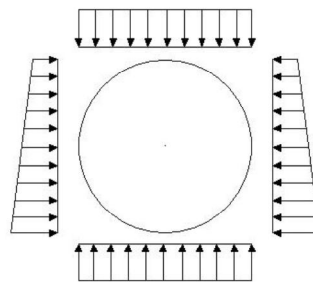


图 3 隧道管片外荷载施加

Fig. 3 External loads applied on tunnel segments

### 2.3 模拟工况

研究以宁波轨道交通联络通道试段为背景, 联络通道埋深 15~22 m, 均处于黏土性质土层中, 渗透性低, 自稳性较差, 且土体较软。本文以埋深 15 m 联络通道为例, 通过改变钢-玻璃纤维混凝土管片的弹性模量和应力-应变关系来模拟钢-玻璃纤维混凝土管片强度变化, 来模拟计算隧道管片整体受力情况的变化, 研究玻璃纤维混凝土管片在 C50 强度、C35 强度、C25 强度下切削洞口变形及隧道管片的整体受力情况。

## 3 数值计算结果分析

采用 ANSYS 有限元软件自带的静力求解器进行

结构受力分析计算。分析切削洞口为不同强度的正线隧道，处在 15 m 深土层围压下的变形以及受力情况。

### 3.1 切削洞口位移分析

图 4 为切削洞口为不同强度下正线隧道的位移矢量图及位移云图，由图可知，切削洞口为 C50 强度下位移最大值最小，为 1.22594 mm；随着切削洞口强度降低，正线隧道位移最大值一直在增大，但是变化不大。切削洞口为 C25 强度下位移最大值为 1.28504 mm。这说明改变洞口的强度值对正线隧道整体变形有影响，但是影响不大。另外，降低切削洞口强度会使洞口处的位移增大，但位移最大值仍出现在隧道顶部和底部处，这说明在 15 m 范围深的地层内改变切削洞口管片的强度对于隧道的变形影响很小，这对于复合管片强度要求可以提供一定的参考价值。

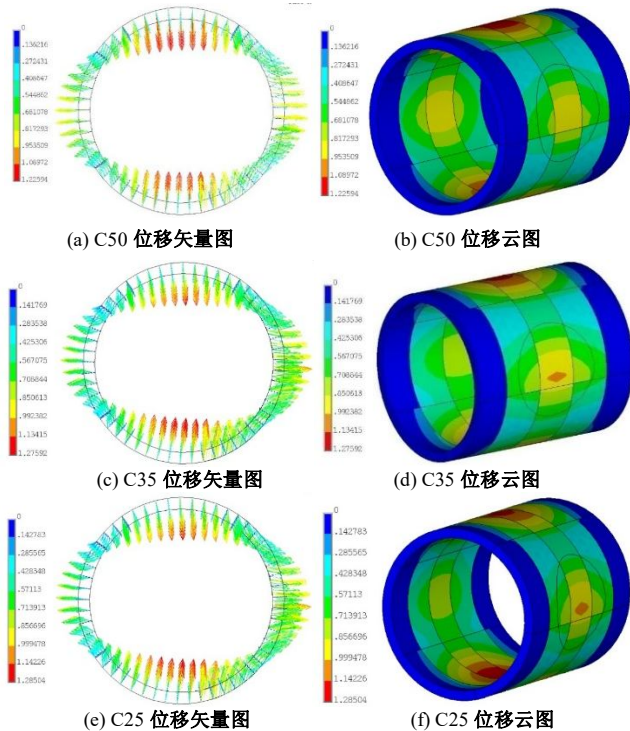
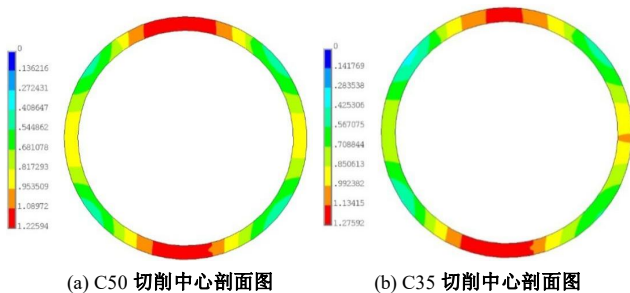


图 4 切削洞口为不同强度下正线隧道的位移矢量图及位移云图

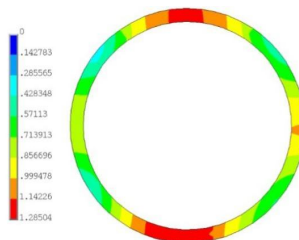
Fig. 4 Displacement vectors and nephograms of tunnel under different strengths of cutting openings

图 5 为切削洞口不同强度下正线隧道的切削中心剖面位移图，由图可知，降低切削洞口强度后，洞口管片位移增大。但是切削洞口强度变化对正线隧道的切削中心剖面位移影响量较小，结构较为安全。



(a) C50 切削中心剖面图

(b) C35 切削中心剖面图



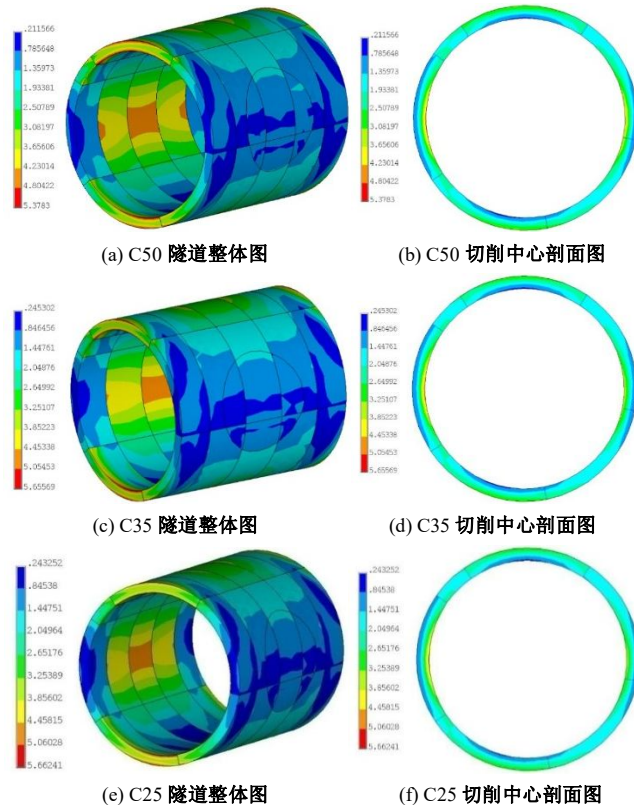
(c) C25 切削中心剖面图

图 5 正线隧道的切削中心剖面位移图

Fig. 5 Displacement diagrams of cutting center section of tunnel

### 3.2 切削洞口应力分析

图 6 为切削洞口在不同强度下正线隧道的应力云图，由图可知，随着切削洞口混凝土强度降低，隧道应力最大值有所增大，但增幅较小。其中当切削洞口混凝土强度为 C25 时，应力最大值为 5.66241 MPa，不足以破坏混凝土，但是由于管片间采用螺栓连接，所以需要注意是否会引起螺栓的变形过大。



(e) C25 隧道整体图

(f) C25 切削中心剖面图

图 6 切削洞口为不同强度下正线隧道的应力云图

Fig. 6 Stress nephograms of tunnel under different strengths of cutting openings

### 3.3 洞口切除后正线隧道位移及应力分析

图 7, 8 为洞口切除之后正线隧道在深层土体内部的状态分析，由图 7 可知，当正线隧道开洞后，其位移值变化较大，最大值达到 2.23376 mm。其中最大值出现在洞口中心上下的管片处，说明该处的管片最为危险，特别要注意该管片的螺栓连接是否能达到强度要求。由图 8 可知，洞口周围出现应力集中的情况，



最大应力达到 14.6526 MPa。这说明若是洞门敞开则会比较危险, 说明洞口需要做加固处理, 特别是洞口处连接管片之间的螺栓, 需要引起注意, 防止出现较大的管片开裂或者其他变形情况。

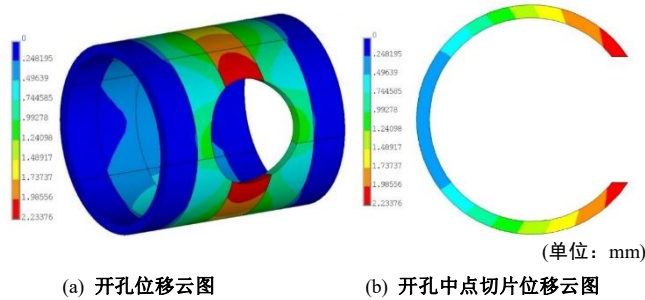


图 7 洞口切除后正线隧道的位移云图

Fig. 7 Displacement nephograms of tunnel after removal of entrance

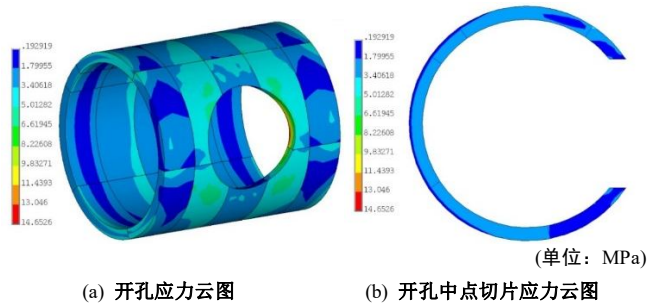


图 8 洞口切除后正线隧道的应力云图

Fig. 8 Stress nephograms of tunnel after removal of entrance

综上, 管片开洞有一定的危险, 从混凝土强度上看, 管片完成满足要求, 但是需要特别注意管片之间的连接, 连接处的受力主要由螺栓承担, 特别需要关注洞口管片之间螺栓连接的安全性。

## 4 结 论

本文采用 ANSYS 有限元软件分析了在不同强度的切削洞口下, 机械法联络通道正线隧道的变形及受力情况。主要得到 3 点结论。

(1) 随着切削洞口强度降低, 正线隧道位移最大值和洞口管片位移增大。改变洞口的强度值对正线隧道整体变形和洞口管片位移有影响, 但是影响不大。

(2) 随着切削洞口混凝土强度降低, 隧道应力最大值有所增大, 但增幅较小。其中, 当切削洞口混凝土强度为 C25 时, 应力最大值为 5.66241 MPa, 不足以破坏, 但需要注意是否会引起螺栓变形过大。

(3) 管片开洞后, 洞口中心上下的管片位移最为危险, 洞口需要做加固处理。连接处的受力主要由螺栓承担, 需要特别关注洞口管片之间螺栓连接的安全

性。

## 参考文献:

- [1] HUANG Yi, LIU Zheng-hao, MA Xian-feng, et al. Research on cutting test and numerical simulation of segments used in connection passage with mechanical excavation method[J]. Tunnel Construction, 2022, **42**(S1): 93 - 103.
- [2] 林 萍, 叶冠林, 陈 楠, 等. 冻结法施工旁通道的冻土压力现场监测方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(8): 2555 - 2560. (LIN Ping, YE Guan-lin, CHEN Nan, et al. In-situ monitoring method for frozen soil pressure during cross passage construction by freezing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(8): 2555 - 2560. (in Chinese))
- [3] 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 Jian-lin, HE Zhai-bing, LI Hai-bo, 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))
- [4] 岳丰田, 仇培云, 杨国祥, 等. 复杂条件下隧道联络通道冻结施工设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(5): 660 - 663. (YUE Feng-tian, QIU Pei-yun, YANG Guo-xiang, et al. Design and practice of freezing method applied to connected aisle in tunnel under complex conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 660 - 663. (in Chinese))
- [5] HU Xiang-dong, PI Ai-ru. Frozen soil properties for cross passage construction in Shanghai Yangtze River Tunnel[C]// Proceedings of the 6th International Symposium (IS-SHANGHAI 2008). Shanghai, 2008.
- [6] YAN Q X, ZHANG J C, CHEN W Y, et al. Dynamic characteristics of intersection structure consisting of twin shield tunnels and a transverse passage[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, **23**(11): 4824 - 4835.
- [7] ZHANG Jun-chen, YAN Qi-xiang, SUN Ming-hui, et al. Experimental study on the vibration damping of two parallel shield tunnels connected by an assembled transverse passage[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, **107**: 103659.