

机械法联络通道施工关键技术数值模拟

李东洋

(中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司,北京 101100)

摘要:机械法联络通道施工技术具有施工质量好,对环境扰动小,后期沉降小,不对结构产生破坏等特点,因此逐渐被应用到公路、轨道交通等交通施工领域。目前,国内外对机械法、盾构法联络通道施工技术在城市轨道交通建设中的应用研究不多。文章对城市轨道交通建设项目中机械法联络通道施工技术关键工序进行分析,以苏州6号线工程为例,利用有限元软件对地表沉降、深层土体沉降、深层土体水平位移、隧道位移进行模拟分析,并提出几项机械法联络通道施工建议。模拟结果表明:1)机械法联络通道开挖对隧道周边环境的影响范围为0~20 m,其地表沉降影响值约为18 mm;2)联络通道顶面出现较大的沉降,底面出现较大的隆起现象,主隧道开口处也呈现出上部洞口沉降、下部洞口隆起的现象。本文成果可为城市轨道交通联络通道施工方法提供一点参考。

关键词:机械法联络通道;掘进施工;沉降分析;有限元模拟

中图分类号:U455.4

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)03-0023-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.03.032

Analysis on key technologies and numerical simulation of connection aisle construction using mechanical method

LI Dongyang

(Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., of China Railway 16th Bureau Group, Beijing 101100, China)

Abstract: The connection aisle construction technology of mechanical method has the characteristics of good construction quality, small disturbance to the environment, small settlement in the later stage, and no damage to the structure, so it is gradually applied to the transportation construction fields such as highway and rail transit. At present, there are not many researches on the application of connection aisle construction technology of both mechanical method and shield method in the construction of urban rail transit at home and abroad. At first, the key processes of mechanical method connection aisle construction technology in urban rail transit transportation construction project are analyzed, and then Suzhou Line 6 project is taken as an example, finite element software is used to simulate and analyze the surface settlement, deep soil settlement, deep soil horizontal displacement and tunnel displacement, and finally several suggestions for the construction of mechanical method connection aisle are proposed. The simulation results show that: 1) The influence range of mechanical method connection aisle driving on the surrounding environment of the tunnel is 0~20 m, and the influence value of surface settlement is about 18 mm; 2) The top surface of the connection aisle has a large settlement, the bottom surface has a large uplift, and the opening of the main tunnel also shows such phenomenon as settlement of the upper opening and uplift of the lower opening. The results can provide a certain reference for construction method of urban rail transit connection aisle.

Key words: connection aisle using mechanical method; driving construction; finite element simulation; settlement analysis

在公路、水路和轨道交通工程机械法联络通道建设中, 受限于既有隧道空间小、通道结构复

收稿日期: 2023-10-13

作者简介: 李东洋(1988—), 女, 工程师, 从事城市轨道交通建设施工工作。

杂、装备研发难度大等原因,顶管、盾构等隧道施工工法仍存在一定的不足。机械法开挖联络通道能够提升施工效率和安全性,特别是在城市轨道交通不良地层施工时,其优点更加突出,并在部分国家和地区开展了工程实践^[1]。同时,机械设备使用寿命长,可周转使用,施工过程投入相对较低,因此联络通道越多,单座施工成本越低,经济效益越加显著。

机械法联络通道安全性高,全断面支护,没有临空面,采用刀盘直接切削管片进出洞技术,从根本上解决施工风险问题^[2]。其主要特点包括节约工期、成本低:根据国外经验及数据分析,单条工期(含施工准备)不超过 1 个月;采用全机械工法开展联络通道施工,将取消费用高昂的冷冻工艺,初步估算采用盾构或顶管法开展联络通道施工,工程造价将节约 30%。但机械法联络通道施工应用仍存在诸多局限,目前该工法多应用于地层较好的硬岩地层,在施工联络通道前进行开挖土体加固。黄大维等^[3]开展了盾构机接收对已建盾构隧道影响试验研究,认为在地层中纵向变形分析时需要考虑横断面变形的影响;黄毅等^[4]开展了管片切削试验与数值模拟研究,结果显示切削对同一环的螺栓影响较大,切削洞口管片强度对隧道变形影响很小;丁修恒等^[5]进行了隧道系统地震荷载响应分析,研究表明在地震荷载作用下刚性接头受力远大于半刚性工况。关于机械法联络通道技术在城市轨道交通隧道中的成熟应用案例较少。因此,本文以苏州地铁 6 号线临顿路至苏州大学站工程为例,通过实例分析和有限元软件进行数值模拟,重点对掘进施工关键技术和施工过程中的沉降情况进行分析研究,以期机械法联络通道技术在城市轨道交通隧道建设中的应用提供一定的参考。

1 机械法联络通道施工关键技术

为避免集中荷载引起主隧道结构变形,围绕机械法联络通道建造技术施工工艺,开展掘进施工关键技术研究^[4]。联络通道掘进机掘进施工关键技术主要包括首环衬砌管节安装、始发切削混管片、衬砌管片运输、衬砌管片拼装与管节安装

和施工测量导向与壁后注浆等内容。

1.1 首环衬砌管节安装

1.1.1 盾构法

在首环衬砌管片安装前,先将型钢置于盾壳内,且其厚度应小于盾尾间隙,以确保盾壳内管片位置适合,并在负环管片拼装完成后进行拆除。负环管片采用可重复使用钢环进行拼装,钢环无楔形量。首环衬砌管片采用错缝拼装,封顶块(F)位于右上方,以便于管片拼装,如图 1 所示。管片与始发托架之间存在 70 mm 宽的间隙,为确保管片不下沉,在管片脱出盾尾时,需及时安放钢楔块,每环管片安放 4 个(左右各两个)。在安放过程中,应避免用力敲击导致管片上浮^[6]。

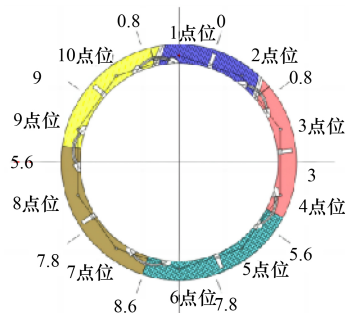


图 1 首环衬砌管片拼装点位

1.1.2 顶管法

为便于盾构主机的拆除,首环管节进行特殊设计,环宽取 450 mm,接缝处为斜口设计。该管节为钢结构构件,起连接盾构主机及衬砌的作用。为确保管节在始发托架上顺利行走,在托架上方黏贴垫板,垫板材料宜采用聚四氟板。

1.2 始发切削混管片

掘进机在切削管片时,掘进参数按照管片切削试验结果进行适当调整。掘进机在始发过程中切削管片的推力为 2 000 ~ 3 000 kN,扭矩控制为 300 ~ 550 kN·m。切削过程中需采取必要措施改良渣土,降低扭矩并防止螺旋机喷涌。试验段选用的改良剂为膨润土-水玻璃双液浆。浆液通过土仓胸板的预留注浆孔注入,浆液混合口应尽量接近注入口,以免管路堵塞。

1.3 衬砌管片运输

管片从正线隧道运至联络通道,其运送路线呈 L 形结构,因此常规的管片运输设计很难达到施工要求。考虑到联络通道管片直径较小,内部

空间有限，很难在联络通道内安装双梁，但也正因管片直径小、厚度较低，使得单块管片的质量较轻，因此可将管片运输分为两个部分，正线隧道内管片采用单梁运输，联络通道内采用人工运输。其中，人工运输是在隧道内用角铁焊制一条轨道，并在轨道上放置一个平板车。运输时将管片吊运至平板车上，由人工推至拼装机处。

1.4 衬砌管片拼装与管节安装

由于联络通道管片长度为 0.55 m，而隧道长度并非 0.55 的倍数，需增加不同厚度调节环，使得联络通道的管片洞门钢环处管片位置正好合适。考虑到错缝拼装内力大，通缝拼装内力较小，可拼装自由度相对较多，有利于管片的安装，因此在受力允许的状态下，可采用“小通缝”进行拼装。小通缝是指两个管片环之间允许有 1~2 条通缝，相应地，3 条及 3 条以上的通缝定义为“大通缝”，而大通缝的情况是绝对不允许的。

1.5 施工测量导向与壁后注浆

1.5.1 掘进施工测量导向

联络通道作为地铁区间上行线与下行线的连接隧道，与地铁正线隧道呈 T 字形。其作业空间狭小，自动测量导向系统因测站点安装于后支撑体系上，受盾构推力作用产生位移，精度不满足施工要求^[7]。测量技术作为盾构隧道施工的眼睛，其测量结果的准确性直接影响着项目工程是否能够顺利进行。在盾构隧道施工中，为确保各开挖面正确贯通和符合设计要求，随着隧道施工掘进，实时测定当前盾构机与设计轴线的偏差。

1.5.2 壁后注浆

由于联络通道掘进机较小，且内部空间有限，

采用二次注浆的形式代替同步注浆。联络通道管片预留注浆孔，采用双液浆进行同步注浆。浆液需具有高密度、充填性良好、体积收缩率低、浆液不分层、不离析、假固性良好、不易流失、初凝时间短、强度较高等优良性质^[8-9]。联络通道隧道施工中应加强监测，如遇土体沉降和地面形变，应及时采取措施进行注浆。实时掌握联络通道在施工过程及施工结束后对周边环境与建筑物的影响，及时采取必要技术手段确保安全。

2 机械法联络通道施工有限元模拟

2.1 计算模型

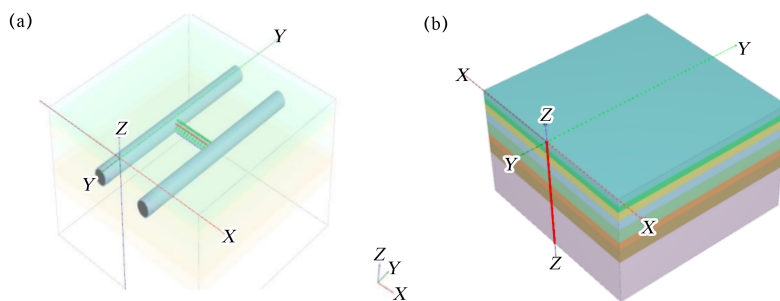
苏州地铁 6 号线临顿路至苏州大学站工程，联络通道主隧道间隔为 17 m，其中主隧道长度为 80 m，管片厚度为 0.35 m，外直径为 6.2 m，主隧道距离土表面 12.3 m。采用有限元软件 Plaxis3D 建立三维有限元模型。将模型长宽均设置为 80 m，深度为 50 m，初始地下水位设置在地表处；小隧道外直径为 3.15 m，位于主隧道之间 40 m 处，管片厚度为 0.25 m，属于对称设置。土体选择 HSS 本构模型，具体土层参数如表 1 所示。

采用等效刚度法模拟既有隧道，假定混凝土管片在基坑开挖过程中一直处于弹性变形阶段。根据相应的研究成果，定义盾构隧道横向刚度有效率为 75%，用以反映管片间接头存在对既有隧道变形产生的影响。弹性模量取为 C50 混凝土模量值 (50 GPa) 的 75%，即 37.5 GPa，泊松比取为 0.25。隧道模型与土层模型如图 2 所示。

机械法联络通道施工有限元模拟的施工步骤如下。

表 1 HSS 本构模型土层参数

土层	名称	有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	割线模量/MPa	切线模量/MPa	初始剪切模量/MPa	剪应变/10 ⁻⁴	卸载再加载泊松比	侧压力系数
1	黏土	29.9	12.7	0	2.2	2.6	30.0	1	0.2	0.78
2	淤泥	14.8	12.1	0	3.4	3.9	59.0	1	0.2	0.79
3	粉质黏土	21.3	17.4	0	4.4	4.8	60.0	1	0.2	0.70
4	淤泥质粉质黏土	20.7	16.8	0	6.5	7.0	71.0	1	0.2	0.71
5	黏土	23.7	15.9	0	5.0	5.5	60.0	1	0.2	0.73
6	粉砂	9.0	30.0	0	5.1	5.0	75.1	1	0.2	0.83
7	粉质黏土	29.6	17.4	0	7.5	7.6	80.1	1	0.2	0.70



(a) 隧道模型; (b) 土层模型

图 2 隧道与土层模型

(1) 初始阶段: 利用侧压力系数变化过程生成初始应力, 初始阶段采用程序默认设置。

(2) 主隧道生成: 直接生成主隧道, 并将主隧道中的土体冻结, 完成主隧道的施工。

(3) 联络通道施工(推进第一环): 消除主隧道施工引起的位移值, 模拟盾构机在土体内的推进, 冻结需要开挖的土体, 激活外侧的钢套筒, 同时激活该段面的面收缩, 激活外侧的注浆荷载, 完成一环施工模拟。

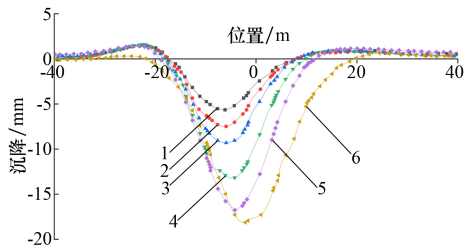
(4) 联络通道施工(推进第二环): 冻结需要开挖的土体, 激活对应外侧的钢套筒, 冻结上一段面的面收缩和注浆荷载, 同时激活该段面下的面收缩与注浆荷载, 完成第二环的施工。

(5) 同上一步的模拟措施相同进行接下来开挖模拟, 直到开挖连接到另一侧的主隧道。

(6) 冻结钢套管, 激活联络通道的管片, 完成联络通道的施工模拟。

2.2 地表沉降分析

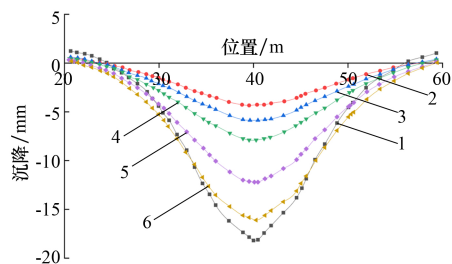
取联络通道中心对应的地表点进行分析, 其中联络通道由左侧开挖至右侧。联络通道地表纵向(x 方向)沉降如图 3 所示。由图 3 可知: 随着联络通道的开挖, 地表沉降值在不断增大, 且最大沉降一直向右侧移动, 达到 18.12 mm。



1—开挖至 6 m; 2—开挖至 7.5 m; 3—开挖至 9 m;
4—开挖至 13 m; 5—开挖至 15 m; 6—开挖结束。

图 3 联络通道地表纵向沉降

取联络通道开挖时最大沉降点进行分析。不同联络通道开挖距离下地表横向沉降曲线如图 4 所示。由图 4 可知: 随着联络通道的开挖, 地表沉降不断增大, 最大值达到 18.12 mm, 开挖影响区域在隧道中心左右 20 m 范围内, 地表沉降曲线在联络通道上方呈现一个下凸的峰值。



1—开挖结束; 2—开挖至 6 m; 3—开挖至 7.5 m;
4—开挖至 9 m; 5—开挖至 13 m; 6—开挖至 15 m。

图 4 联络通道地表横向沉降

2.3 深层土体沉降分析

分别取 $x = 0$ m 处的截面与 $y = 40$ m 处的截面进行深层土体的沉降分析, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: $x = 0$ m 处截面最大沉降值达到 43.78 mm, 联络通道上部土体发生沉降, 下部土体由于突然卸荷发生轻微隆起。 $y = 40$ m 处截面最大沉降值达到 44.5 mm, 联络通道下部土体呈现隆起趋势, 联络通道两端(两个主隧道附近)的隆起值较大, 中部的隆起值较小。

2.4 深层土体水平位移分析

图 6 为联络通道开挖结束后不同位置处深层土体的水平位移。由图 6 可知: 联络通道开挖使得其附近土体产生较大的水平位移, 且呈现突增的峰值, 最大值达到 23.25 mm; 同时, 联络通道两侧的水平位移最大, 且深层水平位移呈现出关于联络中心的对称。

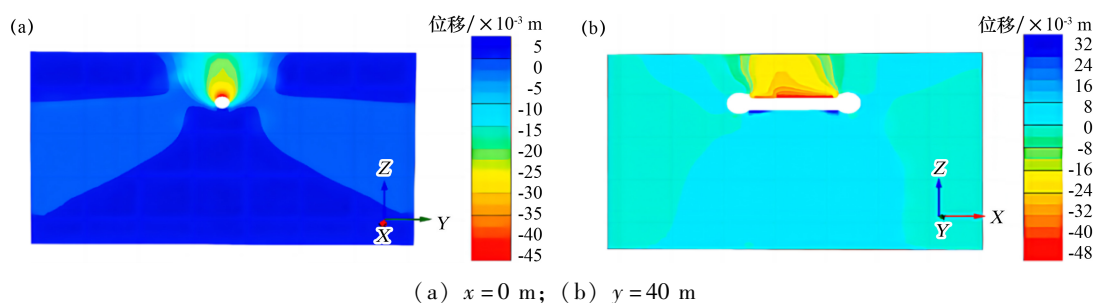


图 5 联络通道中部横向剖面、联络通道剖面土体沉降

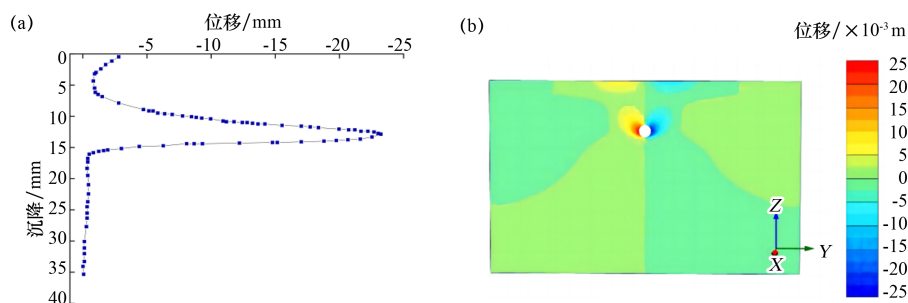


图 6 深层土体水平位移

2.5 隧道位移分析

图 7 为开挖结束后隧道竖向位移云图。由图 7 可知：联络通道顶面表现出较大的沉降，而底面出现较大的隆起现象。顶面的最大沉降发生在联络通道的中部，而底面的最大隆起出现在联络通道两端。图 8 为联络通道中心剖面图下的沉降云图。由图 8 可知：联络通道底部出现隆起，且呈现出两头大中间小的趋势。联络通道上部表现为沉降，且呈现出中间大两头小的趋势。图 9 为联络通道中间横向剖面。由图 9 可知：联络通道上部表现出沉降，下部表现出隆起。

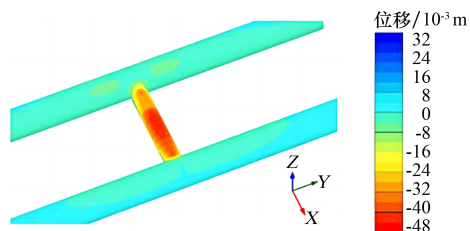


图 7 开挖结束后隧道竖向位移云图

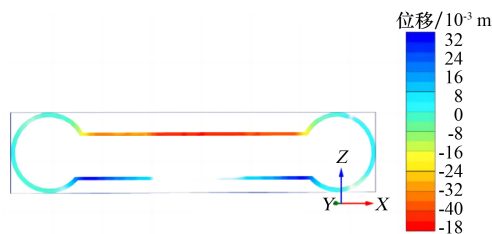


图 8 联络通道剖面隧道沉降值示意

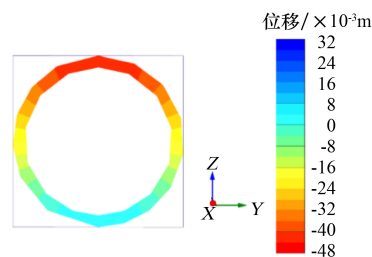


图 9 联络通道中部横向剖面隧道沉降值示意

3 结论与建议

机械法联络通道所引发的地表沉降原因复杂多变，如隧道掘进时的推进压力、推进速度、注浆量、注浆时间等，其中最为基本的因素之一为地层条件影响。通过地表沉降、深层土体沉降、深层土体水平位移、隧道位移数值模拟分析，得出如论如下。

(1) 机械法联络通道开挖对隧道周边环境的影响范围为 0 ~ 20 m，地表沉降影响值约为 18 mm。从隧道位移模拟结果可知，联络通道顶面表现出较大的沉降，底面出现较大的隆起现象。其中顶面的最大沉降发生在联络通道的中部，底面的最大隆起出现在联络通道两端。此外，主隧道开口处也呈现出上部洞口沉降下部洞口隆起的现象。

(下转第 33 页)

(1) 无隔离桩防护措施下的小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工会引起地表横向沉降变形,施工期间很可能危及铁路线路运营安全。而设置隔离桩防护措施下的小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工也会引起地表横向沉降变形,但未超出桥梁结构变形控制标准。因此,设隔离桩防护措施更有利于施工期间铁路线路的运营安全。

(2) 将有无隔离桩防护措施的数值计算结果进行对比,发现隔离桩防护措施分担了一部分盾构隧道施工对铁路桥梁结构的不利影响,起到了一定的挡土与阻隔效用,有效降低小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工引起的铁路桥桩变形及其附加内力。

(3) 将监测数据与数值计算结果进行对比,发现数值计算结果准确性高,小半径盾构隧道穿越铁路桥梁施工期间隔离桩防护措施能有效保障铁路线路的运营安全,隔离桩防护措施有效。

参考文献:

[1] 董齐蕾. 浅析地铁盾构法施工技术[J]. 现代物业

(中旬刊),2018(4):181.

- [2] DONG Y Q, DING Z, JIANG Y, et al. Measured analysis on surface deformation and influence of cutter torque for twin shield tunnelling in silty sand[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022(3):301–320.
- [3] 郭社军,郝晓龙,舒国明. Peck 公式在小半径曲线隧道沉降分析的应用[J]. *公路*, 2020, 65(8):405–408.
- [4] 吴镇,张秀山,王磊. 小半径曲线叠落盾构隧道下穿京沪高铁隔离桩设置参数研究[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(9):88–94.
- [5] ZHAO B Y, WANG X P, ZHANG C, et al. Structural integrity assessment of shield tunnel crossing of a railway bridge using orthogonal experimental design [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020(114):313–324.
- [6] 范海龙. 浅谈地铁盾构机的选型[J]. *机械工程与自动化*, 2013(5):223–224.
- [7] 黄健. 盾构机的选型依据[J]. *工程机械与维修*, 2008(12):130–131.
- [8] 王梦恕. 不同地层条件下的盾构与 TBM 选型[J]. *隧道建设*, 2006(2):1–3;8.

(上接第 27 页)

(2) 通过数值模拟对沉降的关键部位和关键点进行重点关注,并采取合适的措施减少沉降形变。数值模拟虽然在施工过程中为地表沉降的发展趋势预测提供了数据支撑,但由于实际工程中各个因素的叠加,其精准度不高,因此需要进行实时监测和控制分析,以确保隧道施工的安全。

(3) 机械法联络通道施工过程需要设置试验段并进行现场监测,对每一个施工段都需要进行试验和施工参数的动态调整,并结合试验结果对整体施工参数进行调整优化。运用优化施工参数的方法,进一步控制联络通道隧道施工时的沉降,减小与主隧道间的不均匀沉降。

参考文献:

- [1] 丁修恒. 地铁区间联络通道盾构法修建关键技术[J]. *建筑施工*, 2019, 41(4):667–671.
- [2] 李建强,梁鑫勇,朱金贤. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降的研究[J]. *工程建设*, 2023, 55(2):29–35.
- [3] 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/OL]. *岩土工程学报* [2023–08–18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20230816.1741.006.html>.

- [4] 黄毅,刘正好,马险峰,等. 机械法联络通道管片切削试验与数值模拟研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(S1):93–103.
- [5] 丁修恒,文毅然,郑明飞,等. 机械法联络通道-隧道系统地震荷载响应分析[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(S2):193–200.
- [6] 柳献,高一民,张姣龙,等. 机械法联络通道施工中主隧道的破洞响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5):951–960.
- [7] 白中坤,李鹏,王祥祥,等. 机械法联络通道特殊衬砌环结构的有限元计算分析[J]. *工程技术研究*, 2023, 8(1):18–21.
- [8] 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(S1):178–188.
- [9] 孙海明,汤友生,鲜少华,等. 基坑开挖对邻近多管隧道结构变形的影响[J]. *工程建设*, 2023, 55(4):13–18.