

海底隧道联络通道机械法施工的结构稳定性分析

张恒忠¹ 舒卫建² 孟绥宝³ 俞然刚² 骆超锋³ 张连震² 周耀升³
王澜涛³ 石宝星³ 王永辉³

(1. 上海地铁咨询监理科技有限公司, 200032, 上海; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 266580, 青岛;

3. 中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司, 214104, 无锡//第一作者, 高级工程师)

摘要 青岛地铁8号线海域段盾构隧道联络通道施工具有埋深深、水压高、围岩破碎等特点。使用FLAC 3D软件, 对联络通道顶管法施工过程中主隧道及联络通道的力学响应和结构稳定性进行了分析。结果表明: 由于联络通道的施工, 主隧道的变形由对称转为不对称, 变形和应力明显增大; 在主隧道与联络通道连接处发生明显的应力集中, 尤其是高水压条件下, 必须做好加固和防水措施; 联络通道的开挖对始发隧道的影响大于接收隧道, 施工前可根据主隧道的地质状况确定始发端; 洞口破除处的主隧道内架设支撑可有效减小结构变形; 洞口破除和支撑拆除两个工况下, 主隧道结构变形和受力变化明显, 施工中应加强变形监测。

关键词 海底隧道; 联络通道; 机械法施工; 数值模拟; 稳定性

中图分类号 U455.44; U456.3⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.036

Structure Stability Analysis of Subsea Tunnel Link Passage Constructed with Shield Method

ZHANG Hengzhong, SHU Weijian, MENG Suibao, YU Ran'gang, LUO Chaofeng, ZHANG Lianzhen, ZHOU Yaosheng, WANG Lantao, SHI Baoxing, WANG Yonghui

Abstract Qingdao Metro Line 8 sea section shield tunnel link passage construction has characteristics of large buried depth, high water pressure and broken surrounding rock. FLAC3D is used to analyze the mechanical response and structure stability of the main tunnel and link passage during pipe jacking method link passage construction. Research results show that: due to the construction of link channel, the deformation of main tunnel changes from symmetrical to asymmetrical, and the deformation and strain increase significantly. Obvious strain concentration occurs at the connection between main tunnel and link passage, especially under the condition of high water pressure, reinforcement and waterproof measures must be taken. Link passage excavation

has greater impact on starting tunnel than on receiving tunnel, and the starting end can be determined by main tunnel geological condition before construction. Setting up supports in main tunnel at portal breaking can effectively reduce the structural deformation. Under the two working conditions of portal breaking and support removal, main tunnel structure deformation and stress change are obvious, deformation monitoring should be strengthened during the construction.

Key words subsea tunnel; link passage; shield method construction; numerical simulation; stability

First-author's address Shanghai Metro Consulting and Supervision Technology Co., Ltd., 200032, Shanghai, China

0 引言

地铁联络通道是设置在两条主隧道之间, 起到联通、排水及防火等作用的通道^[1]。联络通道的施工主要采用矿山法, 同时辅以冻结或注浆来加固。这种传统施工方法具有不占用地面交通、适用面广、技术成熟等优点^[2], 但是存在施工速度慢、造价高、工后沉降大、对周边环境的影响大、施工过程中安全隐患较多等缺点^[3]。机械法联络通道施工是使用顶管机或盾构机进行联络通道的开挖, 将钢管片和预制混凝土管片形成的拼装式结构作为联络通道结构主体。该方法施工速度快、机械化程度高、工后沉降小、安全性高^[4], 其应用范围越来越广。例如, 世界首条盾构法联络通道——宁波轨道交通联络通道已变为现实^[5]。

联络通道的开挖往往会引起主隧道的沉降和收敛, 在二者的连接部位, 还会发生应力集中现象, 隧道结构可能会因此发生破坏^[6]。文献[7]开展足尺试验, 发现联络通道破洞过程是管片和内支撑共同受力的过程, 内支撑在切削过程中承担主要的荷载变化。文献[8]采用有限元分析方法, 探究了不

均匀变形对主隧道和联络通道的影响程度。文献[9]使用FLAC 3D 软件研究了主洞和联络通道在不同施工方法以及不同开挖进尺下主洞与联络通道交叉段的沉降及应力演化过程。文献[10]进行了隧道开洞的三维分析,讨论了开洞过程的应力影响范围和可能损坏的位置。

目前,机械法联络通道多应用于软土地层,埋深也比较浅,而在埋深深的海底隧道中的应用还非常少。因此,有必要对此进行探究。本文依托青岛地铁8 号线(以下简为“8 号线”)海域段盾构隧道联络通道工程,针对联络通道埋深深、水压高、穿越地层破碎等特点,使用FLAC 3D 软件对联络通道的开挖过程进行数值模拟,探究不同工况下,主隧道、联络通道以及管片和支撑结构力学响应,并对结构稳定性进行分析,为今后联络通道机械法施工积累经验。

1 工程概况

8 号线大洋站—青岛北站站东侧过海段区间共有 6 条联络通道(见图 1),其中 9[#]、10[#]、11[#] 联络通道采用顶管法开挖。9[#] 联络通道(里程为左线 DK44+641.672,右线 DK44+635.000)埋深最深为 41.4 m,长度为 25 m,开挖直径为 3 290 mm,管片厚度为 0.25 m。联络通道纵断面图如图 2 所示。

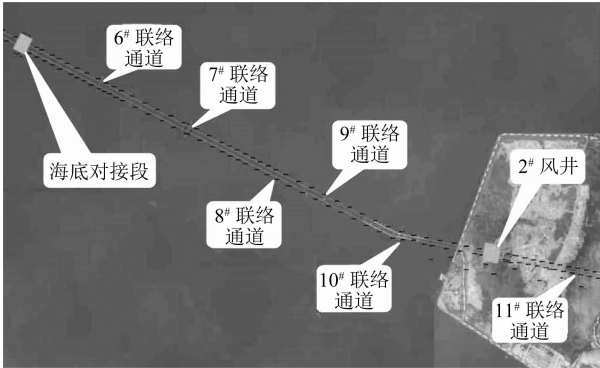


图 1 8 号线大洋站—青岛北站站区间联络通道图
Fig. 1 Diagram of Line 8 Dayang Station-Qingdao North Railway Station interval link passage

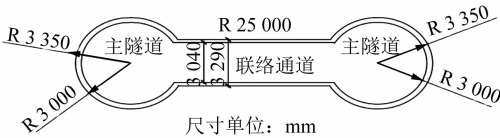


图 2 联络通道纵断面图
Fig. 2 Vertical section of link passage

联络通道穿越岩层为较破碎的强风化泥质粉砂岩和中风化火山角砾岩(见图 3),围岩等级为Ⅲ级;过海段为胶州湾北部区域,最高潮位水深 3~11 m。地下水受海水潮汐影响较大,无稳定水位。近海地下基岩裂隙水受潮汐影响,与海水连通性较好,涌水量较大。

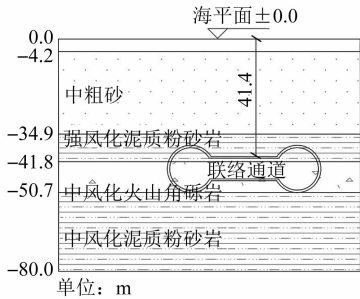


图 3 9[#] 联络通道地质剖面图
Fig. 3 Geological profile of 9[#] link passage

2 联络通道施工模拟

联络通道机械法施工流程如下:洞门加固→安装始发和接收套筒→掘进机就位→套筒中填充介质→切削主隧道管片→设备顶进,拼接管片→切削另一条主隧道管片→进入接收套筒→封堵洞门,拆除套筒→完成施工。

2.1 计算模型及参数

采用FLAC 3D 软件建立有限元计算模型。模型尺寸为 105 m(长,y 向)×105 m(宽,x 向)×80 m(高,z 向),如图 4 所示。为了保证计算精度,将靠近盾构隧道和联络通道开挖部分的网格划分较密,远离开挖部分的网格划分较疏。数值模型本构关系采用莫尔-库伦弹塑性模型,土体采用实体单元,隧道管片采用壳单元,如图 5 所示。水位设置在地质层顶面以上 4 m 处。各土层及结构的参数见表 1 和表 2。

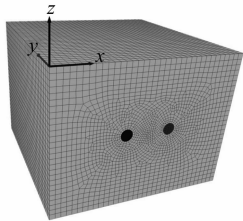


图 4 三维计算模型
Fig. 4 3D computational model

2.2 边界条件及初始应力场

计算模型采用位移边界条件,在模型底部施加竖向约束,两侧面施加水平约束,上表面为自由面。



图 5 联络通道及主隧道模型

Fig. 5 Model of link passage and main tunnel

表 1 地层参数

Tab. 1 Formation parameters

地层	体积质量/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松 比	内聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
中粗砂	1 950	60	0.30	20	23
强风化泥质粉砂岩	2 300	160	0.28	40	42
中风化火山角砾岩	2 350	400	0.24	190	50
中风化泥质粉砂岩	2 350	400	0.24	200	50

表 2 结构参数

Tab. 2 Structure parameters

构件名称	体积质量/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松 比	厚度/ mm	宽度/ m
主隧道管片	2 500	25 000	0.17	350	1.5
联络通道管片	2 500	30 000	0.17	250	1.0

初始应力场由自重产生。为保证数值模拟的准确性,在隧道开挖支护前赋予隧道与实际相符的初始应力场,隧道开挖前,围岩初始应力产生的位移场和速度场予以清零。

数值模拟采用更改强度参数的弹塑性求解法。即先将黏聚力和抗拉强度设大值,平衡后再将黏聚力和抗拉强度更改为实际值,最终计算平衡。

2.3 模拟工况

为了模拟盾构施工,土体挖除后,立即施加壳单元进行平衡求解。根据盾构法联络通道的施工特点,将施工过程划分为 3 个工况(具体见表 3)。工况 1 中,台车对主隧道管片施加支撑力,从而对洞门进行加固。台车支撑体系按表 4 进行分级加载。数值计算过程中,通过对主隧道相应区域的管片施加加法向力来实现对此工况的模拟。

表 3 开挖工况

Tab. 3 Excavation conditions

工况	工况具体介绍
初始工况	左线主隧道已开挖且隧道管片铺设完成
工况 1	始发端台车支撑完成,盾构机后座施加顶推力,刀盘切削管片,洞门破除
工况 2	联络通道开挖至对面右线主隧道,接收洞门破除
工况 3	拆除两端隧道台车支撑

表 4 台车支撑体系分级加载步骤

Tab. 4 Trolley support system grading loading steps

加载步骤	不同类型支撑加载/kN	
	上下支撑	侧部支撑
0	0	50
1	100	50
2	200	50
3	300	50
4	400	50
5	500	50

2.4 计算结果分析

2.4.1 工况 1(洞门破除)

1) 位移分析。左线主隧道的洞门打开之后,其整体刚度明显降低,致使靠近联络通道一侧的管片变形明显大于另一侧管片,左线主隧道的横向椭圆长轴有所增加。竖向位移主要集中在洞口的顶部和底部,顶部向下沉降最大值为 2.86 mm,底部向上隆起最大值为 2.55 mm,如图 6 所示;在水平方向上,洞口腰部向隧道外侧扩张,最大位移为 1.93 mm,如图 7 所示。影响范围主要集中在洞口两侧大约 3 m 范围内,整体上看,左线主隧道有变扁的趋势。

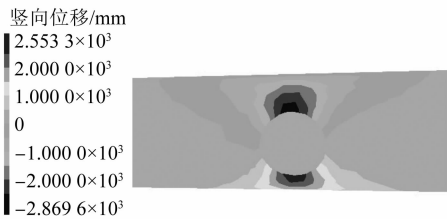


图 6 洞口管片竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement nephogram of the opening segment

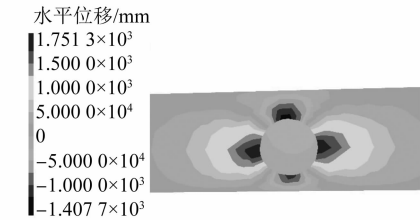


图 7 洞口管片水平位移云图

Fig. 7 Horizontal displacement nephogram of the opening segment

2) 应力分析。破洞后,左线主隧道管片由原来的对称受力变为非对称受力,开洞侧管片洞口顶部和底部压应力明显增加,如图 8 所示。同时,洞口腰部的拉应力也明显增大,如图 9 所示。由于左线主隧道玻璃纤维筋管片的打开,开口处边界处于自由

状态。根据壳体的开口理论,自由边界开口周围的应力集中状态要高于孔口有约束的情况^[11]。因此,在联络通道拼接管片之前,隧道的受力状态最为不利,稳定性最差。在土体加固效果较差或者主隧道内部支撑不力的情况下,主隧道破坏的危险很大。因此,主隧道在破洞之前,要提前对洞口附近主隧道管片结构以及联络通道开挖方向洞口岩土体进行加固,以防止结构在破洞后发生破坏。

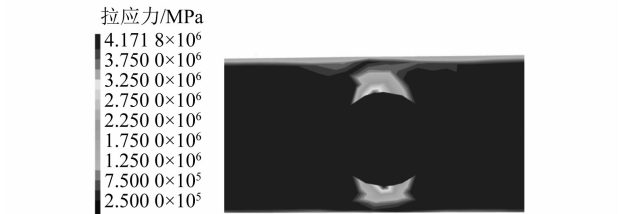


图 8 洞口管片最大拉应力云图

Fig. 8 Maximum tensile stress nephogram of the opening segment

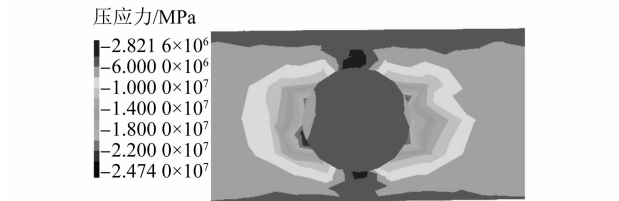


图 9 洞口管片最大压应力云图

Fig. 9 Maximum compressive stress nephogram of the opening segment

2.4.2 工况 2(联络通道开挖至接收洞门破除)

1) 位移分析。在开挖过程中,联络通道的竖向沉降主要集中在拱顶,隆起集中在拱底,如图 10 所示,水平收敛集中在腰部,如图 11 所示。联络通道的竖向沉降远大于水平收敛,而且其中间部位变形最大,如图 12 所示。总体上看,左线隧道有整体向右侧移动的趋势,而右线隧道有向左侧移动的趋势,而且左线主隧道管片的变形明显要大于右线(如图 13 所示),因此联络通道的开挖对于左线主隧道的的影响要明显大于右线。

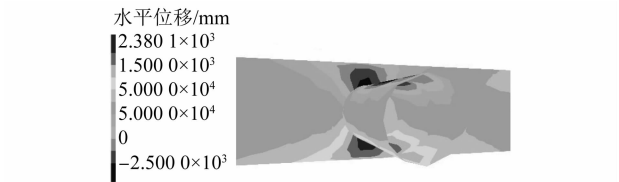


图 10 联络通道竖向位移云图

Fig. 10 Vertical displacement nephogram of link passage

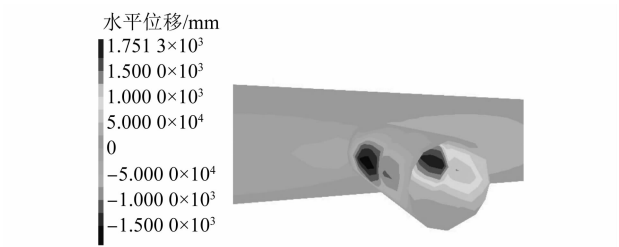


图 11 联络通道水平位移云图

Fig. 11 Horizontal displacement nephogram of link passage

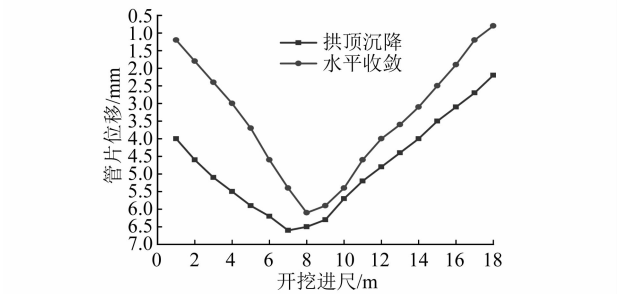


图 12 联络通道竖向位移变化曲线

Fig. 12 Vertical displacement change curve of link passage

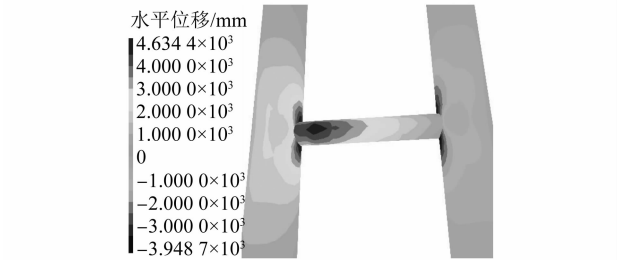


图 13 管片水平位移云图

Fig. 13 Nephogram of segment horizontal displacement

2) 应力分析。联络通道的开挖,导致主隧道原有的受力方式发生了应力重分布,在主隧道与联络通道的交叉处,出现了明显的应力集中,最大压应力出现在交叉结构的拱腰处,为 28 MPa,如图 14 所示;最大拉应力出现在洞口顶部,为 19 MPa,如图 15 所示。因此,在设计与施工时,要高度重视交叉部分的结构安全,同时还要做好防水处理。

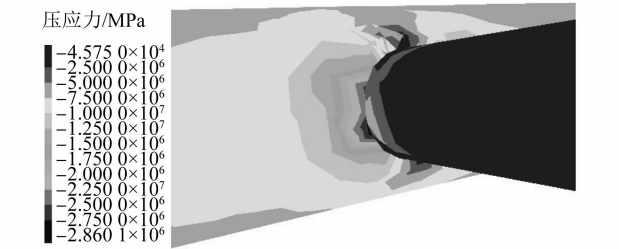


图 14 管片最大压应力云图

Fig. 14 Nephogram of segment maximum compressive stress

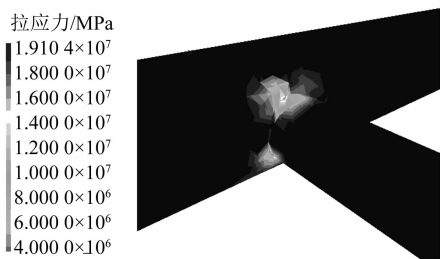


图 15 管片最大拉应力云图

Fig. 15 Nephogram of segment maximum tensile stress

联络通道开挖过程中,开挖面的水平压应力在不断发生改变,尤其是在联络通道中部,压应力发生了突增,致使水平位移突增如图 16 所示。因此,在联络通道开挖过程中,要合理调整掘进机土仓压力,以防止开挖面涌水涌砂,从而保证开挖面的稳定。对比图 12 和图 16,发现在联络通道的中间部位,变形和开挖面压应力都达到了最大值。这是由于联络通道土体开挖后,开挖区附近的土体受到持续的扰动,而且土层会进一步损失,土体应力得到释放,原先土体承受的荷载更多地施加在联络通道管片上。

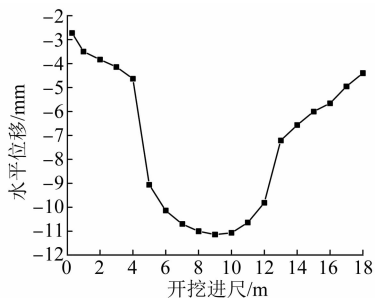


图 16 联络通道开挖面最大水平位移图

Fig. 16 Maximum horizontal displacement of link passage excavation surface

2.4.3 工况 3(拆除两端平台支撑)

台车支撑拆除,主要对主隧道与联络通道交叉部分影响较大,而对联络通道影响较小。

1) 位移分析。拆除两端隧道台车支撑后,交叉结构位移发生了明显变化,如图 17、图 18 所示。左线主隧道顶部最大沉降由 4.2 mm 增加为 5 mm,腰部收敛由 2.2 mm 增加为 4.6 mm,而且影响范围也明显扩大。

2) 应力分析。拆除支撑后,交叉结构的腰部压应力迅速增大,最大由 23 MPa 增加至 28 MPa,而拉应力的变化较小,由 17 MPa 增加至 19 MPa。因此,支撑拆除时,要加强对交叉结构的变形监测,一旦超过预警值,应及时进行加固处理。此外,在卸载

时,最好采用分级卸载的方式,使荷载能够在管片之间有效传递。

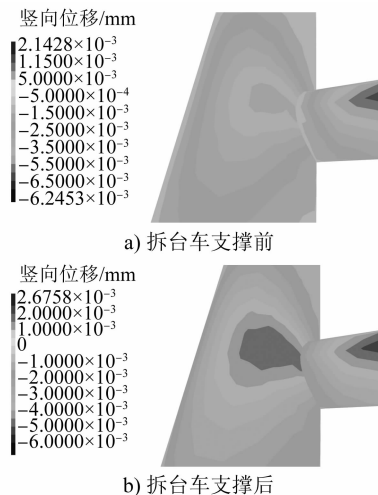


图 17 拆撑前、后管片竖向位移云图

Fig. 17 Nephogram of segment vertical displacement before and after support removal

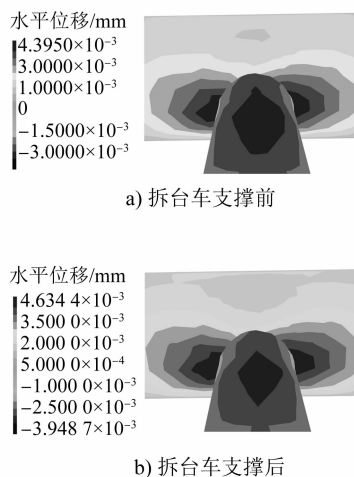


图 18 拆撑前、后水平位移云图

Fig. 18 Nephogram of horizontal displacement before and after support removal

2.4.4 主隧道有无台车支撑结果对比

为了探究在联络通道盾构法施工过程中台车支撑的作用,分别对两种条件下(有、无支撑)的施工过程进行数值模拟。将结果进行对比,发现台车支撑可有效减少主隧道结构的变形和受力,现以始发破除洞门施工工况为例,结果见表 5。

2.5 实测与计算结果的对比分析

联络通道施工过程中对隧道沉降和收敛变形进行了现场监测,主隧道拱顶沉降采用水准仪进行高程测量,计算本次变量和累计变量;主隧道收敛

变形监测用手持测距仪测量拱腰两收敛点之间的距离,通过不同时段收敛点间的距离变化情况反映隧道结构收敛情况。监测点布置在联络通道两侧主隧道管片内,靠近联络通道中心线位置监测点适当加密。监测点位置如图 19 所示。

表 5 主隧道有无台车支撑的管片变形和受力结果对比
Tab. 5 Comparison of segment deformation and stress results of main tunnel with and without support

工况	最大竖向位移/mm	最大水平位移/mm	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa
加支撑	2.8	1.9	4.1	24
不加支撑	3.9	2.4	5.9	31

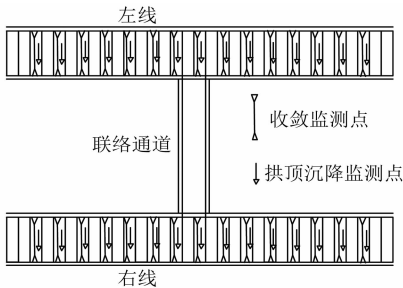


图 19 监测点布置图
Fig. 19 Layout of monitoring points

图 20 和图 21 分别给出了主隧道沉降和收敛的现场监测结果与数值模拟计算结果,可以看到,总体上实测结果与数值模拟计算结果的曲线规律相似,主隧道与联络通道交叉部位管片变形最大,因此,沉降与收敛曲线近似呈“U”型。由于实测数据存在测量误差以及数值模拟存在模型建立、材料参数选取、边界条件等方面的近似处理,致使实测数据与模拟数据难以完全吻合。总的来说,数值模拟的结果基本可反映实测结果。

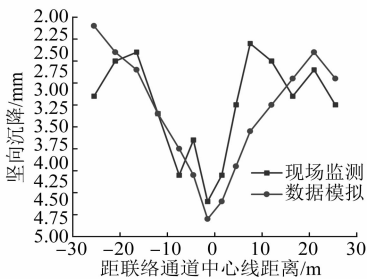


图 20 主隧道拱顶沉降值
Fig. 20 Main tunnel vault settlement value

3 结论

利用有限元软件对联络通道顶管法施工过程

进行数值模拟,得到以下结论:

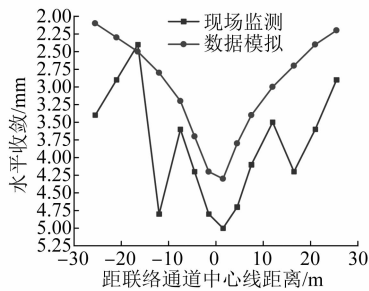


图 21 主隧道收敛变形值
Fig. 21 Main tunnel convergence deformation value

1) 联络通道施工过程中,最危险的两个工况是洞门破除和台车支撑拆除,尤其是对于埋深深的海底隧道,极易发生涌水涌砂事故,因此要采取一定的加固措施,并加强对交叉部分结构的变形监测。

2) 主隧道与联络通道连接处发生了明显的应力集中,在设计与施工时,要高度重视交叉部分的结构安全,适当提高结构强度,同时还要做好防水处理,增加抗渗性能。

3) 整体看,联络通道的开挖对左侧始发隧道的影 响要大于右侧接收隧道。联络通道施工前,可根据两侧主隧道的地质状况选择合适的开挖顺序。

4) 开挖过程中,开挖面的压力会不断发生变化,开挖至联络通道中部时,压力发生了突变。要及时调整掘进机土仓压力,保证开挖面的稳定。同时,联络通道的沉降和收敛变形曲线近似呈“U”型,中部变形最大,施工过程中应重视变形监测,必要时采取加固措施以保证结构的稳定性。

5) 主隧道内设置台车支撑,可有效减小主隧道结构及交叉部位的变形。此外,在卸载时,最好采用分级卸载的方式,使荷载能够在管片之间有效传递。

参考文献

[1] 吴文涛,张恒,李海清.地铁联络通道施工力学特性分析[J].铁道建筑,2011(11):65.
WU Wentao,ZHANG Heng,LI Haiqing. Analysis of mechanical characteristics of metro link passage construction[J]. Railway Engineering,2011(11):65.
[2] 唐震东.线路重叠交叉段下部隧道联络通道冻结法施工对上部隧道的影响[J].城市轨道交通研究,2020(5):92.
TANG Zhendong. Influence of the freezing construction of lower tunnel connecting passage on upper tunnel at overlapped and crossing line section[J]. Urban Mass Transit,2020(5):92.

(下转第 190 页)