

# 联络通道施工盾构管片力学行为研究

刘 军<sup>1</sup>, 贺美德<sup>2</sup>, 宋旱云<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学, 北京 100044; 2. 北京市市政工程研究院, 北京 100038)

**摘 要:** 应用数值模拟计算方法对北京地铁某盾构隧道联络通道施工中管片的力学行为进行研究, 介绍了联络通道的一般施工方法及施工工序, 通过对联络通道施工中管片的力学行为进行现场监测分析和三维有限元数值计算分析, 得到了联络通道施工过程中及管片开洞后管片的受力特征和位移特性, 研究表明: 联络通道施工时, 管片开洞后, 盾构管片产生向联络通道方向移动的水平附加位移。由于联络通道的施工, 原有的受力方式发生了应力重分布, 开洞侧大部分既有管片会产生受拉的不利受力形式, 将严重影响盾构隧道的安全, 为此提出了盾构隧道管片的临时支撑加固措施。该研究对类似工程的设计和施工提供了理论依据。

**关键词:** 地铁; 联络通道; 施工; 盾构管片; 三维数值模拟

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0271-05

**作者简介:** 刘 军(1965-), 男, 教授, 主要从事岩土与地下工程的教学与研究工作。E-mail: liujun01@tsinghua.org.cn。

## Mechanical behaviors of shield tunnel segments due to construction of connecting passages

LIU Jun<sup>1</sup>, HE Mei-de<sup>2</sup>, SONG Han-yun<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Numerical simulation analysis method is employed to study the mechanical behaviors of segments of connecting passage of a shield tunnel. The general construction method and process of the connecting passage are introduced. Through field monitoring analysis and three-dimensional finite element analysis, the force and displacement characteristics of the get the contact channel, segments during construction of the connecting passage and after hole-opening are obtained. The results show that during: construction of the connecting passage and after hole-opening, the horizontal additional displacement of the shield segments is generated, towards the direction of the connecting passage. Owing to the construction of the connecting passage, the original forces of the segments lead to stress redistribution of the Most of the segments at the side openings will produce negative tension forces, and it will seriously affect the safety of the shield tunnel. To this end, temporary support reinforcement measures for the shield tunnel segments are proposed. This study has the reference value for similar projects.

**Key words:** subway; connecting passage; construction; shield segment; three-dimensional numerical simulation

## 0 引 言

在盾构法隧道基础上修建联络通道, 由于要破除管片, 使开挖过程中已修建盾构隧道管片的结构受力复杂, 另外联络通道部位往往存在降水及地层加固困难, 在地下水的作用下, 开洞处及联络通道容易产生塌方, 因此如何开洞及如何保护盾构管片的安全稳定是盾构法施工很关键的问题。在联络通道施工中, 目前采取的方法主要有冻结法<sup>[1-3]</sup>、矿山法<sup>[4]</sup>、顶管法<sup>[5]</sup>等, 这几种方法在国内的地铁建设中都得到了广泛的应用。正确分析隧道施工过程中围岩的力学性状以及盾构隧道的变化, 是保证联络通道安全、快速、经济施工的首要前提和必要条件。可见, 进行联络通道施

工中盾构管片的力学行为研究显得极为必要。国内外学者对隧道施工的力学行为进行了大量研究, 如 1981 年 Cunha 采用逐步分析法研究了弹性地层中无支护隧道多步掘进时的力学响应<sup>[6]</sup>; Pan 等采用线性黏弹性模型研究了开挖面和开挖速度的影响<sup>[7]</sup>。金丰年等应用非线性黏弹性模型对全断面开挖过程进行的三维有限元计算表明开挖面的影响范围约为隧道直径的 2 倍, 开挖速度在短时间内影响较大, 随着时间的延长而

基金项目: 北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目 (IDHT20130512); 北京市自然科学基金项目, 北京市教育委员会科技计划重点项目 (KZ20131001601)

收稿日期: 2013-06-07

减弱<sup>[8]</sup>。贺美德等研究了盾构法隧道联络通道施工引起的管片应力变化分析等<sup>[9]</sup>。

本文应用数值模拟分析通过对北京地铁某盾构区间隧道一联络通道施工中管片的力学行为研究,探讨拆除部分管片以及施工联络通道对管片变形和受力状态的影响,提出盾构隧道管片的临时支撑加固措施,为类似工程的施工和设计提供理论依据。

北京地铁某盾构区间隧道的联络通道位于某胡同内,周围民居林立,街区繁华。该胡同宽约 4.9 m,胡同南侧靠近道路为一座双层小楼门市,内侧为单层门市,胡同北侧为双层门市。在胡同内有 3 条地下管线:①污水管,南北走向,φ500 顶部距地面 1.5 m;②电信管沟,东西走向,六孔管沟,埋深大约为 1 m,混凝土结构;③2 吋自来水管线,埋深大约 1 m。

根据地质勘察报告知,联络通道处于第四纪覆盖层的砂卵石层中,地下水丰富,易出现流沙等不良地质现象。因此,施工不当会造成掌子面塌方、地面沉降及管线开裂,给周围居民财产造成极大损失。

## 1 联络通道施工方法

联络通道处布置两环钢管片,管片长度 1.2 m,开口环的开洞宽度 1.6 m,联络通道宽 2.0 m,高度由联络通道内门洞高确定,直墙部分为 1.8 m 并向上起拱。联络通道采用矿山法施工,复合式衬砌结构。本区间隧道联络通道处于饱和的砂层中。从场地的地层条件来看,分叉段(联络通道)的施工容易引起流沙等不良地质现象,在拆除管片、开洞时可能造成掌子面塌方、地下水的涌入,从而使地面塌陷。因此在拆除管片前,必须对地层进行加固处理。加固后土体应有良好的均匀性和自立性,其无侧限抗压强度 0.3~0.5 MPa,渗透系数  $k \leq 1.0 \times 10^{-8}$  cm/s。

联络通道一般施工顺序:

(1) 地层加固。注浆加固区的范围为联络通道两侧各 3.0 m,通道上下各 3.0 m。注浆加固位置为钢管片两侧各 3 环管片的区域范围,为此管片加工时预先在钢管片开洞处和左右两侧各 3 环管片的联络通道侧留置注浆孔,注浆范围见图 1。

(2) 开洞顺序。从上至下,先拆除上洞口的管片,再拆除洞口下部管片。

(3) 进洞前采用 Φ42 超前小导管对开挖面进行注浆加固。小导管长 2.5 m,间距 300 mm。浆液采用纯水泥浆。

(4) 破洞口施工时,将整个洞口分上下两洞分块破口施工,分块掘进,留置核心土,并迅速封闭块内

初期支护,上洞口开挖 2 m 后,进行下洞口破除。上洞开挖高度 2.5 m,留置核心土高 1.0~1.5 m,两侧挖土宽约 80 cm。

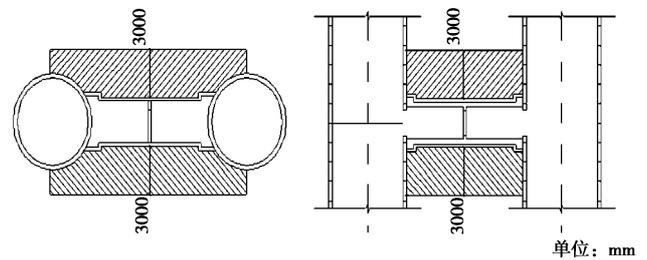


图 1 地层加固范围

Fig. 1 Range of ground reinforcement

区间隧道采用钢架锚喷网初期支护,初期支护在每步开挖后及时进行,主要有初喷、安装钢架、挂网、喷混凝土等工序。

(5) 拆除管片破口过程中加强监测,在此处埋设拱顶下沉、周边收敛点及钢筋计,加强监控量测。

## 2 施工过程力学行为三维模拟分析

### 2.1 模型建立与参数取值

两盾构纵向开挖 30 m,竖向上表面取至地表,为自由面,下边界取离盾构隧道中心 25 m,为 3 倍多洞径长。左右边界分别取离左、右盾构隧道中心 25 m。左右边界限制水平方向位移,下边界限制竖向方向位移。模型采用理想弹塑性本构关系和 Mohr-Coulomb 屈服准则,计算模型如图 2 所示。

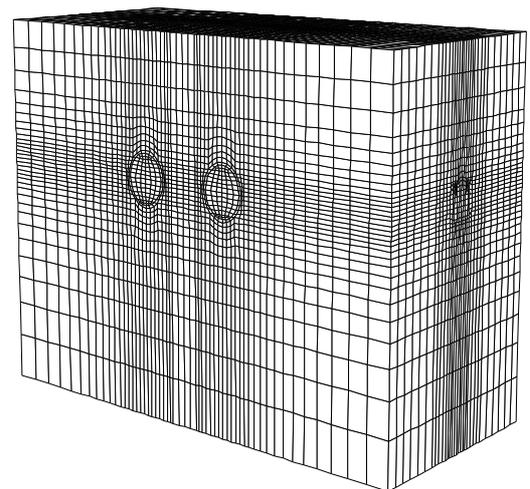


图 2 计算模型

Fig. 2 Computational model

模型侧面和底面为位移边界,侧面限制水平位移,底部限制垂直移动,模型顶面为地面,取为自由面,但施加附加荷载的应力边界。盾构隧道与联络通道交

叉部网格如图 3 所示。

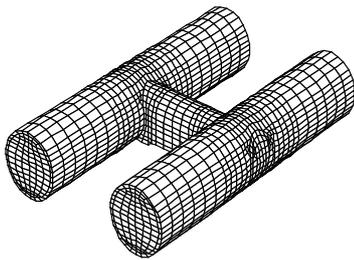


图 3 盾构隧道与联络通道空间关系网格图

Fig. 3 Spatial relationship between shield tunnel and connecting passage

计算的土层物理力学参数取自盾构区间岩土工程勘察报告。支护措施模拟及参数按以下情况确定：

(1) 钢筋混凝土盾构管片

盾构管片采用弹性单元模拟，弹性模量  $E=34.5$  G，泊松比 0.17。

(2) 超前小导管注浆

把超前小导管注浆当作安全储备，模拟计算中不予考虑。

(3) 注浆地层

注浆层采用提高地层参数来模拟，本模型注浆层选用的地层参数如下：密度  $2.2 \text{ g/cm}^3$ ，压缩模量 30.0 MPa，泊松比 0.25，黏聚力 75 kPa，内摩擦角  $50^\circ$ 。

(4) 格栅钢拱架+喷混凝土

格栅钢拱架+喷混凝土采用拱壳弹性单元模拟，弹性模量取 17.5 GPa，泊松比取 0.20，密度取  $2.5 \text{ g/cm}^3$ 。

(5) 模筑钢筋混凝土二衬

模筑钢筋混凝土二衬采用弹性单元模拟，弹性模量取 30 GPa，泊松比取 0.20，密度取  $2.4 \text{ g/cm}^3$ 。

2.2 计算结果与分析

(1) 盾构管片变形

由于联络通道施工使得一方侧压力减小，盾构管片产生向联络通道方向移动的水平附加位移，其最大附加变形为 3.613 mm，见图 4。

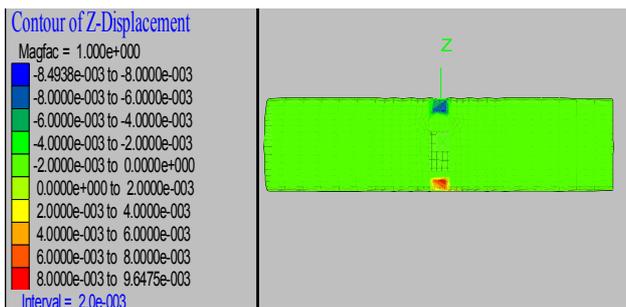


图 4 管片附加最大位移图

Fig. 4 Segment additional maximum displacement map

(2) 盾构隧道受力分析

联络通道施工完成后，管片最大主应力增加很大，最大值增加了近 100%，且开口侧大部分管片最大主应力值由负变正，即为拉应力。而最小主应力变化不大，尤其是未开洞一侧，几乎没变化。见图 5，6。

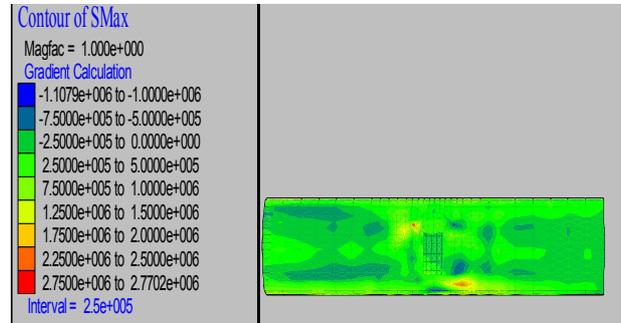


图 5 盾构隧道管片最大主应力分布云图

Fig. 5 Contours of maximum principal stress of shield tunnel segment

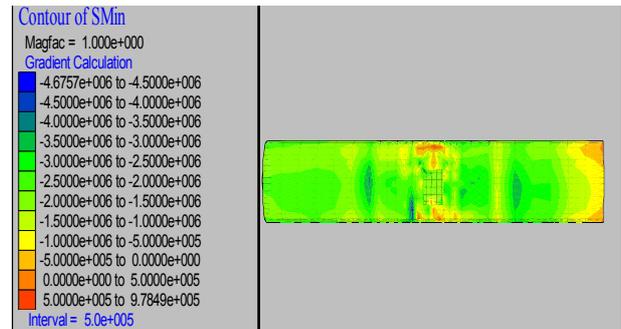


图 6 盾构隧道管片最小主应力分布云图

Fig. 6 Contours of minimum principal stress of shield tunnel segments

(3) 对地表沉降的影响

双线盾构施工完成后地表最大沉降为 15.58 mm。联络道施工完成后对地表沉降的主要影响区域为：沿联络道纵向长度 19.2 m，横向宽度 17.3 m，最终最大地表沉降为 28.35 mm，见图 7，其中联络通道施工产生的地面沉降为 12.77 mm。

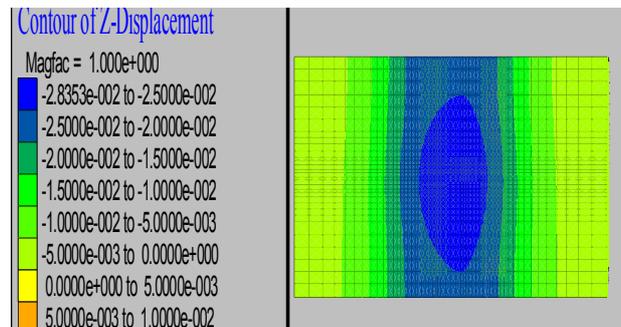


图 7 联络道修建后地表沉降图

Fig. 7 Surface subsidence after construction of connecting passage

施工期间，地表沉降及管片最大主应力值产生的

位置详见表1。

表1 地表沉降和管片最大主应力最大值发生位置

Table 1 Surface subsidences and locations of maximum principal stress

施工阶段	地表沉降		管片最大主应力	
	最大值 /mm	发生位置	最大值 /MPa	发生位置
联络道初期支护后	25.58	联络道中部略偏右	2.58	拆除管片处底部
联络道二次衬砌后	28.35	联络道中部略偏右	2.77	管片开口处左上角

施工期间,管片水平方向应力和纵向应力的最大值及所在位置如表2,3所示。

表2 管片x方向应力最大值随施工过程的变化

Table 2 Change of maximum stress with in x direction of segments construction process

施工阶段	压应力		拉应力	
	数值 /MPa	位置	数值 /MPa	位置
联络道初期支护后	4.58	管片开口处左侧底部	2.12	管片开口处左侧中心偏上
联络道二次衬砌后	3.76	离中心5.3 m处管片底部	1.86	管片开口处左上角

表3 管片y方向应力最大值随施工过程的变化

Table 3 Change of maximum stress with in y direction of segments construction process

施工阶段	压应力		拉应力	
	数值 /MPa	位置	数值 /MPa	位置
联络道初期支护后	2.99	开口处管片顶部	1.85	开口处管片底部
联络道二次衬砌后	1.93	第一环中部	1.42	管片开口处顶部略偏下

由表1~3可以看出,由于联络道施工,与联络横通道相连接的盾构隧道衬砌环成为整体盾构隧道衬砌环中结构安全度最低的环节,尤其是联络道开挖和初期支护过程中,应力集中最大。从上述分析可知,管片开洞及联络通道修建中,既有管片会产生比较复杂的力学变化,若处理不当会造成开洞附近管片的较大变形,甚至会引起既有盾构隧道的安全稳定,因此必须对既有的盾构隧道管片进行临时加固,其加固方案如图8所示。

### 3 监测分析

为了进一步研究联络通道施工中盾构隧道的受力状态及地表沉降,进行了监控量测工作,监测项目主要为临时支撑轴力、管片受力、隧道收敛、地表沉降等项目,测点布置参见文献。

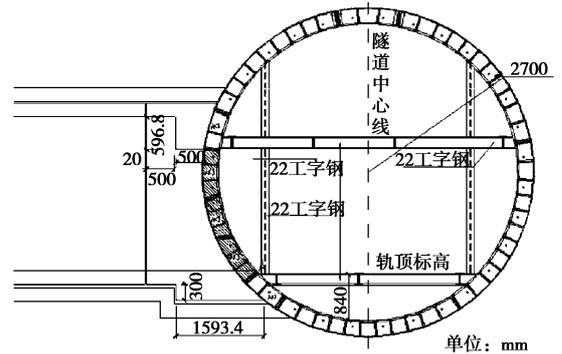


图8 联络道修建后地表沉降图

Fig. 8 Surface subsidence after construction of connecting passage

#### 3.1 临时支撑轴力

在联络通道开挖过程中,钢支撑所受轴力较小,如钢梁最初为受压,联络通道施工中出现最大受拉轴力 0.2036 kN,随后其受拉程度又呈现出减弱的趋势,受拉状态一直持续到上洞贯通。

#### 3.2 管片收敛

在联络通道施工过程中,管片收敛的趋势是开始向洞内收敛,后来又向洞外收敛;向洞内收敛的最大值为 1.94 mm,向洞外收敛的最大值为 2.91 mm。与三维数值模拟的最大附加水平变形为 3.613 mm 有一定差异,说明是钢梁与管片焊接后限制了管片向外位移。

#### 3.3 管片应力监测分析

由于在联络通道开挖过程中,必然会引起受扰动土体的应力释放,这就使得在相邻的混凝土管片上产生应力,受扰程度不同其应力变化范围也不同。在靠近开挖侧混凝土管片上应力从最初的 0.621 MPa 一直增大到各管片所受的最大拉应力 2.7945 MPa;在远离开挖侧混凝土管片上的应力变化趋势较为平缓,产生的最大压应力为 0.56819 MPa,与三维数值模拟分析基本吻合。

#### 3.4 地表沉降

在联络通道开洞后,联络通道已施作一半后,开洞处地表附近测点的沉降值第一次达到了最大值 4.06 mm,可以看出地表沉降具有一定的滞后性。随着开挖工作面继续向前推进,远离开洞处,该处的应力场又重新形成新的应力场,且逐渐趋于稳定,其他各点的沉降值也逐渐减小,趋于稳定。

地表沉降实际监测结果与数值模拟分析结果差异也较大,联络通道施工产生的地面沉降为 12.77 mm,而实际监测值为 4.06 mm,说明在盾构隧道内架设了临时支撑后,竖向支撑对限制地表沉降也起到了极大作用。

## 4 结 论

在联络通道施工过程中引起的应力释放, 应力的重分布使得在开洞过程中的受力特性显得更为复杂。从三维有限元数值计算和现场监测的结果以及上述对各项指标的分析可以看出:

(1) 联络通道施工时, 开洞后, 盾构管片产生向联络道方向移动的水平附加位移。

(2) 由于联络通道的施工, 主隧道原有的受力方式发生了应力重分布, 开洞侧大部分既有管片会产生拉应力, 对盾构隧道的安全极为不利, 为此, 施工时应应对联络通道附近的管片进行有效的加固, 实施足够的支撑, 确保在联络通道施工时, 管片开洞后盾构隧道的安全。

(3) 地表沉降大的位置, 往往是应力变化大的位置。

(4) 盾构隧道内架设临时支撑保护盾构隧道本身及开挖联络通道的安全是可行的, 对减少地面沉降也具有很好的效果。临时架设的支撑, 对限制管片位移及地表沉降具有极为重要的意义, 是联络通道施工必不可少的临时措施。在临时支撑架设过程中, 要特别注意支撑与管片的联接质量。

### 参考文献:

[1] 李大勇, 陈福全, 张庆贺, 等. 地铁联络通道冻结施工的三维数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 472 - 474. (LI Da-yong, CHEN Fu-quan, ZHANG Qing-he, et al. The subway connecting passage to freeze the construction of three-dimensional numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 472 - 474. (in Chinese))

[2] 张志强, 何 川. 用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(18): 3211 - 3217. (ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Construction of the subway connecting passage construction mechanics freezing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(18): 3211 - 3217. (in Chinese))

[3] 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, CHOU Pei-yun, YANG Gou-xiang, et al. The tunnel channel complex conditions to freeze construction design and practice[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 660 - 663. (in Chinese))

[4] 云维冬. 某地铁站联络通道矿山法和组合式盾构法施工方案比较[J]. 铁道勘察, 2005, **31**(4): 75 - 78. (YUN Wei-dong. Comparison of the construction of a subway station contact channel Mines Act and composite shield law program[J]. Railway Survey, 2005, **31**(4): 75 - 78. (in Chinese))

[5] 高 波, 陈裕康. 顶管法在地铁盾构区间隧道联络通道中的应用[J]. 施工技术, 2005, **34**(6): 19 - 20, 23. (GAO Bo, CHEN Yu-kang. Pipe jacking applications in the the Metro Shield Interval tunnel channel[J]. Construction Technology, 2005, **34**(6): 19 - 20, 23. (in Chinese))

[6] CUN Ha. Analysls of advancing tunnels in rock[C]// International Society for Rock Mechanics, 5th ISRM Congress. Melbourne, 1983. (in Australian)

[7] PAN Y W, DONG J J. Time dependent tunnel convergence- II, Advance rate and tunnel-support interaction[J]. Journal of Rock mechanics in Mining Science and Geomechanics, 1991, **28**(6): 477 - 488.

[8] 金丰年, 钱七虎. 隧洞开挖的三维有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(3): 193 - 200. (JIN Feng-nian, QIAN Qi-hu. The tunnel excavation dimensional finite element calculation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(3): 193 - 200. (in Chinese))

[9] 贺美德, 乐贵平, 刘 军. 盾构隧道联络通道施工中管片纵向应力变化[J]. 都市轨道交通, 2007, **20**(3): 56 - 59. (HE Mei-de, LE Gui-ping, LIU Jun. Channel of shield tunnel construction segment longitudinal stress change[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2007, **20**(3): 56 - 59. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)