

类矩形盾构隧道管片施工期内力分布规律研究

徐 森¹, 朱瑶宏^{1*}, 董子博², 周俊宏², 吴彩霞¹, 杨 磊¹

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 310006)

摘要: 对于使用阶段的隧道管片结构, 其受力特性通常可以简化为平面应变问题进行分析; 而在施工阶段, 由于隧道纵向荷载的差异, 边界约束条件的不均匀, 施工荷载的交叉影响以及盾构施工的时间空间性, 导致施工阶段管片受力成为一个三维问题。本文以宁波软土地层大断面类矩形盾构隧道为背景, 依据现场试验来探索类矩形盾构隧道衬砌结构在施工期受力、变形的规律。研究表明: 施工阶段中衬砌弯矩、轴力整体呈上小下大、左右对称分布; 脱出盾尾阶段为施工过程中的最不利工况, 管片和螺栓的应力水平迅速提高, 之后随推进距离增大逐渐趋于稳定, 管片中柱接近纯受压构件。研究认为同步注浆和纵向、环向螺栓对管片应力变化影响均较大, 建议加强对同步注浆工艺的控制, 加强螺栓初期预紧力和后期复拧的管理。

关键词: 类矩形盾构; 软土地层; 现场试验监测; 管片内力

中图分类号: U455.91

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0066-06

近年来, 国内地铁建设处于高速发展阶段, 盾构法隧道是地铁区间隧道的主要形式, 相对于明挖法等传统施工方法, 盾构工法具有对周围环境影响小、施工受地形地貌限制较少、占地面积小、地层适用性广等显著优点^[1-4], 因此成为了软土地区隧道建设的首选工法。

相比于圆形盾构隧道, 矩形盾构隧道^[5]起步较晚, 采用类矩形盾构建设地铁单洞双线区间是解决复杂环境下地铁建设难题的一种新思路, 今后有可能在此基础上进行小规模扩挖形成车站^[6-10], 相关探索研究工作一直都在进行。朱瑶宏等^[11]通过开展类矩形盾构隧道衬砌结构受力的足尺试验, 研究了其在正常运营状态和同步注浆施工工况下的结构使用性能, 可为类矩形盾构隧道衬砌结构的设计、施工提供试验依据及指导; 叶宇航等^[12]通过开展极限承载力下的整环足尺试验, 获得了结构极限承载力和变形特征, 得出了衬砌结构的破坏链和破坏机制, 明确了结构薄弱部位, 均为类矩形盾构隧道衬砌结构设计提供了依据; 马险峰等^[13]通过对施工期管片受力的数值模拟, 分析了

类矩形盾构施工对地表沉降变化的影响规律, 以及不同注浆率对管片内力的影响; 王东方等^[14]将施工过程中管片的受力划分为4个阶段, 通过衬砌结构受力的现场实验研究了各阶段管片所受水土荷载随时间的变化规律; 叶俊能等^[15]通过类矩形盾构隧道的三维有限元模拟, 分析了同步注浆压力设定、千斤顶推力、后配套自重等施工参数对结构变形的影响, 并对高敏感性因素提出了施工参数建议。盾构法隧道施工阶段管片受力是一个完全的三维问题, 理论分析和足尺试验无法完全做到真实模拟。大量施工实践表明, 在施工过程中, 盾构隧道衬砌结构出现诸如管片裂缝、上浮、错台等质量问题的概率高于正常使用阶段, 给隧道衬砌结构在使用期的安全性带来隐患。目前国内无开展类矩形断面盾构隧道现场施工的应用实例, 其结构变形、结构内力等结构受力性能未完全明确, 因此有必要针对类矩形盾构隧道的结构性能开展现场试验研究。

本文依托宁波轨道交通3号线类矩形盾构区间段隧道, 在前人研究的基础上进行现场试验研

收稿日期: 2018-05-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市社会发展重大专项 (2015C110017)。

第一作者: 徐森 (1992-), 男, 山东威海人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 盾构隧道结构与施工。E-mail: 1551747457@qq.com

*通信作者: 朱瑶宏 (1960-), 男, 浙江宁波人, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 地下空间与轨道交通工程技术。E-mail: 406905816@qq.com

究, 获取衬砌管片钢筋、螺栓在施工阶段受力的相关数据, 以反映类矩形盾构隧道衬砌结构在施工阶段的受力特性, 从而为类矩形盾构隧道衬砌结构的设计提供有力支撑, 同时也为同类型盾构隧道的施工提供建议和指导。

1 工程简述

1.1 工程概况

现场试验以宁波市轨道交通 3 号线一期工程类矩形盾构段区间隧道为依托。类矩形区间衬砌采用环间错缝拼装, 衬砌外尺寸及分块如图 1 所示, 管片混凝土等级为 C50, 环向连接采用 6.8 级 M33 型直螺栓连接, 其中手孔位置采用铸铁预埋件, 纵向连接采用 6.8 级 M30 型直螺栓连接, 其中手孔位置采用铸铁预埋件。

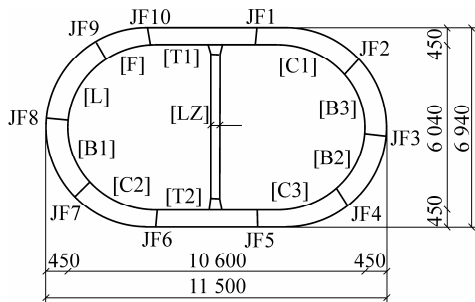


图 1 类矩形隧道衬砌结构示意图(mm)

1.2 地质条件

隧道的覆土厚度为 2.50~10.46 m, 根据地质详勘资料, 隧道纵向地质分布如图 2 所示。

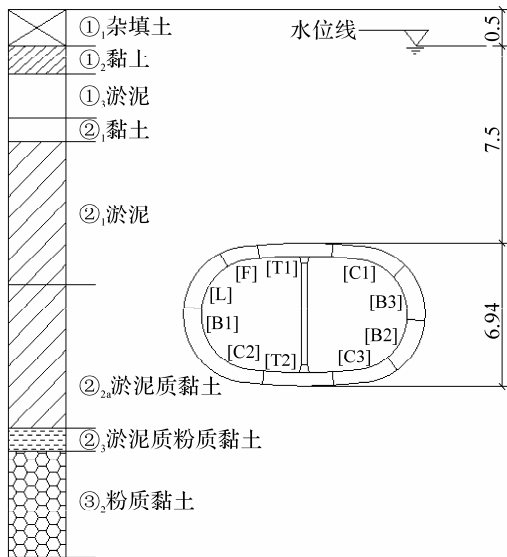


图 2 隧道地质剖面图(m)

隧道穿越地层的主要物理力学参数见表 1。

表 1 隧道穿越地层主要物理力学指标

层号	岩层名称	天然含水量	天然孔隙比	液限 $\omega_L / \%$
		$W / \%$	e	
①2a	淤泥	58.0	1.616	45.1
②2b	淤泥质粉质黏土	46.2	1.314	40.3

层号	塑限 $\omega_p / \%$	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\phi_{\text{CU}} / (^\circ)$	黏聚力 $C_{\text{CU}} / \text{kPa}$
①2a	24.8	16.6	13.0	7.8
②2b	22.6	17.3	13.8	8.4

注: 灵敏度为 3.0~5.9。

宁波地区软土具有明显的含水量高、流动性强、渗透系数小、孔压消散难、固结时间长、灵敏度高、压缩性高、抗剪能力差等特点。在此工程地质条件下进行类矩形盾构隧道施工的难度较圆形盾构隧道更大, 且隧道管片受力性能异于单圆隧道管片, 值得探究。本现场试验研究在衬砌结构横断面测试截面的选择上, 依据前期朱瑶宏等^[11]进行的类矩形盾构隧道衬砌结构受力性能的足尺试验研究得出的设计荷载下衬砌结构的内力分布情况, 结合现场施工实际情况, 并以沿试验环均匀、对称布置, 局部加密为原则, 共选取 11 个测试截面, 其中 T1、T2 块各布置 2 个测试截面, C1、C2、C3、B1、B3 块各布置 1 个测试截面, 中柱中间位置处布置 1 个测试截面。

2 现场试验方案

现场试验测试内容及试验环相应测点布设见表 2。

表 2 现场测试内容及测点汇总

测试内容	测试工具	量程	数量/个
主筋应变	振弦式钢筋测力计	-160~200 MPa	44
纵缝螺栓应变	应变式螺栓轴力计	400 kN	20
环缝螺栓应变	应变式螺栓轴力计	200 kN	8

内力测试截面的具体位置如图 3 截面所示 (N1~N11)。

不考虑中柱接缝, 现场试验监测螺栓的具体位置如图 4 截面所示(环向螺栓标号: JF1~JF10, 纵向螺栓标号: A1~A8)。

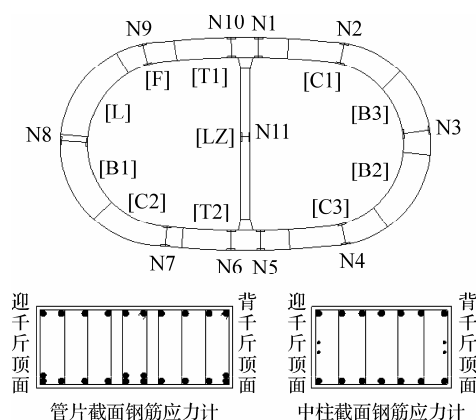


图3 内力测试截面编号及钢筋测力计测点布置图

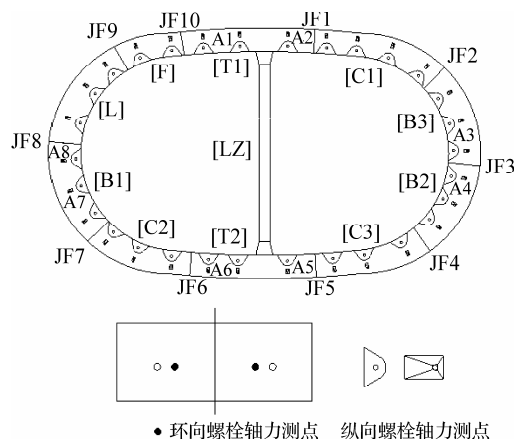


图4 螺栓应变及轴力计测点布置及编号

3 现场实测分析(衬砌内力分析)

现场施工过程中以试验环管片成环后, 脱出盾尾前为初始状态, 以试验环传感器全部接入采集器正式开始采集为时间零点, 随后的工况记录均为相对该时刻的时间. 重要施工工序汇总见表3.

表3 施工过程汇总

时间/h	施工工序
8~10	盾构机继续推进(同步注浆)
10~13	进行试验环后第1环管片拼装
13~15	试验环脱出盾尾(同步注浆)
32~34	试验环脱出盾尾后盾构机继续推进1环(同步注浆)
37.25~40.8	试验环脱出盾尾后盾构机继续推进2环(同步注浆)
56~58	试验环脱出盾尾后盾构机继续推进3环(同步注浆)
61.5~63.75	试验环脱出盾尾后盾构机继续推进4环(同步注浆)
78.5~80.5	试验环脱出盾尾后盾构机继续推进5环(同步注浆)

3.1 衬砌管片钢筋应力分析

由现场测得数据绘制试验环各测试截面内、外弧面钢筋应力随时间的整体变化曲线如图5、6所示: 应力数值为正, 表明内、外弧面钢筋受拉; 应力数值为负, 表明内、外弧面钢筋受压.

试验环各测试截面内、外弧面钢筋应力随时间(即施工过程)的变化规律为: 初期因试验环管片处于盾体之中, 各测点位置钢筋应力波动较小; 脱出盾尾阶段, 随着盾构机向前推进, 管片逐渐脱出盾尾并开始承受水土压力、注浆压力、盾尾刷及油脂压力等荷载作用, 内外弧面钢筋受力快速增大, 最大值明显大于后期阶段应力值, 其中脱出盾尾瞬间出现尖峰; 管片完全脱出盾尾后, 钢筋应力值快速减小后趋于稳定. 综上表明盾尾处同步注浆荷载为一脉冲荷载, 仅在盾构机推进过程中发生, 且在盾尾一定范围内以流体或半流体形式分布, 对管片结构内力及几何形态较为不利, 因此脱出盾尾阶段可看作施工过程中最不利工况; 在继续推进过程中, 每环管片脱盾时, 试验环各测点应力均有所波动后逐渐减小至趋于稳定, 距离越远, 波动

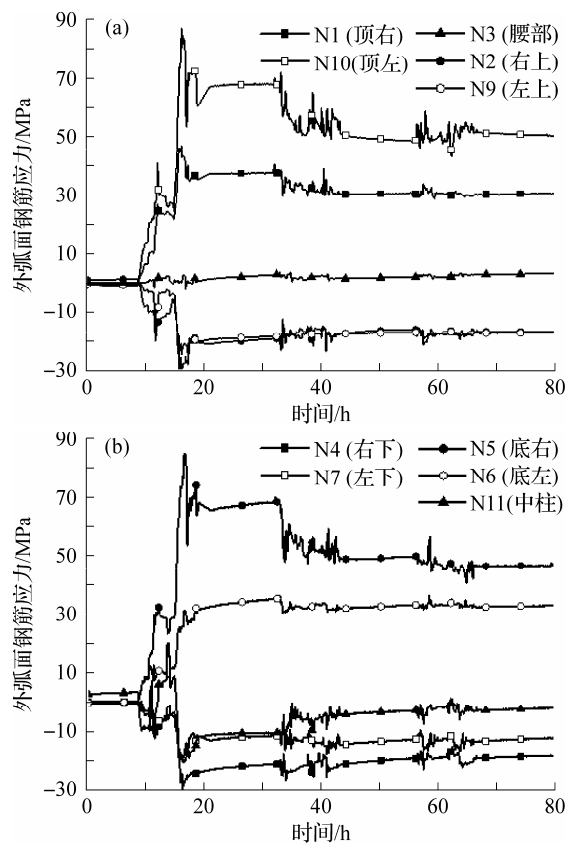


图5 外弧面钢筋应力随时间变化曲线

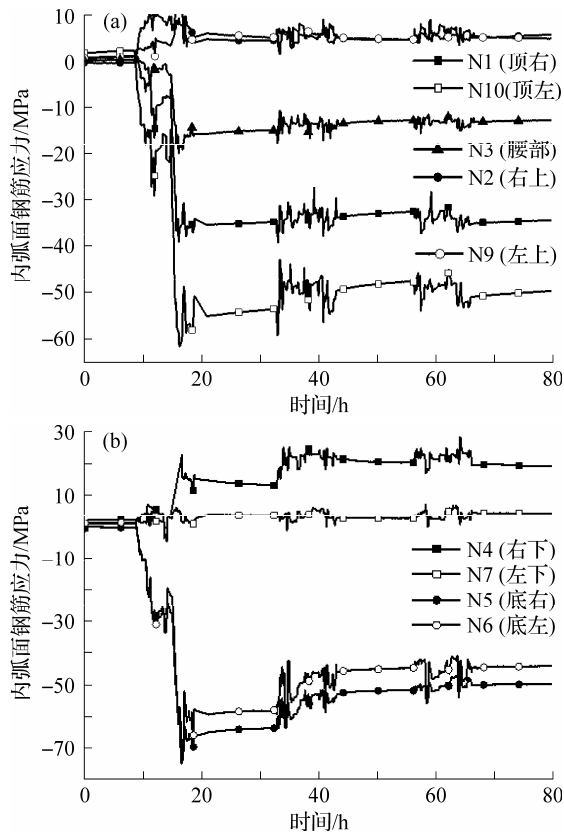


图6 内弧面钢筋应力随时间变化曲线

越小。表明:盾尾同步注浆荷载对试验环管片截面的影响随盾尾离开距离增加而减小,之后试验环外围包裹的浆液随时间固结导致压力逐渐减小至趋于稳定,钢筋应力也随之逐渐减小至趋于稳定。

各测试截面内、外弧面钢筋受力特征在空间上呈现的分布规律:以脱出盾尾阶段为例,整环中柱附近衬砌顶部、底部外弧面钢筋受拉明显,所对应的内弧面钢筋受压明显;腰部截面内弧面受压,外弧面受拉不明显;顶部、底部与腰部之间位置处截面受力相似,内弧面受拉,但其拉应力值较小,外弧面受压,压应力值较大。

由试验结果可知,衬砌结构钢筋都处于弹性状态,可由下式计算截面的轴力 N 和弯矩 M (钢筋为 HRB400, 混凝土为 C50):

$$N = \varepsilon_s E_s A_s + \varepsilon'_s E'_s A'_s + \int_0^h \sigma[\varepsilon(x)] b dx, \quad (1)$$

$$M = (\varepsilon'_s E'_s A'_s - \varepsilon_s E_s A_s) \times (h/2 - c) - \int_0^h \sigma[\varepsilon(x)] b (x - h/2) dx, \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_s, \varepsilon'_s$ 为内外侧钢筋应变; A_s, A'_s 为内外侧钢筋面积; E_s, E'_s 为内外侧钢筋弹性模量; h, b, c

分别为管片厚度,环宽以及主筋保护层厚度; $\varepsilon(x)$ 为对应位置处混凝土的应变; $\sigma[\varepsilon(x)]$ 为对应位置处由混凝土应变决定的混凝土应力值。

由于试验环脱出盾尾及继续推进过程中钢筋应力存在波动,且截面内力对钢筋受力较为敏感,该阶段计算所得内力波动性较大,因此选择对荷载稳定阶段的钢筋受力进行计算,再通过钢筋对应位置的应变值,计算出试验环不同内力测试截面的弯矩值和轴力值,并绘制内力分布图如图7、8所示。

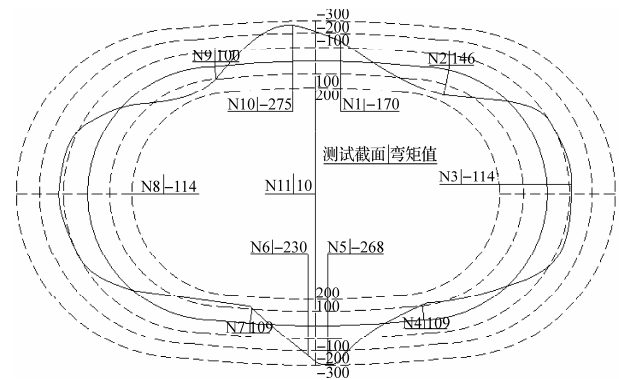


图7 实测弯矩分布图

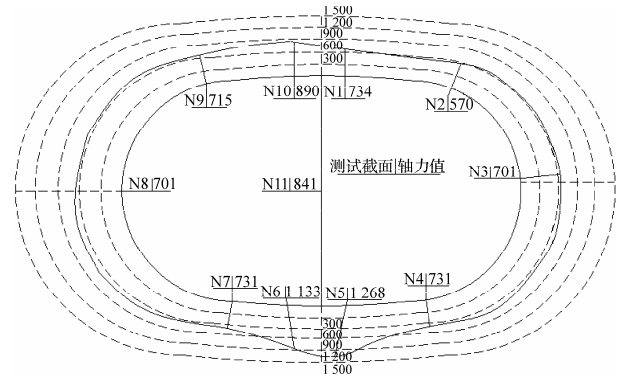


图8 实测轴力图

可以看出:试验环管片结构所受弯矩整体呈对称分布,顶部中柱两侧荷载存在差异,考虑为施工期间注浆压力存在差异、盾尾钢板刷对衬砌环的挤压不均匀导致;中柱附近外弧面钢筋负弯矩较大,表明其受拉明显;腰部处钢筋弯矩相对较小,表明内弧面受压,外弧面受拉不明显。

轴力分布上可以看出:试验环管片整体均受压,压力分布整体呈上小下大的对称分布形式;中柱受力较大,接近纯受压构件。

结合整环管片所受弯矩及轴力情况,可分析

其对试验环管片变形的影响:纵向上,由于中立柱的存在,盾构管片在中柱位置收敛变形小,而左右轴线位置处的垂直收敛会相对较大;横向上,由于腰部处内弧面受压,外弧面受拉均不明显,可见结构的横向刚度较大,水平收敛变形较小,后期在隧道运营期间抗干扰变形能力较强。

3.2 衬砌管片连接螺栓应力分析:

由于试验环所受弯矩及轴力整体成对称分布形式,对衬砌管片连接螺栓所受应力分析上,选取试验环管片左半部分位于顶部、底部、腰部及同步注浆孔附近位置处的螺栓轴力计所测数据,绘制其随时间的变化规律曲线(图9)进行说明。

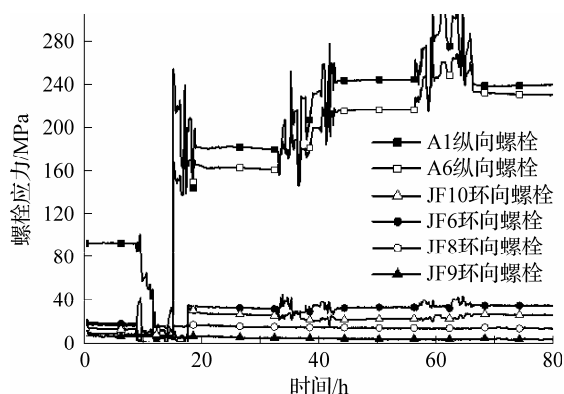


图9 各测点环、纵向螺栓应力随时间的变化曲线

由图9可以看出:环、纵向连接螺栓具有一定的初始预紧力,在脱出盾尾阶段中,外部荷载等多项突发性作用下,管片结构内力重新分布,管片块与块之间出现压紧,导致螺栓应力急剧减小,之后试验环管片顶部、底部、腰部等处螺栓应力迅速增大;随后盾构机继续推进4环及同步注浆过程中,螺栓所受应力不断波动,连续出现尖峰,之后渐渐趋于稳定值;后期施工荷载随盾尾离试验环管片距离的增加,对各测点的螺栓影响逐渐减小,螺栓应力随之逐渐变小至趋于稳定。

试验环管片纵向螺栓应力值及应力波动剧烈程度均明显大于环向螺栓应力值,是由于施工过程中环与环间通过纵向螺栓连接的管片截面除受水土荷载作用外,还受注浆压力、盾构机千斤顶推力的直接影响。若注浆压力过大,会造成管片的变形与错台,严重时甚至会剪断纵向连接螺栓。尤其对于类矩形盾构管片封顶块,注浆压力会造成封顶块向隧道内部出现空间位移,因此施工过程中

对注浆压力的控制尤为重要,整个注浆工艺有待深入研究;盾构机千斤顶推力会使已拼装好的管片产生沿盾构轴线方向向后的位移,易使纵向连接螺栓出现松弛现象,螺栓松弛会造成管片错位、接缝处渗漏水等现象,建议在管片脱出盾尾后进行螺栓复拧。

4 结论

(1)施工过程中,脱出盾尾工况应作为最不利工况对管片受力特性进行分析,类矩形盾构管片中柱附近截面外弧面钢筋受拉,内弧面受压明显,腰部截面内弧面受压,外弧面受拉不明显,顶部、底部与腰部之间位置处截面受力相似,内弧面拉应力较小,外弧面压应力较大;衬砌弯矩、轴力分布整体呈上小下大,左右对称分布;中柱接近纯受压构件,建议拼装时注意,避免出现裂缝或破坏。

(2)纵向螺栓在脱出盾尾阶段应力快速减小,脱出盾尾后又快速增大,建议在管片脱出盾尾后进行纵向螺栓复拧;稳定荷载阶段及后期运营,需定期进行纵、环向螺栓的查漏复拧,以保证隧道的整体性。同时,建议提高环向螺栓初期预紧力,以使接缝具有较高的初期转角刚度,利于控制脱出盾尾后的变形,从而有效减小类矩形隧道的横向变形量。不同螺栓预紧力对管片内力及结构变形的影响有待研究。

(3)同步注浆作为施工过程中管片所受的一重要荷载,浆液由注浆泵通过脉冲形式注入盾尾一定范围内,以流体或半流体形式分布,若压力、几何状态差异变化很大,对衬砌整体内力变化、周边地层稳定、地表沉降影响很大,需加强注浆控制;同时盾构机推进过程中应特别注意盾构机姿态控制,盾构机中心线与管片轴线应尽量重合,从而实现管片环向上注浆均匀分布,以提高管片所受荷载的对称性。

参考文献:

- [1] 张风祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):418-424.
- [3] 张厚美. 盾构隧道的理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

- [4] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1):97-109.
- [5] 张志勇, 李淑海. 城市矩形隧道的应用与施工工艺的发展[J]. 施工技术, 2009, 38(S1):54-56.
- [6] 朱瑶宏, 朱雁飞, 黄德中, 等. 类矩形盾构法隧道技术的开发与应用[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):1-12.
- [7] 杨志豪, 沈张勇, 朱雁飞, 等. 类矩形盾构隧道设计方案研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):83-91.
- [8] 朱瑶宏, 黄德中, 朱雁飞, 等. 类矩形盾构法隧道施工关键技术探索[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):170-180.
- [9] 龙建兵, 杨志豪, 沈张勇. 类矩形盾构工法在宁波轨道交通工程中的应用探讨[J]. 地下工程与隧道, 2016(3):1-6.
- [10] 朱瑶宏, 朱雁飞, 黄德中, 等. 类矩形盾构法隧道关键技术研究与应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(9):1055-1062.
- [11] 朱瑶宏, 朱雁飞, 叶宇航, 等. 类矩形盾构隧道衬砌结构受力性能的足尺试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):108-117.
- [12] 叶宇航, 黄德中, 李刚, 等. 类矩形盾构隧道衬砌结构极限承载力足尺试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):118-127.
- [13] 马险峰, 黄俊, 俞登华. 类矩形盾构隧道施工管片受力特性数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):164-169.
- [14] 王东方, 张维熙, 董子博, 等. 类矩形盾构隧道衬砌结构受力的现场试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6):174-181.
- [15] 叶俊能, 周顺华, 季昌, 等. 软土地区类矩形盾构隧道施工期变形规律[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S1):248-256.

Study on internal force distribution of quasi-rectangular shield tunneling construction

XU Sen¹, ZHU Yao-hong^{1*}, DONG Zi-bo², ZHOU Jun-hong², WU Cai-xia¹, YANG Lei¹

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd, Ningbo 310006, China)

Abstract: The mechanical characteristics of lining structure at operation stage can usually be simplified to the plane-strain problem. During the construction process, the analysis of segment stress becomes a three-dimensional problem due to the difference of the tunnel longitudinal load, uneven conditions of the boundary constraints, the cross-direction impact of the construction load and the time and spatial distributions of shield construction. Based on the project of large-section quasi-rectangular shield tunneling in Ningbo's soft stratum, the internal force distribution and deformation during construction period are monitored and analyzed. Study shows that the bending moment and the axial force distribution are close to the pre-analytical results, and the distribution is symmetrical. The upper internal force is smaller than that in the lower area. The stage of separating from the shield tail is the most unfavorable period in the construction process. The stress of the segments and bolts is increased rapidly. Afterwards, the stress tends to be stabilized as the advancing distance increases. The center column can be regarded as a pure compression member. Synchronous grout, longitudinal and circumferential bolts have a great influence on the stress of the segments. Both the control of synchronous grouting pressure and the bolts management on the preload in initial stage and re-tightening in the late stage are suggested to be strengthened.

Key words: quasi-rectangular shield tunneling; soft stratum; site monitoring; segmental internal stress

(责任编辑 韩超)