

DOI: 10.11779/CJGE2017S2049

盾构隧道弯螺栓接头力学特性受预紧力影响的数值研究

张稳军^{1,2}, 张云沛^{1,2}, 宋晓龙^{1,2}

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300354; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津, 300354)

摘要: 利用 ABAQUS 有限元分析软件, 通过数值模拟对盾构隧道弯螺栓接头在预紧力作用下的力学特性进行研究, 为螺栓接头的设计和施工提供理论依据。采用符合混凝土受力特性的 DP 本构模型和符合钢材受力特性的塑性本构模型, 研究预紧力对于弯螺栓接头力学特性的影响; 施加不同的荷载, 分析不同工况下预紧力作用效果的差异, 揭示预紧力作用的机理。结果表明: 预紧力改善了弯螺栓接头的力学特性, 增强了螺栓约束管片的能力, 减小了结构的整体变形。

关键词: 盾构隧道; 弯螺栓; 预紧力; DP 模型

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0203-04

作者简介: 张稳军(1975-), 男, 副教授, 博士生导师, 从事隧道与地下工程施工与设计研究。E-mail: wjzhang@tju.edu.cn。

Numerical study on mechanical behavior of bent bolted connection in shield tunnel under effect of preload

ZHANG Wen-jun^{1,2}, ZHANG Yun-pei^{1,2}, SONG Xiao-long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: With the help of ABAQUS FEM software, a numerical study is carried out on the mechanical properties of bent bolted connection in shield tunnel under the effect of preload, which offers theoretical evidence for the design and construction of bolted connection, considering the DP constitutive model fit for concrete as well as the plastic constitutive model fit for steel. The differences between the effect of preload under different load cases are analyzed, and the principle of the preload effect is revealed. The results show that the preload can improve the structural behavior of bent bolted connection, the restraint on the segment increases, and the entire deformation decreases.

Key words: shield tunnel; bent bolt; preload; DP constitutive model

0 引言

随着城市化的推进, 地上空间趋于饱和, 对地下空间的开发利用近年来成为研究热点。我国幅员辽阔, 地形地貌复杂, 不利的地质条件给盾构隧道的设计和施工带来了挑战, 接头的存在削弱了隧道衬砌结构的整体刚度。在软土地层中, 隧道施工运行的各个阶段都会产生沉降, 进而危害隧道安全。国内专家学者对于盾构隧道接头的受力变形进行了大量研究, 为不利地质条件下盾构隧道的设计和施工提供了理论依据。

王湛^[1]研究了隧道结构在纵向不均匀沉降下的受力和变形机制; 张建刚^[2]等考虑了螺栓预紧力根据武汉长江隧道工程管片接头对螺栓进行模拟; 吴彪^[3]利用光纤光栅监测技术监测盾构管片接缝及连接螺栓, 由此分析接缝及螺栓的应变变化规律; 方恩权^[4]等提出一种盾构隧道的纵缝接头力学模型, 获得了不同力学状态下的纵缝张开过程及极限纵缝张开量。

接头受力后变形是盾构隧道施工和运行中的关键控制因素, 现有研究提出了多种方法和措施控制接头的受力变形。在实际工程中, 弯螺栓接头综合性能好, 更具代表性。近年来广泛使用的高强螺栓能有效约束管片变形, 一定程度上弥补了接头对管片的削弱。综上, 本文以弯螺栓接头作为研究对象, 研究预紧力对弯螺栓接头力学行为的影响。

1 数值模型

1.1 几何建模

管片和螺栓建模参考《深圳地铁 7 m 盾构管片及螺栓受力现场测试及分析》^[3]相关数据。管片宽 1200 mm, 厚 400 mm, 内径 6700 mm, 外径 7500 mm, 单

基金项目: 国家重点研发计划项目 (02016YFL0802403); 国家自然科学基金项目 (51778412, 51378342)
收稿日期: 2017-08-02

块管片圆心角为 55° 。螺栓接头轴线弯曲,管片螺孔内无螺纹,依靠螺帽施加在垫片上的预拉力紧固管片。螺栓几何参数见表 1,构造见图 1。为简化计算,忽略垫片的建模,以两块管片模拟整个衬砌环。

表 1 螺栓几何尺寸表

Table 1 Geometric sizes of bolt				
螺杆直径	螺栓轴线弧长	螺栓轴线半径	螺母厚度	螺母直径
30 mm	550 mm	360 mm	24 mm	52 mm

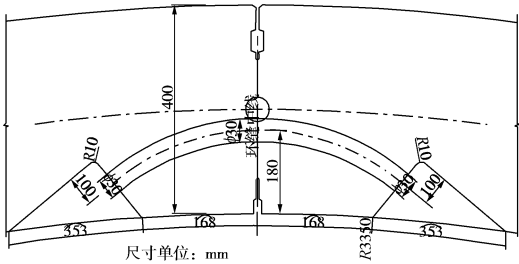


图 1 螺栓及手孔示意图

Fig. 1 Construction drawing of bolt and hole

1.2 本构关系及材料属性

混凝土强度等级为 C50,弹性模量为 3.45×10^4 MPa,泊松比为 0.2。取摩擦角为 30° ,剪胀角为 30° ,由规范中混凝土应力-应变曲线确定 DP 模型参数。使用摩擦型高强度螺栓,螺栓公称直径为 30 mm,泊松比为 0.3,其余参数见表 2。

表 2 螺栓接头材料参数表

Table 2 Material parameters of bolt			
螺栓等级	抗拉强度	屈服强度	弹性模量
8.8 级	800 MPa	640 MPa	2.1×10^5 MPa
10.9 级	1000 MPa	900 MPa	2.1×10^5 MPa

1.3 接触关系和网格划分

螺栓和螺孔的接触采用 surface to surface 模拟,螺帽和手孔面的接触采用 Tie 模拟,均采用自由网格划分,单元类型设置为 C3D10M,网格划分见图 2。

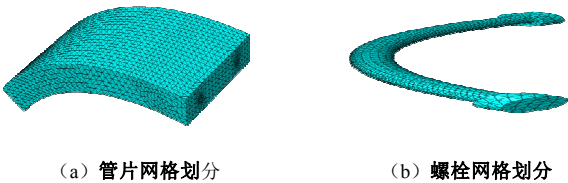


图 2 模型网格划分图

Fig. 2 Division of model mesh

1.4 边界条件和加载方式

管片左端固定,右端允许产生水平方向位移;于管片两端面施加垂直集中力模拟轴力,分 4 步加载。于管片上表面施加竖直面力模拟弯矩,分 3 步加载。边界条件和模型受力情况见图 3。

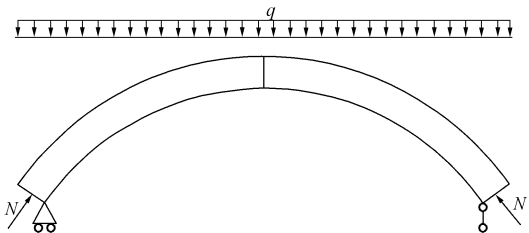


图 3 模型边界条件及受力图

Fig. 3 Boundary conditions and loads of model

2 数值分析

2.1 计算工况

(1) 将模型视为简支梁,由天津地铁 6 号线相关工程确定盾构隧道衬砌管环内力,在其基础上取整作为结构的内力,进而反算出荷载。

(2) 由规范确定 8.8 级高强螺栓预拉力为 280 kN,10.9 级高强螺栓预拉力为 355 kN。共取如下 12 种工况进行计算。

按螺栓划分:工况 1—6 使用 8.8 级高强螺栓,工况 7—12 使用 10.9 级高强螺栓;按预紧力划分:工况 1—3 和 7—9 不施加预紧力,工况 4—6 施加 280 kN 预紧力,工况 10—12 施加 355 kN 预紧力;按荷载组合划分:工况 1,4,7,10 为纯弯矩作用,8.8 级高强螺栓取 $310\text{ kN}\cdot\text{m}$,10.9 级取 $500\text{ kN}\cdot\text{m}$;工况 2,5,8,11 为纯轴力作用,8.8 级高强螺栓取 1100 kN,10.9 级取 1750 kN;工况 3,6,9,12 为弯矩轴力组合作用,取弯矩 $300\text{ kN}\cdot\text{m}$,轴力 1100 kN。

2.2 预紧力作用结果分析

对螺栓接头仅施加预紧力,研究其受力特性。

(1) 8.8 级高强螺栓

将螺栓分为螺帽和螺杆两部分,其应力见图 4。

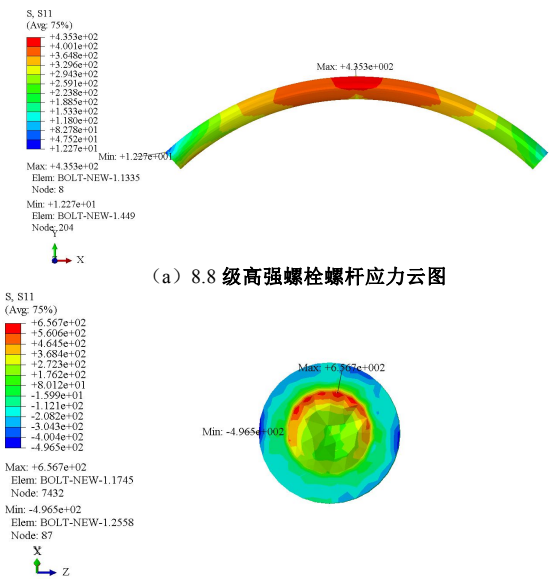


图 4 8.8 级高强螺栓接头应力云图

Fig. 4 Stresses of high-strength bolt 8.8

由云图可见, 螺杆整体受拉, 最大值位于中截面上轴线处, 最小值位于螺杆左端靠近螺帽处。螺帽基本受压, 最大压应力为 496.5 MPa, 部分区域受拉, 最大拉应力出现在螺帽与螺杆过渡处, 数值为 656.7 MPa。最大拉、压应力均出现在螺帽处, 体现了高强螺栓通过拧紧螺帽施加预紧力的作用机制。

(2) 10.9 级高强螺栓

10.9 级高强螺栓应力云图分布规律与 8.8 级高强螺栓相似, 拉应力最值提升为 550.3 MPa 和 164.0 MPa。螺杆应力分布与之前基本一致, 拉应力最大值提升 26.4%, 与预紧力提升幅度 26.7% 相接近, 从侧面验证了数值模拟结果的准确性; 螺帽基本受压, 最大拉压应力提升为 851.1 MPa 和 744.1 MPa。

2.3 预紧力对螺栓受力的影响分析

以 8.8 级高强螺栓为例, 考虑到螺栓破坏多发生在螺杆处, 本节只针对螺杆分 6 种工况进行分析, 研究预紧力对螺栓受力的影响。

(1) 弯矩作用

取施加预紧力前后螺杆轴线上若干点的应力分析, 其结果分别见图 5 和图 6。

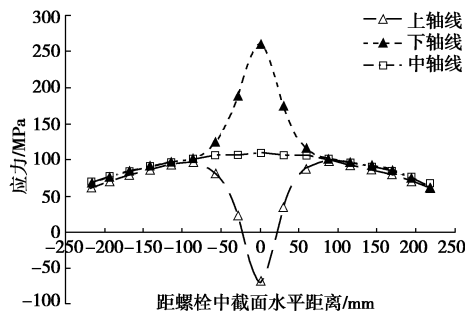


图 5 弯矩作用下螺杆轴线应力示意图

Fig. 5 Axial stresses of bolt under bending moment

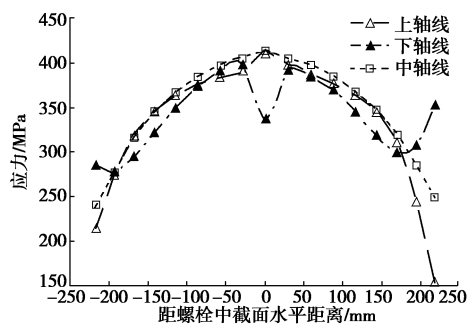


图 6 预紧后弯矩作用下螺杆轴线应力示意图

Fig. 6 Axial stresses of preload bolt under bending moment

可见未施加预紧力时螺杆基本受拉, 中轴线处应力变化较小, 分布在 50~100 MPa。中截面处应力差距明显, 顶部受压底部受拉, 越靠近螺帽应力越接近。上述应力分布规律充分体现了弯矩作用的效果: 跨中截面处弯矩最大, 产生应力最大, 并由跨中向两端减

小。此外, 螺杆顶部受到管片螺孔的挤压, 产生压应力。

施加预紧力后螺杆整体受拉, 应力明显提高, 对管片的约束作用增强; 三条轴线受力趋于一致, 改善了螺杆受力性能。此外, 下轴线部分节点应力与整体曲线存在差异, 这是由于弯矩作用下, 螺杆底部受到手孔挤压, 抵消了部分预拉力, 导致螺杆中截面下轴线处应力较小。螺杆两端节点靠近螺帽紧固面, 受预紧力影响较大, 存在应力集中, 故应力大于相邻部位。

(2) 轴力作用

分析轴力作用下螺杆应力见图 7。与弯矩作用下类似, 中轴线处应力变化较小, 中截面处应力存在差异。最大拉应力位于上轴线处, 最大压应力位于下轴线处。这是由于管片受两端挤压, 接缝面外侧张开内侧闭合, 导致螺杆上部受拉下部受压。取施加预紧力后的螺杆三条轴线上若干点应力分析, 其结果见图 8。

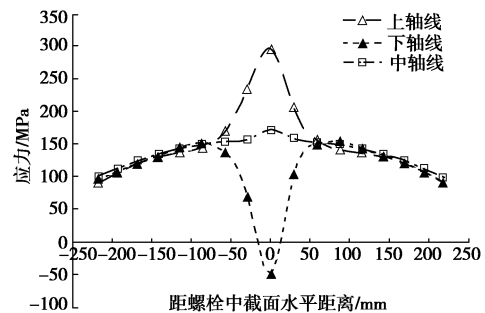


图 7 轴力作用下螺杆轴线应力示意图

Fig. 7 Axial stress of bolt under axial force

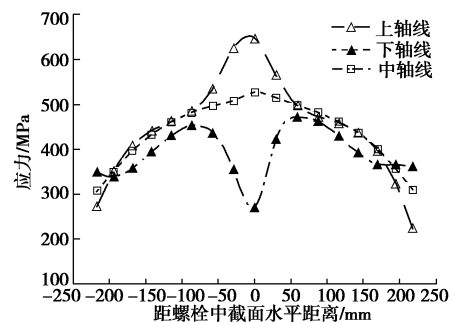


图 8 预紧后轴力作用下螺杆轴线应力示意图

Fig. 8 Axial stresses of preload bolt under axial force

施加预紧力后螺杆整体受拉, 应力明显提高, 对管片约束作用增强; 相比弯矩作用, 螺栓中截面上下应力差更明显。这是由于螺栓弯曲, 轴力在中截面产生附加弯矩, 使螺杆上部受拉下部受压, 增大应力差。

(3) 轴力弯矩组合作用

螺杆应力分布与轴力作用下类似, 但中截面上轴线处最大应力为 109.8 MPa, 大幅减小, 这是由于弯矩抵消了部分轴力产生的偏心弯矩。施加预紧力后螺杆整体受拉, 应力明显提高; 螺栓应力基本呈抛物线

分布，应力变化与预紧后轴力作用下的结果更吻合，说明在实际工程中，弯螺栓接头应力主要由轴力控制。

2.4 预紧力对变形的影响

考虑模型结构和荷载关于接缝面对称，理论上不会产生错台量，故本文研究整体最大位移和接缝面张开量。统计各工况下的变形值见表 3。

表 3 模型变形统计表

Table 3 Deformation statistics of model

外荷载	工况	接缝面张开量/mm		最大水平位移/mm	最大竖直位移/mm
		外侧	内侧		
弯矩	1	-0.0211	0.8067	2.628	-2.652
	4	-0.0204	0.1580	1.840	-2.299
	7	-0.0402	1.4131	4.664	-4.671
	10	0.0684	0.5814	3.048	-4.160
轴力	2	1.5276	-0.0857	-5.030	6.036
	5	0.9098	-0.0901	-4.431	4.783
	8	2.7080	-0.1613	-8.794	10.610
	11	2.0133	-0.1689	-8.052	9.129
弯矩 轴力 组合	3	0.4995	-0.0029	-2.598	2.642
	6	0.1274	-0.0388	-2.232	2.067
	9	0.4911	-0.0523	-2.571	2.608
	12	0.0832	-0.0350	-2.684	2.154

注：1.表中工况由上文“2.1 计算工况”中规定；2.接缝面张开量正值表示张开，负值表示闭合；水平位移正值表示向右，竖向位移正值表示向下。

分析工况 1—3：弯矩作用下，最大水平位移为正，最大竖向位移为负，接缝面外侧闭合内侧张开；轴力作用下，最大水平位移为负，最大竖向位移为正，接缝面外侧张开内侧闭合；组合作用下，变形与轴力作用下更接近，但数值更小，体现了弯矩的抵消作用。

对比工况 1 和工况 4、工况 7 和工况 10，施加预紧力后管片位移和张开量显著减小；对比工况 2 和工况 5，工况 8 和工况 11，施加预紧力后，轴力作用下管片变形的减小幅度小于弯矩作用；对比工况 3 和工况 6，工况 9 和工况 12，施加预紧力后，组合作用下管片变形的减小幅度介于弯矩作用和轴力作用之间。

综上所述，预紧力对结构变形的作用机理如下：螺栓预拉力使管片预先受力，荷载由螺栓向管片传递，引起较小变形。外荷载作用后，荷载由管片向螺栓接头传递，由于螺栓本身的应力较高，故在外荷载作用下应力提高幅度较小，后期变形较小，充分发挥了螺栓接头对管片的约束作用；弯矩作用下螺栓承受弯曲正应力，轴力作用下螺栓除承受轴力产生的应力外，还需要承受附加弯矩产生的应力，因此应力和变形增大，导致施加预紧力后轴力作用下管片变形的减小幅度小于弯矩作用。

3 结 论

本文利用 ABAQUS 有限元软件建立模型，模拟一定埋深下盾构隧道衬砌管片受力情况，对不同工况下螺栓接头的受力特性进行分析，得出以下结论：

(1) 预紧力使螺栓预先受拉，有效提高了螺栓接头的受力特性和约束能力，减小了管片的整体变形，提高了结构的受力性能。

(2) 螺帽整体受压，通过紧密挤压手孔面产生预紧力拉伸螺栓。拉应力最大值出现在螺帽和螺杆过渡处，压应力最大值出现在螺帽紧固面边缘。因此，在螺栓加工中，应重视螺帽和螺杆过渡处的制作工艺，保证该部位良好的承载力。

(3) 施加预紧力后，轴力作用下管片变形的减小幅度小于弯矩作用，而组合作用下减小幅度介于弯矩作用和轴力作用之间。因此，工程设计中宜使盾构隧道受弯矩作用控制，充分发挥螺栓接头的约束作用。

参考文献：

[1] 王 湛. 软土地层中盾构隧道结构沉降与变形机制分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (WANG Zhan. Settlement and failure mechanism of shield tunnel in soft soil area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))

[2] 张建刚, 何 川. 复杂接缝面管片接头的力学性能数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 1350 - 1354. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan. Numerical analysis of mechanical property of shield tunnel segmental joint with complex interface[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 1350 - 1354. (in Chinese))

[3] 吴 彪. 深圳地铁 7 m 盾构管片及螺栓受力现场测试及分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (WU Biao. Field test and analysis on a 7 m shield segment and bolt' mechanics characteristic in Shenzhen metro engineering project[D]. Beijing: Beijing JiaoTong University, 2015. (in Chinese))

[4] 方恩权, 杨玲芝, 李晓军, 等. 地铁盾构隧道纵缝接头极限张开量研究[C]// 2014 中国青岛城市轨道交通管理和技术创新研讨会论文集. 2014. (FANG En-quan, YANG Ling-zhi LI Xiao-jun, et al. The study of subway shield tunnel longitudinal seam joint limit opening[C]// Seminar papers of Qingdao China urban rail transit conference on management and technology, 2014. (in Chinese))

(本文责编 明经平)