

DOI: 10.11779/CJGE2019S1029

# 天津滨海 Z2 号线盾构隧道接头螺栓比选及抗弯刚度研究

张稳军<sup>1, 2</sup>, 张琪<sup>1, 2</sup>, 张高乐<sup>1, 2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 2. 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)

**摘要:** 针对不同形式螺栓接头, 充分考虑复杂接缝间的不连续性及接头预紧力, 以天津滨海 Z2 号线盾构隧道管片纵缝为研究对象, 分析比较了直螺栓、斜螺栓和弯螺栓三种接头在不同弯矩和轴力条件下对管片接缝力学性能的影响。根据分析结果给出了三种螺栓接头的适用性, 以及三种螺栓接头在不同埋深、弯矩作用下的抗弯刚度建议值。研究结果表明: 螺栓形式对螺栓最大受力位置影响很小; 螺栓拉应力和接缝张开量随轴力的增大而减小, 但接头抗弯刚度均随之增大; 螺栓拉应力、接缝错台量和张开量随弯矩的提升而增大, 但接头抗弯刚度随之减小。

**关键词:** 盾构隧道; 螺栓接头; 力学性能; 接缝面; 抗弯刚度

**中图分类号:** U455.43    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2019)S1-0113-04

**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。

## Selection of bolted joints and bending stiffness of shield tunnel of Z2 metro line in Tianjin Binhai New Area

ZHANG Wen-jun<sup>1, 2</sup>, ZHANG Qi<sup>1, 2</sup>, ZHANG Gao-le<sup>1, 2</sup>

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

**Abstract:** Aiming at different types of bolted joints, taking into account the discontinuity of complex joints and the pre-tightening force of joints, the longitudinal joints of shield tunnel segments of Z2 metro line in Tianjin Binhai New Area are studied. The effects of straight bolts, oblique bolts and bending bolts on the mechanical properties of segment joints under different bending moments and axial forces are analyzed and compared. According to the analysis results, the applicability of the proposed three kinds of bolted joints and their values of bending stiffness under different buried depths and bending moments are given. The results show that the bolt form has little effect on the maximum stress position of the bolts. The tensile stress and joint opening of the bolts decrease with the increase of axial forces, but the bending stiffness of the joints increase. The tensile stress, dislocation and opening of the joints increase with the increase of the bending moment, but the bending stiffness of the joints decreases accordingly.

**Key word:** shield tunnel; bolted joint; mechanical property; joint surface; bending stiffness

## 0 引言

盾构隧道衬砌结构为装配式结构, 结构的破坏始于接缝处<sup>[1]</sup>。由于地下工程施工和不均匀沉降等影响因素, 导致隧道结构接缝变形、接头位置应力增大及渗漏等现象。因此, 盾构隧道衬砌结构接头的力学性能成为研究热点。国内管片主要采用螺栓连接, 接头形式为单排直螺栓、单排斜螺栓和单排弯螺栓<sup>[2]</sup>等。其中直螺栓施工方便、制作简单, 但预留手孔较大, 易出现管片局部破坏; 斜螺栓接头手孔面积最小, 安装快速, 对管片损伤最小; 弯螺栓应用广泛, 预留手孔较小, 安装较困难, 易造成手孔处混凝土开裂。

李守巨等<sup>[3]</sup>分析了轴力对混凝土管片直螺栓接头极限承载力的影响, 研究结果表明接头极限承载力随轴力增大而增大。朱瑶宏等<sup>[1]</sup>以不同螺栓形式的接缝为研究对象, 探讨了直螺栓和弯螺栓接头的破坏过程。李新星等<sup>[4]</sup>的研究结果表明深埋隧道衬砌的纵缝转角刚度比浅埋隧道衬砌的纵缝转角刚度大。张稳军等<sup>[5]</sup>研究了预紧力对弯螺栓接头力学特性的影响。

本文依托天津滨海 Z2 号线, 盾构隧道埋深约在

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778412); 天津市建设系统科学技术项目发展计划(2016-17)

收稿日期: 2019-04-29

6.6~26.8 m 之间, 主要位于含水量较高的软土地层, 穿越地层包括粉质黏土、粉土、淤泥质黏土等。此外, 隧道工程沿线地面交通较为繁忙, 地下管线密集。综合考虑 Z2 号线盾构隧道区间所处地层、隧道埋深以及周边环境的影响, 管片间选用螺栓连接: 由于联络通道或管道的存在, 该隧道区间段受力较复杂, 为接头破坏时拆除方便, 宜选用直螺栓接头, 此外, 抗震要求较高的隧道区段亦可采用直螺栓接头; 隧道穿越承压含水层地段宜采用抗弯能力最强、受力性能较好的斜螺栓接头; 其余隧道区间可采用适用于小直径盾构隧道的弯螺栓接头。

综上所述, 不同形式的螺栓接头力学性能有所不同, 但仍然采用相同抗弯刚度。鉴于此, 提出了不同埋深作用下三种螺栓接头的抗弯刚度建议值, 研究结果可为天津滨海 Z2 号线盾构隧道螺栓接头实际应用, 以及接头抗弯刚度的取值提供参考。

## 1 管片接头三维精细化数值模型

### 1.1 管片-接头结构几何参数

以天津滨海 Z2 号线为工程背景, 管片纵缝采用 2 根 8.8 级 M30 高强螺栓接头呈单排布置形式, 管片圆心角取 67.5°, 环宽 1.5 m, 隧道外径为 6.6 m。

### 1.2 数值模型材料参数

本文采用 ABAQUS 内置的 Drucker-Prager 双曲线强化本构模型, 混凝土材料的强度等级为 C50。考虑螺栓材料非线性特征, 8.8 级摩擦型高强螺栓选用双线性等向强化本构模型, 弹性模量取 210 GPa。

### 1.3 数值模型加载方式

双管片-螺栓接头加载模型如图 1 所示, 为防止接头部位产生附加弯矩, 其边界条件如下: 双管片一端设置为可动铰支座, 另一端设置为固定铰支座, 通过在管片上施加相应的等效荷载来抵消圆弧效应引起的附加弯矩。

加载方式: 采用力加载方式对数值模型进行分级加载, 在管片两端面位置施加均布压力, 在管片上表面施加面板压力。针对 8.8 级高强螺栓施加预紧力为 280 kN。



图 1 数值模型加载示意图

Fig. 1 Loading diagram of numerical model

### 1.4 数值模拟计算工况

荷载确定方法: 根据地质勘察报告, 土层参数如表 1 所示, 将隧道有限元模型视为均质连续圆环, 考

虑横向接头的影响, 对管片环进行整体折减(取横向刚度有效率为 0.9)。分别建立不同隧道埋置深度的二维地层-结构组合模型进行数值计算, 确定管片接缝部位所受轴力和弯矩的范围大小: 针对双管片-螺栓接头模型选取管片接头受轴力作用在 -1054 kN 至 -2083 kN 的范围, 管片接头受弯矩在 -280 kN·m 至 280 kN·m 之间。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soils

岩土 编号	岩土 名称	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	基床系数 $K/(MPa \cdot m^{-1})$	厚度 /m
⑥2 <sub>1</sub>	淤泥质黏土	1.78	9.07	0.6~5.6
⑧1	粉质黏土	2.00	18.00	0.7~15.4
⑧2	粉土	1.99	26.00	0.5~7.5
⑧2 <sub>4</sub>	粉细砂	2.01	22.00	0.7~5.4
⑨1	粉质黏土	1.97	15.02	0.9~7.1

## 2 计算结果

### 2.1 弯矩对不同螺栓接头力学性能影响

#### (1) 弯矩对不同螺栓接头应力影响

沿螺栓杆轴线分别提取直螺栓、弯螺栓和斜螺栓上侧节点 Mises 应力。由图 2 可知: 三种螺栓的最大应力值均出现在复杂接缝面附近, 其中直螺栓应力最大, 弯螺栓应力最小; 斜螺栓上侧节点距接缝面越远, 斜螺栓应力提升速率越快。

由图 3 可知: 斜螺栓应力最大, 直螺栓应力次之, 弯螺栓应力最小; 斜螺栓最大应力位置不在螺栓杆上侧节点处, 而位于复杂接缝面处螺栓杆的侧面; 斜螺栓和弯螺栓最大应力值随弯矩变化不大, 直螺栓最大应力值随弯矩的增大而增大。

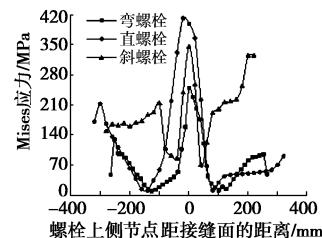


图 2 螺栓应力沿轴线变化规律

Fig. 2 Curves of stresses along axis of bolts

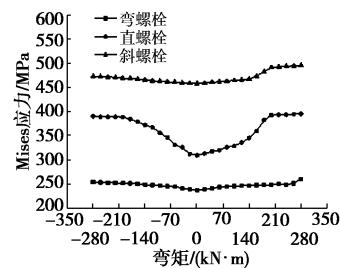


图 3 螺栓应力随弯矩变化曲线

Fig. 3 Curves of bolt stresses with bending moments

### (2) 弯矩对不同螺栓接头变形影响

由图 4 可知: 螺栓应变沿轴线变化曲线均呈“单峰”形式, 远离接缝面的螺栓应变值为 0; 斜螺栓应变值最大, 直螺栓应变值次之, 弯螺栓应变值最小。

从图 5 可知: 由于斜螺栓轴线倾斜角度的影响, 斜螺栓接头张开量最小, 错台量最大; 三种螺栓接头错台量随弯矩的增大而增大, 其中弯螺栓错台量最小; 三种螺栓接头张开量随弯矩的增大而增大, 但其数值差别不大。

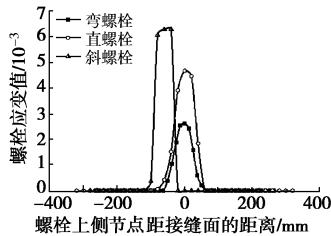


图 4 螺栓应变沿轴线变化规律

Fig. 4 Curves of strains along axis of bolts

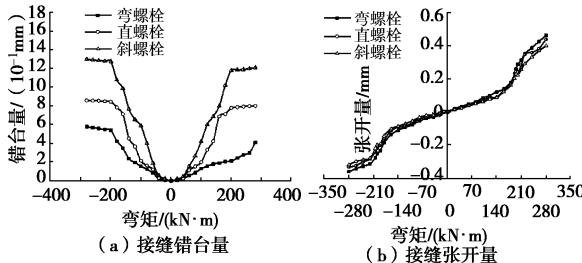


图 5 接缝变形量随弯矩变化曲线

Fig. 5 Deformation curves of seam with moments

## 2.2 轴力对不同螺栓接头力学性能影响

### (1) 轴力对不同螺栓接头应力影响

由图 6 可知: 保持弯矩大小为 280 kN·m 时, 三种螺栓应力随轴力变化规律相同, 螺栓拉应力随轴力增大而减小; 斜螺栓应力与轴力的关系曲线呈线性发展, 且变化速率较小。

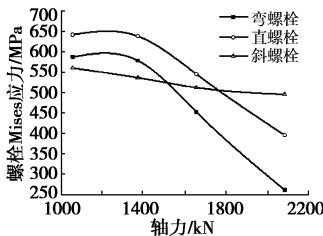


图 6 螺栓应力随轴力变化曲线

Fig. 6 Variation curves of bolt stresses with axial forces

### (2) 轴力对不同螺栓接头变形影响

由图 7 可知: 保持弯矩大小为 280 kN·m 时, 三种螺栓接头张开量随轴力变化规律相同, 接头张开量随轴力的增大而减小; 弯螺栓接头张开量最大, 斜螺栓接头张开量最小。

## 2.3 不同螺栓接头抗弯刚度

由图 8 可知, 三种螺栓接头的  $\theta - M$  关系曲线均

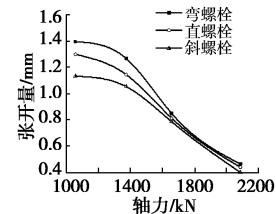


图 7 接缝变形量随轴力变化曲线

Fig. 7 Deformation curves of seam with axial forces

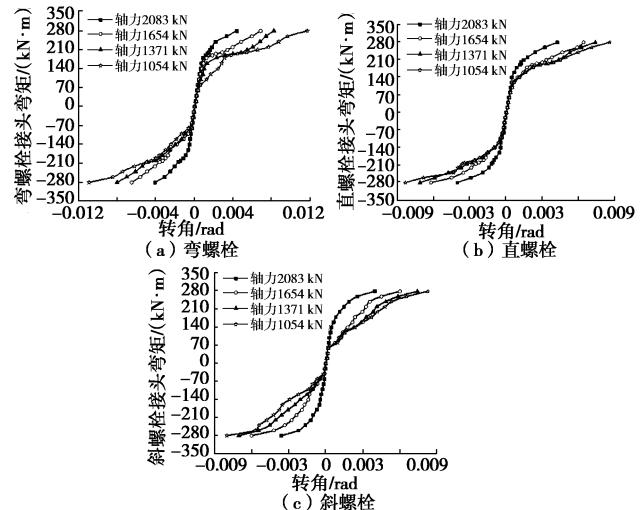


图 8 螺栓接头弯矩 - 转角关系曲线

Fig. 8 Bending moment-angle relation curves of bolted joints

呈非线性, 随着弯矩的增大, 曲线各点的斜率逐渐减小。螺栓接头转角变化速度随弯矩的增大而增大, 直至接头破坏。对比结果可知, 轴力越大, 接头转角随弯矩变化曲线的线性发展阶段越长。

结合  $\theta - M$  关系曲线采用割线法获取接头抗弯刚度  $K_\theta$ 。由图 9 可知, 接头抗弯刚度与弯矩关系曲线呈非线性, 接头抗弯刚度随弯矩的增大而减小, 随轴力增大而增大, 斜螺栓接头抗弯刚度最大。

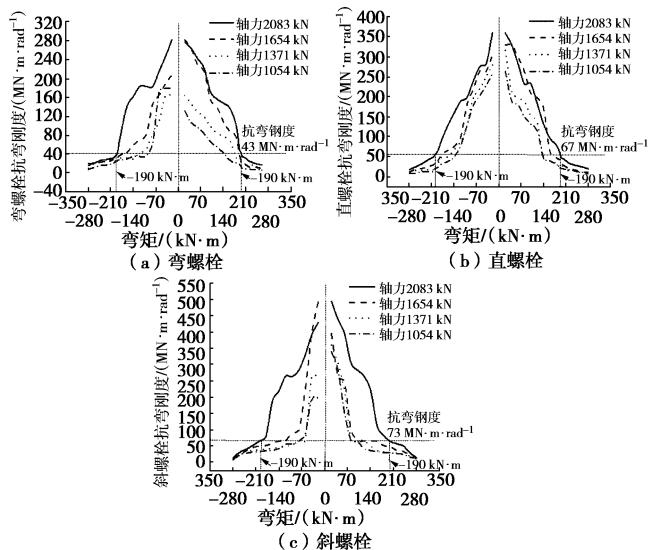


图 9 螺栓接头弯矩 - 抗弯刚度关系曲线

Fig. 9 Bending moment-bending stiffness curves of bolted joints

表 2 接头抗弯刚度建议值

Table 2 Recommended values of bending stiffness of joints

正负弯矩 /(kN·m)	埋深 /m	弯螺栓抗弯刚度/(MN·m·rad <sup>-1</sup> )		直螺栓抗弯刚度/(MN·m·rad <sup>-1</sup> )		斜螺栓抗弯刚度/(MN·m·rad <sup>-1</sup> )	
		$K_{\theta}^+$	$K_{\theta}^-$	$K_{\theta}^+$	$K_{\theta}^-$	$K_{\theta}^+$	$K_{\theta}^-$
10~190	4D	40~290	40~290	65~375	65~375	70~495	70~460
	3.5D	35~290	30~255	40~345	40~335	50~445	50~420
	3D	25~190	25~190	20~300	35~310	30~400	40~340
	2.5D	20~175	25~180	20~295	20~290	30~370	35~300
	2D	15~155	20~160	15~265	15~260	25~330	30~270
	D	15~130	15~135	15~220	15~220	20~280	25~225
190~280	4D	15~40	20~40	20~65	15~65	10~70	10~70
	3.5D	10~35	15~30	10~40	10~40	10~50	10~50
	3D	5~25	10~25	5~20	10~35	10~30	10~40
	2.5D	5~20	5~25	5~20	5~20	10~30	5~35
	2D	4~15	4~20	4~15	4~15	9~25	4~30
	D	3~15	3~15	3~15	3~15	5~20	3~25

注: 特定弯矩条件下抗弯刚度的取值可采用线性插值法进行计算;  $K_{\theta}^+$ 是正抗弯刚度,  $K_{\theta}^-$ 为负抗弯刚度; D为隧道外径。

## 2.4 接头螺栓比选方案及接头抗弯刚度建议取值

基于 2.3 节对接头抗弯刚度的研究, 给出了螺栓接头抗弯刚度在正负弯矩为 10~280 kN·m 范围内不同埋深下接头抗弯刚度  $K_{\theta}$  建议取值, 如表 2 所示。

基于上述研究结果可知, 受相同外荷载作用下, 弯螺栓应力最小, 在符合设计要求的前提下, 可适当降低螺栓等级, 节约成本。针对盾构隧道不同区段的受力特征, 对三种螺栓接头进行比选, 见表 3 所示。

表 3 三种螺栓接头性能对比

Table 3 Comparison of performances of three kinds of bolted joints

螺栓形式	优点及适用性
斜螺栓	抗弯性能最强: 易受弯破坏部位 防水性能较好: 隧道穿越承压层区段 手孔面积最小, 对管片损伤最小: 大直径盾构隧道
弯螺栓	抗剪性能最强: 易受剪破坏部位 接头柔性较好, 对管片损伤较小: 管片较薄、中小直径盾构隧道
直螺栓	拆除方便: 受力较复杂部位, 以及有抗震要求区段

## 3 结语

(1) 管片接缝处的螺栓应力较大, 但螺栓形式对螺栓最大受力位置影响很小; 相同外荷载作用, 斜螺栓应变值最大, 直螺栓应变值次之, 弯螺栓应变值最小。

(2) 三种螺栓接头错台量和张开量均随弯矩的增大而增大; 三种螺栓接头张开量均随轴力的增大而减小。

(3) 接头弯矩保持不变, 螺栓拉应力随轴力增大而减小; 轴力保持不变, 螺栓拉应力随弯矩增大而增大; 接头抗弯刚度随弯矩的增大而减小, 随轴力增大而增大。

## 参考文献:

[1] 朱瑶宏, 柳 献, 张晨光, 等. 地铁盾构隧道纵缝接头螺栓

形式对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1427~1435. (ZHU Yao-hong, LIU Xian, ZHANG Chen-guang, et al. Contrast test research on longitudinal joint with different forms of bolts in metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1427~1435. (in Chinese))

[2] 王慎堂. 隧道管片通缝拼装与错缝拼装的比较[D]. 上海: 同济大学, 2002. (WANG Shen-tang. The comparison of shield tunnel with segment seams in sequence and in stagger[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))

[3] 李守巨, 刘军豪, 上官子昌, 等. 钢筋混凝土直螺栓管片接头抗弯极限承载力的简化计算模型[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 18~23. (LI Shou-ju, LIU Jun-hao, SHANG GUAN Zi-chang, et al. Simplified computing models for ultimate flexural capacity of reinforced concrete segment joints strengthened by straight bolts[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(1): 18~23. (in Chinese))

[4] 李新星, 杨志豪, 曹文宏. 超大隧道装配式管片接头刚度的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 315~320. (LI Xin-xing, YANG Zhi-hao, CAO Wen-hong. Experimental investigations on stiffness of segment joints of larger tunnel prefabricated lining[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 315~320. (in Chinese))

[5] 张稳军, 张云旆, 宋晓龙. 盾构隧道弯螺栓接头力学特性受预紧力影响的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 203~206. (ZHANG Wen-jun, ZHANG Yun-pei, SONG Xiao-long. Numerical study on mechanical behavior of bent bolted connection in shield tunnel under effect of preload[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 203~206. (in Chinese))

(责编: 明经平)