

# 温州轨道交通 M1 线盾构隧道衬砌管片接头力学特性<sup>\*</sup>

刁维科

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,430063,武汉//高级工程师)

**摘 要** 为研究温州轨道交通 M1 线地铁盾构隧道衬砌的极限抗弯承载力和接头变形能力,基于地铁盾构隧道变形的衬砌管片接头张开破坏试验,介绍了地铁衬砌结构接头破坏试验的研究内容,包括加载装置、荷载设计、测试内容,以及部分试验结果,并对试验进行了数值模拟分析。研究结果表明:正、负弯矩工况下,接头力学性能发展可大致分为线性增长、塑性发展和极限破坏 3 个阶段,极限破坏状态在正、负弯矩作用下的破坏模式并不相同。

**关键词** 城市轨道交通;盾构隧道;衬砌管片;力学特性  
**中图分类号** U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.005

## Mechanical Properties of Shield Tunnel Lining Segment Joint on Wenzhou Rail Transit Line M1

DIAO Weike

**Abstract** To study the ultimate bending bearing capacity and joint deformation ability of Wenzhou Rail Transit Line M1 shield tunnel lining, based on the opening failure test of the deformed lining segment joint of the shield tunnel, the research contents of metro lining structure joint failure test are introduced, including loading device, load design, test content and part of the test results. Numerical simulation analysis of the test is carried out. The results show that the development of joint mechanical behavior under positive and negative bending moments can be roughly divided into three stages: linear growth stage, plastic development stage and ultimate failure stage. The failure modes of ultimate failure state under positive and negative bending moments are different.

**Key words** urban rail transit; shield tunnel; lining segment; mechanical property

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

## 0 引言

盾构隧道衬砌结构由管片和接头构成,其中管

片接头是盾构隧道中重要的一部分。由于盾构隧道接头抗弯刚度弱于盾构管片,故接头成为了隧道衬砌的薄弱点,其力学行为极大地影响了整环的力学性能。接头包括接头、螺栓和螺栓孔等部件,细部结构相对复杂,目前并无统一的力学性能计算公式。因此研究盾构隧道接头的受力和变形是探讨盾构隧道衬砌整体受力和变形的关键。

目前常用的研究隧道衬砌受力的方法有足尺试验和数值模拟。足尺试验能够直接且真实地反映管片的力学行为,给工程设计提供最直接的意见,且其还可以用于验证数值模型。对于重大工程的盾构隧道衬砌管片力学性能,多采用整环管片加载试验的方式进行设计荷载作用下管片整环的受力和变形分析研究。文献[1]针对具体工程中的接头力学性能进行了试验研究,主要研究了管片接头抗弯刚度和抗剪刚度。文献[2]基于管片接头极限承载力试验,研究了管片的破坏变化特征。文献[3]针对武汉长江隧道承受高水压和穿越高渗透性砂性土质的情况,分析了高水压和变水压条件下的管片衬砌结构力学变化规律。文献[4]开展 2 组错缝拼装盾构隧道整环足尺试验,研究了隧道的结构破坏机制及外弧面纵缝变形规律。文献[5]开展了纵向接头局部足尺试验,研究了接头的受力变形特征。

但足尺试验需要消耗大量的人力物力,无法开展系统性的多工况管片接头试验。为了研究更多工况下接头的力学行为,可以开展既有试验的三维精细化数值模拟,并通过对比模拟结果与试验结果的一致性来验证所提数值模拟的有效性。文献[6]将混凝土本构简化为双折线线性强化弹塑性模型,对管片接头进行三维线弹性和弹塑性有限元分析。文献[7]针对外径为 4.81 m 的原型管片接头开展接头抗弯试验,研究了接头抗弯性能和破坏过程。文献[8]结合工程背景,对管片接头进行了足尺试验,

<sup>\*</sup> 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2021-K-080)

并在足尺试验的基础上进行了数值模拟,分析了管片接头在压弯状态下的破坏过程,建立了管片接头的三阶段抗弯刚度模型,为工程设计提供了支撑。

根据足尺试验和数值模拟获得的刚度模型可以较好地应用于后续的隧道开挖沉降计算。随着盾构隧道的发展,其力学性能及极限破坏状态千差万别,且随着管片接头断面的增加,接头的极限张开量也较传统地铁管片有所改变。本文以温州轨道交通 M1 线深厚软土层地铁盾构隧道设计管片为研究对象,采用同济大学自主研发的可三向加载多功能衬砌管片接头力学性能试验系统,进行了正、负弯矩作用下的接头张开破坏试验。通过试验获得该管片接头在正、负弯矩作用下的接头变形曲线,研究其在弯矩与轴力共同作用下的力学性能变化及接头张开破坏的全过程,为大直径、大埋深、高水压、长距离及土质差的盾构隧道设计提供技术指导与借鉴。

### 1 管片接头足尺试验

#### 1.1 试验目的及内容

在软土地区,尤其是温州地区,盾构隧道变形的控制是必须的。盾构隧道管片的接头是隧道衬砌结构的薄弱环节,大部分隧道病害多发生在接头位置(如错台、掉块、漏水等)。温州轨道交通 M1 线隧道位于深厚软土地区,该地区软土分布广泛,工程力学性质相较于其他软土性质更差,且目前深厚软土地区盾构隧道结构设计及沉降控制系统指导经验不足。因此极有必要针对管片接头进行力学压弯试验及数值模拟。结合依托工程衬砌结构及接头受力特点,设计足尺管片接头正弯矩与负弯矩工况压弯试验,通过压弯试验获得管片接头的抗弯性能。本文的研究目的为:研究管片接头在正、负弯矩下的力学性能变化过程;研究管片接头在正、负弯矩下的接头张开变形特征;为计算实际埋深工况下的隧道变形及地面沉降奠定试验基础。

#### 1.2 试验装置与加载方式

试验加载设备为由同济大学自主研发的 TJ-GPJ2000 管片接头试验加载系统。在试验中,通过加载系统的轴向加载作动器对试件施加水平荷载以模拟接头轴力,通过垂向加载作动器对试件施加竖向荷载以导入接头弯矩,采用数据采集系统对试件变形、应变和加载荷载等参数进行实时采集。

控制子系统采用高级工控机自动控制试验进程,根据需求完成多通道异步阶梯加载和负荷保

持,自动采集试验力和垂向加载作动器的活塞位移,记录试验曲线,并能以通信方式或模拟输出方式将上述试验数据结果输出至数据采集系统,为试验数据的进一步处理分析提供了便利。控制程序界面截图如图 1 所示。数据采集系统采用 Datataker 智能可编程数据采集器采集试验数据,可自动记录由测试设备传来的电信号,能够实时、独立地记录数据,通过一定的转化公式将电信号转换为应力、应变或位移数据。试验数据采集系统如图 2 所示。

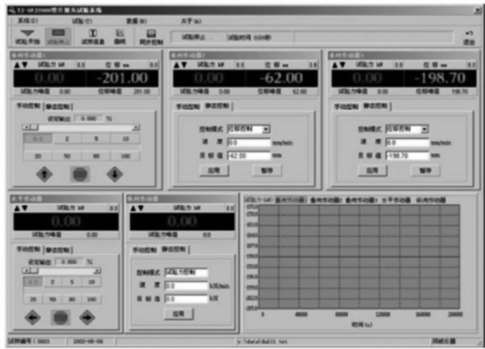


图 1 控制程序界面软件截图

Fig. 1 Software screenshot of control program interface

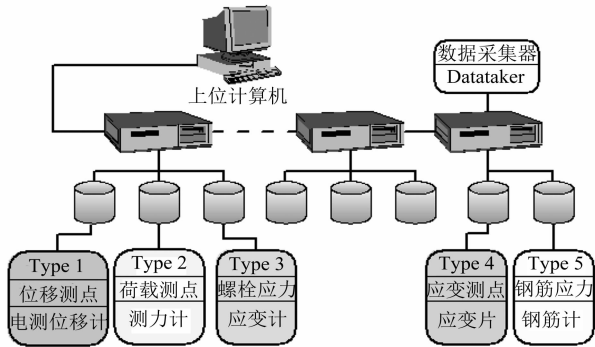


图 2 试验数据采集系统

Fig. 2 Test data acquisition system

本研究中的正弯矩工况指的是管片内侧受拉、外侧受压的情况,而负弯矩工况指的是管片外侧受拉、内侧受压的情况。在支座两端分别施加 200 kN 的轴力后再施加竖向荷载。

#### 1.3 试验试件与工况

盾构隧道外直径  $D=6\,700\text{ mm}$ ,管片内直径  $d=5\,900\text{ mm}$ ,管片厚度  $h=400\text{ mm}$ ,幅宽  $L=1\,200\text{ mm}$ 。盾构隧道结构形式采用 6 分块管片衬砌,管片混凝土强度等级为 C50,抗渗等级  $\geq\text{P10}$ ,部分构造钢筋采用 HPB300,主筋采用 HRB400 钢筋;衬砌环的纵缝、环缝采用弯螺栓连接,同环内块与块间采用两根 M33 弯螺栓环向连接,每环共 12 根。

TJ-GPJ2000 管片力学试验加载系统所能加载的最大试件尺寸为 2.6 m(长)×2.0 m(宽)×0.7 m(高)。据此试件的尺寸设计为 2.3 m(长)×1.2 m(宽)×0.4 m(高),管片接头试件尺寸详图如图 3 所示。试验试件参数如表 1 所示。

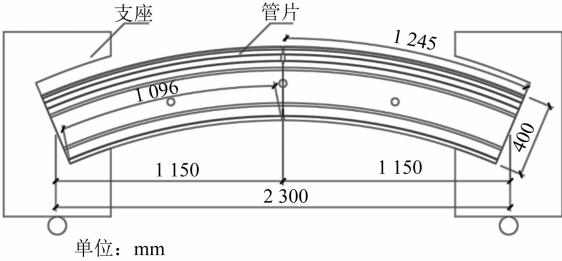


图3 管片接头试件尺寸详图

Fig. 3 Detail drawing of segment joint specimen size

表 1 接头压弯试验及试件参数

Tab. 1 Joint bending test and specimen parameters		
序号	试验名称	试件尺寸(弦长×环宽×高)
1	接头正弯矩压弯试验	2.3 m×1.2 m×0.4 m
2	接头负弯矩压弯试验	2.3 m×1.2 m×0.4 m

1.4 测点布置设计

本次试验主要监测内容为跨中挠度、混凝土表面应变、接头张开量及螺栓应变。针对每种试验加载工况,布设管片挠度(位移)测点 4 个,正弯矩工况下设置混凝土应变测点 17 个,负弯矩工况下设置混凝土应变测点 10 个,接头张开位移计测点 4 个,螺栓应变测点 4 个,具体测试内容及测点布设位置如表 2 所示。

表 2 测试内容及测点布设位置

Tab. 2 Measuring items and layout position of measuring points		
测试内容	测试元件	测点布设位置
管片挠度	挠度计(位移计)	顶着管片内弧面
混凝土应变	混凝土应变计	管片环向表面贴片
接头张开量	接头张开位移计	接头内外弧面
螺栓应变	螺栓应变计	每根螺栓 2 个

在一根弯螺栓的上、下表面各布设 1 个应变片,一组试验 2 根弯螺栓共 4 个应变片。在管片内、外弧面各布设 2 个位移计以测量接头张开量。在管片试件外弧面表面接头左、右两侧各布设 6 个混凝土应变片。在接头一侧表面布设 5 个混凝土应变片。在试件下方设置 4 个挠度位移计,接头左、右位置各 2 个。

1.5 管片接头力学试验结果

1.5.1 正弯矩工况

基于上表面 2 个位移计和下表面 2 个位移计平

均变化量的差值可以获得接头张开量,接头张开量除以上、下表面位移计的距离可以获得接头张开弧度。在此基础上,结合分级加载荷载,可以获得弯矩-接头张开量关系曲线与弯矩-接头转角关系曲线,分别如图 4 和图 5 所示。

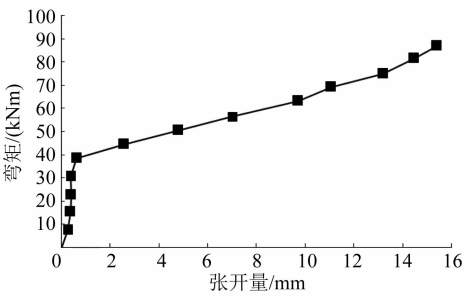


图 4 正弯矩工况下的弯矩-接头张开量关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of bending moment-joint opening amount under positive bending moment working condition

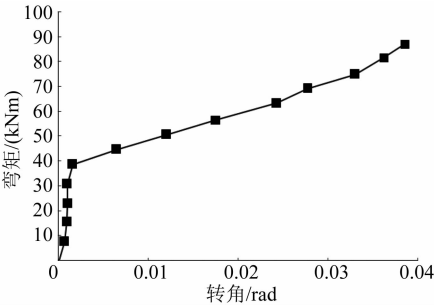


图 5 正弯矩工况下的弯矩-接头转角关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of bending moment-joint rotation angle under positive bending moment working condition

在正弯矩工况下,接头内侧混凝土发生相背运动,产生接头张开变形,螺栓由于抵抗接头变形而受拉。随着弯矩不断增大,接头变形量变形增长速度均逐渐增大,呈现出明显的非线性变化,其过程大致可分为 3 个阶段:① 第 1 阶段,当弯矩  $M \leq 7.5$  kNm 时,接头并未发生明显变形,接头张开并不明显,可认为该阶段为线性发展阶段;② 第 2 阶段,当  $7.5 \text{ kNm} < M \leq 40.0 \text{ kNm}$  时,接头变形逐渐加快,接头内侧张开变形明显,最大张开量约为 1.8 mm,该阶段为塑性发展阶段;③ 第 3 阶段,当  $M > 40.0 \text{ kNm}$  时,接头张开变形明显加快,在弯矩增量较小的情况下仍能产生较大的变形,表明该阶段内的管片接头处混凝土裂缝发展迅速,故可认为该阶段为接头塑性破坏阶段。

接头转角表示在弯矩荷载作用下,相邻两块管片

间发生的相对转动角度。由图 5 可知,接头转角随弯矩的变化曲线与接头张开量的变化曲线较为一致。

管片接头处挠度取下方 4 个竖向位移计的平均值,钢筋混凝土管片接头的弯矩包括竖向荷载、水平荷载及管片自重产生的弯矩总和。通过试验加载与过程监测,获得的弯矩-接头处挠度关系曲线如图 6 所示。在管片接头力学性能试验中,接头处挠度是监测的重要变形量之一,其变化对应着整环衬砌的收敛变形,反映了盾构隧道在外荷载作用下抵抗隧道径向变形的能力。由图 6 可知,接头处挠度随弯矩的变化曲线,与接头张开量、接头转角的变化曲线较为一致。

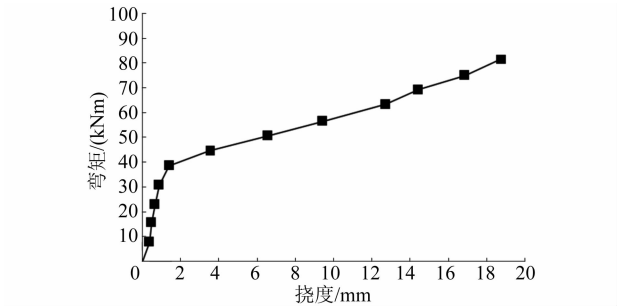


图 6 正弯矩工况下的弯矩-接头处挠度关系曲线  
Fig. 6 Relationship curve of bending moment-deflection at joints under positive bending moment working condition

试验加载结束后,对接头试件进行拆卸以观察接头的破坏情况。螺栓出现屈服现象,产生了一定的塑性变形,但是由于该螺栓为 8.8 级 M33 高强螺栓,强度较高且刚度较大,所以其发生的变形较小。在正弯矩作用下,管片在受压区出现了较长的裂缝,裂缝宽度为 0.15 mm。管片受压区破坏模式照片如图 7 所示。除了受压区裂缝外,由于密封垫对沟槽两边混凝土的挤压作用,管片角部出现了由于剪切而产生的裂缝,裂缝宽度为 0.10 mm。密封垫沟槽破坏模式照片如图 8 所示。螺栓的 4 个手孔则出现了压溃现象,手孔处混凝土压溃区和受压区的裂缝是正弯矩下管片接头破坏的主要原因。

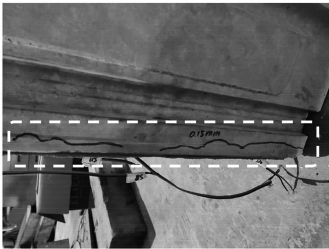


图 7 管片受压区破坏模式照片  
Fig. 7 Picture of segment compression zone failure mode

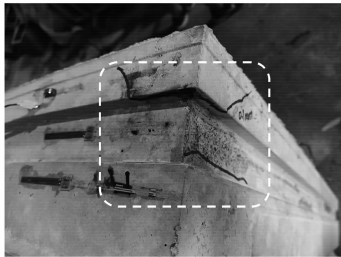


图 8 密封垫沟槽破坏模式照片  
Fig. 8 Picture of sealing gasket groove failure mode  
1.5.2 负弯矩工况

负弯矩工况的弯矩-挠度关系与正弯矩工况类似,此处不再赘述。通过试验加载与过程监测,获得负弯矩工况下的弯矩-接头处挠度关系曲线、弯矩-接头张开量关系曲线与弯矩-接头转角关系曲线,分别如图 9—图 11 所示。

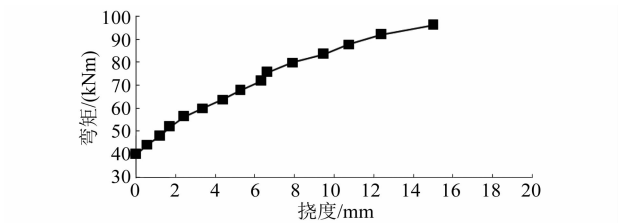


图 9 负弯矩工况下的弯矩-接头处挠度关系曲线  
Fig. 9 Relationship curve of bending moment-deflection at joints under negative bending moment working condition

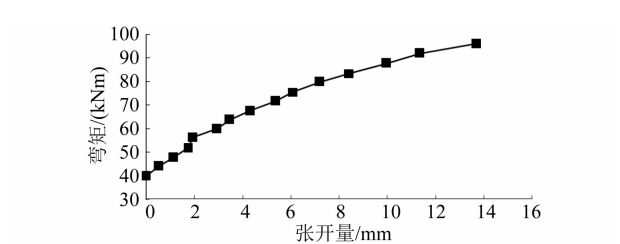


图 10 负弯矩工况下的弯矩-接头张开量关系曲线  
Fig. 10 Relationship curve of bending moment-joint opening amount under negative bending moment working condition

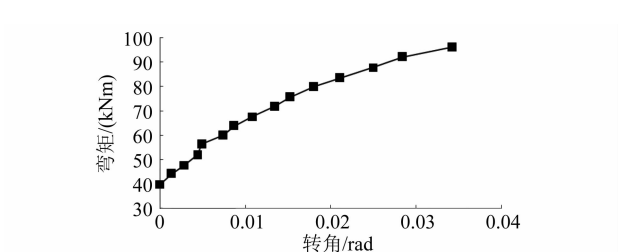


图 11 负弯矩工况下的弯矩-接头转角关系曲线  
Fig. 11 Relationship curve of bending moment-joint rotation angle under negative bending moment working condition

负弯矩工况中的螺栓同样出现了一定的塑性变形,螺栓手孔的位置也出现了压溃现象。不同于正弯矩工况,负弯矩工况中并没有在受压区出现裂缝现象,而是由于螺栓对螺栓孔的挤压,在两块管片的螺栓孔位置出现了裂缝以及大块剥落。负弯矩工况中,接头手孔处的压溃和螺栓孔下部的裂缝是管片接头破坏的主要原因。

## 2 三维精细化数值模拟

虽然管片接头试验可以直接准确地研究盾构管片接头的力学-变形模型,但考虑到试验试件的制作成本较高,试验过程耗费人力物力较大,为研究更多工况下的接头力学性能,在试验基础上进行数值模拟,并以试验结果为依据验证该数值模型,从而保证模型的准确性。

### 2.1 建立有限元模型

根据试验中试件与支座的尺寸及位置,在有限元软件 Abaqus 中建立相应的模型,模型中管片上表面设置 2 根弹性钢条,用于分布施加于管片上的竖向集中荷载。正、负弯矩工况有限元模型如图 12 所示。有限元模型共包括四部分:支座、加载钢板、钢筋混凝土管片和弯螺栓。根据试验设计资料,管片接头中各部件材料及其型号如表 3 所示。管片接头构造的相互接触及边界条件均与试验中设置相同。

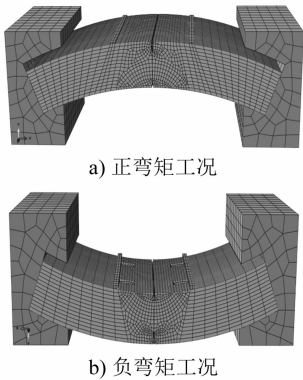


图 12 正、负弯矩工况有限元模型

Fig. 12 Finite element model of positive and negative bending moment working conditions

表 3 模型各部件材料及其型号

Tab. 3 Material and type of model components		
部件	材料	型号
管片	混凝土	C50
	钢筋	HRB400/HRB300
螺栓	8.8 级高强度钢	M33
加载钢板	钢材	Q235

混凝土本构将软化阶段简化为近似水平线,结合 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,可以获得 C50 混凝土的材料本构。本文所用本构与 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中的本构对比如图 13 所示。螺栓、钢筋采用弹性本构。

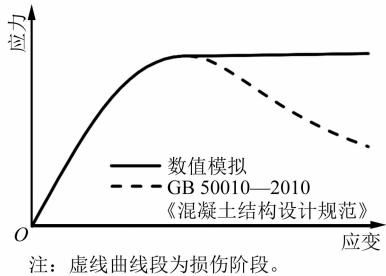


图 13 混凝土数值模拟与规范中的本构关系对比曲线  
Fig. 13 Contrast curve of concrete numerical simulation and constitutive relations in specifications

### 2.2 模拟结果与试验结果对比分析

正、负弯矩工况下,弯矩-转角曲线的数值模拟与试验结果对比分别如图 14 和图 15 所示。由图 14 和图 15 可知,数值模拟结果可以较好地反映试验中接头的抗弯力学行为。

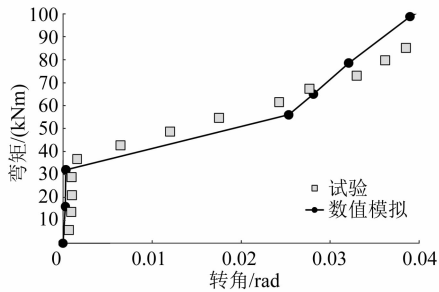


图 14 正弯矩工况下弯矩-转角曲线的数值模拟与试验结果对比

Fig. 14 Comparison between numerical simulation and test results of bending moment-rotation angle curve under positive bending moment working condition

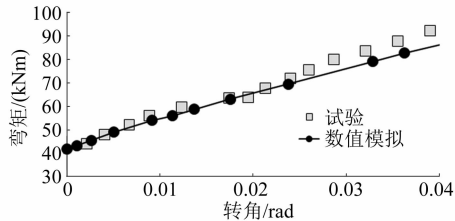


图 15 负弯矩工况下弯矩-转角曲线的数值模拟与试验结果对比

Fig. 15 Comparison between numerical simulation and test results of bending moment-rotation angle curve under negative bending moment working condition

### 2.3 实际工况下盾构接头抗弯性能

实际工程中的轴力要大于试验中的轴力(轴力较小便于管片接头试验破坏),根据前期计算可以粗略得出,工程中接头的两端轴力约为 1 200 kN。在上述数值模型基础上,计算当轴力为 1 200 kN 时,正、负弯矩下每延米接头的抗弯性能,如图 16 所示。正、负弯矩工况下弯矩-转角关系曲线均可以分为两个阶段。正弯矩工况中,第 1 阶段转动刚度为 137 708 kNm/rad,当弯矩达到 140 kNm 时,进入第 2 阶段;第 2 阶段的转动刚度为 1 216 kNm/rad。负弯矩工况中,第 1 阶段的转动刚度为 105 934 kNm/rad,当弯矩达到 125 kNm 时,进入第 2 阶段;第 2 阶段转动刚度为 702 kNm/rad。正弯矩工况下两个阶段的转动刚度均大于负弯矩工况,且由第 1 阶段进入第 2 阶段时的转折点弯矩同样大于负弯矩工况。第 1 阶段中,接头处的弯矩主要由轴压平衡,螺栓基本不受力,两块管片的相对转角较小。随着转角的不断增大,接头张开点的位置不断提高,直至达到螺栓位置,螺栓开始受力,混凝土管片和螺栓开始共同平衡弯矩,管片接头的受弯过程进入第 2 阶段。当该阶段结束后,管片接头的抗弯转动刚度开始增大。正弯矩工况中,接头的极限抗弯承载力为 360 kNm,为第 1 阶段结束时弯矩的 2.57 倍,

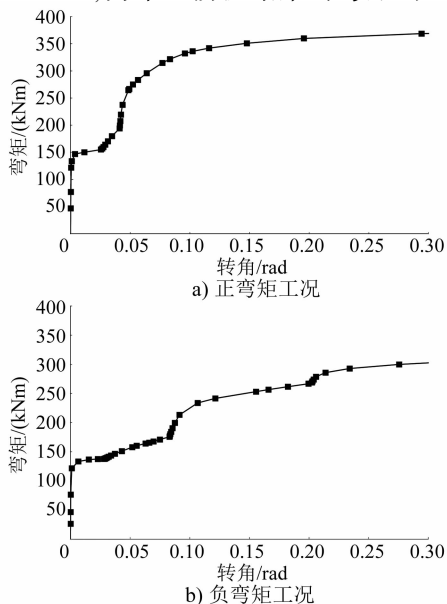


图 16 当轴力为 1 200 kN 时的正、负弯矩下每延米接头的抗弯性能

Fig. 16 Bending performance per meter joint under positive and negative bending moments with axial force of 1 200 kN

有 220 kNm 的安全储备;负弯矩工况中,接头的极限抗弯承载力为 310 kNm,是第 1 阶段结束时弯矩的 2.48 倍,也有 185 kNm 的安全储备。综上所述,该接头在极端工况作用下仍然有较好的承载能力。

### 3 结语

本文先以温州 M1 线管片接头足尺试验为基础,获得了管片接头在正、负弯矩作用下的接头变形曲线,研究了在弯矩与轴力共同作用下,接头力学性能以及接头张开破坏的全过程。建立三维数值模型,将数值模拟与试验结果进行分析对比,以验证所提数值模型的可靠性。本文研究主要获得以下结论:

1) 试验盾构隧道管片接头试件在轴力为 1 200 kN 时,正弯矩工况下,极限抗弯承载力可达到 360 kNm;负弯矩工况下,极限抗弯承载力可达到 310 kNm。

2) 在弯矩作用下,管片接头呈现出明显的非线性状态,随着弯矩的增大,管片接头张开变形也在不断加快,直到达到极限承载状态。正、负弯矩工况下的接头力学性能发展可大致分为 3 个阶段:线性增长阶段、塑性发展阶段和极限破坏阶段。

3) 正弯矩工况下的极限抗弯承载力大于负弯矩工况下的极限抗弯承载力,而正弯矩工况下的接头变形小于负弯矩工况下的接头变形。

4) 正、负弯矩工况下对应的最终极限破坏状态也不同。正弯矩工况下,最终接头破坏表现为受压区混凝土破坏剥落,手孔处混凝土的压溃区和受压区的裂缝是接头破坏的主要原因;负弯矩工况下,接头的破坏过程表现出了明显的脆性,并没有在受压区出现裂缝,而是由于螺栓对螺栓孔的挤压,在两块管片的螺栓孔位置出现了裂缝以及大块的剥落,接头手孔处的压溃和螺栓孔下部的裂缝是管片接头破坏的主要原因。

### 参考文献

- [1] DING W Q, PENG Y C, YAN Z G, et al. Full-scale testing and modeling of the mechanical behavior of shield TBM tunnel joints [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2013, 45 (3):337.
- [2] 柳献,张晨光,张宸. 地铁盾构隧道纵向接缝承载能力试验研究与解析分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 110.
- LIU Xian, ZHANG Chengguang, ZHANG Chen. Investigation on the ultimate bearing capacity of longitudinal joints in segmental tunnel lining [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (10):110.

(下转第 32 页)