

# 输气盾构隧道原型管片接缝弯压破坏试验

邱 月<sup>1</sup> 何 聪<sup>2</sup> 何 川<sup>3</sup> 封 坤<sup>3</sup> 胡 熠<sup>1</sup> 郑立宁<sup>1</sup>

(1. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610052; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031;  
3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川成都 610031)

**摘要:**长距离输气盾构隧道常需穿越复杂地层, 接缝作为衬砌结构的薄弱环节, 构造复杂, 在大弯压荷载下变形易超出设计要求而导致破损。为探明接缝的压弯力学特性和破坏机理, 选取原型弧形接缝结构进行加载试验。详述接缝影响范围内管片受力、变形、破坏的全过程, 定量分析破坏程度与结构内力、形变的关联。结果表明: 偏心距可影响接缝变形的挤压、隆起趋势从而影响结构的弯矩分布。在压弯作用下, 接缝经历了螺栓屈服前缓慢变形阶段、屈服时突变阶段和屈服后快速变形破坏阶段。接缝破坏时变形量较小, 两侧被压溃的混凝土范围约等于管片厚度。破坏机理可归纳为: 螺栓屈服导致接缝张开, 致使弹性密封垫下部接触受压区面积减小、压强增大造成混凝土压溃, 进而外弧边沿嵌缝槽处混凝土受压接触并最终压溃, 导致接缝破坏。

**关键词:**输气盾构隧道; 管片接缝; 原型试验; 压弯特性; 破坏机理

**中图分类号:** U451+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)07-0108-09

## Prototype failure tests of segmental joints for gas transmission shield tunnel under bending-compression load

Qiu Yue<sup>1</sup> He Cong<sup>2</sup> He Chuan<sup>3</sup> Feng Kun<sup>3</sup> Hu Yi<sup>1</sup> Zheng Lining<sup>1</sup>

(1. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Long gas transmission shield tunnels often run through complex strata. Joint, as vulnerable location of segmental lining, is complex in its detail and configuration, and its deformation may easily exceed the design requirements under large bending-compression load causing the damage of segmental linings. In order to investigate the mechanical properties and failure mechanism of the joint under large bending-compression load, a series of prototype tests of the curve-shaped joint were carried out. A detailed description was given to highlight the complete mechanical behaviors, such as stress, deformation and failure, of the segmental disturbed region affected by the joint. Then the relationships between the damage degree and internal force/ deformation of the structure were quantitatively analyzed. The results show that the eccentricity can lead to the extrusion or uplift of the structure, and affect the distribution of segmental bending moment along the circumferential direction. Under large bending-compression load, the failure process can be divided into three stages, namely the slow deformation stage before yielding of bolt, the sudden deformation stage due to yielding of bolt, and the rapid deformation and failure stage after yielding of bolt. When the joint is damaged, the deformation amount is small, and the range of crushed concrete on both sides of the joint is approximately equal to the thickness of the segment. The failure mechanism can be described as follows: the joint open due to the yielding of bolt, resulting in the decrease of the contact area of compressive zone under the elastic sealing gasket the increase of concrete pressure and the collapse of concrete. Subsequently, the concrete at the outer edge of the caulking groove is pressed and finally crushed, leading to the final damage of the joint.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0802205)、国家自然科学基金(51878569, 51578462)和四川省科技计划项目(2019YFS0070)

作者简介: 邱月, 博士, 工程师

通讯作者: 何川, 博士, 教授

收稿日期: 2019-03-18

**Keywords:** gas transmission shield tunnel; segmental joint; prototype test; bending-compressive behavior; failure mechanism

**E-mail:** yyuueeqiiuu@126.com

## 引 言

盾构隧道是由管片、环向和纵向螺栓等装配而成的结构,由于接缝特殊的接触关系、传力途径,其抗弯性能及破坏特性比较复杂,能直接影响衬砌结构整体的力学行为<sup>[1]</sup>。对于新兴的长距离输气盾构隧道,常需穿越高水压、大埋深等复杂地段,接缝作为衬砌结构的薄弱环节,在较大的弯曲荷载下,变形易超出设计允许要求<sup>[2-3]</sup>,造成结构安全隐患。因此,深入了解管片接缝的受力、破坏机制至关重要。

目前,对接缝的研究多以足尺或模型试验的方式开展,比较典型的有林光俊等<sup>[4]</sup>以东京—横滨输气隧道为对象,开展了管片纵缝抗弯性能的实体试验。张厚美<sup>[5-6]</sup>、何英杰<sup>[7]</sup>等对南水北调穿黄隧洞工程管片接缝进行了加载试验,测试了混凝土应变分布、接缝形式和偏心距大小对接缝位移的影响,以及螺栓拉力、钢筋应力的变化情况,拟合了接缝抗弯刚度的经验公式。王哲<sup>[8]</sup>、雷华明<sup>[9]</sup>、周海鹰<sup>[10]</sup>等对地铁隧道管片接缝的抗弯刚度进行了测试。何川<sup>[11]</sup>、封坤<sup>[12-13]</sup>、苏宗贤<sup>[14]</sup>等自主研发了“多功能盾构隧道结构体试验系统”装置,对水下隧道管片接缝在正弯和负弯荷载下的破坏过程及抗弯刚度进行了研究。朱合华等<sup>[15]</sup>以管片接缝系列试验为基础,提出了接缝弯矩-相对转角关系的线性、双线性和非线性模型。

这些试验多基于自行浇筑的直接缝进行,忽略了管片曲率对结构变形的影响,侧重于研究接缝抗弯刚度的取值和影响因素。对于接缝的破坏过程仅简单描述破坏现象,未能关注裂缝发展的具体过程,也没有量化分析破坏程度与结构内力的关联,而此项内容对于研究构件的破坏机理十分重要。并且,囿于试验条件的限制,直接缝试件一般仅有管片标准块长度的三分之一,对于接缝影响范围内管片沿弧长方向的受力变形规律,受轴压比、偏心距等的影响程度均不清楚。

鉴于此,文章采用课题组自行研发的“原型结构加载试验系统”,针对长距离输气盾构隧道弧形纵缝构件进行原型试验,详述接缝影响范围内管片受力、破坏的全过程,探究破坏过程中裂缝开裂时间、

发展程度与接缝受力、变形以及转角、张开量间的关系,对接缝的破坏机理进行探讨,以期对相关工程设计和理论分析提供参考。

## 1 工程概况

长距离输气盾构隧道穿越水库,衬砌需承受的最大水压为 0.33MPa,水下埋置深度为 14~30m,主要位于卵石层中;两岸穿越地层为粉质黏土、粉砂及粗砂层,渗透系数为 2.5~70m/d。隧道采用装配式钢筋混凝土通用管片环,C50 混凝土,HRB335 级主筋,保护层厚度 40mm,内部采用滑动支座方式支撑两条直径 1219mm 的天然气管道。衬砌外半径 2405mm,内半径 2125mm,厚度 280mm,幅宽 1200mm,每环分为 6 块(图 1),包括封顶块 K(圆心角  $\alpha=60^\circ$ ),邻接块 B1、B2(圆心角  $\beta=48^\circ45'$ )和标准块 A1~A3(圆心角  $\gamma=67^\circ30'$ ),纵、环缝各布置 12 颗 M24 弯螺栓,机械等级 5.8 级。

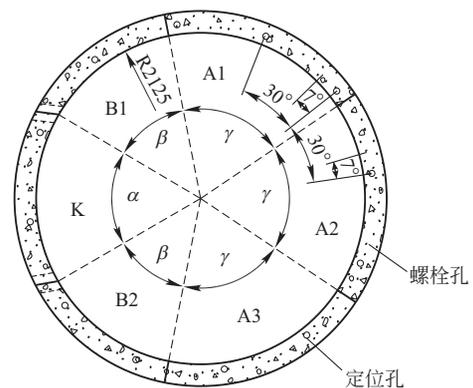


图 1 管片分块示意(单位: mm)

Fig. 1 Layout of segments (unit: mm)

## 2 试验概况

### 2.1 试验装置及量测系统

试验采用“局部原型结构加载试验系统”装置,通过水平和竖向千斤顶导入结构内力,并由可自由转动的铰支座支承试验构件<sup>[16-17]</sup>,如图 2 所示。

试验构件由邻接块 B2 和标准块 A3 组成,管片接缝构造及连接螺栓详图如图 3 所示。为描述和揭示接缝构件的压弯力学形态和破坏特性,试验过程中

对管片结构的内力、主应力、竖向位移、接缝张开量和张开高度进行采集，对混凝土裂缝的宏观发生位置、时间以及构件最终的破坏形态进行记录。

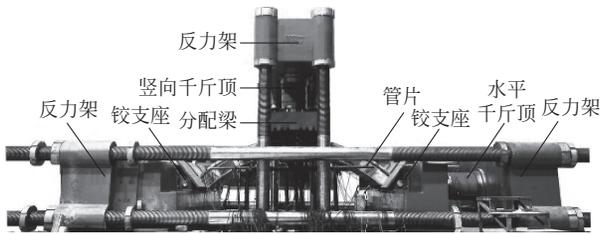
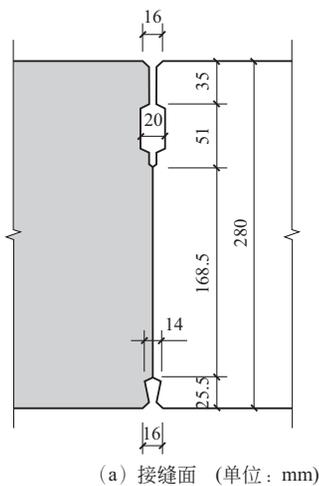
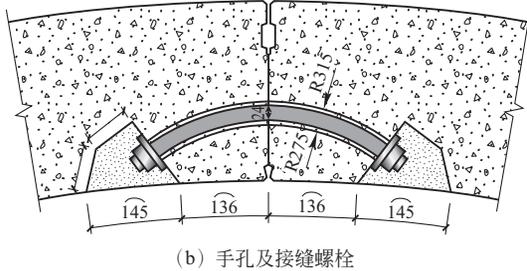


图 2 局部原型结构加载试验系统  
Fig. 2 Local prototype loading test system



(a) 接缝面 (单位: mm)



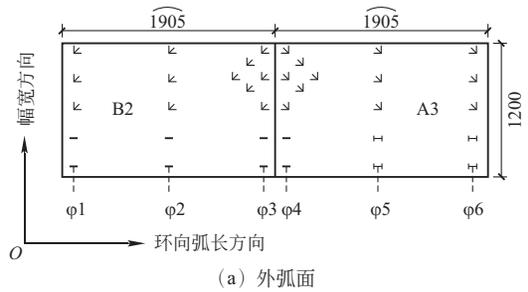
(b) 手孔及接缝螺栓

图 3 管片接缝详图

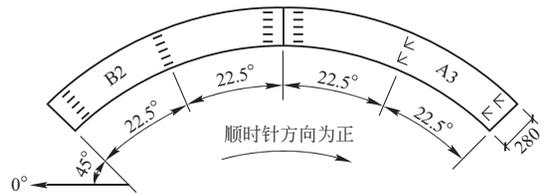
Fig. 3 Sketch of segmental joint structures

结构内力和主应力采用静态应变电测法，测点布置及试件尺寸如图 4 所示，其中  $\varphi 1$ 、 $\varphi 6$  为构件两侧， $\varphi 2$ 、 $\varphi 5$  分别为 B2、A3 块正中， $\varphi 3$ 、 $\varphi 4$  为接缝面两侧。结构竖向位移由精度 0.1mm 的激光位移传感器量测，通过非接触式量测，最大限度的减小了元件对试验结果的影响。接缝张开量由精度 0.01mm 的差动式位移传感器量测，张开高度由钢尺量测。螺栓内力由螺栓中部一对电阻应变片量测，采用高强度极细航空导线连接以确保应变数据的正常导出(图 5)。为便于观察混凝土的裂缝发展，在管片表面按 10cm 间距绘制网格线，及时记录各级荷载下的开

裂和破坏情况。



(a) 外弧面



(b) 侧面

注：—：应变片；⊥：应变花；⊥：正弦式混凝土应变计

图 4 接缝构件尺寸及测点布置(单位: mm)  
Fig. 4 Sizes of segment and arrangement of the measurement points (unit: mm)

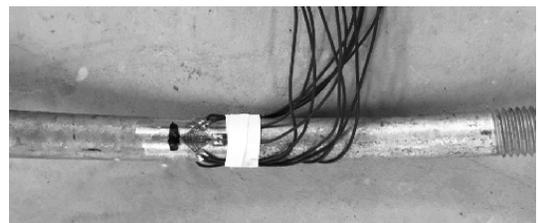


图 5 螺栓应变测量

Fig. 5 Layout of strain gauges for bolt

## 2.2 加载方法

考虑到加载系统和接缝构件的对称性，取半结构进行分析，加载时控制接缝截面 AB 的内力，如图 6 所示。规定轴力以压力为正，弯矩和偏心距以内弧边沿受拉为正，反之为负。由结构受力平衡可得：

$$N = N_x \quad (1)$$

$$F = \frac{\lambda b h f_c (e + H) - W(L_3 - L_2)}{L_3 - L_1} \quad (2)$$

其中， $\lambda = \frac{N}{f_c b h} \quad (3)$

$$e = M/N \quad (4)$$

式中： $N$ 、 $M$  为截面的轴力、弯矩； $N_x$ 、 $F$  为水平、竖向千斤顶荷载； $W$  为管片自重； $H$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  为力作用点的尺寸位置； $\lambda$  为截面轴压比； $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值，本次取  $f_c = 23.1 \text{ MPa}$ ； $h$ 、 $b$  为截面的高度、宽度； $e$  为截面偏心距。

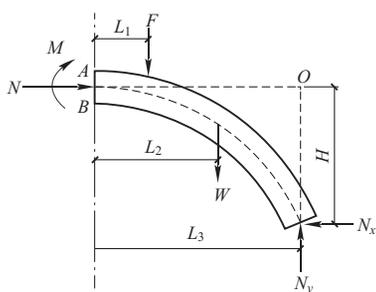


图 6 加载模式示意图

Fig. 6 Diagram of loading mode

2.3 试验工况

根据盾构隧道的实际埋置状况，管片结构在水库段和两岸段的最不利偏心距分别为 0.05m 和 0.2m，对应轴压比均为 0.22。因此，分别按照以上两种最不利工况进行加载方案的设计，具体为：①使接缝截面偏心距维持 0.05m 或 0.2m 不变，轴压比从 0.01 逐级增至 0.22，对应水平、竖向千斤顶荷载按式(1)~(2)计算得出；②使接缝截面轴压比维持 0.22 不变，增大截面偏心距，即水平荷载保持不变，竖向荷载每级增大 25kN，直至接缝面破坏，试验结束。

3 构件受力变形分析

3.1 构件内力分布

试验考察了管片接缝构件轴力和弯矩沿管片环向(弧长方向)的变化情况，如图 7 和图 8 所示。

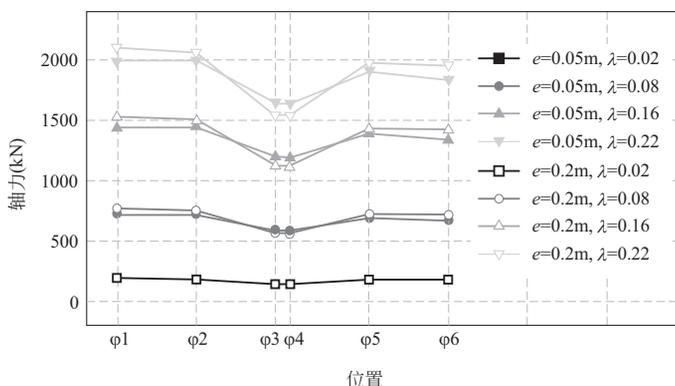


图 7 偏心距对环向轴力分布的影响

Fig. 7 Influence of the eccentricity on axial force distribution in the circumferential direction

由图 7 结构轴力沿管片环向的变化情况看，不同偏心距下，结构轴力的变化规律基本一致：在  $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$  位置(管片接缝)处最小，在接缝面两侧较大且并非完全对称，其中， $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  位置(水平固定支座一

侧)较大， $\varphi_5$ 、 $\varphi_6$  位置(水平千斤顶一侧)较小。随着轴压比  $\lambda$  的增大，轴力逐渐增大，非对称性也更为明显。

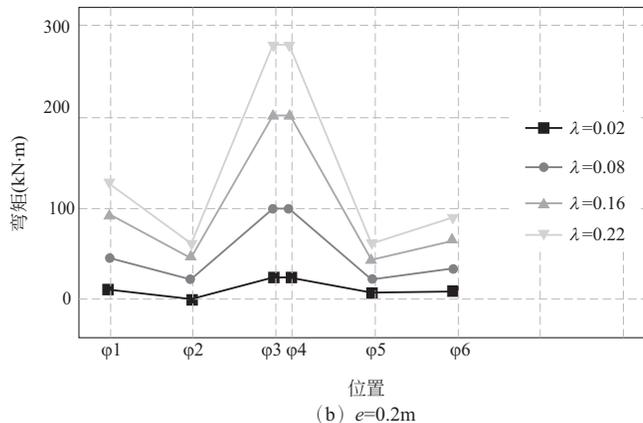
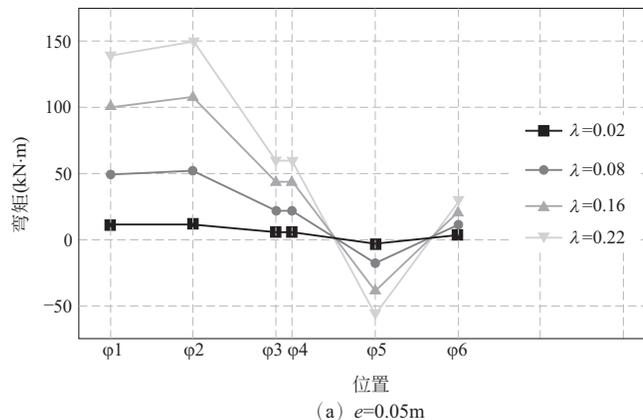


图 8 偏心距对环向弯矩分布的影响

Fig. 8 Influence of the eccentricity on bending moment distribution in the circumferential direction

由图 8 结构弯矩沿管片环向的变化情况看，当偏心距  $e=0.05m$  时，结构弯矩在  $\varphi_5$  位置出现负弯，在其余位置为正弯，其中  $\varphi_2$  位置弯矩最大， $\varphi_6$  位置(靠近水平千斤顶)处最小。当偏心距  $e=0.2m$  时，结构弯矩在  $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$  位置(管片接缝)处最大，在  $\varphi_2$ 、 $\varphi_5$  位置处最小。随着轴压比  $\lambda$  的增大，各位置处弯矩均逐渐增大。

由此可见，偏心距的变化对构件的弯矩分布影响较大。当偏心距较小时，竖向千斤顶荷载较小，水平千斤顶荷载相对较大，因而千斤顶一侧结构受到水平荷载的挤压作用产生负弯；当偏心距较大时，竖向千斤顶荷载相对较大，占据了控制结构变形的主导地位，因而结构产生趋于扁平的变形趋势，内弧面受拉，外弧面受压，结构各位置处均为正弯。

3.2 构件竖向位移变化

同一偏心距下管片竖向位移的变化规律基本一致(图 9)。

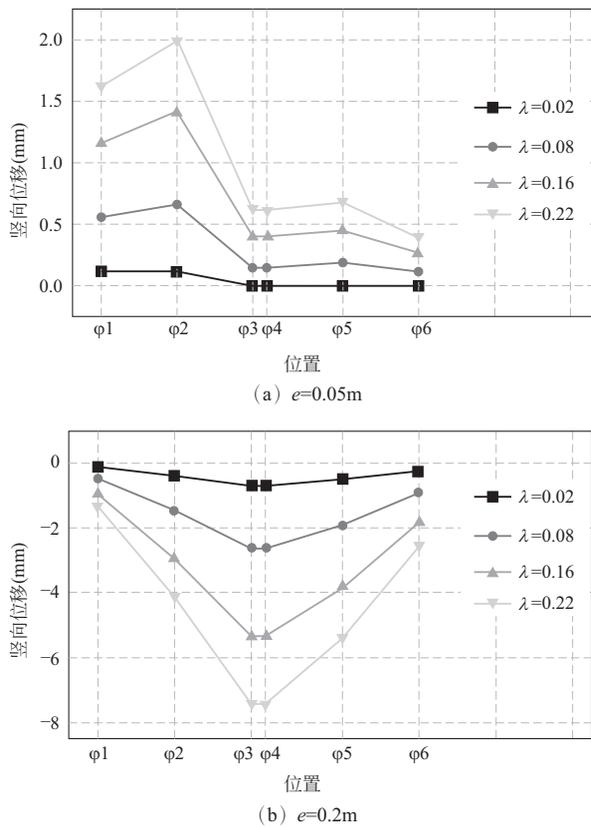


图 9 构件的竖向位移

Fig. 9 Structural vertical displacement

当  $e=0.05m$  时, 构件整体全线隆起, 在接缝面两侧并不对称, 靠近水平千斤顶处 ( $\phi 3 \sim \phi 6$  位置) 隆起量较小, 靠近水平固定支座处 ( $\phi 1$ 、 $\phi 2$  位置) 隆起量较大, 最大隆起出现在  $\phi 2$  位置, 离左侧水平支座约 800mm 处, 最大隆起 2.0mm。当  $e=0.2m$  时, 构件整体全线下沉, 在接缝面两侧结构变形基本对称, 在接缝处 ( $\phi 3$ 、 $\phi 4$  位置) 下沉量最大, 为 7.5mm, 在两侧支座处 ( $\phi 1$ 、 $\phi 6$  位置) 下沉量最小, 为 1.4mm。

由此可见, 偏心距的变化对构件变形的影响较大。当偏心距较小时, 水平千斤顶荷载相对较大, 结构受到水平挤压, 靠近水平固定支座处产生隆起; 当偏心距较大时, 竖向千斤顶荷载相对较大, 使得结构变形趋于“扁平化”, 沿环向全线下沉。

#### 4 构件压弯破坏特征与机理

##### 4.1 构件压弯破坏特征

###### 4.1.1 裂缝的产生与发展

为观测接缝的压弯破坏特性, 试验加载第一阶段, 水平和竖向千斤顶同时加载, 并保持  $e=0.2m$  不变, 水平千斤顶加载等级用  $\lambda$  表示,  $\lambda$  从 0.01 逐步增至 0.22, 竖向千斤顶加载等级由式(2)计算得出;

加载第二阶段,  $\lambda$  保持 0.22 不变, 竖向千斤顶荷载继续增大, 即截面  $e$  持续增大, 直至结构破坏。加载过程中, 管片结构内弧面和侧面裂缝的产生、发展以及最终形态如图 10 和图 11 所示(图中数字表示裂缝出现的先后顺序, 括号内数字表示裂缝出现时的轴压比)。

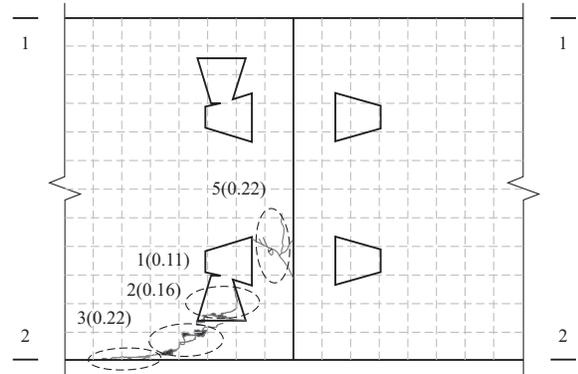


图 10 结构内弧面裂缝发展

Fig. 10 Crack development in the structural intrados

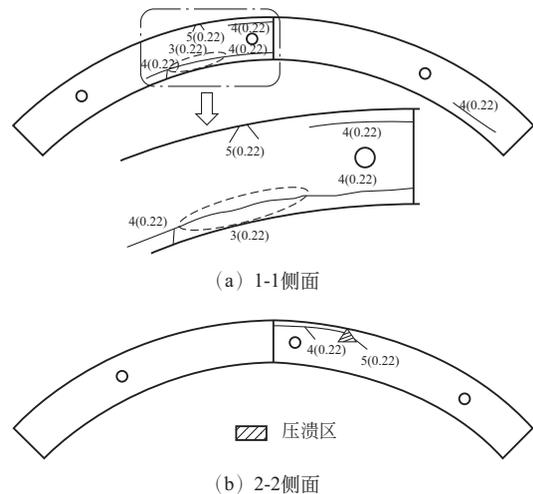


图 11 结构侧面裂缝发展

Fig. 11 Crack development on the structural flank

加载第一阶段, 当接缝截面轴压比  $\lambda$  增至 0.11 时, 由于螺栓拉力逐渐增大, 导致手孔处应力集中较为严重, 手孔开裂; 结构侧面并未产生裂缝。当  $\lambda=0.16$  时, 手孔内部裂缝已扩展至结构内弧面表面, 长度约 400mm。当  $\lambda=0.22$  时, 手孔内部裂缝已由结构内弧表面发展至结构 1-1 侧面, 侧面裂缝长度约 400mm。

加载第二阶段, 随着竖向力的增大, 接缝螺栓屈服。结构 1-1 侧面下部裂缝继续沿环向扩展, 长度增至约 750mm; 上部嵌缝槽处混凝土压溃分层, 开始剥离, 形成环向裂缝, 长度约 300mm; 固定支座端靠近内弧面一侧出现环向裂缝, 长度约 350mm。

结构 2-2 侧面嵌缝槽处混凝土也开始压溃，分层剥离，形成约 500mm 的环向裂缝。

可见，管片结构内弧面和侧面裂缝的发展均呈现非对称性。其中，手孔开裂最为明显，试验构件共有手孔 4 处，仅 1 处产生可观测裂缝(裂缝宽度大于 0.1mm)。由此，结构开裂与否除了与其受力状态联系紧密，与结构自身是否存在初始缺陷、试件拼装是否存在误差都息息相关。

#### 4.1.2 接缝变形与破坏

加载第一阶段，当接缝截面  $M = 103\text{kN} \cdot \text{m}$ ， $e = 0.2\text{m}$  时，内弧面手孔开裂。加载第二阶段，当  $M = 316\text{kN} \cdot \text{m}$ ， $e = 0.31\text{m}$  时，接缝竖向位移从 25.5mm 急剧增大至 30.1mm，弹性密封垫下部接触受压区混凝土达到极限压应变，开始压溃，螺栓屈服。继续加载，外弧面嵌缝槽处混凝土接触并压溃，开始剥离、掉块，结构侧面自嵌缝槽处沿混凝土剥离方向出现环向裂缝。当  $M = 360\text{kN} \cdot \text{m}$ ， $e = 0.35\text{m}$  时，外弧面与压梁接触的混凝土压溃，环向裂缝从嵌缝槽处发展至压梁附近的混凝土压溃区，结构竖向位移再次急剧增大至 49.2mm，接缝转角增至  $5.821^\circ$ ，张开量增至 18.59mm，张开高度增至 182.8mm，结构破坏，试验结束，如图 12 所示。



(a) 外弧面接缝混凝土压溃



(b) 内弧面手孔开裂

图 12 结构最终破坏形态

Fig. 12 Ultimate structural failure

此时，连接螺栓并未断裂，远离接缝的混凝土仍处在弹性范围内，接缝破坏对结构的影响范围较小。将接缝一侧外弧边沿可明显观测到混凝土压溃

或开裂的范围定义为接缝破坏的表面单侧影响距离  $l_{ef}$ ，可见两侧  $l_{ef}$  分别为 83mm 和 138mm，即最大  $l_{ef}$  约为 0.5 倍管片厚度。

由于接缝在弯矩作用下抵抗变形的能力对管片结构至关重要，并受多种因素影响制约<sup>[13]</sup>。因此，定量分析接缝破坏程度与结构内力、变形的关联至关重要。由图 13 接缝弯矩-张开高度-最大张开量的相互关系可见，随着弯矩的增大，接缝张开高度和最大张开量都逐渐增大，两者变化趋势基本一致，可分为三个阶段：①在螺栓屈服前，接缝变形速率较慢，弯矩较小时，张开高度先从 0 升至约 172mm，之后螺栓开始受力，张开高度缓慢增大至 175mm；②螺栓屈服时，张开高度和张开量均出现短暂的“平台”段，分别急剧增大 1.5mm 和 2.51mm；③螺栓屈服后，接缝变形速率较屈服前更大，接缝快速张开后发生破坏。

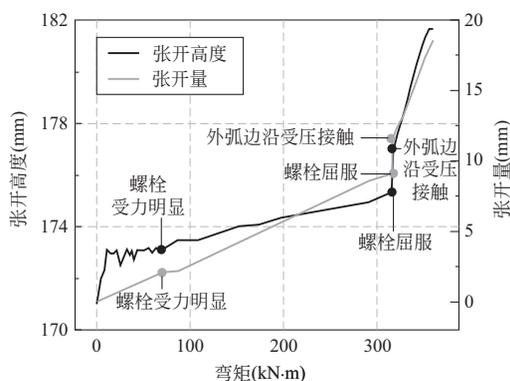


图 13 接缝弯矩-张开高度-最大张开量图

Fig. 13 Relationships of bending moment, joint opening height and joint opening amount

由图 14 接缝弯矩-转角-挠度的相互关系可见，随着弯矩的增大，接缝处转角和挠度都逐渐增大，且变化趋势同步，试验加载至螺栓屈服时，接缝转角与挠度均出现短暂的“平台”段，在外荷载保持不变的情况下，挠度迅速增大约 4.6mm 后保持稳定，接缝转角随之增大，随后挠度和转角的增长速率显著提高。

由此，接缝在压弯作用下的变形大致可以分为三个阶段：①螺栓屈服前缓慢变形段；②螺栓屈服时突变“平台”段；③螺栓屈服后快速变形直至破坏段。并且，转角与挠度变化的同步性也印证了接缝在受弯过程中变形的协调性。

#### 4.2 构件压弯破坏机理

本文在文献[3]中对比了自行浇筑的直接缝构件和原型弧形构件破坏时接缝变形的差异，发现接缝

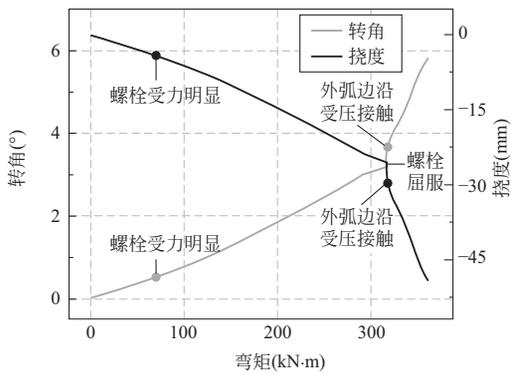


图 14 接缝弯矩-转角-挠度图

Fig. 14 Relationships of bending moment, joint rotation angle and deflection

破坏时，直接缝变形量较大，而弧接缝变形量较小的特点。再对比文献[18]中的整环衬砌环原型破坏试验，同样可以得到接缝破坏时变形量较小的特点。因此，接缝破坏并非其变形过大造成的，但这些文献均未对接缝的破坏机理进行深入研究。对此，本文对接缝面处厚度方向的混凝土应变规律作进一步分析，以此探讨接缝面的压弯破坏机理。

#### 4.2.1 构件厚度方向的混凝土应变

试验对接缝构件  $\varphi 1 \sim \varphi 3$  位置沿厚度方向的混凝土应变进行了测试， $e = 0.2m$ ， $\lambda = 0.22$  时的量测结果如图 15 所示。

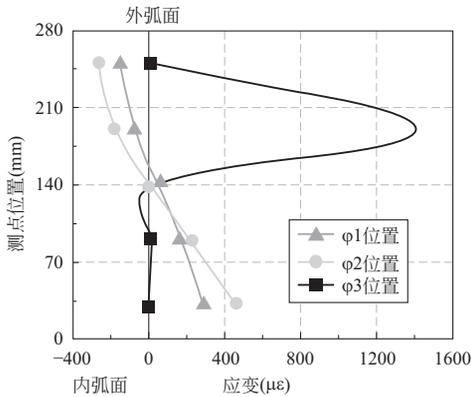


图 15 沿厚度方向的混凝土应变

Fig. 15 Concrete strain along the thickness

可见，不同位置处混凝土应变沿厚度方向的变化规律差异较大。在远离结构接缝的  $\varphi 1$ 、 $\varphi 2$  位置，应变基本符合平截面假定，靠近外弧面一侧受拉，靠近内弧面一侧受压。在结构接缝  $\varphi 3$  位置，应变分布呈现出典型的非线性特征，在弹性密封垫下部接触受压区(测点位置约 190mm 处)，压应变发生突变显著增大，其余位置接近 0。出现该现象的原因是，试验构件在转动铰支座和竖向千斤顶的作用下发生

转动，导致接缝内弧面张开，外弧面接近，如图 16 所示。然而，在  $e = 0.2m$  时，由于接缝面顶部嵌缝槽的存在，结构弯矩并不能使外弧边沿受压接触，因此，接缝截面仅在弹性密封垫下部较小区域内受压接触，致使压应变较大，而其余位置应变接近 0。

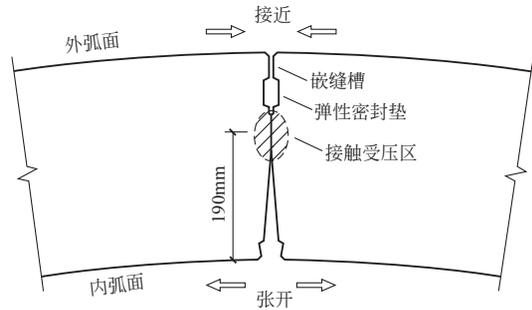


图 16 接触受压区示意图

Fig. 16 Contact and compressive zone

#### 4.2.2 破坏机理分析

根据试验构件的内力、形变分布和破坏形态，接缝受压弯荷载，偏心距较大时的破坏机理可归纳为：在弯矩作用下，接缝面内弧边沿受拉张开，外弧边沿受压接近，仅弹性密封垫下部较小区域内混凝土相互接触，承受接缝面上的所有轴压，因而，该区域混凝土压强骤增，受压开裂。同时，螺栓拉力增大，致使手孔局部应力集中、受拉开裂。随着弯矩的继续增大，接缝从屈服前的缓慢变形段进入屈服时的突变“平台”段，转角迅速增大，外弧边沿嵌缝槽处混凝土受压接触，在轴压作用下进入屈服后快速变形、破坏阶段，混凝土最终被压溃，接缝破坏。总体来看，接缝的破坏机理可简单概括为：螺栓屈服导致接缝张开，致使接触受压区面积减小、压强增大造成混凝土压溃，进而外弧边沿嵌缝槽处混凝土受压接触并最终压溃，接缝破坏。

## 5 结 论

针对长距离输气盾构隧道弧形接缝开展原型加载试验，研究构件在压弯荷载下的力学行为和破坏特性，得出如下有益结论。

- (1) 接缝构件的内力和变形分布受偏心距的影响较大。当偏心距较小时，靠近水平千斤顶一侧结构受到挤压作用产生负弯，靠近水平固定支座一侧产生隆起；当偏心距较大时，竖向荷载占据了控制结构变形的主导地位，结构趋于“扁平化”，全线下沉，均为正弯。
- (2) 接缝在压弯作用下的破坏过程可分为三个阶段：①螺栓屈服前缓慢变形段；②螺栓屈服时突变

“平台”段；③螺栓屈服后快速变形直至破坏段。

(3) 接缝构件的最终破坏形态为：内弧面手孔开裂，外弧面接缝接触受压区、嵌缝槽以及与压梁接触处混凝土压溃，侧面环向裂缝贯通混凝土压溃区。试验结束时接缝变形量较小且呈现非对称性，连接螺栓并未断裂，接缝表面单侧影响距离较小，约为 0.5 倍管片厚度。远离接缝区域，结构处于弹性状态。

(4) 接缝受压弯荷载，偏心距较大时的破坏机理可归纳为：在弯矩作用下，接缝面内弧边沿张开，外弧边沿接近，仅弹性密封垫下部接触受压区承受接缝面上的所有轴压，该处混凝土首先受压开裂。同时，螺栓拉力增大，手孔局部应力集中、受拉开裂。随着接缝转角的继续增大，螺栓受拉屈服，外弧边沿嵌缝槽处混凝土受压接触，并最终压溃，接缝破坏。

#### 参 考 文 献

- [1] 封坤, 何川, 肖明清. 高轴压作用下盾构隧道复杂接缝面管片接头抗弯试验[J]. 土木工程学报, 2016, 49(8): 99-110, 132 (Feng Kun, He Chuan, Xiao Mingqing. Bending tests of segment joint with complex interface for shield tunnel under high axial pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8): 99-110, 132 (in Chinese))
- [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): 110-122 (Liu Xian, Zhang Chenguang, Zhang Chen. Investigation on the ultimate bearing capacity of longitudinal joints in segmental tunnel lining[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 110-122 (in Chinese))
- [3] 张力, 封坤, 方若全, 等. 盾构隧道原型管片接头抗弯性能试验[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增2): 220-230 (Zhang Li, Feng Kun, Fang Ruoquan, et al. Experiment study on flexural performance of prototype segment joint of shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 220-230 (in Chinese))
- [4] 林光俊. ほぞセケメントの力学特性およびその合理的製造方法に関する研究[D]. 東京: 早稲田大学, 1997
- [5] 张厚美. 装配整体式双层衬砌接头荷载试验与结构计算理论——南水北调中线穿黄隧洞结构计算模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2000 (Zhang Houmei. Research on the loading test and structural models of prefabricated segment reinforced by secondary lining[D]. Shanghai: Tongji University, 2000 (in Chinese))
- [6] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 28-33, 41 (Zhang Houmei, Fu Deming, Guo Chi. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6): 28-33, 41 (in Chinese))
- [7] 何英杰, 袁江. 影响盾构隧道衬砌接头刚度的因素[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(1): 20-22, 26 (He Yingjie, Yuan Jiang. Factors affecting joint stiffness of shield tunnel lining[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(1): 20-22, 26 (in Chinese))
- [8] 王哲, 李京爽. 地铁管片环向接头弯曲刚度试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(1): 86-88 (Wang Zhe, Li Jingshuang. Experimental research on bending stiffness of circumferential joint in shield tunneling segment[J]. Industrial Construction, 2005, 35(1): 86-88 (in Chinese))
- [9] 雷华明, 陈俊生. 盾构隧道施工阶段管片接头刚度试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2007(12): 43-45, 38
- [10] 周海鹰. 盾构隧道衬砌管片结构的力学性能试验及理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011 (Zhou Haiying. Theoretical study and test on mechanic behavior of lining segment in shield tunnel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011 (in Chinese))
- [11] 何川, 封坤, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道原型结构加载试验系统的研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 254-266 (He Chuan, Feng Kun, Su Zongxian. Development and application of loading test system of prototype structure for underwater shield tunnel with large cross-section[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 254-266 (in Chinese))
- [12] 封坤. 大断面水下盾构隧道管片衬砌结构的力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011 (Feng Kun. Research on the mechanical behavior of segmental lining structure for underwater shield tunnel with large cross-section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011 (in Chinese))
- [13] Feng Kun, He Chuan, Qiu Yue, et al. Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75(3), 100-116
- [14] 苏宗贤. 超大断面水下盾构隧道原型结构试验及结构分析模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008 (Su Zongxian. Research on prototype test and structure analyse model of underwater shield tunnel with super-large cross-section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008 (in Chinese))
- [15] 朱合华, 黄伯麒, 李晓军, 等. 盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2153-2160 (Zhu Hehua, Huang Boqi, Li Xiaojun, et al. Unified model for internal force and deformation of shield segment joints and experimental analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2153-2160 (in Chinese))
- [16] 邱月, 何川, 封坤, 等. 盾构隧道管片衬砌拼装效应局部原型结构加载试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 156-163, 215 (Qiu Yue, He Chuan, Feng Kun, et al. Local prototype loading test on segmental lining structure of shield tunnel under assembling effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 156-163, 215 (in Chinese))

(下转第 128 页)

[D]. 成都: 西南交通大学, 2013 (Luo Fang. Analyse the investment and financing mode of Line 6 for the third phase of Shenzhen urban rail construction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013 (in Chinese))

[31] 陆慧敏. PPP 模式在轨道交通中的应用研究——以深圳轨道交通 6 号线为例[D]. 广州: 暨南大学, 2018 (Lu Huimin. Application research of PPP model in urban rail transit-a case study of Shenzhen rail transit line Line 6 [D]. Guangzhou: Jinan University, 2018 (in Chinese))

[32] 刘慧, 王孟钧, Skibniewski M J. 基于解释结构模型的建设工程创新关键成功因素分析[J]. 科技管理研究, 2016, 36 (3): 20-26 (Liu Hui, Wang Mengjun, Skibniewski M J. Analysis on the critical success factors of construction innovation based on integrated structural modeling [J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(3): 20-26 (in Chinese))

[33] Lyer K C, Sagheer M. Hierarchical structuring of PPP risks using interpretative structural modeling [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136 (2): 151-159

张余钰(1995— ),女,硕士研究生。主要从事 PPP 项目方面研究。

郝生跃(1967— ),男,博士,教授。主要从事 PPP 项目、国际工程管理研究。

(上接第 115 页)

[17] 邱月, 封坤, 何川, 等. 盾构隧道错缝拼装管片衬砌局部原型结构破坏试验[J]. 土木工程学报, 2019, 52 (4): 98-108 (Qiu Yue, Feng Kun, He Chuan, et al. Local prototype failure test on staggered assembled segmental lining for shield tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52 (4): 98-108 (in Chinese))

[18] 封坤, 何川, 苏宗贤. 南京长江隧道原型管片结构破坏试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(4): 564-571 (Feng Kun, He Chuan, Su Zongxian. Prototype test on failure characteristics of segmental lining structure for Nanjing Yangtze River Tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46 (4): 564-571 (in Chinese))

邱 月(1990— ),女,博士,工程师。主要从事隧道与地下工程设计理论方面的研究。

何 聪(1990— ),男,硕士,工程师。主要从事隧道及地下工程的设计研究。

何 川(1964— ),男,博士,长江学者特聘教授、博士生导师。主要从事地铁及水下盾构隧道结构理论、大型及复杂交通隧道结构安全以及长大交通隧道运营控制等方面的研究。

封 坤(1983— ),男,博士,副教授。主要从事水下隧道、城市地铁隧道结构理论等方面的研究。

胡 熠(1984— ),男,博士,高级工程师。主要从事岩土工程的设计研究。

郑立宁(1985— ),男,博士,高级工程师。主要从事岩土工程的理论、设计研究。