

# 盾构隧道纵缝接头极限状态试验研究

李晓军<sup>1,2,3</sup>, 周晓舟<sup>1</sup>, 沈奕<sup>1,2,3</sup>, 朱合华<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 纵缝接头对盾构隧道衬砌结构的变形和内力起控制作用, 且不同受力状态下的盾构隧道接头的力学性能差异较大。基于 1:1 的纵缝接头正、负弯矩荷载试验, 通过加载接头至极限破坏, 获得了纵缝接头在轴力和弯矩共同作用下的接缝张开、接头挠度、螺栓和管片混凝土的应变。根据连接螺栓、密封垫和管片混凝土的工作状态, 确定了纵缝接头的使用状态极限; 根据接头最终破坏的变形和承载状态, 确定了纵缝接头的承载能力极限。最后, 在对比试验结果与设计结果的基础上, 研究了现行安全系数设计方法的安全储备。

**关键词:** 盾构隧道; 纵缝接头; 原型试验; 正常使用极限状态; 承载能力极限状态

中图分类号: TU921

文献标志码: A

## Experimental Study on Serviceability Limit State and Ultimate Limit State of Concrete Segmental Lining Longitudinal Joints

LI Xiaojun<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Xiaozhou<sup>1</sup>, SHEN Yi<sup>1,2,3</sup>, ZHU Hehua<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A series of full-scale tests on longitudinal joints subjected to positive and negative moments were conducted. The joints were continuously loaded until completely damaged, and the development of joint opening, joint deflection, bolt strain and concrete strain with the bending moment were obtained. Based on the deformation and stress state of bolt, gasket and segment

stress, the serviceability limit state of longitudinal joints were derived. The ultimate limit state of longitudinal joints was determined according to the ultimate bearing capacity of the joints. Finally, based on the comparison between the test results and the design results, the safety reserve of current safety factor design method was researched.

**Key words:** shield tunnel; longitudinal joint; full scale tests; serviceability limit state; ultimate limit state

盾构法隧道是地铁隧道的一种主要衬砌结构形式, 地铁的安全运营离不开隧道衬砌结构的健康服役, 受外界因素(如地面违规超载、周边工程活动等)影响, 运营盾构隧道已经出现了管径收敛过大、纵缝张开过大和由此引起的渗漏水问题<sup>[1-2]</sup>, 盾构隧道衬砌结构的正常使用极限状态与承载能力极限状态越来越受到关注。纵缝接头对盾构隧道衬砌结构的变形和内力起控制作用, 因此有必要对接头的正常使用极限状态与承载能力极限状态展开研究。

目前盾构隧道衬砌结构的计算模型主要包括惯用法、修正惯用法、多铰圆环模型和梁—弹簧法等<sup>[3]</sup>。在这些模型中, 纵缝接头或者被考虑为圆环弯矩刚度的折减, 或者被作为弹簧或弹性铰考虑<sup>[4]</sup>。近年来, 不同学者先后基于理论分析、结构试验或数值模拟对接头模型进行了研究。朱合华等从卡氏第二定理出发, 给出了梁—弹簧模型的矩阵式<sup>[5]</sup>。蒋洪胜等以多弹簧分别模拟外缘混凝土、弹性密封垫、受力衬垫以及连接螺栓的作用, 考察了轴力、管片厚度、螺栓位置对于接头转动刚度的影响<sup>[6]</sup>。朱伟等将纵缝处的相对转动变形发展简化为两阶段, 提出了管片接头相对转动刚度的双折线模型<sup>[7]</sup>。张冬梅

收稿日期: 2019-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(51478341)

第一作者: 李晓军(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下结构分析与计算等。

E-mail: lixiaojun@tongji.edu.cn

通信作者: 沈奕(1988—), 男, 研究员, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下结构分析与计算等。

E-mail: evanedinburgh@163.com



论文  
拓展  
介绍

等将纵缝接头离散为切向弹簧和法向弹簧,在计算中动态调整弹簧刚度参数<sup>[8]</sup>。李晓军等基于解析方法建立了接头的力学模型,考虑了包括防水密封垫、螺栓预紧力以及轴力等各种构造因素的影响<sup>[9-10]</sup>,将接头承载能力极限状态定义为边缘混凝土达到极限压应变。该模型虽给出了接头极限承载能力的判定方法,但并未对接头极限状态的安全性开展深入研究。

纵缝接头的试验研究也取得了较为丰富的结果。张厚美等通过实验分析了纵缝接头的刚度,推导了接头刚度的简化公式<sup>[11-12]</sup>。滕丽等通过接头正、负弯矩荷载试验,得到了接头通缝和错缝拼装下的抗弯性能曲线<sup>[13]</sup>。闫治国等通过管片接头原型试验,研究了青草沙输水隧道接头的刚度模型<sup>[14]</sup>。这些研究主要是接头力学模型或设计性能的验证,而非正常使用极限状态与承载能力状态的试验研究。丁文其等通过接头试验分析了纵缝接头的防水性能,研究对象主要为接头防水密封垫<sup>[15]</sup>;柳献等采用整环试验研究了衬砌环的加载破坏过程<sup>[16-17]</sup>,但并未对试验结果展开理论分析。总的来说,现有理论和试验或着眼于接头刚度和接头模型,或着眼于接头各种性能,但对接头承载能力的安全性及安全储备分析不足。

本文基于1:1原型试验对上海地铁通用管片纵缝接头的极限状态进行研究,确定其正常使用极限状态与承载能力极限状态,并对现在安全系数设计方法的安全储备进行研究,为运营盾构隧道的维保工作和性能评估提供试验依据。

## 1 试验概况

试验选取上海13号线地铁衬砌结构。上海13号线地铁隧道为单层衬砌、通缝拼装的单圆盾构隧道,衬砌环采用5+1的拼装形式,全环分为封顶块(F块,1块)、邻接块(L块,2块)、标准块(B块,2块)和拱底块(D块,1块)。衬砌环的构造形式如图1所示。

### 1.1 试验设备及试件形式

#### (1) 加载设备

试验加载设备采用TJ-GPJ2000盾构隧道管片接头加载系统,如图2所示。该加载系统能够在垂向、轴向和纵向对管片或接头同时加载,其中垂向最大荷载为3000kN,轴向最大荷载为2000kN,纵向荷载为2000kN。

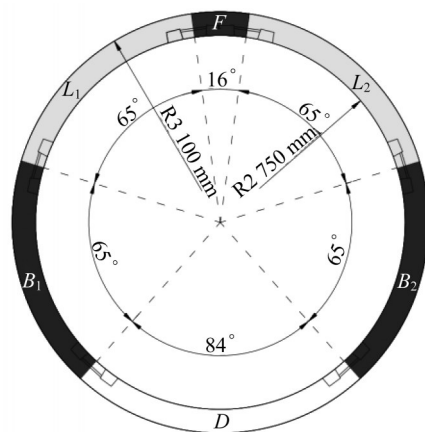


图1 上海地铁隧道衬砌环

Fig.1 The structure of tunnel lining in Shanghai Metro



图2 TJ-GPJ2000盾构隧道管片接头加载系统

Fig.2 TJ-GPJ2000 facility for full-scale joint tests

#### (2) 试件形式

试验衬砌管片选用上海地铁通用管片的标准块。衬砌结构外径6.2m,内径5.5m,管片厚0.35m,宽1.2m,管片浇筑混凝土的强度是C55。由于直接将两块标准块拼成一个纵缝接头试件,其尺寸过大,为减小试验难度,在试验中截取标准块的两端(截取部分弧长约为标准块的1/3),再将截取的两块管片拼装成一个接头试件。试件通过两根直螺栓连接,螺栓的直径30mm,长472mm,强度等级5.8级,螺栓材质为无明显流幅的硬钢。在管片的纵缝上,由外至内依次贴上挡水条、密封垫和定位棒。接头试件的尺寸和纵缝结构形式如图3所示。

### 1.2 试验加载方案

#### (1) 试验加载方法

试验中对接头分别加载正弯矩和负弯矩,研究接头的抗弯极限状态。同时,由于轴力对接头的力学性能有较大影响,试验中在试件两侧加载轴力,研究接头在不同轴力作用下的极限性能的差异。

正、负弯矩加载试验如图4所示。试件两端放

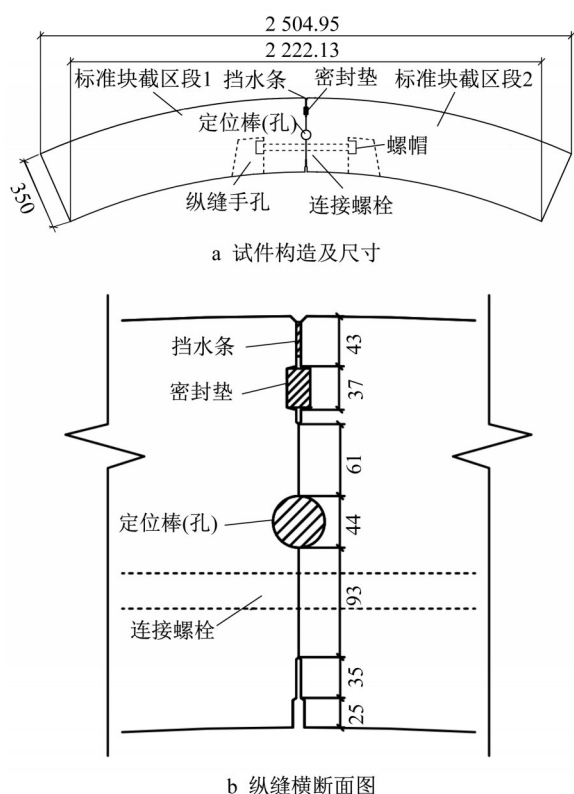


图3 纵缝接头试件形式

Fig.3 Structural diagram of lining longitudinal joint

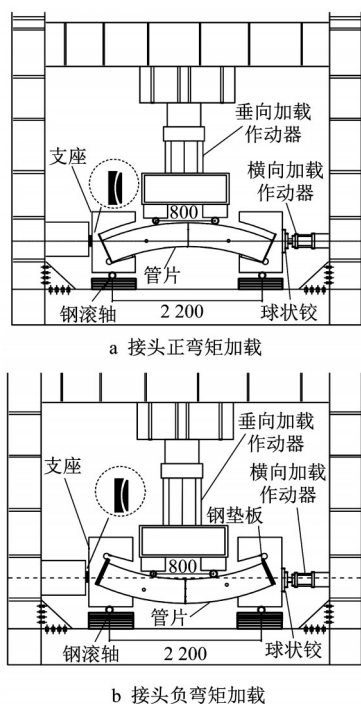


图4 正、负弯矩加载试验示意图(单位:mm)

Fig.4 Sagging and hogging moments tests diagram of segment joint(Unit:mm)

置于试件支座上,轴向作动器通过球状铰作用在支座上。接头轴力通过轴向加载作动器施加,竖向力

通过垂直加载作动器施加,其作用线与试件的接缝的距离为400mm。支座放置在加载系统底座的钢滚轴上,滚轴能够在底座上自由滚动。

(2) 试验加载工况

试验采用等轴力加载,根据上海地铁隧道浅埋、中埋及深埋下的接头轴力水平,将试验中接头轴力分为三级,分别为500kN、900kN和1300kN。

接头弯矩M是通过竖向力P导入,在正弯矩情况下,由图5可知, $M = P(L_1 - L_2) + W(L_1 - L_3)$ 。其中W是试件自重,为6.97kN,  $L_1, L_2, L_3$ 分别为1.1m, 0.4m, 0.6m,故 $M = 0.7P + 0.5W$ 。同理负弯矩下 $M = -0.7P - 0.5W$ 。

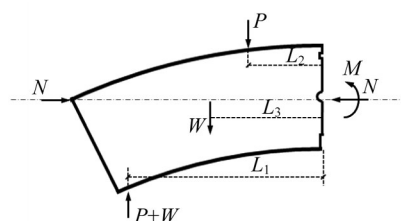


图5 正弯矩下一侧试件受力情况

Fig.5 Load diagram of joint subject to sagging moment

试验的加载工况见表1。

表1 试验工况

Tab.1 Load conditions of tests

弯矩类型	工况编号	轴力/kN	弯矩/kN·m
正弯矩	工况1	500	— 加载竖向力导入接头弯矩
	工况2	900	
	工况3	1300	
负弯矩	工况4	500	
	工况5	900	
	工况6	1300	

(3) 试验加载过程

试验加载过程如下:

①调节垂直加载作动器和竖向加载作动器与试件接触良好;②对接头加载轴力至指定值;③采用分级单调加载的方式,持续对接头加载竖向力导入接头弯矩,直至接头完全破坏;④当接头完全破坏时,试验停止。具体加载过程如图6所示。

1.3 测量方案

(1) 测量内容

试验测量内容包括:试件的纵缝张开、试件中心的竖向位移(接头挠度)、连接螺栓的相对应变和管片表面的混凝土相对应变。测量参数可以分为位移类和应变类,分别采用位移计和电阻式应变片测量。各测点数量统计如表2所示。

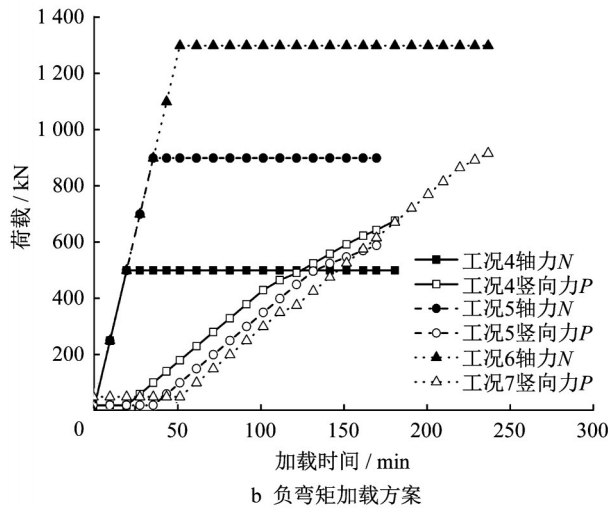
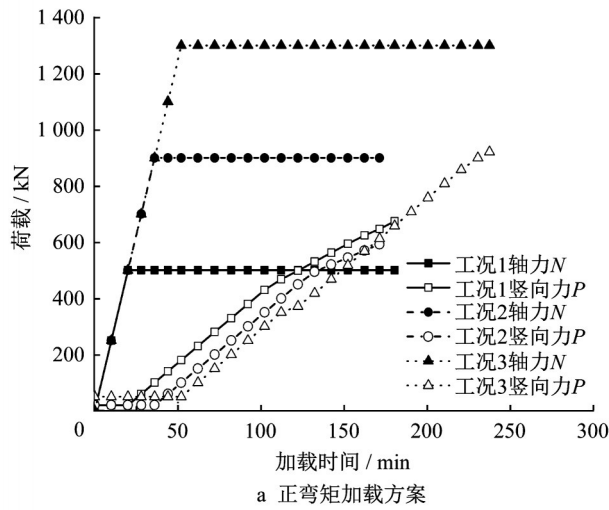


图6 试验具体加载方案

Fig.6 Sagging and hogging moments tests diagram of segment joint

表2 测点数量统计

Tab.2 Statistics of measuring points

测量内容	测量仪器	测点数量
接缝张开	位移计	3
接头挠度	位移计	4
混凝土应变	电阻应变片	20
螺栓应变	电阻应变片	2

(2)测点布置

正弯矩加载试验的测量接头挠度与接缝张开的位移计布置在试件的内弧面,负弯矩加载试验布置在试件的外弧面。混凝土应变测点布置在纵缝附近(距离纵缝50mm),正弯矩加载试验布置在试件的外弧面及两侧,负弯矩加载试验布置在试件的内弧面及两侧。混凝土应变测点较多,在图7中未予体现。

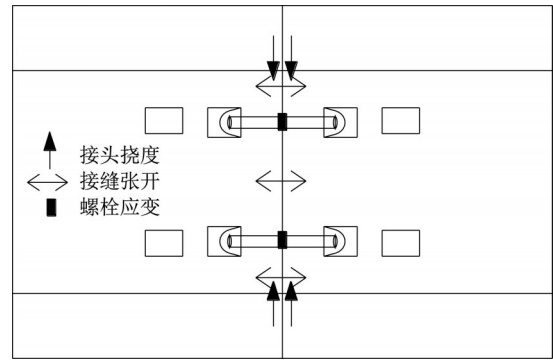


图7 试验测点布置

Fig.7 Distribution of measuring points

2 试验结果

2.1 正弯矩加载试验

(1)接缝张开、接头挠度及螺栓应变

图8~图10是试验工况1、2和3测得的接缝张开、接头挠度和螺栓相对应变与导入弯矩关系曲线。在图8~10中,纵轴从左至右依次为接缝张开、接头挠度和螺栓应变,负弯矩试验相同。

在工况1( $N = 500\text{kN}$ )试验中,从开始导入接头弯矩至接头弯矩为 $98\text{kN}\cdot\text{m}$ ,接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长较缓慢,接头刚度很大。此后接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长加速,接头刚度降低,直至接头弯矩加载到 $266\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,螺栓出现屈服且手孔处混凝土开始出现裂缝,同时接缝张开及接头挠度有较大增幅,管片的接缝外侧受压区首次出现裂缝。当接头弯矩加载至 $329\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,管片外弧面混凝土保护层剥离,形成贯通性裂缝,剥离深度最深处约 $60\text{mm}$ ,剥离长度约 $300\text{mm}$ ,试验停止加载。

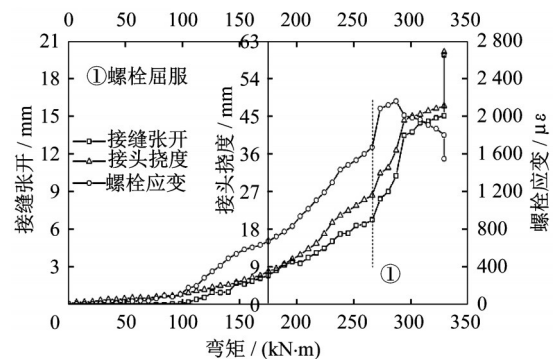


图8 工况1的接缝张开、接头挠度及螺栓应变测量结果

Fig.8 Test results of joint opening, joint deflection and bolt strain in Case 1

在工况2( $N = 900\text{kN}$ )试验中,从开始导入接头弯矩至接头弯矩为 $116\text{kN}\cdot\text{m}$ ,接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长较缓慢。此后接缝张开、接头挠度及

螺栓应变增长加速,接头刚度降低,直至接头弯矩加载到 266.2kN·m 时,螺栓出现滑丝,测量结果表明在该级加载接缝张开增加了 8.31mm,接头挠度增加 17.52mm,但螺栓应变仅增加了 53 $\mu\epsilon$ ,同时管片接缝受压区出现首次出现裂缝。当接头弯矩加载至 296.43kN,管片外弧面混凝土保护层剥离,剥离深度最深处约 80mm,剥离长度约 500mm,试验停止加载。

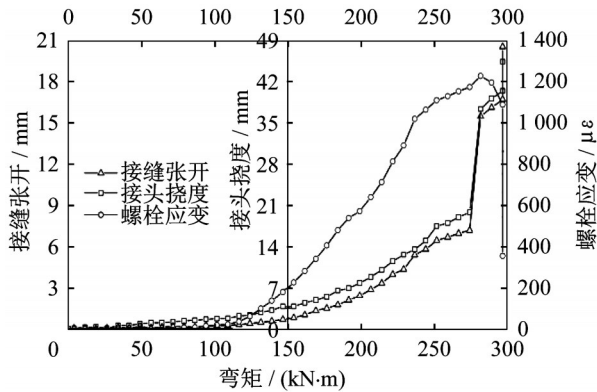


图9 工况2的接缝张开、接头挠度及螺栓应变测量结果  
Fig.9 Test results of joint opening, joint deflection and bolt strain in Case 2

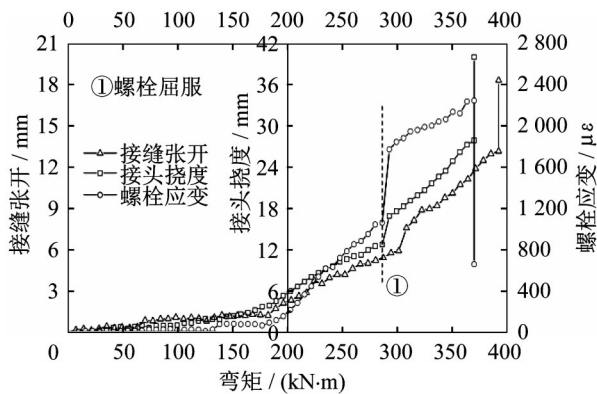


图10 工况3的接缝张开、接头挠度及螺栓应变测量结果  
Fig.10 Test results of joint opening, joint deflection and bolt strain in Case 3

在工况3( $N = 1300\text{kN}$ )试验中,从开始导入接头弯矩至接头弯矩为 162kN·m,接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长较缓慢。此后接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长加速,接头刚度降低,直至接头弯矩加载到 301kN·m 时,螺栓出现屈服且手孔处混凝土开始出现裂缝,同时接缝张开及接头挠度有较大增幅,管片的接缝外侧受压区首次出现裂缝。当接头弯矩加载至 392kN·m 时,管片外弧面混凝土保护层剥离,剥离深度最深处约 65mm,剥离长度约 500mm,试验停止加载。

## (2)混凝土应变

试验的混凝土应变测点较多,规律较杂乱,选取三组工况典型的混凝土应变测点进行分析。由图11可知,当接头弯矩较小时,混凝土应变缓慢发展,随着接头弯矩的增大,测点混凝土应变到达峰值后开始回落,这说明管片边缘由于应力集中而开裂,位于管片外弧面的混凝土测点混凝土退出工作而受力减小。根据混凝土应变的测量结果,混凝土首次出现裂缝的接头弯矩与螺栓屈服的接头弯矩相等,可知螺栓屈服(滑丝)与接缝外侧受压区混凝土首次开裂同时发生。

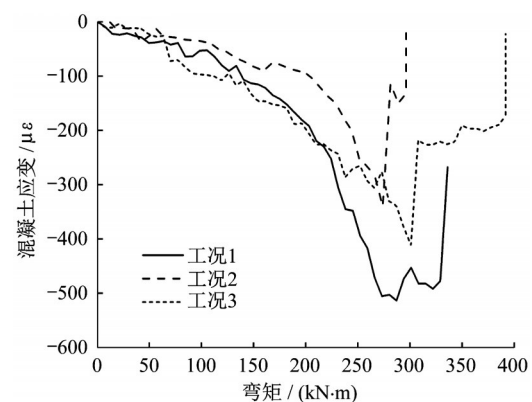


图11 混凝土应变—加载弯矩曲线  
Fig.11 Sagging moment-strain curves of lining concrete

## (3)正弯矩加载试验分析与讨论

根据三组正弯矩加载试验可知,接头的变形规律较一致,即在加载初期,接头变形较缓慢,接头刚度较大,之后接头变形加速,接头刚度降低,直至螺栓屈服或滑丝,管片接缝外侧受压区混凝土出现裂缝,随着接头弯矩的继续增大,管片破损加剧,最终达到极限抗弯承载能力。

在接头的正弯矩变形过程中,有三个力学性能关键点,即接头抗弯刚度由大变小的拐点,螺栓屈服(工况2为螺栓滑丝)及接头最终极限破坏。正弯矩变形的纵缝接头在不同轴力作用下的力学性能差异较大,主要表现为不同轴力的力学性能关键点的接头弯矩不同。

## 2.2 负弯矩加载试验

### (1)接缝张开、接头挠度及螺栓应变

图12~图14是工况4~6测得的接缝张开、接头挠度和螺栓相对应变与导入弯矩关系曲线。

在工况4( $N = 500\text{kN}$ )试验中,从开始导入接头弯矩至接头弯矩为 -125kN·m,接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长较缓慢,接头刚度较大;此后接缝张

开、接头挠度及螺栓应变增长加速,接头刚度降低,直至接头弯矩加载到 $-178\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,管片接缝内侧的混凝土相互接触(当接缝张开为零时该区域混凝土存在 $4\text{mm}$ 宽的缝隙),随后该处混凝土由于应力集中迅速开裂,管片内弧面表层混凝土剥离,剥离深度最大约为 $35\text{mm}$ ,剥离长度约 $300\text{mm}$ ,试验停止加载。在该组试验中,螺栓测点的应变超出屈服应变,但没有螺栓没有出现明显的屈服现象。

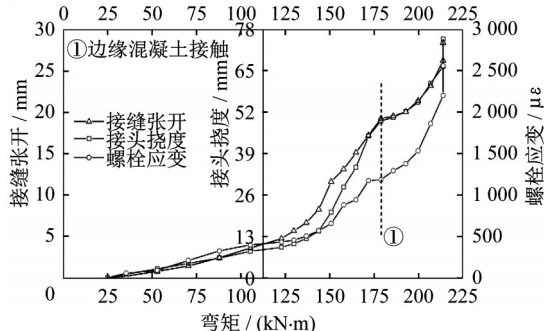


图12 工况4的接缝张开、接头挠度及螺栓应变测量结果  
Fig.12 Test results of joint opening, joint deflection and bolt strain in Case 4

在工况5( $N = 900\text{kN}$ )试验中,从开始导入接头弯矩至接头弯矩为 $-138\text{kN}\cdot\text{m}$ ,接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长较缓慢,接头刚度较大;此后接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长加速,接头刚度降低,直至接头弯矩加载到 $-180\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,螺栓出现滑丝,接缝张开、接头挠度均大幅增加,出于安全考虑,试验停止加载。试验过程中,螺栓应变没有达到屈服应变。

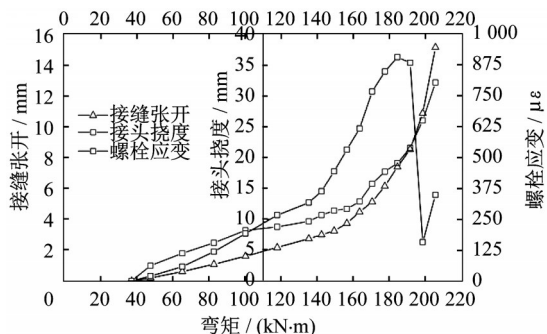


图13 工况5的接缝张开、接头挠度及螺栓应变测量结果  
Fig.13 Test results of joint opening, joint deflection and bolt strain in Case 5

在工况6( $N = 1300\text{kN}$ )试验中,从开始导入接头弯矩至接头弯矩为 $-165\text{kN}\cdot\text{m}$ ,接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长较缓慢,接头刚度较大;此后接缝张开、接头挠度及螺栓应变增长加速,接头刚度降低,直至接头弯矩加载到 $-265\text{kN}\cdot\text{m}$ 时,管片接缝内

侧的混凝土相互接触,随后该处混凝土由于应力集中迅速开裂,管片内弧面表层混凝土剥离,剥离深度最大约为 $80\text{mm}$ ,剥离长度约 $500\text{mm}$ ,试验停止加载。在该组试验中,螺栓测点的应变达到屈服应变,但没有螺栓没有出现明显的屈服现象。

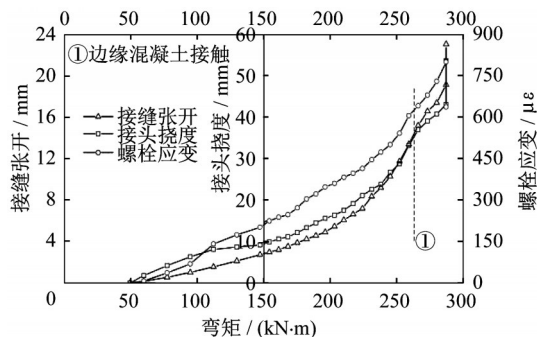


图14 工况6的接缝张开、接头挠度及螺栓应变测量结果  
Fig.14 Test results of joint opening, joint deflection and bolt strain in Case 6

## (2)混凝土应变

与正弯矩加载试验一致,选取三组负弯矩试验典型的混凝土应变测点进行分析。由图15可知随着接头弯矩的增大,混凝土应变逐渐增加,当测点混凝土应变到达峰值后开始回落,这说明管片边缘由于应力集中而开裂,使位于管片外弧面的混凝土测点受力减小。

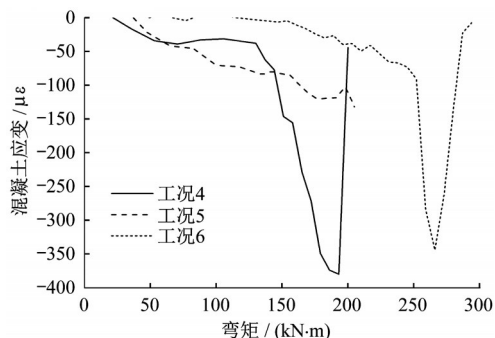


图15 混凝土应变测量结果  
Fig.15 Hogging moment-strain curves of lining concrete

## (3)负弯矩加载试验分析与讨论

根据三组负弯矩加载试验可知,接头的变形规律较一致,即在加载初期,接头变形较缓慢,接头刚度较大,之后接头变形加速,接头刚度降低,直至边缘混凝土相互接触后由于应力集中而开裂,随着接头弯矩的继续增大,管片破损加剧,最终达到极限抗弯承载能力。在加载过程中,螺栓应变较小,未出现明显屈服现象。

在接头的负弯矩变形过程中,有三个力学性能

关键点,即接头抗弯刚度由大变小的拐点,边缘混凝土接触及接头最终极限破坏。同样负弯矩变形的纵缝接头在不同轴力作用下的力学性能差异较大,主要表现为力学性能关键点的接头弯矩不同。

### 3 试件变形及破坏现象分析

#### 3.1 正弯矩加载试验

从试验现象及测量数据来看,纵缝接头在恒定的轴力和持续增大的正弯矩的作用下,接缝内侧逐渐张开,螺栓拉力持续增大,接缝受压区逐渐外移且受压高度不断减小,弹性密封垫和挡水条受压变形扭曲。当接头达到极限状态时,螺栓首先产生屈服或滑丝,同时管片的接缝外侧的受压区混凝土出现肉眼可见裂缝,接头进入极限受力状态。随着加载接头逐渐增大,接头达到极限受力状态,最终管片的接缝外侧的混凝土出现贯通性裂缝,丧失了抵抗受弯变形的能力,接头完全破坏。

当接头完全破坏后,主要破坏特征为管片边缘形成了贯通性裂缝,外弧面表层混凝土大范围剥离,如图16所示。内弧面混凝土有开裂现象,开裂程度与轴力相关,轴力越小,内弧面开裂现象越严重,当轴力为1 300kN时,内弧面没有出现肉眼可见裂缝。



图16 正弯矩变形接头极限破坏形式(N=1 300kN)

Fig.16 A view of the damaged joint subjected to the sagging moment ( $N = 1\ 300\text{kN}$ )

#### 3.2 负弯矩加载试验

纵缝接头在恒定的轴力和持续增大的负弯矩的作用下,接缝外侧逐渐张开,接缝内侧逐渐闭合,螺栓拉力持续增大,接缝受压区逐渐内移且受压高度不断减小,弹性密封垫和挡水条接触应力减小并最终互相脱离。接缝内侧的混凝土相互接触后,由于应力集中迅速开裂,接头达到极限状态。随着加载接头逐渐增大,接头达到极限受力状态,最终管片的接缝内侧的混凝土出现贯通性裂缝,丧失了抵抗受

弯变形的能力,接头完全破坏。

当接头完全破坏后,主要破坏特征为管片边缘形成了贯通性裂缝,内弧面表层混凝土剥离,如图17所示。外弧面没有出现肉眼可见裂缝。



图17 负弯矩变形接头极限破坏形式(N=1 300kN)

Fig.17 A view of the damaged joint subjected to the hogging moment ( $N = 1\ 300\text{kN}$ )

### 4 接头的极限状态分析

根据纵缝接头的正、负弯矩加载试验,接头的变形过程存在明显的力学性能关键点,在这些关键点,接头的力学性能会有明显变化。本文根据试验确定的纵缝接头力学性能关键点,并结合盾构隧道的密封垫防水试验<sup>[18]</sup>,确定了纵缝接头的极限状态,包括正常使用极限状态和承载能力极限状态。

#### 4.1 纵缝接头承载能力极限状态的确定

在《盾构隧道管片设计》中将接头断面发生破坏定义为承载能力极限状态<sup>[19]</sup>。在《混凝土结构设计规范》中,认为当混凝土达到极限压应变 $\epsilon_{cu}$ ,就标志着构件达到了承载能力极限状态<sup>[20]</sup>。

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \leq 0.0033 \quad (1)$$

式中: $f_{cu,k}$ 为混凝土强度等级。

因此,对试验中C55的管片试件,当边缘混凝土应变达到0.003 25时,认为其已达到承载能力极限状态。然而,达到承载能力极限状态并不意味着构件完全破坏,在达到承载极限后,由于混凝土的延性,构件仍具有一定的承载能力。故接头在承载能力极限状态下的接头弯矩、接缝张开和接头挠度,如表3和表4所示。其中,由于工况2与工况5为螺栓滑丝,试验结果存在一定的偏差。工况5中混凝土未达到极限压应变。

#### 4.2 纵缝接头正常使用极限状态的确定

在盾构隧道实际工程中常根据止水材料防水是否失效手孔处混凝土裂缝大小来确定接头的正常使用极限状态。对于上海通用管片头,当密封垫脱离6mm(管片张开大于7.1mm)时,可认为止水材料防

表3 正弯矩变形接头承载能力极限状态

Tab.3 Ultimate limit state of longitudinal joint subject to sagging moment

轴力 /kN	承载能力极限状态			完全破坏 弯矩/kN·m
	弯矩/kN·m	接缝张开/mm	接头挠度/mm	
500	234.62	5.30	20.38	329.2
900	271.86	7.12	19.60	296.4
1300	304.13	6.65	14.59	392.0

表4 负弯矩变形接头承载能力极限状态

Tab.4 Ultimate limit state of longitudinal joint subject to hogging moment

轴力 /kN	承载能力极限状态			完全破坏 弯矩/kN·m
	弯矩/kN·m	接缝张开/mm	接头挠度/mm	
500	176.80	19.23	49.21	178
900	/	/	/	180
1300	263.73	15.27	37.11	265

水失效<sup>[21]</sup>。当混凝土裂缝达到0.2mm时,可认为达到混凝土结构正常使用极限状态<sup>[20]</sup>。

#### (1) 正弯矩变形接头

对于正弯矩变形接头,由于密封垫始终处于受压状态,接触应力大,防水性能良好,可只根据管片开裂情况确定正弯矩变形接头的正常使用极限状态。正弯矩加载试验表明,管片手孔处开裂与螺栓屈服几乎是同时发生的,所以可将螺栓屈服或手孔开裂时的状态定义为正弯矩下接头的正常使用极限状态,如表5所示。

表5 正弯矩变形接头正常使用极限状态

Tab.5 Serviceability limit state of longitudinal joint subject to sagging moment

轴力/ kN	正常使用极限状态		
	弯矩/kN·m	接缝张开/mm	接头挠度/mm
500	266.2	6.72	26.05
900	273.9	7.18	19.84
1300	301.0	5.89	12.72

#### (2) 负弯矩变形接头

弹性密封垫的防水能力主要体现在接触面上的接触应力,当接触应力大于渗水压力时,可以认为密封垫密封完好<sup>[21]</sup>。根据上海地区地铁盾构隧道防水设计的要求,密封垫的接触应力不小于0.6MPa。根据橡胶弹性密封垫的防水试验研究<sup>[18]</sup>,密封垫脱开6mm(即接缝张开7.1mm),接触应力为0.6MPa。

对于负弯矩变形接头,根据试验结果,当密封垫脱开6mm时,接缝张开为7.1mm,此时螺栓未屈服,管片没有出现开裂,即密封垫防水失效要先于螺栓屈服和管片开裂产生。所以可将接缝张开为7.1mm时的状态定义为负弯矩下接头的正常使用

极限状态,如表6所示。

表6 负弯矩变形接头正常使用极限状态

Tab.6 Serviceability limit state of longitudinal joint subject to hogging moment

轴力/ kN	正常使用极限状态		
	接缝张开/mm	接头弯矩/kN·m	接头挠度/mm
500	7.1	139	13.0
900	7.1	183	18.9
1300	7.1	222	20.5

## 5 极限状态设计安全性分析

### 5.1 接头承载能力极限设计方法

根据试验结果,接头破坏主要是由于正/负弯矩下接头外/内侧开裂破坏,因此,根据《混凝土设计规范》,当接头外/内侧混凝土应变 $\epsilon_c$ 大于极限应变 $\epsilon_{cu}$ 时,可认为接头达到承载能力极限状态<sup>[20]</sup>。

忽略密封垫接触应力,认为螺栓已达到屈服状态,由力与力矩平衡条件可知,在正弯矩下有

$$N + nT_b - F_c = 0 \quad (2)$$

$$M - nT_b(h_b - h/2) - F_c(h/2 - \beta y/2) = 0 \quad (3)$$

$$T_b = f_y \pi d^2 / 4 \quad (4)$$

$$F_c = \alpha f_c \beta b y \quad (5)$$

式中: $N$ 为接头的轴力; $n$ 为接头螺栓个数; $T_b$ 为螺栓屈服拉力, $F_c$ 为混凝土受压区合力; $h_b$ 为螺栓中心到外弧面的距离; $h$ 为衬砌管片厚度; $\alpha$ 、 $\beta$ 为混凝土受压区等效矩形系数; $y$ 为混凝土受压区高度; $f_y$ 为螺栓抗拉强度; $d$ 为螺栓直径; $f_c$ 为混凝土抗拉强度, $b$ 为衬砌管片宽度。

同理,在负弯矩下有

$$N + nT_b - F_c = 0 \quad (6)$$

$$M - nT_b(h_b - h/2) + F_c(h/2 - \beta y/2) = 0 \quad (7)$$

### 5.2 接头承载能力极限设计安全性分析

在采用极限状态设计法设计盾构隧道纵缝接头时,常依据安全系数直接考虑荷载及材料强度的不均一性及不确定性<sup>[19]</sup>。在设计工作中,荷载和材料强度均取设计值,荷载设计值的分项系数为 $1.35 \times 1.1 = 1.485$ ,其中,1.35为永久荷载的分项系数,1.1为设计使用年限100年的分项系数,根据5.1节中设计方法,达到承载能力极限状态时的弯矩承载力与试验结果对比如表7所示。

由表7可以看出,在一定范围内,当轴力增加时,弯矩承载力设计值近似呈线性增加,这是由现行的设计方法所决定的。且当轴力增加时,不管是正弯矩还是负弯矩情况,试验结果与设计值的比值均



表7 接头弯矩承载力计算值与试验结果对比

Tab.7 Comparison of design values of joint bending moment bearing capacity and test results

弯矩	轴力/kN	承载力极限状态		
		计算值/kN·m	试验值/kN·m	试验值/计算值
正弯矩	500	125.93	234.62	1.86
	900	177.76	271.86	1.53
	1300	221.77	304.13	1.37
负弯矩	500	103.08	176.80	1.71
	900	154.92	/	/
	1300	198.92	263.73	1.33

逐渐减小。当轴力由500kN增加到1300kN时,在正弯矩情况下,比值由1.86下降到1.37;在负弯矩情况下,比值由1.71降低到1.33。总体而言,当轴力小于1300kN时,试验值均大于承载力设计值,即目前的设计方法在轴力不超过一定限值时安全的,且当轴力较小时,设计得到的弯矩承载力安全储备较大,当轴力增大时,设计得到的弯矩承载力安全储备将减小。

实验结果的承载力极限与设计计算的结果之比不同,说明在不同的受力状态下,接头设计可采用的安全系数也不同。其原因在于不同的受力组合下,接头的破坏形态和过程不同。一方面,由于接头本身的构造(正弯矩下的挡水条和负弯矩下的接缝沟),混凝土受压区会向中心偏移,使得实际偏心距往往比设计偏心距要小,当设计轴力越大时,则混凝土受压区高度越大,设计偏心距越小,此时,较大的轴力会将偏心距误差导致的计算极限承载弯矩放大。另一方面,当混凝土受压区高度较小时,螺栓在达到充分屈服后混凝土受压区破坏,接头整体延性破坏,此时该破坏的过程更长,即轴力较小时试验得到的接头承载力相对计算结果更高。此外,目前的纵缝接头设计方法多采用线性或双线性,而实际接头的荷载变形性能可能为非线性甚至多段线性关系<sup>[9-10,22]</sup>,当受力组合不同时,在不同阶段所应采用的安全系数也可能不同。

根据实验与计算结果,假设试验值与计算值的比值相对于轴力呈线性变化,采用线性方法拟合轴力与该比值可得,正弯矩下轴力大于2225.0kN或负弯矩下轴力大于1994.7kN时,试验值与设计值之比将小于1,即此时设计结果的安全性可能将大幅降低。由于接头的轴力与埋深呈正相关<sup>[3]</sup>,所以对于深埋或超深埋的隧道,可以在轴力较大时对弯矩承载力设计值予以折减。

综上所述,对于偏心受压的管片接头,当其所受轴力较大时,可对设计的弯矩承载力予以适当的折

减。采用线性拟合方法可以得到,对于上海通用管片,建议当正弯矩时轴力大于2225.0kN,负弯矩时轴力大于1994.7kN时予以折减。也可采用分阶段的安全系数设计方法,从实际结构的不同受力部位确定采用的安全系数,从而得到安全且适用的设计结果。

## 6 结论

基于管片纵缝接头试验,确定了纵缝接头的承载力极限状态与正常使用极限状态,通过设计值与试验结果的对比,研究了目前设计工作中安全系数设计方法的合理性,并得到了以下结论:

(1)接头的承载力极限状态可由边缘混凝土达到极限压应变确定,虽然此时接头可能并未出现明显的破坏。对于接头的正常使用极限状态,在正弯矩下可定义为手孔处开裂或螺栓屈服时的状态,在负弯矩下可定义为密封垫防水失效时的状态,对于上海地铁通用管片,接缝张开为7.1mm时密封垫防水失效。

(2)对于上海地铁通用管片,当轴力小于1300kN时,试验值均大于承载力设计值,即目前设计方法在轴力不超过一定限值时安全的,且当轴力较小时,设计得到的弯矩承载力安全储备较大,当轴力增大时,设计得到的弯矩承载力安全储备将减小。

(3)对于上海地铁通用管片,在不同的受力状态下,若设计工作中采用相同的安全系数,在正弯矩下轴力大于2225.0kN或负弯矩下轴力大于1994.7kN时可对接头受弯承载力予以折减。也可采用分阶段的安全系数设计方法,从实际结构的不同受力部位确定采用的安全系数,从而得到安全且适用的设计结果。

研究成果能够为地铁盾构隧道的设计和运营维护工作提供试验依据。

## 参考文献:

- [1] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6):1092.  
WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092.
- [2] YU Haitao, YUAN Yong, QIAO Zongzhao, et al. Seismic analysis of a long tunnel based on multi-scale method [J]. Engineering Structures, 2013, 49, 572.
- [3] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟译. 北

- 京:中国建筑工业出版社,2001.
- Japanese Civil Engineering Institute. Shield tunnel design codes and explanation [M]. Translated by ZHU Wei. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [4] DON A, DIAS D, ORESTE P, *et al.* 2D numerical investigation of segmental lining behavior [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 37: 115.
- [5] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. *岩土力学*, 1998, 19(2): 26.
- ZHU Hehua, TAO Lubin. Beam-spring system model for shield lining analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(2): 26.
- [6] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(9): 1574.
- JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Theoretical study of rotational stiffness of joint in shield tunnel segments [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9): 1574.
- [7] 朱伟, 钟小春, 秦建设. 盾构衬砌管片接头力学分析及双直线刚度模型研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(12): 2154.
- ZHU Wei, ZHONG Xiaochun, QIN Jianshe. Mechanical analysis of segment joint of shield tunnel and research on bilinear joint stiff model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2154.
- [8] 张冬梅, 樊振宇, 黄宏伟. 考虑接头力学特性的盾构隧道衬砌结构计算方法研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(8): 2546.
- ZHANG Dongmei, FAN Zhenyu, HUANG Hongwei. Calculation method of shield tunnel lining considering mechanical characteristics of joints [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(8): 2546.
- [9] LI Xiaojun, YAN Zhiguo, WANG Zhen, *et al.* A progressive model to simulate the full mechanical behavior of concrete segmental lining longitudinal joints [J]. *Engineering Structures*, 2015, 93: 97.
- [10] LI Xiaojun, YAN Zhiguo, WANG Zhen, *et al.* Experimental and analytical study on longitudinal joint opening of concrete segmental lining [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2015, 46: 52.
- [11] 张厚美, 过迟, 傅德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 309.
- ZHANG Houmei, GUO Chi, FU Deming. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 309.
- [12] 张厚美, 付德明, 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.
- ZHANG Houmei, FU Deming, GUO Chi. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel [J]. *Modern Tunneling Technology*, 2002, 39(6): 28.
- [13] 滕丽, 吕建中. 通用管片接头荷载试验研究[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2010, 16(2): 216.
- TENG Li, LÜ Jianzhong. Load test on typical segment joints [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2010, 16(2): 216.
- [14] 闫治国, 彭益成, 丁文其, 等. 青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接头荷载试验研究[J]. *岩土工程学报*. 2011, 33(9): 1385.
- YAN Zhiguo, PENG Yicheng, DING Wenqi, *et al.* Load tests on segment joints of single lining structure of shield tunnel in Qingcaosha Water Conveyance Project [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 22(9): 1385.
- [15] DING Wenqi, GONG Chenjie, MOSALAM Khalid M, *et al.* Development and application of the integrated sealant test apparatus for sealing gaskets in tunnel segmental joints [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2017, 63: 54.
- [16] LIU Xian, JIANG Zijie, YUAN Yong, *et al.* Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded steel plates [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(6): 685.
- [17] LIU Xian, ZHANG Chen, ZHANG Chenguang, *et al.* Ultimate load-carrying capacity of the longitudinal joints in segmental tunnel linings [J]. *Structural Concrete*, 2017, 18(5): 693.
- [18] 薛绍祖. 地下建筑工程防水技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- XUE Shaoyu. Waterproof technology of underground construction engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [19] 小泉淳. 盾构隧道管片设计 [M]. 官林星译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- KOIZUMI Chun. Segment design of shield tunnel [M]. Translated by GUAN Linxing. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of housing and urban rural development of the people's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [21] 石修巍, 向科, 藏延伟. 盾构法隧道管片接缝密封垫设计及试验研究 [C] // 中国土木工程学会隧道与地下工程分会防排水专业委员会第十三届学术交流会论文集. 厦门: 中国土木工程学会, 2007: 46-48.
- SHI Xiwei, XIANG Ke, ZANG Yanwei. Design and experimental study of segment joint gasket of shield tunnel [C] // Proceedings Of The 13th Academic Exchange Meeting of Waterproof And Drainage Professional Committee of Tunnel And Underground Engineering Branch of China Society of Civil Engineering. Xiamen: China Society of Civil Engineering, 2007: 46-48.
- [22] BLOM C B M. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils [D]. Delft: Technical University of Delft, 2000.