

盾构隧道错缝拼装管片衬砌局部原型结构破坏试验

邱 月¹ 封 坤^{1,2} 何 川¹ 苏 昂¹ 梁 坤¹

(1. 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; 2. 西南交通大学中日 RSC 结构研究中心, 四川成都 610031)

摘要: 为探明盾构隧道管片衬砌的局部破坏特性, 定量评价结构的安全状态, 选取考虑前后环错缝拼装组合的原型管片结构局部构件进行加载试验研究。详述结构裂缝的发展、主应力的分布、螺栓的受力与管片内力、变形以及接缝张开、错台的关系, 揭示结构的破坏机理, 并采用数值计算对试验结果进行验证。研究表明: 结构初始裂缝出现在中间环内弧面靠近相邻环接缝处, 并发展成为最终破坏的主裂缝。在恒定截面轴压比、增大偏心距的加载方式下, 结构中部为压弯破坏, 两侧为压剪破坏。试件接缝并未发生破坏, 张开量较小, 错台量较大, 手孔附近应力集中较为严重。错缝构件的破坏机理可归纳为: 结构刚度较大的区域首先开裂, 导致整体刚度重分布, 之后刚度较大的区域继续开裂, 如此循环, 直至结构变形过大发生破坏。可将裂缝宽度、接缝错台量与控制截面竖向位移作为结构安全的评价指标。

关键词: 盾构隧道; 局部原型试验; 破坏特征; 破坏机理; 错缝拼装

中图分类号: U451⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)04-0098-11

Local prototype failure test on staggered assembled segmental lining for shield tunnel

Qiu Yue¹ Feng Kun^{1,2} He Chuan¹ Su Ang¹ Liang Kun¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China-Japan RSC Structure Research Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigate the local failure characteristics of segmental lining for shield tunnel and quantitatively evaluate the safety state of the structure, a local prototype test was carried out on a staggered assembled segmental lining. The relationships between crack development, stress distribution and bolt internal force to structural internal force and deformation, joint opening and dislocation were described in detail. The failure mechanism of the structure was thus analyzed and the test results were verified by the numerical calculated ones. The results show that the initial crack in the structure appears at the middle ring close to the longitudinal joint of the adjacent ring, and develops into the main crack at final damage. The compression-flexure failure occurs in the middle of the structure and the compressive shear failure occurs at both ends of the structure when the axial compression ratio of control section remains constant and bending moment increases. There is no damage to the joints, the joint opening is smaller but the dislocation is larger. The stress concentrations near the hand hole are serious. The failure mechanism is found to be caused by cracking in the region where the stiffness is relatively larger. In addition, the cracking results in the redistribution of the overall stiffness of the structure, and subsequently the region with the greatest stiffness continues to crack, repeating the cycle until the structure is damaged with excessive deformation. Moreover, the crack width, joint dislocation and vertical displacement of control section can be taken as the evaluation indexes of structural safety.

Keywords: shield tunnel; local prototype test; failure characteristic; failure mechanism; staggered assembling

E-mail: yuueeqqiuu@126.com

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0802205)、国家自然科学基金
基金(51878569, 51578462)和中国铁路总公司科技开发计
划重点课题(2014G004-0)

作者简介: 邱月, 博士研究生

通讯作者: 封坤, 博士, 副教授

收稿日期: 2018-03-30

引 言

随着盾构法修建隧道的普遍使用,盾构隧道的安全问题受到了广泛关注^[1]。隧道结构的破坏大致分为:①整体变形失稳或崩塌破坏;②管片或接缝截面局部破坏^[2]。对于结构整体破坏的研究,原型试验最大程度地还原了工程结构本身的实际受力状态,最为直观有效、可信度高、开展较多。如何川^[3]、封坤^[4]、夏松林^[5]、邹育麟^[6]等通过对大断面、高水压盾构隧道多环衬砌进行水、土压力分离加载,探明了结构在通缝和错缝条件下的裂缝发展规律及其破坏特性。鲁亮^[7]、毕湘利^[8-9]等采用多点对拉的加载方式对轨道交通盾构隧道进行加载,分析其承载性能和破坏机理。柳献等^[10-12]针对内张钢圈半环加固法、整环加固法以及复合腔体加固的盾构隧道,探明了结构的受力过程、破坏模式和极限承载能力。叶宇航等^[13]探讨了类矩形盾构隧道结构的破坏过程和破坏机理。德国在 2003 年结合易北河第四隧道工程验证了结构的承载能力和稳定性^[14]。

然而整环试验造价高、周期长,对试验场地、设备性能要求严苛,管片的大量浇筑和运输也十分不便。而局部原型试验更为经济便捷、周期较短,针对性较强,对设备、场地、人工的要求较低。同时,能够真实展现管片的细部特征及破坏过程、破坏机理等力学特性,模拟结构的实际受力状况。对于施工、运营期更为常见的管片局部破坏问题,国内外学者也开始尝试采用该手段进行考察,但主要针对管片接缝的抗弯、抗剪性能开展。如兰学平等^[15]依托上海长江隧道工程进行了接头错缝夹片试验,获取了结构纵缝的正、负抗弯刚度。朱合华等^[16-17]以青草沙水源原水工程输水隧道为背景,对管片接头局部构件进行加载,得到了纵缝转角刚度、纵环缝剪切刚度以及弯矩传递系数。

盾构隧道作为装配式衬砌结构^[18],由于纵、环向螺栓的存在,单管片在两侧环片挟持作用下的局部破坏问题研究较少,其开裂、破坏荷载与受力、变形的关系^[3]尚不清楚,结构安全状态的定量评价尚不明确。

鉴于此,本课题组采用自主研发的“局部原型结构加载试验系统”装置^[19],对盾构隧道结构中考虑前后环错缝拼装组合的原型管片衬砌局部构件(以下简称夹片构件)进行破坏试验,以考虑接缝在内力传递和刚度分配上对结构产生的影响。试验

探究了破坏过程中裂缝开裂时间、发展程度与结构受力、变形以及接缝张开、错台的关系,提出了相应的评价指标,为有效掌握结构破坏程度、充分保障结构安全提供参考。

1 工程概况

某输气盾构隧道穿越水库,水下段覆土厚度 14~30m,最大水头 33m,主要埋置于卵石层中;两岸段局部穿越粉质黏土、粉砂及粗砂层。

隧道衬砌采用单层钢筋混凝土通用管片环,外直径 4.81m,内直径 4.25m,管片厚度 0.28m,幅宽 1.2m,内置两条直径 1219mm 的输气管道。混凝土强度等级为 C50,主筋等级为 HRB335,箍筋及构造筋等级为 HPB300,主筋保护层厚度 40mm。每环衬砌分为 6 块(图 1),包括封顶块 K(圆心角 $\alpha=60^\circ$),邻接块 B1、B2(圆心角 $\beta=48^\circ 45'$)和标准块 A1~A3(圆心角 $\gamma=67^\circ 30'$),纵、环缝各布置 12 颗 M24 弯螺栓,机械等级 5.8 级。

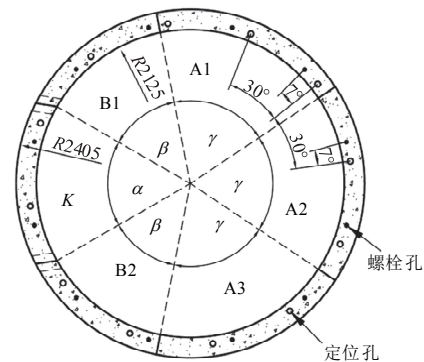


图 1 管片分块示意(单位: mm)

Fig.1 Diagram of Segment Layout (unit: mm)

2 试验概况

2.1 试件及量测系统

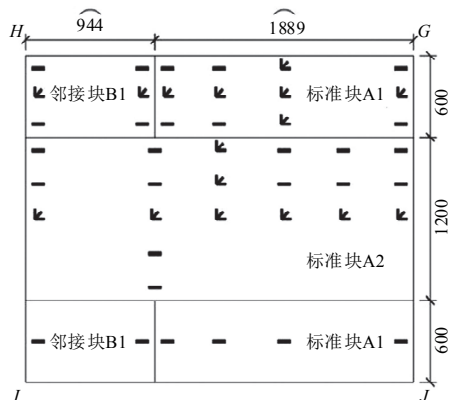
试验构件为钢筋混凝土原型管片,由标准块 A1、A2 和邻接块 B1 组成。具体为:将 A1 和 B1 沿幅宽中部对称切开后拼装于 A2 两侧,较好地实现了管片结构由于非均匀块体装配咬合带来的拼装效应,如若使用整幅宽管片拼装于 A2 两侧则会放大结构的边界效应^[19]。

量测内容包括:管片结构的内力、主应力、竖向位移、接缝张开和错台量、螺栓内力以及混凝土裂缝的宽度、数量和发展情况。结构内力、主应力由电阻应变片和正弦式混凝土应变计量测,试件具

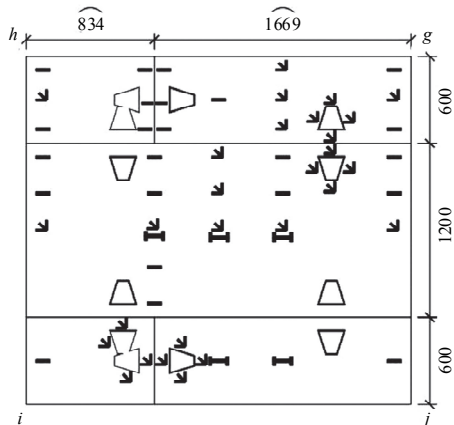
体尺寸及应变测点布置如图 2 所示。结构竖向位移由精度 0.1mm 的激光位移传感器量测，接缝张开、错台量由精度 0.01mm 的差动式位移传感器量测，测试原理及位移测点布置如图 3、图 4 所示。螺栓内力由粘贴在螺栓中部内、外弧面的一对电阻应变片量测。混凝土裂缝宽度由精度 0.005mm、可 40 倍放大的裂缝宽度测试仪器量测，在试件内、外弧面按 10cm 间距绘制网格线，以便观察和记录各级荷载下裂缝的产生和发展情况。构件各部分对应的圆心角如图 5 所示。

2.2 试验装置

试验装置由大型试验架、千斤顶、加载分配梁、压梁、转动铰支座、控制台以及提供反力的钢箱梁底座形成自反力体系，如图 6 所示。试件水平方向一端固定，一端自由，自由端与水平千斤顶相连，该千斤顶通过转动铰支座将水平荷载作用在试件上。在竖直方向上，试件不能自由移动，通过竖向



—: 应变片; ◀: 应变花
(a) 外弧面



⊥: 正弦式混凝土应变计
(b) 内弧面

图 2 构件尺寸及应变测点布置 (单位: mm)

Fig.2 Sizes and arrangement of the strain gauging points on the structure (unit: mm)

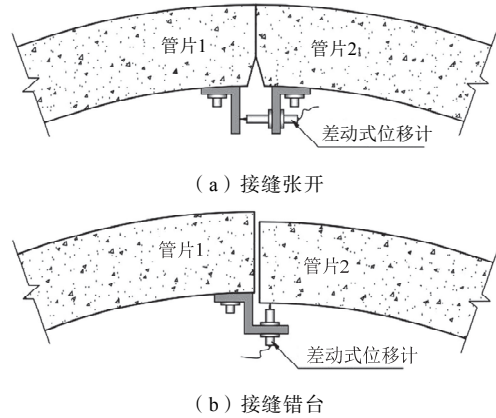
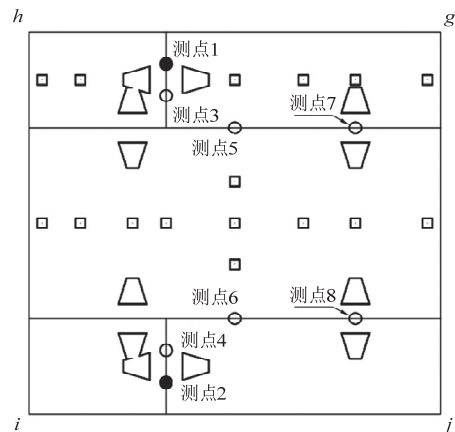


图 3 接缝张开、错台测试原理

Fig.3 Testing principle for joint opening and dislocation



●: 接缝张开测点; ○: 接缝错台测点; □: 竖向位移测点

图 4 构件位移测点布置

Fig.4 Layout of the displacement gauging points

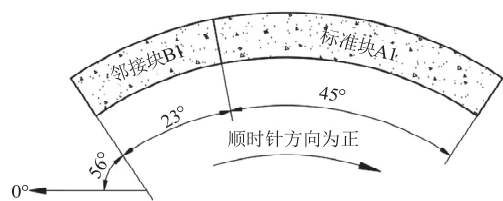


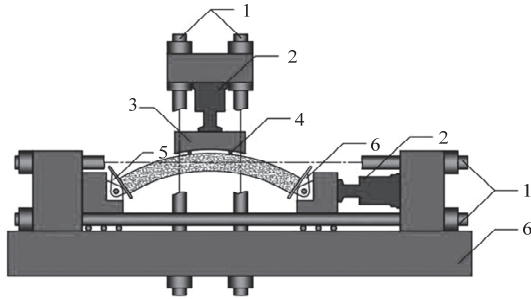
图 5 构件各部分对应的圆心角

Fig.5 Central angle of each part of the structure

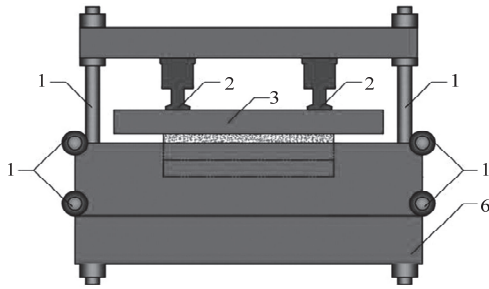
千斤顶将荷载依次传递至加载分配梁和压梁，并最终作用在结构上。试件左右两端均由转动铰支座支承，能够释放构件的转角自由度。

2.3 加载方法

由于加载系统受力对称，可取试件的半结构进行分析。图 7 为夹片构件在加载时的受力简图，其中， N_x 、 F 为试验时水平和竖向千斤顶施加的荷载； M 、 N 为试验构件的截面弯矩和轴力； W 为管片构件的自重； N_y 为竖向支座对管片构件的支承力。规



(a) 结构主视图



(b) 结构侧视图

1—反力架；2—千斤顶；3—加载分配梁；4—压梁；
5—支座；6—钢箱梁底座

图 6 局部原型结构加载试验系统

Fig.6 Local prototype loading test system

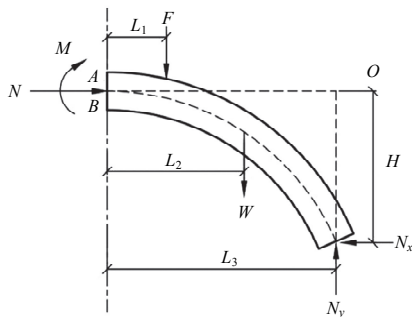


图 7 加载模式示意图

Fig.7 Diagram of loading mode

定轴力受压为正，使内弧面受拉的弯矩为正，对应正偏心距，反之为负。

鉴于加载试件为弧形结构，易知其轴力（或弯矩）同时受水平和竖向千斤顶推力的关联控制，仅对称轴处截面 AB 例外，该截面轴力由水平千斤顶单独控制，如图 7 所示。因而，选取中截面 AB 作为加载的控制截面，使其内力与实际工程相等，以便于试验时的调控操作。

因此，由水平方向受力平衡，可得控制截面轴力与千斤顶荷载的关系为：

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

由 O 点力矩平衡，可得控制截面弯矩与千斤顶

荷载的关系为：

$$M + N_x H - F(L_3 - L_1) - W(L_3 - L_2) = 0 \quad (2)$$

式中：H、L₁、L₂、L₃ 为力作用点的位置尺寸。

根据偏心距的定义 $e=M/N$ ，并将轴力条件用轴压比 λ 表示：

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

式中： f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值，本次取 $f_c=23.1\text{MPa}$ ；b、h 分别为截面的宽度和高度。

则竖向千斤顶荷载可表示为：

$$F = \frac{\lambda b h f_c (e + H) - W(L_3 - L_2)}{(L_3 - L_1)} \quad (4)$$

由此，只需确定控制截面的轴压比与偏心距，即可由式（1）和式（3）求得水平千斤顶所需施加的荷载，由式（4）求得竖向千斤顶的荷载。

2.4 试验工况

根据盾构隧道的实际埋置状况，控制截面在运营期可能承受的最不利偏心距为 0.2m，对应轴压比为 0.22，据此设计加载工况如下：

（1）第一阶段按等偏心距逐步加载至构件在运营期内可能承受的最不利荷载^[20]，轴压比每级增加 0.0032 直至 $\lambda=0.22$ 。具体为：交替施加水平和竖向千斤顶荷载，即首先保持竖向荷载不变施加水平荷载，每级增加 50kN，然后保持水平荷载不变施加对应竖向荷载，每级增量由式（4）求出，每两级加载后，控制截面保持 $e=0.2\text{m}$ 不变。

（2）第二阶段按等轴压比逐步加载至构件破坏。具体为：水平千斤顶保持 $\lambda=0.22$ 不变，竖向千斤顶每级增加 25kN，直至构件竖向位移曲线进入平台段，结构破坏，试验结束。

3 试验过程描述

3.1 结构内力与变形

随着加载级数的增加，水平和竖向千斤顶荷载及构件控制截面的内力变化如图 8 所示。可见，第一阶段加载时，随着千斤顶荷载的增大，构件控制截面的内力同步增大，截面轴力略小于水平千斤顶推力，存在一定的摩擦损耗，但第一阶段加载时，截面偏心距基本保持在 0.2m，达到试验的设计要求。第二阶段加载时，水平荷载保持不变，随着竖向荷载的增大，结构变形增大，截面弯矩和偏心距均迅速增大，截面轴力也有所增大，结构很快破坏，

试验结束。

另外，由于弧形构件的内力受水平和竖向千斤顶的联合控制，结构的内力换算相对较为复杂，如若后续试验能实现轴力、弯矩的分离控制，则可使加载过程更为方便，结构受力更为明确。

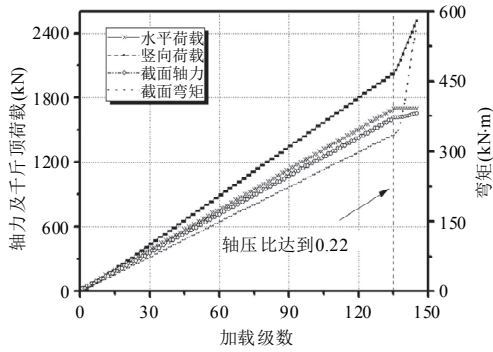


图 8 试验加载与结构内力

Fig.8 Test loading and structural internal force

从结构的整体变形（图 9）看，随着轴压比的增大，结构竖向位移逐渐增大，同一轴压比下，结构中部竖向位移较大，两侧较小。 $\lambda=0.22$ 时，结构中部竖向位移为 9mm，千斤顶加载侧（圆心角 124° ）为 3mm，水平固定支座侧（圆心角 56° ）为 2mm，可见， $\lambda \leq 0.22$ 时，千斤顶加载侧的竖向位移略大于水平固定支座侧。结构破坏时，中部竖向位移达到 21mm，两侧位移均为 4mm。并且，由于夹片构件在圆心角 79° 处两侧半环存在纵向接缝，致使该处结构刚度较小，竖向位移较右侧对称位置处（圆心角 101° ）更大。直至破坏，结构竖向位移逐渐趋于对称化，但始终在纵缝处略大。

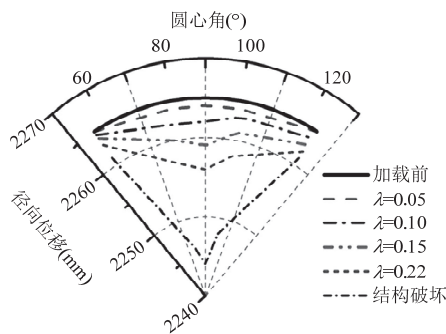


图 9 管片整体变形雷达图

Fig.9 Radar map of overall segmental deformation

测点 1 和测点 2 处，夹片结构直至破坏，纵缝张开量均较小。当 $\lambda=0.22$ 时，测点 1、测点 2 处的张开量分别为 0.46mm 和 0.32mm，结构破坏时分别为 1.87mm 和 1.75mm。

测点 3~测点 8 处，接缝错台量如图 10 所示。 $\lambda=0.22$ 时，测点 3~测点 8 的错台量分别为 0.83mm、0.61mm、0.56mm、0.35mm、0.28mm 和 0.27mm，破坏时分别为 5.16mm、4.91mm、4.53mm、4.27mm、2.21mm 和 2.02mm。可见，纵缝处（测点 3、测点 4）的错台量略大于环缝（测点 5~测点 8），环缝中部（测点 5、测点 6）的错台量略大于两侧（测点 7、测点 8）。

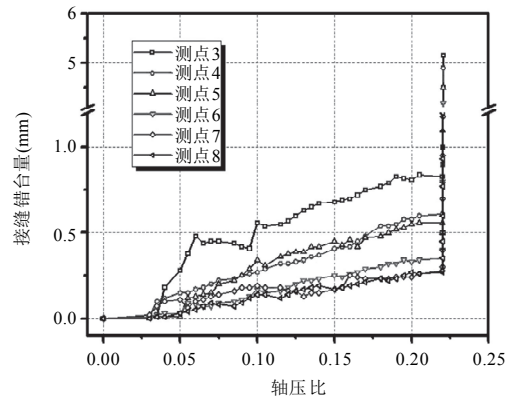


图 10 各测点的接缝错台量

Fig.10 Joint dislocation of each measuring point

由于结构破坏时，接缝错台量较大，建议类似工程在管片设计时，于接缝处增设凹凸榫，以提高接缝的抗剪性能，减小其错台量。

3.2 裂缝的产生与发展

试验过程中，管片结构内弧面裂缝的产生、发展以及最终形态如图 11 所示。当控制截面轴压比增至 0.09 时，结构出现第一批裂缝。其中，A2 块在靠近相邻环纵缝处（圆心角 83° ）出现主裂缝，宽度 0.1mm，长度 900mm；A1 块在圆心角 $91^\circ \sim 103^\circ$ 位置集中出现 7 条裂缝，宽度 0.1~0.2mm，长度 60~600mm。

当 $\lambda=0.14$ 时，结构主裂缝贯通整个 A2 块截面，宽度增至 0.4mm，并在平行主裂缝的方向上新增两条宽度均为 0.2mm 的贯通裂缝，以及数条宽度 0.1mm 的短裂缝。当 $\lambda=0.19$ 时，主裂缝宽度增至 1.6mm，A1 块的短裂缝相继贯通，宽度在 0.3~0.4mm 左右。当 $\lambda=0.22$ 时，主裂缝宽度增至 2.5mm，其余位置处，纵向裂缝数量显著增多，宽度 0.3~1.5mm 不等。

随后，轴压比保持 0.22 稳载，随着竖向力的增大，结构主裂缝宽度迅速增大，结构破坏时达到 5.5mm，而其余裂缝的宽度增加较小，增大幅度仅在 0.1mm 左右。

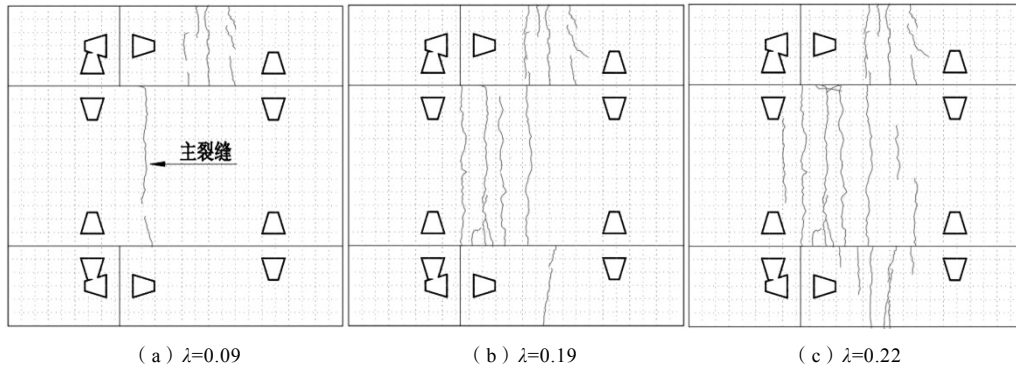


图 11 结构内弧面裂缝发展

Fig.11 Crack development in the structural intrados

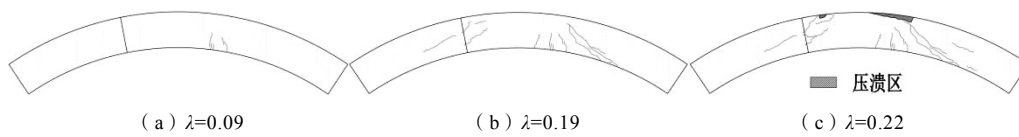


图 12 结构侧面裂缝发展

Fig.12 Crack development in the structural flank

从管片结构侧面裂缝的产生、发展过程(图 12)看,当 $\lambda=0.09$ 时,管片侧面在圆心角 97° 位置,从底部开始产生多条斜裂缝,长度为 $55\sim 105\text{mm}$,宽度均为 0.1mm 。当 $\lambda=0.14$ 时,在圆心角 91° 处新增一条斜裂缝,最大缝宽增至 0.15mm 。 $\lambda=0.19$ 时,圆心角 $67^\circ\sim 84^\circ$ 以及 $99^\circ\sim 111^\circ$ 位置新增数条斜裂缝,长度 $156\sim 450\text{mm}$,宽度 $0.2\sim 0.4\text{mm}$ 。 $\lambda=0.22$ 时,斜裂缝继续往竖向千斤顶方向发展,宽度增至 $0.7\sim 0.85\text{mm}$ 。随后,竖向千斤顶荷载持续增大,与压梁接触的混凝土压溃,斜裂缝发展至压溃区,贯通整个厚度方向,长度 560mm ,宽度增至 1.1mm ,结构破坏。

3.3 螺栓受力

夹片构件纵、环向螺栓初始预紧力均为 50MPa ,试验对螺栓中点处的轴力、弯矩进行了测试,其变化如图 13 所示。

可见,螺栓中点处轴力和弯矩均随轴压比的增加而减小,这是由于随着轴压比的增加,管片轴力逐渐增大,接缝混凝土受到挤压导致螺栓长度回缩,初始预紧力产生的效果被逐渐抵消。当 $\lambda \leq 0.09$ 时,内力减小幅度较大,当 $0.09 < \lambda < 0.22$ 时,减小幅度较小,并且纵向螺栓的内力始终稍大于环向螺栓。当 $\lambda \geq 0.22$ 时,水平千斤顶稳载,竖向千斤顶继续加载。此时,环向螺栓的内力有所增大,纵向螺栓的内力继续减小。直至结构破坏,纵、环向螺栓均未屈服。

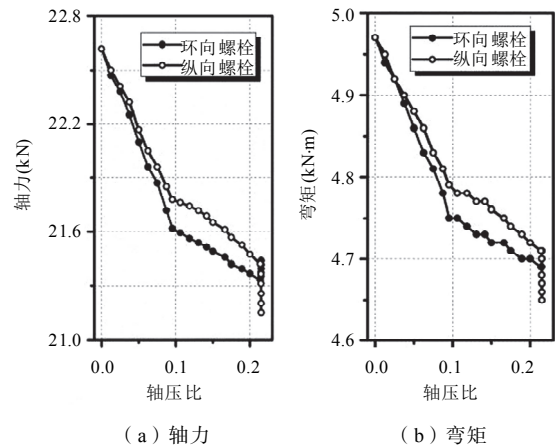


图 13 螺栓内力随轴压比的变化

Fig.13 Variation of bolt internal force with axial compression ratio

3.4 管片结构主应力分布

通过布置于结构表面的应变花,可获得各测点的主应力,结合测点的相应位置,绘制各工况下结构内、外弧面的主应力云图,选取 $\lambda=0.22$ 时的分布情况,如图 14 所示。

可见,结构主应力分布并不对称。内弧面最大主拉应力为 4.2MPa ,最大主压应力为 8.4MPa ,均出现在手孔附近,其中 B1 块手孔区域应力集中最为严重。外弧面主拉应力在千斤顶加载侧(右侧)最大,在结构中部最小,最大值为 2.5MPa 。主压应力在结构中部最大,在千斤顶加载侧最小,最大值为 31.7MPa 。

由于试件的纵、横向手孔在 B1 块有局部重合，因而该区域附近应力集中最为严重。建议今后在管片设计时，调整纵、横向螺栓手孔的距离，使其间隔均匀，以免出现严重的应力集中，影响结构的力学性能。

3.5 最终破坏形态

试验结束时，最终破坏形态如图 15 所示。在结构中部（圆心角 75°~105°），内弧面出现大量沿幅宽方向的纵向裂缝，其中，标准块 A2 上贯通裂缝 4 条（含主裂缝），长度 1200mm，最大缝宽 5.5mm，标准块 A1 上贯通裂缝各 2 条，长度 600mm，最大缝宽 1.6mm，邻接块 B1 上未见裂缝。外弧面与压梁接触的混凝土压溃，竖向位移持续增加至 21mm，最终破坏形态为压弯破坏。

在结构两侧（圆心角 56°~75°以及 105°~124°），构件从侧面底部产生大量斜裂缝，最终发展至外弧面混凝土压溃区，贯通整个厚度方向，斜裂缝最大长度 560mm，最大缝宽 1.1mm，破坏形态为压剪破坏。

在整个破坏过程中，结构竖向位移达到 21mm，纵缝张开量较小，仅有 1.87mm，错台量较大，为 5.16mm。螺栓受力不明显，并未屈服，纵向接头也未发生破坏。

另外，在结构即将破坏时，随着竖向千斤顶加载级数的增加，结构竖向位移增加较快，变形明显，可能出现试件整体从支座上滑落的情况，对试验人员造成危险。建议后续试验在转动铰支座上增加夹具，这样既能更好地固定试件，又不影响其应有的自由度。

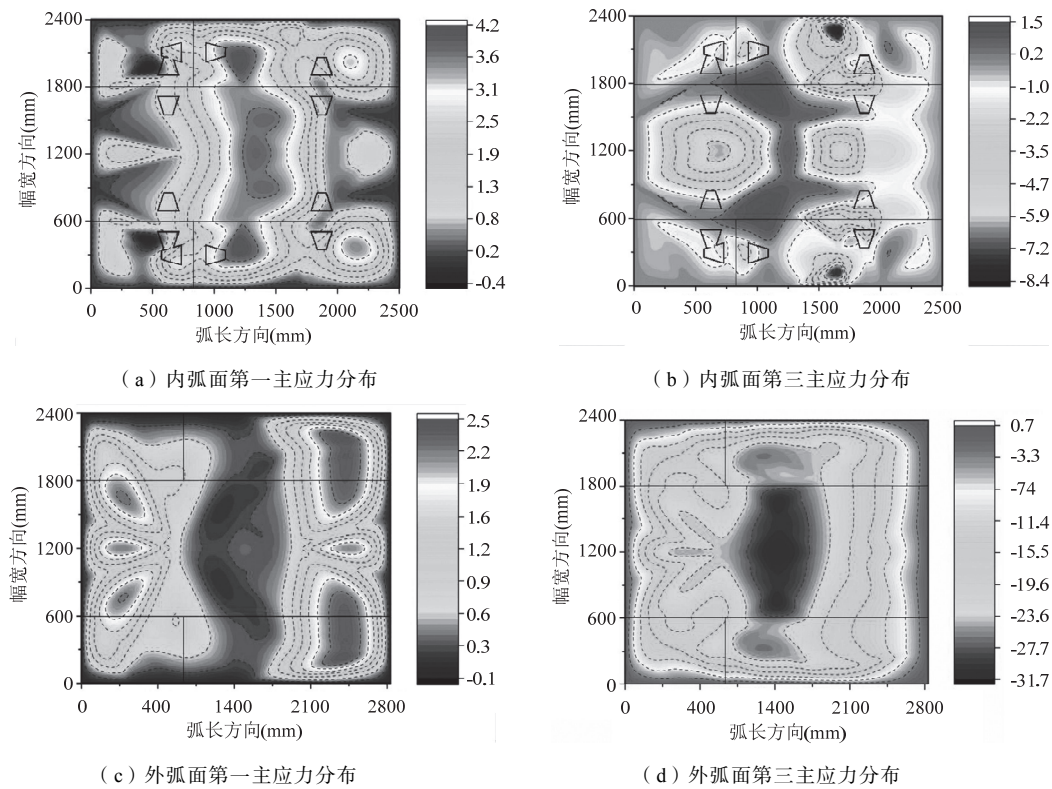
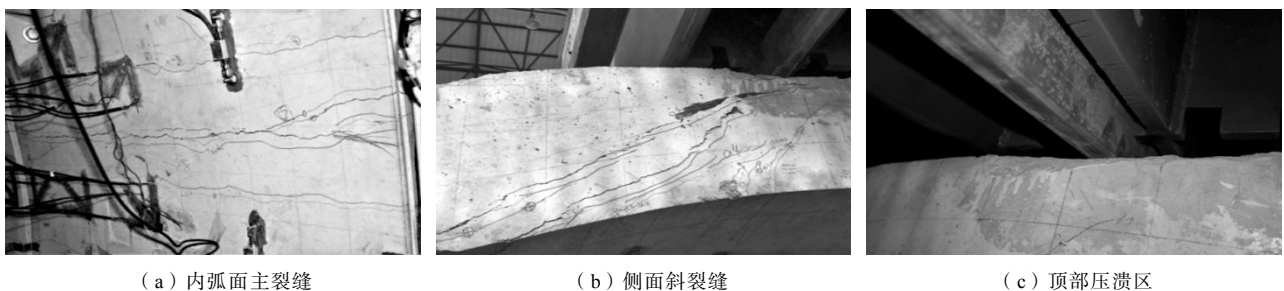


图 14 管片结构内、外弧面主应力分布（单位：MPa）

Fig.14 Distribution of principal stress of structural intrados and extrados (unit: MPa)



(a) 内弧面主裂缝

(b) 侧面斜裂缝

(c) 顶部压溃区

图 15 结构最终破坏形态

Fig.15 Structural ultimate failure

4 数值计算验证

采用有限元计算软件 ABAQUS 进行建模, 通过空间六面体单元 C3D8R 模拟混凝土管片和接缝螺栓, 通过三维杆单元 T3D2 模拟钢筋网, 实现钢筋混凝土的组合式建模 (Embedded Model), 即将钢筋和混凝土分开考虑, 但不计入二者之间的滑移, 模拟完全协调变形的无滑移粘结状态。通过接触单元模拟混凝土纵缝、环缝、混凝土与螺栓以及螺栓与螺母之间的接触, 由于接缝螺栓与孔壁之间间隙较大, 当接缝变形较小时, 二者不发生接触, 变形较大时接触单元才会产生作用。采用刚性单元模拟支座和压梁, 使得模型的受力方式与试验基本相同。材料的本构模型采用文献[21]中的推荐值 (图 16)。

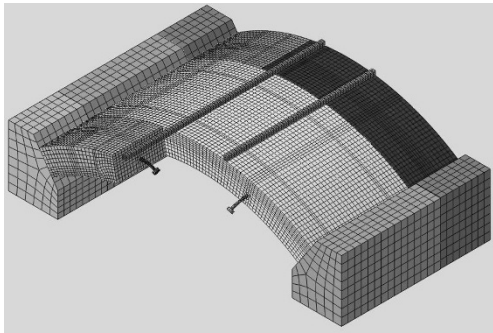


图 16 数值计算模型

Fig.16 Numerical calculation model

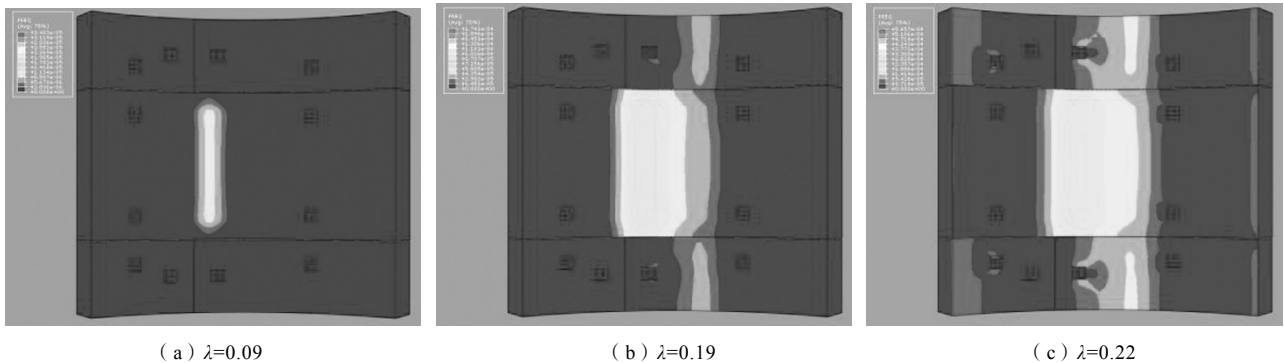


图 17 结构塑性区分布

Fig.17 Distribution of structural plastic zone

裂位置一致。 $\lambda=0.22$ 时, 塑性区范围扩大至手孔, 支座附近混凝土出现塑性, 对应试验现象为支座附近混凝土小范围剥落。可见, 数值计算时, 混凝土的破坏范围、裂缝的出现区域与试验现象基本一致, 裂缝发展略微滞后于试验, 破坏范围更具有对称性, 且略大于试验裂缝区域。

总体来说, 数值计算与试验结果的误差较小, 可对构件的受力和破坏特性进行相互印证, 两者结

数值计算的加载步骤与试验完全相同, 通过混凝土塑性区的范围变化模拟结构的开裂破坏过程, 表 1 为控制截面数值模拟与试验结果的对比, 图 17 为构件破坏过程中塑性区的发展情况。由表 1 可知: 试验内力小于数值计算值, 其中, 轴力相差较小, 在 5% 以内; 弯矩相差较大, 为 9.5% ~ 12.6%。试验位移大于数值计算值, 在结构正常受力时两者相差较小, 为 2.7%; 破坏时相差较大, 为 12.6%。

表 1 数值计算与试验结果对比表

Table 1 Comparison between numerical calculation and experimental results

工况	项目	试验结果	计算结果	误差
$\lambda=0.22$ $e=0.2m$	轴力(kN)	1615	1692	4.8%
	弯矩(kN·m)	335	367	9.5%
	竖向位移(mm)	9	8.76	2.7%
结构 破坏	轴力(kN)	1655	1695	2.4%
	弯矩(kN·m)	565	636	12.6%
	竖向位移(mm)	21	18.12	13.7%

由图 17 可知, $\lambda=0.09$ 时, A2 块在圆心角约 80° 位置首先出现塑性区, 与试验主裂缝位置一致, 但此时 A1 块并无塑性区出现。 $\lambda=0.19$ 时, A2 块塑性区往左右两边发展, 宽度略大于试验裂缝区域, A1 块在圆心角约 96° 位置开始出现塑性区, 与试验开

果均较为可靠。

5 破坏机理分析

试验过程中, 结构控制截面的竖向位移随竖向千斤顶荷载的变化情况如图 18 所示, 图中特征点 $P_1 \sim P_6$ 处裂缝的发展状态及其与结构受力、变形的关系见表 2。

可见, 第一批裂缝的产生 (对应图中 P_1 点) 对

结构刚度的影响较小, 荷载-位移曲线斜率并未因此发生较大变化; 但裂缝的产生对螺栓内力的影响较大, 其内力的减小幅度明显变小。

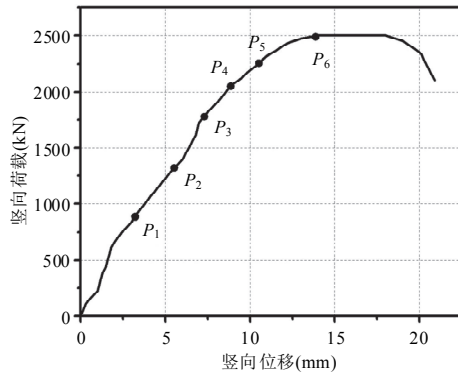


图 18 控制截面荷载-位移曲线

Fig.18 Load-displacement curve for control section

主裂缝贯通后 (P_2 点), 逐渐对结构刚度造成影响, 曲线斜率略微减小, 即结构刚度略微降低。但经过短暂的调整又很快恢复至之前的水平, 结构刚度大体保持不变。

构件两侧半环上裂缝的贯通 (P_3 点) 对结构刚度的影响依然较小。轴压比达到 0.22 后 (P_4 点), 曲线增长速率稍微减缓。外弧面混凝土开始压溃时 (P_5 点), 曲线斜率发生突变。当竖向荷载增至 2500kN 并保持不变后 (P_6 点), 控制截面竖向位移持续增大, 最终达到结构半径的 9.27‰。在此

阶段, 结构裂缝宽度, 接缝张开、错台量均出现阶跃式增长。

纵观整个破坏过程, 夹片构件中刚度最大的标准块 A2 首先开裂, 随后, 刚度其次的标准块 A1 开裂, 刚度最小的邻接块 B1 最后才出现斜裂缝。而结构纵缝张开量较小, 直至试验结束也未发生破坏。因而, 本次试验的破坏机理可归纳为: 结构刚度较大的区域受力和变形较大, 混凝土达到极限拉应变后首先开裂, 开裂区域刚度减小, 导致结构整体刚度快速调整和重分布, 而后刚度较大的区域继续开裂, 如此循环, 直到结构刚度减小至一定水平, 在外荷载保持不变的情况下, 变形持续增大, 达到承载极限, 结构破坏。

由于试验时接缝并未发生破坏, 遂将结构裂缝宽度、接缝错台量以及控制截面竖向位移作为结构安全的评价指标。具体来说, 根据本工程盾构隧道的实际情况, 荷载-位移曲线在达到 P_5 点时, 已然出现混凝土压溃的现象, 且 P_5 点与最终破坏点 P_6 十分接近, 结构也很快随之破坏。因此, 偏于安全的选择 P_5 点的各项指标作为本工程结构安全的评价标准。具体为: 裂缝最大宽度 3.1mm, 接缝最大错台量 1.96mm, 控制截面竖向位移为结构半径的 5.83‰。在盾构施工、工程环境变化或其他意外情况发生时, 如果隧道结构变形达到三者之中任一指标, 则应立即采取相应措施防止结构发生破坏。

表 2 裂缝发展与结构受力、变形的关系

Table 2 Relationships between crack development with structural internal force and deformation

特征点	轴压比	裂缝发展状态	最大裂缝宽度	最大裂缝长度	控制截面竖向	竖向位移/结构计算	接缝最大张	接缝最大错	偏心距
			(mm)	(mm)	位移(mm)	半径(‰)	开量(mm)	台量(mm)	(m)
P_1	0.09	第一批裂缝(含主裂缝)产生	0.2	900	2.6	1.15	0.14	0.42	0.2
P_2	0.14	主裂缝贯通, 并产生新的贯通裂缝	0.4	1200	5.4	2.38	0.25	0.67	0.2
P_3	0.19	构件两侧半环上的裂缝贯通	1.6	1200	7.7	3.40	0.40	0.83	0.2
P_4	0.22	裂缝数量显著增多	2.5	1200	9.0	3.97	0.48	0.85	0.2
P_5	0.22	外弧面混凝土开始压溃	3.1	1200	13.2	5.83	0.91	1.96	0.26
P_6	0.22	结构达到承载极限状态	5.5	1200	21.0	9.27	1.87	5.16	0.33

6 结论

结合实际工程, 采用局部原型试验与数值计算相结合的手段, 开展考虑前后环错缝拼装组合的原型管片局部构件破坏试验, 得出如下有益结论:

(1) 结构初始开裂时, 控制截面轴压比为 0.09, 偏心距为 0.2m, 竖向位移为半径的 1.15‰。初始裂

缝出现在中间环内弧面靠近两侧环接缝位置, 并成为最终破坏的主裂缝。

(2) 结构破坏时, 控制截面轴压比为 0.22, 偏心距为 0.33m, 竖向位移为半径的 9.27‰。破坏形态为: 在结构中部, 内弧面出现 4 条贯通裂缝, 主裂缝宽 5.5mm, 外弧面混凝土压溃, 形成压弯破坏。在结构两侧, 斜裂缝贯通整个厚度方向, 最大缝宽 1.1mm, 形成压剪破坏。接缝张开量较小, 为

1.87mm, 错台量较大, 为 5.16mm。

(3) 结构外弧面在千斤顶加载侧主拉应力较大, 在结构中主压应力较大, 内弧面手孔附近应力集中较为严重。螺栓均未发生屈服, 受初始预紧力的影响, 随着轴压比的增加, 纵向螺栓内力减小, 环向螺栓内力先减小后增大。

(4) 在恒定轴压比、增大偏心距的加载模式下, 夹片构件的破坏机理可归纳为: 结构刚度较大的区域首先开裂, 开裂后该区域刚度减小, 导致整体刚度重分布, 而后刚度较大的区域继续开裂, 直到整体结构刚度减小至一定水平, 在外荷载保持不变的情况下, 变形持续增大, 达到承载极限, 结构破坏。

(5) 可将裂缝宽度、接缝错台量以及控制截面竖向位移作为结构安全的评价指标。本工程中具体为: ①裂缝宽度达到 3.1mm; ②接缝错台量达到 1.96mm; ③控制截面竖向位移达到结构半径的 5.83‰。

参考文献

- [1] 何川, 封坤. 大型水下盾构隧道结构研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 1-11 (He Chuan, Feng Kun. Review and prospect of structure research of underwater shield tunnel with large cross-section [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 1-11 (in Chinese))
- [2] (日)土木学会. 盾构隧道管片设计: 从允许应力设计法到极限状态设计法[M]. 官林星译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012 (JSCE. Shield tunnel segment design: from the allowable stress design method to the limit state design method [M]. Translated by Guan Linxing. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese))
- [3] 何川, 封坤, 晏启祥, 等. 水下盾构法铁路隧道管片衬砌结构的原型加载试验研究[J]. 中国工程科学, 2012, 14(10): 65-72 (He Chuan, Feng Kun, Yan Qixiang, et al. Prototype test study on mechanical characteristics of segmental lining structure of underwater railway shield tunnel [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(10): 65-72 (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 夏松林. 狮子洋隧道通缝式拼装管片衬砌结构的原型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010 (Xia Songlin. Proto-type test of lining structure of segment rings with straight joints for Shiziyang tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010 (in Chinese))
- [6] 邹育麟. 狮子洋水下盾构隧道错缝式拼装管片衬砌结构的原型试验[D]. 成都: 西南交通大学, 2010 (Zou Yulin. Proto-type test of lining structure of segment rings with staggered joints for Shiziyang underwater shield tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010 (in Chinese))
- [7] 鲁亮, 孙越峰, 柳献, 等. 地铁盾构隧道足尺整环结构极限承载能力试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(6): 134-139 (Lu Liang, Sun Yuefeng, Liu Xian, et al. Full-ring experimental study on the ultimate bearing capacity of the lining structure of the metro shield tunnel [J]. Structural Engineers, 2012, 28(6): 134-139 (in Chinese))
- [8] 毕湘利, 柳献, 王秀志, 等. 通缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 117-127 (Bi Xiangli, Liu Xian, Wang Xiuzhi, et al. Experimental investigation on the ultimate bearing capacity of continuous-jointed segmental tunnel linings [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 117-127 (in Chinese))
- [9] 毕湘利, 柳献, 王秀志, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 128-137 (Bi Xiangli, Liu Xian, Wang Xiuzhi, et al. Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 128-137 (in Chinese))
- [10] 柳献, 张浩立, 唐敏, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究-半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131-137 (Liu Xian, Zhang Haoli, Tang Min, et al. Experimental study of the ultimate bearing capacity of a shield tunnel reinforced by a semi-ring steel plate[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 131-137 (in Chinese))
- [11] 柳献, 唐敏, 鲁亮, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究-整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2300-2306 (Liu Xian, Tang Min, Lu Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2300-2306 (in Chinese))
- [12] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(7): 52-57 (Liu Xian, Zhang Lele, Li Gang, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of shield tunnel composite cavity reinforcement[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(7): 52-57 (in Chinese))
- [13] 叶宇航, 黄德中, 李刚, 等. 类矩形盾构隧道衬砌结构极限承载力足尺试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016(s1): 124-133 (Ye Yuhang, Huang Dezhong, Li Gang, et al. Full-scale experimental study on the ultimate bearing capacity of quasi-rectangular shield tunnel lining [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016(s1): 124-133 (in Chinese))
- [14] Jorg Schreyer, Dieter Winselman. Suitability tests for the lining for the 4th Elbe Tunnel Tube-Results of large-scale tests [J]. Tunnel, 2000(1): 34-44

- [15] 兰学平, 鲁亮, 刘利惠. 超大隧道衬砌管片接头力学性能试验研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(5): 114-118
Lan Xueping, Lu Liang, Liu Lihui. Experimental study on mechanical properties for segment joints of super tunnel lining [J]. Structural Engineers, 2009, 25(5): 114-118 (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 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): 1385-1390 (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, 33(9): 1385-1390 (in Chinese))
- [18] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991 (Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Shield tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991 (in Chinese))
- [19] 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 (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 (in Chinese))
- [20] 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 (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 (in Chinese))
- [21] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015 (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese))

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

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。

何 川 (1964—), 男, 博士, 教授。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。

苏 昂 (1992—), 男, 硕士研究生。主要从事隧道及地下结构体系理论方面的研究。

梁 坤 (1993—), 男, 硕士研究生。主要从事盾构隧道管片力学行为方面的研究。