

DOI: 10.11779/CJGE201911008

# 水压作用对通缝拼装管片结构力学性能的影响研究

梁 坤<sup>1</sup>, 封 坤<sup>\*1</sup>, 肖明清<sup>2,3</sup>, 何 川<sup>1</sup>, 谢 俊<sup>2,3</sup>, 方若全<sup>1</sup>

(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. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430071;  
3. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 以苏通 GIL 综合管廊工程为背景开展了通缝拼装方式下的原型试验, 从水压对管片环的受力、形变及抗裂性方面着手, 对通缝拼装条件下水压力对管片结构力学性能影响进行了研究。试验结果表明: ①通缝拼装管片结构在拱顶位置出现较大的位移, 水压力的增大对管片结构拱顶形变和整体椭圆变形的控制有良好的效果, 但管片最大单点位移相比椭圆度更易达到限值; ②通缝拼装管片结构建议取单点最大形变率 2%~2.5%作为形变控制标准; ③在高水压作用下通缝拼装管片结构的纵缝张开主要发生在封顶块附近, 由于该处纵缝密集、结构刚度最小、变形最大所致, 水压力的增大对该处纵缝张开有明显的限制作用, 且可减小相应连接螺栓的受力; ④水压力的增大会较大幅度地提升管片的抗裂性能, 并减小管片主筋的拉应力, 但也会使主筋的压应力和箍筋应力有较大幅度的升高; ⑤水压力的升高在一定程度上提高了管片结构的受力性能, 但高水压使管片结构处于高轴压受力状态, 易发生纵缝处的压剪破坏, 该破坏具突发性。研究成果对水下盾构隧道的设计具有重要的指导意义。

**关键词:** 盾构隧道; 水压作用; 通缝拼装; 原型试验; 受力性能

中图分类号: TU43; U455 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)11-2037-09

作者简介: 梁 坤(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为盾构隧道结构设计理论研究。E-mail:  
[kunliang556324@outlook.com](mailto:kunliang556324@outlook.com)

## Water-pressure action on structural behaviors of straight assembling segmental linings of underwater shield tunnels

LIANG Kun<sup>1</sup>, FENG Kun<sup>1</sup>, XIAO Ming-qing<sup>2,3</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>2,3</sup>, FANG Ruo-quan<sup>1</sup>

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

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430071, China; 3. National & Local Joint Engineering Research

Center of Underwater Tunnel Technology, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** For Suzhou-Nantong GIL power gallery tunnel, the prototype tests using the straight assembling segmental lining method are carried out. From the aspect of water pressures on the force, deformation and crack resistance of the segmental structure, the influences of water pressures on the mechanical properties of the segmental structure under the straight joint assembling condition are studied. The results show that: (1) The straight assembling segmental lining has a large displacement at the position of dome, and increasing the water pressures can effectively control the dome deformation and the overall elliptical deformation of the segmental structure. However, the maximum single point displacement of the segment is easier to reach the limit than the ellipticity. (2) It is recommended to take the single-point maximum deformation rate of 2%~2.5% as the deformation control standard. (3) Under the effects of high water pressures, the joint opening of the segmental structure mainly occurs near the K-block, which is caused by dense joints, the minimum structural rigidity and the maximum deformation. The increase in the water pressures has a significant limiting effect on the longitudinal joint opening, and can reduce the force of the corresponding connecting bolts. (4) Increasing the water pressures will greatly improve the crack resistance of the segmental structure and reduce the tensile stress of the main reinforcement of the segmental structure, but it will also increase its compressive stress and hoop stress. (5) The increase in the water pressures improves the mechanical properties of the segment structure to a certain extent. However, the high water pressures cause the segmental structure to be in a state of high axial compression, which is prone to crushing and shearing at the joint and the damage is sudden. The research results have important guiding significance for the design of underwater shield tunnels.

**Key words:** shield tunnel; water-pressure action; straight

assembling; prototype test; force performance

基金项目: 国家电网公司科技项目(SHJJGC1700023)

收稿日期: 2019-03-11

\*通讯作者(E-mail: [windfeng813@163.com](mailto:windfeng813@163.com))

## 0 引言

盾构工法具有安全、适应性强的优点，在世界范围内快速发展，尤其在中国城市地铁、跨江越海通道工程中得到了大量应用<sup>[1]</sup>。目前，盾构隧道可采用的管片环拼装方式主要有通缝拼装和错缝拼装 2 种方式，通缝拼装由于能较大幅度降低结构内力、节省钢筋用量而在欧洲与中国软土地层得到广泛使用<sup>[2]</sup>。

通常认为，通缝拼装管片结构具有变形大、内力小等特征，然而对于水下盾构隧道，在水压作用下结构变形被有效控制，此时通缝拼装管片结构的变形与受力性能如何有待探明。

目前，针对水压对管片结构的影响的研究还比较少，谢红强等<sup>[3]</sup>，针对重庆主城排水过江盾构隧道工程，进行了水压力的现场跟踪测试，得到了施工期外水压力的分布；周济民<sup>[4]</sup>通过现场实测，得到了水下盾构隧道的水压分布规律；封坤<sup>[5]</sup>、张建刚等<sup>[6]</sup>依托南京长江隧道工程，采用模型试验方法，对不同水压力下管片结构的受力形变特点进行了分析；唐长东<sup>[7]</sup>、周济民等<sup>[8]</sup>、彭博<sup>[9]</sup>利用数值模型方法对水压力变化时管片衬砌结构力学特征进行了研究；黄清飞等<sup>[10]</sup>以日本修正惯用法为基础，理论推导了不同水压条件下管片内力计算方法；曾东洋等<sup>[11]</sup>针对不同水压荷载下管片衬砌结构的内力计算方法进行了比较；王士民等<sup>[12]</sup>以广深港客运专线狮子洋盾构隧道工程，采用模型试验方法对 3 种不同水压条件下管片衬砌内力形变等方面进行了探讨。由上述分析可知水压变化对管片衬砌力学性能的研究主要采用数值模拟、模型试验和理论推导的方法，而由于大断面水下盾构隧道受力复杂，这些方法并不能真实地反映隧道结构的受力特征。而在原型试验方面，文献[13~16]分别就不同工程背景和荷载工况进行了原型试验研究，但研究多集中在管片结构的承载能力和破坏过程方面，通缝拼装方式下水压力变化和高水压作用对管片受力性能影响的研究较少。

鉴于此，本文依托苏通 GIL 综合管廊工程针对水压作用下通缝拼装管片结构的变形与受力特征开展了原型试验，特别对高水压状态下通缝拼装管片结构的力学性能进行了分析，探明了水压变化对盾构隧道管片衬砌结构力学性能的影响。

## 1 工程概况

苏通 GIL 综合管廊工程起于南岸（苏州）引接站，止于北岸（南通）引接站，是淮南—南京—上海 1000 千伏交流特高压输变电工程的关键单体工程，工程位

于长江下游三角洲前缘地带，在苏通大桥上游 1 km 处穿越长江，工程隧道内径 10.5 m，外径 11.6 m。盾构段总长度约 5466.5 m，主要穿越第四纪淤泥质黏土、粉土、砂层等软弱覆盖层，隧道底面最低点标高 -74.83 m，最高水压力达 0.8 MPa，隧道顶板埋深介于 20.4~47.8 m，含水层较厚，渗透性强，其纵断面示意图如图 1 所示。

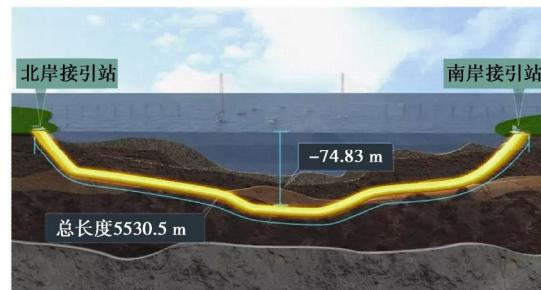


图 1 苏通 GIL 综合管廊工程纵断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal section of Suzhou-Nantong GIL integrated pipe gallery project

隧道结构采用单层装配式钢筋混凝土通用管片环，外直径为 11600 mm，内直径为 10500 mm，管片厚度 550 mm，幅宽 2000 mm，混凝土强度为 C60。衬砌结构采用“5+2+1”的分块方式，即 5 个标准块 B1, B2, B3, B4, B5（圆心角 49.0909°），2 个邻接块 L1, L2（圆心角 49.0909°）以及 1 个封顶块 F（圆心角 16.3637°）组成。单环布置 24 颗 M10.9 级的环向螺栓，22 颗 M10.9 级的纵向螺栓，内部钢筋采用 HRB400，衬砌结构如图 2 所示。

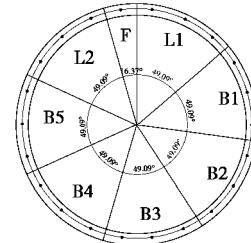


图 2 苏通 GIL 综合管廊工程管片分块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of segment division of Suzhou-Nantong GIL integrated pipe gallery project

## 2 试验概况

### 2.1 试验装置

根据苏通 GIL 隧道结构特征和荷载条件，对隧道结构在通缝拼装条件下进行加载，该装置可以将水压与土压分离加载<sup>[17]</sup>。该装置对拉梁为管片环原型试验提供径向对拉力以对结构导入弯矩内力，环箍梁提供环向环箍力以导入轴力模拟水压。试验加载实况如图 3 所示。



图 3 原型试验加载实况图

Fig. 3 Sketch of assembling segmental lining structure tests for Suzhou-Nantong GIL integrated pipe gallery project

## 2.2 试验管片布置方案

通缝拼装管片在施工过程中由于便于拼装, 封顶块位置大多位于拱顶附近, 因此, 本次试验选取封顶块位于拱顶的典型工况进行试验, 管片的布置方案如图 4 所示。

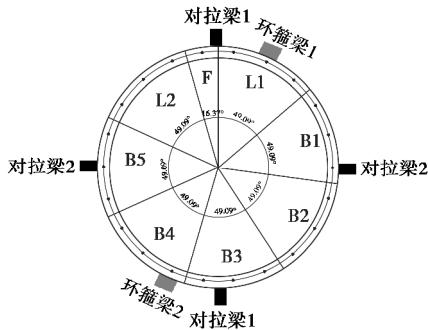


图 4 试验管片布置图

Fig. 4 Layout of test segments

试验管片纵缝位置角度如图 5 所示。为了方便表达, 这里通过角度来表达各纵缝位置, 以拱顶为  $0^\circ$  位置, 以顺时针方向为正方向 (下同)。

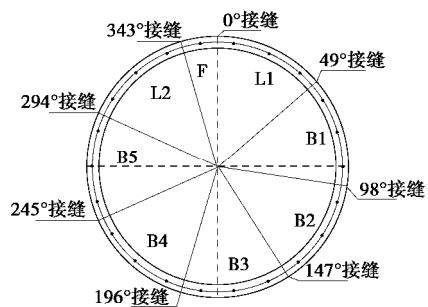


图 5 纵缝位置示意图

Fig. 5 Layout of longitudinal joints

## 2.3 量测系统

试验量测内容包括: 衬砌结构内力、内部混凝土应变、管片径向位移、管片纵缝张开量、螺栓应力等。

(1) 管片衬砌结构内力。管片环衬砌结构内力采用胶基电阻应变片量测, 单块管片沿幅宽方向布置 5 排, 沿管片环方向布置 3 列应力测点, 应力测点在管片内外部对应布置, 根据内外表面的应变情况计算出

衬砌结构内力。局部应力测点布置情况如图 6 所示。

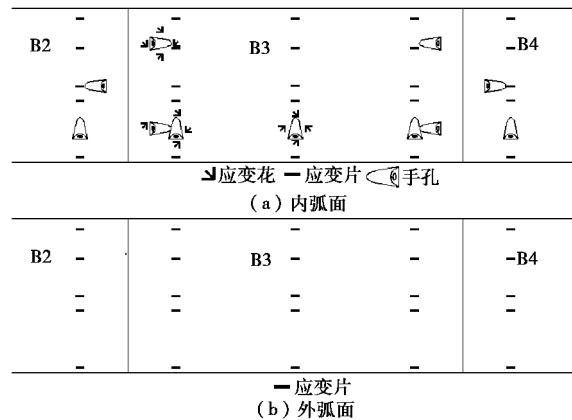


图 6 混凝土应变测点布置图

Fig. 6 Layout of concrete strain measuring points

(2) 管片径向位移。管片径向位移利用精度为  $0.01\text{ mm}$  的差动式位移计进行量测, 沿管片环共布置 16 个测点, 其中 12 个位于管片外表面, 4 个位于管片内表面。外侧的 12 个测点间隔  $30^\circ$  布置, 内侧 4 个测点布置分别布置在拱顶、右拱腰、拱底及左拱腰的内侧。管片径向位移测点布置情况如图 7 所示。

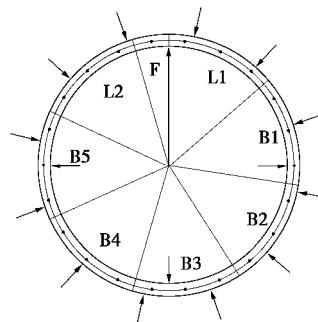


图 7 将管片径向位移测点布置图

Fig. 7 Layout of segmental radial displacement measuring points

(3) 管片纵缝张开量。管片纵缝张开量采用钢弦式位移测缝计进行量测, 在管片环的 8 个纵缝的内外弧面均布置 2 个测缝计, 测点的布置情况如图 8 所示。

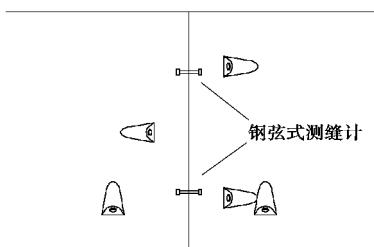


图 8 管片纵缝张开量测点布置图

Fig. 8 Layout of longitudinal joint opening measuring points of segmental structure

(4) 螺栓应力。螺栓应力通过预先布置的胶基电阻应变片进行量测, 在连接管片纵缝的 24 颗环向螺栓

上均对称布置应变花。测点布置情况如 9 所示。



图 9 螺栓应变测点布置示意图

Fig. 9 Layout of bolt strain measuring points

(5) 管片内部钢筋应变。管片内部钢筋应变的测试主要包括主筋应变和箍筋应变。主要通过预埋的胶基电阻应变片进行量测，在各块管片内部布置测点，测点的布置情况如图 10 所示。

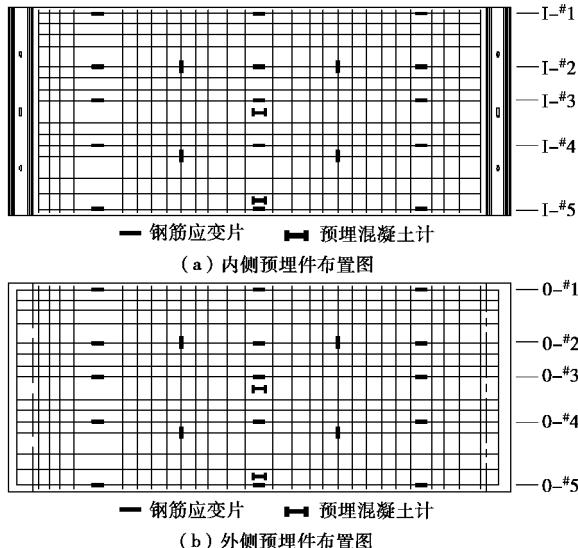


图 10 内部预埋件布置图

Fig. 10 Layout of internal embedded parts

## 2.4 加载方案

试验采用环箍力来模拟水压，为了方便表达，将环箍力记为  $P_1$ ，主对拉力（主对拉梁方向）记为  $P_2$ ，副对拉力（副对拉梁方向）记为  $P_3$ 。常规加载条件下加载最大水压达 80 m，破坏加载则保持水压 60 m 逐级增大对拉力至结构破坏。加载方式如图 11 所示。

具体加载方法如下：

(1) 施加水压  $P_1$ 。由 0 kN 开始分级加载至达到 80 m 水头所对应的水头压力 ( $P_3=9184.8$  kN)，加载过程中每级荷载之间间隔时间为 10 min。

(2) 施加对拉力。保持  $P_1$  不变， $P_2$  和  $P_3$  同时逐级增大，每级之间间隔 10 min。根据地质条件将侧压力系数取为 0.55，并保持不变。加载过程中保持

$P_3=0.55P_2$ ，逐级加载至预期荷载。

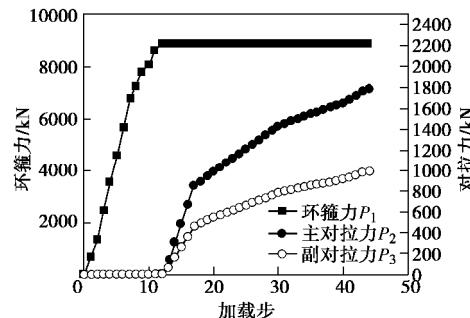


图 11 80 m 水压时的加载图

Fig. 11 Loading diagram at water pressure of 80 m

## 3 试验结果分析

### 3.1 水压力对管片形变和受力的影响

在保持对拉力  $P_2$  和  $P_3$  不变 ( $P_2=1344$  kN,  $P_3=739$  kN)、水压分别为 40, 60, 80 m 的条件下，通缝拼装管片结构的整体形变如图 12 所示，可见，高水压通缝拼装管片结构在受力过程中，管片的拱顶拱底向管片内部移动，左右拱腰位置向管片外部移动，整体呈现不规则的“椭圆形”形变。且拱顶处位移比其他位置更大，随着水压力的不断增大，管片的整体位移逐渐减小，特别是在拱顶位置，拱顶处的位移有明显的降低。

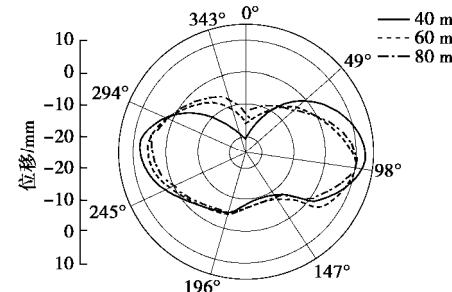


图 12 管片整体变形图

Fig. 12 Overall deformation of segmental structure

通常情况下，盾构隧道受荷载作用后发生如图 13 所示的近似椭圆变形，椭圆度是衡量盾构隧道管片结构整体变形的重要指标，根据《盾构隧道施工与验收规范 GB 50466—2017》<sup>[18]</sup>要求，盾构隧道椭圆度允许偏差为  $\pm 0.6\%D_0$  ( $D_0$  为隧道直径)。椭圆度的计算公式为

$$d = 2 \times (l_a - l_b) , \quad (1)$$

式中， $l_a$  为椭圆的长半轴， $l_b$  为椭圆的短半轴。

3 种水压条件下通缝拼装管片结构的椭圆度变化情况如图 14 所示，可见，通缝拼装管片结构的椭圆度变化情况可以分为线性变化和非线性变化两个阶段，随着水压的增大，线性变化的过程增长，这 3 种水压

条件下管片的椭圆度达到 6% 时的对拉力分别为 1220.6, 1438.2, 1814.7 kN, 相比 40 m 水压, 60 m 和 80 m 水压力下, 通缝拼装管片结构的容许荷载分别提升了 17.8% 和 26.2%。故水压增大能够显著地提高通缝拼装管片结构的容许荷载。

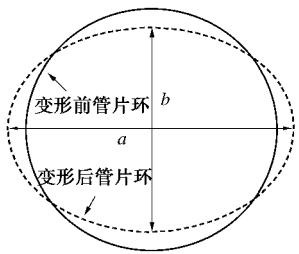


图 13 隧道整体形变简化图

Fig. 13 Simplified view of overall deformation of tunnel

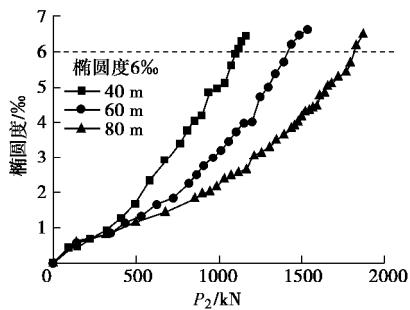


图 14 管片结构椭圆度变化图

Fig. 14 Diagram of change of segmental structure ellipticity

直径变化率同样是控制管片形变的重要指标, 一般采用隧道外直径的 4% 作为管片结构运营期正常服役阶段直径变化率的限值<sup>[19]</sup>, 而由前文可知, 通缝拼装管片结构单点位移差异明显, 拱顶位移明显大于其他位置, 因此, 采用直径变化率作为形变控制标准已不再适用, 这里选取直径变化率限值的 50% 作为单点位移量限值(即直径的 2%), 以此作为管片形变控制指标。

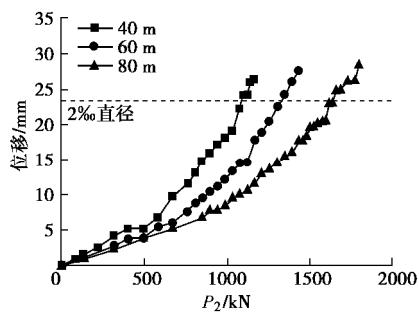


图 15 管片结构单点最大位移变化图

Fig. 15 Change of single-point maximum displacement

管片结构的最大单点位移变化情况如图 15, 由图

可知, 水压越大管片结构的最大单点位移越小, 且当最大单点位移达到管片结构直径的 2% 时, 3 种水压条件下的对拉力  $P_2$  量值分别为 1075.7, 1344.5, 1635.2 kN。若采用单点位移作为控制标准, 则容许荷载可分别提高 25% 和 21.5%。

各水压作用下管片椭圆度达到 6% 时和单点最大形变达到直径的 2% 时管片的弯矩如图 16 所示, 图中实线和虚线分别代表椭圆度达到 6% 和单点直径变化率达到 2% 时管片受到的弯矩。可见, 通缝拼装管片在拱底 (180°) 附近产生最大正弯矩, 在左右拱腰附近 (45° 和 300°) 出现较大负弯矩。水压的升高对管片弯矩的大小和分布影响不大。在各水压条件下以椭圆度达到 6% 作为位移限值时, 管片结构所受到的弯矩明显大于以单点位移变化率 2% 时的弯矩; 当达到椭圆度 6%, 各水压条件下的最大弯矩分别为 972.8, 1172.5, 1435.7 kN·m, 而当达到位移变化率 2% 时, 管片的最大弯矩分别为 782.3, 1119.9, 1306.8 kN·m。根据试验中管片的裂纹观测情况, 这些受力工况下管片拱底的内弧面均有微裂纹产生, 且裂纹宽度在 0.1 mm 左右。

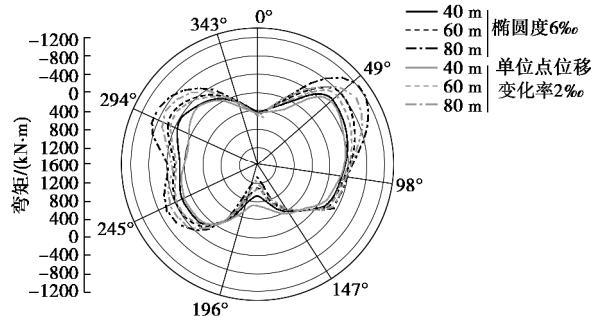


图 16 管片结构达到位移限值时的弯矩图

Fig. 16 Moments under limit displacement of segmental structure

分析可知, 通缝拼装管片随着水压力的升高, 管片的整体位移和单点位移均有较大幅度的降低, 但在拱顶位置管片结构管片的单点形变相对于椭圆度更容易达到限值。在破坏试验中, 管片结构最终破坏时的椭圆度和单点最大形变率分别为 8.8% 和 16.3%, 可知拱顶的单点最大形变对椭圆度的贡献度超过 50%, 因此, 结合前文分析通缝拼装管片结构建议采用单点最大形变率 2%~2.5% 作为管片形变的控制指标。

各水压条件下当管片椭圆度达到 6% 的轴力分布(单点位移达到 2% 时基本相同)如图 17 所示, 由图可知, 3 种水压下管片都在拱底附近有较高的轴力, 且截面轴压比分别达到 0.16, 0.24, 0.33。因此, 水压的增大会带来轴力的大幅度增加, 使管片处于高轴压的受力状态。

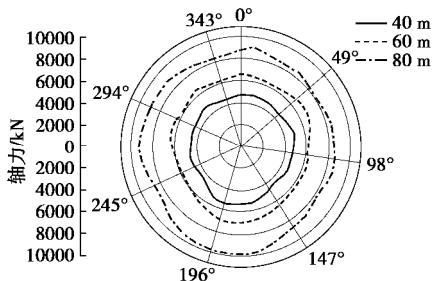


图 17 管片达到位移限值时的轴力图

Fig. 17 Axial forces under limit displacement of segments

### 3.2 水压力对管片纵缝张开及螺栓受力的影响

不同水压条件下管片的纵缝张开情况如图 18、19 所示, 由图可知, 管片外弧面纵缝明显张开的纵缝有  $49^\circ$  和  $245^\circ$  纵缝, 管片内弧面纵缝明显张开的纵缝有  $0^\circ$  和  $196^\circ$  纵缝, 而其他纵缝则张开不明显或处于压合状态。

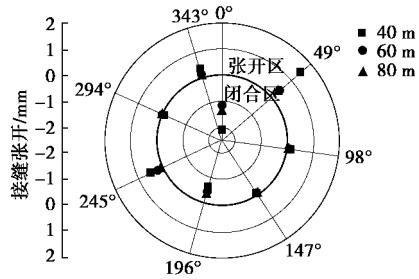


图 18 外侧纵缝张开情况

Fig. 18 Opening situation of outer longitudinal joints

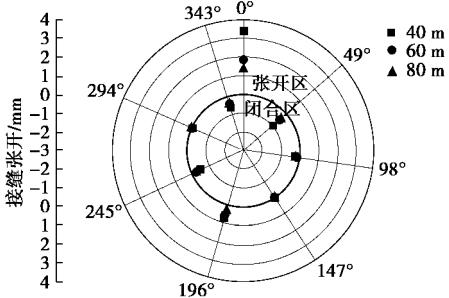


图 19 内侧纵缝张开情况

Fig. 19 Opening situation of inner longitudinal joints

可见, 水压的变化仅会影响纵缝的张开或压合程度, 而对纵缝的张开的分布影响不大。而由于通缝拼装管片结构在拱顶封顶块位置纵缝数量较多, 存在较大的刚度削弱, 导致该位置区域纵缝会产生明显的张开变形。而  $49^\circ$  纵缝外侧纵缝出现明显张开则因该处受到的弯矩较大并受到  $0^\circ$  纵缝内侧张开变形的连带影响。

管片结构  $0^\circ$  纵缝内弧面出现了最大张开量值, 取该位置分析水压对管片纵缝张开量的影响, 如图 20 所示, 可知各水压条件下纵缝最大张开量随对拉力的增大呈非线性变化, 在相同对拉力作用下, 水压越大

管片环的最大张开量越小。根据文献[20], 盾构隧道管片接缝最大张开量在施工阶段受力后限值为 3 mm。本次试验中, 当最大纵缝张开量达到限定的 3 mm 警戒值时, 对拉力  $P_2$  分别为 1098.6, 1389.4, 1613.5 kN。可见, 相同条件下水压力的升高会较大幅度减小管片的最大张开量, 从而提高通缝拼装管片结构的容许荷载。

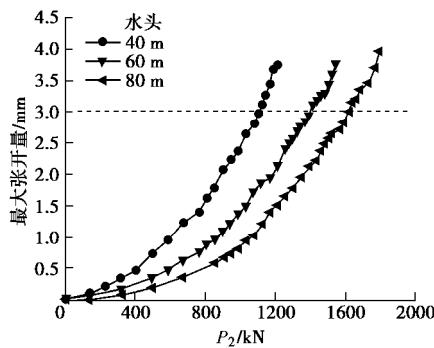


图 20 最大纵缝张开量变化图

Fig. 20 Change of maximum opening of longitudinal joints

螺栓受力和纵缝张开量之间有紧密联系, 由上文可知管片在  $0^\circ$  纵缝内弧面张开量最大, 因此, 取该处的连接螺栓进行分析。得到的不同水压条件下螺栓受力的变化如图 21 所示。由图 21 可知, 当水压一定时, 土压较小时螺栓受力很小, 且变化率很小。当对拉力继续增大时螺栓受力迅速增长。对拉力一定时, 水压越大螺栓所受的压力越小。分析可知, 当水压较大时, 管片纵缝难以发生张开变形, 所以相同对拉力作用下水压越大纵缝张开量越小, 螺栓应力越小, 可见水压的升高能够有效地减小螺栓受力。

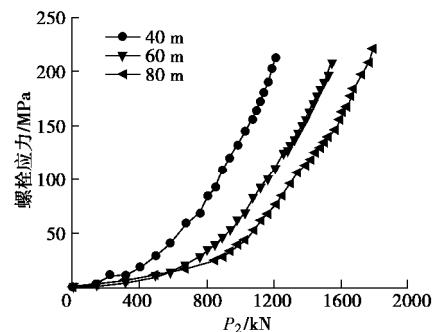


图 21 最大螺栓应力变化情况

Fig. 21 Change of maximum stress of bolts

### 3.3 水压作用对管片开裂及钢筋受力的影响

混凝土结构一旦出现裂纹, 不仅破坏结构的完整性, 还会降低混凝土的耐久性, 影响承载能力, 缩短结构的寿命<sup>[21]</sup>, 因此裂纹的产生是评估管片受力状态的重要因素, 得到管片开裂时的弯矩就显得尤为重要。在试验中, B3 块管片内弧面由于所受到的正弯矩较大, 在此处最先产生受拉裂纹。B3 块内弧面的裂纹开

展情况如图 22 所示。

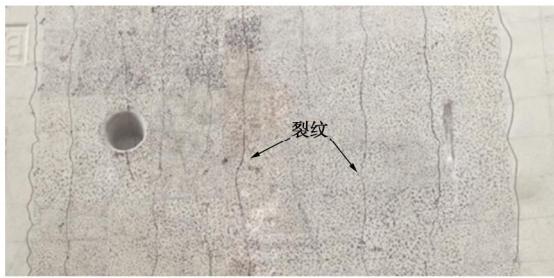


图 22 B3 块内弧面纵缝裂纹开展情况

Fig. 22 Crack development of longitudinal crack in block B3

试验得到了在各水压作用下的该位置处的开裂弯矩, 如图 23 所示。

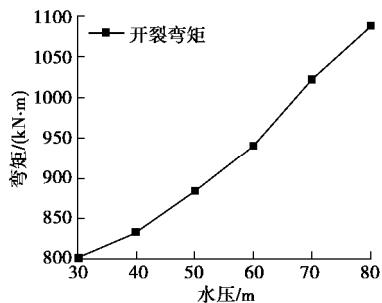


图 23 管片的开裂弯矩

Fig. 23 Cracking moments of segmental structure

可见, 随着水压的增大, 管片的开裂弯矩逐渐增大。当水压为 30 m 时, 管片的开裂弯矩为 804.1 kN·m, 而当水压增长到 40 m 时, 管片的开裂弯矩为 834 kN·m, 继续增大水压至 80 m 时, 开裂弯矩达到 1087.1 kN·m, 和最初 30 m 水压的开裂弯矩相比, 增幅达到 35.2%, 可见水压的增大对管片结构的抗裂性能增益明显。

管片内部钢筋受力和裂纹的开展有很大关系, 试验测试了管片内部主筋和箍筋在不同水压力下的受力情况。管片内侧主筋和外侧主筋在主对拉力  $P_2=1344$  kN 时的受力情况分别如图 24, 25 所示, 由图 23 可知, 管片外侧主筋在拱顶和拱底处存在较大压应力, 水压越高, 外侧主筋的拉应力越大, 在 3 种水压力下, 管片外侧主筋在拱顶处的压应力达到 -49.56, -57.54, -70.56 MPa, 故水压力增大会导致管片外侧主筋压应力显著上升。

而对于管片内侧主筋, 在管片拱底内弧面由于受拉裂纹的产生和发展, 使管片内侧主筋受到较大的拉应力, 3 种水压下主筋的拉应力分别达到 130.62, 64.05, 29.61 MPa, 下降幅度分别达到 50.9% 和 53.7%。因此, 水压力的上升使管片的开裂弯矩上升, 延缓裂纹的产生, 使管片内侧主筋拉应力明显降低。

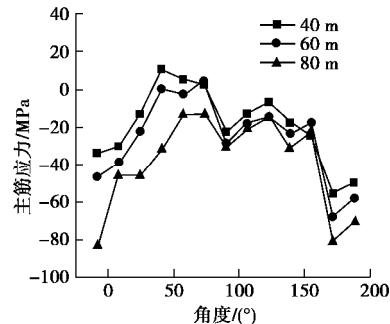


图 24 外侧主筋受力情况 ( $P_2=1344$  kN)

Fig. 24 Forces of outer main reinforcement ( $P_2=1344$  kN)

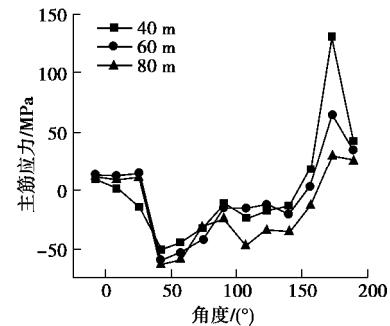


图 25 内侧主筋受力情况 ( $P_2=1344$  kN)

Fig. 25 Forces of inner main reinforcement ( $P_2=1344$  kN)

试验中最大箍筋应力出现在位于拱腰位置的 B1 块内侧, 3 组水压下最大箍筋应力变化情况如图 26 所示。由图 26 可知, 箍筋的应力随对拉力的变化主要由增长期和平缓期两个阶段, 水压越高管片内部箍筋所受拉应力越大, 在主对拉力  $P_2$  达到 1164 kN 时, 各组试验得到的最大箍筋应力分别为 19.74, 24.78, 29.19 MPa。因此, 水压增大会使箍筋拉应力明显增大。

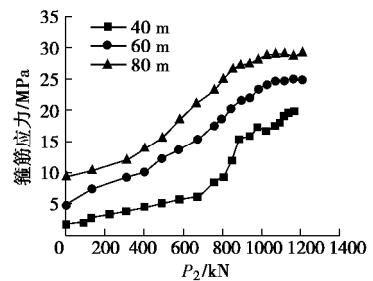


图 26 最大箍筋应力变化情况

Fig. 26 Change of maximum stress of stirrup

总得来看, 水压增大虽然会使管片内侧主筋的拉应力明显降低, 但同时也会使管片主筋的最大压应力和箍筋应力有明显的上升。

### 3.4 高水压对通缝拼装管片结构破坏的影响

破坏试验选取 60 m 高水压并保持围压条件下进行, 试验过程中管片拱顶位移不断增大, 0° 纵缝内弧面和 49° 纵缝外弧面纵缝张开量不断增大, 当加载到  $P_2=2912$  kN 时, 这两处的纵缝张开量分别由 18.4 mm 增大到 22.8 和由 16.9 mm 增大到 19.3 mm, 且此时拱

顶外侧混凝土大面积压溃、剥离，在拱顶 F 块外侧及 L1 块外侧出现宽度 3 cm 的裂纹，同时，49° 纵缝处出现大面积混凝土剪坏。该破坏发生后，管片拱顶位移不断增大，通缝结构处于失稳状态，并丧失承载能力。可见，高水压下通缝拼装管片结构破坏使纵缝处混凝土发生压剪破坏，且具有突发性。结合前文分析可知，高水压作用带来的管片整体形变降低和受力性能的提升，但也使通缝拼装结构的延性降低，并易引起纵缝处压剪破坏。

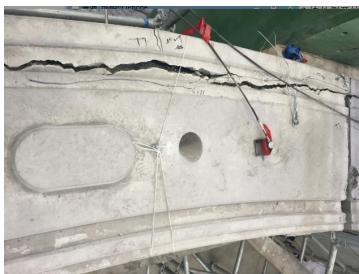


图 27 管片纵缝处的破坏图

Fig. 27 Destruction at longitudinal joint of segmental structure

## 4 结 论

采用结构原型试验方法对高水压条件下通缝拼装管片结构的受力特征进行了测试与分析，得到有益结论如下：

(1) 水压力的升高对通缝拼装管片结构整体形变起到很好的控制作用，能有效减小管片的椭圆度和单点最大形变率，但通缝拼装管片结构拱顶形变大，拱顶变形在管片结构整体形变中所占比重最高且更易超过限值，建议将单点位移变化率 2%~2.5% 作为通缝拼装管片结构的形变控制标准。

(2) 通缝拼装管片的纵缝张开主要受到封顶块位置刚度削弱的影响，在封顶块附近的纵缝出现明显张开，水压的增大对通缝拼装结构纵缝张开量的限制很明显，能明显减小螺栓受力。

(3) 水压的升高对通缝拼装管片结构裂缝的产生与发展具有明显的抑制作用，高水压作用使管片结构内侧钢筋的拉应力降低、开裂弯矩增大，但管片外侧钢筋的压力也随之上升，造成正常使用阶段管片外侧钢筋应力由压应力控制。

(4) 高水压作用使通缝拼装管片的容许荷载明显增大，同时造成管片结构的延性降低，易造成纵缝压剪破坏，从而引起通缝拼装管片结构的突发性破坏。

## 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] ITA-Working Group Research. Processed recommendation for design of lining of shield tunnel[R]. Lausanne: Tunneling Association, 1997: 1~26.
- [3] 谢红强, 何川, 李围. 江底盾构隧道施工期外水压分布规律的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1851~1855. (XIE Hong-qiang, HE Chuan, LI Wei. Experimental study on distribution of external water pressure around sub-river shield tunnel in construction period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1851~1855. (in Chinese)).
- [4] 周济民. 水下盾构法隧道双层衬砌结构力学特性[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (ZHOU Ji-ming. Mechanical properties of double layer lining of underwater shield tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [5] 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, 2012. (FENG Kun. Research on mechanical behavior of segmental lining structure for underwater shield tunnel with large cross-section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [6] 张建刚, 何川. 高水压大断面盾构隧道管片衬砌结构静力学行为模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 80~84. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan. Experimental study on static behavior model of segment lining structure of high water pressure large section shield tunnel[J]. Hydro Geological Engineering Geology, 2009, 36(4): 80~84. (in Chinese))
- [7] 唐长东. 高水压盾构隧道整环管片的力学特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (TANG Chang-dong. Study on mechanical properties of high pressure of shield tunnel segment domain[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [8] 周济民, 何川, 肖明清, 等. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 115~121. (ZHOU Ji-min, HE Chuan, XIAO Ming-qing, et al. The field test and calculation analysis of the force of the lining structure of the underwater shield tunnel in the lion ocean[J]. Journal of Railway Science, 2012, 34(7): 115~121. (in Chinese))
- [9] 彭博. 水下盾构隧道管片衬砌结构渐进性破坏机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. (PENG Bo. Research on progressive damage of segment lining of underwater shield

- tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [10] 黄清飞, 袁大军, 王梦恕. 水位对盾构隧道管片结构内力影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1112 - 1120. (HUANG Qin-fei, YUAN Da-jun, WANG Meng-shu. Influence of water level on internal force of segments of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1112 - 1120. (in Chinese))
- [11] 曾东洋, 何 川. 盾构隧道衬砌结构内力计算方法的对比分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 707 - 712. (ZENG Dong-yang, HE Chuan. Comparsion and analysis research of different shield tunnel lining internal forces design methods[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 707 - 712. (in Chinese))
- [12] 王士民, 姚佳兵, 何祥凡, 等. 水压对盾构管片衬砌力学特征与破坏形态的影响模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 111 - 120. (WANG Shi-min, YAO Jia-bing, HE Xiang-fan, et al. Research on the mechanical property and failure mode of shield tunnels with different hydraulic pressure by model test[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 111 - 120. (in Chinese))
- [13] 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 Zong-xian. Prototype test on failure characteristic of segmental lining structure for Nanjing Yangtze River Tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(4): 564 - 571. (in Chinese))
- [14] 何 川, 封 坤, 晏启祥. 高速铁路水下盾构隧道管片内力分布规律研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 101 - 109. (HE Chuan, FENG Kun, YAN Qi-xiang. Study on Inner force distribution of segmental lining of high-speed railway underwater shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 101 - 109. (in Chinese))
- [15] 毕湘利, 柳 献, 王志秀, 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 Xiang-li, LIU Xian, WANG Zhi-xiu, 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))
- [16] LIU Xian, DONG Zi-bo, BAI Yun, et al. Investigation of the structural effect induced by stagger joints in segmental tunnel linings: first results from full-scale ring tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 1 - 18.
- [17] 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 Zong-xian. Development and application of loading test system of prototype structure for underwater shield tunnel with large section-cross[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 254 - 266. (in Chinese))
- [18] GB 50446—2017 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (GB 50446—2017 Shield tunnel construction and acceptance specification[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese))
- [19] 张旭辉, 杨志豪, 洪弼宸, 等. 盾构隧道结构健康评价的变形指标研究[J]. 隧道与轨道交通, 2014(4): 7 - 13. (ZHANG Xu-hui, YANG Zhi-hao, HONG Bi-chen, et al. Study on deformation index of shield tunnel structural health evaluation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2014(4): 7 - 13. (in Chinese))
- [20] 邓朝辉. 盾构隧道管片接缝防水设计[J]. 铁道建筑技术, 2008(增刊 1): 157 - 159, 163. (DENG Zhao-hui. Waterproof design of joints of shield tunnel segments[J]. Railway Construction Technology, 2008(S1): 157 - 159, 163. (in Chinese))
- [21] WEI H, WANG Y, LUO J. Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 91 - 100.