

# 水下盾构法铁路隧道管片衬砌结构的原型加载试验研究

何川<sup>1,2</sup>, 封坤<sup>1,2</sup>, 晏启祥<sup>1,2</sup>, 齐春<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 西南交通大学地下工程系, 成都 610031)

[摘要] 针对我国第一条水下铁路盾构法隧道——狮子洋隧道,采用“多功能盾构隧道结构体试验系统”装置原型管片衬砌结构,在通缝和错缝不同的拼装方式下进行了原型结构加载试验,对其结构力学性能进行深入探讨。试验结果表明,不同水压条件下管片衬砌结构力学特征不同,尤其是当结构开裂后,高压水对于结构内力与形变的发展有明显的减缓作用。狮子洋隧道采用的榫式接头管片结构在通缝与错缝拼装下的破坏特征不同,通缝拼装时结构在高压水条件下纵缝附近区域易发生局部剪切破坏,该研究成果可为同类工程的设计提供有价值的参考。

[关键词] 水下盾构法铁路隧道;管片衬砌结构;原型试验;榫式接头;破坏特征

[中图分类号] U459.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0065-08

## 1 前言

铁路作为长距离交通的重要手段,成为保障我国经济发展的基石<sup>[1]</sup>。随着我国高速铁路的大力建设,新建铁路中隧道数量、隧线比急剧增大,铁路隧道常常面临着穿越江河等水域阻隔的难题<sup>[2]</sup>。

我国采用盾构法修建水下隧道的技术很成熟,近年来多座水下隧道均采用了盾构法修建<sup>[3-5]</sup>,如杭州庆春路隧道、上海崇明越江隧道、武汉长江隧道、南京长江隧道等,将其应用于水下铁路隧道的修建,前景十分广阔。

对于水下铁路盾构法隧道,由于穿越距离长、埋置较深、所处水文地质条件复杂,所要求结构断面大,其受力性能不同于一般铁路隧道或地铁区间隧道<sup>[6-7]</sup>,对其结构力学性能的评价十分关键,有必要对原型隧道结构进行试验研究。

国内外相关原型试验开展较少,2000年及2004年,上海和广州地铁曾进行了1:1水平整环试

验<sup>[8-9]</sup>;2003年,日本曾进行了双圆断面盾构衬砌原型试验<sup>[10]</sup>;2005年,上海崇明隧道曾对其衬砌整环进行了加载试验<sup>[11]</sup>。上述试验均采用了多点施加综合荷载的加载方式,即将土压和水压混合在一起施加。而水下盾构隧道所受土压和水压这两种力之间关联性差,通常以水压成分为主导,因此要较真实地测试出拟建水下隧道结构的各种力学特征,须将水压及土压分离控制。

## 2 工程概况

狮子洋隧道是我国第一条水下铁路隧道,也是我国第一条采用盾构法施工的水下长隧,该隧道工程范围全长10.8 km,盾构段长9.34 km,目标速度值世界第一,设计行车速度为350 km/h,被誉为“中国铁路世纪隧道”。

隧道位于东涌站—虎门站区间,下穿狮子洋等多条河道,纵断面图见图1。盾构段穿越地层为淤泥质土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂、全风化泥质粉砂

[收稿日期] 2010-08-07

[基金项目] 高铁联合基金重点项目(U1134208);国家973计划(2010CB732105);国家自然科学基金(50925830,51208432)

[作者简介] 何川(1964—),男,重庆市人,西南交通大学教授,博士,主要从事公路、铁路及城市地铁隧道的科研、教学工作;

E-mail:chuanhe21@163.com

岩、弱风化泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、砂砾岩,穿越弱风化基岩、半岩半土、第四系覆盖物地层的长度分别占掘进长度的73.3%、13.3%、13.4%。基岩

的最大单抗压强度为82.8 MPa,基岩层的渗透系数达 $6.4 \times 10^{-4}$  m/s。隧道承受最大水压力达0.67 MPa,为目前国内水压力最大的盾构隧道。

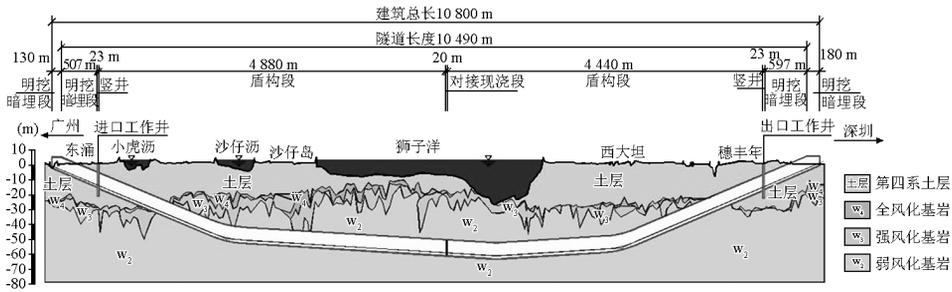


图1 狮子洋隧道工程纵断面图

Fig. 1 Longitudinal profile of Shiziyang shield tunnel project

隧道采用单层装配式钢筋混凝土管片衬砌,并且在入口段施设一层厚为300 mm的素混凝土作为满足高速铁路隧道功能要求的衬砌。隧道外直径10 800 mm,内直径9 800 mm,管片厚度500 mm,管

片采用通用环拼装,平均幅宽2 000 mm,衬砌环分成8块,纵缝布置24颗环向螺栓,纵向螺栓22颗,封顶块圆心角为 $16^{\circ}21'49.09''$ ,邻接块和标准块圆心角为 $49^{\circ}5'27.27''$ ,衬砌结构布置如图2所示。

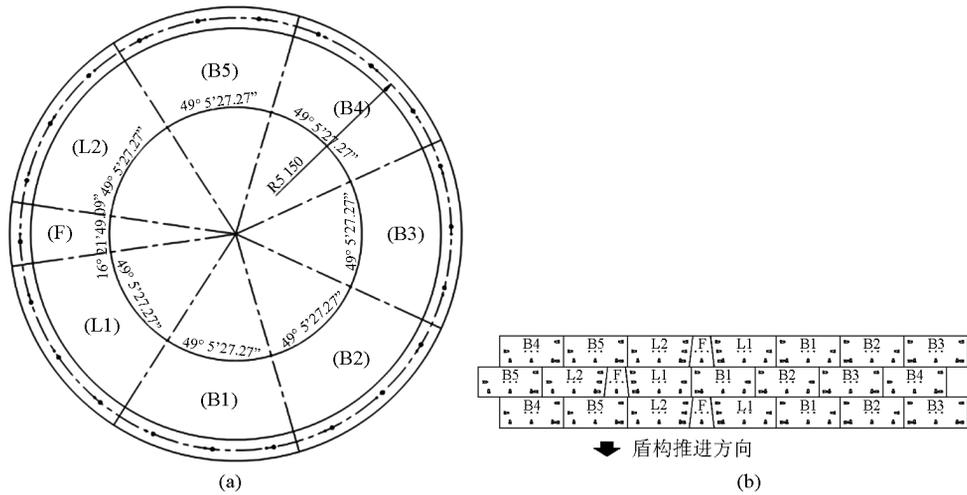


图2 狮子洋隧道工程管片布置图

Fig. 2 Segment layout of Shiziyang shield tunnel

### 3 试验装置及量测系统

#### 3.1 试验装置

根据狮子洋隧道结构特征和荷载条件,采用“多功能盾构隧道结构体试验系统”装置,对隧道结构在通缝及错缝拼装条件下分别进行加载,见图3和图4。

如图5所示,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。每根对拉梁上设4孔,

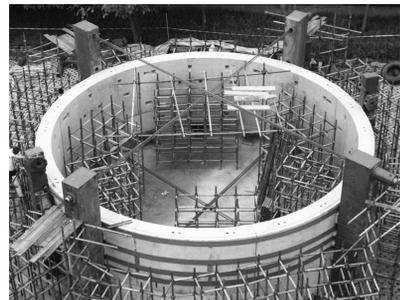


图3 单环(通缝)管片结构加载实况

Fig. 3 Sketch of straight assembling segmental lining structure test

钢绞线从孔内穿越,一端锚固于对拉梁,另一端锚固于另一对拉梁上的千斤顶以实现张拉。环箍梁也同样设有孔位,钢绞线绕管片环一圈后张拉端与固定端设在同一根环箍梁上。

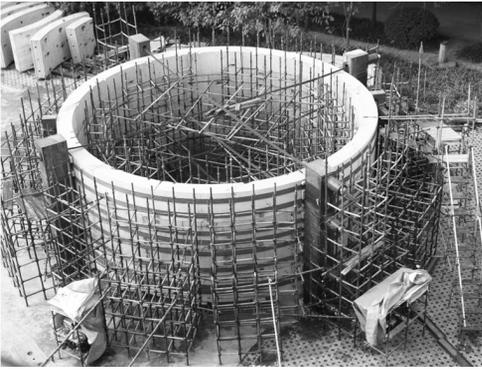


图4 组合环(错缝)管片结构加载图  
Fig. 4 Sketch of staggered assembling segmental lining structure test

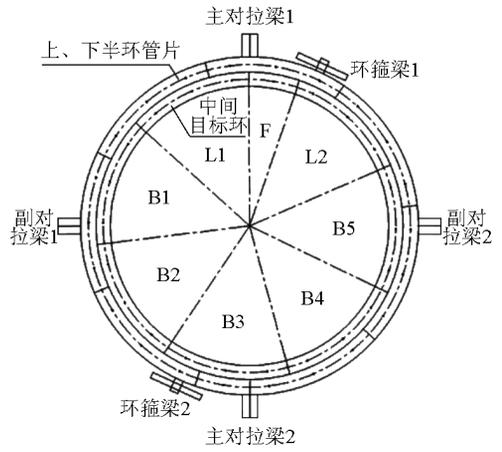


图6 加载布置图  
Fig. 6 Plan of load mode

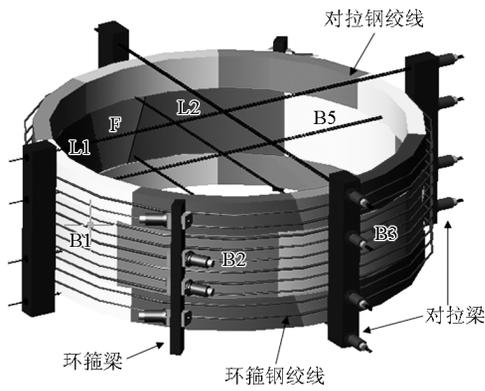


图5 原型盾构隧道管片结构加载示意图  
Fig. 5 Diagram of load application

### 3.2 加载模式

试验针对最不利的情况进行加载研究,具体加载布置见图6。对于单环(通缝)的情况,管片布置如图6中内环的情况;对于组合环(错缝)的情况,分别将上下半环相对中间目标环管片旋转180°布置。

### 3.3 试验系列

试验分别模拟了20 m、30 m、40 m、50 m、60 m水压,10 m、20 m、30 m、40 m、50 m土压等情况,采用若干级小步长分级加载加至目标荷载,每级稳载时间不低于10 min,待应变仪和位移计数值显示稳定后开始读数,试验目标加载工况见表1。

表1 试验加载工况  
Table 1 Load cases

组号	试验模拟工况		备注
	水压/m	土压/m	
1	20	10	
2	30	10	
3	40	10	
4	50	10	
5	60	10	
6	20	20	
7	30	20	
8	40	20	
9	50	20	
10	60	20	
11	20	30	仅错缝
12	30	30	
13	40	30	
14	50	30	
15	60	30	
16	30	40	仅错缝
17	40	40	仅错缝
18	50	40	
19	60	40	
20	40	50	仅错缝
21	50	50	仅错缝
22	60	50	仅错缝
23	破坏加载试验		

### 3.4 量测系统

试验测试的内容包括管片衬砌结构内力、变形、接缝张开以及混凝土裂缝的产生和发展,并于关键区域预埋混凝土应变计、钢筋计,以保证测试的准确性。

1)管片衬砌结构内力。采用胶基电阻应变片以  $16^{\circ}21'49.09''$  为单位在管片环结构内、外侧对称布设,测试内外侧应变值,以此计算出管片环结构截面内力,并于关键区域布置应变片,考察应力状态,如图7所示。

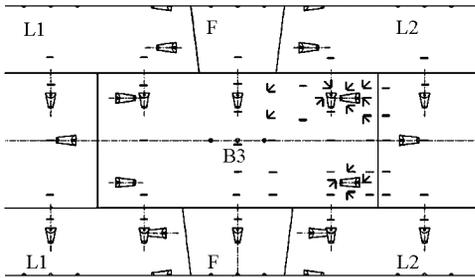


图7 应变测点布置图

Fig.7 Layout of surface strain sensor

2)管片衬砌结构径向位移。管片环位移主要考察中间目标环,沿圆周分布12个径向测点,每 $30^{\circ}$ 设置一处,对于组合环管片(错缝拼装),由于上下半环与中间环位移有差异,遂于上下半环各设置12个径向测点,亦按 $30^{\circ}$ 均布。位移量测采用0.01 mm精度的差动式位移传感器,如图8所示。

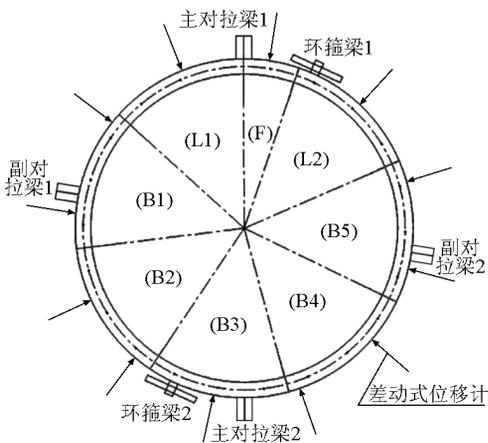


图8 管片径向位移测点布置图

Fig.8 Layout of radial displacement measuring points

3)管片纵缝张开量。在管片目标环接缝处上下侧,沿内弧面和外弧面布置两对钢弦式位移测缝计,对接缝的张开进行实时量测,如图9所示。

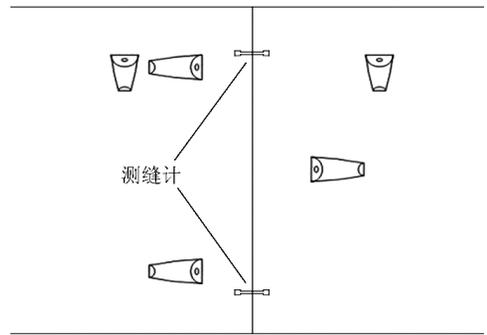


图9 管片纵缝张开量测点布置图

Fig.9 Layout of longitudinal seam stretching-amount measuring points

## 4 试验结果分析

### 4.1 不同水压条件下管片衬砌结构力学特征

狮子洋隧道的大部分区段位于江底,受水位影响明显。随着珠江水位涨落,管片衬砌结构的内力将有所不同,试验分别用水压力为20 m、30 m、40 m、50 m、60 m对应不同的土压力情况,对通缝拼装与错缝拼装两种结构进行加载研究。

#### 4.1.1 结构内力的变化

从通缝拼装管片的加载情况来看,如图10所示,随着水压增大,最大正、负弯矩都呈缓慢增长趋势。对于10 m土压,当结构承受高水压时(50 m、60 m水压),通缝结构最大正、负弯矩有明显增幅,这是由于高水压使结构轴力显著增加,从而增强了通缝管片的整体刚度,引起结构弯矩增长。而当土压较大时,弯矩增长并不明显。

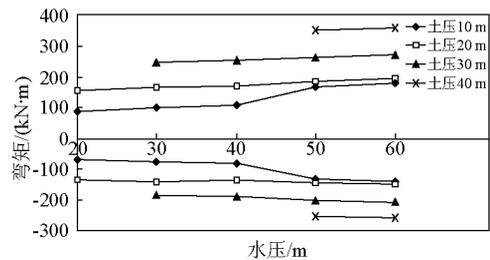


图10 不同土压条件下通缝拼装结构最大弯矩随水压变化图

Fig.10 The maximum bending moment of straight assembling structure changing with water pressure under different earth pressure

当通缝结构出现裂缝后,弯矩增长较明显。当土压从30 m增至40 m时,结构最大正、负弯矩增幅

达 31.66 % 和 24.89 %。

不同条件下错缝拼装管片最大弯矩随水压的变化如图 11 所示,与通缝相似,弹性状态下弯矩随水压的增加缓慢增长。当结构出现裂缝时,弯矩明显增大,如土压 50 m 的情况,当水压由 60 m 降至 50 m 时,最大正弯矩由 511.07 kN·m 增至 548.71 kN·m,增幅达 7.39 %,最大负弯矩由 -389.10 kN·m 增至 -410.94 kN·m,增幅达 5.68 %;而当水压由 50 m 降至 40 m 时,最大正弯矩增至 656.05 kN·m,增幅达 19.56 %,最大负弯矩增至 -459.14 kN·m,增幅达 11.73 %。可见,随着裂缝的不断开展,结构弯矩迅速增长且非线性变化显著。

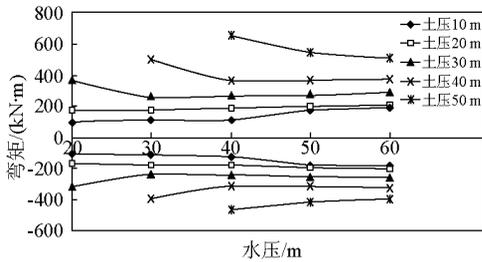


图 11 不同土压条件下错缝拼装结构最大弯矩随水压变化图

Fig. 11 The maximum bending moment of staggered assembling structure changing with water pressure under different earth pressure

选取 30 m 土压的情况,将通缝与错缝结构轴力的变化情况进行对比,如图 12 所示,实线为最大轴力,虚线为最小轴力,随着水压增大,二者显著增大,相同荷载条件下错缝结构最大轴力均略大于通缝结构,其最小轴力略小于通缝结构,而当结构开裂时,水压力由 30 m 降至 20 m,两者最大轴力并未降低,而最小轴力降幅明显,其中通缝结构最小轴力由 5 267.00 kN 降至 4 056.90 kN,降幅为 22.98 %,错缝结构最小轴力由 5 475.20 kN 降至 4 244.80 kN,降幅为 22.47 %。可见,结构开裂时,错缝结构最小轴力的降幅小于通缝结构,而最大轴力降幅不显著。

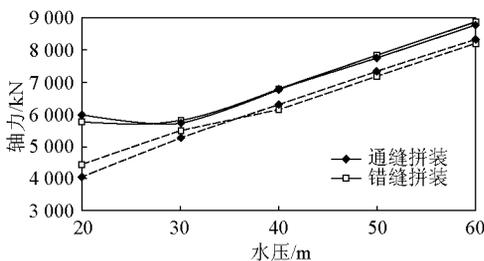


图 12 结构轴力随水压变化图

Fig. 12 Axial force changing with water pressure

从结构偏心距的变化来看,随水压增大,结构偏心距减小,如图 13 所示。当结构开裂时,通缝与错缝结构偏心距均增加,通缝结构由于轴力的骤减,使其偏心距显著增大。

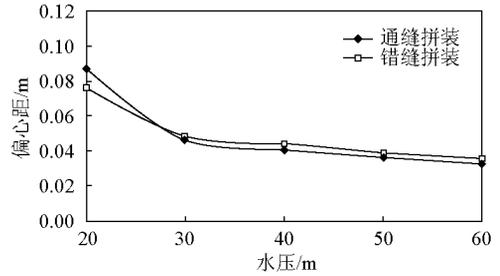


图 13 结构最大偏心距随水压变化图

Fig. 13 The maximum eccentricity changing with water pressure

#### 4.1.2 结构形变的发展

选取 30 m 土压的情况,将通缝与错缝结构形变的发展情况进行对比,如图 14 所示,随着水压的增长,二者的最大变形量缓慢增长,通缝结构的变形量大于错缝结构。而当结构发生裂缝时,二者最大变形量大幅增加,当水压从 30 m 降至 20 m 时,通缝结构最大变形量由 9.035 mm 增至 11.798 mm,增幅达 30.58 %;错缝结构最大变形量由 7.399 mm 增至 9.001 mm,增幅达 21.65 %,可见,错缝结构对结构形变的控制更好,结构开裂后变形开展更为缓慢。

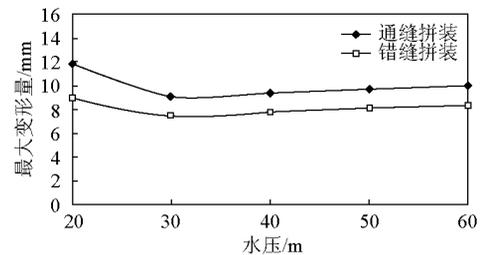


图 14 结构最大变形量随水压变化图

Fig. 14 The maximum deformation changing with water pressure

#### 4.1.3 纵缝张开的变化

从结构纵缝张开的情况看,随水压增加,通缝与错缝结构的纵缝张开量均呈减小的趋势。如图 15 所示,30 m 土压的情况,在弹性状态下,通缝结构最大纵缝张开量大于错缝结构,而当水压从 30 m 降至 20 m 时,结构开裂,此时通缝结构最大张开量由 0.804 mm 增至 1.32 mm,增幅达 64.13 %;错缝结构最大张开量由 0.71 mm 增至 1.099 mm,增幅为

54.7%，可见，弹性状态下高水压对于结构张开量的控制有益。

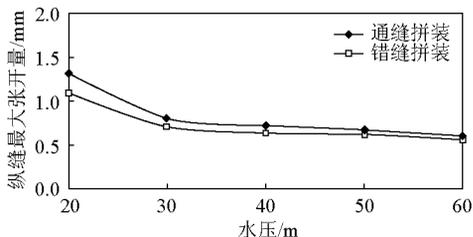


图15 纵缝最大张开量随水压变化图

Fig. 15 The maximum longitudinal seam stretching-amount changing with water pressure

#### 4.2 高水压条件下不同土压对管片衬砌结构的影响

试验着重对于高水压条件下(60 m 水压力)通缝拼装与错缝拼装两种结构在不同土压力的情况进行了加载研究。

##### 4.2.1 结构内力的变化

从两种结构的弯矩来看,在高水压条件下,随着土压增长,结构最大正负弯矩逐步增长,相对而言,错缝拼装结构的弯矩量值较大,如图16所示。而当通缝结构于40 m 土压时出现裂缝后,其结构最大正负弯矩显著增加,其中最大正弯矩变化尤为明显,由272.435 kN·m 变化至658.699 kN·m,增幅达141.78%。

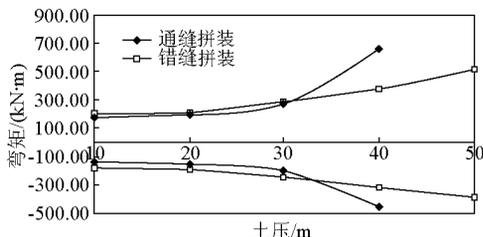


图16 高水压条件下结构最大弯矩随土压变化图

Fig. 16 The maximum bending moment changing with earth pressure under high water pressure

从两种结构的轴力变化来看,在高水压条件下,随着土压增长,结构最大、最小轴力有所增长,但增幅不大。在弹性状态下,错缝与通缝拼装结构的轴力基本处于同一水平,如图17所示。而当通缝结构于40 m 土压时出现裂缝后,其结构最大、最小轴力明显降低,而最小轴力的降幅更为明显,由8 336.00 kN降至6 020.20 kN,降幅达27.78%。

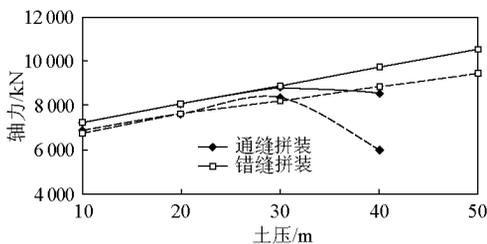


图17 高水压条件下结构轴力随土压变化图

Fig. 17 Axial force changing with earth pressure under high water pressure

从结构偏心距的变化来看,在高水压条件下,随着土压增长,结构最大偏心距逐步增长,相对而言,错缝拼装结构的最大偏心距量值较大,如图18所示。而当通缝结构于40 m 土压时出现裂缝后,其结构最大偏心距由0.033 m 骤增至0.109 m,明显大于错缝结构的情况。

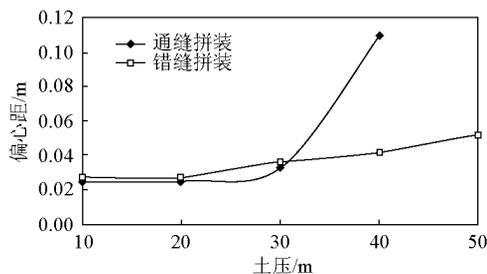


图18 高水压条件下结构最大偏心距随土压变化图

Fig. 18 The maximum eccentricity changing with earth pressure under high water pressure

##### 4.2.2 结构形变的发展

从结构形变的发展来看,在高水压条件下,随着土压增长,通缝与错缝拼装结构变形量均逐步增长。当通缝结构于40 m 土压时出现裂缝后,其结构最大变形量由9.994 mm 骤增至26 mm,明显大于错缝结构的情况。可见在高水压条件下,错缝结构对于结构最大变形量的控制能力更强。

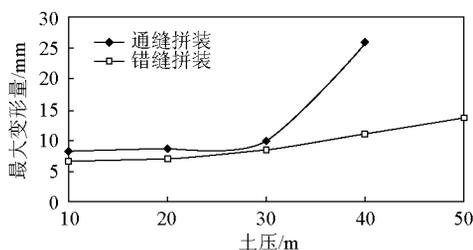


图19 高水压条件下结构最大变形量随土压变化图

Fig. 19 The maximum deformation changing with earth pressure under high water pressure

### 4.2.3 纵缝张开的变化

从结构纵缝张开的情况来看,在高水压条件下,随着土压增长,通缝与错缝拼装结构变形量均逐步增长,通缝结构最大纵缝张开量略大于错缝结构。当通缝结构于40 m土压时出现裂缝后,其结构最大纵缝张开量由0.597 mm 骤增至1.605 mm,明显大于错缝结构的情况。可见,在高水压条件下,错缝结构对于结构纵缝张开的控制能力更强。

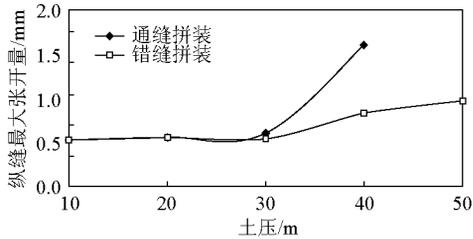


图 20 高水压条件下纵缝最大张开量随土压变化图  
Fig. 20 The maximum longitudinal seam stretching-amount changing with earth pressure under high water pressure

### 4.3 榫式接头管片结构在通缝与错缝拼装下的破坏特征

狮子洋隧道管片结构纵缝的设计,采用了榫式接头结构,如图 21 所示。其优点在于能够有效地减小拼装误差,然而由于纵缝接触面上榫头与榫槽等细部结构的存在,给结构局部受力,特别是高水压条件下结构的力学分布带来了不利的影响。

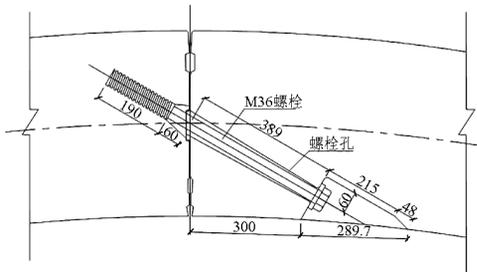


图 21 榫式接头结构(单位:mm)

Fig. 21 Plan of longitudinal seam joint(unit:mm)

由于高水压条件下结构通常轴力较大,而通缝结构受力后产生的变形显著,纵缝张开较大,实际受压区域很小,局部压应力已超过混凝土承载力,多处接缝突然出现大面积压溃与剪坏,剪坏区多沿环向螺栓的走向发展,如图 22~图 25 所示,B3 块、L2 块纵缝出现从榫头处沿结构内侧的剪切裂缝,B5 块与 F 块出现从榫头处沿结构外侧的剪切裂缝与压溃区。

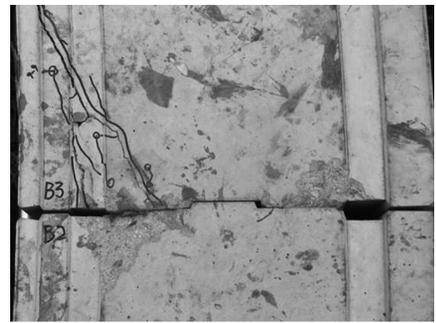


图 22 B3 块内侧接缝处剪坏  
Fig. 22 Shear failure at inside longitudinal seam of B3

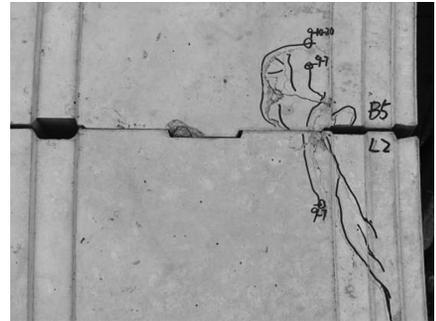


图 23 L2 块内侧接缝处剪坏  
Fig. 23 Shear failure at inside longitudinal seam of L2



图 24 B5 块外侧接缝处剪坏  
Fig. 24 Shear failure at outside longitudinal seam of B5

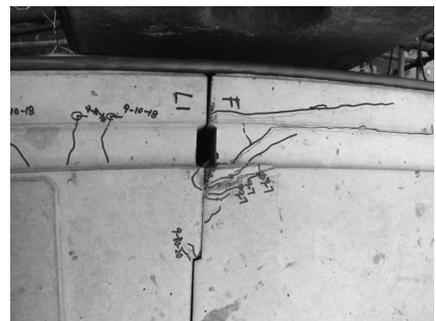


图 25 F 块外侧接缝处剪坏  
Fig. 25 Shear failure at outside longitudinal seam of F

高水压条件下通缝管片结构的破坏过程,大致可分为几个阶段,首先拱顶与拱底变形显著增加,管片内弧面边沿出现可见微裂缝→内弧面裂缝发展,纵缝处局部压溃→内弧面出现贯通裂缝,外弧面出现可见微裂缝→结构大变形,出现多处压溃区,局部接缝突然剪坏→内弧面出现多条贯通裂缝,结构失稳破坏。

而对于错缝结构,结构整体性好于通缝,结构变形、纵缝张开量较小,不易发生结构纵缝处的剪切破坏。其破坏过程为,拱顶与拱底变形增大,管片内弧面出现可见微裂缝→管片内弧面裂缝缓慢发展→管片内弧面出现贯通裂缝,外弧面出现微裂缝→结构变形显著,出现多处贯通裂缝→荷载不变,位移不断增大,结构失稳破坏。

## 5 结语

采用“多功能盾构隧道结构体试验系统”装置对狮子洋隧道原型管片结构在通缝与错缝两种拼装方式下进行了加载试验,得出有益结论如下:

1)在正常使用状态下,随着水压力的不断加大,在不同的土压条件下通缝与错缝拼装管片结构的最大正负弯矩均略有增长,轴力的增长较为显著,结构最大偏心矩均明显减小。两种结构最大变形量缓慢增加,纵缝最大张开量明显减小。

2)高水压条件下,随着土压力的增加,通缝与错缝拼装管片结构的最大正、负弯矩均显著增长,结构最大偏心矩均明显增加,最大变形量与纵缝最大张开量缓慢增加,错缝结构对于结构内力与形变的控制能力更强。

3)当结构出现裂缝时,通缝拼装结构弯矩骤增,结构最小轴力骤减,结构最大偏心矩骤增,最大变形量与纵缝最大张开量均显著增大。而错缝结构开裂后内力增幅小于通缝,其最大变形量与纵缝最大张开量的增长并不大,高水压明显减缓了结构内

力与形变的发展。错缝拼装结构的整体稳定性好于通缝结构,对于水下隧道,错缝拼装结构对于接缝张开量的控制作用尤为明显。

4)榫式管片在通缝拼装时,结构纵缝附近区域在高水压条件下易发生局部剪切破坏,须严格控制其变形与纵缝张开量的发展。

5)对于水下盾构法隧道榫式管片,出于结构防水、承载力、破坏特征以及长期安全储备等方面的综合考虑,建议优先采用错缝拼装方式。

## 参考文献

- [1] 孙永福. 西部铁路通道建设及政策措施[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 18-24.
- [2] 钱七虎. 从河床冲淤分析沉管法修建长江水下隧道问题[C]//钱七虎院士论文集, 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 何川, 张建刚, 杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 85-89.
- [4] 何川, 封坤, 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2260-2269.
- [5] 黄融. 上海崇明越江通道长江隧道工程综述(一)——长江隧道工程设计[J]. 地下工程与隧道, 2008(1): 2-8.
- [6] 苏宗贤. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 131-136.
- [7] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85-89.
- [8] 王如路, 宋博, 王祺, 等. 双圆盾构隧道衬砌错缝拼装整环试验及结构分析[J]. 地下工程与隧道, 2001(1): 12-15.
- [9] 郭智杰, 鲁亮, 刘祖华. 双圆盾构法隧道衬砌1:1结构试验加载方法研究[J]. 结构工程师, 2004(3): 64-71.
- [10] Hiroshi Nakamura, Toshikazu Kubota, Mamoru Furukawa, et al. Unified construction of running track tunnel and crossover tunnel for subway by rectangular shape double track cross-section shield machine[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18: 253-262.
- [11] 王彪, 刘祖华, 鲁亮. 上海崇明越江隧道衬砌整环试验加载方法研究[J]. 施工技术, 2006, 35(增刊): 52-54.

(下转 89 页)