

DOI: 10.11779/CJGE201607006

# 接头抗弯刚度非线性及渗水影响下盾构隧道力学行为分析

徐国文, 卢岱岳

(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:** 盾构隧道在运营过程中会出现局部渗漏水, 对结构的长期安全性有较大影响。目前渗漏水研究中, 难以对局部渗漏水及盾构隧道的力学特性同时进行准确的模拟。针对该现状, 提出一种组合模拟方法, 即渗流计算时, 管片结构采用均质圆环模型, 在局部接头处设置相应的渗流路径; 而在力学计算时, 关闭渗流场, 将管片结构的均质圆环模型替换为考虑接头抗弯刚度非线性的壳-弹簧-接触-地层模型, 迭代计算达到平衡。采用该方法对不同渗流量及渗漏位置情况下, 隧道周围孔隙水压力分布规律及结构的力学行为进行了对比分析。分析结果表明: 渗流量越大, 孔隙水压力降低越明显, 结构内力变化越显著, 且拱腰附近接头渗水对结构内力的影响程度大于拱顶与拱底附近接头渗水; 各接头渗水时, 影响区域的划分表现出一致性, 即以渗水接头为中心, 两侧各  $36^\circ$  的区域为严重影响区域; 与严重影响区域相连, 两侧各  $48^\circ$ ,  $60^\circ$  区域为一般影响区域, 剩余区域为微弱影响区域。复合地层情况下, 与静水压力工况相比, 上半部分渗水导致结构上侧正弯区域增加, 下半部分渗水导致结构下侧正弯区域增加, 且轴力沿全环分布不均, 渗流侧轴力平均值小于非渗流侧轴力, 对管片结构受力不利。

**关键词:** 盾构隧道; 非线性; 抗弯刚度; 接头渗水; 内力

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)07-1202-10

**作者简介:** 徐国文(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的工作。E-mail: xgw80033@163.com。

## Mechanical behavior of shield tunnel considering nonlinearity of flexural rigidity and leakage of joints

XU Guo-wen, LU Dai-yue

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

**Abstract:** Partial leakage during operation of shield tunnel has great impact on the long-term safety of structures. It is difficult to simultaneously simulate partial leakage and mechanical properties of shield tunnel accurately. Hence, a combined simulation method is proposed. For partial leakage simulation, the homogeneous ring model is used and the corresponding seepage path is set at joint position. For mechanical calculation, a shell-spring-contact-ground model considering the nonlinearity of flexural rigidity of segment joints is established to replace the homogeneous ring model. The real stress state of lining is obtained by iterative calculation. The distribution of pore water pressure around tunnel and the mechanical behavior of structures are analyzed under different seepage flows and leakage locations. The results show that the pore water pressure decreases more significantly and the internal force of structures changes more obviously with the increasing seepage. The leaking joint close to tunnel hance has more obvious effect on its internal force. The affected areas of joint leakage exhibit consistency. Taking the leaking joint as the center, the 36-degree areas at its both sides are severely affected, the 48-degree and 60-degree areas are generally affected, and the remaining areas are weakly affected. For the composite strata, compared with these under hydrostatic pressure conditions, the upper and lower leakages lead to the increase of upper and lower positive bending areas, and the distribution of axial force along the whole ring is uneven. The average axial force at the leakage side is less than that at the non-leakage side, which is unfavorable to the safety of segment structures.

**Key words:** shield tunnel; nonlinearity; flexural rigidity; joint leakage; internal force

## 0 引言

盾构隧道采用环向接头将多个弧形的衬砌管片拼

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278424); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682014CX070)

收稿日期: 2015-06-21

接成管片环, 再通过纵向接头将管片环以通缝或错缝方式拼装而成<sup>[1]</sup>, 接头位置处在长期运营过程中易发生渗漏<sup>[2]</sup>。刘印等<sup>[3]</sup>对上海地铁的渗漏水情况进行统计, 发现接头渗水占约总渗水的 80%~90%; Mair<sup>[4]</sup>、Shin<sup>[5]</sup>通过调研发现, 盾构隧道渗水主要发生在管片接头、螺栓孔等局部区域。

接头渗漏会导致衬砌结构周围的水压力发生变化, 结构承受的水压力不再满足目前设计中通用的分布形式<sup>[6]</sup>, 导致管片结构的椭圆及侧向移动<sup>[7]</sup>, 进而导致结构内力发生变化。Wongsaroj 等<sup>[8]</sup>通过数值计算发现, 长期渗漏过程中, 隧道顶部的轴力对衬砌的渗透系数最为敏感; 黄宏伟等<sup>[9]</sup>研究发现, 渗漏使管片的轴力与弯矩都产生了较大变化; Li 等<sup>[10]</sup>采用理论分析对不同渗透系数下结构的内力随渗漏时间的变化情况进行了研究。同时, 管片接头抗弯刚度具有明显的三维特性<sup>[11-12]</sup>, 其量值为管片衬砌接头处所受弯矩和轴力的函数。接头渗漏导致结构内力随着时间不断变化, 使得管片接头抗弯刚度的取值随之发生变化。而目前的结构设计中多将接头抗弯刚度取为一恒定数值代入整环模型中进行计算<sup>[13]</sup>, 这种设计方法对于渗漏情况下管片力学机理的研究是不适合的。

对于盾构隧道局部渗漏水问题, 国内外学者作了大量的研究。经调研发现, 主要存在着两个方面的问题: ①渗漏大多采用衬砌等效渗透模拟的思路实现, 该方法得到的隧道周围水压力与实际分布有一定偏差; ②在计算盾构隧道受力时, 大多采用均质圆环模型, 该模型难以反映出盾构隧道复杂的力学机理。如张冬梅等<sup>[2]</sup>、Mair<sup>[4]</sup>、Shin 等<sup>[5]</sup>学者在研究中, 均采用了衬砌等效渗漏的均质圆环模型。

为了更为准确的研究接头渗漏对衬砌结构内力的影响, 本文提出了一种新的模拟思路。即渗流计算时, 通过设置管片接头的渗漏路径, 实现接头的局部漏水; 力学计算时, 采用基于接头抗弯刚度非线性的壳-弹簧-接触-地层模型, 实现对管片力学特性的准确模拟。将该方法与狮子洋隧道工程相结合, 对不同渗流量、不同渗漏位置等情况下盾构隧道衬砌周围孔压及隧道力学机理进行了分析。

## 1 计算方法

### 1.1 工程背景

以广深港狮子洋隧道作为原型, 其主体结构采用单层装配式钢筋混凝土平板型衬砌。如图 1 所示, 结构外直径 10.8 m, 内直径 9.8 m, 厚度 50 cm; 采用 5+2+1 分块形式, 其中封顶块圆心角 16°21'49.09", 邻接块和标准块中心线圆心角均为 49°5'27.27", 管片幅

宽 2 m; 纵缝布置 24 颗环向螺栓, 环间设置纵向螺栓 22 颗。

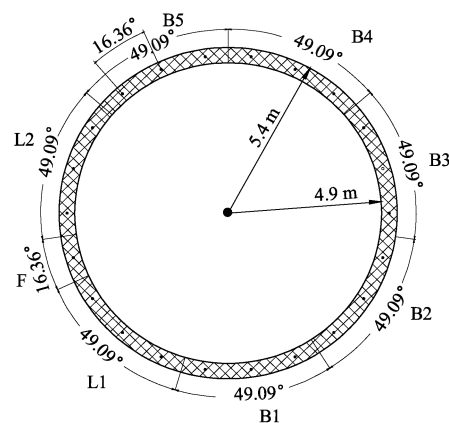


图 1 狮子洋隧道管片衬砌分块图

Fig. 1 Diagram of segment lining of Shiziyang tunnel

### 1.2 管片模型的建立

管片结构内力计算采用壳-弹簧-接触-地层模型, 如图 2 所示。其中管片采用 FLAC<sup>3D</sup> 中的 liner 单元<sup>[14]</sup>进行模拟, 该单元不但能承受主方向的拉压应力, 还能模拟管片与土体之间的摩擦相互作用, 能够较为真实的反应结构与土体间的相互作用关系。

壳单元与地层间通过地层弹簧相连, 管片间通过接头弹簧相连。每个接头有 6 个自由度, 分别为  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的切向自由度以及绕  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的旋转自由度, 6 个自由度可以由管片间连接弹簧的 6 个刚度表示。现有的力学模型中<sup>[15]</sup>, 多考虑旋转弹簧 ( $k_{R0}$ , 即抗弯刚度), 轴向弹簧 ( $k_A$ , 即抗压刚度) 以及径向弹簧 ( $k_R$ , 即抗剪刚度) 对结构力学特性的影响。因此, 本文接头刚度特性主要由这 3 个弹簧表示, 而  $y$  方向的切向弹簧以及绕  $x$ ,  $z$  轴旋转的旋转弹簧设定为刚接。

### 1.3 接头刚度的确定

封坤<sup>[16]</sup>采用自行研制的“多功能原型组合加载试验系统”对狮子洋隧道管片接头进行了抗弯加载试验。本文接头抗弯刚度取值就是基于该实验结果, 先将其简要引述。

图 3 为接头刚度与弯矩、轴力关系图。从图中可以看出, 接头抗弯刚度并非恒定值, 其与弯矩跟轴力水平密切相关。在轴力一定的情况下, 管片接头抗弯刚度随着弯矩  $M$  的增大逐渐减小, 后趋于稳定; 在弯矩一定的情况下, 管片接头刚度随着轴力的增大而增大。

接头的抗剪刚度与抗压刚度随着外荷载的增加也具有一定的非线性<sup>[17]</sup>。文献<sup>[18]</sup>研究表明, 抗剪与抗压刚度的非线性对结构内力的影响可以忽略。因此, 本文在计算中将其取为定值。



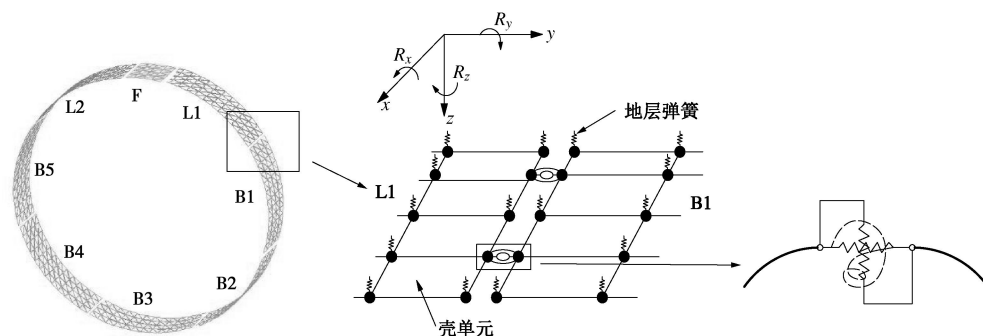
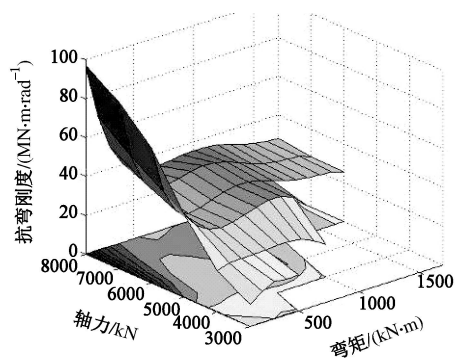


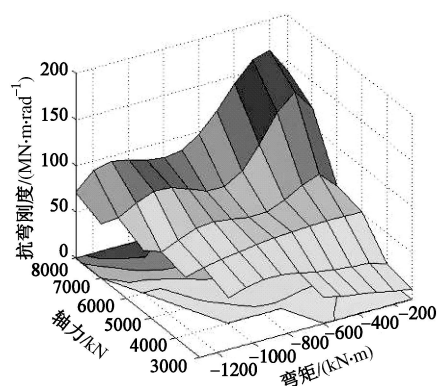
图2 壳-弹簧-接触-地层模型

Fig. 2 Shell-spring-contact-ground model

均质渗透系数。



(a) 正弯矩



(b) 负弯矩

图3 接头刚度与弯矩、轴力关系

Fig. 3 Relationship among rigidity, bending moment and axial force

#### 1.4 渗流的实现

由于结构单元没有水压自由度，不能模拟地下水渗入管片。前人的研究中，渗流的实现多采用以下两种方法：

##### (1) 实体模型法

如图4所示，采用实体单元模拟衬砌，对模型接头处的刚度  $E_j$  进行弱化，使得衬砌圆环整体刚度等于均质圆环刚度  $E_c$ ；然后将盾构隧道的渗流简化为等效渗流的形式，根据给定流量多次试算，得到衬砌的

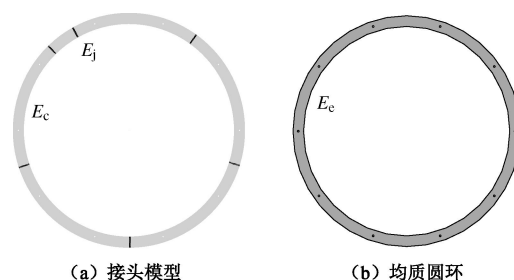


图4 实体模型法

Fig. 4 Entity model

##### (2) 组合模式

隧道开挖之前，与结构单元（此时未激活）相连的实体单元采用土体的力学参数与渗透系数；隧道开挖之后，激活结构单元，此时这部分实体单元的力学参数不变，渗透系数变为衬砌的等效渗透系数<sup>[8]</sup>。

通过分析可知，实体模型法容易设置渗流路径和渗流参数，也是国际隧协推荐的盾构隧道设计方法之一，但其难以反映接头的力学性状；组合模型采用结构单元模拟管片的受力，采用实体单元模拟衬砌的渗流，但由于结构单元处于实体单元内侧，作用在结构单元上的水压力与实际有差别（图5）。

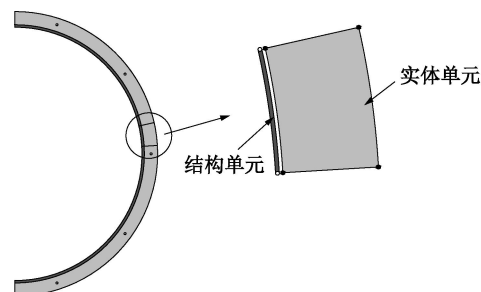


图5 组合模式

Fig. 5 Combination model

在前述方法的基础上，本文提出一种新的模拟方法，即分离模拟法（图6），具体步骤为：

(1) 渗流计算时，管片结构采用均质圆环模型，

在局部接头处设置相应的渗流路径。

(2) 力学计算时, 关闭渗流场, 将均质圆环模型替换为壳-弹簧模型, 迭代计算达到平衡。

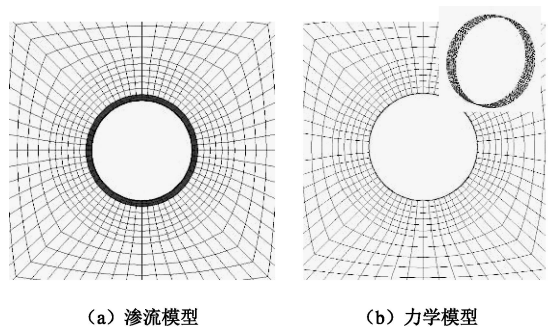


图 6 分离模拟法

Fig. 6 Separation simulation

1.5 接头抗弯刚度非线性及渗流作用算法的实现

本文考虑接头抗弯刚度非线性及渗水影响下盾构隧道力学行为的计算过程见图 7。

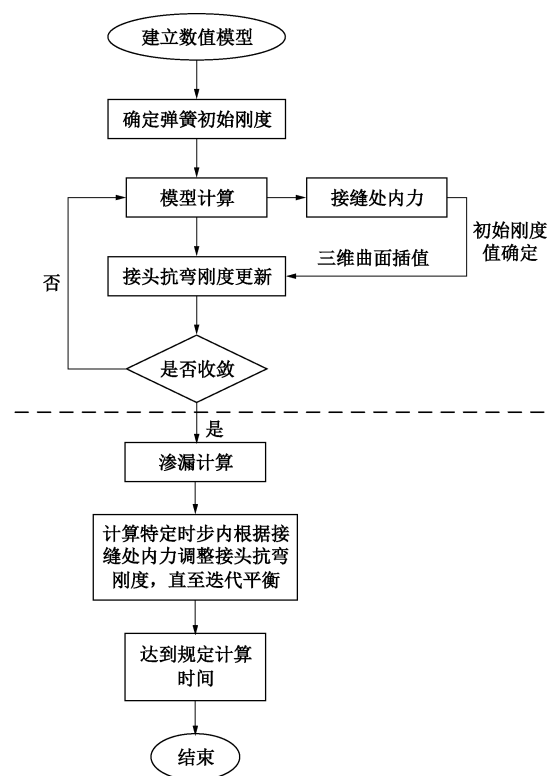


图 7 计算流程图

Fig. 7 Flow chart of calculation

- (1) 确定渗漏计算开始时接头的刚度值
- a) 建立力学模型, 给定接头抗弯刚度初始值, 并带入模型进行计算, 得到接头处管片结构内力。
- b) 将结构内力值带入三维曲面, 双向内插得到更新后的抗弯刚度值, 并将其带入模型进行计算。
- c) 比较第  $j$  步与  $j+1$  步接头抗弯刚度值, 如果两次计算的刚度值逼近, 则退出迭代, 此时刚度值则为

渗漏计算开始时接头刚度值; 若两次刚度值差别较大, 则重新计算。

(2) 渗漏及力学计算

a) 设定渗漏路径, 确定渗流计算时间。

b) 在计算时间步内, 根据接缝处管片内力调整接头抗弯刚度值, 直至达到规定计算时间。

## 2 数值模型的建立

2.1 整体模型的建立

隧道拱顶埋深 25 m, 其中地层采用实体单元, 本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型, 而管片衬砌采用弹性模型。流体采用各项同性渗流模型, 并认为颗粒不可压缩, 即取 Biot 系数  $\alpha=1$ 。土体饱和度取为 1。计算模型见图 8, 围岩参数如表 1 所示。

力学边界条件为: 上表面为自由面, 侧面及底面施加法向约束, 初始地应力取自重力应力。渗流边界条件为: 上表面为透水边界, 水头固定为 10 m, 侧面及底面为不透水边界, 开挖临空面孔隙水压力固定为 0, 初始渗流场取静水压力场。

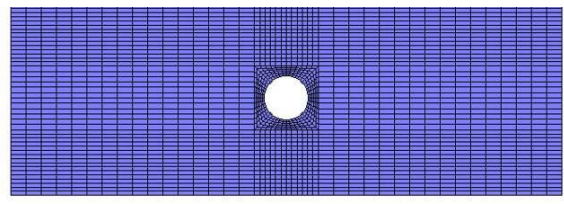


图 8 数值模型

Fig. 8 Numerical model

2.2 接头局部渗透系数的设置

研究接头渗漏位置与流量大小对结构的影响, 隧道的渗水量取为 0.05, 0.1, 0.2 L/(m<sup>2</sup>·d), 接头渗漏位置分别为接头 1, 2, 3, 4, 如图 9 所示。除接头渗漏外, 管片环其余部位均不漏水。根据流量相等原则, 通过试算得到接头的渗透系数如表 2 所示。

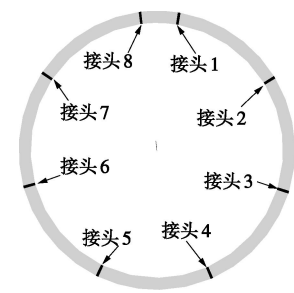


图 9 接头位置图

Fig. 9 Joint position

## 3 计算结果分析

### 3.1 孔隙水压力分布

表 1 围岩参数

Table 1 Parameters of rock							
类别	变形模量 $E_0/\text{MPa}$	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	泊松比 $\mu$	渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	孔隙率 $n$
砾石卵石层	25.0	19.2	5.0	32.0	0.23	12.0000	0.5
黏性土层	5.0	18.8	23.5	12.6	0.33	0.0032	0.5
泥质粉砂岩层	8820.0	26.5	6270.0	35.0	0.15	3.5424	0.1

表 2 工况设置

Table 2 Calculation cases				
工况	渗水位置	渗透系数/(m·d)		
		0.05 L/(m <sup>2</sup> ·d)	0.1 L/(m <sup>2</sup> ·d)	0.2 L/(m <sup>2</sup> ·d)
1	接头 1	$6.5\times 10^{-5}$	$1.9\times 10^{-4}$	$1.0\times 10^{-3}$
2	接头 2	$6.0\times 10^{-5}$	$1.5\times 10^{-4}$	$8.0\times 10^{-4}$
3	接头 3	$5.0\times 10^{-5}$	$1.3\times 10^{-4}$	$5.4\times 10^{-4}$
4	接头 4	$4.7\times 10^{-5}$	$1.1\times 10^{-4}$	$4.0\times 10^{-4}$

图10为不同渗流量及渗漏位置下衬砌背后孔隙水压力分布雷达图,图11为 $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时衬砌外侧水压力展布图及隧道周围孔隙水压力图。通过分析发现,水压力变化存在如下规律:

(1)接头渗水会导致接头附近的孔隙水压明显减小。从图11可以看出,接头1,2,3,4渗水导致接头孔隙水压相对于静水压力分别减小了282.602,289.503,293.51,287.46 kPa。

(2)从图11中隧道周围土体孔隙水压分布云图可以看出,不同接头渗流位置对隧道周围土体孔压分布有较大影响,主要表现在孔隙水压分布形态差异很大。

(3)从图10可以看出,隧道接头渗漏量越大,衬砌外侧水压力减小越多。以接头2渗水为例,当渗漏量为0.05,0.1,0.2 L/(m<sup>2</sup>·d)时,接头2处孔隙水压相对于静水压力分别减小了76.1,146.3,290.6 kPa。

(4)根据孔隙水压减小值与静水压力的比值,将渗水的影响划为3个等级:A为严重影响(当孔隙水压改变值为初始值的30% ( $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )、20% ( $Q=0.1\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )、10% ( $Q=0.05\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )以上);B为一般影响(当孔隙水压改变值为初始值的5%~10%);C为微弱影响(当孔隙水压改变值小于初始值的5%)。

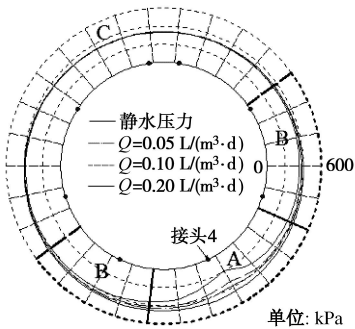
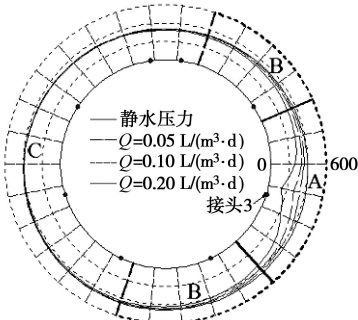
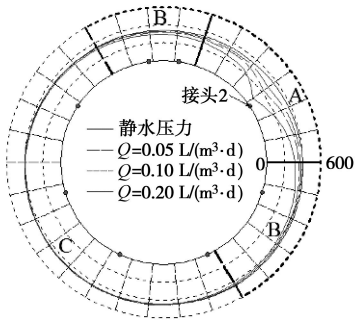
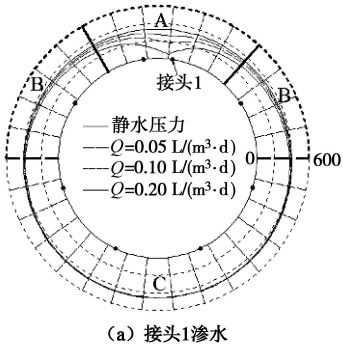


图 10 衬砌背后水压力分布图

Fig. 10 Distribution of water pressure of lining

从图10可以看出,各接头渗水时,影响区域表现出一致性,即以渗水接头为中心,两侧各36°的区域为A区域;与A区域相连,两侧各48°,60°区域为B区域,剩余区域为C区域。

3.2 结构内力分析

渗漏导致衬砌结构所受内力不断发生变化,内力的变化会引起接头刚度的变化,而接头抗弯刚度对结构内力又有较大影响。因此,结构内力的变化是渗流与接头刚度共同作用的结果。

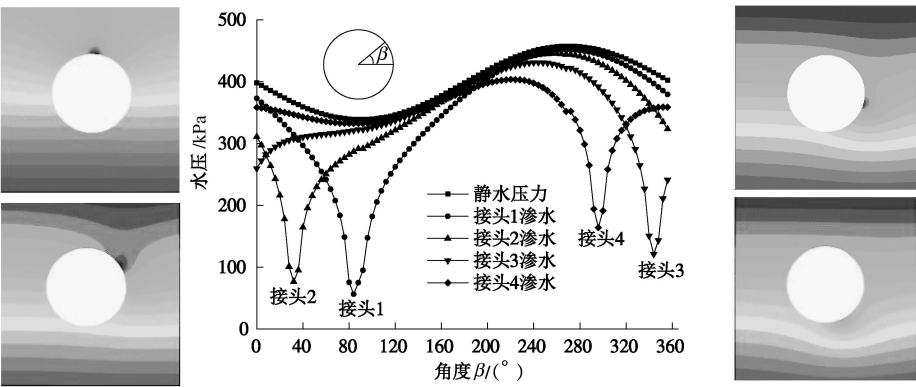


图 11 隧道衬砌外侧水压力 ( $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )

Fig. 11 Water pressures of outside part of lining ( $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )

图12为 $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时结构内力随渗流时间变化曲线,表3为各工况下结构内力值,可以得到如下结论:

(1) 衬砌结构的内力随着渗流时间的增加而增加,当达到稳定渗流状态时,结构内力值趋于稳定,从图12可以看出,隧道达到稳定渗流的时间大致在2000 d左右。

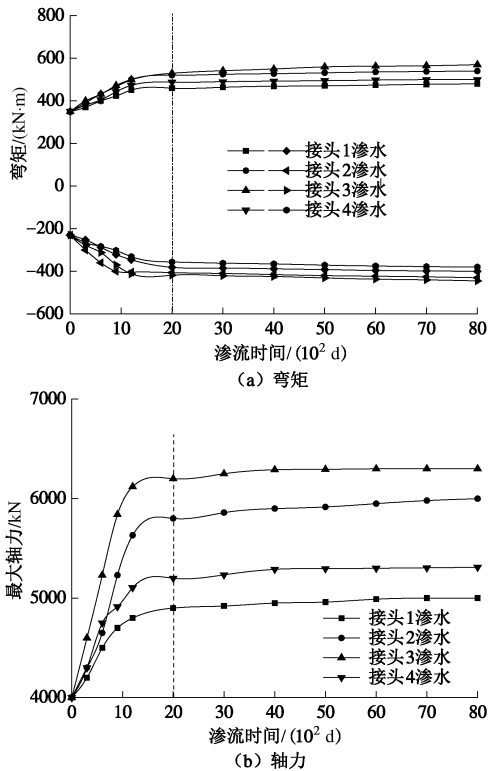


图 12 内力随渗流时间变化曲线( $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )

Fig. 12 Variation of internal force with seepage time ( $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )

(2)综合对比接头不同渗漏位置下结构内力值可知,接头2,3渗漏对结构内力的影响大于接头1,4渗漏的影响。如 $Q=0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,接头2,3渗漏对应的最大正负弯矩分别为542, 574  $\text{kN}\cdot\text{m}$ 和-439, -445  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,最大轴力为6000, 6300  $\text{kN}$ ;而接头1,4渗漏

对应的最大正负弯矩分别为480, 502  $\text{kN}\cdot\text{m}$ 和-403, -380  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,最大轴力为5000, 5310  $\text{kN}$ 。现对其原因分析如下:

对盾构隧道而言,由于其为圆形结构,水压在一定程度上对结构受力有环箍作用。而由于接头渗水,在渗流影响区域内结构的环箍作用减弱,导致结构受力变大。在静水压力下,结构典型受力如图13所示。可以看出,接头1,4处于正弯矩区,而结构2,3处于负弯矩区。因此,环箍力的减弱对2,3的影响大于1,4。

渗漏的力学机理在一定程度上可以与衬砌背后存在注浆缺陷进行类比。张建刚<sup>[19]</sup>对衬砌拱顶、拱肩及拱腰有注浆缺陷下衬砌结构的内力值进行对比分析发现,拱腰注浆缺陷对管片衬砌结构受力为最不利。其3种工况可对分别应于接头1、接头2、接头3渗水,从表3的结果可知,接头3渗水对结构受力最为不利。两者结果具有一定的相似性。

表 3 各种工况下衬砌内力统计表

Table 3 Internal forces under various cases				
渗水位置	渗流量 $/(\text{L}\cdot\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1})$	最大正弯矩 $/(\text{kN}\cdot\text{m})$	最大负弯矩 $/(\text{kN}\cdot\text{m})$	最大轴力 $/\text{kN}$
接头 1	0.05	375	-261	4750
	0.1	412	-308	4820
	0.2	480	-403	5000
接头 2	0.05	405	-283	5600
	0.1	433	-317	5720
	0.2	542	-439	6000
接头 3	0.05	421	-295	6070
	0.1	457	-331	6150
	0.2	574	-445	6300
接头 4	0.05	386	-252	4985
	0.1	425	-287	5040
	0.2	502	-380	5310

相同接头位置渗漏情况下,结构受力随着渗流量的增加而增加,以接头2渗漏为例,当渗流量为0.05, 0.1, 0.2  $\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,结构的最大轴力增加量为初始状态的40%, 43%, 50%,最大正弯矩增加量分别为初

始状态的15.7%, 23.7%, 54.8%, 最大负弯矩增加量分别为初始状态的18.7%, 37.8%, 90.8%。

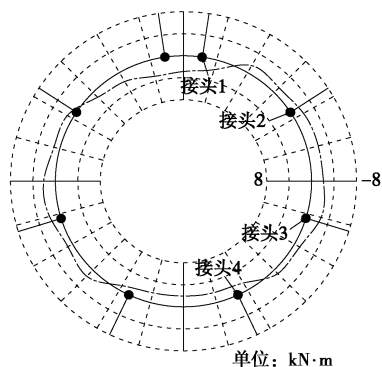


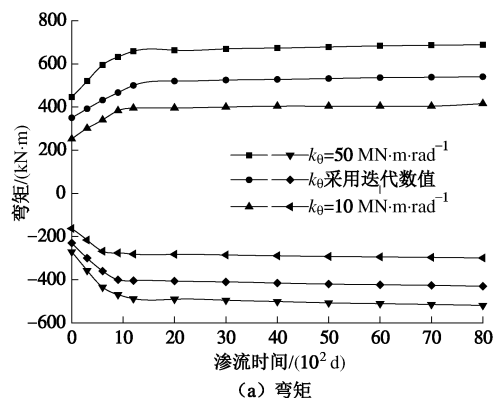
图 13 静水压力下结构弯矩图

Fig. 13 Bending moments under hydrostatic pressure

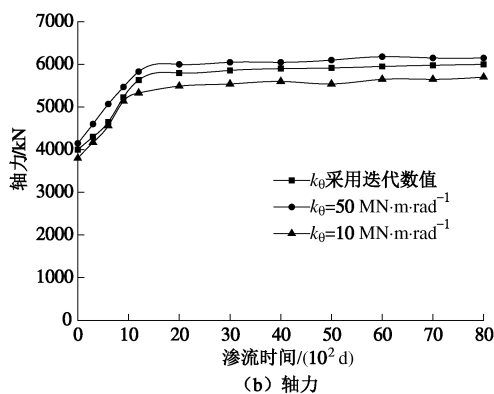
图14为 $Q=0.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 采用刚度迭代算法与刚度恒定算法的结构内力比较结果。迭代算法的初始刚度取为 $10 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ , 恒定算法的刚度分别取为10,  $50 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 。从图中可以得出以下结论:

(1) 接头抗弯刚度对结构弯矩影响较大, 而对轴力影响较小。

(2) 保持接头刚度不变, 结构内力也随着渗流时间的增加而增加, 说明了管片渗漏过程中, 存在着渗流与接头刚度的耦合作用。



(a) 弯矩



(b) 轴力

图 14 接头抗弯刚度对结构受力影响

Fig. 14 Influence of flexural rigidity of joints on internal force

(3) 在渗流计算时间内, 恒定算法中, 当接头刚度取为 $50 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 时, 结构内力值一直大于迭代算法; 当接头刚度取为 $10 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 时, 结构内力值一直小于迭代算法。下面对其原因进行分析:

图15为 $Q=0.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时接头2抗弯刚度随渗流时间变化图, 可以看出, 随着渗流时间的增加, 接头的抗弯刚度不断增大, 从 $10 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 增加至 $35.22 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 。其值在计算过程中一直大于 $10 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 且小于 $50 \text{ MN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ , 因此出现上述结果。

由前述结果可知, 接头抗弯刚度、渗流量以及渗流位置3个因素对结构的内力都有较大的影响。现以接头2渗漏且 $Q=0.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 为例, 对其敏感性进行比较, 结果如图16所示。图16中, 纵坐标比值为各种工况下计算结果与基准值的比值。其中红色柱状体为基准值, 即接头2渗漏、采用迭代算法且 $Q=0.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时的值。可以看出, 接头刚度对结构内力影响最为显著, 其次为渗流量, 而渗流位置的影响最小。

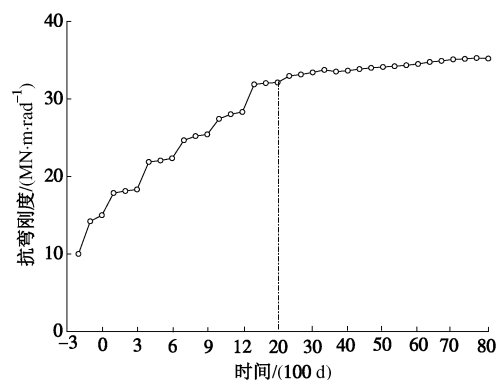


图 15 接头 2 抗弯刚度随渗流时间变化

Fig. 15 Variation of flexural rigidity of joint 2 with seepage time

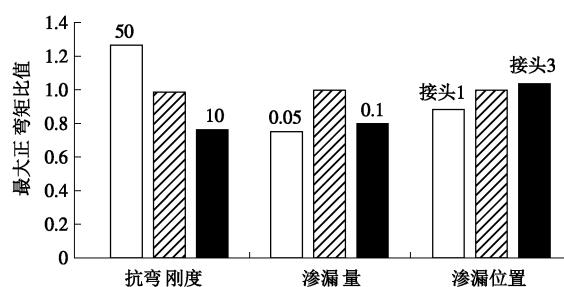


图 16 敏感性分析

Fig. 16 Sensitivity analysis

#### 4 复合地层条件下渗流影响分析

狮子洋隧道在开挖方向上存在着多种不同性质地层组成的复合地层<sup>[20]</sup>。文献[21]采用模型实验, 对狮子洋隧道在粉质砂土与泥质粉砂岩交替地层情况下, 衬砌纵向不均匀沉降和管片纵向弯矩的大小进行了研究。结果发现, 隧道处于软硬交界地层中时, 较大的



沉降量与弯矩均发生在软土侧。隧道的纵向不均匀变形导致横断面上侧与下侧接缝变形向着不同方向发展。隧道在下凸变形部位会出现下侧接缝张大, 上侧接缝变小, 导致隧道下侧渗流加重; 反之会出现上侧渗漏加重。因此, 本节的模拟分为两种工况: ①隧道上半部分接头渗漏, 下半部分接头不渗漏; ②隧道上半部分接头不渗漏, 下半部分接头渗漏。流量均取为  $0.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

图17为计算得到的孔隙水压力图, 从图中可以看出, 隧道上、下部分渗水时, 隧道周围孔隙水压及衬砌结构所受水压力差异很大。隧道上部分渗水时, 衬砌外侧水压力分布总体上为一正弦曲线; 而当隧道下部分渗水时, 衬砌外侧水压力分布总体较为均匀, 仅在4个渗漏接头处形成4个峰谷点。

将图17与图11对比可以发现, 当渗水只发生在一处接头时, 接头周围的孔隙水压力减小非常明显; 而当渗流发生在多处接头时, 各接头处孔隙水压减小值均低于一处接头。

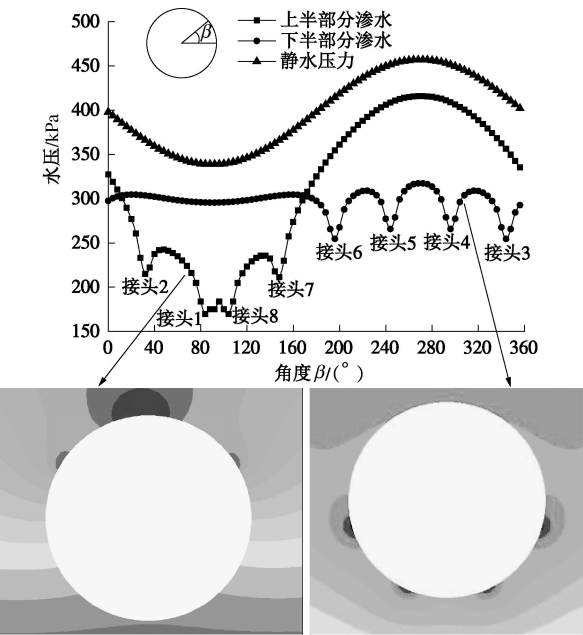


图 17 孔隙水压力图

Fig. 17 Pore water pressure

表4为3种工况下统计的结构内力, 可以看出, 上半部分渗水与下半部分渗水情况下, 结构的内力值都有很大变化, 且上半部分渗水对结构内力影响更为显著。

图18为衬砌结构内力图, 可以看出, 渗漏对结构弯矩及轴力分布形态有一定影响。从图18 (a) 可知, 与静水压力工况相比, 上半部分渗水导致结构上侧正弯区域增加, 下半部分渗水导致结构下侧正弯区域增加。从18 (b) 可知, 静水压力工况下, 结构轴力全环

分布较为均匀, 而两种渗水工况下, 轴力沿全环分布不均, 渗漏侧轴力平均值小于非渗漏侧轴力, 对管片结构受力不利。

表 4 内力统计表

Table 4 Interanal forces				
渗水位置	最大正弯矩 /(kN·m)	最大负弯矩 /(kN·m)	最大轴力 /kN	最小轴力 /kN
未渗水	350	-230	4100	3820
上半部渗水	573	-382	7380	3250
下半部渗水	405	-363	7980	3950

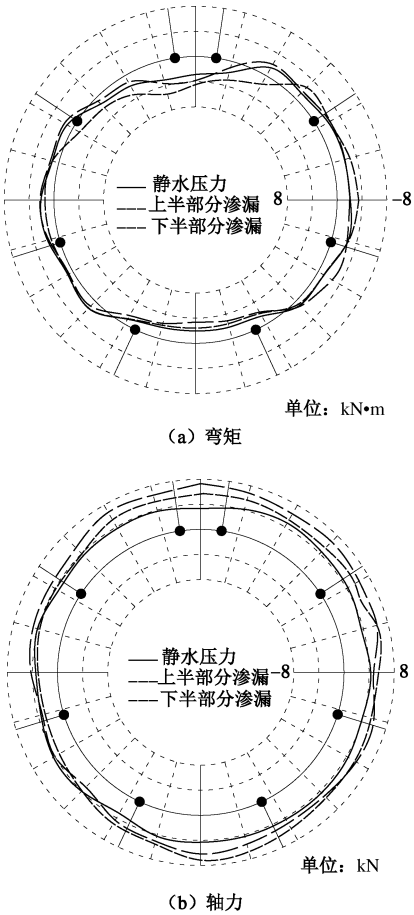


图 18 衬砌结构内力图

Fig. 18 Internal forces of lining

5 结论及讨论

提出一种组合模拟方法, 即渗流计算时, 管片结构采用均质圆环模型, 在局部接头处设置相应的渗流路径; 在力学计算时, 关闭渗流场, 将管片结构的均质圆环模型替换为考虑接头抗弯刚度非线性的壳-弹簧-接触-地层模型, 迭代计算达到平衡。采用该方法对接头不同渗流量及渗漏位置情况下, 隧道周围孔隙水压力分布规律及结构的力学行为进行了对比分析, 得到以下结论:

(1) 渗漏量越大, 孔隙水压力降低越明显, 结构

内力变化越显著,且拱腰附近接头渗水对结构内力的影响程度大于拱顶与拱底附近接头渗水。

(2) 各接头渗水时,其划分的影响区域表现出一致性,即以渗水接头为中心,两侧各  $36^\circ$  的区域为严重影响区域;与严重影响区域相连,两侧各  $48^\circ$ ,  $60^\circ$  区域为一般影响区域,剩余区域为微弱影响区域。

(3) 接头抗弯刚度、渗流量以及渗漏位置对结构的内力都有较大的影响。通过敏感性分析发现,接头刚度对结构内力影响最为显著,其次为渗流量,而渗漏位置的影响最小。

(4) 复合地层情况下,与静水压力工况相比,上半部分渗水导致结构上侧正弯区域增加,下半部分渗水导致结构下侧正弯区域增加,且轴力沿全环分布不均,渗漏侧轴力平均值小于非渗漏侧轴力,对管片结构受力不利。

(5) 渗漏对水压力分布的大小或程度的影响与周边土层的性质相关联,如渗透系数。以接头 1 渗水为例,笔者比较了 3 种地层渗透系数情况下水压力的分布情况。即在原文工况的基础上,渗透系数增大 10 倍、100 倍。假定接头渗透系数不变,得到的孔隙水压力分布如图 19 所示。从图中可以看出,若周边土层渗透系数很大,渗漏的水量很快得到补充,则对水压力分布的影响就较小,相应的对结构受力影响也就更小。

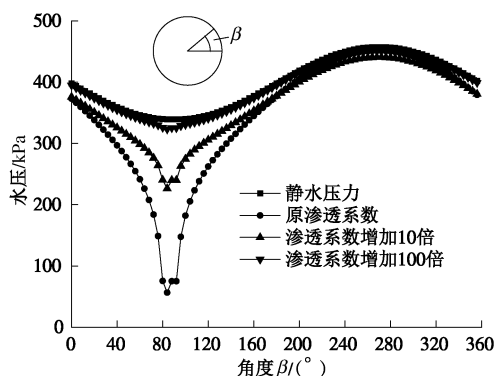


图 19 孔隙水压力比较

Fig. 19 Comparison of pore water pressure

因此,在实际工程中,要结合具体的地层进行针对性分析。

#### 参考文献:

[1] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming. Shielded tunnelling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))

[2] 张冬梅, 黄宏伟, 杨俊. 衬砌局部渗流对软土隧道地表长期沉降的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1430 - 1436. (ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei, YANG Jun. Influence of partial drainage of linings on long-term surface settlement over tunnels in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1430 - 1436. (in Chinese))

[3] 刘印, 张冬梅, 黄宏伟. 盾构隧道局部长期渗漏水对隧道变形及地表沉降的影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 291 - 304. (LIU Yin, ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Influence of long-term partial drainage of shield tunnel on tunnel deformation and surface settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 291 - 304. (in Chinese)).

[4] MAIR R J. Tunnelling and geotechnics: new horizons[J]. Géotechnique, 2008, 58(9): 695 - 736.

[5] SHIN J H.A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behavior[J]. Géotechnique, 2002, 52(6): 391 - 403.

[6] 潘昌实, 译. 国际隧协小组研究报告-盾构隧道衬砌设计指南(草案)[J]. 世界隧道, 1997(2): 19 - 29. (PAN Cang-shi. ITA-Working Group Research-Design guidelines of shield tunnel lining (draft)[J]. World tunneling, 1997(2): 19 - 29. (in Chinese))

[7] 王志良. 上海运营地铁盾构法隧道变形特性及其结构性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2010: 15 - 40. (WANG Zhi-liang. Study on deformation and structure characteristics of operation shield tunnel in Shanghai metro[D]. Shanghai: Tongji University, 2010: 15 - 40. (in Chinese))

[8] WONGSAROJ, SOGA K, MAIR R J. Modelling of long-term ground response to tunneling under St James's Park, London[J]. Géotechnique, 2007, 57(1): 75 - 90.

[9] 黄宏伟, 刘印, 张冬梅. 盾构隧道长期渗水对地表沉降及管片内力的影响[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(6): 36 - 43. (HUANG Hong-wei, LIU Yin, ZHANG Dong-mei. Influence of long-term seepage of shield tunnel on inner force of segments and ground surface settlement[J]. China Railway Science, 2012, 33(6): 36 - 43. (in Chinese))

[10] LI X, FLORES-BERRONES R. Time-dependent behavior of partially sealed circular tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29: 433 - 449.

[11] 陈俊生, 莫海鸿. 盾构隧道管片接头抗弯刚度的三维数值计算[J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 87 - 91. (CHEN Jun-sheng, MO Hai-hong. Three dimensional FEM analysis on flexural rigidity of segment joints in shield tunnel[J]. Journal of the

- China Railway Society, 2009, **31**(4): 87 - 91. (in Chinese))
- [12] 闫治国, 丁文其, 沈碧伟, 等. 输水盾构隧道管片接头力学与变形模型研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1185 - 1191. (YAN Zhi-guo, DING Wen-qi, SHEN Bi-wei, et al. Structural model for radial joints of water-conveyance shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1185 - 1191. (in Chinese))
- [13] 朱 伟, 译. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 15 - 36. (ZU Wei, tran. Specification for tunnel (shield) and commentary[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006: 15 - 36. (in Chinese))
- [14] Itasca Consulting Group. Inc FLAC3D User's Manual, Version3.0[R]. Itasca Consulting Group, 2004.
- [15] 何 川, 张建刚, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 83 - 89. (HE Chuan, ZHANG Jian-gang, SU Zong-xian. Study on mechanical properties of underwater shield tunnel with large section[M]. Beijing: Science Press, 2010: 83 - 89. (in Chinese))
- [16] 封 坤. 大型水下盾构隧道管片衬砌结构力学性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 32 - 65. (FENG Kun. Research on mechanical behavior of segmental lining structure of underwater shield tunnel with large cross-section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 32 - 65. (in Chinese))
- [17] CAVALARO S.H.P, AGUADO A. Packer behavior under simple and coupled stresses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **28**: 159 - 173.
- [18] Ngoc-Anh Do, Daniel Dias, Pierpaolo Oreste, et al. 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **37**: 115 - 127.
- [19] 张建刚. 大断面水下盾构隧道的相似模型试验及结构内力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 145 - 150. (ZHANG Jian-gang The model test and structural internal force analysis of large section underwater tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008: 145 - 150. (in Chinese))
- [20] 竺维彬, 鞠世健. 复合地层中的盾构施工技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 1 - 20. (ZHU Wei-bing, JU Shi-jian. Shield construction technology in complex stratum[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2006: 1 - 20. (in Chinese))
- [21] 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: 104 - 112. (ZHOU Ji-min. Research on mechanical behavior of double-layer lining structure for underwater shield tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 104 - 112. (in Chinese))