

# 高水压岩质盾构隧道施工期结构内力分析

夏炜洋<sup>1</sup>, 何 川<sup>1</sup>, 晏启祥<sup>1</sup>, 谢红强<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 地下工程系, 四川 成都 610031; 2. 四川大学 水力水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 在使用大型跨江海盾构法进行水下隧道施工时, 主要存在的流固耦合问题是: 掘进过程中引起的流固耦合效应对管片结构内力的改变。结合重庆主城排水过长江盾构隧道工程, 选取典型断面, 按连续介质理论, 采用有限元数值模拟手段进行分析。对该典型断面采取水土合算和考虑耦合效应 2 种方式来计算管片结构内力分布, 并和现场实测数据进行验证。研究表明, 在水下盾构法施工期间, 管片截面最大内力出现在刚拼装完时, 长期地下水渗流会减小管片截面内力。从流固耦合角度来研究管片结构受力特征, 可为类似的工程设计及施工提供有益的参考。

**关键词:** 隧道工程; 盾构法; 高水压; 流固耦合; 管片内力

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3727 - 05

## STRUCTURAL INTERNAL FORCE ANALYSIS OF ROCK SHIELD TUNNEL UNDER HIGH WATER PRESSURE DURING CONSTRUCTION

XIA Weiyang<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, YAN Qixiang<sup>1</sup>, XIE Hongqiang<sup>2</sup>

(1. Department of Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. College of Water Resources and Waterpower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract:** There are many hot issues about solid-fluid coupling during the construction of large-scale shield tunnel beneath river or sea. The solid-fluid coupling effect on segments internal force in the process tunnel excavation is the main issue. According to the continuum theory, finite element analysis is adopted for a drain tunnel project crossing Yangtze River in the downtown of Chongqing City. Study on segment internal force distributing by two methods is carried out. One is considering water load combined with soil load, another is considering coupled effects. The result is verified by in-situ data. The calculation results show that internal forces of segments are different during shield tunnel construction. The internal forces of segments reach maximum values at the time of assemble completed, while the value will decrease for the long-term groundwater seepage. Mechanical characteristics of segment and structure are also studied, and shield tunnel construction parameters have close relationship with solid-fluid coupling. The achieved results can provide references to the design and construction of similar engineering cases.

**Key words:** tunneling engineering; shield method; high water press; solid-fluid coupling; internal forces of segment

## 1 引言

由于水下隧道处于江海水底, 尤其是在复杂的

工程地质和水文地质环境当中, 隧道多处于不同渗流场体以及高水压作用下, 因此盾构施工过程中掘进参数及结构受力体系的流固耦合问题将表现尤为突出。在隧道工程的流固耦合方面, 目前国内外开

**收稿日期:** 2007 - 06 - 14; **修回日期:** 2007 - 07 - 25

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA11Z116)

**作者简介:** 夏炜洋(1975 -), 男, 1996年毕业于西南交通大学工程力学系工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事盾构法隧道方面的研究工作。E-mail: wyxia2002@tom.com

展的工作集中在于围岩渗透率<sup>[1]</sup>、孔隙水压力的分布规律<sup>[2~4]</sup>及涌水量的预测上<sup>[5~7]</sup>。但是对于大型跨江海盾构隧道的流固耦合问题研究，目前仅有少许报道<sup>[8~10]</sup>。对于水下隧道所承受的水荷载计算<sup>[11]</sup>主要有水土分算和水土合算2种计算模式，这2种模式都是将岩土和水作为独立的体系来对待，而没有作为一个耦合体系来对待，这将导致由于取值标准的不同而带来不同的计算结果。从流固耦合理论角度来研究盾构施工参数和管片结构受力特征，具有很大的现实工程意义。

在大型跨江海盾构法水下隧道施工期间，主要存在的流固耦合问题是：掘进过程中引起的流固耦合效应对管片结构内力的改变。在盾构施工期，当围压即时作用在管片衬砌上时，水压却因为回升滞后的原因只作用上去相对较小的一部分，这一现实导致了施工期管片衬砌外荷载是个变化的过程，相应的管片结构内力也会改变，这就是盾构施工期面临的典型流固耦合现象。图1为施工过程中流固耦合形成的概念图。

重庆主城排水工程中的太平门—海棠溪穿越长江隧道受地质条件、水文条件及工期的控制，选择采用盾构施工法修建。隧道将主要穿越地层的软硬程度差异极大，砂岩和泥岩层单轴抗压强度为7.3~69.4 MPa，隧道顶部与长江最高水位差60 m，在施工及使用阶段隧道均将承受极高的水压。

结合该工程项目，本文采用大型有限元程序，对施工期盾构隧道围岩及主体结构的渗流场和应力场进行了二维流固耦合分析，研究高水压作用下盾

构隧道围岩及主体结构的流固耦合问题。

## 2 应力场和渗流场耦合的数值解法

在应力场影响下的渗流场数学模型<sup>[12~15]</sup>为

$$[K]\{\phi\} + \{Q\} = [S] \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

式中： $[K]$ 为总渗透矩阵， $\{Q\}$ 为源(汇)项列阵， $[S]$ 为贮水矩阵， $\{\phi\}$ 为地下水水头列阵。

渗流影响下的应力场数学模型为

$$\{\sigma\} = [D][\{\varepsilon\} + \{\Delta\varepsilon_v\}] \quad (2)$$

式中： $\{\sigma\}$ 为岩体的应力列阵； $\{\varepsilon\}$ 为不考虑渗透压力的应变列阵； $\{\Delta\varepsilon_v\}$ 为渗透水压力引起岩体变形的应变列阵； $[D]$ 为弹性矩阵，可表示为

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & A & A & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & A & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \text{对} & B & 0 \\ & & & & \text{称} & B \\ & & & & & B \end{bmatrix} \quad (3a)$$

其中，

$$A = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad B = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (3b)$$

式中： $\nu$ 为材料泊松比。

应力场是通过影响土体的体积应变和孔隙率而影响土体的渗透性，从而最终影响渗流场，这就是应力场对渗流场的影响机制。应力场和渗流场耦合的表达式为

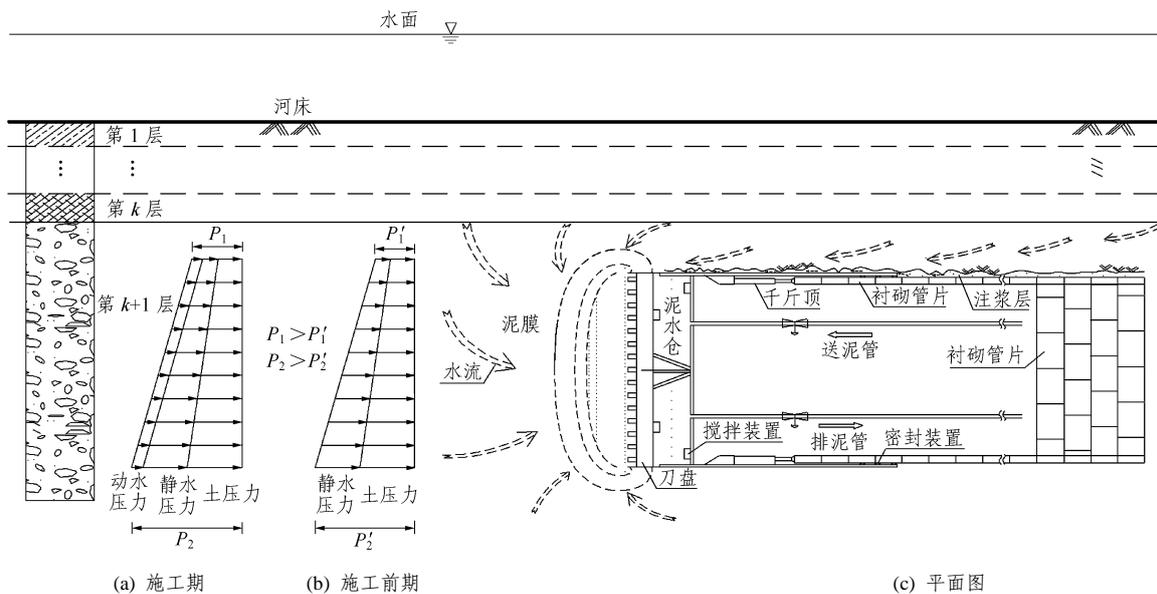


图1 泥水盾构施工过程中流固耦合的概念图

Fig.1 Concept figure of coupled solid-fluid during construction of slurry shield

$$\Delta\varepsilon_v = \frac{n}{E_w} \Delta P = \frac{n\gamma}{E_w} \Delta\phi \quad (4)$$

$$\Delta P = \frac{E_w}{n} \Delta\varepsilon_v \quad (5)$$

式中:  $P$  为单元体中地下水的渗透压强,  $\phi$  为地下水水头,  $\Delta P$  可表示为

$$\Delta P = \gamma\Delta\phi \quad (6)$$

耦合计算的思路是: 由式(1)求得初始应力场下的  $\Delta P$ , 代入式(4)可求得水头变化引起的岩体变形量, 再代入式(2)可求得渗流场影响下的应力场。根据所得的  $\{\sigma\}$ , 按弹性力学方法求解考虑渗透水压力的应变值和体应变增量  $\Delta\varepsilon_v$ , 再把求得的  $\Delta\varepsilon_v$  代入式(5)计算  $\Delta P$ , 该  $\Delta P$  是由于应力场改变引起岩体系统内水头压力的改变。如此迭代即形成渗流场与应力场耦合的耦合问题, 当给定迭代精度时, 可分别求得应力场作用下的渗流场和渗流场作用下的应力场。

### 3 施工期管片结构内力变化规律

#### 3.1 数值计算模拟

盾构法施工的特点是盾构前方进行开挖的同时, 盾尾及时进行管片拼装, 因而围岩开挖后在不长的时间内就和管片共同作用。当土压力作用在管片衬砌上时, 水压却因为回升滞后的原因只作用相对较小的一部分, 这一现实导致了施工期管片衬砌外荷载不同于运营期, 容易引起管片弯矩变大, 截面偏心加剧等不利工作状态。

根据太平门—海棠溪长江隧道工程地质详勘报告和 design 图并参考相关资料, 选取有代表意义的典型断面进行分析, 考虑到与现场测试断面进行比较, 确定断面 K0+397.5 进行研究。有限元模型见图 2。围岩及结构的物理力学参数见表 1。

计算中考虑了 2 种工况: 工况 1 为管片刚拼装完成水压还没作用上去的情况; 工况 2 为一段时间后水压作用在管片上的情况。对于工况 1, 管片承受地层压力和静水压力; 对于工况 2, 地下水经过一段时间, 通过连续介质的渗透性, 已经渗透至管片附近, 管片是在渗流场与应力场耦合情况下的受力。计算过程中, 根据现场实测水位, 确定地层顶部距水面为 39.75 m。

#### 3.2 计算结果分析

图 3, 4 分别为工况 1, 2 情况下的管片弯矩和轴力图。

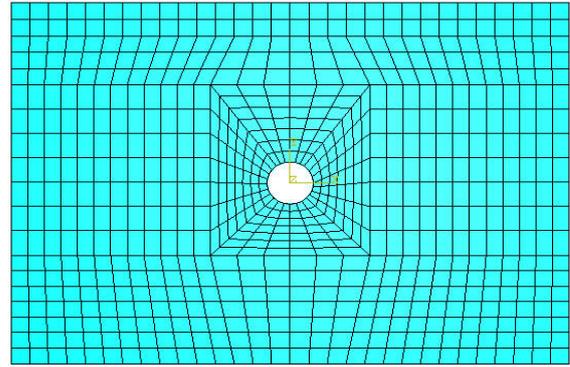


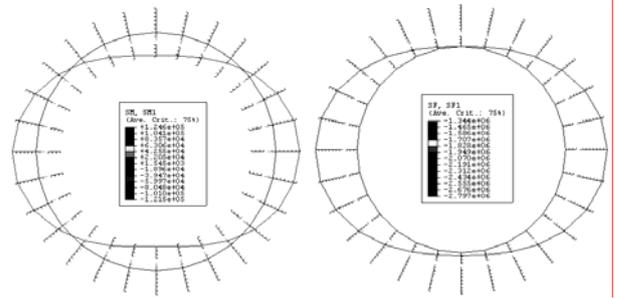
图 2 盾构隧道有限元模型

Fig.2 Finite element model of shield tunnel

表 1 岩体及结构物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses and structure

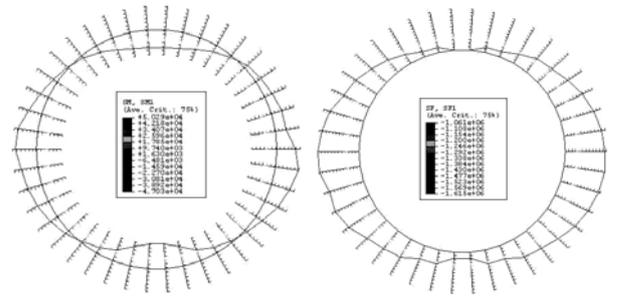
介质	$\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E$ /GPa	$\nu$	$c$ /MPa	$\phi(^{\circ})$	$K$ /( $10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
卵石土	20.0	0.40	0.40	0.02	30	100.000 0
泥岩	25.2	6.36	0.33	1.85	32	0.020 0
砂岩	26.5	8.82	0.15	6.27	35	4.100 0
C50 混凝土	26.0	34.5	0.20	-	-	0.000 1



(a) 弯矩(单位:  $\text{N} \cdot \text{m}$ ) (b) 轴力(单位:  $\text{N}$ )

图 3 工况 1 管片弯矩和轴力分布

Fig.3 Distributing of segment bending moments and axial forces during construction of case 1



(a) 弯矩(单位:  $\text{N} \cdot \text{m}$ ) (b) 轴力(单位:  $\text{N}$ )

图 4 工况 2 管片弯矩和轴力分布

Fig.4 Distributing of segment bending moments and axial forces during construction of case 2

比较管片的结构内力, 可以得出: 在结构内力

分布规律上, 只考虑静水压和考虑耦合作用的 2 种工况下管片的内力分布规律是相同的, 只是在量值上二者大小不同。工况 1 的最大正弯矩和最小负弯矩的值分别为 125 和 -121 kN·m, 而考虑耦合效益的工况 2 的最大正弯矩和最小负弯矩的值分别为 50 和 -47 kN·m, 前者的值约为后者的 2.5 倍。在工况 1 下, 轴力的最大值是 2 797 kN(压力), 而工况 2 下轴力的最大值是 1 615 kN(压力), 前者值约为后者值 2 倍。

### 4 现场试验对比

通过在管片对应内外侧同时安装混凝土应变仪来换算管片的内力值及分布规律, 图 5 为混凝土应变仪(YB)的测点布置图; 图 6, 7 分别为管片在刚拼装完后及开挖到前方 220 m 处时的管片环向弯矩和轴力图。

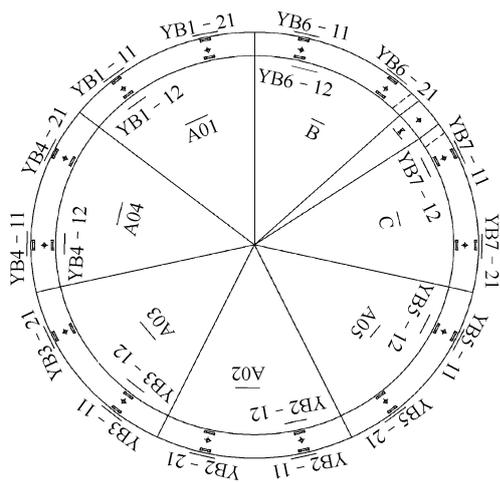


图 5 混凝土应变仪(YB)的测点布置图  
Fig.5 Layout of test position of concrete strain gauge(YB)

管片结构弯矩的环向分布接近于顶部为正弯矩, 腰部为负弯矩, 弯矩值为 -150~191 kN·m, 计算结果为 -121~125 kN·m, 与计算结果相比, 数值在同一量级上。随着开挖进程, 即经过一段时间后, 当隧道开挖至前方 220 m 处时, 地下水压力基本作用在管片结构上, 相应的管片弯矩表现出明显的减小, 与计算工况 2 的趋势类似。

管片轴力沿管片环向分布以受压为主, 只在个别点上出现受拉现象, 轴力范围为 -129~3 710 kN, 计算结果为 1 300~2 800 kN, 两者误差大些。对于图 7 中 2 种水位下轴力分布, 在长期水压作用下应该是水位越高而轴力越大, 但试验数据表明了

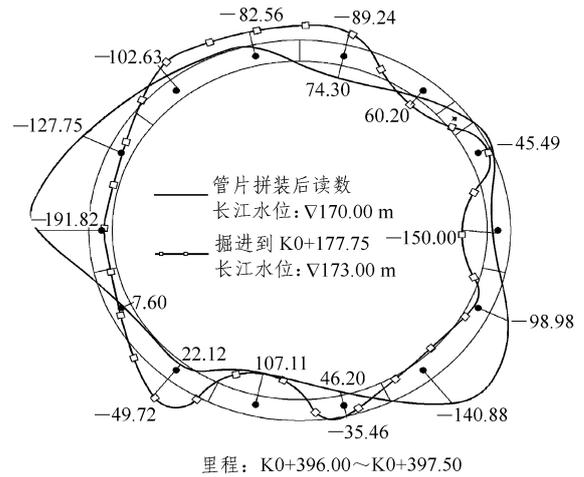


图 6 管片弯矩沿环向分布曲线(单位: kN·m)  
Fig.6 Distributing curves of segment bending moments along ring direction(unit: kN·m)

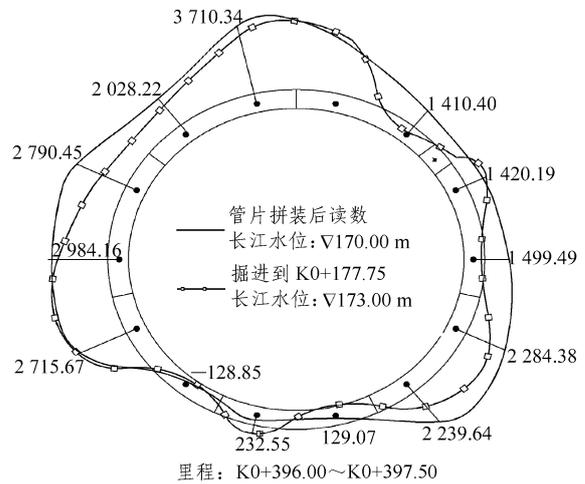


图 7 管片轴力沿环向分布曲线(单位: kN)  
Fig.7 Distributing curves of segment axial forces along ring direction(unit: kN)

刚刚拼装完的管片水压还没有立即作用上去的情况下反而承受的更大的轴力。随着施工延续和地下水的渗流, 轴力在管片断面上的分布愈来愈趋于均匀, 轴力也数值上也开始变小, 这种变化趋势和数值模拟的结果类似。

比较现场试验所测和数值模拟的弯矩和轴力图, 可以看出二者在分布规律上有较大的相似性, 但在某些值上有一定的偏差, 这主要是由于现场试验的复杂性和管片拼装中接头影响而引起的。

### 5 结 论

重庆长江排水盾构隧道施工期主要存在的流固

耦合问题是掘进过程中引起的流固耦合效应对管片结构内力的改变, 通过对该问题进行模拟分析, 可以得出如下结论:

(1) 在水下盾构法隧道施工过程中, 由于围岩的多样性、复杂性, 地下水在开挖后其渗流是一个时间的过程, 相应的管片结构内力是一个变化的过程, 随着施工的进程, 其值呈下降的趋势。

(2) 在一定时间内, 刚拼装完的管片主要承受围压, 虽然管片没有直接承受水压, 但其实际内力值是更不利于结构安全的。

(3) 通过计算得到施工初期管片的结构内力比开挖一定距离后的管片结构内力大 2 倍左右。这说明在进行管片结构设计时, 应按施工初期的最不利工况下的结构受力来进行管片截面设计。

### 参考文献(References):

- [1] KELSALL P C, CASE J B, CHABANNES C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(3): 123 - 135.
- [2] YI X, KERRY R R, LEE K M. Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth balance shield[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(3): 476 - 490.
- [3] ABU-FARSAKH M Y, VOYIADJIS G Z. Computational model for the simulation of the shield tunneling process in cohesive soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1999, 23(1): 23 - 44.
- [4] SHIN J H, ADDENBROOKE T I, POTTS D M. A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(6): 391 - 403.
- [5] ZHANG L, FRANKLIN J A. Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(1): 37 - 46.
- [6] 黄涛, 杨立中. 渗流与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量的预测研究[J]. *铁道学报*, 1999, 21(6): 75 - 80.(HUANG Tao, YANG Lizhong. A prediction study of water-gush yield in fractured tunnels under coupling between seepage and stress[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1999, 21(6): 75 - 80.(in Chinese))
- [7] 王建秀, 朱合华, 叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(7): 1 150 - 1 153.(WANG Jianxiu, ZHU Hehua, YE Weimin. Forward and inverse analyses of water flow into tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(7): 1 150 - 1 153.(in Chinese))
- [8] 李宗利, 任青文, 王亚红. 考虑渗流场影响深埋圆形隧洞的弹塑性解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1 291 - 1 295.(LI Zongli, REN Qingwen, WANG Yahong. Elastoplastic analytical solution of deep-buried circle tunnel considering fluid flow field[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1 291 - 1 295.(in Chinese))
- [9] 陈卫忠, 杨建平, 杨家岭, 等. 裂隙岩体应力渗流耦合模型在压力隧洞工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2 384 - 2391.(CHEN Weizhong, YANG Jianping, YANG Jialing, et al. Hydromechanical coupled model of jointed rock mass and its application to pressure tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2 384 - 2 391.(in Chinese))
- [10] 李廷春, 李术才, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(3): 397 - 401.(LI Tingchun, LI Shucai, CHEN Weizhong, et al. Coupled fluid-mechanical analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(3): 397 - 401.(in Chinese))
- [11] 杨林德, 丁文其. 渗水高压引水隧道衬砌的设计研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(2): 112 - 117.(YANG Linde, DING Wenqi. A study on the design of permeable R. C. lining in high pressure water carriage tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(2): 112 - 117.(in Chinese))
- [12] 仵彦卿, 张俦元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.(WU Yanqing, ZHANG Zuoyuan. *Introduction to rock mass hydraulic theory*[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994.(in Chinese))
- [13] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.(ZHANG Youtian. *Rock hydraulics and engineering*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.(in Chinese))
- [14] 仵彦卿, 曹广祝, 丁卫华. CT 尺度砂岩渗流与应力关系试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(23): 4 203 - 4 209.(WU Yanqing, CAO Guangzhu, DING Weihua. Experimental study on relation between seepage and stress of sandstone in CT scale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(23): 4 203 - 4 209.(in Chinese))
- [15] 王媛, 速宝玉, 徐志英. 等效连续裂隙岩体渗流与应力全耦合分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 1998, 26(2): 26 - 30.(WANG Yuan, SU Baoyu, XU Zhiying. Coupling analysis of seepage and stress in multi-fractured rock masses[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science)*, 1998, 26(2): 26 - 30.(in Chinese))