

压力隧洞内水外渗的渗流-应力-开裂耦合分析

胡云进¹, 方镜平¹, 黄东军², 冯仕能², 苏项庭³

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 华东勘测设计研究院, 杭州 310014;
3. 浙江省建筑设计研究院, 杭州 310006)

摘要: 针对压力隧洞内水外渗分析缺乏完善的渗流-应力-开裂耦合分析模型现状, 基于传统的黏结裂缝模型, 提出了能进行渗流分析的黏结裂缝单元模型. 应用 Biot 固结理论和内水荷载施加的体力理论, 建立了压力隧洞内水外渗的渗流-应力-开裂耦合分析模型. 选择典型的圆形断面压力隧洞进行了内水外渗的渗流-应力-开裂耦合模拟分析. 计算结果与实测资料的定性对比表明, 该模型是合理可行的, 可用于压力隧洞内水外渗的渗流-应力-开裂耦合分析.

关键词: 压力隧洞; 内水外渗; 黏结裂缝单元; 耦合分析

中图分类号: TV 554

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)02-0174-06

Coupling Analysis of Seepage-Stress-Cracking for Inner Water Exosmosis of Pressure Tunnel

HU Yun-jin¹, FANG Jing-ping¹, HUANG Dong-jun², FENG Shi-neng², SU Xiang-ting³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. East China Investigation and Design Institute, Hangzhou 310014, China;
3. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Aimed at the lack of perfect seepage-stress-cracking coupling analysis model in simulating inner water exosmosis of pressure tunnel, a cohesive crack element model coupled with seepage analysis is introduced based on the traditional cohesive crack model. A seepage-stress-cracking coupling analysis model for inner water exosmosis of pressure tunnel is established based on the Biot's consolidation theory and the body force theory of applying the inner hydraulic pressure. A typical pressure tunnel with circular section is chosen as a numerical example to verify the coupling analysis model. The simulation results qualitatively agree well with the test results. Therefore, this coupling model is reasonable and feasible, and the model can be used to conduct coupling analysis of seepage-stress-cracking for the inner water exosmosis of pressure tunnel.

Key words: pressure tunnel; inner water exosmosis; cohesive crack element; coupling analysis

压力隧洞内水外渗的准确计算是隧洞设计的关键问题之一. 压力隧洞内水外渗的模拟分析目前主要采用有限单元法等数值方法, 耦合计算模型主要有 2 大类.

1) 渗流-应力耦合分析模型 杨林德等^[1]将渗流场的力学效应按渗流体积力来考虑, 并根据试验获得的渗透系数-应力关系, 建立了混凝土衬砌和围岩中渗流场与应力场的耦合分析模型; 陈卫忠等^[2]

收稿日期: 2010-11-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279177); 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2009ZX07424-004).

作者简介: 胡云进(1974—), 男, 副教授, 主要从事渗流水力学和岩体力学方面的研究, E-mail: huyunjin@zju.edu.cn.

应用渗流-应力耦合分析模型对山西万家寨引黄工程高压岔管围岩和衬砌中的渗流场和位移场进行了计算;张巍等^[3]把内水压力以体力形式的作用于衬砌和围岩,建立了隧洞内水外渗的渗流场与应力场的耦合分析模型;杜小凯等^[4]应用 Biot 固结理论,考虑结构面的法向渗透性,对高压内水外渗进行了渗流场-应力场耦合模拟;苏凯等^[5]建立了能考虑衬砌与围岩有条件联合承载的充水夹层单元模型,采用等效耦合分析方法,对高压隧洞内水外渗下的衬砌钢筋应力和围岩应力状态进行了计算模拟;李新星等^[6]应用内水荷载施加的体力理论,考虑渗流场和应力场的直接耦合作用,对透水衬砌结构进行了内水外渗分析。

2) 考虑损伤的渗流-应力耦合分析模型 在渗流-应力耦合模型中嵌入描述介质损伤破坏区的渗流-损伤耦合方程,来反映压力隧洞的渗流-应力-损伤耦合行为。文献[7-9]均建立了裂隙岩体渗流场与损伤场的耦合分析模型;张巍等^[10]以渗透体力来考虑渗流场的力学效应,建立了应力-损伤-渗透系数关系方程,结合岩体的三维弹塑性损伤有限元分析,建立了大型地下洞室开挖围岩应力-损伤-渗流耦合分析模型;赵延林等^[11]根据裂隙发育和工程尺度的关系,建立了裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型,该模型能真实反映渗流场与应力场耦合作用下岩体的损伤演化特性,但未考虑裂缝开度对渗流的影响以及裂缝处水流的劈裂作用,不能很好地模拟压力隧洞的内水外渗。

压水试验表明,在高压内水作用下,隧洞衬砌将开裂,裂缝呈稀而疏分布,因此进行渗流-应力-开裂耦合分析将更接近工程实际,但目前缺乏完善的渗流-应力-开裂耦合分析模型。因此,本文将基于传统的黏结裂缝模型,提出能进行渗流分析的黏结裂缝单元模型。应用 Biot 固结理论和以体力形式施加内水荷载的理论,构建压力隧洞内水外渗的渗流-应力-开裂耦合分析模型;并对典型的圆形断面隧洞进行内水外渗的计算模拟,通过算例计算结果与实测资料的定性对比,验证了本文所建立模型的合理性。

1 渗流-应力-开裂耦合分析模型

1.1 渗流-应力耦合基本方程

基于 Biot 固结理论^[12]将力学平衡方程和渗流基本方程进行联立求解。对二维问题,压力隧洞内水外渗的渗流-应力耦合控制方程如下:

$$\begin{cases} G \nabla^2 u - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_V - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ G \nabla^2 v - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_V - \alpha \frac{\partial p}{\partial y} = \gamma \\ \frac{1}{\rho_w g} \left[k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right] = -\alpha \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$; ε_V 为固

体的体积应变, $\varepsilon_V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$; $\lambda = \frac{Eu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$;

$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 为拉梅系数; u, v 分别为 x, y 方向上的位移分量; E, μ 分别为弹性模量和泊松比; k_x, k_y 分别为 x, y 方向上的渗透系数; p 为孔隙水压力; γ 为固体颗粒的重度; ρ_w 为水的密度; α, Q 为 Biot 固结系数; g 为重力加速度; t 为时间。

式(1)定义了渗流场-应力场全耦合的数学模型。给定边界条件和初始条件,求解上述方程组,即可得到结点位移和孔隙水压力。渗流场作用效果的施加主要通过渗透荷载的耦合来实现。渗透系数变化的计算公式取 $k = k_0 e^{-\beta \sigma}$ (k_0 为初始渗透系数; β 为拟合参数; σ 为正应力)。

1.2 带有渗流分析功能的黏结裂缝单元模型

为了模拟衬砌和围岩开裂以及渗流-开裂的耦合,基于传统的黏结裂缝模型,建立了能进行渗流分析的黏结裂缝单元模型,该模型能模拟裂缝开度对渗流的影响,在衬砌和围岩开裂后,能考虑裂缝单元渗透系数按立方定理随开度增加以及裂缝尖端的水力劈裂作用(水压力以面力方式作用于已开裂的裂缝面),从而实现应力-渗流-开裂的耦合。典型的二维黏结裂缝单元示意图及其结点编号顺序如图1所示,裂缝的初始厚度取为零,为了便于理解,将裂缝表示成具有一定厚度的单元。

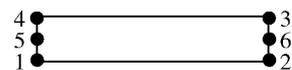


图1 裂缝单元及结点编号

Fig. 1 Cohesive element and node numbering

图2为本模型所采用的黏结裂缝单元的本构关系, OA 段表示裂缝两侧拉应力处于极限抗拉强度以内,裂缝单元处于线弹性阶段;当两侧拉应力达到极限抗拉强度后,该裂缝单元则进入软化阶段(裂缝开裂并扩展),即 AB 段。假设当单元刚进入软化阶段时,其拉应力对应为极限抗拉强度,当单元完全软化时,拉应力降为零。软化阶段的应力与开度关系

设为线性关系, 裂缝的开裂按黏结裂缝单元应力值及软化线性关系求得.

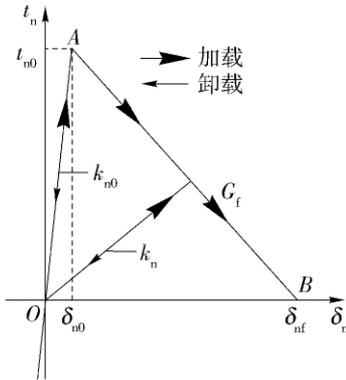


图2 裂缝单元的应力-开度关系

Fig.2 Traction-separation law of cohesive element

黏结裂缝单元渗流包括切向流和法向流(即正向流), 切向流是裂隙内沿裂缝长度方向的渗流, 法向流是垂直于裂缝长度方向的渗流, 如图3所示.

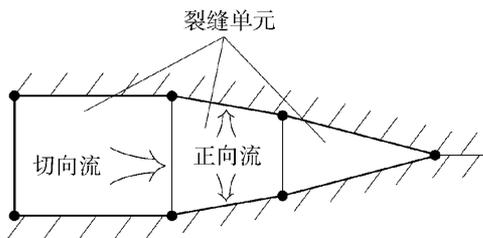


图3 裂缝单元中的渗流

Fig.3 Flow within cohesive elements

将切向流近似成牛顿流体流动, 单位裂缝开度的渗流量 q 可表示为

$$qd = -k_t \nabla p \quad (2)$$

式中: k_t 为切向渗透系数; ∇p 为黏结裂缝单元长度方向上的水压差; d 为黏结裂缝开度.

根据立方定理和雷诺方程, 切向渗透系数可定义为

$$k_t = \frac{d^3}{12\mu} \quad (3)$$

式中 μ 为流体动力黏滞系数.

法向流则简化为黏结裂缝单元内外水压差与渗流量之间的比例关系

$$q_t = c_t(p_i - p_t), \quad q_b = c_b(p_i - p_b) \quad (4)$$

式中: q, c, p 分别为黏结裂缝单元的渗流量, 渗透系数和孔隙水压力. 渗透系数值分别取为裂缝单元顶、底面相连实体单元的渗透系数, 如图4所示. 下标 t, b 分别代表裂缝单元的顶面和底面; p_i 为裂缝单

元中点处的孔隙水压力.

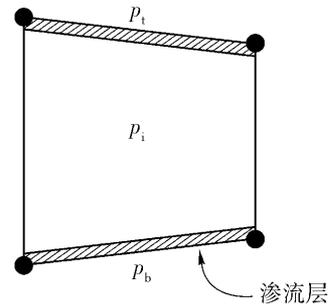


图4 法向流渗透系数的解释

Fig.4 Explanation of permeability in the normal direction

1.3 岩体、混凝土及钢筋的本构模型

岩体本构模型选用 ABAQUS 软件中的线性扩展 Drucker-Prager 模型. 该模型采用 3 个应力不变量来表示, 在偏平面上采用非圆形屈服面拟合压缩屈服和 3 轴拉伸数值, 同时提供了偏平面上相关联的非线性流动、单独的摩擦角和剪胀角.

由于在渗流-应力-开裂耦合分析模型中已考虑了衬砌开裂, 加上衬砌较薄, 因此采用线弹性模型模拟混凝土衬砌.

假设钢筋与混凝土位移相协调, 采用埋藏式钢筋模型来模拟钢筋, 单元综合刚度矩阵由混凝土和钢筋的单元刚度矩阵组合得到. 即单元的综合刚度矩阵 K^e 为

$$K^e = K_c + K_s \quad (5)$$

式中: K_c 为混凝土单元的贡献; K_s 为钢筋单元的贡献.

2 渗流-应力-开裂耦合分析步骤

首先, 在给定的初边值条件下进行压力隧洞内水外渗的渗流-应力耦合分析. 根据计算得到的黏结裂缝单元两侧的拉应力, 判断黏结裂缝开展与否(即拉应力是否大于抗拉强度); 对已经开展的裂缝单元则根据其开度计算黏结裂缝单元的切向渗透系数, 进而进行渗流-应力-开裂迭代计算, 直至收敛为止. 黏结裂缝开裂后, 按应力场及黏结裂缝单元本构模型计算确定其开宽.

围岩屈服准则选用 Drucker-Prager 准则, 采用增量变刚度迭代法进行有限元计算. 为了减小计算量, 通过子结构法将计算域分成线弹性区域和弹性区域.

对线弹性区域, 有

$$K\delta = P \quad (6)$$

式中: K 为刚度矩阵; δ 为结点位移向量; P 为荷载向量.

对弹塑性区域, 增量加载时的控制方程为

$$K_{i-1} \Delta \delta_i = \Delta P_i \quad (7)$$

式中: K_{i-1} 为第 $i-1$ 步的刚度矩阵; $\Delta \delta_i$ 为第 i 步的结点位移增量; ΔP_i 为第 i 步的荷载增量. 而

$$\begin{aligned} \delta_i &= \delta_{i-1} + \Delta \delta_i, \\ \varepsilon_i &= \varepsilon_{i-1} + \Delta \varepsilon_i, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta \sigma_i$$

式中: δ_i 和 δ_{i-1} 分别为第 i 步和第 $i-1$ 步的结点位移向量; ε_i 和 ε_{i-1} 分别为第 i 步和第 $i-1$ 步的单元应变向量; σ_i 和 σ_{i-1} 分别为第 i 步和第 $i-1$ 步的单元应力向量; $\Delta \delta_i$ 为第 i 步的位移增量; $\Delta \varepsilon_i$ 为第 i 步的应变增量; $\Delta \sigma_i$ 为第 i 步的应力增量.

弹性区域中任意单元的刚度矩阵为

$$K^e = \iiint_V B^T D B dV \quad (9)$$

式中: K^e 为单元刚度矩阵; V 为单元体积; B 为几何矩阵; D 为弹性矩阵.

塑性区域中任意单元第 i 次迭代计算中的刚度矩阵为

$$K_{i-1}^e = \iiint_V B^T D_{ep} B dV \quad (10)$$

式中: K_{i-1}^e 为第 $i-1$ 步的单元刚度矩阵; V 为单元体积; B 为几何矩阵; D_{ep} 为弹塑性矩阵.

具体计算分析步骤如下:

1) 初始地应力平衡 模型左右边界的水压由上边界的零值线性增至下边界的模型高度所对应的静水压力; 模型下边界的竖向位移以及模型左右两侧边界的水平位移取为零.

2) 隧洞开挖区岩体应力释放 开挖区应力水平释放通过将这一区域岩体的变形模量折减 100% 的方法来实现.

3) 开挖及衬砌添加模拟 移除开挖区岩体单元, 在开挖区的外缘加入衬砌单元, 进行渗流场和位移场的耦合分析, 得到围岩和衬砌的位移、应力及渗流场.

4) 充水运行工况模拟 将内水压力以体力形式施加于衬砌进行压力隧洞内水外渗下的渗流-应力-开裂的耦合分析.

3 算例分析

3.1 计算模型及参数

选择典型的圆形断面压力隧洞, 进行内水外渗

下的渗流-应力-开裂耦合模拟. 图 5 为计算所用的几何模型, 隧洞内径、衬砌厚度和固结灌浆圈厚度分别取为 6、0.5 和 3 m, 围岩厚度取 10 倍洞径. 隧洞中心处的地应力取 3 MPa, 地应力侧压力系数取 1. 在衬砌和围岩最有可能开裂的部位 (即 0° 、 90° 、 180° 和 270° 方向) 预设贯穿衬砌及围岩的未开裂零厚度黏结裂缝单元 (衬砌黏结裂缝单元参数在开裂前按混凝土材料参数选取, 抗拉强度取与混凝土抗拉强度相同; 围岩黏结裂缝单元参数在开裂前按围岩材料参数选取, 抗拉强度按常见岩体结构面的抗拉强度取为 0.1 MPa), 如图 6 所示. 围岩和钢筋混凝土衬砌的材料参数如表 1 所示.

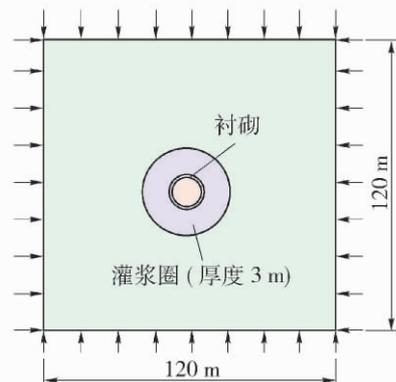


图 5 计算模型及边界条件示意

Fig. 5 Illustration of model and boundary conditions

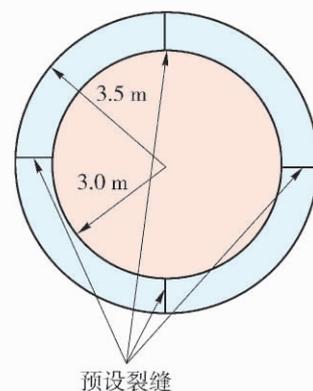


图 6 衬砌几何尺寸及预设黏结裂缝位置

Fig. 6 Geometry of lining and pre-inserted cracks

3.2 计算结果及分析

主要给出充水运行过程中应力和孔隙水压的计算结果. 模拟计算时隧洞内水压力以体力的方式作用于衬砌, 内水压力取 0.45 ~ 4.5 MPa, 按 0.225 MPa 的增量步长由小到大逐级施加. 不同内水压力下的应力和孔隙水压分布见图 7.

由图 7 可知, 内水压力为 0.9 MPa 时, 衬砌环向

表 1 计算参数

Table 1 Parameters of the computational model

材料	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模 量/GPa	泊松 比	摩擦 角/ $(^\circ)$	凝聚 力/MPa	剪胀 角/ $(^\circ)$	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	直径/ mm	间距/ cm
围岩	26.5	36	0.2	60	2.0	48	39		5×10^{-7}		
混凝土	25	28	0.167					1.75	1×10^{-9}		
钢筋	78	200	0.3					335		28	20

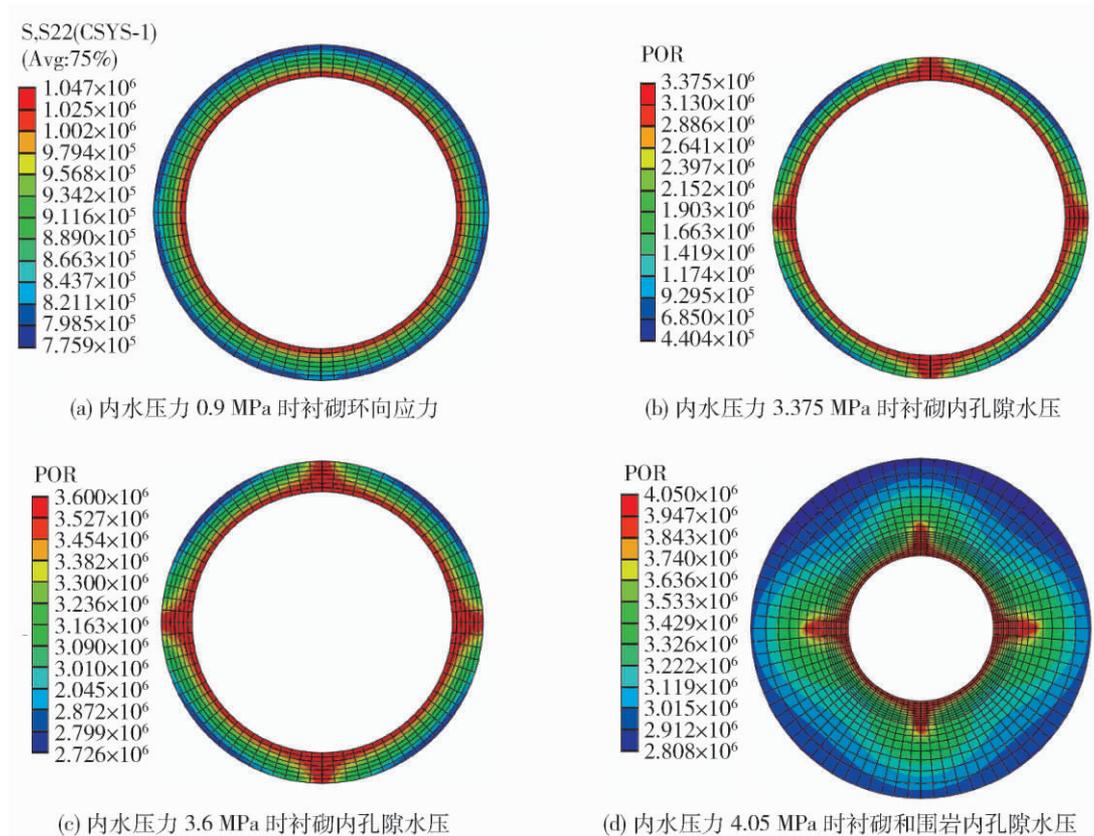


图 7 不同内水压力下的应力及孔隙水压分布

Fig. 7 Contour maps of stress and pore pressure under different inner hydraulic pressures

开始出现拉应力(最大值为 1.05 MPa 左右),但仍小于混凝土的抗拉强度,预设黏结裂缝未张开,因此环向拉应力及孔隙水压分布都较均匀.衬砌环向拉应力随着内水压力的增加而增大,当内水压力增加至 3.375 MPa 时,4 条预设的衬砌黏结裂缝开始张开(第 1 条张开裂缝首先产生在衬砌最薄弱的部位,随后其余黏结裂缝几乎同时出现张开),裂缝扩展至第 5 层单元(衬砌共划分 7 层单元),在裂缝张开处,孔隙水压力与隧洞内水压力相等.继续增加内水压力至 3.6 MPa,4 条预设衬砌裂缝均贯通,衬砌失去阻水作用,绝大部分内水压作用于围岩.由于此时内水压力(3.6 MPa)大于隧洞处围岩初始地应力(3 MPa),因此衬砌裂缝贯通后,围岩预设的黏

结裂缝也同时起裂;当内水压力达 4.05 MPa 时,虽然预设的水平裂缝(0° 和 180° 方向)已经贯穿围岩固结灌浆圈,但灌浆圈外围岩体仍未开裂,渗流量较小.之后,灌浆圈外围岩体出现裂缝,并继续扩展.由此可知,当隧洞内水压力大于预设黏结裂缝抗拉强度与地应力之和时,围岩预设黏结裂缝将开裂并扩展,但需要继续增加内水压力使裂缝贯穿.

为了验证本文所建立模型的可靠性,将不同内水压力下充水运行过程中模拟得到的孔隙水压力与文献[13]给出的实测资料进行了定性对比.由对比结果来看,衬砌外孔隙水压力的分布和数值大小基本接近,表明所建立的压力隧洞内水外渗耦合分析模型是合理可行的.

4 结论

1) 基于传统的黏结裂缝模型,提出了能进行渗流分析的黏结裂缝单元模型.应用 Biot 固结理论和按体力施加内水压力的理论,建立了能进行渗流-应力-开裂耦合模拟的压力隧洞内水外渗分析模型.

2) 该模型能模拟隧洞开挖、衬砌添加及充水运行的全过程,由于直接耦合渗流、应力和开裂,因此可得到符合实际的衬砌和围岩位移场、应力场及渗流场等.

3) 对典型的圆形断面压力隧洞内水外渗过程进行了模拟计算分析,计算结果与实测资料的定性对比表明,该模型是合理的,为分析压力隧洞的内水外渗提供了一种行之有效的方法.

参考文献:

- [1] 杨林德,丁文其. 渗水高压引水隧洞衬砌的设计研究[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(2): 112-117.
YANG Lin-de, DING Wen-qi. Study on the design of permeable lining in high pressure water carriage tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 112-117. (in Chinese)
- [2] 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): 2384-2391.
CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, YANG Jia-ling, 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): 2384-2391. (in Chinese)
- [3] 张巍,黄立财. 基于渗流场与应力场耦合的高压隧洞设计[J]. 水利与建筑学报,2007,5(2): 41-44.
ZHANG Wei, HUANG Li-cai. Design of tunnel with high pressure water based on coupling of seepage field and stress field [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5(2): 41-44. (in Chinese)
- [4] 杜小凯,任青文,陈伟. 有压引水隧洞内水外渗作用研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版,2008,40(5): 63-68.
DU Xiao-kai, REN Qing-wen, CHEN Wei. Study on the effect of seepage from underground hydraulic tunnel under high internal water pressure [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(5): 63-68. (in Chinese)
- [5] 苏凯,伍鹤皋. 水工隧洞内水外渗耦合分析[J]. 岩石力学,2009,30(4): 1148-1152.
SU Kai, WU He-gao. Analysis of hydro-mechanical interaction in hydraulic tunnel with inner water exosmosis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1148-1152. (in Chinese)
- [6] 李新星,蔡永昌,庄晓莹,等. 高压引水隧洞衬砌的透水设计研究[J]. 岩土力学,2009,30(5): 1404-1408.
LI Xin-xing, CAI Yong-chang, ZHUANG Xiao-ying, et al. Design of permeable lining for high pressure hydraulic tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1404-1408. (in Chinese)
- [7] OTTO S, TILL P, HARMUT K. Development of damage and permeability in deforming rock salt [J]. Engineering Geology, 2001, 61: 163-180.
- [8] ODA M T, TAKEMURA A, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of India granite [J]. Mechanics of Materials, 2002, 34: 313-331.
- [9] 郑少河,姚海林,葛修润. 裂隙岩体渗流场与损伤场的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(9): 1413-1418.
ZHENG Shao-he, YAO Hai-lin, GE Xiu-run. Coupling analysis on seepage and damage in fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1413-1418. (in Chinese)
- [10] 张巍,肖明,范国邦. 大型地下洞室群围岩应力-损伤-渗流耦合分析[J]. 岩土力学,2008,29(7): 1813-1818.
ZHANG Wei, XIAO Ming, FAN Guo-bang. Stress-damage-seepage coupling analysis of surrounding rock of large-scale underground caverns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1813-1818. (in Chinese)
- [11] 赵延林,曹平,汪亦显,等. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8): 1634-1643.
ZHAO Yan-lin, CAO Ping, WANG Yi-xian, et al. Coupling model of seepage-damage-fracture in fractured rock masses and its application [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1634-1643. (in Chinese)
- [12] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12: 155-164.
- [13] 侯靖. 天荒坪抽水蓄能电站高压隧洞充水试验实测资料分析[J]. 水利水电科技进展,2009,29(2): 27-31.
HOU Jing. Observed data analysis of water filling test of the high-pressure tunnel in Tianhuangping pumped-storage power station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(2): 27-31. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)