

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2500-07

裂隙岩体高压压水试验水-岩耦合过程数值模拟

蒋中明^{1,2}, 冯树荣², 陈胜宏³, 张新敏¹

(1.长沙理工大学 岩土工程研究所, 长沙 410076; 2.中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014;

3.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 为了解高压水渗流作用对裂隙岩体应力和变形的影响, 结合黑麋峰抽水蓄能电站岩体高压压水试验的渗压及变形测试成果, 采用多孔连续介质全耦合理论, 研究了试验区岩体测点在压水孔加压和卸压过程中的孔隙压力和位移变化过程。通过对测点位移和渗压随时间变化过程的计算值和实测值对比研究, 验证了所采用的水-岩耦合数值模型的合理性。研究表明: 在压水孔内的水压力和岩体孔隙压力的共同作用下, 岩体内的应力大幅度增加; 压水过程中, 岩体因渗流作用产生了较大的位移, 停止压水后的一段时间内, 由于岩体中还存在一定的孔隙水压力和水压力梯度, 从而导致岩体内仍存在部分变形值, 且该部分变形值并非是压水孔卸载后岩体内的塑性残余变形; 高压水渗流作用下的岩体耦合效应对工程应力和围岩变形有重大影响, 考虑水-岩耦合效应的岩体稳定性评价结果对工程设计更具指导意义。

关 键 词: 裂隙岩体; 高压压水试验; 水-岩耦合效应; 水-岩全耦合模型

中图分类号: TU 456

文献标识码: A

Numerical simulation of hydro-mechanical coupling process of fractured rock mass during high pressure permeability test

JIANG Zhong-ming^{1,2}, FENG Shu-rong², CHEN Sheng-hong³, ZHANG Xin-min¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;

2. Mid-South Design and Research Institute, CHECC, Changsha 410014, China;

3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to understand the influence of seepage under high pressure condition on stress and deformation of fractured rock mass, fully coupling model based on porous media mechanics is employed to study the variations of pore pressure and displacement of measuring point in rock mass during the experiment period, combined with measured data of pore pressure and displacement obtained in high pressure permeability test at Heimifeng pumped storage power station. The hydro-mechanical coupling model is validated by the comparison of calculated results of pore pressure and displacements with measured data. It also indicates that rock mass stress increases sharply under the effect of water pressure in water injected borehole and pore pressure in rock mass. During the experiment, it occurs larger displacement in rock mass due to the seepage. After stopping injection of water, the deformation remains due to the existence of pore water pressure and hydraulic gradient in rock mass. The part of deformation is not the plastic residual deformation of rock mass after the unloading of water injected borehole. Hydro-mechanical coupling effect of rock mass under high water pressure condition is obvious. The evaluated results of rock mass stability with the consideration of hydro-mechanical coupling effect have more significance for engineering design.

Key words: fractured rock mass; high pressure permeability test; hydro-mechanical coupling effect; fully hydro-mechanical coupling model

1 引 言

近年来, 我国的抽水蓄能电站得到迅速的发

展。抽水蓄能电站的最大特点是电站设计水头较高, 静水头一般达到 400~600 m^[1]。高水头作用下引水隧洞高压岔管段一般采用钢衬, 随着水电建设技术

收稿日期: 2010-07-12

基金项目: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金 (No. 200813047); 中国博士后基金 (No. 20080430990)。

第一作者简介: 蒋中明, 男, 1969 年生, 博士后, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的科研教学工作。E-mail: zmmjiang@163.com

的发展, 岔管段采用钢筋混凝土衬砌的电站越来越多, 如天荒坪抽水蓄能电站、黑麋峰抽水蓄能电站等^[1-2]; 钢筋混凝土衬砌带裂缝运行模式必然导致岔管段衬砌外的岩体处于高压水环境中。高压水在围岩内部渗透、挤压、劈裂和压力传递, 将改变岩体物理力学参数, 使围岩受力与变形更为复杂。特别是当岔管区存在局部不良地质岩体时, 如何正确评价岔管区围岩的抗渗性和安全稳定性事关工程建设的成败。为此, 一些重要的工程都采用了高压压水试验的方法来研究岔管区岩体渗透性, 旨在为围岩的渗控措施的选择提供依据。鉴于岔管存在局部断裂破裂带岩体, 黑麋峰抽水蓄能电站在高压压水试验过程不仅关心岩体的渗透性, 同时对高压水渗流作用下岩体变形也进行了试验研究。考虑到处于高压水渗透作用环境的岩体渗流和变形之间存在相互作用和相互影响的耦合效应^[3-5], 为更加全面地掌握压水试验对围岩变形场和渗透场分布的影响, 本文采用水-岩耦合数值分析模型对高压压水过程进行了模拟。通过对试验过程和数值仿真过程中各物理量的分析, 全面了解围岩渗流、应力和位置分布特点。

2 水-岩耦合理论

裂隙岩体高压压水过程的渗透应力耦合效应可采用连续多孔介质理论进行研究^[6-10]。数值分析软件采用有限元数值软件 CODE_ASTER 进行分析。目前, 水-岩耦合分析的模型较多^[3], 本文采用的耦合模型基本理论介绍如下。

2.1 力学平衡方程

$$\text{div} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{b} = 0 \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为 Cauchy 应力张量; $\boldsymbol{b}$ 为外力。

2.2 水质量平衡方程

饱和和多孔介质模型采用 Coussy 方法进行描述, 其水质量平衡方程为

$$\text{div} \boldsymbol{w} + \frac{dm}{dt} = 0 \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{w}$ 为流体流量向量; m 为相对于初始状态的流体质量增量; t 为时间。

2.3 固-液耦合本构关系

$$\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_0 = (K - 2G/3) \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{I} + 2G \boldsymbol{\varepsilon} - b(p - p_0) \boldsymbol{I} \quad (3)$$

$$p - p_0 = M[-b \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} + m / \rho_0^n] \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; $\boldsymbol{\sigma}_0$ 为初始状态应力张量; K

为不排水不可压缩体积模量; G 为剪切模量; $\text{tr} \boldsymbol{\varepsilon}$ 为体积应变; $\boldsymbol{I}$ 为单位张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为外力引起应变张量; b 为 Biot 系数; p 为孔隙压力; p_0 为初始状态孔隙压力; M 为 Biot 模量; ρ_0^n 为参考状态流体密度。

在研究中, 孔隙压力和应力之间按全耦合考虑, 孔隙压力大小既影响孔隙介质体单位体积的流体体积改变量, 同时也影响着孔隙介质有效应力, 即式 (3) 中的应力为有效应力。

CODE_ASTER 采用直接耦合法对控制方程进行求解, 根据节点位移求得单元应变张量, 根据节点流量变化求得流入或流出单元的流体质量增量后, 应用式 (4) 计算单元中心孔隙水压力, 然后应用式 (3) 计算单元应力。由于式 (4) 中包含了体积应变对孔隙压力影响项, 而式 (3) 包含了孔隙压力对应力的影响项, 从而实现应力和渗流之间的全耦合分析。

3 数值模型

3.1 工程概况

黑麋峰抽水蓄能电站岔管洞室埋深为 215 m, 高压岔管紧邻 F₁₅ 断层。洞室内 F₁₅ 断层包括 2 条分支断层, 两分支断层在引水隧洞下平段左侧合并, 断层间最大相距 5 m 左右。断层两侧均有 2~15 m 不等宽的断层影响破碎带, 整个断层破碎带及影响带宽度 7.5~18 m。考虑到断层及其影响破碎带对高压引水岔管区影响较大, 在高压水冲刷作用下可能产生水力劈裂、渗透破坏和相邻洞室内出现高压喷水现象, 危及高压岔管、引水隧洞下平段 F₁₅ 断层段及相邻洞室的安全, 特别是在一洞运行一洞放空不运行工况下, 水压力差大, 更容易产生由于断层带 (含影响带) 水压劈裂和渗透破坏引起的透水事故或围岩失稳问题。为此, 对高压引水岔管区断层岩体进行了现场高压压水试验研究。

3.2 计算网格

数值模型原点选在压水孔孔口中心。y 轴沿压水孔轴线方向, 指向压水钻孔底为 y 轴正方向。x 轴指向引水洞上游侧为正, z 轴指向铅直向上。

模型水平 x 方向自钻孔中心左右各延伸 40 m, 数值模型 x 方向长度为 80 m。水平 y 方向自钻孔孔口向孔底方向延伸 82 m, 数值模型 y 方向长度为 82 m。水平 z 方向自钻孔中心上下各延伸 30 m, 数值模型 z 方向长度为 60 m。

为了更好地研究试验区周围岩体在压水试验过程表现出的水力学和力学响应特性, 对断层、断层影响带和压水段附近部分岩体的网格进行了细化

处理,而对距离压水孔较远区域的岩体采用较大尺寸的网格。由于断层破碎带宽为 0.6~1.5 m,数值模拟时按 1.0 m 考虑,并在 CODE_ASTER 软件中剖分为实体单元。断层影响带按 6.5 m 考虑,剖分为实体单元。整个计算模型网格单元数为 49 864,节点数为 52 311。图 1 为水-岩耦合分析采用的三维网格图。

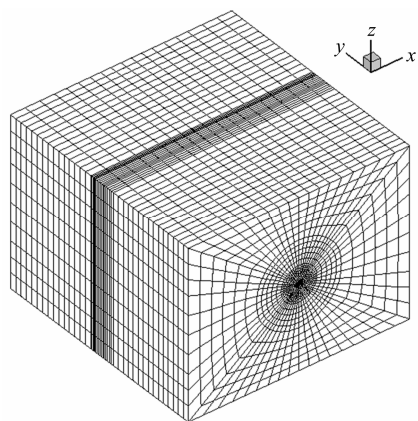


图 1 水-岩耦合分析三维网格图

Fig.1 Three-dimensional grids of hydro-mechanical coupling analysis

3.3 初始及边界条件

地应力场:根据压水致裂法测试的地应力场结果,水平 x 方向和 y 方向初始应力取 2.2 MPa,铅直 z 方向初始应力取 4.4 MPa。

初始孔隙压力场:根据试验区因隧洞开挖揭露情况和长期通风的影响,渗流分析的初始孔隙压力场均取 0.1 MPa。

力学边界条件:铅直边界上施加水平位移约束;水平边界上施加铅直位移约束。

水力学边界条件:由于压水段长度为 10 m,距离边界较远,因此,认为边界上孔隙压力不受压水影响,故在所有边界上都取定水头边界。试验开始之前,布置在压水孔周围的渗压计数值接近 0.1 MPa,故上下水平面边界孔隙压力设为定值 0.1 MPa;前后左右前置边界的孔隙压力也固定在 0.1 MPa。加压段布置钻孔穿越断层附近 10 m 长度范围内。

3.4 计算参数

数值分析所需要的力学参数采用国电公司中南院提供地质报告建议值,渗透系数采用常规压水试验结果结合工程类比进行取值,Biot 模量采用反分析方法确定。相关的计算参数取值见表 1。本构关系式中所需参数根据表 1 可计算得到。

表 1 岩体的力学参数取值

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

围岩类别	密度 /(g/cm ³)	变形模量 /GPa	泊松比	渗透系数 /(10 ⁻⁶ cm/s)	Biot 模量 /GPa
断层	1.9	1	0.33	12.0	5.6
断层影响带	2.2	2	0.30	6.0	6.2
裂隙岩体	2.5	5	0.28	0.2	8.0

3.5 荷载及分析步骤

为尽可能真实地反映计算模型的实际情况,计算过程按以下 5 个步骤进行(各步骤施加相应的荷载条件):① $t=0$,初始应力和孔隙压力场的模拟;② $t=0$,压水钻孔开挖过程计算(水-岩耦合分析);③ $t=0\sim 60$ min,快速法压水升压过程模拟(水-岩耦合分析);④ $t=60\sim 120$ min,压水稳压状态模拟(水-岩耦合分析);⑤ $t=120\sim 220$ min,压水孔压力降压过程模拟(水-岩耦合分析)。压水孔压力随时间变化实测曲线如图 2 所示。

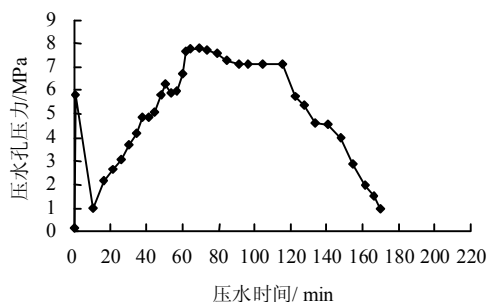


图 2 压水段水压力与时间关系曲线

Fig.2 Curve of water pressure vs. time in experiment borehole

4 计算结果及分析

4.1 岩体渗压变化过程分析

为了解岩体渗压随压水过程的变化,在距离压水孔 6 m 和 16 m 位置布置了渗压孔以监测岩体渗压,详见参考文献[11]。图 3 为渗压观测孔内的渗压计渗压测量值与计算值对比关系。由图可知,压水过程中渗压计的计算值和实测值变化趋势和数量值基本吻合,且岩体中渗压变化滞后于压水孔内的水压变化。这说明利用反分析得到的计算力学参数和所采用的水-岩耦合分析模型对压水试验区岩体进行水-岩耦合是合理的,可以真实地反映在压水过程中岩体内的渗流场的变化。

4.2 岩体位移变化过程分析

图 4 为多点位移计安装孔内的位移测量值与计算值对比关系曲线。由图可知,压水过程中测点 4-1 的计算值和实测值变化趋势和数量值相一致,且岩

体中位移变化滞后于压水孔内的水压变化。再次证明所采用的计算力学参数和水-岩耦合分析模型对压水试验区岩体进行水-岩耦合分析是合理的,可以真实地反映在压水过程中岩体内的位移场和应力场的变化。

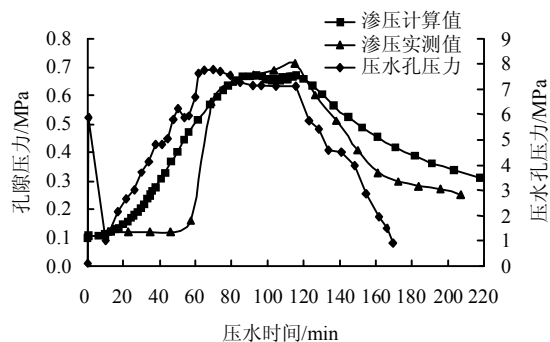


图 3 syj5-1 测点渗压计算值与实测值比较

Fig.3 Comparison between measured and calculated pore pressures of sensor syj5-1

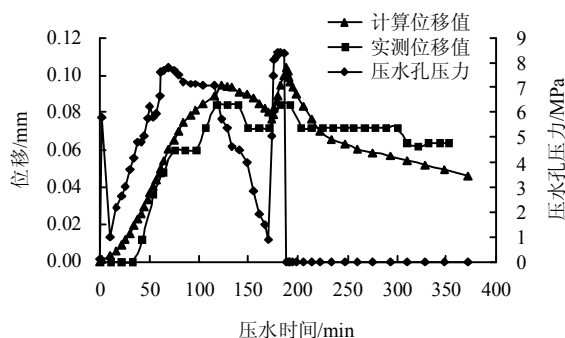


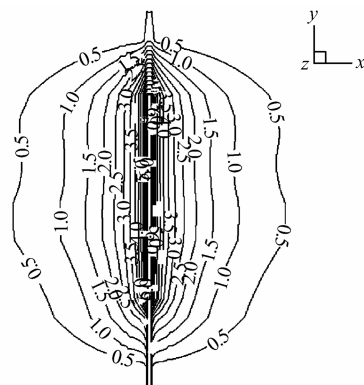
图 4 wyj4-1 测点位移计算值与实测值比较

Fig.4 Comparison between measured and calculated displacements of sensor wyj4-1

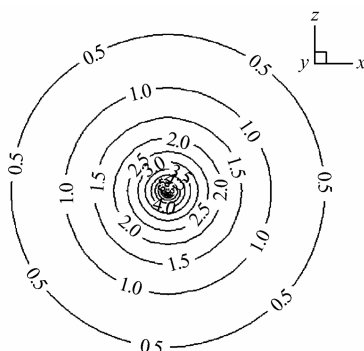
4.3 孔隙压力场分布

图 5 为压水孔压力升压到最大值并稳压 60 min 时岩体孔隙压力分布场;图 6 为压水孔在降压结束后附近岩体的孔隙压力分布场。

压水孔压力维持在 7.0 MPa 情况下,压水孔壁附近岩体压力与压水孔内的压力基本保持相同,而岩体内孔压自压水孔中心向周围逐渐递减的分布;由于岩体对水流扩散的阻力作用,岩体内的孔隙压力在压水孔附近岩体内呈迅速递减的趋势,离开压水孔中心 4 m 处孔隙压力仅为 0.5 MPa,表明断层岩体和断层影响带岩体由于渗透性较小,对高压水在岩体中受到的渗流阻力作用较大。高压压水对岩体渗流场影响范围(>0.105 MPa)较大,达到 35 m 以上。



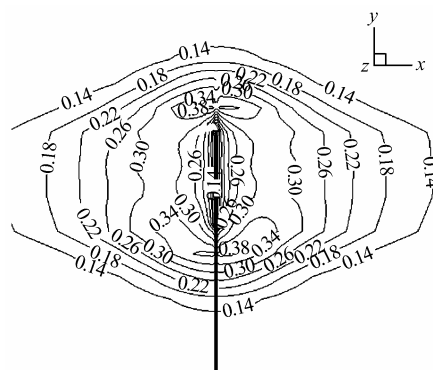
(a) 水平截面



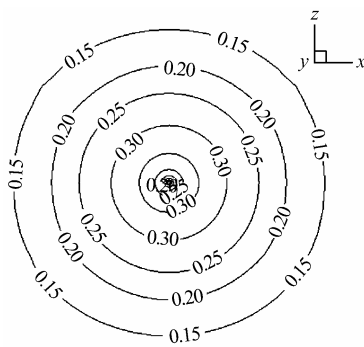
(b) 铅直截面

图 5 稳压 60 min 时的孔压场 (单位: MPa)

Fig.5 Pore pressure fields with steady pressure for 60 min(unit: MPa)



(a) 水平截面



(b) 铅直截面

图 6 降压结束时的孔压场 (单位: MPa)

Fig.6 Pore pressure fields at the end of water injection (unit: MPa)

压水停止后,压水孔压力降低情况下,压水孔试验区岩体内的裂隙水在压力梯度作用下,一部分向远离钻孔的方向继续流动,而另一部分,由于孔内压力的降低,岩体内的部分水流回流到压水孔内,岩体中的孔隙水压力最大值约 0.3 MPa,位置在离钻孔 3 m 左右处。由此说明孔隙水压力的消散过程比较缓慢,其原因是渗透系数较小,孔隙水不能快速排出。前期压水对远处岩体的渗流场影响继续加大。

4.4 岩体位移场分布

图 7 分别为压水孔压力升到最大值并稳压 60 min 时压水孔中心水平纵向截面和铅直横截面上的位移等值线图。在压水孔内 7.0 MPa 水压力和岩体内较大孔隙压力的持续作用下,岩体内产生了较大的水平位移变形。由于岩体对称性,压水孔纵向截面上的水平 x 向位移呈对称分布。由于压水压力在前期曾达到 7.8 MPa,并维持了近 20 min,故 x 向最大位移值出现在距离孔壁 1.0 m 左右的岩体内,其最大位移达 1.3 mm。同样,压水孔纵向截面上的水平 y 向位移也关于压水孔轴心线呈对称分布。由于前期压水压力曾达到 7.8 MPa,并维持了

近 20 min,所以 y 向最大位移值出现在压水孔两端的断层影响带附近的裂隙岩体中,其最大位移达 0.6 mm。水平 y 向位移以压水段的中心为分界面。由于岩体内孔隙压力的平衡作用,在分界面上,岩体 y 方向的位移为 0。而分界面两侧岩体内孔隙压力梯度作用方向相反,因此,位移方向相反。

压水孔铅直截面上的铅直 z 向位移关于压水孔中心水平面对称分布。同样由于前期压水最大压力达到了 7.8 MPa,并维持了近 20 min,导致 z 向最大铅直位移值出现在距离孔壁 1.0 m 左右的上、下方岩体内,其最大位移达 1.0 mm。

渗流场引起岩体发生较大位移量 (>0.1 mm) 的范围约为 13 m,渗流场引起岩体产生变形 (0.01 mm) 的影响范围也达到了 35 m。

图 8 分别为压水孔在降压结束后岩体纵向截面和铅直横截面上的位移等值线图。

钻孔内水压卸压后,由于岩体中还存在一定的孔隙水压力和水压力梯度,岩体内仍存在部分的水水平位移变形。由于岩体性质的对称性,压水孔附近岩体纵向截面和铅直截面上的位移均对称分布。 x 向最大位移值出现在距离孔壁 6.0 m 左右的岩体内,

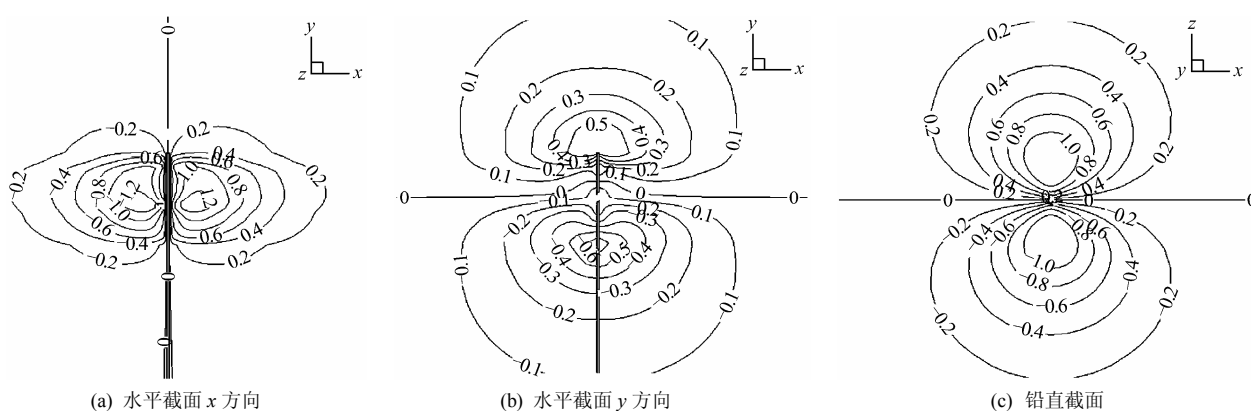


图 7 稳压 60 min 时的位移场 (单位: mm)

Fig.7 Displacement fields with steady pressure for 60 min (unit: mm)

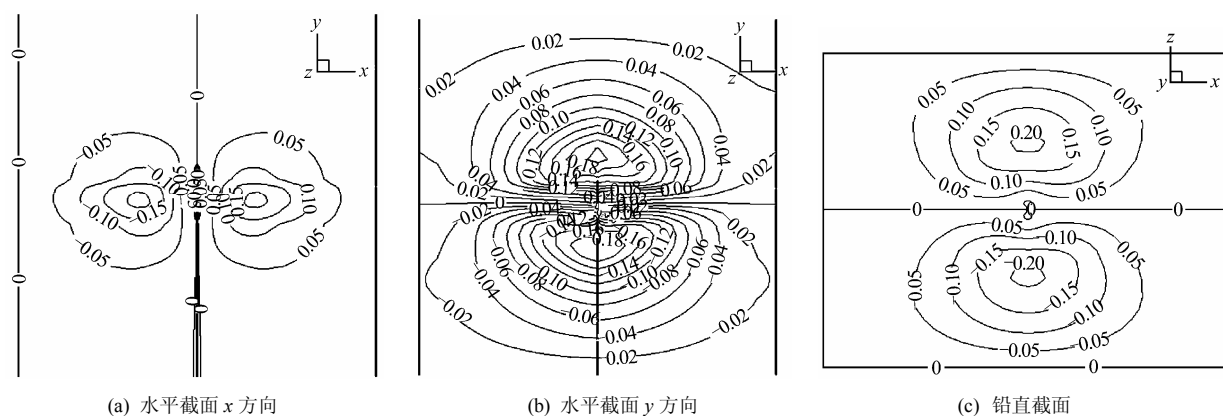


图 8 降压结束时的位移场 (单位: mm)

Fig.8 Displacement fields at the end of water injection (unit: mm)

其值为 0.2 mm。 y 向最大位移值出现在压水孔两端的断层影响带以外 3.0 m 附近的裂隙岩体中, 其值约为 0.2 mm。水平 y 向位移仍以压水段的中心为分界面。 z 向最大位移值出现在距离孔壁 6.0 m 左右的上、下部位的岩体内, 其值约为 0.2 mm。

由于耦合计算中力学模型采用线弹性模型, 加之压水孔停止压水后, 测点变形并未立即消失, 而随时间的变化逐渐减小, 因此, 可以判断钻孔内水压卸压后岩体内的继续存在变形并非压水孔力学卸载后的岩体塑性残余变形, 而是岩体孔隙压力变化引起的岩体变形。同时这种现象也只有水-岩耦合理论才能模拟和解释。

4.5 岩体应力场分布

图 9(a)、9(b)分别为压水孔压力升压到最大值并稳压 60 min 时压水孔中心水平纵向截面上的第一主应力和第三主应力等值线图。当压水孔维持较高水压时, 由于受压水孔水压力和岩体孔隙压力对岩体的共同作用, f15-1 断层内的压水孔壁上的第一主应力最大值(压应力)达到了 -9.0 MPa, 第三主应力最大值(压应力)达到了 -4.2 MPa。第一、第三主应力在横截面和纵向截面上都呈对称分布。

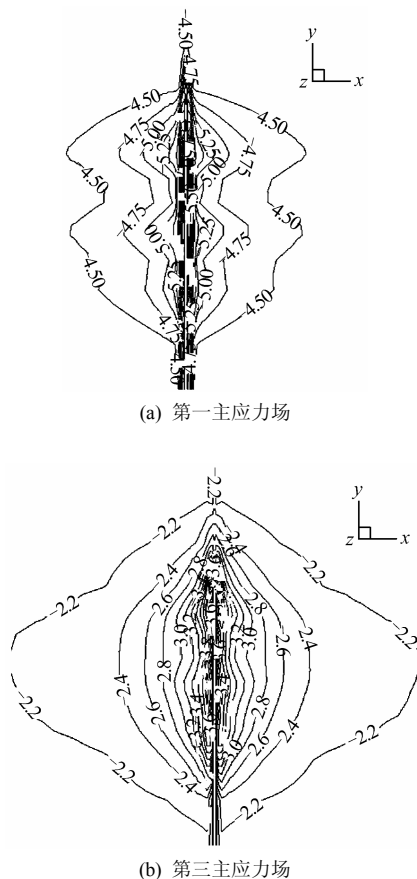


图 9 稳压 60 min 时的水平截面应力场 (单位: MPa)

Fig.9 Stress fields of horizontal section with steady pressure for 60 min (unit: MPa)

图 10(a)、10(b)分别为降压结束后压水孔中心水平纵向截面上的第一主应力和第三主应力等值线图。压水停止后, 随着压水孔压力的降低, 压水孔壁上的第一主应力最大值(压应力)降低到 -6.5 MPa, 第三主应力最大值(压应力)降低到 -2.6 MPa, 比稳压状态下岩体的第一、第三主应力最大值分别小 2.5 MPa 和 1.6 MPa。第一、第三主应力在横截面和纵向截面上也都呈对称分布。

图 10 还表明: 停止压水后, 孔壁上的应力并没有降低到压水前的初始应力值, 而是保持在一个相对较低的水平, 这主要是岩体中存在的孔隙水压力引起的。

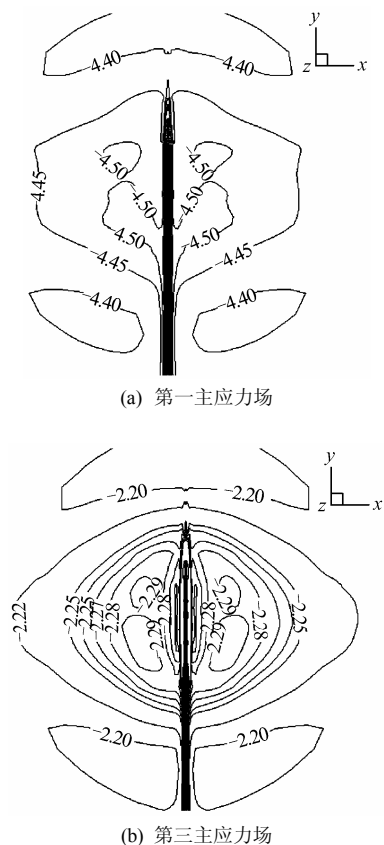


图 10 降压结束时的水平截面应力场 (单位: MPa)

Fig.10 Stress fields of horizontal section at the end of water injection (unit: MPa)

5 结 论

(1) 岩体测点的渗压和多点位移计算值与现场实测值随时间变化的趋势和数值大小吻合情况表明, 采用水-岩耦合分析模型对压水试验区岩体的渗压和变形进行模拟是合理、有效的。

(2) 压水试验过程中, 压水孔壁附近岩体压力与压水孔内的压力基本保持相同, 而岩体内孔压自压水孔中心向周围逐渐递减的分布; 停止压水后,

试验区岩体内的裂隙水在压力梯度作用下,一部分向远离压水孔的方向继续流动,而另一部分则回流到压水孔内。

(3) 压水过程中,岩体内各点在各个方向上均产生了较大的位移变形。停止压水后,由于岩体中还存在一定的孔隙水压力和水压力梯度,岩体内仍存在部分的水平位移变形。压水结束后还存在的变形并非压水孔卸载后岩体内的塑性残余变形。

(4) 压水过程中,受压水孔水压力和岩体孔隙压力的共同作用,岩体内的应力大幅度增加。停止压水后,孔壁上的应力不会降低到压水前的初始应力值,而将保持在一个相对较低的水平值,这种情况与岩体内继续存在的渗流有关。

综上所述,考虑水-岩耦合效应的围岩稳定性评价结果更符合岩体实际工作状态,因此,建议高压引水隧洞支护设计时应尽可能考虑高压水流动对工程稳定性带来的影响。

参考文献

- [1] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [2] 蒋中明, 傅胜, 李尚高, 等. 高压引水隧洞陡倾角断层岩体高压压水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2318—2323.
JIANG Zhong-ming, FU Sheng, LI Shang-gao, et al. High pressure permeability test on hydraulic tunnel with steep obliquity faults under high pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2318—2323.
- [3] 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 92—97.
SHENG Jin-chang, SU Bao-yu. Comment on the research of coupled stress and fluid flow in fractured rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(2): 92—97.
- [4] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060—1066.
LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis of hydraulic fracturing process of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1060—1066.
- [5] 蒋中明. 黑麋峰抽水蓄能电站高压岔管段 F15 断裂带高压压水试验研究报告[R]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- [6] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. **Journal of Applied Physics**, 1942, (12): 155—164.
- [7] BIOT M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. **Journal of Applied Physics**, 1954, (26): 182—191.
- [8] BIOT M A. General solution of the equation of elasticity and consolidation for a porous material[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1956, (78): 91—96.
- [9] DOUMARY E, MCLENNAN J D, ROEGIERS J C, et al. Poroelstic concepts explain some of the hydraulic fracturing mechanism[R]. Kentucky, USA: Society of Petroleum Engineers, Inc., 1986.
- [10] COUSSY O, DORMIEUX L, DETOURNAY E. From mixture theory to Biot's approach for porous media[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1998, 35(34—35): 4619—4635.
- [11] 蒋中明, 冯树荣, 傅胜, 等. 某水工隧洞裂隙岩体高水头作用下的渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 673—676.
JIANG Zhong-ming, FENG Shu-rong, FU Sheng, et al. Test study of osmotic behavior of fractured rock mass of water tunnel under high water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 673—676.