

溪洛渡拱坝坝基渗流-应力耦合分析研究

Coupled stress and fluid flow analysis of the arch dam foundation of Xiluodu Hydropower Station

盛金昌, 速宝玉, 赵 坚, 詹美礼
(河海大学 水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 把裂隙岩体概化为等效连续介质, 基于表征单元体的概念建立了统一的渗流-弹塑性应力全耦合控制方程。对拱坝坝区耦合分析表明, 与非耦合计算相比, 渗流场差别非常明显, 结构面的抗滑能力有所降低, 对坝体的安全产生不利影响。

关键词: 裂隙岩体; 渗流场; 应力场; 耦合

中图分类号: O 357.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2001)01-0104-05

作者简介: 盛金昌, 男, 1969 年生, 博士, 水力学及河流动力学专业, 主要从事岩体水力学、渗流控制优化分析及岩石力学等方面的研究工作。

SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, ZHAO Jian, ZHAN Mei-li

(College of Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A set of united coupled elastoplastic stress and fluid flow control equations are established with generalization of jointed rock masses as equivalent continuum media. The coupled analysis of dam site shows that the seepage field of coupled analysis is very different from that of uncoupled analysis. The safety factor against sliding of rock discontinuities decreases, which has adverse influence on the safety of dam.

Key words: jointed rock masses; seepage field; stress field; coupled

1 工程概况^{*}

溪洛渡水电站是金沙江干流攀枝花市至宜宾市河段梯级开发规划中的第三个梯级大型水电站。枢纽挡水建筑物为混凝土拱坝, 最大坝高 285 m。溪洛渡坝址区山体为含层间和层内错动的裂隙岩体, 无论是力学性质还是渗透特性均呈明显的非均值各向异性特征, 坝区内构造破坏较弱, 没有发现较大规模的断层, 主要构造形迹为一套发育于岩流层层间和层内的构造错动带和节理裂隙系统。这些地质构造是裂隙岩体的主要渗水通道。其透水性严格受构造、风化卸荷和岩溶发育程度诸因素控制, 尤以缓倾角的层间、层内错动带影响最大。坝区岩体风化具有间隔式分布特征, 总体呈由表到里, 从浅至深, 由强变弱的规律。根据岩体的风化程度及其透水性强弱, 可以划分为: ①中等透水的弱风化上段岩体, 水平深度约 30~50 m, 河床深度 10~20 m; ②弱透水的弱风化下段岩体, 水平深度约 40~80 m, 河床深度 10~30 m; ③弱~微透水的微风化新鲜岩体。坝区玄武岩体中有 6 组较发育的裂隙系统, 尽管坝区裂隙发育总的组数较多, 但各区段上, 一般很少同时出现 3 组陡裂隙的情况。

溪洛渡拱坝坝高为 285 m, 属高拱坝, 水库蓄水后, 坝体及坝肩将承受巨大的荷载, 坝基、坝肩区的应力随蓄水过程将发生显著变化, 由此引起渗流场改

变。水电站坝址区地质条件复杂, 左右岸坝区均发育有数组陡裂隙, 同时还发育有一组缓倾角的裂隙面, 这样岩体渗流场和应力场的相互作用对各优势结构面抗滑能力产生什么样的影响, 是一个很值得重视的课题, 法国的马尔帕赛拱坝的失事就与这一问题有密切的关系。

对水利水电及岩土工程中一些失稳破坏的实例分析表明: 建筑物的失稳破坏往往与其所受到的渗透压力大小有密切的关系, 因此, 对岩体地下水运动规律的研究引起了人们的高度重视。由于溪洛渡拱坝坝区地质条件较复杂, 故岩体的地下水运动也比较复杂。为进一步研究岩体的渗透规律, 在以往工作的基础上, 这里着重从裂隙岩体渗流-应力耦合的角度, 对溪洛渡拱坝坝区在水库蓄水过程中的应力场和渗流场进行了耦合模拟计算, 分析了坝址区的渗流场受应力作用的影响, 着重考察了坝址区的渗流场的变化和裂隙结构面上应力的变化情况, 为坝体的稳定分析提供了进一步的资料。

2 耦合分析的数学模型

分析中采用的力学本构关系及耦合分析方法详见文献[1, 2], 计算模型概述如下:

* 基金项目: “九·五”国家科技攻关项目(96-21-05-03-01)
收稿日期: 2000-01-10

(1) 渗流连续性方程

$$v_{i,i} = 0 \quad (1)$$

式中采用指标法(下同), v_i 表示流速。其中假定渗流服从达西定律:

$$v_i = k_{ij} J_j \quad (2)$$

式中渗透张量与应力状态有关, J_i 为水力坡降。

(2) 静力平衡方程

$$\alpha_{ij,j} + p_{,i} - X_i = 0 \quad (3)$$

式中 α_{ij} 为有效应力; X_i 为体积力分量; p 为渗透水压力。

(3) 裂隙岩体本构模型^[1]

裂隙岩体的本构关系分两步来建立, 即先建立反映剪胀特性的节理弹塑性本构关系, 然后采用均化方法以表征单元体(REV)的平均应力和平均应变来建立裂隙岩体的本构关系。分述如下:

a) 节理本构关系

节理的变形和应力之间存在强烈的非线性关系, 节理开度的变化对岩体渗透性产生直接的影响。这里将节理本构关系按弹塑性模型来处理。节理面局部坐标系如图1。节理面相对位移增量可分为弹性和塑性两部分:

$$\begin{bmatrix} dv \\ du_s \\ du_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dv^e \\ du_s^e \\ du_t^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dv^p \\ du_s^p \\ du_t^p \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 e 和 p 分别表示弹性和塑性分量。

节理弹塑性本构关系为(详细推导见文献[2]):

$$\begin{bmatrix} d\sigma \\ d\tau_s \\ d\tau_t \end{bmatrix} = [K^{\text{ep}}] \begin{bmatrix} dv \\ du_s \\ du_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

该模型中, 反映了非线性法向变形及剪胀对裂隙隙宽的影响^[1,2]。

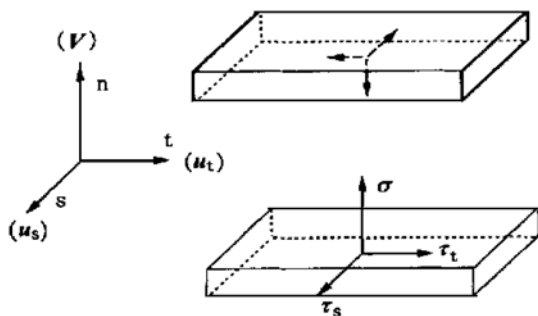


图1 三维节理的应力和位移的定义

Fig. 1 Definition of stress and displacement of a 3-D joint

b) 裂隙岩体的弹塑性本构模型

这里引入均化方法, 用表征单元体(REV)的平均应力和平均应变来建立裂隙岩体的本构关系。表征单元体(REV)的平均应力和平均应变定义如下:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \\ \bar{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \epsilon_{ij} dV \end{aligned} \quad (6)$$

式中 V 为 REV 的体积。

将节理的本构关系代入, 可得三维裂隙岩体的柔度矩阵为(详细推导见文献[2])

$$\bar{C}_{ijkl} = C_{ijkl}^R + \sum_k \bar{T}_{ip} \bar{T}_{jq} \bar{T}_{kr} \bar{T}_{ls} \bar{C}_{pqrs}' \quad (7)$$

式中 $\bar{T}_{ij}$ 是坐标转化矩阵。这样, 裂隙岩体的弹塑性本构关系为

$$\Delta \alpha_{ij} = D_{ijkl}^{\text{ep}} \Delta \epsilon_{kl} \quad (8)$$

(4) 裂隙岩体渗透特性与应力的关系

假定表征体单元内的裂隙可概化为 N 组, 其中第 k 组裂隙的单位法向量为 $n^{(k)}$, 平均张开度为 $\bar{b}(\alpha_{ij})_k$, 其与应力的关系由式(5)计算, 裂隙连通率为 ω_k , 平均线密度为 γ_k , 则等效连续介质的渗透张量为

$$k_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{\omega_k \gamma_k \bar{b}(\alpha_{ij})_k^3}{12 \mu} \left[\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)} \right] \quad (9)$$

3 计算模型与计算参数

(1) 计算范围选取

以左岸作研究对象, 由于渗流边界条件的问题, 计算域范围较大, 上下游边界相距约 4 km, 左岸垂直河床向距离约 1.5 km, 左岸平面图见图2。计算模型中所涉及到的水文地质条件(如岩层分类、渗透系数、边界条件简化等)均是在详细分析了基本资料与溪洛渡水电站地质勘探分析课题组共同商量、讨论的基础上确定的。厂房洞室壁面设为不透水边界。

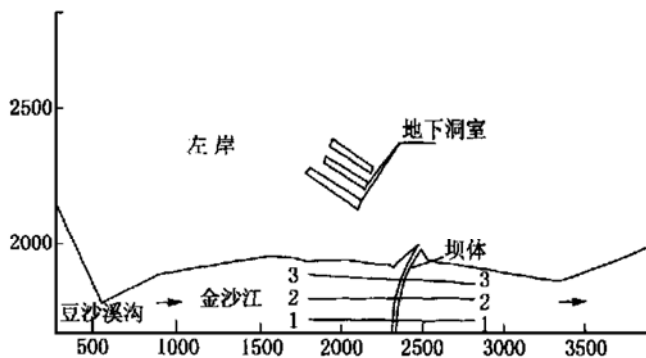


图2 左岸计算域及各剖面图所在的位置示意图

Fig. 2 The calculating region of left bank and the locations of profiles

(2) 计算参数

计算采用的上游水位是 600.0 m, 下游水位 382.4 m。坝体帷幕渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-5}$ (cm/s), 坝体视作不透水材料。裂隙有 4 组, 其力学参数、几何物理参数见表 1, 2。

表 1 溪洛渡坝区各种材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of various materials in Xiluodu dam site

材料类型	抗拉强度/MPa	弹模 E / GPa	泊松比 μ	容重 γ / (kN·m ⁻³)
坝体混凝土	1.5	24.0	0.1667	25.0
弱上岩块	0.5	40.0	0.30	27.6
弱下岩块	1.0	45.0	0.25	27.6
微新岩块	1.5	60.0	0.20	28.5

表 2 左岸微新岩体各组裂隙的几何物理参数

Table 2 Geometric and physical parameters of rock joints on left bank

列号	裂隙宽 / mm	裂隙间距 l / m	法向刚度 / (GPa·m ⁻¹)	切向刚度 / (GPa·m ⁻¹)	摩擦角 / (°)	JRC	JCS / × 10 ⁸ Pa	倾角 / (°)	倾向 / (°)
1	0.7	0.25	1.98	0.76	38.70	10.0	6.0	77.5	143.97
2	0.7	0.20	1.98	0.76	38.66	10.0	6.0	75.0	183.97
3	0.75	0.50	1.98	0.76	38.66	10.0	6.0	77.5	208.97
4	0.60	0.50	3.28	0.44	30.00	10.0	6.0	12.5	83.97

(3) 岩体地应力场

由于提供的地应力场区域过小, 在这范围之外的计算域将根据文献[3] 中对地应力场的分析成果采用以下处理方法: ①主应力的方向取平均值, 即左、右岸的应力主方向分别取相同的值。分别求出 σ_1 , σ_2 , σ_3 与 x , y , z 轴的夹角 α_{11} , α_{12} , α_{21} , α_{22} , α_{23} , α_{31} , α_{32} , α_{33} 。②垂直向的主应力取为埋深 H 的函数, 水平向的两个主应力由侧压力系数得出。③最后根据坐标转换即可得出一点的应力状态。

(4) 增量荷载的处理

先根据以上边界条件计算出天然渗流场, 在此基础上水库蓄水过程分为 5 级荷载, 每级为库水位增加 55 m, 每级荷载加上后, 所形成的渗流场和应力场是由本次荷载所产生的增量和此前的叠加而成。

4 计算结果与分析

研制了考虑裂隙弹塑性变形的大型三维渗流场-应力场耦合分析程序。为便于分析渗流场和应力场耦合作用的相互影响, 拟采用以下方案进行对比分析:

非耦合计算: 按前期确定的渗透分区渗流计算模型和渗透张量, 计算坝区非耦合渗流场(简称非耦合情况) 。

耦合计算: 模拟水库蓄水过程计算渗流场和应力场的耦合情况(简称耦合情况) 。

非耦合是根据溪洛渡课题组按渗透分区提供的渗透张量进行计算的, 在计算中认为岩体的渗透性只与岩体的风化程度有关, 而与埋深无关, 即与岩体的初始地应力状态无关, 这是目前常规渗流分析中常用的做法, 即本文的非耦合情况。在这种条件下, 计算非耦合的渗流场和应力场。耦合计算是计算水库蓄水后渗流场和应力场相互耦合作用的情况。

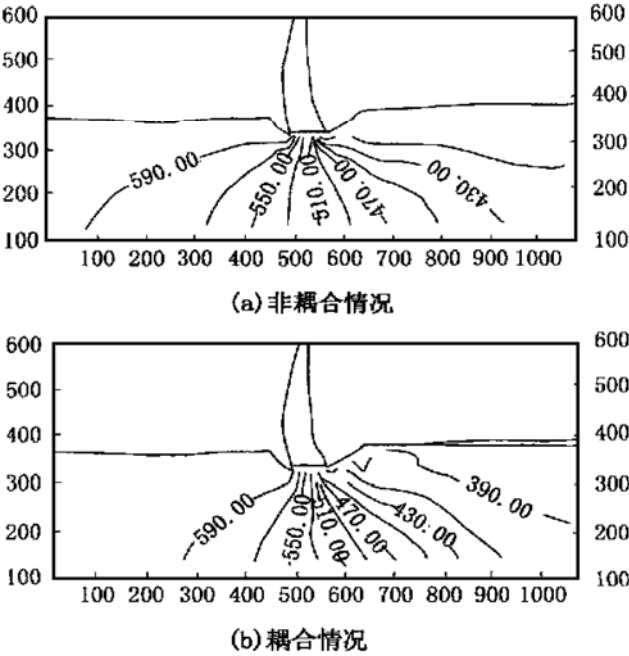


图 3 耦合与非耦合情况下的等势线分布图(1-1剖面:
 $y = 1700$ m, 坐标轴和等势线的单位: m)

Fig. 3 Seepage equipotential lines of coupled analysis
and uncoupled analysis

4.1 渗流场计算成果的对比分析

图(3)~(5)给出了坝基非耦合情况和耦合情况渗流场等势线分布的剖面图(这些结果是根据三维计算结果插值得到的, 各剖面图在平面图上的位置见图 2)。从图上看, 耦合和非耦合渗流场等势线分布均有较显著的差别, 耦合分析计算出的渗流场等势线偏向下游。应力分析表明, 应力的改变量和地应力相比基本相当, 由于受坝体上游面承受巨大的水压力, 使坝体上游的岩体压应力减小, 裂隙隙宽较蓄水前增大, 渗透性增大, 而在坝肩和坝基下游的岩体的裂隙面上承受的压应力增加, 裂隙面闭合, 渗透性减小, 从而形成上

游裂隙张开下游裂隙闭合的情况,在这种情况下就会造成坝肩及坝基的扬压力增大,对坝体的稳定产生不利影响,设计中务必予以考虑。两种情况的坝基扬压力计算结果见表 3~ 5。从表中可以看出耦合算法的扬压力明显比非耦合的大,对坝体的稳定产生不利影响。

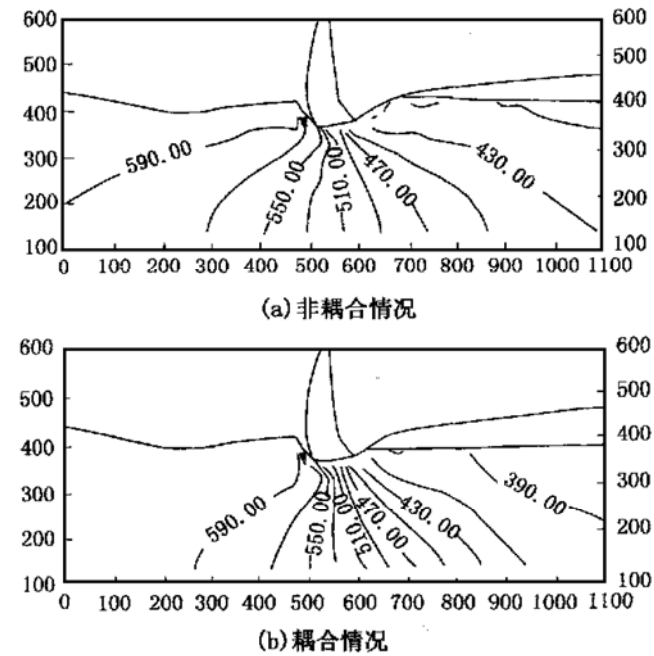


图 4 耦合与非耦合情况下的等势线分布图(2- 2 剖面:
 $y = 1800\text{ m}$, 坐标轴和等势线的单位: m)
Fig. 4 Seepage equipotential lines of coupled
and uncoupled analysis

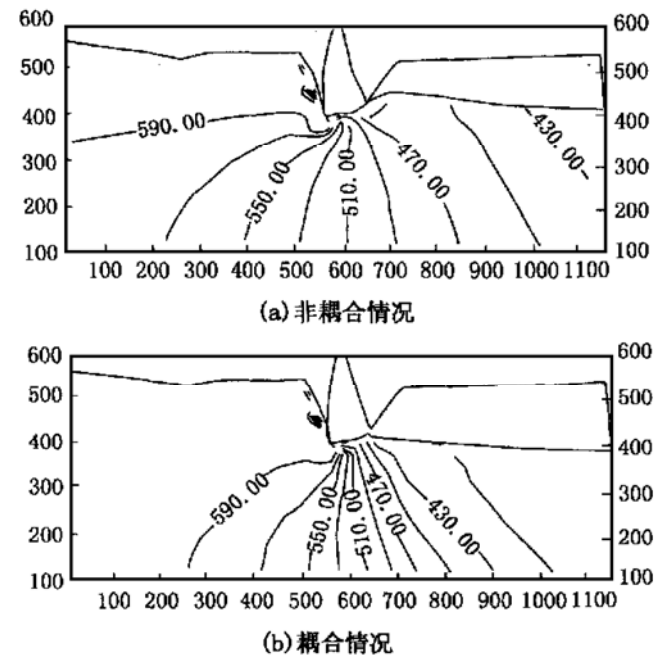


图 5 耦合与非耦合情况下的等势线分布图(3- 3 剖面:
 $y = 1900\text{ m}$, 坐标轴和等势线的单位: m)
Fig. 5 Seepage equipotential lines of coupled
and uncoupled analysis

表 3 两方案左岸坝基底部扬压力值(325.0 m 高程处)
Table 3 Water pressure of coupled and uncoupled
analysis in the dam foundation

方案	压力水头/m			
	点 1	点 2	点 3	点 4
非耦合	600.00	531.72	493.55	382.40
耦合	600.00	569.07	508.43	382.40

表 4 两方案左岸坝基底部扬压力值(350.0 m 高程处)
Table 4 Water pressure of coupled and uncoupled
analysis in the dam foundation

方案	压力水头/m			
	点 1	点 2	点 3	点 4
非耦合	600.00	509.32	499.94	382.40
耦合	600.00	529.98	528.08	382.40

表 5 两方案左岸坝基底部扬压力值(366.0 m 高程处)
Table 5 Water pressure of coupled and uncoupled
analysis in the dam foundation

方案	压力水头/m			
	点 1	点 2	点 3	点 4
非耦合	600.00	513.67	498.89	382.40
耦合	600.00	523.32	509.05	382.40

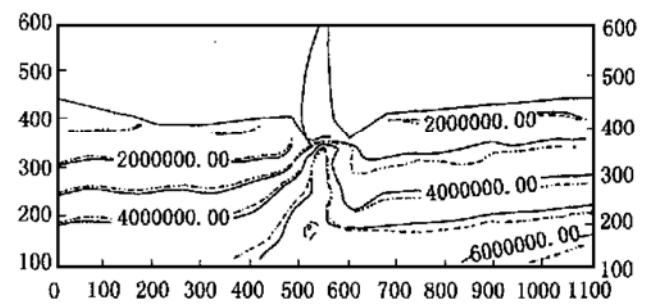


图 6 第 4 组裂隙法向应力对比图(2- 2 剖面.
坐标轴单位: m, 等势线的单位: Pa)

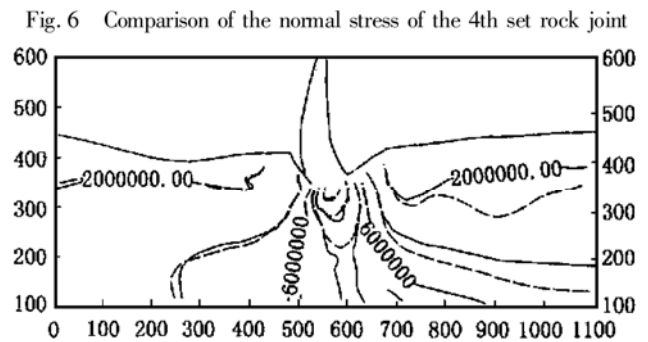


图 7 第 4 组裂隙剪应力对比图(2- 2 剖面,
坐标轴单位: m, 等势线的单位: Pa)

Fig. 7 Comparison of the shear stress of the 4th set rock joint

4.2 裂隙面的应力对比分析

图(6)~ (9)给出了坝基 4 组裂隙中 2 组裂隙法向应力和剪应力的对比分布图(图中虚线为非耦合计算结果,实线为耦合计算结果),第 1 组裂隙为陡裂隙,第

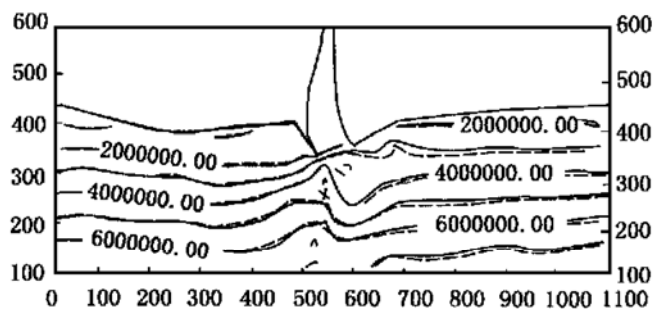


图8 第1组裂隙法向应力对比图(2-2剖面,
坐标轴单位: m, 等势线的单位: Pa)

Fig. 8 Comparison of the normal stress of the 1st set rock joint

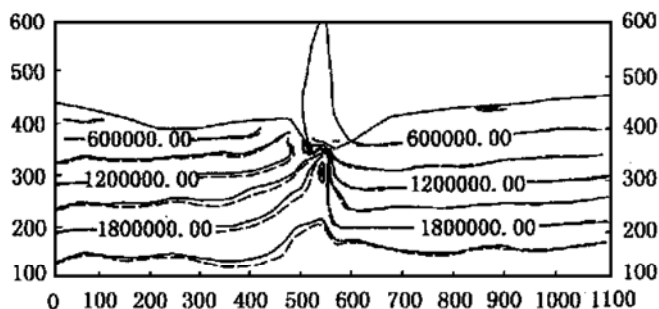


图9 第1组裂隙剪应力对比图(2-2剖面,
坐标轴单位: m, 等势线的单位: Pa)

Fig. 9 Comparison of the shear stress of the 1st set rock joint

4组裂隙为水平向裂隙。从图中可以看出, 上游结构面的法向应力, 耦合情况比非耦合情况小, 下游则增大, 但水平裂隙上的法向应力变化幅度比陡裂隙的大(见图6, 8); 对于剪应力, 耦合计算的结果也增大, 其中水平裂隙在下游区变化大些(图7), 陡裂隙在上游区变化要大些(图9)。这主要是由于受坝体上游面承

受巨大的水压力, 使坝体上游的岩体压应力减小, 裂隙隙宽较耦合前增大, 而坝肩和坝基靠下的岩体的裂隙面上承受的压应力增加较大, 裂隙面闭合, 渗透性减小。从以上分析结果看, 耦合作用使坝肩和坝基附近的流场等势线偏向下游, 坝肩及坝基的扬压力增大, 上游区裂隙面法向应力减小, 下游区法向应力增大, 而剪应力也增大, 耦合作用对坝体的稳定将产生明显不利影响。

5 结 论

(1) 把裂隙岩体概化为等效连续介质, 基于表征单元体的概念建立了统一的渗流- 弹塑性应力全耦合控制方程, 编制了大型的三维四自由度渗流- 弹塑性应力全耦合分析程序。

(2) 由于受坝体上游面承受巨大的水压力, 使坝体上游的岩体压应力减小, 裂隙张开, 下游区裂隙面闭合, 渗透性减小, 而剪应力则增大, 耦合作用对坝体的稳定将产生明显不利影响, 因此在进行高水头大型水工建筑物设计时, 应考虑渗流- 应力耦合影响。

参考文献:

- [1] 盛金昌, 速宝玉, 詹美礼. 裂隙岩体的弹塑性本构模型及有限元分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(5): 27~ 34.
- [2] 盛金昌, 速宝玉, 王 媛, 等. 裂隙岩体渗流- 弹塑性应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 304~ 309.
- [3] 电力工业部成都勘测设计院. 金沙江溪洛渡水电站可行性研究中间报告(岩体物理力学特征研究)[R]. 成都: 电力工业部成都勘测设计院, 1998. 47~ 53.

欢迎订阅《岩土工程界》

《岩土工程界》是适应信息技术高速发展和岩土工程专业市场不断扩大形势, 融“政策、技术、市场”于一体的大型综合信息技术月刊, 1998年初创刊, 经新闻出版署和国家科技部批准, 2000年开始面向国内外公开出版发行。

《岩土工程界》面向勘察设计单位、岩土工程施工企业、设备制造及代理商、科研单位、大专院校、学会协会、房地产开发商等, 内容涵盖岩土工程专业各个领域, 是沟通岩土工程相关各层次群体交流与合作的综合信息平台。

《岩土工程界》2001年改为大16开本, 每月28日出版, 国内外公开发行。国内统一刊号: CN11- 4489/TD, 连续出版物

号: ISSN 1009- 5098。全国各地邮局均可订阅本刊, 邮发代号为2- 656; 读者也可通过《全国非邮发报刊联合征订服务部》网站(网址: www.LHSD.com) 下载“电子订单”并订阅本刊; 也可直接汇款向本编辑部订阅。定价每期8元, 全年12期共96元。

本刊兼营广告, 收费合理, 读者面广, 是广告客户的理想选择。本刊除诚征学术、技术稿件外, 还诚征业界新闻、施工动态、书刊评述, 稿酬照付。展会消息免费刊登。

本刊地址: 北京市朝阳区安外安贞里2区11楼1层 邮编: 100029 电话: 010- 64435074; 64417951 传真: 010- 64435075 电子信箱: geo-pro@263.net