

裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析与工程应用

赵延林^{1, 2, 3}, 王卫军^{1, 2}, 黄永恒³, 曹平³, 万文^{1, 2}

(1. 湖南科技大学煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 综合运用岩体结构力学、几何损伤力学及岩石流体力学理论, 建立裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合数学模型(扩展 FLAC^{3D}模型), 在 FLAC 现有计算模块的基础上, 通过 Fish 研制了其分析程序。该模型的耦合机理: 渗透水梯度作为渗透体积力作用于损伤应力计算单元, 裂隙渗透压作为面力作用于裂纹张开部分引起断续岩石裂纹的起裂, 扩展导致岩体损伤演化; 岩体裂纹的扩展引起岩体渗透系数的增加, 导致渗流场的改变。对一复杂裂隙岸坡蓄水加载过程进行渗流-损伤-断裂耦合分析, 得到不同蓄水时期, 裂隙岸坡渗流场分布、损伤场的演化, 初步探讨了水库蓄水过程中岸坡山体变形机制。耦合分析认为: 山体变形是增量渗透力和增量浮托力共同作用于岸坡的结果; 对蓄水相对高程较大的裂隙岸坡而言, 库水位上升, 裂隙渗透水压增加导致岩体裂纹起裂扩展, 岩体损伤区增大且向岸坡深部扩展。高渗透压诱发岸坡不利断层带损伤区扩展, 甚至贯通, 可能是导致岸坡失稳的重要原因。

关键词: 耦合模型; 损伤演化; FLAC^{3D}; 裂隙岸坡; 渗透压

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 100-4548(2010)01-0024-09

作者简介: 赵延林(1975-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩体渗流力学研究。E-mail: yanlin_8@tom.com。

Coupling analysis of seepage-damage-fracture in fractured rock mass and engineering application

ZHAO Yan-lin^{1, 2, 3}, WANG Wei-jun^{1, 2}, HUANG Yong-heng³, CAO Ping³, WAN Wen^{1, 2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By comprehensive use of the theories of structural mechanics of rock mass, geometrical damage mechanics and rock fluid mechanics, the model of seepage-damage-fracture coupling (extended FLAC^{3D} model) is established. Based on FLAC^{3D} existing computation modules, the programs of seepage-damage-fracture coupling in fractured rock mass are developed with the Fish language. The coupling mechanism of the model lies in that hydraulic gradient applies on the stress calculation units as permeable volume strength. Seepage pressure applies on the opening part of cracks as surface force, resulting in damage of rocks with splitting and growth of discontinuous cracks. The crack growth induces the increase of permeability coefficient, ultimately the change of seepage field. The seepage-damage-fracture coupling analysis on the fractured rock bank slope during the rising of water level in a reservoir is shown. The laws of the distribution of the seepage field and rock damage field evolution are obtained. A preliminary study on deformation of bank slope during the rising of water level in the reservoir is also made. Coupling analysis indicates that deformation of bank slope is due to the interaction of increment seepage force and increment uplift force. For the fractured bank slope with relatively high elevation of water storage, the increase of seepage pressure in fractures leads to the starting growth and propagation of damage zone. High seepage pressure leads to the growth of damage zone in unfavorable fault zone and even to the penetration. It may be the important reason for the instability of bank slopes.

Key words: coupling model; damage evolution; FLAC^{3D}; fractured bank slope; seepage pressure

0 前 言

处于渗流场中的裂隙岩体的力学特性及水岩作用的机理一直是岩石力学领域关注的方向, 渗流场的存在和改变是导致裂隙岩体工程的失稳, 甚至导致大

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400);
国家自然科学基金项目(50774093); 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放基金项目(2008001)

收稿日期: 2008-11-04

规模的地质灾害和岩体的突变失稳的重要原因之一, 如法国Malpasset拱坝(1959年)在初次蓄水时发生溃坝以及Vajont拱坝(1963年)上游左岸产生大滑坡^[1]。对于裂隙岩体的力学特性与水的耦合效应研究, 从太沙基提出有效应力原理基本概念以来, 不少学者提出了许多流固耦合模型, 如基于连续介质假设的岩体渗流-应力耦合模型^[2-3]、把岩体看成由裂隙切割成的块裂介质建立的离散介质渗流-应力模型^[4-6]及两者结合起来的双重介质流固耦合模型^[7-8]。大量的工程实践表明, 地下水位的上升及裂隙的渗流是裂隙岩石边坡失稳的重要原因之一。一方面裂隙水压加剧了岩体裂隙的起裂、扩展、贯通, 导致岩体渐进失稳破坏, 在宏观上, 这一过程也是渗流导致岩体强度渐进劣化损伤的过程, 另一方面岩体应力的改变和岩体裂隙的损伤扩展, 导致裂隙岩体的渗透特性变化, 将改变渗流场的分布。岩体应力的损伤演化与渗流之间的作用是相互耦合。朱珍德、郑少河等从不同角度建立了裂隙岩体渗流场与损伤场的有限元耦合模型^[9-10], 并将耦合模型应用于大型水利工程中, 唐春安等^[11]研制的Rfpa-Flow软件从细观力学的层次解释宏观工程岩体渗流-应力耦合作用下的破坏、失稳行为。FLAC^{3D}作为岩土工程计算的通用计算软件提供了多种内嵌本构模型和包含强大的内置Fish程序语言可以模拟地质材料的高度非线性和不可逆性力学响应。为研究复杂地质、地理条件下裂隙岩体的渗流-损伤-断裂耦合作用, 笔者用Fish扩展建立了基于FLAC^{3D}的裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合计算程序。

1 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型

1.1 渗流计算模块

在渗流分析中, FLAC^{3D}的数值实现的微分控制方程为

$$\frac{\partial p}{\partial t} = M \left(-\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v - a \frac{\partial e}{\partial t} \right) . \quad (1)$$

式中 p 为渗透压; M 为比奥模量; q_v 为体积流原强度; e 为体积应变; a 为有效应力的比奥系数; q_i 为比流量,

$$q_i = k_{ij} \frac{\partial p}{\partial x_j} , \quad (2)$$

其中, k_{ij} 为渗透系数, 考虑损伤断裂效应, 表达式为

$$k_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{g(b^{(k)} + \Delta b^{(k)})^3}{12nC^{(k)}} \pi(a+l)^{(k)^2} b^{(k)} r_s^{(k)} (d_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) , \quad (3)$$

其中, a 为断续裂纹迹长, n 为运动黏滞系数, $C^{(k)}$ 为 k 组裂纹面的粗糙度修正系数, $b^{(k)}$ 为 k 组裂纹的连

通率, $r_s^{(k)}$ 为 k 组裂纹面密度, n_i , n_j 为裂纹面法向余弦, l 为翼形裂纹扩展长度, $s_n^{(k)}$, $k_n^{(k)}$ 分别为 k 组裂纹的法向应力和法向刚度, $b^{(k)}$ 为 k 组裂纹初始张开度,

$$\Delta b^{(k)} = -b^{(k)} \left(1 - e^{-\frac{s_n^{(k)} - b^{(k)} p}{k_n^{(k)}}} \right) . \quad (4)$$

1.2 损伤计算模块

裂隙岩体可看作是由众多断续裂纹网络切割而成的地质综合体, 同时岩体断续节理是地质历史运动的形迹, 具有一定的规律性和方向性, 即成组定向, 有序分布。

在压剪应力优势的岩体中, 断续岩石裂纹在远场应力和裂隙渗透压共同作用下摩擦滑动、压剪起裂、形成翼形张开裂纹, 新裂纹面沿最大主应力方向扩展, 直到形成贯通的宏观裂隙, 从而使岩体损伤演化, 裂隙扩展, 引起岩体结构改变, 使岩体弹性模量降低、柔度增加, 裂隙岩体这一力学特性可通过损伤变量的演化发展加以描述^[12]。

假定裂纹面部分闭合, 引入系数 b 以表征连通面积与总面积之比, 渗透压力 p 的贡献变为 bp 。在渗透压 bp 和单元应力 s_1 , s_3 作用下, 压剪裂纹在有效剪切驱动力作用下滑移形成翼形裂纹, 翼形裂纹起裂时尖端应力强度因子^[12]:

$$K_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} t_{\text{eff}} \sqrt{\pi a} = \frac{2}{\sqrt{3}} (t_e - s_n m + b p m) \sqrt{\pi a} , \quad (5)$$

式中, t_{eff} 为断续裂纹传递的有效切向应力, t_e 为断续裂纹传递的切向应力, s_n 为断续裂纹传递的法向应力, m 为裂纹内表面摩擦因数。

翼形裂纹逐渐沿最大压应力的方向稳定扩展。扩展中翼形裂纹尖端应力强度因子 K_1 计算方法在 Kemeny 等^[13]计算模型上修正, 考虑裂纹渗透水压 p 产生的附加应力强度因子 $p\sqrt{\pi a L}$, 翼形裂纹尖端应力强度因子为

$$K_1 = \frac{T_e \cos y}{\sqrt{p L}} - s_3 \sqrt{\pi a L} + p \sqrt{\pi a L} \\ = \frac{\sin 2y - (1 + \cos 2y)m}{\sqrt{\pi L}} s_1 \sqrt{a} \cos y + \\ \frac{(\cos 2y - 1)m - \sin 2y}{\sqrt{\pi L}} s_3 \sqrt{a} \cos y - \\ s_3 \sqrt{\pi a L} + \frac{2\sqrt{a}mbp}{\sqrt{\pi L}} \cos y + p\sqrt{\pi a L} , \quad (6)$$

式中, $L = l/a$ 为等效翼形裂纹长度, l 为翼形裂纹扩展长度, a 为裂纹迹长, y 为裂纹与最大主应力夹角。

翼形裂纹沿最大主应力方向扩展直至 $K_1 = K_{IC}$ (K_{IC} 为岩石断裂韧度), 由此可求出翼形裂纹在压剪应力及渗透压共同作用下的扩展长度 l (见图1)。翼

形裂纹扩展过程中, 岩体强度劣化, 裂隙岩体损伤演化, 翼形裂纹的扩展引起附加变形, 对于 N_A 条滑移型压剪裂纹起裂扩展产生的附加损伤应变 Δe , Song 等^[14]研究得出

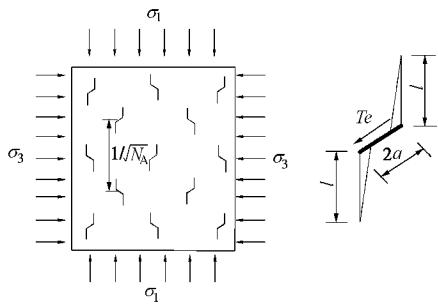


图 1 裂纹扩展示意图

Fig. 1 Propagation of cracks

$$\Delta e_1 = \frac{8Ic \cos y}{E_0} \left[\frac{2t_e \cos y}{\pi} \ln \frac{l}{a} - s_3 \left(\frac{l}{a} - 1 \right) \right], \quad (7)$$

$$\Delta e_3 = \frac{c}{E_0} \left[\frac{16t_e \cos^2 y}{\pi} \ln \frac{l}{a} - 8 \cos y \left(\frac{l}{a} - 1 \right) (s_3 g + t_e) + s_3 \pi \left(\frac{l^2}{a^2} - 1 \right) \right], \quad (8)$$

式中,

$$t_e = \frac{s_1 - s_3}{2} \sin 2y - \frac{m[s_1 + s_3 + (s_1 - s_3) \cos 2y]}{2} + bpm, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} l &= \sin y \cos y - u \cos^2 y, \\ g &= -\sin y \cos y - u \sin^2 y, \\ c &= N_A a^2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, N_A 为单位面积滑移型压剪裂纹的条数, E_0 为完整岩石弹性模量。

用应变等效原理, 假定岩石材料损伤后泊松比 m 保持不变, 岩石材料损伤由弹性模量 E 损伤导致。由式 (7) ~ (10) 可反演出在裂纹扩展损伤演化过程中岩体的弹性模量 E 的损伤演化方程 D :

$$\bar{E} = (1 - D)E_0, \quad (11)$$

$$D = \frac{E_0(\Delta e_1 s_1 - \Delta e_3 s_3)}{E_0(\Delta e_1 s_1 - \Delta e_3 s_3) + s_1^2 - s_3^2}, \quad (12)$$

式中, \bar{E} 为损伤状态下的弹性模量。

在损伤应力场与渗流场耦合作用下损伤本构关系:

$$s_{ij,j} + F_i + (ap)_{,j} = 0, \quad (13)$$

式中, F_i 为等效结点荷载, $(ap)_{,j}$ 为渗透水力梯度作为等效体积力作用于岩体骨架, 反映了渗流场对应力场的耦合作用。

1.3 程序设计

采用FLAC^{3D}自带FISH语言研制的渗流场与损伤

应力场耦合分析程序, 具体思路如下:

损伤计算模块中根据式 (5) ~ (12), 用FISH语言编写断续裂纹的起裂、裂纹扩展与损伤变量 D 的演化程序段 damage.dat。调用莫尔-库仑模型, 每计算若干时步, 调用 damage.dat, 用以监控该计算该时段内的起裂单元, 计算起裂单元的裂纹扩展长度, 进而得到该计算时段末的损伤变量, 此损伤值即为下个计算时段内的损伤值, 如此递推下去, 直至达到预定计算精度。

渗流场计算模块中, 考虑了渗流边界条件动态变化(如水位动态变化, 边界上流量动态变化等)和渗透系数动态变化对渗透场的影响。

为实现渗流场与损伤应力场之间耦合分析, 编写将渗透水力梯度耦合到损伤应力计算单元的程序段和将裂纹扩展长度耦合到渗透系数的程序段。

损伤场中裂纹扩展动态耦合到渗透系数的程序设计按如下方法进行: 先根据每个时步的渗流时间 (time_step) 设定一个渗流时段 t (即运行 n 个时步得一个渗流时段 $t = \text{time_step} \cdot n$), 每计算一个渗流时段后退出渗流模块进入损伤场计算模块, 计算由于渗透压和渗透动水力梯度导致的裂纹扩展和渗透体积力, 得到当前渗流时段内的损伤应力场、位移场。进而由式 (4) 得到断续裂纹法向变形; 由式 (6) 计算出当前段末的裂纹扩展长度, 由式 (3) 求出当前时段末渗透系数, 即为下一时段的渗透系数, 程序进入下一时段的渗流计算, 如此循环, 直至达到稳定渗流阶段或预定的计算时间。裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展FLAC^{3D}模型)的地质建模的前处理过程在Ansys上完成, 数值结果的后处理在Tecplot上完成。程序运行框图见图2。

裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展FLAC^{3D}模型)的耦合机制体现下面2个方面:

(1) 渗透水力梯度作为渗透体积力作用于应力计算单元, 裂隙渗透压作为面力作用于裂纹张开部分引起断续岩体裂纹的起裂, 扩展导致岩体强度弱化和局部损伤, 进而改变了岩体的应力场。

(2) 岩体裂纹的扩展引起岩体渗透系数的增加, 导致渗流场的改变。

2 水库蓄水裂隙岸坡渗流-损伤-断裂耦合分析

水库的蓄水过程是裂隙库岸边坡水岩环境动态变化的过程, Riemer统计了60个水库滑坡实例, 指出85%的滑坡发生在建设或蓄水期或工程完工2 a内^[16]。

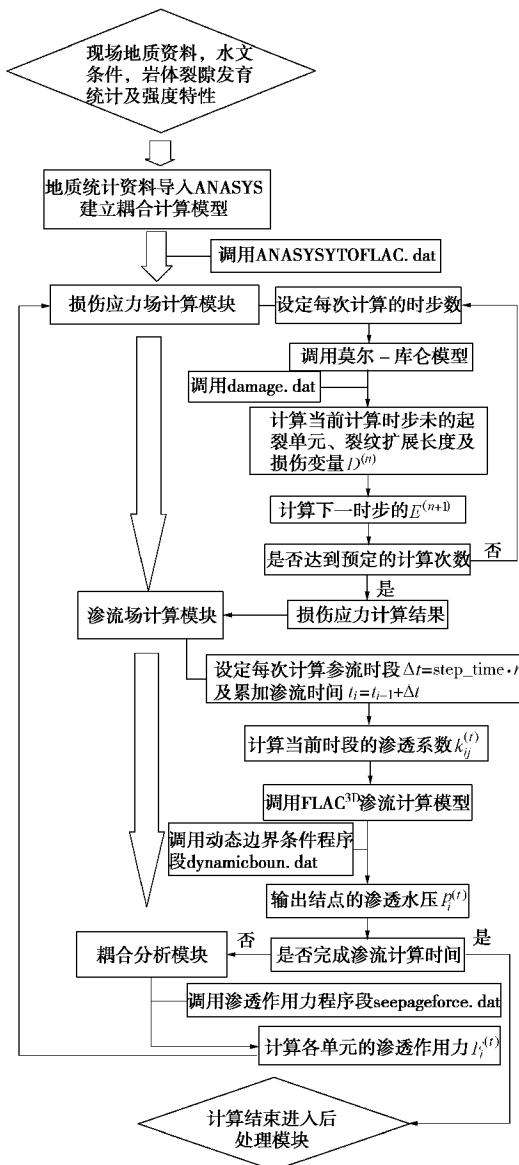
图2 扩展 FLAC^{3D}耦合程序框图

Fig. 2 Flow chart of program of extended FLAC^{3D} coupling model

Vajont近坝库岸岩体大滑坡显示了与土坝滑坡完全不同的规律, 土坝滑坡常发生在水位降落时段, 而Vajont裂隙岩石坡体每当库水位上升时岸坡位移速率随之加大, 而库水位降低时, 位移速度减小甚至停止^[1]。库水位上升导致的裂隙岸坡的失稳机制只有采用流固耦合分析方法才能得出比较正确的答案。笔者利用裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展FLAC^{3D}模型)的强大数值仿真功能, 探讨了在水库蓄水过程中, 某复杂裂隙岸坡渗流-损伤-断裂之间的耦合作用, 研究了水库蓄水过程中的裂隙岸坡损伤区、渗流场、位移场的动态演化。

2.1 工程概况与计算模型

某水电站河流由北向南, 河道平直, 河谷狭窄, 横剖面呈“V”字形。岸坡陡立, 从谷底至岸顶高差达1000 m左右。岸坡山体主要为变质岩系, 包含黑云花岗片麻岩及角闪斜长片麻岩等。岸坡山体构造较发育, 上游左岸坡山体发育断层带F₁, 断层带F₁宽120~200 cm, 断层带内断层泥较破碎, 断层长约4000 m, 断层带F₁不平直。右岸坡山体发育平直断层带F₂, 产状为293.8°∠32°, 断层带宽约100 cm。断层带F₁, F₂位置分布见图3, 4; 裂隙岩体发育着二组低序次节理裂隙, 统计产状和力学参数见表1。

断层带和岩体的物理力学参数见表2, 其中岩体滑移裂纹的密度N_A=0.2364, 裂纹表面内摩擦因数m=0.5; 裂纹连通率b=0.6。断层带内滑移裂纹的密度N_A=0.9014, 裂纹表面内摩擦因数m=0.3, 裂纹连通率b=0.8。

分析模型见图3。坐标原点为模型底部顶点o, 以江河中心线为界, 左右岸坡分别向山里延伸980 m, 共计1960 m(x轴方向); 顺河向(z轴方向)取700 m。河底标高为+210 m, 山体相对河底的相对高程为490~630 m(y轴方向), 河底宽90 m, 左岸坡下部(相对高程210 m下)的坡度为30°~60°, 右岸坡下部

表1 断续裂纹组几何和力学统计参数

Table 1 Geometrical and mechanical parameters of discontinuous crack sets

编号	间距/m	迹长/m	断距/m	q _x /(^°)	q _y /(^°)	q _z /(^°)	初始裂宽/mm	刚度/(GPa·m ⁻¹)		初始渗透系数/(m·s ⁻¹)		
								法向	切向	k _{xx}	K _{yy}	K _{zz}
裂隙组1	1.5	1.0	3.0	30	60	90	0.02	5.00	2.00	9.0×10 ⁻⁷	5.2×10 ⁻⁷	1.2×10 ⁻⁶
裂隙组2	3.0	2.0	3.0	135	45	90	0.01	7.50	3.00	2.5×10 ⁻⁷	2.5×10 ⁻⁷	8.5×10 ⁻⁷
断层带内裂隙组	0.8	0.5	0.6	135	45	90	0.10	0.75	0.30	8.0×10 ⁻⁵	8.0×10 ⁻⁵	9.5×10 ⁻⁵

表2 岩体和断层带力学计算参数

Table 2 Mechanical parameters of rock mass and fault zone

编号	弹性模量E/GPa	泊松比m	空隙率n	黏聚力c/kPa	内摩擦角j/(°)	断裂韧度K _{IC} /(MPa·m ^{0.5})
花岗片麻岩	35	0.21	0.1	2.0	35	1.2
角闪斜长片麻岩	30	0.25	0.15	1.5	30	1.0
断层带F ₁	1.0	0.30	0.65	0.6	15	0.35
断层带F ₂	2.0	0.35	0.7	1.0	20	0.45

(相对高程210 m下) 的坡度为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。整个计算区域 $1960 \text{ m} \times 840 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ ($x \cdot y \cdot z$)，共有148835个单元。图4为 $z=5 \text{ m}$ 的裂隙岸坡纵剖面示意图。

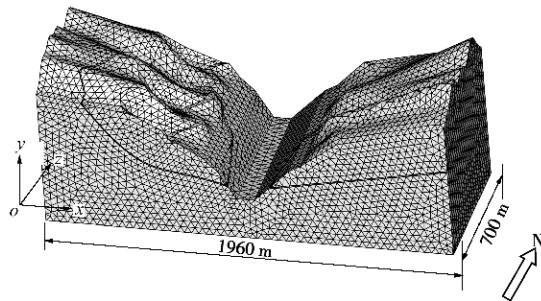


图3 裂隙岸坡计算模型及网格划分

Fig. 3 Computational model of fractured slope and grid mesh

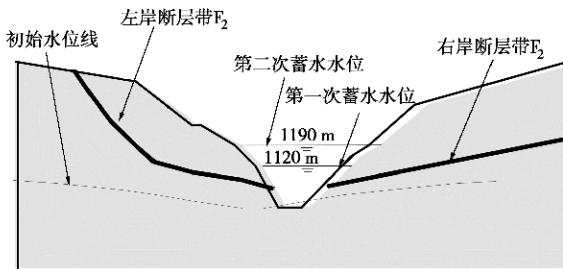


图4 岸坡纵剖面示意图

Fig. 4 Longitudinal profile of fractured slope

耦合计算模型力学边界条件为4个侧面及底面均采用法向约束。

水库的初始水位高度为980 m，最大蓄水位高度为1190 m，渗流场边界条件： $x=0$ 和 $x=1960 \text{ m}$ 的左右边界为定水头边界，水头高度为初始地下水位高度。河谷两岸坡取动水头边界，水头高度是时间的函数，水库最高蓄水水位为1190 m，库区蓄水的相对高程(最大库水深)为210 m。模型底面和上下游边界为不透水边界。水库蓄分二次进行，第一次蓄水：库水位以 2.33 m/d 的速度上升，2个月后水位抬升 140 m ，此后水位保持 1120 m 持续2个月；第二次蓄水：以 1.167 m/d 的速度上升，2个月后水位在 1120 m 的基础上抬升 70 m ，然后水位 1190 m 不变，模拟时间为 270 d ，库水位上升曲线见图5。

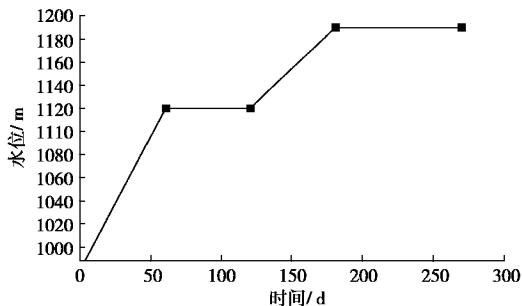


图5 库水位上升曲线

Fig. 5 Rising curves of reservoir level

2.2 耦合计算成果

(1) 蓄水前裂隙岸损伤场和渗流场

裂隙岸坡初始渗流场分布为深埋型地下水位分布(见图6)；图7为蓄水前裂隙岸坡的损伤演化区。在蓄水前在岸坡表层和断层带内出现了一定范围的损伤区，开挖导致裂隙岸坡有5124个单元处于损伤状态。

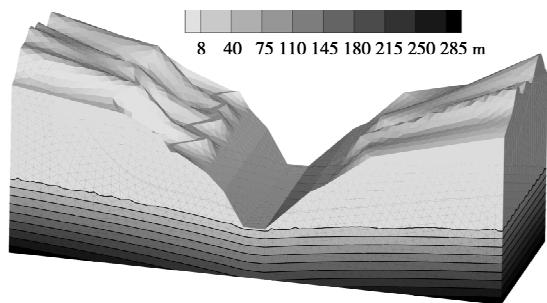


图6 裂隙岸坡初始水头分布图

Fig. 6 Distribution of initial water head of fractured slope

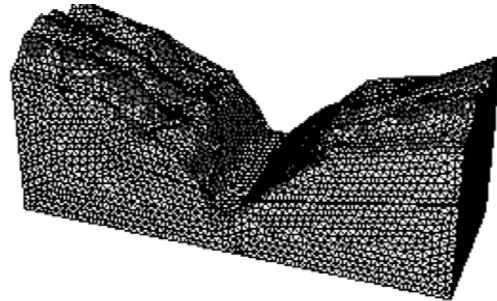


图7 裂隙岸坡初始损伤区分布图

Fig. 7 Distribution of initial damage zone of fractured slope

(2) 水位上升至 1120 m (水位抬升 140 m)

第一次蓄水，水位以 2.33 m/d 的速度上升， 60 d 后水位抬升 140 m ，此后库水位保持 1120 m ，在此水位下，水库负荷运行 60 d ，这里给出了 $t=120 \text{ d}$ (计算时步 $\text{time_step}=16.0515 \text{ s/次}$ ，计算次数 $n=645920$) 时，裂隙岸坡的水头分布(图8)，由于断层带的渗水性要强于岩体，断层带水头较岩体上升快，非稳定渗流阶段，断层带使岩体渗流场呈各向异性。

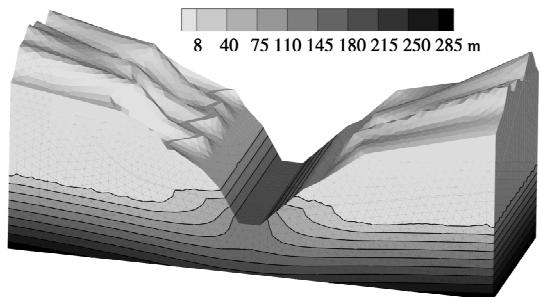


图8 裂隙岸坡水头分布图($t=120 \text{ d}$)

Fig. 8 Distribution of water head of fractured slope ($t=120 \text{ d}$)

渗透水压的增加导致断续岩石裂纹扭折起裂, 形成翼形张拉裂纹并扩展, 这一过程也是岩体强度损伤演化、渗透性增强的过程, 用裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展 FLAC^{3D}模型)计算得到 $t=120$ d 时损伤演化区分布(图 9), 由于渗透压对断续岩石裂纹的劈裂作用, 岩体损伤区演化扩张, 断层带内损伤区向岸坡深处演化, 岸坡内有 7553 个单元处于损伤状态, 损伤单元为蓄水前的 1.474 倍, 渗透水压的动态上升是导致损伤区扩张, 岸坡失稳的重要原因。

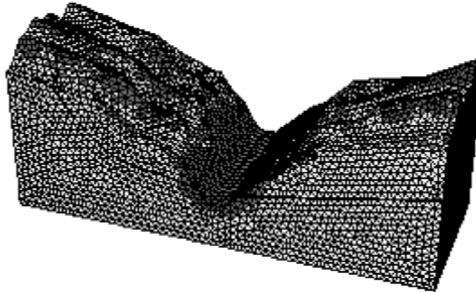


图 9 裂隙岸坡损伤区分布图($t=120$ d)

Fig. 9 Distribution of damage zone of fractured slope ($t=120$ d)

水库蓄水导致岸坡山体变形是由增量渗流渗透力和增量浮托力共同作用于岸坡诱发的, 与水力梯度成正比的增量渗透力方向指向岸坡, 在程序中作为体积力施加于损伤应力计算单元, 增量浮托力指向上, 使岩体上抬, 在程序中用浮重度来考虑其力学效应, 耦合计算得到 $t=120$ d 时岸坡的水平位移(图 10)和竖向位移(图 11)。发现水位线以下岸坡产生朝坡内的水平位移, 左岸断层带的水平位移达 20 mm, 而水位线上以上岩体朝河心方向位移 4~10 mm。增量渗流渗透力和增量浮托力共同作用下两岸山体整体沉降变形, 坡底最大沉降达 60 mm(图 11)。岸坡山体的这种变形规律在多个工程案例得以体现。如文献[17], 通过对李家峡左岸高边坡岩体变位监测资料得到在库水位逐步抬升至正常蓄水位的过程中, 左岸高边坡岩体(水位线以上)主要产生朝河心方向的下滑变位^[16]; 小浪底水库蓄水后左岸山体产生沉降为 31.2~36.2 mm^[11]。

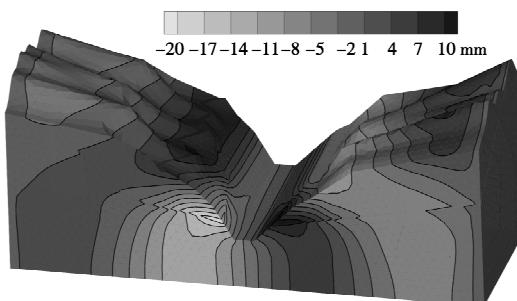


图 10 裂隙岸坡耦合分析下水平位移等值图($t=120$ d)

Fig. 10 Horizontal displacement contours of seepage-damage-fracture coupling analysis ($t=120$ d)

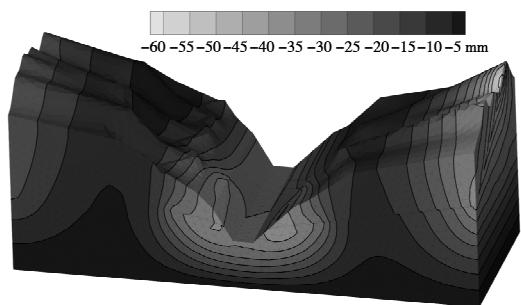


图 11 裂隙岸坡耦合分析下竖向位移等值图($t=120$ d)

Fig. 11 Vertical displacement contours of seepage-damage-fracture coupling analysis of the fractured slope ($t=120$ d)

(3) 水位上升到 1190 m(水位总抬升量 210 m)

第二次蓄水, 库水位以 1.167 m/d 速度上升, 2 个月后水位抬升 70 m 然后保持正常水位 1190 m, 水库负荷运行, 耦合计算总时间为 270 d, 这里给出了耦合分析得到的 $t=270$ d 时裂隙岸坡渗流场、损伤区及山体位移分布。 $t=270$ d 时渗流趋于稳定, 断层带的渗透性远强于基岩, 水位线在断层带和基岩的界面上出现向坡内弯曲的突变, 断层带附近基岩内出现水位跌落(图 12)。裂隙渗透水压增加, 高渗透压驱动下岩体内自锁状态的断续裂纹被激活, 岩体损伤演化区有较大面积增加, 图 13 为裂隙岸坡的损伤区分布图, 岸坡内有 11391 个损伤单元, 为 $t=120$ d 时损伤单元数的 150.8%。

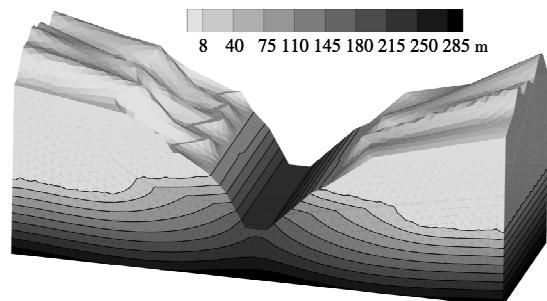


图 12 裂隙岸坡水头分布图($t=270$ d)

Fig. 12 Distribution of water head of fractured slope ($t=270$ d)

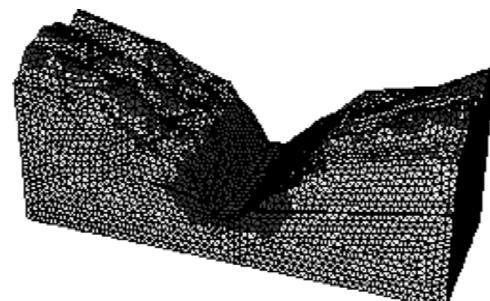


图 13 裂隙岸坡损伤区分布图($t=270$ d)

Fig. 13 Distribution of damage zone of fractured slope ($t=270$ d)

水位从 1120 m 上升至 1190 m 时, 岸坡的变形趋

势没有明显变化, 但位移量值有一定幅度的增加, 水位线以下坡体的水平位移增幅较大, 最大水平位移量值达 50 mm; 水位线以上部分坡体仍朝河心方向变形, 量值为 6~13 mm (图 14), 由于地下水位大幅度上升, 增量浮托力对岸坡贡献较大, 抵消了部分增量渗流渗透力, 岸坡山体沉降变形增幅不大, 与水位 1120 m 的沉降量比较, 沉降增幅量值为 10 mm 左右 (图 15)。

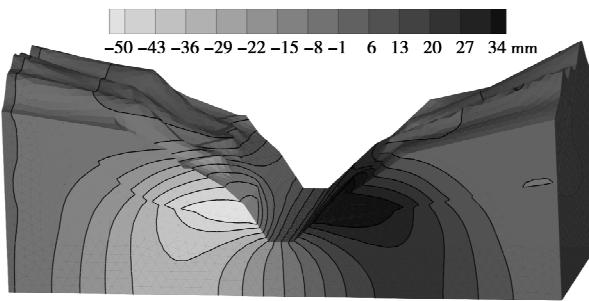


图 14 裂隙岸坡耦合分析下水平位移等值图($t=270$ d)

Fig. 14 Horizontal displacement contours of seepage-damage-fracture coupling analysis ($t=270$ d)

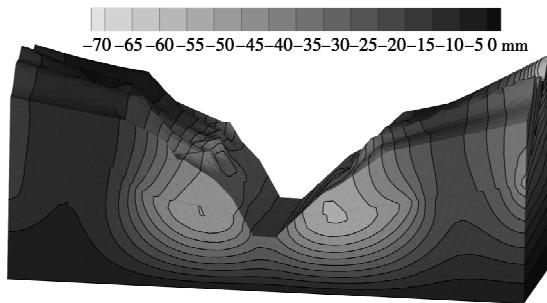


图 15 裂隙岸坡耦合分析下竖向位移等值图($t=270$ d)

Fig. 15 Vertical displacement contours of seepage-damage-fracture coupling analysis of the fractured slope ($t=270$ d)

图 16, 17 为不同水位下, 岸坡岩体强度损伤变量 D 的分布图, 可得出: 随水位上升, 损伤区在扩张, 且岩体损伤由岸坡浅部向深部扩展, 水位上升至 1190 m 时在距岸坡面 200 m 左右岩体内出现了损伤变量 D 的增大区, 其最高量值达 0.295; 随水位上升, 不利断层带损伤区扩展, 有贯通趋势, 这是导致岸坡失稳的重要原因。岸坡深部出现的断裂损伤, 岩石断续裂隙的水力劈裂, 释放表面能, 可能会产生水库触发地震。如江口水电站水库蓄水后第一年, 发生多次水库触发地震.研究认为主要是由于水力导致岩石破裂或因破裂而引发沉陷所产生的。

(4) 断层带损伤区演化

耦合分析 (图 16, 17) 发现左岸断层带 F_1 是裂隙岸坡潜在的滑动带, 随水位上升, 断层带渗透水压增加, 左岸断层带损伤区的扩张导致此断层带损伤区接

近贯通 (图 18), 蓄水前左岸断层带内有 652 个损伤单元, 库水位上升 140 m (水位为 1120 m), $t=120$ d 时, 左岸断层带内有 994 个单元处于损伤状态, 第二次蓄水 $t=270$ d 时, 左岸断层带内损伤单元增加到 1294 个且损伤区接近贯通。随渗透压增加右岸断层带损伤区也向岸坡深处演化, 只是损伤演化区的面积不及左岸断层带。

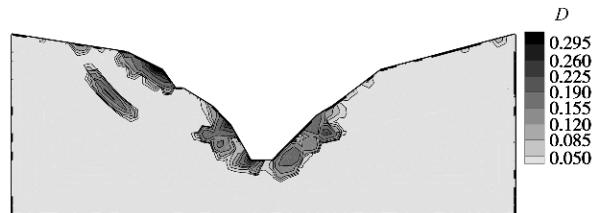


图 16 纵剖面上的损伤变量 D 的分布($t=120$ d)

Fig. 16 Distribution of damaging variable D of longitudinal profile of fractured slope ($t=120$ d)

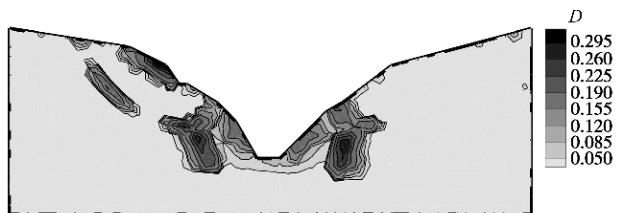
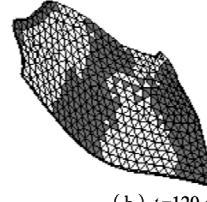


图 17 纵剖面上的损伤变量 D 的分布($t=270$ d)

Fig. 17 Distribution of damaging variable D of longitudinal profile of fractured slope ($t=270$ d)



(a) 蓄水前



(b) $t=120$ d



(c) $t=270$ d

图 18 断层带损伤区演化

Fig. 18 Evolution of damage zone in fault zone

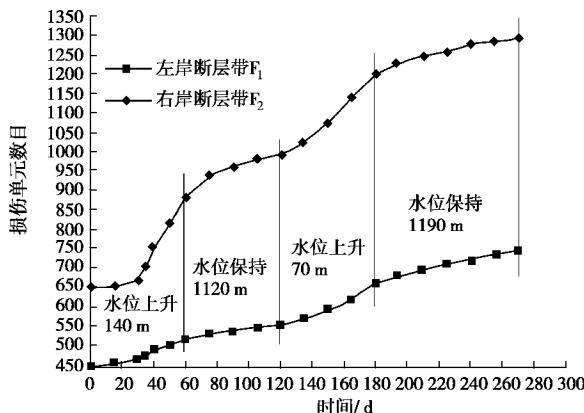


图 19 断层带损伤单元数演化曲线

Fig. 19 Evolution of damage zone unit numbers in fault zone

图 19 为水库蓄水不同时期断层带内损伤区的演化曲线, 可以看出, 随水位的抬升, 断层带内损伤区增大, 由于渗流滞后于水位上升, 水位稳定后, 裂隙岸坡仍处于非稳定渗流状态, 渗透水头随时间继续增加, 断层带内损伤进一步演化扩展。裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型中, 导致岩体的损伤演化的原因在于断续裂纹内的渗透水压和岩体应力的动态变化, 作者认为尽管岩体应力受动水力梯度的耦合作用而扰动了岩体应力分布, 但是对于蓄水相对高程较大的裂隙岩质岸坡而言, 裂纹内的高渗透水压作为面力作用于裂纹表面是导致岩体损伤演化, 岸坡失稳和水库触发地震的重要原因。裂隙渗透压的增加导致裂纹张开度变大、翼形裂纹扩展, 渗透系数随之增加。图 20 显示不同时刻左岸断层带渗透系数的演化, 左岸断层带未损伤部分初始渗透系数 k_{xx} 为 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $t = 120 \text{ d}$ 时左岸断层带损伤区渗透系数 k_{xx} 集中在 $1.05 \times 10^{-4} \sim 2.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $t = 270 \text{ d}$ 时左岸断层带损伤区渗透系数 k_{xx} 集中在 $1.4 \times 10^{-4} \sim 4.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。

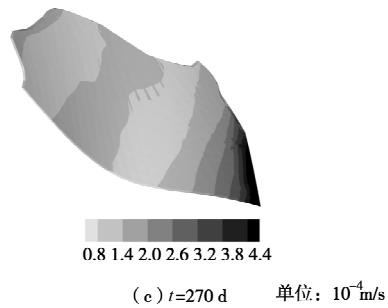
图 20 断层带渗透系数 k_{xx} 的演化

Fig. 20 Evolution of seepage coefficient in fault zone

本算例给出的两个断层带对岸坡来说是不利的地貌与地质结构, 这是导致岸坡失稳的基本条件; 不利的构造结构面的切割, 使之成为潜在的不稳定岸坡地段; 水库蓄水作用改变了岸坡岩体的水动力条件和应力环境, 高渗透压导致岸坡不利面损伤演化, 岩体强度劣化, 恶化了岸坡的地质环境, 促使其稳定性降低, 且不可逆转。

3 结 论

(1) 将几何损伤力学、断裂力学引入裂隙岩体流固耦合分析中而建立的裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展 FLAC^{3D} 模型)具体强大的数值功能, 包含了损伤力学计算模块、渗流计算模块及双场耦合分析模块。

(2) 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展 FLAC^{3D} 模型)的耦合机制体现在渗透体积力作用于损伤应力计算单元; 裂隙渗透压作用于裂纹张开部分引起断续岩石裂纹的起裂, 扩展导致岩体局部损伤; 岩体裂纹的扩展引起岩体渗透系数的增加, 导致渗流场的改变。

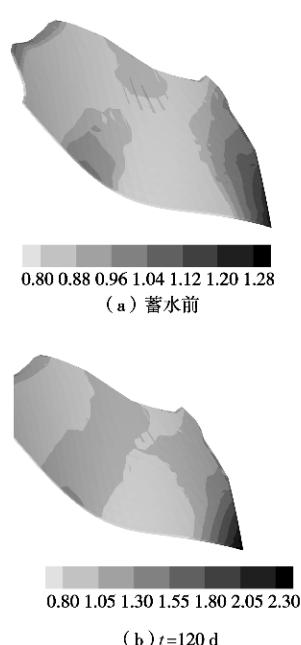
(3) 岸坡山体变形是由增量渗流渗透力和增量浮托力共同作用于岸坡的结果。

(4) 对蓄水相对高程较大的裂隙岸坡而言, 库水位上升, 裂隙渗透水压增加导致岩体裂纹起裂扩展, 岩体损伤演化。高渗透压诱发岸坡不利断层带损伤区扩展, 甚至贯通是导致岸坡失稳的重要原因。

(5) 利用 FLAC^{3D} 强大的数值功能, 通过 Fish 语言研制的裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型(扩展 FLAC^{3D} 模型)为利用成熟的商业计算软件解决新的复杂的问题提供了一个范例, 旨在抛砖引玉推动渗流-损伤-断裂耦合数值分析的进一步发展。

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. (ZHANG You-tian. Rock hydraulics and engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))



- [2] 何 翔, 冯夏庭, 张东晓. 岩体渗流 - 应力耦合有限元计算的精细积分方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10): 2003 - 2008. (HE Xiang, FENG Xia-ting, ZHANG Dong-xiao. Precise integration algorithm for finite element simulation of coupled process of seepage field and stress field in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2003 - 2008. (in Chinese))
- [3] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock mass[J]. Water Resources Res, 1986, **22**(13): 1845 - 1856.
- [4] DVERSTORP B, ANDERSSON J. Application of the discrete fracture networkconcept with field data: possibilities of model calibratin andvalidation[J]. Water Resources Res, 1989, **25**(3): 540 - 550.
- [5] 宋晓晨, 徐卫亚. 裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值模型(I): 裂隙网络的随机生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(12): 2015 - 2020. (SONG Xiao-chen, XU Wei-ya. Numerical model of three-dimensional discrete fractureNetwork for seepage in fractured rocks (I): generation of fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(12): 2015 - 2020. (in Chinese))
- [6] 罗平平, 陈 蕾, 邹正盛. 空间岩体裂隙网络灌浆数值模拟研究[M]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1844 - 1848. (LUO Ping-ping, CHEN Lei, ZOU Zheng-sheng. Numerical simulation of grouting in space fracture net of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1844 - 1848. (in Chinese))
- [7] 赵延林, 曹 平, 赵阳升, 等. 双重介质渗流场 - 应力场 - 温度场耦合模型及三维数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增 2): 4024 - 4031. (ZHAO Yan-lin, CAO Ping, ZHAO Yang-sheng, et al. Dual media model for thermo - hydro - mechanical coupling and 3D numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4024 - 4031. (in Chinese))
- [8] 赵阳升, 段康廉, 胡耀青, 等. 块裂介质岩石流体力学研究新进展[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, **18**(5): 459 - 462. (ZHAO Yang-sheng, DUAN Kang-lian, HU Yao-qing, et al. New advances of block-fractured medium rock fluid mechanics[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 1999, **18**(5): 459 - 462. (in Chinese))
- [9] 朱珍德, 徐卫亚. 裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, **3**(12): 155 - 159. (ZHU Zhen-de, XU Wei-ya. Theoretical study on a coupled seepage damage model for fissured rock masses[J]. Journal of Hohai University (NaturalSciences), 2003, **3**(12): 155 - 159. (in Chinese))
- [10] 郑少河. 裂隙岩体渗流场 - 损伤场耦合理论研究及应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000. (ZHENG Shao-he. Research on coupling theory between seepage and damage of fractured rock mass and its application to engineering[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Scinces, 2000. (in Chinese))
- [11] 唐春安, 杨天鸿, 李连崇, 等. 孔隙水压力对岩石裂纹扩展影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增): 17 - 20. (TANG Chun-an, YANG Tian-hong, LI Lian-chong, et al. Numerical simulation to influence of pore pressure magnitude and gradient on fracture propagation in brittle heterogeneous rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S): 17 - 20. (in Chinese))
- [12] 赵延林, 曹 平, 林 杭, 等. 渗透压作用下压剪岩石裂纹流变断裂贯通机制及破坏准则探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 511 - 517. (ZHAO Yan-lin, CAO Ping, LIN Hang, et al. Study on fracture mechanism and rheologic fracture failure criterion of compressive-shear rock cracks under saturated pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 511 - 517. (in Chinese))
- [13] KEMENY J M, COOK N G W. Crack models for the failure of rocks in compression, constitutive laws for engineering materials: theory and applications[M]. New York: Elsevier, 1987: 879 - 887.
- [14] SONG Li, LAJTAI E Z. Modeling the stress-strain diagram for brittle rock loaded in compression[J]. Mechanics of Materials, 1998, **30**: 243 - 251.
- [15] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D} users manual[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2004.
- [16] RIEMER W. Landslides and reservoirs (keynote paper)[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides. 1992: 1373 - 2004.
- [17] 杨 杰, 胡德秀, 关文海. 李家峡拱坝左岸高边坡岩体变位与安全性态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 3551 - 3560. (YANG Jie, HU De-xiu, GUAN Wen-hai. Analysis of high slope rock deformation and safety performance for left bank of Lijiaxia arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 3551 - 3560. (in Chinese))