

基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型

刘 洋, 李世海, 刘晓宇

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 为模拟边坡在库水涨落和降雨作用下的渐进破坏过程, 发展基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型。它分为固体计算模型、孔隙渗流应力耦合模型和裂隙渗流应力耦合模型3个部分。固体计算模型能够反映地质体的破坏规律, 可以模拟从连续到非连续的破坏过程; 孔隙渗流应力耦合模型可以方便地计算出自由水位线(浸润线)的位置; 裂隙渗流应力耦合模型可以避免由于不连通裂隙(孤立裂隙)存在所导致的收敛性问题; 假设只考虑库水涨落和降雨的最终状态, 裂隙渗流产生的水头分布和由库水涨落所引起的水头改变作为孔隙渗流的变边界条件, 从而实现孔隙渗流场和裂隙渗流场的耦合。典型算例计算结果表明, 基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型对于库区古滑坡的研究是有很有效的。

关键词: 数值模型; 基于连续介质离散元; 双重介质模型; 渗流应力耦合; 动态松弛技术

中图分类号: O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)05 - 0951 - 09

COUPLED FLUID FLOW AND STRESS COMPUTATION MODEL OF DUAL MEDIA BASED ON CONTINUUM-MEDIUM DISTINCT ELEMENT METHOD

LIU Yang, LI Shihai, LIU Xiaoyu

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: To simulate the progressive failure process of the slope in water level fluctuation and rainfall conditions, a coupled fluid flow and stress computation model of dual media is established based on continuum-medium distinct element method. It contains solid calculation model, pore hydromechanical coupling model and fissure hydromechanical coupling model. Solid calculation model could reflect failure regularity of the geologic body, also could simulate the process from continuum to discontinuum. Pore hydromechanical coupling model could calculate the location of phreatic surface conveniently. Fissure hydromechanical coupling model could avoid convergence problem caused by isolated fissure. Considering the final states of the water level fluctuation and rainfall, the waterhead distribution caused by fissure seepage and water level fluctuation in reservoir are regarded as the variable boundary condition, thus implementing the coupling analysis for pore and fissure seepage flow field. Typical example computational results show that a coupled fluid flow and stress computation model of dual media based on continuum-medium distinct element method is very effective for the analysis of reservoir ancient landslide.

Key words: numerical simulation; continuum-medium distinct element method; dual media model; coupled fluid flow and stress; dynamic relaxation techniques

收稿日期: 2010 - 07 - 09; **修回日期:** 2011 - 04 - 06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB731503)

作者简介: 刘 洋(1985 -), 男, 2007年毕业于北京科技大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事渗流应力耦合作用的数值计算方面的研究工作。E-mail: liuyang@imech.ac.cn

1 引言

对于库水型滑坡和降雨型滑坡，必然要涉及到水的作用，反映在数值计算中就是渗流应力耦合模型。它分为2种：第一种是非双重介质渗流应力耦合模型，它包括等效连续介质渗流应力耦合模型和裂隙网络渗流应力耦合模型，前者适用于孔隙介质以及多组裂隙分割的破裂岩体，后者适用于水流只在裂隙网络中的定向流动。第二种是双重介质渗流应力耦合模型，它适用于把岩土体看作由孔隙和裂隙组成的双重介质空隙结构。

大量工程实例发现，库区的古滑坡具有一条非常明显的滑带，把边坡分为了上部松软、透水的滑体和下部坚硬、隔水的基岩。对于这类库岸型古滑坡，人们进行了很多的研究。理论方面，S. W. Qi 等^[1-2]探讨了由于库水涨落所诱发滑坡的破坏机制。同普通的山地滑坡相比，除降雨外，由于水利工程而导致的外部水环境改变是这类滑坡所特有的。强度软化作用，浮托作用，动水压力作用，固结作用，库岸再造，降雨等都会不同程度影响库岸型古滑坡的稳定性。当然，库水涨落和降雨等都是外因，滑坡变形的最本质原因是其特殊的地质结构和岩土体特性。数值模拟能够较好地揭示滑坡破坏的动态过程，同时数值模拟也能够用来进行敏感性分析，例如滑坡地形地貌，岩土体物理力学参数，库水涨落的速率等^[3-6]。

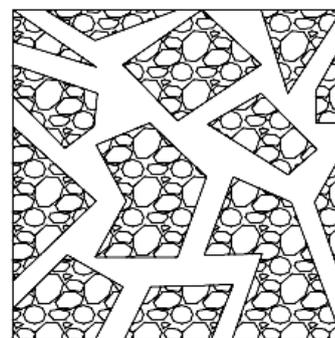
库水涨落和降雨所产生的水流通过坡体表面的裂缝迅速入渗，沿着滑带迅速地流动，因此可以把裂缝和滑带看成是裂隙介质。但是滑体还是具有一定的渗透性，需要把其看成是孔隙介质。所以模拟库区边坡在降雨和库水涨落作用下的响应，选取双重介质渗流应力耦合模型是比较符合实际情况的。

目前国内外对于双重介质渗流应力耦合研究取得了一定的进展。刘耀儒等^[7]采用基于 element-by-element 策略的有限元，开展了双重介质渗流应力耦合模型并行数值分析；黎水泉和徐秉业^[8]考虑固结对渗流的影响，同时也考虑固体变形对渗流参数(孔隙度和渗透率)的影响，推导出了双重孔隙介质非线性流固耦合渗流有限元计算格式；孔亮等^[9]利用双重孔隙介质模型，在多孔介质弹性理论和广义有效应力的基础上，给出了双重孔隙介质非饱和流固耦合方程的数学推导。G. I. Barenblatt 等^[10]在

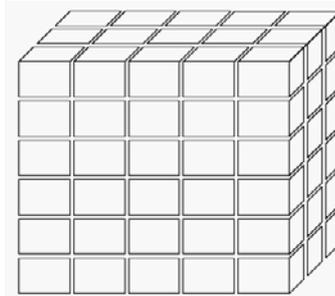
1960 年提出了均质、各向同性的双重孔隙介质模型；V. Reichenberger 等^[11]提出了一种基于点 - 中心有限体积法的全耦合、全隐式离散的双重孔隙介质模型。J. Rutqvist 等^[12]结合 Tough2 和 FLAC^{3D} 实现了双重孔隙介质的热 - 水 - 力 - 化学耦合。

连续介质离散元 (continuum-medium distinct element method, CDEM) 是近期发展起来的一种数值计算方法，它将任意块体(平面)单元化作一系列四面体(三角形)单元，根据各个四面体(三角形)的单元刚度矩阵，就可以写出任意块体(平面)的刚度矩阵，而块体(平面)之间不组成总体刚度矩阵。采用动态松弛技术来求解各个块体(平面)单元的节点水头、力和位移等变量。

针对上述情况，本文发展了一种基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合数值模型，它分为固体计算模型、孔隙渗流应力耦合模型和裂隙渗流应力耦合模型 3 个部分。根据定义，它包含 2 个互相覆盖的连续场(见图 1)：基质系统和裂隙系统。每个连续场都拥有自己的渗流压力场。2 个系统之间有流体的交换，交换的程度取决于 2 个系统之间的水头差。在该模型中，任意一点处都有 2 个水头，即基质系统水头和裂隙系统水头^[7]。



(a) G. I. Barenblatt 等^[10]模型



(b) J. E. Warren 和 P. J. Root^[13]模型

图 1 双重介质模型

Fig.1 Dual media models

固体计算模型分为材料单元和接触单元。材料单元被看作是弹性体或者弹塑性体，在其内部根据力边界条件用有限元求各点的位移；接触单元引入法向和切向弹簧根据位移和相对速度求力。固体计算的模型能够反映地质体的破坏规律，可以模拟从连续到非连续的破坏过程。

在孔隙、裂隙渗流应力耦合模型计算中，由于引入了 CDEM，自由水位线(浸润线)的计算也会变得更加方便，并且可以避免由于不连通裂隙(孤立裂隙)存在所导致的收敛性问题。同时，由于采用了动态松弛技术，即迭代弱耦合方法，以上一时步孔隙渗流场(裂隙渗流场)的结果作为下一时步裂隙渗流场(孔隙渗流场)的输入条件，从而实现孔隙渗流场和裂隙渗流场的更新。当时步足够小时，计算能够收敛到精确解。

为验证模型的可靠性及适用性，本文将对一个典型算例进行计算及讨论。

2 固体计算模型

模型中块体系统力学分析是指单个块体的力学分析和相邻块体之间的相互作用。

块体小位移弹性动态方程为

$$\sigma_{ij,j} + f_i - \rho u_{i,tt} - \alpha u_{i,t} = 0 \quad (1)$$

应变与位移关系：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

本构关系：

$$\sigma_{ij} = C_{ijst} \varepsilon_{st} \quad (3)$$

式(1)~(3)中： $\sigma_{ij,j}$ 为应力张量对长度的一阶偏导数； f_i 为单位体积的体力； ρ 为密度； $u_{i,tt}$ 为位移对时间的二阶偏导数； $u_{i,t}$ 为位移对时间的一阶偏导数； α 为阻尼系数； $u_{i,j}$ ， $u_{j,i}$ 均为位移对长度的一阶偏导数； ε_{ij} ， ε_{st} 均为应变； σ_{ij} 为应力； C_{ijst} 为 Hooke 张量。

块体被离散为有限数量的四面体单元，通过节点相连。在每个四面体单元中，包含一个块体中心节点，一个面中心节点，棱边端部的 2 个节点。块体刚度矩阵由各个四面体单元刚度矩阵组合而成。

在固体计算模型中，采用动态松弛方法，由于引入惯性项，力学过程事实上是动态的，但可以通过引入人工阻尼项使得这一过程变为准静态过程。

块体节点力的计算不像有限元方法那样将节点周围的块体刚阵组合成总刚阵计算，而是按照各个块体的刚度矩阵分别计算出属于各自块体的节点力。

相邻块体之间依靠弹簧连接(见图 2)，采用的破坏准则为莫尔 - 库仑准则。由连续的单元界面转化为非连续断裂面的计算方法。计算单元界面两侧单元应力(等参单元)，并计算出在单元边界上的法向和切向应力。如果其中一个单元的应力满足破坏条件：

$$\sigma_n = \sigma_r \quad (4)$$

$$\sigma_t = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (5)$$

式中： σ_n 为法向应力； σ_r 为结构面材料的容许拉应力； σ_t 为切向应力； c ， φ 分别为黏聚力和内摩擦角。

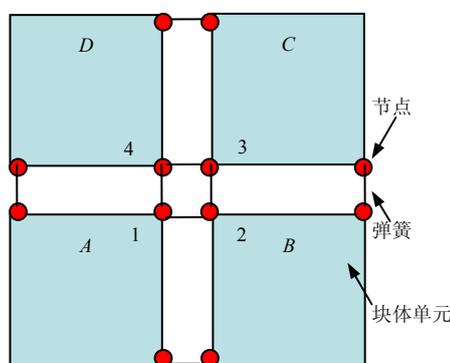


图 2 单元界面断裂计算模型

Fig.2 Fracture calculation model of unit interface

将单元界面转化成为断裂面，断裂面上的接触点的相对位移满足：

$$\Delta u_n = \frac{F_n}{K_n} = \frac{(\sigma_{n1} + \sigma_{n2})A}{2K_n} \quad (6)$$

$$\Delta u_t = \frac{F_t}{K_t} = \frac{(\sigma_{t1} + \sigma_{t2})A}{2K_t} \quad (7)$$

式中： Δu_n ， Δu_t 分别为法向位移和切向位移； F_n ， F_t 分别为法向力和切向力； σ_{n1} ， σ_{n2} 均为相邻接触点的法向应力； K_n ， K_t 分别为弹簧的法向刚度和切向刚度； A 为接触点所代表的面积； σ_{t1} ， σ_{t2} 为相邻接触点的切向应力。新定义的断裂面改变了原来连续界面的特性，应力场将会在继续计算的过程中重新调整，此时的断裂面可能还没有完全破坏，直至满足断裂面拉伸破坏的条件：

$$F_n = \sigma_r A \quad (8)$$

此时，

$$F_n = 0 \quad (9)$$

若断裂面上的受力状态，满足剪切破坏条件：

$$F_t \geq cA + F_n \tan \varphi \tag{10}$$

此时，

$$F_t = F_n \tan \varphi \tag{11}$$

由于动态松弛方法不需要形成总体刚度矩阵，与传统有限元法(FEM)相比，所需内存较小。动态松弛方法还可以求解裂隙岩体的变形和应力，而传统有限元在处理此类问题时将会遇到很大的困难。

3 孔隙渗流应力耦合

3.1 孔隙渗流场的形成

在高饱和度非饱和岩土体中，气体以封闭的气泡形式存在于孔隙水中，可认为是一种可压缩的流体，则

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \tag{12}$$

式中： S 为单位贮水量，表示下降单位水头时，为由于骨架压缩和水的膨胀所释放出的贮存水量，与岩土体和孔隙流体的压缩系数有关； k_x ， k_y 和 k_z 分别为 x ， y 和 z 方向的渗透系数； h 为总水头。

式(12)所示的微分方程在复杂的边界条件下无法直接得到解析解，数值计算的方法是首先建立 $h(x, y, z, t)$ 的泛函，一定边值问题的解就是这个泛函的极小值，这个求解过程就是变分。

在单个四面体渗流单元 Ω^e 中，考虑液体的可压缩性，对于非稳定渗流，泛函 $E^e(h)$ 可表示为

$$E^e(h) = \iiint_{\Omega^e} \left\{ \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \right] + S \frac{\partial h}{\partial t} h \right\} dx dy dz - \int_{\Gamma_2} q h ds \tag{13}$$

式中： q 为流量， s 为表面积， Γ_2 为表面区域。

由于所要求的 $h(x, y, z, t)$ 为泛函式(13)的极小函数，因此必须满足：

$$\frac{\partial E^e}{\partial H_i} = 0 \tag{14}$$

因此可以导出单个四面体渗流单元的渗流矩阵

方程为

$$[S^e] \left(\frac{\partial H^e}{\partial t} \right) + [K^e] \{H^e\} = \{Q^e\} \tag{15}$$

式中： $[S^e]$ 为单元的贮存系数矩阵， $[K^e]$ 为单元渗透矩阵， $\{Q^e\}$ 为根据流量边界得到的节点流量矩阵。

程序计算时，同样不组成总体的渗透矩阵，以单个孔隙单元为单位，采用动态松弛技术来求解每个孔隙单元的节点水头。

3.2 孔隙渗流自由水位线(浸润线)的确定

由于渗流自由面的位置是待求的，故必须迭代求解，渗流自由面问题的求解方法主要分为水动力学法、流网法、试验法和有限单元法^[14]。在这里采用离散单元法：

- (1) 第一次孔隙渗流计算，全区域的渗透系数为给定的渗透系数；
- (2) 将节点水头小于其位置势的所有节点进行标识，然后判断处于自由面之上的所有单元；
- (3) 将自由面以上单元的渗透系数给定一个小值：

$$\left. \begin{aligned} k_n &= k_{n-1} & (h \geq z) \\ k_n &= k_{n-1} / 1\ 000 & (h < z) \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

式中： k_n 为修正渗透系数， k_{n-1} 为初始渗透系数。在计算过程中不再考虑自由面以上单元渗流的影响；

- (4) 将本次求出的结点势与上一次迭代求出的结点势比较，判断：

$$|H_j^{i+1} - H_j^i| \leq \delta \tag{17}$$

式中： i 为迭代计算次数， j 为节点编号， δ 为水头误差。若所有节点都满足式(17)，渗流场中所有满足 $|H - z| \leq \delta$ 的节点的连线即为自由面。

这种方法借鉴了有限单元法中的变单元渗透系数固定网格法^[15]，离散单元法在处理浸润线问题上有着比较突出的优势，由于各个单元之间不需要形成总渗透系数矩阵，可以很方便地改变在自由面之上的单元渗透系数。

假设渗流沿着正 y 方向(见图3)，从水平渗流的饱和土体中取出一个岩土体单元，长、宽、高分别为 d_x ， d_y ， d_z ；设点1，2，3，4有相等的总水头 H_A ，点5，6，7，8有相等的总水头 H_B ，面3478为基准面。则各点的孔隙水压力分别为 $h_{w1} = h_{w2} = H_A - d_z$ ， $h_{w3} = h_{w4} = H_A$ ， $h_{w5} = h_{w6} = H_B - d_z$ ， $h_{w7} = h_{w8} = H_B$ 。

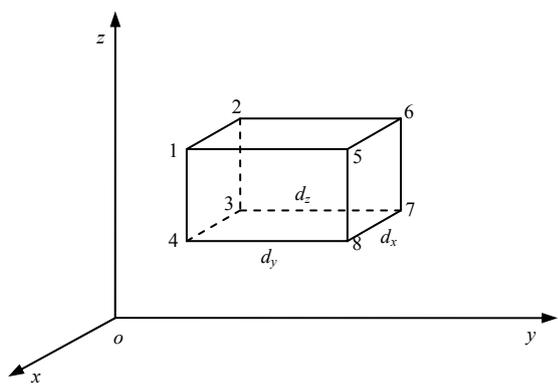


图 3 孔隙渗流单元示意图

Fig.3 Sketch of porosity permeating flow element

3.3 孔隙渗流场对应力场的影响

沿着 x, y, z 方向的合力分别为: $F_x = 0$, $F_y = \rho_w g(H_A - H_B)d_x d_z$, $F_z = \rho_w g d_x d_y d_z$ 。换算成力: $f_x = 0$, $f_y = \frac{\rho_w g(H_A - H_B)}{d_y}$, $f_z = \rho_w g$, 其中 f_y 为渗透力, f_z 为浮力。

3.4 应力场对孔隙渗流场的影响

孔隙渗流的渗透系数^[14]由以下公式给出:

$$k = \frac{\gamma_w R^2 n}{8\eta} \quad (18)$$

对于饱和土, 渗透系数 k 取决于流体的动力黏滞系数 η , 而 η 又与温度、介质浓度和水中气泡等因素有关, γ_w 为流体的重度, 与可溶性盐的含量有关。此外, 用毛细管代替孔隙通道, 半径为 R , n 为孔隙率。 R 和 n 受土粒的颗粒大小、级配等因素影响, 这些也是影响土的渗透系数的因素^[7]。

在程序中, 根据下式计算不同时步岩土体的渗透系数, 实现应力场对渗流场的影响:

$$k = k_0 \exp(-\alpha\sigma) \quad (19)$$

式中: k_0 为 $\sigma = 0$ 时的渗透系数, σ 为有效应力, α 为待定系数。

4 裂隙渗流应力耦合

4.1 裂隙网络的形成

假设研究区域初始为连续区域, 划分完块体单元以后, 当单元界面内所有弹簧都发生断裂破坏时, 就把这个单元界面变为裂隙水单元。通过数值计算中单元界面断裂计算模型, 实现模拟地质体实际的

演化过程。

4.2 裂隙渗流场的形成

对于单裂隙来说, 裂隙的隙宽 t 远远小于裂隙面的长度和宽度, 因此可以将三维问题转化为二维问题进行计算。

根据质量守恒和达西定律推出非饱和渗流的基本微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad ((x, y) \in D) \quad (20)$$

式中: D 为二维渗流计算区域。

类似于孔隙渗流场的计算过程, 将裂隙水单元离散化, 采用动态松弛技术来求解每个裂隙水单元的节点水头。

4.3 裂隙渗流场对应力场的影响

由于在实际情况下, 裂隙水沿着裂隙迅速地流动, 这个过程相对于孔隙渗流来说相当快。只考虑裂隙水流对裂隙壁法向的渗透静水压力作用, 不考虑切向的拖曳力(渗透动水压力)作用, 当单裂隙中没有被充填时, 裂隙水流对裂隙壁的渗透静水压力是面力, 其方向垂直于裂隙壁面, 对裂隙产生扩张作用。裂隙壁面渗透静水压力 p 的表达式为

$$p = \rho g(H - H_z) \quad (21)$$

式中: H, H_z 分别为渗流的总水头和位置水头; ρ 为水的密度; g 为重力加速度常数^[16]。

4.4 应力场对裂隙渗流场的影响

单裂隙渗流的立方定理^[17]为

$$q = [\gamma b^3 / (12\mu)] J_f \quad (22)$$

式中: q 为裂隙的单宽流量; b 为裂隙宽度; γ, μ 分别为流体的容重和动力黏滞系数; J_f 为水力梯度。因此可根据下式实现应力场对裂隙渗流场的影响:

$$k = k_0 (b^3 / b_0^3) \quad (23)$$

式中: k_0, b_0 分别为初始时刻的渗透系数和裂隙宽度; b 为任意时刻的裂隙宽度。

5 孔隙渗流场和裂隙渗流场的耦合

在实际计算中, 库水涨落和降雨引起水头改变的同时, 也可作为孔隙渗流和裂隙的变边界条件。相比较于孔隙渗流而言, 裂隙渗流或者是库水涨落

的速度非常快。上一个时步中，在库水涨落和降雨引起水头改变的情况下只计算裂隙渗流，产生的裂隙渗流场水头分布和由库水涨落所引起的水头改变作为孔隙渗流的变边界条件，在后面的时步中，裂隙渗流不参与计算，而只有孔隙渗流参与计算，所以可以做如下假设：只考虑降雨和库水涨落的最终状态，裂隙渗流产生的水头分布和由库水涨落所引起的水头改变作为孔隙渗流的变边界条件，从而实现孔隙渗流场和裂隙渗流场的耦合。相当于第一类边界条件中变水头边界：

$$H|_{B_1} = H_1(x, y, z, t) \quad ((x, y, z) \in B_1) \quad (24)$$

式中： $H|_{B_1}$ 为孔隙渗流水头边界条件， H_1 为裂隙渗流产生的水头分布， B_1 为孔隙渗流场和裂隙渗流场耦合的区域。

以库区边坡(见图 4)为例，渗流边界条件^[18]为

(1) 水头边界

$$\left. \begin{aligned} h &= \bar{h} \\ \Gamma_h &= \overline{DB} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

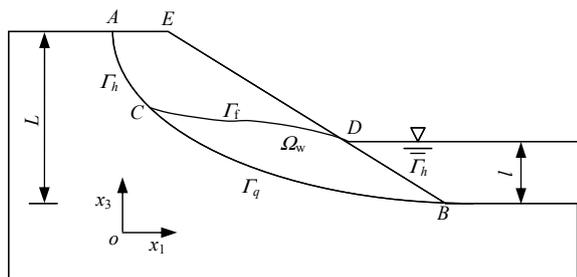


图 4 库区边坡渗流边界条件

Fig.4 Seepage flow boundary condition of reservoir slope

(2) 流量边界

$$\left. \begin{aligned} -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i &= q_n \\ \Gamma_q &= \overline{CB} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

(3) 自由面边界

$$\left. \begin{aligned} -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i &= 0 \\ h &= x_3 \\ \Gamma_f &= \overline{CD} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

(4) 潜在出渗面 Signorini 边界

$$\left. \begin{aligned} -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i &\geq 0 \quad (h = x_3) \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i &= 0 \quad (h < x_3, \Gamma_s = \overline{ACDE}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式(26)~(28)中： h 为总水头， \bar{h} 为给定水头， k_{ij} 为二阶渗透张量， n_i 为所在面的外法线方向的单位向量， q_n 为给定流量， Γ_h 为水头边界区域， Γ_q 为流量边界区域， Γ_f 为自由面边界区域， Γ_s 为潜在出渗面边界区域。

6 算例

为验证程序的正确性，引入一个库水涨落和降雨影响下的古滑坡模型。

不同于纯土体坡体，古滑坡的滑带通常就是滑动面，而不需要通过计算得出圆弧滑动面，当然古滑坡滑体部分也能够通过计算出现次级滑动面。本文中弧形滑带是事先网格划分好的，代表古滑坡的滑动面(见图 5)。

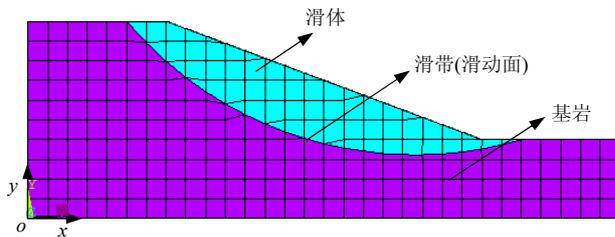


图 5 古滑坡示意图

Fig.5 Sketch of ancient landslide

棋盘式网格划分，并不代表裂隙。裂隙的产生由单元界面断裂计算模型实现，在计算中，当达到一定的破坏准则时，裂隙是沿着单元网格边界产生，而不通过块体内部破坏来产生。当网格划分足够密时，即使是棋盘式的网格划分，也能够很好地反映坡体内部的破坏规律，更为重要的是这种方法易于程序的编写，并且可节省大量的计算时间。

降雨的模拟，只考虑降雨的最终状态，不模拟降雨的过程，即整个过程是稳态流过程。裂隙(孔隙)出露在坡体外部的节点为边界节点，边界条件为水头边界条件。本文参与渗流计算的总水头由 2 个部分组成：位置水头和压力水头。降雨时，裂隙(孔隙)边界节点的水头边界条件为位置水头(零水头)。

不管是降雨还是库水涨落，只要存在水的作用，岩土块体模型和弹簧模型的黏聚力和内摩擦角都降

低 30%。

计算模型的参数见表 1, 2 所示, 计算模型网格划分如图 6 所示。

表 1 计算模型几何和材料参数

Table 1 Geometry and material parameters of calculation model

高度/m		倾角 / (°)	坡长 /m	平均滑体厚度/m
左边	右边			
10	4	21	16	3
弹性模量/Pa		泊松比		密度/(kg · m ⁻³)
8.75 × 10 ⁸		0.2		2 200

表 2 孔隙和裂隙渗流计算参数

Table 2 Parameters of porosity and fissure seepage of media

介质	孔隙初始渗透系数/(m · s ⁻¹)	储水系数(m ⁻¹)			
滑体	1.0 × 10 ⁻²	5.0 × 10 ⁻³			
基岩	0.0	5.0 × 10 ⁻³			
介质	黏性系数 μ/(Pa · s)	重力加速度 g/(m · s ⁻²)	密度 ρ/(kg · m ⁻³)	储水系数 S/(m ⁻¹)	缝宽 b/m
基岩	1.0 × 10 ⁶	9.8	1.0 × 10 ³	5.0 × 10 ⁻³	1.0 × 10 ⁻³

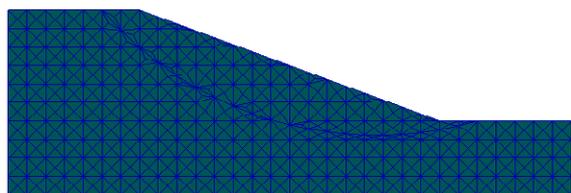
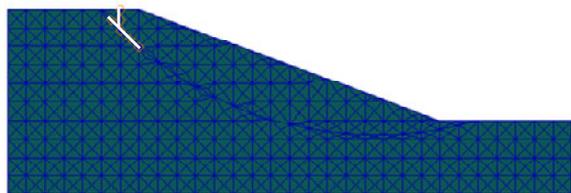


图 6 模型网格划分图

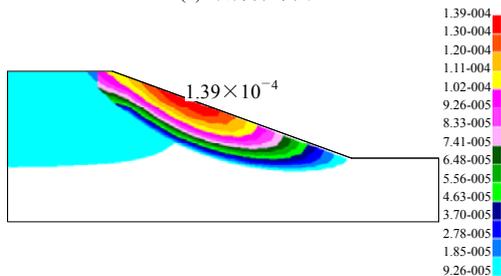
Fig.6 Meshes generation of model

利用程序分别对古滑坡在自重作用下、库水骤降情况下以及库水骤降和暴雨联合作用下进行数值模拟, 得出以下结论:

(1) 从图 7(a), 8(a)和 9(a)可以看出, 库水骤降



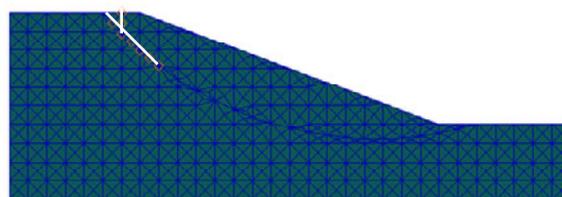
(a) 裂隙分布图



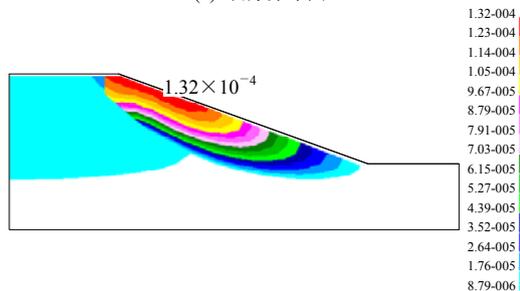
(b) 位移分布图(单位: m)

图 7 自重作用下裂隙和位移分布图

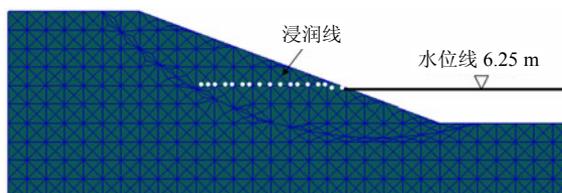
Fig.7 Crack and displacement distributions under gravity action



(a) 裂隙分布图



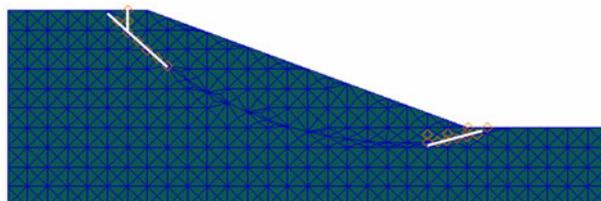
(b) 位移分布图(单位: m)



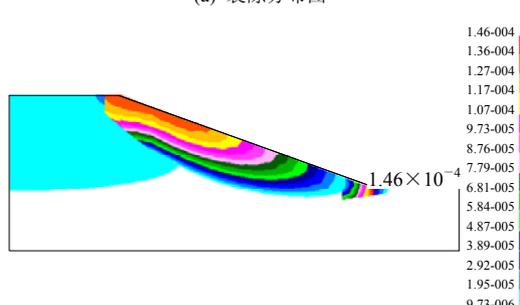
(c) 浸润线位置图

图 8 库水上涨情况下裂隙、位移和浸润线分布图

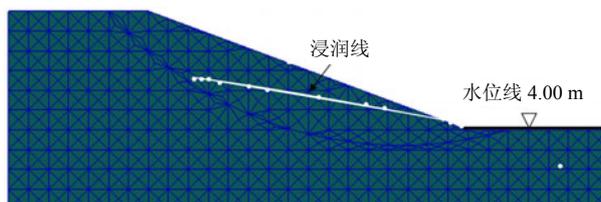
Fig.8 Distributions of crack, displacement and phreatic surface under water level rise condition



(a) 裂隙分布图



(b) 位移分布图(单位: m)



(c) 浸润线位置图

图 9 库水骤降情况下裂隙、位移和浸润线分布图

Fig.9 Distributions of crack, displacement and phreatic surface under water level drop condition in reservoir

时边坡内部弹簧破裂较多，而库水上涨时边坡内部弹簧破裂较少。这是由于相比较于库水上涨，库水骤降更不利于库区边坡的稳定性^[19]。

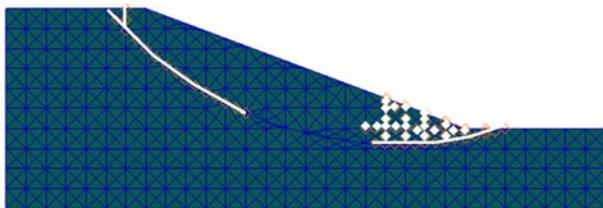
(2) 库水上涨对边坡会产生 2 个影响：一是付托力，二是降低黏聚力、内摩擦角等物理参数；后者肯定不利于边坡稳定性；而前者则不能一概而论。如果浮托力只是影响边坡的抗滑段，则不利于边坡稳定，如果付托力影响下滑段的范围远远大于阻滑段，那么就有利于边坡稳定。

(3) 库水骤降除产生浮托力和降低岩土体物理参数外，对边坡还会产生第三个影响，即渗透力；一般情况下，渗透力对边坡的影响占主导作用。

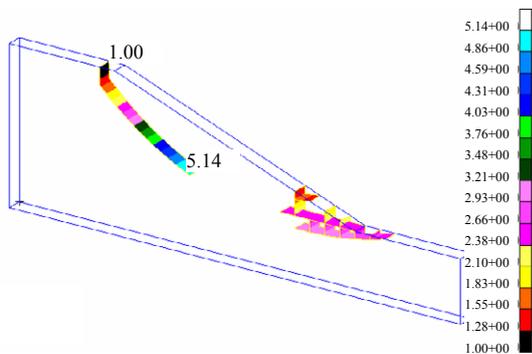
(4) 比较图 7(b), 8(b)和 9(b)，可以发现与自重作用下相比，边坡在库水上涨和骤降情况下，位移变化不大，边坡只是在内部产生渐进破坏，没有最终失稳。

(5) 在涨水时，边坡体内浸润线位置大致与库水水位线齐平(见图 8(c))，水对岩土体材料只有浮托力，无渗透力；而骤降时，浸润线位置呈一条曲线分布(见图 9(c))，这时既有浮托力，又有较高的渗透力。

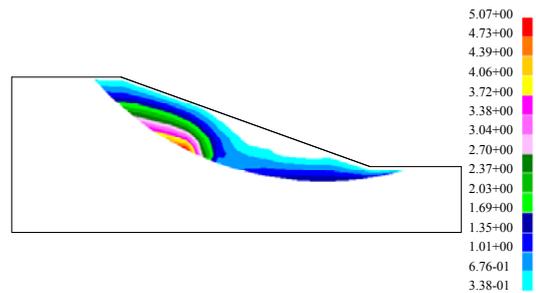
(6) 在库水骤降和暴雨的极端不利情况下，边坡开始失稳。这时在滑坡体内部，滑面逐渐趋于贯通(见图 10(a))。而在滑坡底部，产生了大量的表面裂隙，水迅速入渗(见图 10(b))，更加不利于边坡的稳定。孔隙渗流场如图 10(c)所示。



(a) 裂隙分布图



(b) 裂隙渗流场分布图(单位: m)



(c) 孔隙渗流场分布图(单位: m)

图 10 库水骤降和暴雨情况下裂隙及裂隙和孔隙渗流场分布图

Fig.10 Distribution of crack and distribution of fissure and pore seepage under water level drop in reservoir and rainfall storm conditions

7 结 论

(1) 本文基于连续介质离散元方法，建立了双重介质渗流应力耦合模型，它分为固体计算模型、孔隙渗流应力耦合模型和裂隙渗流应力耦合模型 3 个部分。共同实现了边坡在库水涨落和降雨作用下渐进破坏过程的模拟。固体计算模型分为材料单元和接触单元，采用动态松弛方法计算，能够反映地质体的破坏规律，可以模拟从连续到非连续的破坏过程。孔隙渗流应力耦合模型，借鉴了有限单元法中的变单元渗透系数固定网格法，但不组成总体的渗透矩阵，以单个孔隙为单位，采用动态松弛技术来求解每个孔隙单元的节点水头，通过改变在自由面之上的单元的渗透系数，重新迭代计算，就可以很方便地计算出自由水位线(浸润线)的位置。在裂隙渗流应力耦合模型中，裂隙水单元是随着地质体实际的演化过程而逐个形成的，由于不需要组成总体渗透矩阵，减少了所需的计算机内存，同时可以避免由于不连通裂隙(孤立裂隙)存在所导致的收敛性问题。针对库区古滑坡这类问题，可以假设裂隙渗流产生的水头分布和由库水涨落所引起的水头改变作为孔隙渗流的变边界条件，从而实现孔隙渗流场和裂隙渗流场的耦合。

(2) 数值计算结果表明，基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型对于库水型滑坡和降雨型滑坡的研究有比较大的帮助，为其他类似问题的研究奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] QI S W, YAN F Z, WANG S J, et al. Characteristics, mechanism and development tendency of deformation of Maoping landslide after commission of Geheyan reservoir on the Qingjiang River, Hubei Province, China[J]. *Engineering Geology*, 2006, 86(1): 37 - 51.
- [2] YAN F Z, XU R C. Deformation behavior of ancient landslides on Qingjiang River after impoundment of the reservoir[C]// *Proceedings of the 6th Symposium on Rock Mechanics and Engineering*. [S.l.]: [s.n.], 2000: 543 - 546.
- [3] GOKCEOGLU C, SONMEZ H, NEFESLIOGLU H A, et al. The 17 March 2005 Kuzulu landslide(Sivas, Turkey) and landslide- susceptibility map of its near vicinity[J]. *Engineering Geology*, 2005, 81(1): 65 - 83.
- [4] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [5] MAO S H, CANG Q J. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 93 - 101.
- [6] JUANG C H, JHI Y Y, LEE D H. Stability analysis of existing slopes considering uncertainty[J]. *Engineering Geology*, 1998, 49(2): 111 - 122.
- [7] 刘耀儒, 杨强, 黄岩松, 等. 基于双重孔隙介质模型的渗流 - 应力耦合并行数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 705 - 711.(LIU Yaoru, YANG Qiang, HUANG Yansong, et al. Parallel numerical analysis of coupled fluid flow and stress based on dual porosity media model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 705 - 711.(in Chinese))
- [8] 黎水泉, 徐秉业. 双重孔隙介质非线性流固耦合渗流[J]. *力学季刊*, 2000, 21(1): 96 - 101.(LI Shuiquan, XU Bingye. Flow through fissured media with dual porosity and nonlinear elastic behavior[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2000, 21(1): 96 - 101.(in Chinese))
- [9] 孔亮, 王媛, 夏均民. 非饱和流固耦合双重孔隙介质模型控制方程[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2007, 22(2): 163 - 165.(KONG Liang, WANG Yuan, XIA Junmin. Governing equations of unsaturated fluid-solid coupling in deformable dual porosity media[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science*, 2007, 22(2): 163 - 165.(in Chinese))
- [10] BARENBLATT G I, ZHELTOV I P, KOCHINA I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks[J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1960, 24(5): 852 - 864.
- [11] REICHENBERGER V, JAKOBS H, BASTIAN P, et al. A mixed-dimensional finite volume method for two-phase flow in fractured porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 1 020 - 1 036.
- [12] RUTQVIST J, WU Y S, TSANG C F, et al. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(4): 429 - 442.
- [13] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1963, 3(3): 245 - 255.
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 194 - 195.(LI Guangxin. *Advanced soil mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 194 - 195.(in Chinese))
- [15] 党发宁, 王晓章, 郑忠安, 等. 有自由面渗流分析的变单元渗透系数法[J]. *西北水力发电*, 2004, 20(1): 1 - 3.(DANG Fanning, WANG Xiaozhang, ZHENG Zhong'an, et al. Variable element seepage coefficient method for seepage numerical analysis with free surface[J]. *Journal of Northwest Hydroelectric Power*, 2004, 20(1): 1 - 3.(in Chinese))
- [16] 柴军瑞, 仵彦卿, 袁继国. 岩体中裂隙水流对裂隙壁的双重力学效应[J]. *岩石力学*, 2003, 24(4): 514 - 517.(CHAI Junrui, WU Yanqing, YUAN Jiguo. Double mechanical effects of fissure flow on fissure walls[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 514 - 517.(in Chinese))
- [17] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 482 - 483.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. *Rock mechanics and engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 482 - 483.(in Chinese))
- [18] 胡冉, 毛新莹, 张萍. 基于变分不等式法的渗流有限元分析及程序设计[J]. *水电能源科学*, 2009, 27(4): 54 - 57.(HU Ran, MAO Xinying, ZHANG Ping. Variational inequality-based seepage flow finite element analysis and its object-oriented programming[J]. *Water Resources and Power*, 2009, 27(4): 54 - 57.(in Chinese))
- [19] 袁中友, 唐晓春. 蓄水和水位变动对三峡库区崩塌滑坡的影响及对策[J]. *热带地理*, 2003, 23(1): 30 - 34.(YUAN Zhongyou, Tang Xiaochun. The influence of sluice and water level fluctuation on landslides and rock falls of the Three Gorges project and principles of prevention[J]. *Tropical Geography*, 2003, 23(1): 30 - 34.(in Chinese))