

裂隙岩质边坡渗流与非连续变形耦合过程分析

刘晓丽¹, 林 鹏¹, 韩国锋², 何冠鸿¹

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 裂隙岩体中的渗流-应力耦合作用是岩质边坡失稳的重要因素之一。离散裂隙网络(DFN)模型用于研究裂隙岩体渗流, 具有概念简单、效率高、适用性强的优点, 是研究裂隙岩体渗流问题最为有效的手段之一。非连续变形分析(DDA)方法是专门针对裂隙岩体的非连续特性提出的一种变形场求解方法, 能够更加真实地刻画工程岩体。将 DFN 模拟和 DDA 方法结合起来, 提出基于 DDA-DFN 的渗流-应力耦合模型, 给出考虑裂隙渗流情况下岩体块体系统的瞬时平衡方程, 用于研究裂隙岩体变形对渗流的影响和渗流-应力耦合作用下裂隙岩体的变形破坏特征。利用该耦合模型, 对一大型水利水电工程边坡稳定性进行分析。结果表明, 水库蓄水后, 地下水大幅度抬升, 渗流-应力耦合作用加剧, 导致边坡裂隙岩体中的关键部位发生大变形甚至破坏, 进而触发边坡的进一步失稳。实例分析验证了这种方法用于边坡稳定性分析的有效性。

关键词: 岩石力学; 渗流-应力耦合; 非连续变形; 离散裂隙网络; 边坡稳定分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)06-1248-09

HYDRO-MECHANICAL COUPLING PROCESS ON ROCK SLOPE STABILITY BASED ON DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS AND DISCRETE FRACTURE NETWORK MODELS

LIU Xiaoli¹, LIN Peng¹, HAN Guofeng², HE Guanhong¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Hydro-mechanical coupling in fractured rock mass is one of the key factors controlling rock slope stability. In this paper, discrete fracture network(DFN) model is used to study fluid flow in fractured rock mass. The DFN has a simple concept with high efficiency and applicability, and it is one of the most effective means to study the fracture seepage problem. Discontinuous deformation analysis(DDA), proposed specifically for the discontinuous nature of the fractured rock mass deformation calculations, is applicable to more realistic characterization of engineering rock mass. Combining DFN simulation and DDA, the hydro-mechanical coupling model is proposed; and instantaneous equilibrium equations of rock block system considering fracture seepage, which are used to research the effects of fractured rock mass deformation on fracture seepage and the failure characteristics of rock mass under hydro-mechanical coupling, are presented. By the proposed coupling model, stability of a slope near a large water reservoir is analyzed. Simulated results show that groundwater uplifts greatly with the reservoir impoundment; and hydro-mechanical coupling is intensified, which leads to some key parts of the fractured rock slope present large deformation or even damage, further triggering the failure of the slope. The case study verifies the effectiveness of the coupling model applied for slope stability analysis.

Key words: rock mechanics; hydraulic-mechanical coupling; discontinuous deformation analysis(DDA); discrete fracture network(DFN); slope stability analysis

收稿日期: 2013-01-11; **修回日期:** 2013-02-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013503); 国家自然科学基金资助项目(51009079); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题资助(2013-KY-6)

作者简介: 刘晓丽(1978-), 男, 博士, 2001年毕业于辽宁工程技术大学力学系理论与应用力学专业, 现任讲师, 主要从事水-岩动力学及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn

1 引言

自 20 世纪 40 ~ 50 年代, K. Terzaghi 等^[1-2]研究孔隙介质渗流-应力共同作用下的固结问题以来, 多孔介质渗流-应力耦合作用研究受到国际岩土力学界的关注和重视。70 年代以后, 裂隙岩体多物理场耦合作用过程, 特别是渗流与应力耦合问题得到进一步研究, 直到目前仍然是岩石力学与岩石工程领域的热点问题之一^[3-7]。围绕这方面的研究涉及到资源、环境、水利水电工程、核废料储存、水库诱发地震、地球动力学等诸多领域。具体包括: 水利水电及土木工程中, 大坝及坝基的变形、库区边坡稳定性分析、土壤固结问题、抽排地下水引起的地表沉陷、隧道稳定与渗流及岩体变形的关系等; 采矿工程中, 煤与瓦斯突出、地下水流入矿井引起的地层沉陷、露天矿边坡稳定、矿区水资源保护等; 石油工程中, 自然裂隙油层模拟、与应力有关的岩体渗透率与孔隙率、孔隙弹性体中油井的稳定性、产油过程中出砂与岩石力学等; 环境工程中, 岩土体污染的运移问题、污染物控制系统中的岩石力学问题、垃圾填埋场的环境效应分析以及地下核废料处理等^[6]。

针对上述岩石力学问题, K. Terzaghi 等^[1-7]开展了试验、理论模型及数值模拟方面的渗流-应力耦合过程研究。试验方面, 国内外学者主要针对单一裂隙(平滑裂隙或粗糙裂隙)的渗流与应力耦合问题, 开展室内试验研究, 得出裂隙渗透参数与应力之间的耦合关系式。对于具有随机裂隙结构的多裂隙岩体, 试验难于实施, 且裂隙间变形与流体流动过程相互影响, 对不同岩体很难得到一致的试验结果, 因此试验研究成果较少。理论模型与数值模拟方面, 基于等效连续介质理论的渗流-应力耦合模型一直是主流模型, 在耦合理论与软件开发方面已日趋完善。然而, 对于裂隙岩体, 等效连续介质模型的适用性并未得到广泛认可。因此, 出现了离散裂隙网络渗流模型、双重介质渗流-应力耦合模型、多重介质渗流-应力耦合模型以及损伤场-渗流场耦合模型等。这类模型适用于裂隙岩体, 可以揭示裂隙岩体渗流-应力耦合作用过程中岩体力学特性及水力学特性的演化过程, 在近几年逐渐受到岩石力学与工程领域的重视, 并得到了较深入地研究。

由以上分析可以看出, 尽管目前对于岩土介质多物理场耦合作用的研究成果很多, 但针对含有随机多裂隙的岩体, 在试验方法、理论模型和数值计算方面的研究还很不完善。因此, 迫切需要开展相

关研究工作, 对这一问题进行深入研究。

我国水能资源丰富, 开发空间巨大, 已建成、在建或规划中的大型水利水电工程众多, 库坝安全是这些大型水利水电工程成败的关键要素。大型水利水电工程的建设不可避免地在库区造就了一大批高陡边坡。水库蓄水后, 这些高陡边坡内地下水位大幅度上升, 再加上天然降雨与雾化雨作用, 渗流-应力耦合问题变得尤为突出, 并成为控制边坡稳定的关键因素。可见, 研究库区高陡边坡的渗流-应力耦合作用及其对边坡稳定性的影响具有重要的工程意义。

基于以上分析, 本文提出了等效和离散混合裂隙网络模型, 用于分析裂隙岩体渗流行为, 并结合非连续变形分析(DDA)方法^[8-17], 研究裂隙岩质边坡的渗流-应力耦合过程及其对边坡稳定性的影响, 为大型水利水电工程库区边坡稳定性分析提供数值计算方法和依据。

2 裂隙岩体渗流-应力耦合模式

一般来说, 节理、裂隙等不连续结构面对岩体的变形与渗流过程起到控制作用, 岩体工程特性描述必须突出裂隙的力学与水力学特性, 并以裂隙渗流-应力耦合为主导。因此, 离散裂隙网络(DFN)模型^[7, 13-15, 17-20]适用于裂隙岩体的渗流-应力耦合模型。基于此, 本文概括了裂隙岩体渗流-应力耦合的 3 种模式: 离散裂隙网络渗流-应力耦合、孔隙-裂隙双重介质渗流-应力耦合以及非连续变形介质渗流-应力耦合。

2.1 离散裂隙网络渗流-应力耦合

以离散裂隙网络渗流模型为基础, 结合裂隙结构面应力场分析模型, 就构成了离散裂隙网络渗流-应力耦合模型。在模型中, 仅考虑水在裂隙中的流动, 忽略水在岩块内的渗流过程, 因此, 渗流场与岩体应力场的耦合作用仅发生在裂隙面上。

离散裂隙网络渗流-应力耦合模型的控制方程如下:

(1) 裂隙岩体应力场控制方程

岩体裂隙的变形场控制方程可以选择多种本构模型, 如等效连续介质弹塑性本构模型(Mohr-Coulomb 准则、Drucker-Prager 准则、Hoek-Brown 准则等)或节理本构模型(Goodman 模型、Barton-Bandis 模型、Amadei-Saeb 模型等)。以二维问题为例, 若完整岩块采用线弹性或弹塑性模型, 裂隙采用

Barton-Bandis 模型，可以建立含离散裂隙网络的本构模型。

第 i 条裂隙的法向与切向位移为

$$\left. \begin{aligned} u_n^i &= \sigma_n^i / K_n^i \\ u_s^i &= \sigma_s^i / K_s^i \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (1a)$$

其中，

$$K_n^i = K_{ni}^i [1 - \sigma_n^i / (V_m^i K_{ni}^i + \sigma_n^i)]^{-2} \quad (1b)$$

$$K_s^i = \frac{100}{l^i} \sigma_n^i \tan \left(JRC^i \lg \frac{JCS^i}{\sigma_n^i} + \varphi_r^i \right) \quad (1c)$$

式中： K_{ni}^i 为裂隙面的初始法向刚度， JRC^i 和 JCS^i 分别为裂隙面粗糙度和裂隙面强度， V_m^i 为裂隙最大闭合度， l^i 为裂隙长度， φ_r^i 为裂隙面残余内摩擦角， σ_n^i 为裂隙法向应力， σ_s^i 为裂隙切向应力， M 为裂隙数量。

裂隙的剪切强度为

$$\tau^i = \sigma_n^i \tan \left(JRC^i \lg \frac{JCS^i}{\sigma_n^i} + \varphi_r^i \right) \quad (2)$$

完整岩块的弹塑性本构模型可以表示为

$$\Delta \sigma_{ij} = D_{ijkl}^{ep} \Delta \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

式中： $\Delta \sigma_{ij}$ ， $\Delta \varepsilon_{ij}$ 分别为应力张量增量和应变张量增量； D_{ijkl}^{ep} 为弹塑性刚度张量。

将上述 Barton-Bandis 模型联合完整岩块的本构模型，就构成了具有离散裂隙网络结构的裂隙岩体本构模型。

(2) 离散裂隙网络渗流模型

离散裂隙网络渗流模型是在搞清每条裂隙的空间方位、隙宽等几何参数的前提下，以单个裂隙内水流基本公式为基础，利用流入和流出各裂隙交叉点流量相等的原则建立方程，然后通过求解方程组获得各裂隙交叉点的水头值。

如图 1 所示，以点 i 中心形成一表征单元域(包含节点 i ，且通过各衔接线元的中点，作一闭合曲线形成)，在表征单元域内，某一时刻流进、流出各裂隙的流量为 $q_j (j=1, 2, \dots, N')$ ，表征单元域中

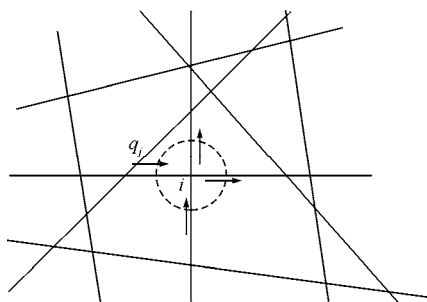


图 1 裂隙网络交叉点水流

Fig.1 Groundwater flow at fracture interaction

每个裂隙内的垂向补给量为 w_j ，节点 i 上源(汇项)为 Q_i 。则单位时间内，流进、流出表征单元域的流量差值等于表征单元域内储存量的变化量，则表征单元域内地下水均衡方程式为

$$\left(\sum_{j=1}^{N'} q_j \right)_i + \left(\sum_{j=1}^{N'} w_j \right)_i + Q_i = -d_i \frac{dh_i}{dt} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (4a)$$

其中，

$$d_i = \frac{S_i}{2} \sum_{j=1}^{N'} (b_j l_j) \quad (4b)$$

式中： h_i 为节点上的水头， S_i 为裂隙以点 i 为中心的表征单元域内弹性贮水(释水)系数， N 为裂隙个数， N' 为节点个数。

假设岩块不透水，对于稳定渗流，上述方程可化为

$$\left(\sum_{j=1}^{N'} q_j \right)_i + Q_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

若渗流区域内有 N_1 个节点，则上述方程组写为矩阵形式：

$$Aq + Q = 0 \quad \text{或} \quad PH = Q \quad (6a)$$

其中，

$$q = \{q_1, q_2, \dots, q_M\}^T \quad (6b)$$

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_1}\}^T \quad (6c)$$

式中： P 为裂隙网络特征矩阵； H 为水头向量； $A = [a_{ij}]_{N_1 \times M}$ 为裂隙网络的衔接矩阵，用于表示裂隙网络中裂隙单元与节点的衔接关系，其裂隙元素具体表示为

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & (\text{裂隙单元 } j \text{ 与节点 } i \text{ 不衔接}) \\ -1 & (\text{裂隙单元 } j \text{ 与节点 } i \text{ 衔接, 指向离开节点 } i \text{ 方向}) \\ 1 & (\text{裂隙单元 } j \text{ 与节点 } i \text{ 衔接, 指向节点 } i \text{ 方向}) \end{cases}$$

(3) 耦合作用方程

渗流-应力耦合方程主要包括渗流对应力场的影响和应力场对渗流场的影响两方面。渗流场对应力场的影响可由有效应力原理表述：

$$\sigma = \sigma' - Ip \quad (7)$$

式中： σ' 为总应力张量， σ 为有效应力， p 为水压力， I 为单位张量。

应力场对渗流场的影响主要体现在应力作用下裂隙网络渗透系数的演化方面。裂隙网络渗透系数可以用 C. Louis^[3]修正的立方定律表示：

$$K_f^i = \frac{\eta^i g b^i{}^2}{12\nu_\omega C^i} = \frac{\eta^i g (b^i - u_n^i)^2}{12\nu_\omega C^i} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

式中： K_f^i 为第 i 个裂隙的渗透系数， η^i 为裂隙连通系数(即连通面积与总面积之比，当不考虑岩块渗流时，对于连通裂隙 $\eta^i = 1$ ，对于不连通裂隙 $\eta^i = 0$)； C^i 为裂隙面相对粗糙度修正系数，量纲为一； ν_ω 为水的运动黏滞系数，量纲为 $[L^2T^{-1}]$ ； g 为重力加速度； b^i 为初始裂隙宽度。

式(1)~(8)组成了离散裂隙网络渗流-应力耦合模型，是离散裂隙网络分析的理论基础。利用离散裂隙网络模型进行渗流-应力耦合分析的过程如图 2 所示。由图 2(c)和(d)可以看出，渗流与应力耦合过程以裂隙网络为界面发生和进行。

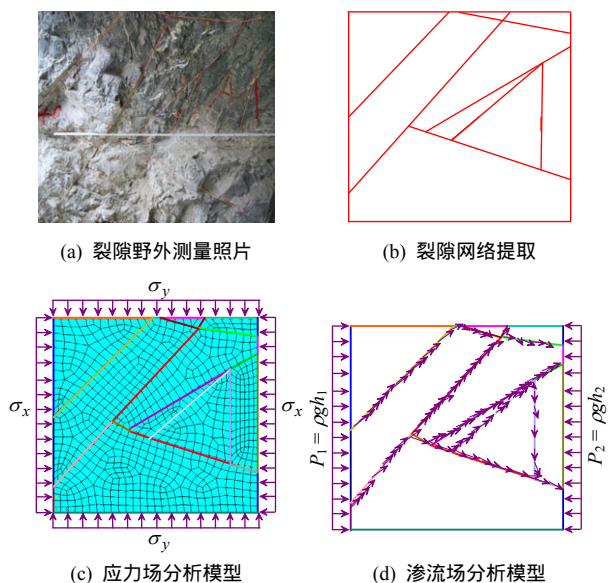


图 2 离散裂隙网络渗流-应力耦合模型
Fig.2 Hydro-mechanical coupling models in DFN

单一裂隙渗流-应力耦合模型属于这一耦合模式，目前试验研究成果较多。但对于多裂隙渗流-应力耦合模型，尚需进一步研究。近年来，不少学者进行了随机裂隙网络描述的研究^[13,16]，包括随机裂隙网络建模及裂隙网络渗流路径识别等，这些成果都可以用于改进和扩展离散裂隙网络渗流-应力耦合模型，并应用于工程中。

2.2 孔隙-裂隙双重介质渗流-应力耦合

孔隙-裂隙双重介质渗流-应力耦合模型是在离散裂隙网络耦合模型的基础上，考虑岩块(完整岩块或等效裂隙岩块)的透水性而发展起来的。与离散裂隙网络耦合模型相比，孔隙-裂隙双重介质耦合模型仅在渗流场模型上存在差异。对于离散裂隙网络耦合模型，仅在裂隙单元内存在水压力，从而影响力场；而对于孔隙-裂隙双重介质耦合模型，不但在裂隙单元内存在水压力，在岩块内部也存在水压力。

双重介质模型中裂隙网络的渗流方程^[14-15]可由下式表述：

$$Aq + W + Q = 0 \tag{9}$$

式中： $W = (W_1, W_2, \dots, W_M)$ 为裂隙与岩块之间的水量交换，与裂隙内水头和岩块内的水头差(压力梯度)有关。

岩块内，和裂隙相邻的单元与裂隙之间有水量交换，且裂隙水头作为岩块的渗流边界。岩块内的渗流采用连续介质渗流方程描述。

双重介质模型不但适合于贯通裂隙，也可扩展到非贯通裂隙(将裂隙视为不同于岩块的介质)。图 3 为研究非贯通裂隙网络系统的渗流-应力耦合效应模型示意图。

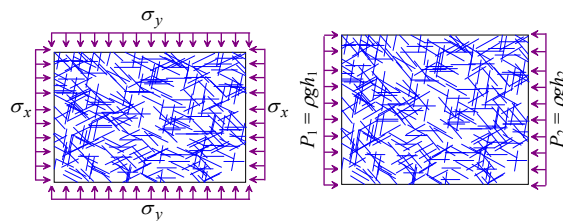


图 3 含非贯通裂隙的双重介质渗流-应力耦合模型
Fig.3 Hydro-mechanical coupling model in dual porous media with intermittent fractures

2.3 基于非连续变形分析的离散网络渗流-应力耦合

以上 2 类模型，对于裂隙岩体应力场的描述均采用了连续介质方法。由于岩体中裂隙的存在，裂隙岩体本质上是一种非连续介质，近年来，非连续介质方法在裂隙岩体变形分析中应用越来越广泛，并取得了长足的进展。非连续介质方法主要包括离散元方法(DEM)、块体元方法、非连续变形分析方法(DDA)、数值流形元方法(NMM)等^[8-12,21]。本节对基于 DDA 的 DFN 渗流-应力耦合模型进行表述。在此模型中，岩体变形采用 DDA 方法表述，岩体渗流采用离散裂隙网络模型表述。渗流过程和变形过程直接在裂隙(块体边界)进行耦合，概念更为简单。

DDA 方法是基于裂隙介质非连续性发展起来的数值方法^[8-9]，自该方法提出以来，近 30 a 来理论上不断得到完善，在工程中的应用也越来越广泛。DDA 方法用于研究离散块体系统的位移和变形特征，相邻块体之间允许发生张开、闭合和滑动，可以模拟块体结构的非连续性、大位移等。

DDA 方法以块体位移和变形作为基本未知量，基于最小势能原理形成块体单元瞬时平衡方程。当块体相互接触时，在接触部位设置罚函数和剪切弹

簧，将离散块体连接成一个整体，构造出整体平衡方程进行求解。

假定块体系统由 n 个块体组成，遵循系统最小势能原理，则块体系统的总体平衡方程可以表示为

$$\tilde{K}D = \tilde{F} \quad (10a)$$

或

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (10b)$$

式中： K_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 为 6×6 的子矩阵，用于描述第 i 个块体和第 j 个块体之间的相互作用 ($i \neq j$)； D_i 和 F_i 均为 6×6 子矩阵，分别表示块体 i 的位移向量和载荷向量。

设块体 i 的第 k 条边 AB 的长度为 l ，倾角为 α ，点 A 流体压力为 h_A ，点 B 流体压力为 h_B ，设 AB 上水头压力呈线性分布，如图 4 所示，则节点 A 和 B 在 x, y 方向的分力分别为

$$\begin{cases} f_{Ax} = -h_A \sin \alpha \\ f_{Ay} = h_A \cos \alpha \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} f_{Bx} = -h_B \sin \alpha \\ f_{By} = h_B \cos \alpha \end{cases} \quad (11b)$$

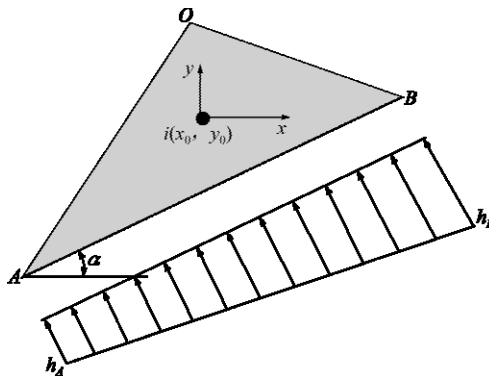


图 4 水压力作用下的离散块体
Fig.4 Block with water pressure on edge

于是，分布压力在块体上做的功为

$$\begin{aligned} \Pi_i = & -\int_0^l (f_{xs}u_i + f_{ys}v_i)ds = \\ & -[D_i^T T_i^T(x_A, y_A)E + D_i^T T_i^T(x_B, y_B)G] \end{aligned} \quad (12a)$$

其中，

$$E = \begin{bmatrix} -\frac{l}{3} \sin \alpha & -\frac{l}{6} \sin \alpha \\ \frac{l}{3} \cos \alpha & \frac{l}{6} \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_A \\ h_B \end{Bmatrix} \quad (12b)$$

$$G = \begin{bmatrix} -\frac{l}{6} \sin \alpha & -\frac{l}{3} \sin \alpha \\ \frac{l}{6} \cos \alpha & \frac{l}{3} \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_A \\ h_B \end{Bmatrix} \quad (12c)$$

式中： T_i 为块体变形系数矩阵， u_i 和 v_i 表示块体形心位移。

对式(12a)两端求导，可以得到流体压力引起的节点 A 和 B 的载荷：

$$F_i = -\frac{\partial \Pi_i(0)}{\partial d_{ri}} = T_i^T(x_A, y_A)E + T_i^T(x_B, y_B)G \quad (13)$$

式中： d_{ri} 为块体 i 的位移变量。将式(13)代入式(10b)得到水头压力作用下瞬时平衡方程。

将上述方程联合离散裂隙网络模型，就构成了基于非连续变形分析的离散网络渗流-应力耦合模型。由以上分析可以看出，基于 DDA 的离散网络渗流-应力耦合模型适用于研究含离散裂隙网络的岩体结构。事实上，该模型可扩展成一种通用的渗流-应力耦合模型，同样可适用于连续介质模型。在实际工程中，当岩体内含有大量随机微裂隙时，岩体可以采用等效连续介质描述，此时，可以用有限元方法对岩体工程特性进行数值描述。如将有限元网格视为离散块体，网格边界视为离散网络，同样也可以用基于 DDA 的离散网络耦合模型研究岩体的渗流-应力耦合行为，并可进一步发展成一种连续-非连续描述方法。本文节 4 就采用了这种方法。

3 基于 DDA 的渗流-应力耦合过程数值模拟

裂隙岩体渗流-应力耦合过程主要通过应力场变化改变裂隙网络的水力隙宽，从而导致渗透压力的变化；与此同时，渗透压力的变化又进一步叠加到初始应力场，改造着应力场。基于 DDA 的裂隙网络渗流-应力耦合作用控制方程通过联立式(6a)和(10b)得到：

$$\begin{cases} \tilde{K}D = \tilde{F} \\ PH = Q \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中， \tilde{F} 包含了渗流场方程未知量——水头压力向量 H ，而裂隙网络特征矩阵 P 中包含了变形场方程未知量——块体位移向量 D ，因此 2 个方程是耦合的，可通过顺序迭代求解。

水力开度的确定对于裂隙岩体渗流-应力耦合分析影响较大，需要进一步研究。本文采用郑春梅^[17]提出的等效水力开度进行计算。如下式所示：

$$e = e_m \left[\frac{16r^2}{(1+r)^4} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

式中： $e_m = 1/2(e_1 + e_2)$ 为平均水力开度，其中， e_1 ， e_2 为块体边上节点处的开度； $r = e_1 / e_2$ 。

基于 DDA 的裂隙网络渗流 - 应力耦合过程分析步骤如图 5，6 所示。

4 渗流 - 应力耦合作用下边坡非连续变形分析

本文基于前述 DDA-DFN 渗流 - 应力耦合模型，对某大型水利水电边坡的稳定性进行二维数值分析。边坡的地形地貌及地质剖面图如图 7 所示，图中，W1 为强风化岩体。

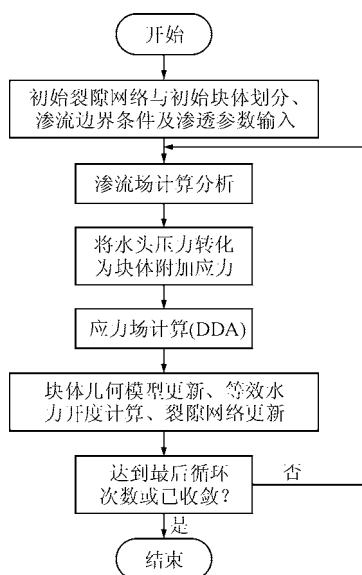


图 5 基于 DDA 的 DFN 渗流 - 应力耦合过程分析流程图
Fig.5 Flow chart for hydro-mechanical coupling analysis based on DDA-DFN

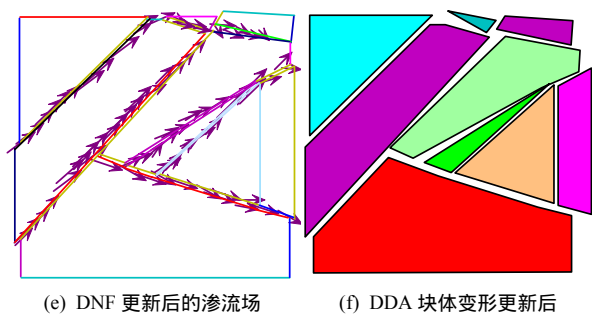
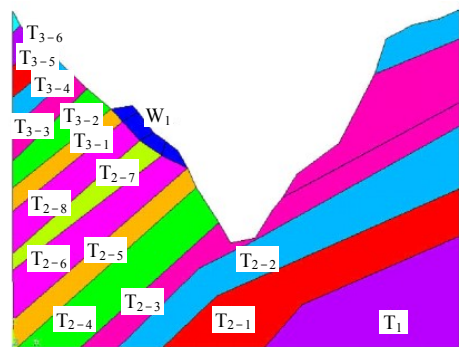


图 6 基于 DDA 的 DFN 渗流 - 应力耦合交替求解过程
Fig.6 Staggered calculation for hydro-mechanical coupling analysis based on DDA-DFN



(a) 地形照片



(b) 地质剖面

图 7 边坡地形照片及地质剖面

Fig.7 Geomorphologic photograph and geological cross-section map of the slope

边坡裂隙岩体层面发育，且岩层含大量随机微裂隙。裂隙网络主要由岩体层面结构和岩层内卸荷裂隙(优势节理)及大量各向同性的随机裂隙组成。裂隙网络切割岩体，形成了 DDA 的块体单元。本文裂隙岩质边坡的裂隙网络及 DDA 块体单元如图 8 所示。

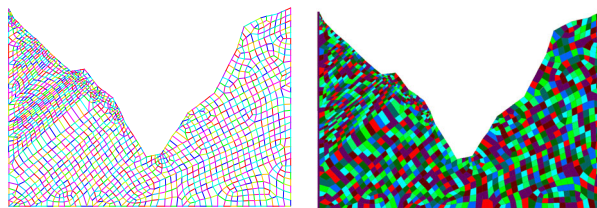
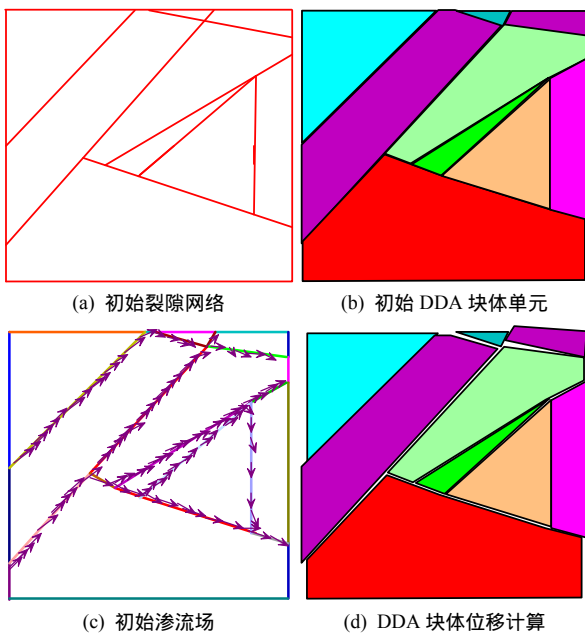


图 8 裂隙网络及 DDA 块体单元

Fig.8 Fracture networks and blocks of DDA

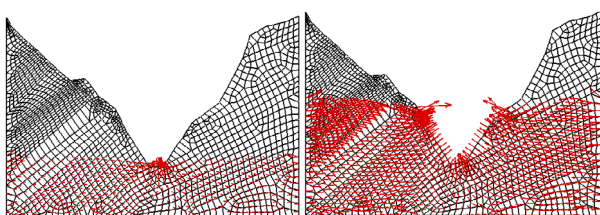
本算例中所采用的岩体力学和结构面参数如表 1 所示，各岩层分布见图 7(b)。变形场的计算边界：底部边界和山体内的左、右边界均采用法向约束，初始应力场为自重应力场。渗流参数为裂隙网络初始等效水力开度，可通过现场试验反演得到，为简化计算，本算例中将裂隙网络系统分为 2 组：岩层层面和岩层内部裂隙，其中，岩层层面的等效水力开度为 0.000 25 m，岩层内部裂隙的等效水力开度为 0.000 12 m。

表 1 岩体力学参数
Table 1 Mechanical parameters of rocks

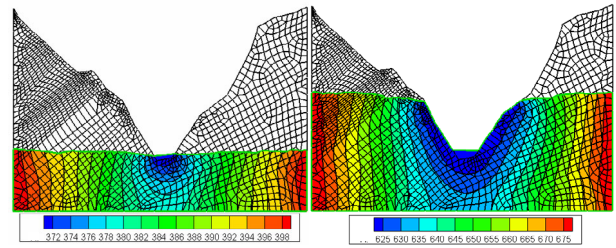
岩层	E/GPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/MPa	$\phi/(\text{°})$	T/MPa
T ₁	9	0.25	0.028	1.00	35	2.0
T ₂₋₁	18	0.25	0.025	1.00	35	1.0
T ₂₋₂	18	0.25	0.025	1.00	35	1.0
T ₂₋₃	20	0.20	0.020	1.70	40	3.0
T ₂₋₄	20	0.20	0.028	1.00	43	3.0
T ₂₋₅	15	0.25	0.028	1.20	38	2.0
T ₂₋₆	14	0.25	0.028	1.50	40	3.0
T ₂₋₇	15	0.25	0.028	1.50	40	3.0
T ₂₋₈	14	0.25	0.028	1.30	40	3.0
T ₃₋₁	8	0.26	0.028	1.00	35	2.0
T ₃₋₂	20	0.25	0.028	1.50	35	1.6
T ₃₋₃	8	0.26	0.028	1.00	42	2.0
T ₃₋₄	20	0.25	0.028	1.50	37	1.7
T ₃₋₅	10	0.26	0.028	1.00	35	1.8
T ₃₋₆	20	0.25	0.028	1.50	40	2.0
W ₁	8	0.25	0.024	0.80	32	0.6
岩体层面	-	-	-	0.10	33	-
卸荷裂隙	-	-	-	0.05	26	-

注： E 为弹性模量， μ 为泊松比， c 为黏聚力， ϕ 为内摩擦角， T 为抗拉强度。

利用上述模型及参数，对图 7 所示裂隙岩质边坡进行了 DDA-DFN 渗流-应力耦合过程研究。考虑库区蓄水前(河水水位 370 m)与蓄水后(库水位 620 m)两种情况。蓄水前初始渗流场计算主要是为了基于库区地下水位监测资料反演渗流计算参数及边界条件。水库蓄水前、后渗流裂隙网络渗流矢量及地下水水位分布见图 9，图中，左图为蓄水前，右图为蓄水后。



(a) 蓄水前、后的地下水流矢量图



(b) 蓄水前、后的地下水水头分布(单位: m)

图 9 蓄水前、后裂隙网络渗流矢量及水头分布

Fig.9 Flow vector and groundwater head distribution of fracture network before and after reservoir impoundment

结合强度折减方法，研究了渗流-应力耦合作用下边坡的破坏过程。图 10 为折减系数为 1.27 的情况下边坡的破坏过程(只显示了不稳定部位的块体)。

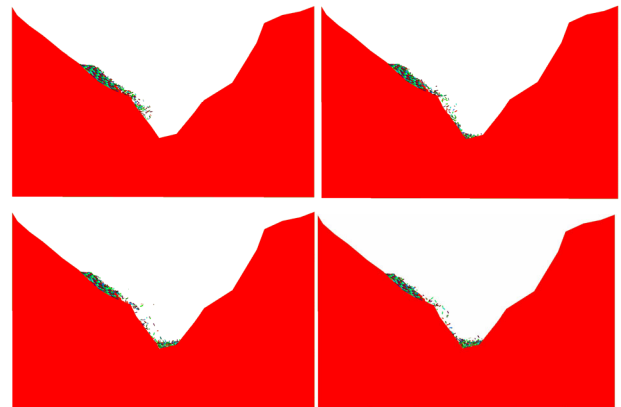


图 10 强度折减条件下基于 DDA-DFN 的渗流-应力耦合分析的边坡滑动过程

Fig.10 Simulated slope failure process of hydro-mechanical coupling analysis based on DDA-DFN under condition of shear strength reduction

由图 9 和 10 可以看出，水库蓄水后，地下水位大幅度抬升，渗流-应力耦合作用加剧，导致边坡裂隙岩体中的关键部位发生大变形甚至破坏，进而可触发边坡的进一步失稳。本工程中，主要是在强风化带(W1)底部位置首先发生破坏，进而导致上部岩体沿风化带层面滑动。

耦合与非耦合条件下渗流场与位移场的区别见图 11。由图 11(b)可以看出，考虑耦合作用时，地下水水头比不考虑耦合作用时大，这是因为法向应力作用下裂隙面开度减小，使水位雍高。由图 11(c)可以看出，考虑耦合作用时，左岸岩体水平位移比不考虑耦合作用时大，即考虑耦合作用的岩体更易于向河谷方向发生变形。此外，从强度折减系数角度考虑，考虑耦合作用时，折减系数为 1.27 时即发生滑动(见图 10)，而不考虑耦合作用时，折减系数

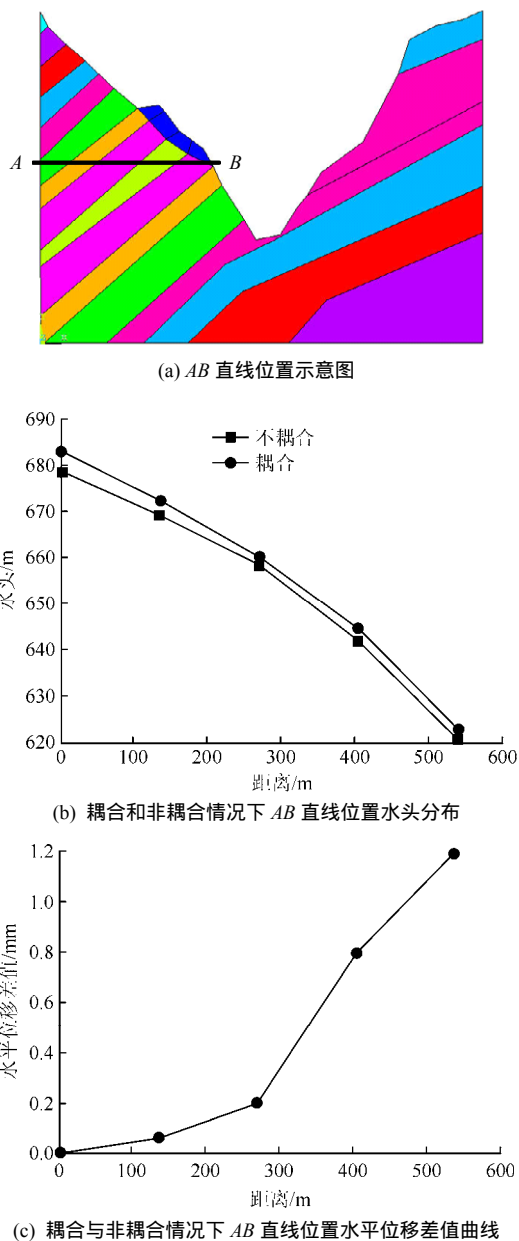


图 11 耦合与非耦合条件下 AB 直线位置上水头与水平位移差值曲线

Fig.11 Calculated water head and horizontal displacement difference curves along line AB under coupled and uncoupled conditions

为 1.38 时岩体才发生滑动。可见，进行裂隙岩体的渗流与应力耦合分析对工程的安全具有十分重要的意义。

5 结论

(1) DFN 模型用于研究裂隙岩体渗流，具有概念简单、效率高、适用性强的优点，是研究渗流问题最为有效的手段之一。本文总结了基于 DFN 模型的 3 种渗流-应力耦合模式，即离散裂隙网络渗流-

应力耦合、孔隙-裂隙双重介质渗流-应力耦合以及非连续变形介质渗流-应力耦合，并给出了其耦合控制方程。

(2) DDA 方法是专门针对裂隙岩体的非连续特性提出的一种变形场求解方法，能够更加真实地刻画工程岩体。本文将 DFN 模拟和 DDA 方法结合起来，提出了基于 DDA-DFN 的渗流-应力耦合模型，并通过实例分析，验证了这种方法用于进行边坡稳定性分析的有效性。

(3) 基于 DDA-DFN 的渗流-应力耦合模型，裂隙网络结构可根据实际岩体工程勘探得到，并在计算模型中真实地描述。由裂隙网络结构相互切割，可形成 DDA 块体单元，进而用于变形场的分析。可见，DFN 方法和 DDA 方法中所用到的模型及单元之间容易转化，建模简单。

(4) 本文只对二维问题进行了阐述和计算，对于三维问题，仍可采用二维的概念模型进行扩展。此时裂隙网络结构可以采用空间面表述，也可以采用空间管表述。而块体单元可由裂隙网络结构相互切割而成。

(5) 裂隙等效水力开度是基于 DDA-DFN 的渗流-应力耦合模型中最为关键的参数之一，初始裂隙等效水力开度的确定和计算过程中裂隙等效水力开度的更新需要进行进一步的研究。

参考文献(References) :

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York : John Wiley and Sons, Inc. , 1943 : 265 - 296.
- [2] BIOT M A. Consolidation settlement under a rectangular load distribution[J]. Journal of Applied Physics , 1941 , 12(5) : 426 - 430.
- [3] LOUIS C. Rock hydraulics[C]// MULLER L ed. Rock Mechanics. Vienna : Springer-Verlag , 1974 : 299 - 387.
- [4] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 论岩体多场广义耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7) : 1 329 - 1 340.(ZHOU Chuangbing, CHEN Yifeng, JIANG Qinghui, et al. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2008 , 27(7) : 1 329 - 1 340.(in Chinese))
- [5] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都 : 西南交通大学出版社, 1995 : 79 - 83.(WU Yanqing, ZHANG Zhuoyuan. An introduction to rock mass hydraulics[M]. Chengdu : Southwest Communication University Press , 1995 : 79 - 83.(in Chinese))

- [6] 刘晓丽. 水岩耦合过程及其多尺度行为的理论与应用研究[博士学位论文][D]. 北京:清华大学, 2008.(LIU Xiaoli. Research on theory and application of water-rock coupled processes and the multi-scale behavior[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.(in Chinese))
- [7] 王恩志. 岩体裂隙的网络分析及渗流模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 214–221.(WANG Enzhi. Network analysis and seepage model of fractures in rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(3): 214–221.(in Chinese))
- [8] SHI G H. Discontinuous deformation analysis—a new numerical model for the statics and dynamics of block system[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, 1988.
- [9] YEUNG M R. Application of Shi's discontinuous deformation analysis to the study of rock behavior[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, 1991.
- [10] ZHANG X L, JIAO Y Y, ZHAO J. Simulation of failure process of jointed rock[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(6): 888–894.
- [11] 张国新, 武晓峰. 裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响——渗流、变形耦合作用的DDA法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 269–1 275.(ZHANG Guoxin, WU Xiaofeng. Influence of seepage on the stability of rock slope-coupling of seepage and deformation by DDA method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 269–1 275.(in Chinese))
- [12] 姜清辉, 周创兵, 罗先启, 等. 三维 DDA 与有限元的耦合分析方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 998–1 001.(JIANG Qinghui, ZHOU Chuangbing, LUO Xianqi, et al. Coupling method of three-dimensional DDA-FEM and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 998–1 001.(in Chinese))
- [13] JIANG Q H, YE Z Y, YAO C, et al. A new variational inequality formulation for unconfined seepage flow through fracture networks[J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(11): 3 090–3 101.
- [14] WANG E Z, YUE Z Q. A dual fracture model to simulate large-scale flow through fractured rocks[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1 302–1 312.
- [15] WANG S J, LIU X L, WANG E Z. Hydro-geodynamic analysis and its application[C]// The 2nd International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems. [S. l.]: [s. n.], 2006: 14–30.
- [16] LIU X L, WANG S J, WANG E Z, et al. Double-medium constitutive model of geological material in uniaxial tension and compression[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(10): 1 361–1 372.
- [17] 郑春梅. 基于 DDA 的裂隙岩体水力耦合研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2010.(ZHENG Chunmei. Study on hydraulic-mechanical coupling of fractured rock mass based on DDA[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2010.(in Chinese))
- [18] WITTKÉ W. Rock mechanics: theory and applications with case histories[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990: 591–672.
- [19] LONG J C S, REMER J S, WILSON C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 645–658.
- [20] DERSHOWITZ W S, EINSTEIN H H. Characterizing rock joint geometry with joint system models[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, 21(1): 21–51.
- [21] 薛雯雯, 陈胜宏. 岩石裂隙渗流与法向应力耦合的复合单元模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2 613–2 619.(XUE Wenwen, CHEN Shenghong. Composite element model of seepage-normal stress coupling for rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup.1): 2 613–2 619.(in Chinese))