

# 裂隙网络渗流与离散元耦合分析 充水岩质高边坡的稳定性

王洪涛 (清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要:** 本文运用裂隙岩体渗流模型与离散元力学模型耦合分析充水岩质高边坡的稳定性。根据裂隙岩体主干裂隙与网络状裂隙的特点, 建立了的离散介质与连续介质耦合渗流模型并求其解。讨论了渗流模型与离散元模型耦合在边坡稳定性分析中应用的原理和方法。应用该方法对乌江构皮滩水利枢纽水垫塘两侧充水岩体的边坡稳定性进行了分析, 结果被用于该工程的设计之中。

**关键词:** 裂隙网络; 连续介质; 离散介质; 离散元模型; 高边坡稳定分析

**中图分类号:** P641.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2000)-02-0030-3.1

**Abstract:** This paper presents an approach for the stability analysis of rock mass slope by using distinct element method coupled with fluid flow model. Two systems of fractures can be classified in a rock mass: dominant fracture system, in which fluid flow can be described by a distinct medium model, and network fracture system, in which fluid flow can be denoted by a continuous medium model. The principle of distinct element method in combination with flow model is discussed in the paper. This approach is applied in the slope stability analysis in Wujiang Goupitan Hydropower Project. Results are used in the design of the project.

**Key words:** fracture network; continuous medium; distinct model; distinct element model; high slope stability analysis

随着我国基岩区高坝建设走进世界前列, 边坡稳定问题已成为基岩区高坝建设的重要课题<sup>[1]</sup>。本文采用岩体渗流分析和离散单元力学模型<sup>[2]</sup>相结合的方法, 对乌江构皮滩水利枢纽工程水垫塘两侧充水岩体的边坡稳定性进行了分析, 结果被用于工程设计之中。

## 1 主干裂隙与网络状裂隙的渗流模型

岩体中的非连续面按其渗流作用不同可分为主干裂隙和网络状裂隙两部分。主干裂隙如断层、剪切破裂带等, 通常切割深, 延伸长, 规模大。网络状裂隙主要由节理和裂隙等构成, 单体规模小, 总体密度大, 在空间上交割成立体网络状。如果使用离散介质方法描述每个裂隙中的水运动<sup>[3]</sup>, 则由于由于岩体裂隙众多而使之应用变的困难。如果使用等效连续介质渗流方法, 则无法刻画骨干裂隙的特殊水力传导性质。这里我们使用连续介质渗流分析方法描述网络状裂隙中的水运动, 使用离散介质方法分析骨干裂隙中的水运动, 并利用裂隙壁边界条件将两者耦合起来<sup>[4]</sup>。这种方法既能反映主干裂隙的特殊导水作用, 又避免了逐个计算网

络状裂隙渗流所带来的困难, 可以在较大研究域上进行岩体渗流分析。

连续介质域(也称岩块域)中的三维非稳定渗流方程为:

$$\mu_s \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(K_m \text{grad}h) + W_m \quad (1)$$

式中:  $h(x, y, z, t)$ ——连续介质域水头;

$\mu_s$ ——贮水率;

$W_m$ ——源汇项, 包括水井、降雨和蒸发等;

$K_m$ ——渗透系数张量。

在裂隙壁上岩块域水头等于裂隙域水头。

对于离散介质域(也称裂隙域)而言, 假设渗流在裂隙面局部坐标系下为二维流, 通过裂隙间的交叉与其它裂隙交换水量, 通过裂隙壁与连续介质域交换水量。各裂隙面二维流在研究域空间坐标系下组合成三维裂隙网络渗流体。就裂隙面局部坐标系而言, 第  $i$  个裂隙中的渗流方程为:

$$\mu_i^* \frac{\partial H_i}{\partial t} = \text{div}(T_{fi} \text{grad}H_i) b_i + W_{fi} + F_i \quad (2)$$

式中:  $H_i$ —— $i$  裂隙的水头;

$\mu_i^*$ ——贮水系数;

$T_{fi}$ ——导水系数;

收稿日期: 1999-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779014)



$b_i$ ——裂隙的水力开度;

$W_{fi}$ ——源汇项;

$F_i$ ——与连续介质域的水量交换项, 定义为单位时间单位裂隙面积由连续介质域进入裂隙的水体积。

裂隙  $i$  的边界有两种: 与研究域边界面相交, 边界条件由研究域边界确定; 终止于研究域内部, 水流量为零。每个裂隙都有这样一个定解问题, 通过裂隙交叉将各个裂隙联系起来。使用有限单元法求上述耦合渗流模型的数值解。由于裂隙域模型与岩块域模型耦合存在, 因此, 使用迭代方法求解之。三维渗流模型可以直接应用于剖面二维问题, 只要取单位剖面厚度即可。

## 2 离散元力学模型

在离散单元法中, 两单元之间的力和位移关系为

$$\Delta F_n = K_n \cdot \Delta u_n; \quad \Delta F_s = K_s \cdot \Delta u_s \quad (3)$$

其中,  $\Delta F_n, \Delta F_s$ : 法向和切向应力增量;  $\Delta u_n$ : 法向叠合位移增量;  $\Delta u_s$ : 切向位移增量;  $K_n, K_s$ : 单元接触处法向和切向的刚度系数, 表示为

角-边接触模式:

$$K_n = E \cdot a/2b; \quad K_s = K_n/2(1 + \mu) \quad (4)$$

边-边接触模式:

$$K_n = E \cdot \Delta \cdot A/(2 \cdot \Delta l); \quad K_s = K_n/2(1 + \mu) \quad (5)$$

式中:  $E$ ——岩块弹性模量;

$\mu$ ——岩块泊松比;

$a$ ——岩块长度;

$b$ ——岩块宽度;

$\Delta$ ——岩块平均尺寸;

$\Delta l$ ——单元厚度;

$A$ ——单宽, 取  $1m$ 。

单元受力作用的运动可以用牛顿定律表示

$$F(t) = m \cdot \frac{\partial u}{\partial t}; \quad M(t) = I \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (6)$$

式中:  $F(t)$ ——单元形心荷载;

$M(t)$ ——单元形心力矩;

$u$ ——单元形心速度 ( $u_x, u_y$ ),  $u = \partial u / \partial t$ ;

$\theta$ ——形心角速度;

$m$ ——单元质量;

$I$ ——单元惯性矩。

离散单元方程求解通常采用动态松弛法。把带有阻尼项的动态平衡方程, 用有限差分法对时间进行差分, 在计算机上迭代求解。为了保证求得准确解, 一般要引进阻尼来吸收系统的动能

$$F_{Dm} = -\alpha \cdot m \cdot \dot{u}; \quad F_{DKn} = -\beta \cdot K_n \cdot \Delta u_n; \\ F_{DKs} = -\beta \cdot K_s \cdot \Delta u_s \quad (7)$$

式中:  $F_{DM}$ ——质量阻尼力;

$F_{DKn}, F_{DKs}$ ——法向和切向刚度阻尼力;

$\alpha, \beta$ ——质量阻尼和刚度阻尼比例系数。

引进阻尼后, 动力学基本方程为:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [D] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F\} \quad (8)$$

式中:  $\ddot{u}$ ——单元加速度。

方程左侧三项分别为动力项、质量阻尼项和刚度阻尼项; 方程右侧为合力, 包括自重、外荷载、单元间接接触力、质量阻尼力和刚度阻尼力。

采用中心差分法可以得到上述方程关于时间  $t$  的差分方程, 从而得到离散元法数值计算的基本方程。求解过程为: 根据边界条件和已知位移  $u(t)$ , 可以用力-位移关系和阻尼方程求得单元间接触力和阻尼力, 两者与块体自重及外荷载一起构成合力  $F$ ; 根据动力学方程可以得到速度  $\dot{u}(t + \Delta t/2)$ , 再依据速度与位移关系, 求出位移  $u(t + \Delta t)$ 。如此以时间步长  $\Delta t$  向前差分, 直到满足计算要求为止。

## 3 渗流模型与离散元力学模型的耦合

渗流作用构成了力学模型的水载荷, 岩石在应力作用的变形又反过来影响渗流场, 两者以耦合形式存在<sup>[4]</sup>。求解方法为: 根据岩体裂隙实际产出状态剖分岩体成岩块, 过程渗流计算和离散元计算的统一计算域, 岩块间为骨干裂隙, 岩块内有网络状裂隙。根据裂隙水力开度与渗透性的关系确定骨干裂隙渗透系数和网络状裂隙的等效多孔介质渗透系数<sup>[1,5]</sup>; 求渗流模型的解得到水头分布和水载荷; 将水载荷代入离散元模型中, 并求其解, 得到应力和位移分布; 根据岩块间的相对位移调整裂隙水力开度, 重复(2)~(4)式直到满足计算精度为止。

## 4 实例研究: 乌江构皮滩水利枢纽水垫塘两侧岩体的边坡稳定性分析

### 4.1 工程概况和地质条件

构皮滩水利枢纽位于贵州省余庆县境内, 是乌江上最大的水电站。坝址以上控制流域面积  $43250km^2$ ,

长江水利委员会“乌江构皮滩水利枢纽初步设计阶段坝线选择专题报告”, 1995

年径流量 $229 \times 10^8 \text{m}^3$ 。枢纽由双曲拱坝、泄洪建筑物、电站厂房等组成。最大坝高231m，坝顶长度536.7m。全部洪水均由坝身下泄。电站装机容量200万kW。泄洪消能区及其两侧岩体主要由两套沉积建造组成：上游段（坝下200m范围）为茅口组（ $P_{1m}$ ）和栖霞组（ $P_{1q}$ ）灰岩，边坡陡峭；下游段（坝下200m至二道坝）为梁山组（ $P_{1l}$ ）和韩家店组（ $S_{2h}$ ）的粉砂质页岩和粘土岩，山体相对低平。岩层产状 $300 \sim 315^\circ \wedge 40 \sim 55^\circ$ ；地层走向与河谷走向近于垂直。主要构造形迹有断层、层间错动和裂隙等。有9条较大断层和92条小断层和14条层间错动，构成主干裂隙，是岩块剖分的基础。岩体稳定性分析剖面选在水垫塘左侧岩体上。开挖前剖分383个岩块，开挖后转变成376个岩块。

#### 4.2 渗流分析条件

为了确定剖面渗流问题的边界条件，对坝区进行了三维渗流分析。渗流计算区以防渗帷幕为界分成上游和下游两部分：上游部分是为了使计算域达到较好的天然地下水边界而包含进来的，不是研究的重点，所以全部按连续介质概化，用分布于上游区中的33个钻孔压注水试验成果给定渗透系数值；下游部分是重点区域，分别考虑主干裂隙和岩块两部分，有22个主干裂隙嵌入连续介质域中。防渗帷幕用8个低渗透面概化。根据裂隙的大小和交叉关系以及与防渗帷幕的关系等条件对裂隙域进行有限元剖分，共计剖分1688个节点，2335个单元；根据岩层岩性和与裂隙的关系对岩块域进行剖分，共计剖分4324个节点，5933个单元。裂隙和岩块的渗透系数用分布于下游区中的29个钻孔压注水试验成果确定。通过与抽水试验结果比较，取压注水试验在主干裂隙通过段渗透系数的10~20倍作为主干裂隙的渗透系数值，进入模型中。岩块域的渗透系数则直接使用注水试验结果。

在岩体稳定性分析剖面上使用裂隙水力开度计算的裂隙的初始渗透系数，并使用压注水试验确定的渗透系数级进行校正。裂隙水力开度使用剖面上四层平碛的实测资料。

#### 4.3 力学参数

岩体稳定分析剖面上地层的容重为 $26 \sim 26.5 \text{kN/m}^3$ ，弹模 $22.5 \sim 35.0 \text{GPa}$ ，泊松比为 $0.25 \sim 0.35$ 。各结构面按野外试验结果给出摩擦系数（ $0.25 \sim 1.0$ ）和粘结力（ $0.1 \sim 1.0 \text{MPa}$ ），并依据结构面的性质、风化、溶

蚀和胶结情况进行调整。在纯摩条件下，粘结力 $C$ 为零，摩擦系数 $f$ 降低10%。剖面的下边界（300m高程）上的岩块固定，山里垂直边界由于对称上体作用只允许垂直位移；从乌江底（420m高程）至300m高程的垂直边界上的岩块由于受右岸对称山体的作用不再位移。临空边坡上的岩块不受约束。

#### 4.4 计算结果与分析

对4种工况13种条件组的边坡稳定性进行了分析计算，包括泄洪工况组合、天然边坡和施工开挖边坡、地下水稳定流和非稳定流、剪摩和纯摩情况等。4种工况为（I）天然情况；（II）水库正常蓄水位 $Z_u = 630\text{m}$ ，水垫塘水位 $Z_d = 463.76\text{m}$ ，忽略泄洪和雾化补给作用；（III） $Z_u = 630\text{m}$ ， $Z_d = 480\text{m}$ ，洪水频率1%，有泄洪降雨补给，泄洪时间为3d；（IV）设计洪水位 $Z_u = 632.17\text{m}$ ， $Z_d = 483.23\text{m}$ ，洪水频率0.2%，有泄洪降雨补给。

计算结果显示，安全系数 $K$ （实际摩擦系数与极限平衡摩擦系数的比值）变化趋势是：天然边坡（ $K = 2.8 \sim 3.0$ ）> 开挖边坡，未蓄水（ $K = 2.5 \sim 2.7$ ）> 正常库水位，无泄洪（ $K = 2.3 \sim 2.5$ ）> 正常库水位，有泄洪（ $K = 1.9 \sim 2.4$ ）> 设计洪水位，有泄洪（ $K = 1.8 \sim 2.4$ ）。可见水载荷的存在使岩体安全性损失了10%~45%。水库蓄水和泄洪雾化降雨作用使地下水位升高，水力梯度增大，渗压作用增强，不仅对岩体有一个向上的浮托力，而且在压力差的作用下，对岩块产生一个向着边坡临空面方向的推力。这一推力在临空面岩块上最大，一般为 $0.04 \sim 0.13 \times 10^6 \text{N}$ ，容易造成边坡失稳。

边坡岩块的合位移在坡顶最大，为 $8.7 \sim 8.8 \text{cm}$ ，向下逐渐降低。位移的方向总体上垂直向下，但从山里向边坡表面略向边坡临空面转向，水平位置有所增加。极限平衡状态转向更大，可旋转 $20 \sim 30^\circ$ 。边坡岩块的应力在垂直方向上受岩体自重作用从上向下应力增加。在水平方向上，从山里向边坡表面应力从小变大。边坡在成坡过程中，由于应力重新分布的结果，主应力迹线发生了偏转。表现为愈接近于临空面，最大主应力愈近于平行临空面，最小主应力则与临空面正交。以376块模型I工况为例，在465m高程上，坡面附近的最大主应力方向为 $-56^\circ \sim -58^\circ$ ；向山里逐步变成 $-86^\circ \sim -90^\circ$ 。在边坡中下部临空面附近出现应力集中现象，其范围在正常状态下大致为420~540m高程线，垂直坡面深度为50~80m的区域。最大主应力 $14.9 \sim 20.8 \text{MPa}$ ，最大剪应力 $6.3 \sim 7.4 \text{MPa}$ 。这个部位是应力

(1) 武昌高知科工贸研究所“乌江构皮滩水利枢纽泄洪雾化影响分析”，1994



# 初论环境地质中裂隙岩体渗流 - 应力- 温度耦合作用研究

杨立中, 黄 涛 (西南交通大学, 四川成都 610031)

**摘 要:** 裂隙岩体赋存于地下水渗流场、应力场与温度场多场并存的复杂地质环境之中, 由于以上多场之间存在的相互作用, 一方面影响了深层地下水资源的评价精度, 另一方面在工程实践中易于诱发诸如岩体失稳、岩爆、涌水及地热等多种地质灾害。基于对深层地下水资源的开采利用和对岩体工程中以上易发生地质灾害预测防范研究的目的, 本文提出了开展裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究的工作设想, 为环境地质中防灾减灾工作及水资源合理利用开拓了一个新的研究方法。

**关键词:** 裂隙岩体; 渗流; 应力; 温度; 耦合作用

**中图分类号:** P641.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2000)-02-0033-2.8

**Abstract:** Fractured rock mass is located in a complex geological environment where groundwater seepage field, stress field and temperature field exist simultaneously. With mutual action among the above fields, the estimation accuracy of deep-buried groundwater resource would be affected on one hand; and on the other hand, the geological hazards such as rock mass' stability loss, rock burst, water gushing and geothermal calamity would be induced in practice. In order to predict the deep-buried groundwater resource and prevent the above disasters in engineering, this article presents a research format about the coupling among seepage, stress and temperature in fractured rock mass, which has developed a new study method for hazards' precaution and rational utilization of groundwater resource in environmental geology.

**Key words:** fractured rock mass; seepage; stress; temperature; coupling

对裂隙岩体而言, 其工程特性决定于裂隙岩体所处的地质环境, 即裂隙岩体存在的地下水渗流场、应力场和温度场环境等等, 这些环境因素相互作用和影响, 使得裂隙岩体时时处于这些因素构成的动态平衡体系中。

因而研究裂隙岩体的工程特性, 是一个涉及到诸如岩体力学、土力学、工程地质学、地下水力学、工程热力学等多学科的问题。与此同时, 一方面, 随科学技术的发展及人类认识和利用自然能力的提高, 上述各学科自身都在不同程度地丰富和发展。另一方面, 针对岩土工程的实际需要, 上述各学科之间的相互交叉和渗透又日益突出。基于这一情况, 开展裂隙岩体地下水渗流场、应力场

收稿日期: 1999-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49872082)

差最大, 易发生剪切破坏。岩体边坡从正常状态到极限平衡状态再到失稳状态, 其应力经历了重新分布过程。应力集中区从边坡表面附近向上、向山里移动。边坡表面附近的应力大幅度降低。

## 参考文献

- [1] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989
- [2] Cundall P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1988, 25(3): 107~116
- [3] 王洪涛, 聂永丰. 耦合岩体主干裂隙和网络状裂隙渗流分析及应用[J]. 清华大学学报(自然科学), 1998, 38(12): 23~26
- [4] Jing L, Tsang C F. DECOVALEX-An international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1995, 32(5): 389~398
- [5] 王洪涛, 王恩志. 各向异性裂隙岩体渗透系数计算方法探讨[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 49~53

编辑: 高岩松