

文章编号:1000-7598-(2001)04-0459-04

考虑动水压力裂隙网络岩体渗流应力耦合分析

柴军瑞^{1,3}, 仵彦卿^{2,3}

(1. 四川大学 水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 西安理工大学 水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 渗流对裂隙网络岩体的作用力包括渗透静水压力和渗透动水压力(裂隙壁切向拖曳力)两部分。较全面地引入渗流与应力之间的相互作用关系,同时考虑渗透静水压力和切向拖曳力的作用,以裂隙(等效)隙宽与岩体应变的关系为桥梁,建立裂隙网络岩体渗流场与应力场耦合分析的数学模型,并采用有限元数值方法进行某工程实例的双场耦合分析,验证所建立模型的可靠性。

关键词: 裂隙网络岩体; 切向拖曳力; 裂隙(等效)隙宽; 渗流场与应力场耦合分析

中图分类号: O 357.3 **文献标识码:** A

作者简介: 柴军瑞,男,1968年生,博士后,副教授,现主要从事岩体力学研究。

Mathematical model for coupled seepage and stress fields in rock mass of fracture network by considering hydrodynamic pressure

CHAI Jun-rui^{1,3}, WU Yan-qing^{2,3}

(1. College of Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;
3. College of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The action forces applied on rock mass of fracture network by seepage include two parts: hydrostatic seepage pressure and hydrodynamic seepage pressure (tangent hauling force applied on fissure walls). The whole interaction between seepage and stress was introduced in this paper. With the hydrostatic seepage pressure and tangent hauling force being simultaneously considered, the mathematical model for coupled seepage and stress fields in rock mass of fracture network was established with the linkage of the (equivalent) aperture and the strain of rock mass. An engineering example is computed by FEM to show the applicability of the model for coupled seepage and stress fields.

Key words: rock mass of fracture network; tangent hauling force; (equivalent) aperture; coupled seepage and stress fields

1 引言

目前,裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析研究正处于方兴未艾之时。在众多的研究文献中,均以等效连续介质理论来模拟裂隙岩体渗流场与应力场的耦合作用,用有效应力原理分析渗流场与应力场的耦合问题^[1~5]。在耦合中仅考虑渗透静水压力对岩体变形的影响,在数值计算时将渗透静水压力作为节点力,用渗透系数(张量)和正应力之间的经验关系式或用应力张量与渗透率张量之间的关系式表示应力对渗流的作用。等效连续介质模型适用于裂隙较密集的岩体,此时岩体的表征体单元和所研究的岩体范围尺寸相比足够小。反之,如果岩体的裂隙分布很稀疏(如比较大的断裂、断层等),表征体单元和所研究的岩体范围尺寸接近时,就应采用非连续的裂隙网络模型^[6]或多重裂隙网络模型^[7]。此外,由于渗流对裂隙网络岩体的作用力包括渗透静水压力和渗透动水压力(裂隙壁切向拖曳力)两部分,因此还需考虑渗透动水压力的

作用。本文在以上研究成果的基础上,同时考虑渗透静水压力和裂隙壁切向拖曳力的作用,以裂隙(等效)隙宽与岩体应变的关系为桥梁,建立裂隙网络岩体渗流场与应力场耦合分析的数学模型,并采用有限元数值方法进行某工程实例的双场耦合分析,验证所建立模型的可靠性。

2 裂隙网络岩体渗流与应力的耦合机理

渗流对应力的影响是通过渗流给介质施加渗透作用力来体现的,渗透作用力包括渗透静水压力和渗透动水压力两部分。对裂隙网络岩体而言,认为渗流只沿裂隙网络流动,岩块不透水。渗透静水压力是作

收稿日期:2000-12-18

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2001年第29批),国家自然科学基金资助项目(编号:49572162),陕西省自然科学基金资助项目(编号:99C22)。

用在裂隙壁上和法线方向一致的面力,渗透静水压力表现为对裂隙壁的切向拖曳力。据单直平滑裂隙稳定流理论(立方定律)的假定,笔者在文献[8]中推导出单直平滑裂隙稳定流渗透静水压力和切向拖曳力的表达式为

$$p = n\gamma(H - z) \quad (1)$$

$$t_w = \frac{b}{2} n\gamma J \quad (2)$$

式中 p 和 t_w 分别为渗透静水压力和切向拖曳力; n 为裂隙充填物的孔隙率,裂隙没有被充填时, $n = 1.0$; γ 为水的重度; H 为水头; z 为位置高度; b 为裂隙隙宽; J 为水力坡度。

岩体应力对裂隙网络渗流的影响,是通过岩体应力改变各条裂隙的隙宽来作用的。采用有限元数值方法计算时,可以用受力后节理单元^[9]各结点的位移计算各条裂隙隙宽(或等效隙宽)的变化,从而也引起渗流场的变化。

3 裂隙网络岩体渗流场与应力场耦合分析的数学模型

裂隙网络岩体应力场影响下的渗流场数学模型为^[10]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) &= 0 \\ (x, y, z) &\in \Omega_1 \\ H(x, y, z) &= H_1(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ q(x, y, z) &= q_2(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 Ω_1 为不包括岩块由裂隙网络组成的特殊区域(即渗流区域); $H(x, y, z)$ 为渗流区域内水头分布; K_x , K_y 和 K_z 分别为渗透主方向(x, y, z 坐标轴)的渗透系数,由各条裂隙的隙宽、充填情况及空间位置确定^[10],它是应力的函数; Γ_1 为第1类边界, $H_1(x, y, z)$ 为该边界上的水头分布; Γ_2 为第2类边界, $q_2(x, y, z)$ 为该边界上的流量分布。上式假定岩块不透水,渗透水流只沿岩体裂隙网络流动,且裂隙壁也不透水。

渗流场影响下的裂隙网络岩体三维应力场数学模型为^[11]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{j,i,j} + f_i &= 0 \quad (x, y, z) \in \Omega \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (x, y, z) \in \Omega \\ \sigma_{ij} &= \lambda \varepsilon_v \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (x, y, z) \in \Omega \\ \sigma_{ji} n_j &= \bar{t}_i(H) \quad (x, y, z) \in S_\sigma \\ u_i &= \bar{u}_i \quad (x, y, z) \in S_u \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 Ω 为包括渗流自由面以上岩体的整个区域;

$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y, z)$ 为应力张量场; $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x, y, z)$ 为应变张量场; $u_i = u_i(x, y, z)$ 为位移场; f_i 为体力; $\varepsilon_v = \varepsilon_{ii}$ 为体积应变; $i, j = 1, 2, 3$; λ, G 为弹性常数; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; S_σ 为已知面力边界, n_j 为其法线方向余弦; $\bar{t}_i(H)$ 为边界 S_σ 上已知面力分布,是渗流场水头分布 $H(x, y, z)$ 的函数,由式(1), (2)确定; S_u 为已知位移边界, $\bar{u}_i$ 为该边界上已知位移分布。

式(3)与式(4)联立构成了裂隙网络岩体三维渗流场与应力场耦合分析的数学模型。当运用有限元数值方法进行计算时,可采用迭代法求解。首先,按初始裂隙网络情况求解式(3)的渗流场模型,得出水头分布 $H(x, y, z)$; 通过式(1), (2)将 $H(x, y, z)$ 代入式(4)求解应力场模型,得出位移场和应力场分布;然后用节理单元各结点的位移计算各条裂隙隙宽(或等效隙宽)的变化,再由修正后的裂隙网络情况求解式(3)的渗流场模型。如此反复迭代,可求出要求精度下的裂隙网络岩体渗流场与应力场解答。

4 算 例

某工程 12 号坝段坝基 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样区内有两条连通裂隙,平面分布如图 1 所示,隙宽均为 0.80 m ,裂隙充填物渗透系数为 10^{-3} m/s ,孔隙率为 0.18 ,重度为 17.64 kN/m^3 ,弹性模量为 0.2 GPa ,泊松比为 0.20 ;等效连续岩块容重为 26.46 kN/m^3 ,弹性模量为 25.0 GPa ,泊松比为 0.17 。现在在 $x = 0$ 面施加 100 m 水头的均匀水压力 p (即 $p = 0.98 \text{ MPa}$),按上述模型进行渗流场与应力场耦合分析。渗流与应力边界条件如图 1 所示。 $p|_{x=0} = 0.98 \text{ MPa}$, $H|_{x=0} = 100 \text{ m}$; x 向位移 $u|_{x=20 \text{ m}} = 0$, $H|_{x=20 \text{ m}} = 0$; 渗流量 $q|_{y=0} = q|_{y=20 \text{ m}} = 0$; y 向位移 $v|_{y=20 \text{ m}} = 0$ 。

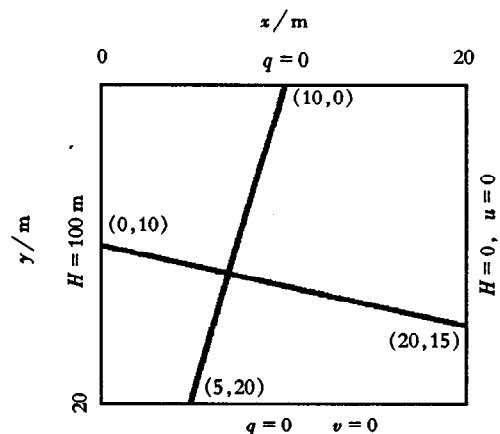


图 1 计算模型简图

Fig.1 Computation model

不考虑耦合作用时,总渗流量为 $0.202 \text{ m}^3/\text{s}$,渗流场等水头线如图2所示,各应力分量等值线如图3~5所示。

考虑耦合作用时,总渗流量为 $0.186 \text{ m}^3/\text{s}$,渗流场等水头线如图6所示,各应力分量等值线如图7~9所示。各正应力分量以受拉为正,受压为负。

综合分析以上计算成果,可以看出:

(1) 耦合作用使裂隙闭合,从而使总渗流量减小;特别是近南北向裂隙的闭合使其非连续性减弱(比较图2与图6)。

(2) 耦合作用使岩体 σ_x 压应力增大(使 σ_x 最大压应力增大 16.67%);这主要是由于平行于裂隙面的

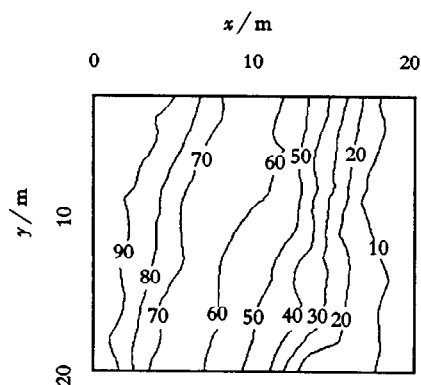


图2 不考虑耦合作用等水头线图(单位:m)
Fig.2 Contour of hydraulic head with no coupling considered

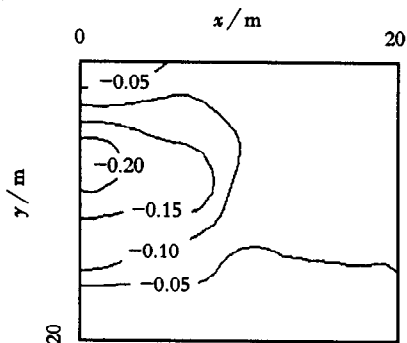


图3 不考虑耦合作用 σ_x 等值线图(单位:MPa)
Fig.3 Contour of σ_x with no coupling considered

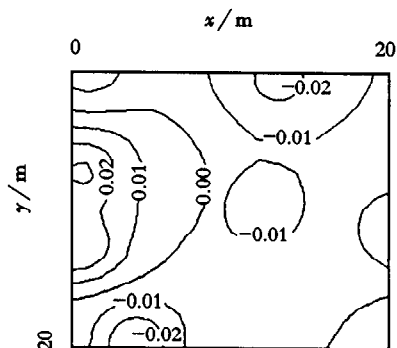


图4 不考虑耦合作用 σ_y 等值线图(单位:MPa)
Fig.4 Contour of σ_y with no coupling considered

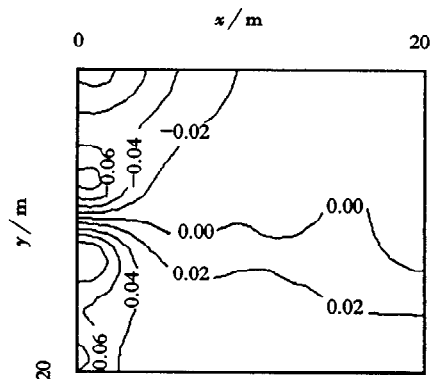


图5 不考虑耦合作用 τ_{xy} 等值线图(单位:MPa)
Fig.5 Contour of τ_{xy} with no coupling considered

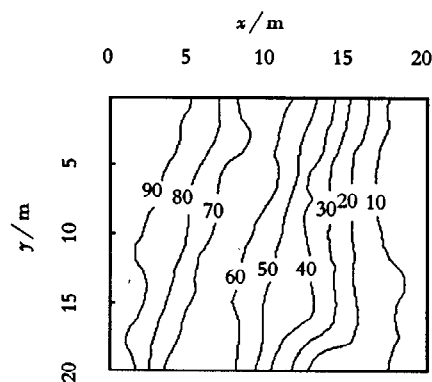


图6 考虑耦合作用等水头线图(单位:MPa)
Fig.6 Contour of hydraulic head with coupling considered

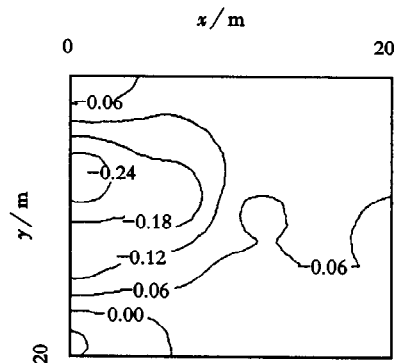


图7 考虑耦合作用 σ_x 等值线图(单位:MPa)
Fig.7 Contour of σ_x with coupling considered

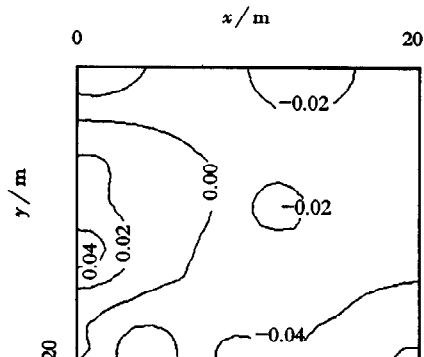


图8 考虑耦合作用 σ_y 等值线图(单位:MPa)
Fig.8 Contour of σ_y with coupling considered

