

裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究

朱珍德,徐卫亚

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 基于能量互易定理并考虑裂隙扩展过程中的能量转换和裂隙扩展过程中的相互作用,探讨了裂隙岩体在复杂应力状态下本构关系与损伤演化方程,给出了渗透张量随裂隙损伤发展的关系,从而建立了多裂隙岩体渗流场与损伤场耦合分析模型.在此基础上,对三峡永久船闸高边坡稳定性进行分析.结果表明,左边坡相对于右边坡有更大的损伤演化区,应适当考虑左边坡的锚固和防渗措施.

关键词 裂隙岩体 渗流场 损伤场 耦合模型

中图分类号 :TU452

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2003)02-0156-05

裂隙岩体水力学研究过程大致可分为 3 个阶段:(a)不考虑渗流场和应力场之间的相互作用;(b)裂隙岩体渗流场与应力场相互耦合作用,但不考虑裂隙扩展贯通对岩体渗透性以及力学性状的影响;(c)裂隙岩体渗流场与损伤场耦合问题的研究.研究表明,裂隙岩体在开挖卸荷作用下,原有裂隙产生闭合、张开、开裂、扩展和贯通,一方面使得岩体力学性质产生显著弱化和强烈的各向异性,从而改变岩体的应力场;另一方面有可能形成新的渗流裂隙网络,显著改变渗流场.这种渗透与岩体裂隙损伤的相互作用是互为关联的,称之为裂隙岩体渗流场与损伤场之间的耦合效应.这种耦合效应对于大型水利工程岩质高边坡及引水隧洞而言,是造成失稳的主要因素.本文基于能量互易定理及自洽理论,建立了裂隙岩体损伤演化方程,考虑裂隙扩展给出了渗流场与损伤场耦合方程,并通过三峡船闸验算分析,验证了模型的正确性.

1 裂隙岩体本构关系

1.1 拉剪应力状态下裂隙岩体的本构关系

设 Φ_e 是受损岩体的等效弹性损伤应变能密度, Φ_o 是无损岩体(即岩石)的弹性应变能密度, Φ_c 是单位体积岩体中裂隙存在产生的附加应变能,则由 Betti 能量互易定理知

$$\Phi_e = \Phi_o + \Phi_c \quad (1)$$

假设岩体中的裂隙呈币状圆盘状,根据文献[1]可求得岩体中单个裂隙存在产生的附加应变能为

$$\Phi'_c = \frac{a^3}{E} (G_1 \sigma^2 + G_2 \tau^2) \quad (2)$$

式中: σ, τ ——远场表观应力张量 σ 在裂隙面法向和切向的投影; a ——裂隙的统计平均半径.

若设单位体积岩体内含有 M 组概化优势裂隙,其中任意第 k 组裂隙法向单位矢量是 $n^{(k)}$,平均体积密度是 $\rho_v^{(k)}$,统计平均半径为 $a^{(k)}$,则裂隙岩体的等效弹性初始损伤应变能密度 Φ_e 为

$$\Phi_e = \Phi_o + \Phi_c = \frac{1}{2} \underline{\sigma}_{ij} C_{ijkl}^0 \underline{\sigma}_{kl} + \frac{1}{E_0} \sum_{k=1}^M \{ a^{(k)^3} \rho_v^{(k)} [G_1 \sigma^{(k)^2} + G_2 \tau^{(k)^2}] \} \quad (3)$$

式中 C_{ijkl}^0 为无损岩体(即岩石)的弹性柔度张量.

将功 Φ_e 对应力张量 $\bar{\sigma}_{op}$ 求导得到裂隙岩体的等效弹性-初始损伤柔度张量

$$\underline{\epsilon}_{op}^{o-d} = \frac{\partial \Phi_e}{\partial \bar{\sigma}_{op}} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial \bar{\sigma}_{op}} + \frac{\partial \Phi_c}{\partial \bar{\sigma}_{op}} = C_{opkl}^o \bar{\sigma}_{kl} + C_{opkl}^d \bar{\sigma}_{kl} = C_{opkl}^{o-d} \bar{\sigma}_{kl} \quad (4)$$

式中 C_{ijkl}^d 为裂隙岩体的初始损伤柔度张量,其值为

$$C_{ijkl}^d = \frac{1}{E_0} \sum_{k=0}^M \left[a^{(k)^3} \rho_v^{(k)} (2 G_1^{(k)} n_o^{(k)} n_p^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)}) + \right. \\ \left. \frac{1}{2} G_2^{(k)} (\delta_{kp} n_o^{(k)} n_l^{(k)} + \delta_{ko} n_p^{(k)} n_l^{(k)} + \delta_{lo} n_p^{(k)} n_k^{(k)} + \delta_{lp} n_o^{(k)} n_k^{(k)} - 4 n_p^{(k)} n_k^{(k)} n_o^{(k)} n_l^{(k)}) \right] \quad (5)$$

1.2 压剪应力状态下裂隙岩体的本构关系

设裂隙的传压系数为 C_n ,传剪系数为 C_s ,法向刚度为 K_n ,剪切刚度为 K_s ,根据 Betti 定理,可得多裂隙岩体的柔度矩阵

$$C = C^o + \sum_{i=1}^m G_i^T \Delta C_i G_i \quad (6)$$

式中: C^o ——岩石无损弹性柔度矩阵; G_i ——新旧坐标转换矩阵的递阵; ΔC_i ——单裂隙对柔度矩阵的贡献,见文献[2].

1.3 渗流对其应力场的力学效应

假设有 k 组裂隙面含有水,裂隙水压力的存在增大了岩体的柔度张量,体现了裂隙水压力对岩体力学特性的削弱.由广义虚功定律,假定水流仅在裂隙中流动,岩块本身不导水,渗透水压力 $p = \gamma H$,对于压剪应力状态,含水裂隙岩体的本构方程可表示为

$$\varepsilon_{ij}^w = C_{ijkl}^o \sigma_{kl} + C_{ijkl}^d \sigma_{kl} - C_{ijkl}^d p \delta_{kl} = C_{ijkl}^{o-d} \sigma_{kl} - C_{ijkl}^d p \delta_{kl} \quad (7)$$

对于拉剪应力状态,含水裂隙岩体的本构方程可写成

$$\varepsilon_{ij}^w = C_{ijkl}^{o-d} \sigma_{kl} + C_{ijkl}^d p \delta_{kl} \quad (8)$$

2 裂隙岩体损伤演化方程

2.1 压剪应力状态下的损伤演化方程

按自治理论,含 n 组裂隙单元体内有 $k(k \leq n)$ 组裂隙扩展,则裂隙岩体损伤演化方程[2]为

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^{o-d} + C_{ijkl}^{ad} \quad (9)$$

式中 C_{ijkl}^{ad} 为裂隙扩展后产生的附加损伤柔度张量,

$$C_{ijkl}^{ad} = \sum_{j=1}^k \left[\frac{F_2^{(j)} \tau^{(j)} + F_3^{(j)} \sigma^{(j)} + F_5^{(j)}}{\sigma^{(j)}} n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)} + \frac{2 F_1^{(j)} \tau^{(j)} + F_2^{(j)} \sigma^{(j)} + F_4^{(j)}}{4 \tau^{(j)}} (\delta_{jl} n_i^{(j)} n_k^{(j)} + \right. \\ \left. \delta_{jk} n_i^{(j)} n_l^{(j)} + \delta_{il} n_j^{(j)} n_k^{(j)} + \delta_{ik} n_j^{(j)} n_l^{(j)} - 4 n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)}) \right] \quad (10)$$

初始裂纹两端在压剪应力状态下产生的翼型分支裂纹随外载的增加而稳定扩展,在扩展后期,分支裂纹之间将产生相互作用导致裂纹击穿岩桥介质而彼此贯通,从而使岩体产生脆性断裂破坏.分支裂纹长度 l 可由文献[1]给出:

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi a}}{(1+L)^{3/2}} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} T_s^o - \frac{\sigma_3 L}{B_n} \right) \left[B_n L + \frac{1}{(1+L)^{1/2}} \right] \quad (11)$$

$$T_s^o = \tau - f\sigma - c \quad L = \frac{l}{a} \quad (12)$$

当 K_I (应力强度因子)降至 K_{Ic} (断裂韧度)时,裂纹便停止扩展,并由此求得 l .

当裂隙面充满水并且水压力为 p 时,分支裂纹在渗流作用下的扩展长度可由下式确定:

$$K_{Ic}^w = K_I + \frac{\sqrt{\pi a}}{(1+L)^{3/2}} \left(\frac{2}{3} f + \frac{L}{B_n} \right) [B_n L + (1+L)^{-1/2}] p \quad (13)$$

从而可由文献[2]确定渗流时裂隙岩体损伤演化的贡献:

$$C_{ijkl}^{adw} = \sum_{j=1}^k \left[\frac{f_2^{(j)} \tau^{(j)} + f_3^{(j)} \sigma^{(j)} + f_5^{(j)}}{\sigma^{(j)}} n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)} + \frac{2 f_1^{(j)} \tau^{(j)} + f_2^{(j)} \sigma^{(j)} + f_4^{(j)}}{4 \tau^{(j)}} (\delta_{jl} n_i^{(j)} n_k^{(j)} + \right. \\ \left. \delta_{jk} n_i^{(j)} n_l^{(j)} + \delta_{il} n_j^{(j)} n_k^{(j)} + \delta_{ik} n_j^{(j)} n_l^{(j)} - 4 n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)}) \right] \quad (14)$$

2.2 拉剪应力状态下的损伤演化方程

裂隙处于拉剪应力状态时,其扩展阻力随裂隙扩展而增大,满足幂函数关系^[2]

$$R' = R \left(\frac{a'}{a} \right)^n \tag{15}$$

式中: n ——裂隙扩展阻力增长指数($n > 0$); R ——裂隙临界扩展阻力; a', R' ——裂隙扩展后的半迹长及其相应的扩展阻力.由式(15)可得出无水裂隙扩展后的长度为

$$a' = a^{\frac{n}{n-1}} [A\sigma^2 + B\tau^2]^{\frac{1}{n-1}} \tag{16}$$

其中

$$A = \frac{4(1 - \nu_0^2)}{\pi E_0 R} \quad B = A - \frac{2}{2 - \nu_0}$$

同理,由式(15)可得出含水裂隙扩展后的长度为

$$a' = a^{\frac{n}{n-1}} [A(\sigma + p)^2 + B\tau^2]^{\frac{1}{n-1}} \tag{17}$$

将式(16),(17)代入式(4),则得到拉剪应力状态下的裂隙岩体损伤演化方程.

3 裂隙岩体断裂损伤效应对渗透张量的影响

多裂隙岩体的渗透张量可表示为^[3,4]

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{gb^{(k)^3}}{12\mu c^{(k)}} \pi a^{(k)^2} \lambda^{(k)} \rho_v^{(k)} [\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \tag{18}$$

式中: b ——裂隙的水力宽度; a ——裂隙的统计平均半径; λ ——连通率修正系数; ρ_v ——岩体密度; μ ——水的运动粘滞系数; c ——裂隙粗糙系数; N ——裂隙组数.

3.1 裂隙面受拉剪作用

裂隙受拉剪应力作用发生扩展,其分支裂纹长度为

$$l = a^{\frac{n}{n-1}} [A(\sigma + p)^2 + B\tau^2]^{\frac{1}{n-1}} - a \tag{19}$$

由于分支裂纹产生而引起的裂隙法向变形由卡氏定理得

$$\Delta b' = \frac{16\sqrt{2}(1 - \nu)}{5\pi E_0} a \sigma_n \tag{20}$$

式中 σ_n 为裂隙面法向应力,对渗透张量的贡献为

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{g(b + \Delta b + \Delta b')^{(k)^3}}{12\mu c^{(k)}} \pi (a + l)^{(k)^2} \lambda^{(k)} \rho_v^{(k)} [\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \tag{21}$$

3.2 裂隙受压剪作用

a. 裂隙面不发生滑移,此时裂隙面法向变形为

$$\begin{aligned} \Delta b &= -\frac{\sigma_n}{k_n} + \Delta b^* \\ \Delta b^* &= \frac{(1 - \alpha^*)(1 + \beta^*)}{1 + \alpha^* \beta^*} b - \frac{(1 - \alpha_0)(1 + \beta_0)}{1 + \alpha_0 \beta_0} b_0 \quad \alpha^* = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n^* - p}{M}\right) \\ \beta^* &= \exp\left\{\frac{\varphi_b}{90^\circ - \varphi_b} \frac{1}{G} \left[\arctan\left(\frac{\tau^*}{M}\right) - \varphi_b \tau^* - \frac{\sigma_n^*}{2} \ln\left(1 + \frac{\tau^{*2}}{\sigma_n^{*2}}\right) \right]\right\} \\ \sigma_n^* &= \sigma_n - p \quad \tau^* = \sigma_n^* \tan\left[20\lg\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right) + 30\right] \end{aligned}$$

Δb^* 是水压引起的裂隙面的法向位移.故渗透张量增加为

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{g\left(b - \frac{\sigma_n}{k_n} + \Delta b^*\right)^{(k)^3}}{12\mu c^{(k)}} \pi a^{(k)^2} \lambda^{(k)} \rho_v^{(k)} [\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \tag{22}$$

b. 裂隙面滑移扩展,由于分支裂隙产生而引起的裂隙平均开度为

$$\overline{\Delta b'} = \frac{2(1-\nu_0)^2}{E_0} \left\{ \frac{4a\tau_s \cos\theta}{\pi l} \int_0^1 \ln \left[\frac{l}{x} + \sqrt{\left(\frac{l}{x}\right)^2 - 1} \right] dx - \frac{\pi}{2} \sigma_3 l \right\}$$

(23)

式中 θ 为裂隙面法向与最大主应力方向的夹角.

渗透张量增加为

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{g}{12\mu c^{(k)}} (b + \Delta b)^{(k)^3} \pi [a^{(k)} + l^{(k)} \cos\theta]^2 \lambda^{(k)} \rho_v^{(k)} [\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}]$$

(24)

式中 l 为分支裂纹长度,由式(13)确定.

4 渗流场与损伤场的耦合方程

本文运用机理分析法建立了岩体渗流场与损伤场耦合的等效连续介质模型. 据此模型用有限单元法由式(1)~(24)可得裂隙岩体渗流与损伤场耦合方程

$$\left. \begin{aligned} \nabla (K \nabla H) + Q &= S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ P &= \gamma_w H \\ \sigma_{ij} &= K_{ijkl}^{o-d} : \varepsilon_{kl} + K_{ijkl}^{o-d} : C_{kl}^d : p \\ \tilde{K} U &= F + p \\ K_{ij} &= K(a, b, n) \quad a = a(\sigma_{ij}, p) \quad b = b(\sigma_{ij}, p) \quad n = n(\sigma_{ij}, p) \end{aligned} \right\}$$

(25)

式中 : K ——渗透系数矩阵 ; K_{ij} ——渗透张量 ; K_{ijkl}^{o-d} ——刚度张量 ; $\tilde{K}$ ——刚度矩阵.

5 算 例

选取三峡永久船闸 20 号剖面. 该剖面几何尺寸、岩体力学参数、初始应力场、岩体结构面力学参数、裂隙的断裂力学参数以及岩体渗流参数与文[2]相同. 计算中采用 20 号剖面, 计算域中共有 588 个单元, 644 个节点, 按设计要

表 1 20 号剖面关键点的位移值

Table 1 Displacement at key points of No.20 cross-section mm

点号	双场耦合模型 (按本文模型)	弹塑性模型 (按 YPZ 程序计算)
581	27.954	27.665
461	35.665	9.593
462	41.438	7.862
380	36.459	6.097
381	27.381	11.649
300	22.114	9.968
218	17.752	7.023
219	21.283	11.588
220	25.746	17.781
302	36.765	27.749
384	48.128	34.835
386	44.016	33.782
388	42.724	36.007
306	35.398	31.022
224	30.232	26.013
225	31.451	26.938
226	23.128	22.068
308	36.409	31.723
390	45.474	34.635
391	21.268	20.029
475	17.097	16.701
603	14.038	13.348
613	14.153	13.934

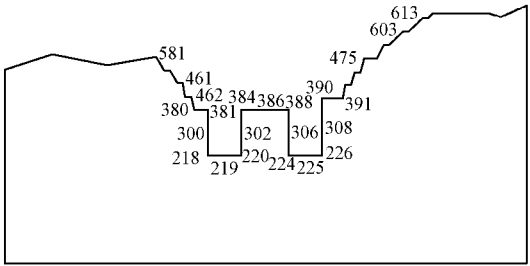


图 1 20 号剖面开挖边界节点

Fig.1 Nodes on the excavation border of No.20 cross-section

求分 7 步开挖. 两种工况, 20 号剖面开挖面上边界节点如图 1 所示.

从第 7 步施工开挖结束的计算结果来分析 20 号剖面的边坡均呈现卸荷回弹变形, 即左边坡向右上位移, 右边坡向左上位移; 中墩向上卸荷回弹, 同时依照左右边坡坡高的差异, 向坡高较低一侧移动, 即中墩向左侧移动.

从双场耦合的计算结果与弹塑性计算结果的比较来看, 其位移形态基本相同. 考虑到节理、裂隙断裂损伤演化后, 位移量有所增加, 在损伤演化加剧区域, 最大可增加 15~30 mm, 一般部位增加 5~10 mm, 因而增大后的总位移量其最大值可达 48.128 mm 左右, 见表 1.

据本文模型计算结果, 其损伤演化区域如图 2 所示. 左右边坡闸顶平台以上的各级微新岩体边坡中的演化区域差不多. 闸顶平台以下, 直立墙体后的岩体中, 右岸边坡的损伤演化区比左岸边坡大, 大约 15%. 中墩部位没有出现很大的损伤演化区域.

据渗流损伤场耦合计算结果, 左右边坡由于开挖卸荷节理裂隙扩展贯通, 损伤加剧, 渗透系数增大. 右岸边坡的渗流演化区域

比左岸边坡大,大约 10% 冲墩部位没有出现较大的渗流损伤演化区域,并且随微新岩体埋深,裂隙渗流演化区逐渐减小,如图 3 所示.

从图 2、图 3 可知,损伤演化区,渗流损伤演化区多集中于这些部位. 利用本文双场耦合模型计算的结果比文献[5]相应的计算结果要大,这正说明了地下水渗流对岩体结构特性的影响.



图 2 20 号剖面损伤演化区
Fig.2 Evolution of damage at
No.20 cross-section



图 3 20 号剖面渗流损伤演化区
Fig.3 Evolution of seepage damage
at No.20 cross-section

6 结 束 语

a. 基于 Betti 能量互易定理及裂隙扩展过程中的能量损伤演化,建立裂隙岩体脆弹性断裂损伤本构模型,考虑到渗透压力对裂隙张开度及长度的影响,定量分析了裂隙岩体断裂损伤效应对渗透张量的贡献. 最后基于两场的耦合机理,建立了多裂隙岩体渗流场与损伤耦合模型.

b. 采用双场耦合模型,边坡中发生损伤演化的区域与弹性性分析、渗流场和应力场耦合分析的结果略有不同,其开挖边位移明显增大,损伤区也相应地偏大. 这正说明本文模型应用于三峡工程是合理的.

c. 从计算结果看,左边坡相对于右边坡有更大的损伤演化区,应适当考虑加强左边坡的锚固和防渗措施.

参考文献:

[1] SEGALL P. Formation and growth of extensional fracture sets[J]. Geological Society of America Bulletin,1984,95 454—462.
[2] 朱珍德,胡定. 渗流损伤耦合模型在三峡工程中的初步应用[J]. 武汉水利电力大学学报,1999,21(1) 1—6.
[3] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resour Resear,1986, 22(13) 1845—1856.
[4] AYATOLLAHI M S, NOORISHAD J, WITHERSPOON P A. Stress-fluid flow analysis of fractured rocks [J]. J. of Eng Mech,1983,109(1) : 1—13.
[5] 朱维申,邱祥波,李述才,等. 损伤流变模型在三峡船闸高边坡稳定分析的初步应用[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(5) : 431—436.

Theoretical study on a coupled seepage-damage model for fissured rock masses

ZHU Zhen-de, XU Wei-ya

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on the Betti energy exchange theory, a study was made on the constitutive law and damage evolution equation of fissured rock mass in complex stress states and the variation of seepage tensor with crack evolution, with energy exchange and interaction considered in the process of crack development, then a coupled seepage-damage model was developed for analysis of multi-fissured rocks. By use of the model, a stability analysis was made of the high slope of the permanent ship lock in the Three-Gorges Project, and the results show that the damage evolution on the left side slope would be more serious than that on the right side slope, so anchors and measures for seepage control should be taken in the construction of the left side slope.

Key words :fissured rock ; seepage field ; damage field ; coupled model