

文章编号: 1000-7598-(2002)06-0687-04

渗透压力对裂隙岩体损伤破坏的研究

郑少河¹, 姚海林^{1,2}, 葛修润^{1,2}

(1. 上海交通大学 建工学院, 上海 200030; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于 Betti 能量互易定理推导了含水裂隙岩体初始损伤柔度张量和损伤演化方程, 建立了考虑渗透压力的裂隙岩体脆弹性断裂损伤本构模型。并提出采用渗透压力附加柔度张量的概念来定义渗透压力对岩体力学特性的影响。工程算例结果表明: 当岩体中有地下水活动时, 考虑渗透压力对损伤区的影响是十分必要的。

关键词: 裂隙岩体; 渗透压力; 损伤演化; 附加柔度张量

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Influence of seepage pressure on damage of fractured rock mass

ZHENG Shao-he¹, YAO Hai-lin^{1,2}, GE Xiu-run^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on Betti energy reciprocal theorem, initial flexibility tensor and damage evolution of rock mass subjected to seepage pressure are presented. And an elastic fracture-damage constitutive equation taking account of seepage pressure is also established. The concept of additional flexibility tensor is introduced to indicate the influence of seepage pressure on the mechanic characteristics of rock mass. The results obtained from a practical project show that the seepage pressure is of great importance to damage evolution when there is groundwater flow in fractured rock mass.

Key words: fractured rock mass; seepage pressure; damage evolution; additional flexibility tensor

1 引言

裂隙岩体的工程特性主要表现在本身的力学性能上^[1]。处于某一应力状态的岩体, 其内部所包含的节理、断裂等宏观结构与其微裂纹空隙、颗粒边界等微观结构是客观存在的, 反映出岩体具有初始损伤特征; 另一方面, 裂隙岩体在荷载作用下, 其内部结构边界将发生变化, 从而引起岩体的损伤演化, 恶化岩体本身的力学性能。从目前国内外对岩体损伤的研究来看, 主要集中在两个方面: ①岩体裂隙发育对岩体损伤力学性能的影响, 即初始损伤^[2]; ②应力应变状态下裂隙岩体的损伤演化特性^[3~5]。需要特别指出: 以上研究主要针对的是非含水裂隙岩体, 即不考虑渗流场对岩体初始损伤及损伤演化的影响。但在诸如水利水电、能源、环保等岩土工程中裂隙岩体中的渗流场是客观存在的。渗流

对岩体应力场的力学作用, 从宏观上看是渗透体积力。在数值分析中, 渗透体积力可等效为结点力, 参与各单元间的应力调整; 从微观上看, 存在于裂隙内的渗透压力使裂隙尖端应力强度因子提高, 具有劈裂作用。另外由于渗透压力的存在及变化将引起岩体损伤特性的改变, 出现渗流损伤, 进一步影响岩体本身的力学性能。因此有必要研究应力与渗透压力共同作用下的岩体初始损伤及损伤演化特性对于实际工程的影响。

2 裂隙岩体初始等效损伤柔度张量

裂隙岩体损伤的宏观力学效应表现为岩体的柔度发生变化, 采用无损伤材料的弹性柔度张量 C^0 和裂隙附加损伤柔度张量 C^d 来表示; 对于渗透压力对裂隙岩体柔度的影响, 本文通过引入渗透压力附加柔度张量 C^w 这一概念来定义渗透压力对裂隙岩体

强度的影响。

设 u_0 为裂隙岩体的等效弹性损伤应变能密度, u_0 为无损岩体的应变能密度, u_d 为由于裂隙及渗透压力存在而产生的附加应变能密度, 按 Betti 能量互易定理, 裂隙岩体的应变能密度函数可表示为^[6]:

$$u_e = u_0 + u_d = \frac{1}{2} \sigma_{ij} (C_{ijkl}^0 + C_{ijkl}^d + C_{ijkl}^w) \sigma_{kl} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} C_{ijkl}^{0-d-w} \sigma_{kl} \quad (1)$$

式中 σ_{ij} 为应力张量。

对于裂隙岩体, 无损材料的弹性柔度张量 C^0 可用完整岩块的资料确定^[7]

$$C_{ijkl}^0 = \frac{1+\nu_0}{E_0} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\nu_0}{E_0} \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (2)$$

假定裂隙岩体含有 N 组优势结构面, 其中任意第 m 组结构面的单位法向向量为 $\vec{n}^{(m)}$, 平均体积密度 $\rho_v^{(m)}$, 统计特征尺寸 $a^{(m)}$, 对于圆盘状裂隙, a 为统计半径。将式 (1) 中的 u_d 对 σ_{ij} 求导, 并注意到柔度张量的对称性, 得到岩体裂隙的附加损伤柔度张量 C^d ^[6]

$$C_{ijkl}^d = \frac{1}{E_0} \sum_{m=1}^N \{ a^{(m)^3} \rho_v^{(m)} \cdot [2G_1^{(m)}(1-C_v^{(m)})^2 n_i^{(m)} n_j^{(m)} n_k^{(m)} n_l^{(m)} + \frac{1}{2} G_2^{(m)}(1-C_s^{(m)})^2 (\delta_{ij} n_j^{(m)} n_k^{(m)} + \delta_{ik} n_j^{(m)} n_l^{(m)} + \delta_{il} n_j^{(m)} n_k^{(m)} + \delta_{jk} n_i^{(m)} n_l^{(m)} - 4n_i^{(m)} n_j^{(m)} n_k^{(m)} n_l^{(m)})] \} \quad (3)$$

式中 E_0 为无损岩体的弹性模量, G_1 和 G_2 为与裂隙形状及相互干扰有关的无量纲因子, $G_1 = 8(1-\nu_0^2)/3$; $G_2 = 1/3(2-\nu_0)$; C_v 和 C_s 为传压、传剪系数, ν_0 为岩体的泊松比。当应力水平不大时,

$$C_v = \frac{a \pi}{a + \frac{\pi E_0}{(1-\nu_0^2)K_n}}; \quad C_s = \frac{\pi a}{a + \frac{\pi E_0}{(1-\nu_0^2)K_s}}.$$

假定水流仅在裂隙中流动, 裂隙面连通率为 β , 引入比例系数 R , $R = \frac{p}{\sigma}$, p 为渗透压力, σ 为平均应力, $\sigma = 3\sigma_{ii}$, σ_{ii} 为第一应力不变量。

同理将式 (1) 中的 u_d 对 σ_{ij} 求导可得裂隙中的渗透压力产生的附加柔度张量^[6]:

$$C_{ijkl}^w = \frac{2}{3E} \sum_{m=1}^N \{ \alpha^{(m)^3} \rho_v^{(m)} [G_1^{(m)}(1-C_v^{(m)})\beta^{(m)}R^{(m)} \cdot (n_i^{(m)} n_j^{(m)} \delta_{kl} + n_k^{(m)} n_l^{(m)} \delta_{ij}) + \frac{1}{3} G_1^{(m)} \delta_{ij} \delta_{kl} (\beta^{(m)} R^{(m)})^2] \} \quad (4)$$

综合式 (2~4) 得到考虑渗透压力的裂隙岩体初始等效损伤柔度张量

$$C_{ijkl}^{0-d-w} = C_{ijkl}^0 + C_{ijkl}^d + C_{ijkl}^w \quad (5)$$

式中 C^0 为无损材料的弹性柔度张量; C_{ijkl}^d 为不考虑渗透压力 p 的裂隙附加柔度张量; C_{ijkl}^w 为渗透压力 p 对柔度张量的贡献, 称为渗透压力附加柔度张量。

由式 (5) 可以看出渗透压力对应力场的贡献不仅体现在有限元计算中的等效结点力上, 也体现在对裂隙岩体刚度矩阵的削弱上。它的存在, 改变了裂隙岩体的柔度张量, 体现了对岩体力学特性的影响。渗透压力对裂隙岩体柔度张量的贡献与裂隙的组数、产状、迹长、裂隙面接触情况等因素密切相关, 并表现出强烈的各向异性, 这与裂隙岩体渗透性的各向异性有关。

3 含水裂隙岩体的能量损伤演化方程

裂隙扩展所引起的岩体结构改变, 使岩体杨氏模量降低, 泊松比增大。按照损伤力学理论, 裂隙岩体的这一力学特性可以通过损伤变量的演化发展加以描述。

岩体裂纹扩展后, 系统内总的应变能密度^[6]为

$$u = u_e + u_{ad} \quad (6)$$

式中 u_e 为裂隙岩体裂纹未扩展时的应变能密度, 见式 (1); u_{ad} 为裂纹扩展后产生的附加应变能密度。

本文主要对 u_{ad} 进行分析。由文献 [4] 得翼型分支裂纹扩展产生的附加弹性应变能密度 u_{ad} 为

$$u_{ad} = \sum_{m=1}^N \left[\frac{4}{E_0} \rho_v^{(m)} a^{(m)^2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \tau^{(m)} + \frac{5}{2} \sigma_1^{(m)} L^{(m)} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中 L 为裂纹扩展长度与裂隙原半径的比值, $L = \frac{l}{a}$, l 为裂隙在压剪应力下的扩展长度, 其余符号同前。

裂纹扩展引起岩体刚度进一步降低, 柔度增大。由式 (7) 将 u_{ad} 对应力张量 σ_{ij} 求导, 可得到考虑渗透压力的裂隙扩展产生的损伤演化柔度张量 C_{ijkl}^{ad} ^[6] 为

$$C_{ijkl}^{ad} = \frac{1}{E_0} \sum_{m=1}^N \{ \rho_v^{(m)} a^{(m)^2} [B_1^{(m)} n_i^{(m)} n_j^{(m)} n_k^{(m)} n_l^{(m)} + B_2^{(m)}$$

$$(n_i^{(m)} n_l^{(m)} \delta_{ij} + n_j^{(m)} n_l^{(m)} \delta_{ki} + n_i^{(m)} n_k^{(m)} \delta_{jl} + n_j^{(m)} n_k^{(m)} \delta_{il}) + \frac{B_3^{(m)}}{3} \beta^{(m)} R^{(m)} \delta_{ij} \delta_{kl} \} \quad (8)$$

式中

$$B_1^{(m)} = \left(\frac{16}{\sqrt{3}} \tau'^{(m)} + 20 \sigma_1^{(m)} L^{(m)} \right) \left[\frac{1}{\sigma^{(m)}} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \mu + \frac{5}{2} L^{(m)} \right) - \frac{1}{\tau^{(m)}} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{5}{2} \text{ctg} \theta^{(m)} L^{(m)} \right) + \frac{5}{2} \sigma_1^{(m)} A_1^{(m)} \right]$$

$$B_2^{(m)} = \left(\frac{4}{\sqrt{3}} \tau'^{(m)} + 5 \sigma_1^{(m)} L^{(m)} \right) \left[\frac{1}{\tau^{(m)}} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{5}{2} \text{ctg} \theta^{(m)} L^{(m)} \right) + \frac{5}{2} \sigma_1^{(m)} A_2^{(m)} \right]$$

$$B_3^{(m)} = \left(\frac{16}{\sqrt{3}} \tau'^{(m)} + 20 \sigma_1^{(m)} L^{(m)} \right) \left[\frac{2\mu}{\sqrt{3}} + \frac{5}{2} (L^{(m)} + \sigma_1^{(m)} A_3^{(m)}) \right]$$

$$A_1^{(m)} = \sqrt{L^{(m)}} \left[\frac{-4a^{(m)} \cos \theta^{(m)} \sigma_1^{(m)^2} (\mu \tau^{(m)} - \sigma^{(m)})}{2 \pi \alpha^{(m)} A^{(m)} \sigma_1^{(m)} \sigma^{(m)} \tau^{(m)}} - \frac{(K_{IC}^{(m)})^2 - 4a^{(m)^2} \cos \theta^{(m)} \tau'^{(m)} \sigma_1^{(m)}}{2 \pi \alpha^{(m)} A^{(m)} \sigma_1^{(m)} \sigma^{(m)} \tau^{(m)}} - \frac{2\sqrt{\pi a^{(m)} A^{(m)} K_{IC}^{(m)} \sigma_1^{(m)}} (\tau^{(m)} - \sigma^{(m)} \text{ctg} \theta^{(m)})}{2 \pi \alpha^{(m)} A^{(m)} \sigma_1^{(m)} \sigma^{(m)} \tau^{(m)}} \right]$$

$$A_2^{(m)} = \sqrt{L^{(m)}} \left\{ \frac{-4a^{(m)} \cos \theta^{(m)} \sigma_1^{(m)}}{2 \pi a^{(m)} A^{(m)} \sigma_1^{(m)} \tau^{(m)}} - \text{ctg} \theta^{(m)} \left[\frac{K_{IC}^{(m)^2} - 4a^{(m)} \cos \theta^{(m)} \tau'^{(m)} \sigma_1^{(m)}}{2 \pi a^{(m)} A^{(m)} \sigma_1^{(m)} \tau^{(m)}} - \frac{2\sqrt{\pi a^{(m)} A^{(m)} K_{IC}^{(m)} \sigma_1^{(m)}}}{2 \pi a^{(m)} A^{(m)} \sigma_1^{(m)} \tau^{(m)}} \right] \right\}$$

$$A_3^{(m)} = \frac{\sqrt{L^{(m)}}}{A^{(m)}} \left[-2 \left(\frac{K_{IC}^{(m)}}{\sqrt{2 \pi a^{(m)}}} \right)^2 \sigma_1^{(m)^3} - \frac{2}{\pi} \cos \theta^{(m)} \left(\frac{\mu}{\sigma_1^{(m)}} - \frac{\tau'^{(m)}}{\sigma^{(m)^2}} \right) \right] - \frac{2 K_{IC}^{(m)} \sqrt{L^{(m)}}}{\sigma^{(m)^2} \sqrt{2 \pi a^{(m)}}}$$

$$A^{(m)} = \sqrt{\left(\frac{K_{IC}^{(m)}}{2 \sigma_1^{(m)} \sqrt{\pi a^{(m)}}} \right)^2 - \frac{2}{\pi} \frac{\tau'^{(m)}}{\sigma_1^{(m)}} \cos \theta^{(m)}}$$

$K_{IC}^{(m)}$ 为第 m 组裂隙尖端 I 型断裂韧度, μ 为裂隙面的摩擦系数, σ_1 为裂隙所在单元体所受的远场主应力, θ 为裂隙与 σ_1 的夹角, τ 为裂隙面上的切向应

力。

式(8)中的最后一项表征了渗透压力对岩体损伤演化的贡献。若裂隙岩体内无地下水运动, 此时渗流压力 $p=0$, $R=0$, 式(8)变为

$$C_{ijkl}^{ad} = \frac{1}{E_0} \sum_{m=1}^N \{ \rho_v a^2 [B_1 n_i n_j n_k n_l + B_2 (n_i n_l \delta_{kj} + n_j n_l \delta_{ki} + n_i n_k \delta_{jl} + n_j n_k \delta_{il})] \} \quad (9)$$

结合岩体的初始损伤及损伤演化柔度张量, 即可得到考虑渗透压力的裂隙岩体损伤演化方程:

$$C_{ijkl}^{o-ad} = C_{ijkl}^o + C_{ijkl}^d + C_{ijkl}^w + C_{ijkl}^{ad} \quad (10)$$

式中 C_{ijkl}^o 为无损岩体的弹性柔度张量, 由式(2)确定; C_{ijkl}^d 为裂隙岩体的初始损伤柔度张量, 由式(3)确定; C_{ijk}^w 为渗透压力产生的附加柔度张量, 由式(4)确定; C_{ijkl}^{ad} 为裂纹扩展产生的附加柔度张量, 由式(8)确定。

4 含水裂隙岩体的本构方程

假定裂隙岩体发生的变形是脆弹性的, 根据不可逆热力学第二定律, 考虑岩体的初始损伤和损伤演化, 可得到含水裂隙岩体脆弹性损伤本构模型:

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijkl}^{o-ad} \sigma_{kl} \quad (11)$$

式中 C_{ijkl}^{o-ad} 由式(10)确定。

5 工程算例

以某地下厂房硐室群施工开挖为例, 研究了两种工况下围岩损伤区的变化。①考虑渗透压力, ②不考虑渗透压力。

地下厂房围岩的力学参数见表1。厂房区裂隙分布主要有以下5组: ① N10~35° E/NW(SE) $\angle$ 70~90°; ② N50~80° E/SE (NW) $\angle$ 70~90°; ③ N0~30° W/NE $\angle$ 10~30°; ④ N10~30° E/NW(SE) $\angle$ 4~20°; ⑤ N70~90° E/NW $\angle$ 8~30°; 裂隙一般延伸1~3 m, 间距多大于50 cm, 裂隙面较新鲜, 微起伏粗糙, 无充填, 连通率 β 取0.75。应力场按自重应力考虑。整个地下研究区域按全饱和计算, 左边界给定水头450 m, 右边界给定水头400 m。

计算范围为 $X \times Y(m) = 550 \times 400$, 共剖分为2549个单元, 有2517个节点。有限元网格见图1。根据施工开挖方案, 计算模拟了9步开挖。

表 1 地下厂房围岩力学参数

Table 1 Mechanic parameters of surrounding rock mass in underground building

岩 性	重 度 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	抗拉 强度 /MPa	泊 松 比	弹 性 模 量 /GPa	抗剪断强度		抗剪强度	
					f' /MPa	c' /MPa	F /MPa	c /MPa
新、完整、 较完整 玄武岩	28.5	1.5	0.20	25	1.35	2.5	1.08	0.0

依据以上地质信息和力学参数,按式(4)和式(8)分别计算考虑渗透压力的初始损伤和损伤演化阶段的柔度张量,再按式(10)进行有限元分析。计算结果如图 2, 3 所示。考虑渗透压力的损伤区面积为 $4\,161\text{ m}^2$, 不考虑渗透压力的损伤区面积为 $3\,448\text{ m}^2$, 损伤区面积增大 20.6 %。结果表明:当岩体中有地下水活动时,考虑渗透压力对损伤区的影响是十分必要的。

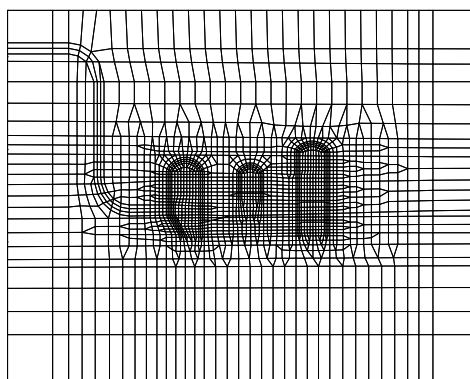


图 1 有限元网格
Fig.1 Mesh of FEM

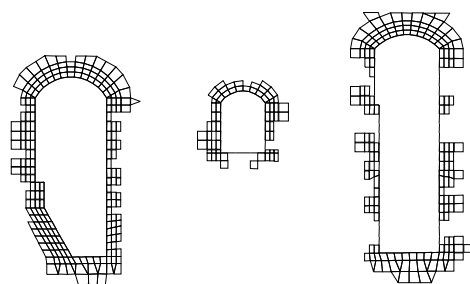


图 2 考虑渗透压力的损伤区面积
Fig.2 The area of damage considering the seepage pressure

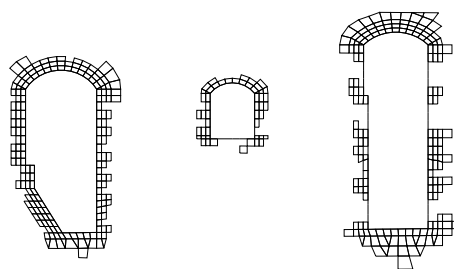


图 3 不考虑渗透压力的损伤区面积
Fig.3 The area of damage without considering the seepage pressure

6 结 论

(1) 基于 Betti 能量互易定理从理论上推导了含水裂隙岩体的初始等效损伤柔度张量。考虑裂纹扩展过程中能量转化,建立了应力场与渗流场共同作用下的裂隙岩体损伤演化方程。

(2) 引入渗透压力附加柔度张量的概念,从力学的角度量化表征了渗透压力对岩体力学特性的影响,并指出渗透压力对应力场的贡献不仅体现在有限元计算中的等效结点上,也体现在对裂隙岩体刚度矩阵的削弱上。

(3) 根据不可逆热力学第二定律,建立了考虑渗透压力的初始损伤和损伤演化状态下的脆弹性断裂损伤本构关系。

(4) 通过工程算例表明:当岩体中有地下水活动时,有必要考虑渗透压力对损伤区的影响。

参 考 文 献

- [1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [2] J. 勒迈特. 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] Ashby M F, Hallam S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compression stress states [J]. *Acta Metall*, 1986, 34 (3): 497—510.
- [4] Germanovich L N, Dyskin A V. A model of brittle failure for material with cracks in uniaxial loading [J]. *Mechanics of Solid*, 1988, 23(2): 111—124.
- [5] 张强勇, 朱维申, 陈卫忠. 三峡船闸高边坡开挖卸荷弹塑性损伤分析[J]. 水利学报, 1998, 20(8): 19—22.
- [6] 郑少河. 裂隙岩体渗流场—损伤场耦合理论及工程应用 [学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [7] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.