

裂隙岩体弹塑性损伤-断裂力学分析

李 磊, 张 勤, 陈志坚, 孙英学

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:根据自洽理论和 Betti 能量互易定理, 结合岩体裂隙在受力情况下进一步扩展的假定, 从断裂力学观点出发, 建立了考虑裂隙演化的岩体弹塑性本构模型. 计算结果表明本模型能够描述裂隙岩体的主要力学性质, 并与有关试验结果吻合.

关键词:裂隙岩体; 损伤断裂; 损伤演化; 柔度张量

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)07-0043-02

岩体内部通常含有大量裂隙, 这些裂隙在岩体内部按一定规律分布, 它们的存在导致岩体力学性质产生了显著弱化和强烈各向异性. 采用弹塑性力学中的均质、各向同性和连续介质的模型已不能满足实际需要^[1]. 对于岩体中分布的大量的结构面, 如断层、长大裂隙、软弱夹层等, 目前可用节理单元和离散单元法来模拟它们的力学特性. 然而如何考虑岩体中大量分布的Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级断续节理构造对岩体力学性质的影响仍是目前岩土工程界面临的主要难题之一. 近年来得到迅速发展的损伤力学和断裂力学理论为裂隙岩体的研究提供了新的思路, 它不再把岩体看成均质的连续体, 而是将其视为有许多缺陷和裂纹的复合结构体, 使建立的计算模型更接近岩体的实际状态, 从而能够更好地模拟岩体的变形破坏特征. 本文从微观和宏观两方面出发, 首先采用损伤力学中考虑微裂纹作用的自洽理论, 从微观机制入手, 建立能够反映裂隙对岩体弱化作用的损伤张量, 然后根据断裂力学的观点, 考虑岩体宏观裂隙的进一步扩展及其扩展条件, 结合上述两方面结果, 建立了裂隙岩体弹塑性损伤-断裂演化本构方程.

1 自洽理论

自洽理论源于对脆性材料裂纹分析, Budiansky 和 O'Connell 考虑了裂纹之间的弱相互作用对有效模量的影响, 使得自洽方法的计算精度有了较大的提高^[2]. 由于其形式也比较简单, 因而受到众多研究者的欢迎.

首先考虑无穷大各向同性介质中一个孤立的裂纹: 裂纹的平均统计半径为 a , 法向单位矢量为 $\mathbf{n}$,

假设裂纹受到均匀的远场应力作用, 由于该裂纹的存在使得系统产生的附加应变能为

$$\Phi_c = \frac{a^3}{E_0} [\sigma^2 f(\nu) + \tau^2 g(\nu, \beta)] \quad (1)$$

式中: E_0 和 ν 为各向同性基体的杨氏模量和泊松比; σ 和 τ 是微裂纹受到的正应力和剪应力; β 是 τ 的方向与微裂纹的特征方向间的夹角, $f(\nu)$ 和 $g(\nu, \beta)$ 是取决于微裂纹的形状、 ν 以及 β 的函数. 对于钱币状裂纹由文献[2]可得

$$G_1 = f(\nu) = \frac{8}{3}(1 - \nu^2),$$

$$G_2 = g(\nu, \beta) = \frac{16(1 - \nu^2)}{3(2 - \nu)} \quad (2)$$

若假设单位体积岩体内含有 N 组具有统计规律的裂隙, 其中任意第 K 组裂隙法向单位矢量是 $\mathbf{n}^{(k)}$, 平均体积密度是 $\rho^{(k)}$, 平均统计半径是 $a^{(k)}$, 完整岩块的弹性模量和泊松比分别为 E_0 和 ν , 同时为了考虑岩体裂隙受压剪应力的作用, 引入传压、传剪系数 C_V 和 C_S ^[3] 对式(1)进行修正, 可得由于多组裂隙的存在使得岩体具有的附加应变能 Φ_c

$$\Phi_c = \frac{1}{E_0} \sum_{k=1}^N \{ a^{(k)^3} \rho^{(k)} [G_1 (1 - C_V^{(k)})^2 \sigma^{(k)^2} + G_2 (1 - C_S^{(k)})^2 \tau^{(k)^2}] \} \quad (3)$$

由 Betti 能量互易定理可知:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_c \quad (4)$$

其中 Φ 为岩体总的应变能, Φ_0 为完整岩块的应变能. 将 Φ 对应力张量求导可得

$$\sigma_{opkl}^d = \frac{1}{E_0} \sum_{i=1}^N [\rho_V^{(k)} a^{(k)^3}] [2G_1 (1 - C_V^{(k)})^2 n_0^{(k)} n_p^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)} +$$

$$+ \frac{1}{2} G_2 (1 - C_s^{(k)})^2 (\delta_{kp} n_o^{(k)} n_l^{(k)} + \delta_{ko} n_p^{(k)} n_l^{(k)} + \delta_{lo} n_p^{(k)} n_k^{(k)} + \delta_{lp} n_o^{(k)} n_k^{(k)} - 4 n_o^{(k)} n_p^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)})] + C_{qpk}^e \quad (5)$$

其中 C_{qpk}^e 为岩块的弹性柔度张量, 式(5)即为根据自治理论推导的裂隙岩体等效弹性-初始损伤柔度张量 C^{e-d} 。

2 岩体的损伤-断裂演化方程

岩体在荷载作用下, 其中的裂隙有可能产生闭合、拉裂、扩展、相互交汇等一系列复杂的变化。为了模拟岩体裂隙的进一步演化, 文献[4]作了以下假定: ①裂隙之间的岩桥是裂隙扩展的薄弱环节, 因此裂隙扩展将沿着岩桥方向延伸扩展, 即裂隙沿着自身平面方向扩展; ②裂隙扩展分两个阶段进行, 即稳定扩展和失稳扩展; ③在裂隙稳定扩展阶段, 裂隙扩展阻力随裂隙扩展而增大, 这种关系可用幂函数关系来表示: $R' = R \left(\frac{a'}{a} \right)^n$, 其中 n 为裂隙扩展阻力增长指数, R 为裂隙临界扩展阻力, a' 和 R' 分别对应于裂隙扩展后的长度和其相应的扩展阻力。根据 Atkinson 和 Rawlings 的研究, 可以近似地确定 $n = 3/2$ 。依据上述假定, 文献[5]推导了钱币状三维裂隙在荷载作用下沿自身平面方向扩展的长度和扩展条件:

$$a' = \frac{a}{a^{n-1}} \left\{ \frac{4(1-\nu)^2}{\pi E_0 R} [\sigma' 2H(\sigma') + 1 - C_s H(\sigma')^2 \tau'^2] \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (6)$$

$$d[\sigma' 2H(\sigma') + \frac{2}{2-\nu} (1 - C_s H(\sigma')^2 \tau'^2)] > 0 \quad (7)$$

$H(X)$ 满足如下关系:

$$H(X) = \begin{cases} 1 & (X > 0) \\ 0 & (X < 0) \end{cases}$$

将裂隙的扩展长度 a' 代入式(5)并根据式(7)判断裂隙是否继续扩展, 即可得到岩体损伤演化的等效柔度张量。

3 裂隙岩体损伤有限元的计算方法

3.1 有效应力的计算

根据 Lemaitre 的假设, 只要把受损材料的 Cauchy 应力转换成有效应力即可采用无损材料的本构关系。由文献[6]可以得到三维应力状态下反映岩体各向异性受损程度的损伤张量

$$\omega_{ykl} = I_{ykl} - E_{yop}^{-d} C_{qpk}^e \quad (8)$$

通过式(8)即可把 Cauchy 应力转换成有效应力。

3.2 有限元的支配方程

损伤岩体的有限元离散方程可表示为

$$KU = F + F^* \quad (9)$$

$$\text{式中: } K = \int B^T D B dV; F = \int N^T p ds + \int N^T f dV; F^* = \int B^T \psi dV; \psi = \sigma - \sigma^*.$$

由式(9)可见, 刚度矩阵 K 与无损材料相同, 裂隙的损伤力学效应仅由“附加节点力” F^* 来表示。

3.3 有限元的分析步骤

a. 首先采用常规有限元方法对岩体施加第一级荷载, 获得无损伤状态下的应力、应变以及弹性区与塑性区的范围, 此时的表观应力为 σ 。

b. 采用式(8)计算有效应力 σ^* , 然后计算附加节点力 F^* 。

c. 把得到的附加节点力代入式(9)重新计算考虑损伤岩体的应力、应变以及弹性区与塑性区的范围。

d. 把考虑损伤效应的应力、传压、传剪系数代入式(6)计算本级荷载作用下裂隙的扩展长度, 并作为下一级荷载作用下的初始损伤状态。

e. 施加下一级荷载, 重复 a~d 步, 直到施加完最后一级荷载。

4 有限元计算结果与试验结果的对比

采用本文模型及计算方法与文献[7]提供的石膏模型试验结果进行了对比, 使用本文模型的计算结果与试验结果比较一致。图1给出了当裂隙倾角等于 45° , 在围压 $q = 5 \text{ MPa}$, 10 MPa 作用下, 试验和计算得到的轴向应力-应变曲线。理论曲线和计算曲线吻合较好, 充分说明本计算模型的可靠性。

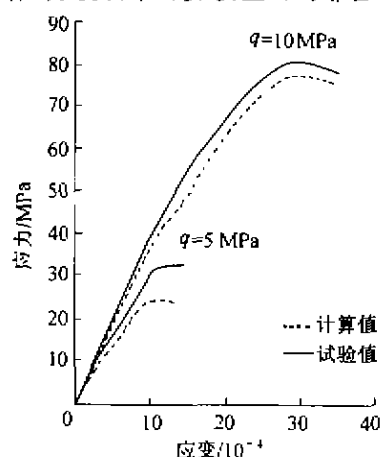


图1 试样的轴向应力-应变曲线

5 结论

综上所述, 应用损伤力学和断裂力学的方法, 能够较好地模拟具有各向异性和非连续性特征的裂隙岩体的力学行为。(下转第70页)

V类为主。

竖井段围岩与上平段相同,为IV、V类岩体。岩层以 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 角倾向下游,对井壁、特别是上游壁的围岩稳定很不利。

下平段隧洞位于地下水位线以下,主要为硅质泥岩、白云质泥岩、硅质岩和辉绿岩,岩体为弱、微风化,洞轴线与岩层走向夹角大于 60° ,为III、IV类围岩。

据地下水注槽内的ZK236号、263号和234号孔揭示,在110 m高程附近遇到洞穴或构造带(F_{28-1})时,孔内的水位突然下降,并稳定在121~125 m高程处,表明该部位可能存在一条由洞穴和 F_{28-1} 构成的与河水连通的导水通道,隧洞经过该部位时有可能发生涌水等,对隧洞围岩的稳定和施工的安全都有很大的影响。

2.3 厂房洞及主变尾闸洞

厂房洞、主变尾闸洞(升压配电站与尾闸室合用一洞,简称主变尾闸洞)是本工程最大的洞室。两洞分别为 $147\text{ m} \times 20.7\text{ m} \times 49\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)和 $124.7\text{ m} \times 19.2\text{ m} \times 24.5\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),轴线方向为 $N62^{\circ}W$ 。

两洞室均布置在 β_{14}^{-1} 辉绿岩内,围岩类别为II、III类,以III类为主,其 Q 值的变化范围为5.2~16.2。

厂房洞、主变尾闸洞的主要工程地质问题如下:

a. F_{28-1} 断层和辉绿岩挠曲轴部节理裂隙发育带,该带位于安装间端头,距主机间只有20 m左右,断层 F_{28-1} 距安装间端墙最近距离(高程130 m)为20 m,该带透水率较大($q=5 \sim 46\text{ Lu}$),对安装间围岩稳定不利。

b. 辉绿岩上游地下水注槽、地下水注槽中的中等透水带距厂房上游边墙最近距离25~30 m,在河水倒灌的情况下,可能对厂房洞上游边墙造成较大

渗透压力,对厂房洞稳定不利。

c. 块体稳定问题,根据PD206号平硐节理裂隙统计、野外结构面抗剪试验成果及国内外已建地下工程坍方实例的分析,四组节理裂隙互相交切,在厂房洞和主变尾闸洞的拱顶、边墙均存在一些不稳定的小三角块体和楔形块体,局部也有可能出现较大的失稳块体。

d. 主变尾闸洞拱顶上覆有效岩体厚度、厂房洞和主变尾闸洞之间的岩体厚度偏薄,要注意施工爆破对岩体的扰动和加强变形监测。

3 尾水洞、渠

尾水支洞共四条,尾水支洞与其它洞室交叉口多,洞室间岩柱单薄,这些地方更易造成块体失稳,需加强支护。

尾水明渠段出露的岩性有辉绿岩接触蚀变带、 D_3I^4 硅质岩、 D_3I^5 硅质泥岩夹铁锰质泥岩、 D_3I^6 泥质灰岩和 D_3I^7 泥岩,除 D_3I^6 泥质灰岩为弱风化外,其余均为全强风化,坡高30~90 m,边坡稳定性差。

4 结 语

电站区地层软硬岩相间,经受多次构造运动,层间挤压强烈,节理和断层发育。辉绿岩完整性差,沉积岩风化较深,整个地下厂房系统的围岩稳定性较差,相对而言,辉绿岩体的围岩稳定性较沉积岩好。厂房洞和主变洞位于辉绿岩内,围岩属II~III类围岩, $Q=5.3 \sim 16.2$,属基本稳定~稳定性差,沉积岩洞段大部分属IV~V类围岩,地质条件虽然较差,但经适当处理,还是能满足修建地下厂房的要求。

(收稿日期:2001-07-02 编辑:张志琴)

(上接第44页)本文的理论出发点实际上是采用非连续介质的观点,更接近岩体的实际状况,所以具有较强实用性,同时充分考虑了目前有限元在岩体工程中的广泛应用,故采用有效应力来进行数值计算,使得以前用来计算连续介质的刚度矩阵仍能够不作修改的情况下继续使用,可以最大限度地使用原有的有限元程序。

此外,还有几个问题值得进一步探讨:①岩体中裂隙的实际形状比较复杂,本文采用了简化的钱币状裂隙来代替复杂多样的实际裂隙;②自治理论主要从微裂纹入手,并假定周围的基体为各向同性,而岩体中裂隙周围的基体一般都是各向异性的;③本文假定裂隙沿自身平面方向扩展,但在实际情况中,裂隙有可能产生翼型的扩展模式;④由于试验条件和时间因素的限制,试样的尺寸和数量都不可能太

大,所以试验中存在一定的尺寸效应。

参考文献:

- [1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
- [2] Budiansky B, O'Connell R J. Elastic moduli of a cracked solids [J]. Int Solids Struct, 1976, 12(1): 81~95.
- [3] 朱维申, 何清潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] Segall P. Formation and growth of extensional fracture sets[R]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95, 154.
- [5] 李新平, 朱瑞庚, 朱维申. 裂隙岩体的损伤断裂理论与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995(3): 240~241.
- [6] 沈为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- [7] 周维垣, 杨延毅. 节理岩体的损伤断裂力学模型及其在坝基稳定分析中的应用[J]. 水利学报, 1990(11): 53~54.

(收稿日期:2001-08-10 编辑:熊水斌)