



裂隙岩体弹塑性-损伤本构模型

孙卫军 周维垣

(清华大学水利系 100084)

提 要

岩体中通常含有大量断续状裂隙, 它们对岩体结构的变形和稳定性有着不可忽视的影响, 本文应用损伤力学原理, 建立了这种岩体的弹塑性-损伤本构模型, 室内试验和地下厂房实测验证说明, 该本构模型是合理有效的。

一、前 言

工程上遇到的岩体, 通常都具有诸如节理、层理、断层等结构面, 这些结构面给建立岩体力学数值模型带来了较大的困难, 经过前人的不懈努力, 目前一些问题已经有了一些解决的方法, 例如, 对于宽度较大的断层带, 可用弹塑性理论处理; 对于较薄的断层等软弱夹层, 可以使用节理单元模拟⁽¹⁾; 对于层理发育的层状岩体, 工程上则常用层状材料模型, 但是, 对于被大量相对结构尺寸为小量(如几米方圆)断续节理裂隙切割的岩体, 却还研究的很不够, 对于这种裂隙岩体, 我们既不能用节理单元逐一模拟众多的裂隙, 又不宜将裂隙近似为连续的层面, 按层状材料处理, 更不宜无视裂隙的存在, 将岩体近似为各向同性完整岩体处理, 因此, 这种岩体的本构关系研究是比较困难的, 工程上一直缺乏有效而又实用的力学模型。

本文作者引用损伤力学原理研究建立这种裂隙岩体的本构模型, 在损伤力学中, 岩体中的裂隙被看作损伤, 引用损伤变量来考虑裂隙的力学影响, 运用连续介质力学原理建立起裂隙岩体的本构模型, 这种方法的显著优点是: 首先, 它不具体考虑个别裂隙的力学行为, 而只追求其宏观的力学效应, 这就避免了如断裂力学等在研究中所遇到的困难, 同时也能在宏观上给问题一个较好的解答; 其次, 借助张量性质的损伤变量, 对含多组断续裂隙的岩体, 都可以写出其本构关系, 这是其他方法所不易办到的。

本文首先讨论一下损伤力学的一些基本概念和原理, 然后探讨损伤力学引入岩体力学研究的一些基本问题, 进而建立起裂隙岩体的本构模型. 为描述变形过程中裂隙不断开展, 岩体力学性质不断劣化的过程, 还将讨论岩体损伤演化问题. 最后利用实验室试验及实测资料对所建立的本构模型进行一些验证工作.

二、基本概念

1. 损伤变量和有效应力

设有简单的拉伸杆, 其表观截面积为 A . 由于存在初始孔隙, 横截面上孔隙的总面积为 A_w . $D = A_w/A$ 定义损伤因子. 由于横截面上存在孔隙, 实际有效承载面积是 $A_{e,t}$, $A_{e,t} + A_w = A$. 于是作用于杆件未损材料上的应力是 $P/A_{e,t}$. P 是杆件承受的总拉力. 这个应力就定义为有效应力, 记为 σ^* , 即 $\sigma^* = P/A_{e,t}$.

若记横截面上的表观应力为 σ , 则 $\sigma = P/A$. 由损伤变量定义可得:

$$\sigma^* = \sigma / (1 - D)$$

在三维情况下的损伤变量定义为: 一个代表性体积元素的某斜截面内, 损伤的总面积与该截面面积的比值^[4]. 由于孔隙在空间分布上往往带有一定的方向性, 此比值一般与截面方位有关, 这时需选用张量作为损伤变量, 以便同时记录截面的损伤率和方向. 实用中以二阶张量居多.

三维情况下的有效应力, 不同的研究者使用了不同的形式. 本文以方便使用的角度出发将采用下式^[3]:

$$\sigma^* = \frac{1}{2} (\sigma \cdot \underline{\psi} + \underline{\psi} \cdot \sigma) \quad (1)$$

其中

$$\underline{\psi} = (1 - D)^{-1}$$

2. 应变等价性假说和本构关系的建立

考虑两个横截面积都是 A 的拉伸杆. 杆 I 无损伤, 杆 II 有损伤率 D (参见图 1).

在拉力 P 的作用下, 杆 I 的应变按虎克定律为:

$$\varepsilon_I = \frac{P/A}{E} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{P/A_{ef}}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} = \frac{\sigma^*}{E}$$

以上式中, E 为材料弹性模量. J. Lemaitre^[4] 提出了应变等价性假说 (也称损伤力学的基本假说):

假定损伤对应变行为的影响只通过有效应力来体现. 也就是说, 损伤材料的本构关系只需要把原始 (无损伤) 材料的本构关系中的应力改为有效应力即可.

3. 损伤演化规律

损伤力学用场变量-损伤变量描述介质的损伤条件, 故需要进一步考虑一个场方程来描述损伤变量随变形过程发生、发展的演化律. 这个方程称作损伤演化方程.

损伤演化方程通常写作增量形式. 一般地, 损伤变量的增量 dD 与即时应变状态、损伤

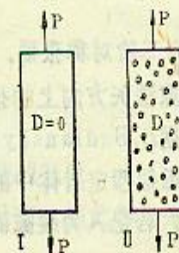


图1 损伤及无损伤杆的拉伸
Fig.1 Damaged and intact bar under tension

状态以及应变增量有关。即

$$d\underline{D} = \underline{F}(\underline{\varepsilon}, D, d\underline{\varepsilon}) \quad (2)$$

目前,关于损伤演化方程的研究进行的比较少。对三维问题,比较适用的还属经验性方程。

三、裂隙岩体损伤张量定义

岩体中的裂隙一般成组发育,在空间分布上多具有一定的方向性。故可以近似将它们划分为若干组。我们首先讨论岩体含一组裂隙的情况,对于含多组裂隙的情况,可以进一步用迭加方法得到其损伤张量。

岩体裂隙的许多几何参量,比如裂隙的分布间距、裂隙面特征几何尺寸(如圆盘直径)等等,都呈随机分布。根据统计规律,一般都可写出其随机分布函数^[5,6]。但为方便以下讨论,我们先将裂隙的各几何参量都理解为概率统计意义上的平均量,据此导出裂隙岩体损伤张量的定义式。

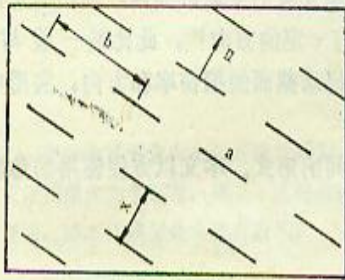


图2 一组裂隙的基本几何参量

Fig.2 Geometric parameters for joints

对于一组裂隙来说,它的空间几何参量主要有(参见图2):裂隙面面积 a 、裂隙层距 x 、裂隙中心距 b ,以及裂隙的单位法向矢量 n 。我们称这些几何参量为一组裂隙的基本几何量,并认为这些基本几何参量决定着—组裂隙对岩体力学性质的影响程度,或者叫损伤程度。因此,岩体的损伤张量应是这些基本几何参量的函数。于是我们建议如下裂隙岩体损伤张量定义式:

$$\underline{D} = D \cdot \underline{n} \underline{n} \quad (3)$$

$$D = 1 - \exp\left(-\frac{a}{bx}\right) \quad (4)$$

\underline{D} 是一个二阶对称张量。 D 是最大损伤率。因为它是矢量 $\underline{D} \cdot \underline{n}$ 的模,也就是最大损伤方向—该组裂隙法矢方向上的损伤率。

根据B. Budiansky等人的研究^[7],裂隙的平面形状对岩体力学性质的影响是一次要量。因此,近似假定岩体中的裂隙都是等直径的平面圆盘。另外,对于层状均匀、中心距均匀的裂隙体,若记入为裂隙面面密度,则有:

$$\lambda = 1/bx \quad (5)$$

于是(4)式可改写为

$$D = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \lambda d^2\right) \quad (6)$$

式中, d 是裂隙面直径。(3)、(6)式就是一组裂隙情况,岩体损伤张量的实用定义式。

如果岩体内含多组裂隙,它们可以用迭加方法求其损伤张量:

$$\underline{D} = \sum_{i=1}^m D_i \underline{n}_i \underline{n}_i \quad (7)$$

$$D_i = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \lambda_i d_i^2\right) \quad (8)$$

式中具有下标 i 的量, 为第 i 组裂隙相应量, m 为总裂隙组数。

四、裂隙岩体损伤张量的概率统计算法

1. 裂隙法向矢量

建立如图3所示的直角坐标系, 记Y轴与裂隙走向线的夹角 (从Y轴逆时针转) 为 α_1 , 裂隙面法向矢量 \underline{n} 与Z轴夹角 (从Z轴转到 \underline{n} 的正向) 为 α_2 , 则 \underline{n} 可以用 α_1 、 α_2 表示为:

$$\begin{aligned} \underline{n} &= (n_x, n_y, n_z) \\ &= (\cos\alpha_1 \sin\alpha_2, \sin\alpha_1 \sin\alpha_2, \cos\alpha_2) \end{aligned} \quad (9)$$

根据地质上对产状的一般表示方法, α_1 、 α_2 与走向角 β_1 、倾角 β_2 有如下关系:

$$\begin{aligned} N\beta_1 E \begin{cases} SE\beta_2: \alpha_1 = 180^\circ - \beta_1, \alpha_2 = 180^\circ - \beta_2 \\ NW\beta_2: \alpha_1 = 180^\circ - \beta_1, \alpha_2 = \beta_2 \end{cases} & \text{Fig. 3 The relation of normal vectors of} \\ N\beta_1 W \begin{cases} SW\beta_2: \alpha_1 = \beta_1, \alpha_2 = 180^\circ - \beta_2 \\ NE\beta_2: \alpha_1 = \beta_1, \alpha_2 = \beta_2 \end{cases} & \text{joints with their formations} \end{aligned} \quad (10)$$

如果已经测得了一组裂隙的平均走向角 β_1 和倾角 β_2 , 由(9)、(10)式即可得其平均法向矢量。

2. 裂隙出露轨迹平均长度

在探洞的洞壁上, 可看到一条条裂隙出露轨迹线。简称裂隙迹线。近似取 d 等于裂隙迹线平均长度 \bar{l} 。

探洞观测面一个狭长矩形, S.D.Priest和J.A.Hudson⁽⁵⁾借助概率统计理论, 导出了适用这种情况的迹线平均长度推求方法。该法引用了以下概念:

- 测线: 任意布置在观测面上一条长度一定的直线;
- 删节线: 一条与测线平行且同等长度的直线;
- 半迹线: 从迹线与测线的交点到迹线一端点间这段迹线;
- 删节长度: 迹线同时与测线和删节线相交时, 两交点间这段迹线长度。

S.D.Priest 等人的研究认为, 岩体裂隙迹线长多服从负指数分布。据此得具体方法如下:

首先在岩壁上布置上测线和删节线。然后统计与测线交切的迹线总条数 n , 和仅与测线交切而不与删节线交切的迹线条数 r 。进而即可按下式估算出平均迹线长度 \bar{l} 。

$$\bar{l} = \frac{C}{-\ln\left(1 - \frac{r}{n}\right)}$$

式中, C 为删节长度。

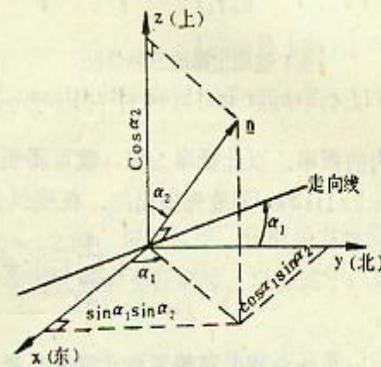


图3 裂隙法向量与产状关系

Fig. 3 The relation of normal vectors of joints with their formations

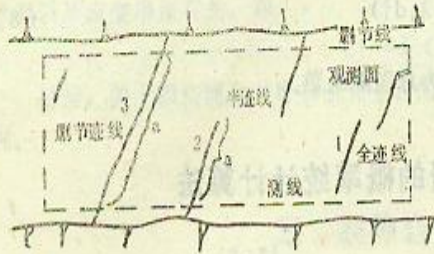


图4 迹线出露的三种情况

Fig.4 Traces in three situations

3. 裂隙面密度

裂隙面密度就是观测面单位面积上, 裂隙迹线中心点的数量。在探洞洞壁这样一个狭长的观测面上, 裂隙迹线一般有三种出露情况 (参见图4): 全迹线、半迹线和删节迹线。后两种迹线的中心点不一定在观测面内。所以裂隙面密度一般不等于观测到的裂隙条数除以观测面面积。不过, 我们可以根据迹线在观测面内的出露长度 a 、计算出它的中心点位于观测面内的概率, 以此概率为权, 就可得裂隙面密度的计算公式。这是由 T.H.Wu 和 P.H.S. W.Kukulilake(6) 最先提出的。在迹线长度服从负指数分布时, 若记入为裂隙面密度, 则:

$$\lambda = \frac{k + \sum_{i=1}^m [P_i(w)]_i + \sum_{i=1}^n [P_e(w)]_i}{A} \quad (12)$$

其中, k, m, n 分别是观测面内全迹线、半迹线和删节迹线的出露条数; A 是观测面面积; 而 $P_1(w)$ 、 $P_0(w)$ 分别是半迹线、删节迹线中心位于观测面内的概率:

$$P_1(w) = 1 - e^{-\mu a} \quad (13)$$

$$P_0(w) = \mu e^{\mu a} \int_{2a}^{\infty} \frac{a}{1-a} e^{-\mu l} dl + 1 - e^{-\mu a} \quad (14)$$

式中, $\mu = 1/\bar{l}$; a 的意义见图4。

五、裂隙岩体的有效应力

(1) 式定义的有效应力最初是用来分析拉应力场中金属的幅变损伤问题的(3)。它假定损伤不传力, 然而在岩体力学中, 往往要分析压应力场问题, 这时必须考虑裂隙能够传递部分压应力和剪应力的情况。故(1)式定义的有效应力不能直接引用于岩体力学。为此本文建议如下修正式:

$$\underline{\sigma}^* = \frac{1}{2} (\underline{\sigma} \cdot \underline{\psi} + \underline{\psi} \cdot \underline{\sigma}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^* & \sigma_{12}^* & \sigma_{13}^* \\ & \sigma_{22}^* & \sigma_{23}^* \\ \text{对称} & & \sigma_{33}^* \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\sigma_{11}^* = \sigma_{11} V_{11} + \sigma_{12} S_{12} + \sigma_{13} S_{13}$$

$$\sigma_{22}^* = \sigma_{22} V_{22} + \sigma_{12} S_{12} + \sigma_{23} S_{23}$$

$$\sigma_{33}^* = \sigma_{33} V_{33} + \sigma_{23} S_{23} + \sigma_{13} S_{13}$$

$$\sigma_{12}^* = \frac{1}{2} [\sigma_{12} (T_{11} + T_{22}) + (\sigma_{11} + \sigma_{22}) S_{12} + \sigma_{23} S_{13} + \sigma_{13} S_{23}]$$

$$\sigma_{23}^* = \frac{1}{2} [\sigma_{23} (T_{22} + T_{33}) + (\sigma_{22} + \sigma_{33}) S_{23} + \sigma_{12} S_{13} + \sigma_{13} S_{12}]$$

$$\sigma_{13}^* = \frac{1}{2} [\sigma_{13} (T_{11} + T_{33}) + (\sigma_{11} + \sigma_{33}) S_{13} + \sigma_{12} S_{23} + \sigma_{23} S_{12}]$$

其中, V_{ij} 、 T_{ij} 和 S_{ij} 是修正损伤效果因子:

$$V_{ij} = \begin{cases} \psi_{ij} & , \sigma_{ij} < 0 \\ \psi_{ij}(1-C_v) & , \sigma_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (ij=11, 22, 33) \quad (17)$$

$$T_{ij} = \begin{cases} \psi_{ij} & , I_1 < 0 \\ \psi_{ij}(1-C_s) & , I_1 \geq 0 \end{cases} \quad (ij=11, 22, 33) \quad (18)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} \psi_{ij} & I_1 < 0 \\ (1-C_s)\psi_{ij} & I_1 \geq 0 \text{ 且 } |\psi_{ij}| \leq 1 \\ \frac{\psi_{ij}}{|\psi_{ij}|} (|\psi_{ij}|^{(1-C_s)-C_s}) & I_1 \geq 0 \text{ 且 } |\psi_{ij}| > 0, I_1 \geq 0 \text{ 且 } |\psi_{ij}| > 1 \end{cases} \quad (ij=12, 23, 13) \quad (19)$$

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$$

而 C_v 、 C_s 分别是裂隙的传压、传剪系数。取值在0~1之间。裂隙传压、传剪能力越强, C_v 、 C_s 值越大。从而可描述强度较高的新鲜裂隙, 或强度较低的夹泥裂隙。以上式中, 以压应力为正, 拉为负。

裂隙传压、传剪系数 C_v 、 C_s 应该与裂隙的力学性质和它所处的应力状态有关。本文给 C_v 、 C_s 一个近似的关系统式, 以近似反映 C_v 、 C_s 的这种特性:

$$C_v = \frac{K_n/E}{a + K_n/E} \quad (20)$$

$$C_s = \frac{K_s/G}{b + K_s/G} \quad (21)$$

式中, k_v 、 k_s 为裂隙的法向刚度和切向刚度; E 、 G 为岩石的弹性模量和剪切模量; a 、 b 为材料常数。

裂隙的法向和切向刚度与裂隙面的应力状态有关。在小变形问题中, 我们近似取:

$$K_{n_{ij}} = \begin{cases} 0 & , \sigma_{ij} < 0 \\ (k_{n_0} + \frac{\sigma_{ij}}{V_m})/k_{n_0} & , \sigma_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (ij=11, 22, 33) \quad (21)$$

$$k_s = \begin{cases} 0 & , I_1 < 0 \\ F(S + \sigma_n)^n & , I_1 \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中 V_m 、 F 、 S 、 n 都是试验常数, 可由现场岩体裂隙面的压缩和剪切试验确定^[1]。其他符号意义同前。应力以压为正。 $k_{n_{11}}$ 、 k_{n_0} 分别相应于 k_n 的分量和初始量, 由(20)式求得 C_v 及(17)式的 V_{ij} 。

以上这套修正式对压应力场中有效应力的修正, 是根据每一个损伤效果因子 ψ_{ij} 的具体作用所做的针对性修正, 并考虑了裂隙的传压、传剪能力与裂隙的力学性质及它所处的应力状态有关的特性。可适用于拉压应力场, 以及张开、闭合或夹泥裂隙。

六、损伤演化方程

在岩体损伤力学中, 损伤演化方程用来描述岩体内部裂隙在外载作用下不断开展, 使岩体力学性质逐渐劣化的过程和规律。由于损伤力学引入岩体力学的时间不长, 更由于岩石类

脆硬性材料的实验研究难度较高,至今,这个问题的研究工作做得还很不夠。已有的损伤演化方程都存在较大不足^[8]。本文建议如下经验性损伤演化方程:

$$dD = \sum_{i=1}^3 A \frac{\exp(1 - |\underline{D} \cdot \underline{V}_i|) - 1}{c-1} \eta(d\varepsilon_i^p) d\varepsilon_i^p \underline{V}_i \cdot \underline{V}_i \quad (23)$$

$$\eta(d\varepsilon_i^p) = \begin{cases} 1 & d\varepsilon_i^p > 0 \\ 0 & d\varepsilon_i^p \leq 0 \end{cases}$$

式中, $d\varepsilon_i^p$ 是塑性应变增量 $d\varepsilon^p$ 的第 i 个主应变 (拉伸为正), \underline{V}_i 是其方向矢量, A 是材料常数, 可以通过岩石单轴拉伸试验确定。这个演化方程主要是出于如下两个方面的考虑:

(1) 大量岩石类脆硬性裂隙体的试验都表明, 裂隙的发生与发展, 基本都沿着主拉应变的方向。因此, (23) 式假定了塑性主拉应变增量为损伤的驱动力, 以其方向矢量的并矢来描述裂隙沿塑性主拉应变的垂直面开展的性质;

(2) 文献^[8]根据不可逆热力学原理阐明: 损伤变量 D 越大, 损伤应变能释放率——相伴的热力学广义力的阈值也随之增大, 就象硬化材料的屈服应力随着应变的增加而提高一样。因此对损伤而言, 存在着与应变硬化类似的“强化”现象。所以损伤增量 dD 是随着损伤 D 的增加而递减的。

顺便提及, 从(23)式演化方程可见, 材料的损伤发展与塑性变形有关。这就是说, 随着塑性变形的发展, 材料内部裂隙不断发生、发展, 材料损伤程度随之增大。损伤力学将材料不断演化的损伤状态, 通过损伤张量引入本构关系, 即可体现裂隙的发生与发展, 导致材料弹性模量弱化和产生塑性 (或损伤) 诱导各向异性的力学效应。这两个岩石力学现象若是从弹塑性本构理论直接研究, 则是比较困难的。

七、弹塑性-损伤本构方程

如果已知完整岩体——岩石的弹塑性本构关系:

$$\{\sigma\} = \{Dep\} \{de\}$$

式中, $\{Dep\}$ 是岩石弹性矩阵, $\{\sigma\}$ 、 $\{de\}$ 分别是记成列阵形式的表观应力增量和应变增量。根据 J. Lemaitre 的应变等价性假说, 我们只需将以上本构关系中的应力换成本文建议的裂隙岩体有效应力, 就可得到所求的裂隙岩体弹塑性-损伤本构关系:

$$\{\sigma^*\} = \{Dep\} \{de\} \quad (24)$$

式中, $\{\sigma^*\}$ 是有效应力增量列阵。

从(24)式可以看出, 我们无需估计裂隙岩体的宏观力学性质 (如综合变形模量、抗剪强度等), 而只需要知岩石的力学性质、裂隙的空间分布规律及裂隙面的力学性质, 就能完全确定裂隙岩体的本构关系。这就避免了要直接研究性质复杂多变的裂隙岩体的困难, 大大提高了本构关系的实用性。

裂隙岩体本构关系(24)式在形式上与普通的弹塑性本构关系一样。但由于内容的改变, 实际使用上略有不同。在具体的有限元计算中, 需要作一些计算方法上的处理。根据有限元虚功方程可求得如下关系^[9]:

$$[k] \{dU\} = \{dF\} + \{dF^*\} \quad (25)$$

$$\{dF^*\} = [B]^T (\{d\sigma^*\} - \{d\sigma\}) dv \quad (26)$$

式中, $[k]$ 、 $[B]$ 、 $\{dU\}$ 、 $\{dF\}$ 依次是普通有限元方程中的刚度矩阵、几何矩阵、结点位移列阵和荷载增量列阵。从(25)式可见, 由于损伤的存在, 各向同性非损伤材料的有限元计算式中多了一项附加力 $\{dF^*\}$ 。损伤力学的力学效应就是通过该项体现的。我们管它叫作损伤附加力。

将(25)式进一步分解为:

$$[k]\{dU'\} = \{dF\} \quad (27)$$

$$[k]\{dU''\} = \{dF^*\} \quad (28)$$

$$\{dU\} = \{dU'\} + \{dU''\} \quad (29)$$

于是有裂隙岩体弹塑性-损伤本构关系(24)式的有限元计算方法如下: 对一级荷载增量 $\{dF\}$,

(1) 用(27)式解出 $\{dU'\}$, 从而得表观应力增量

$$\{d\sigma\} = [Dep][B]\{dU'\};$$

(2) 用(15)式算得有效应力增量 $\{d\sigma^*\}$, 进而由(26)式求出损伤附加力 $\{dF^*\}$;

(3) 由(28)式解出损伤附加位移增量 $\{dU''\}$, 再由(29)式迭加得一级荷载下结构的总体位移增量 $\{dU\}$ 。

本文已根据上述算法编制了弹塑性-损伤三维有限元程序。

八、裂隙试件单轴压缩与验算

为验证本文建议的本构模型在描述裂隙体变形及强度性质方面的有效性, 我们采用脆性模型材料——石膏硅藻土混合料制作了一批裂隙体试件, 进行了单轴压缩试验和相应的弹塑性-损伤有限元计算。对两者结果作对比。

图5是试件的几何参数。其中裂隙为圆盘形, 均匀分布于试件内。试件损伤张量是:

$$\underline{D} = D \underline{n} \underline{n} = 0.325 \begin{pmatrix} \cos^2\theta & 0 & \sin\theta\cos\theta \\ 0 & 0 & 0 \\ \sin\theta\cos\theta & 0 & \sin^2\theta \end{pmatrix}$$

其中, θ 的意义如图5所示。图6是试验与计算的结果对比。从中可以看出, 弹塑性-损伤本构模型的计算结果基本上反映了裂隙体的变形和强度上的各向异性特性。在定量上虽然有一定偏差, 但偏差量还是可以接受的。这种在定性、定量方面存在一致性, 在一定程度上说明了本文建议的本构模型是基本合理有效的。

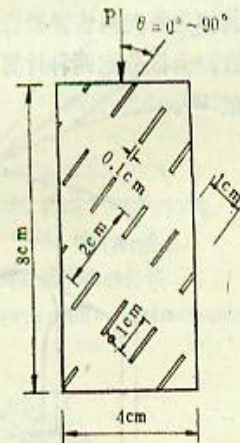


图5 试件的几何参数

Fig.5 Geometric parameters for specimen

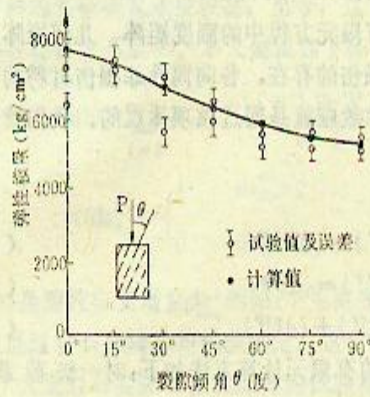


图6a 试件的弹性模量

Fig.6a Elastic modulus for specimen

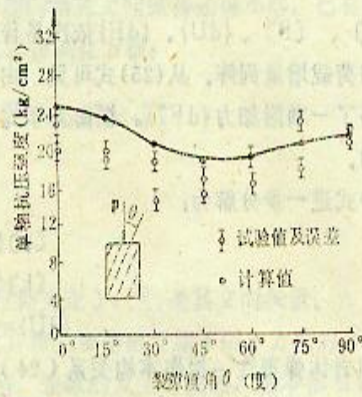


图6b 试件单轴抗压强度

Fig.6b Uniaxial compression strength for specimen

九、大型地下水厂房的实测与验算

本节进行一座水电站大型地下厂房的弹塑性—损伤有限元开挖计算，并与实测变形对比。以此作为对本文建议本构模型的进一步实测验证。为了更好地说明本文模型细致考虑了裂隙岩体的力学性质所产生的效果，还同时做了常规有限元计算。即除不考虑岩体的裂隙，而将其作为各向同性弹性介质处理外，其他如计算边界条件等均与弹塑性—损伤有限元计算一致。为区分这两种计算结果，我们简称前者为损伤分析，后者为常规分析。实测材料引自文献^[10]。

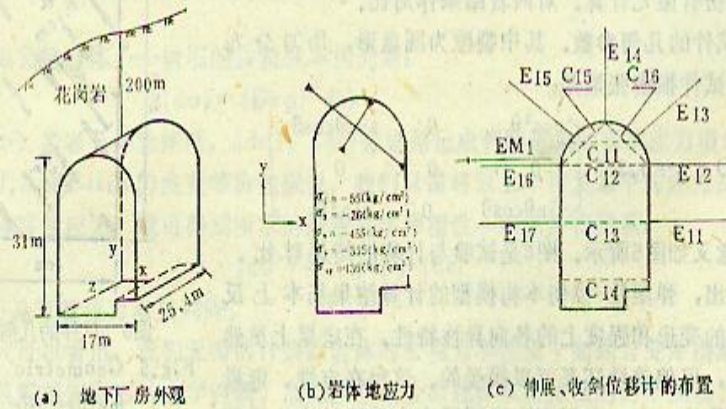


图7 地下厂房

Fig.7 Under ground powerhouse

这座地下厂房开挖在裂隙性花岗岩山体，其大致外观及基本几何尺寸见7a。岩体地应力如图7b。图7c为位移计布置情况。

按损伤力学分析原理，在损伤分析中，岩石参数采用室内试验结果。厂房区花岗岩弹性

模量是 $20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ，泊松比0.25。常规分析则按一般取用岩体综合变形模量的方法，采用岩体变形模量现场试验值： $12 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 。岩体的拟伤张量按文献[10]为：

$$D = \begin{pmatrix} 0.524 & -0.275 & 0.133 \\ & 0.243 & 0.097 \\ \text{对称} & & 0.311 \end{pmatrix}$$

两种有限元计算结果及相应的实测值示于表1和图8至图11。

表1 开挖完后洞室累积位移

Tab. 1 Accumulated deformations after excavations 单位: mm

位移计	两侧洞室相对位移		洞壁上测点位移		
	C18	C12	EM1	E11	E17
测量值	32.0	16.0	14.8	25.0	17.0
损伤分析	30.0	14.0	9.0	17.5	12.5
常规分析	12.0	8.4	3.5	5.0	4.5

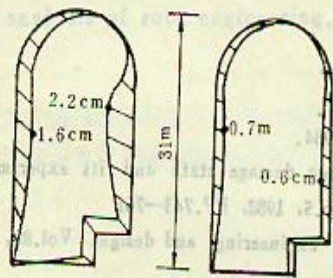


图8 开挖完后洞室变形量

Fig.8 Deformations after excavations

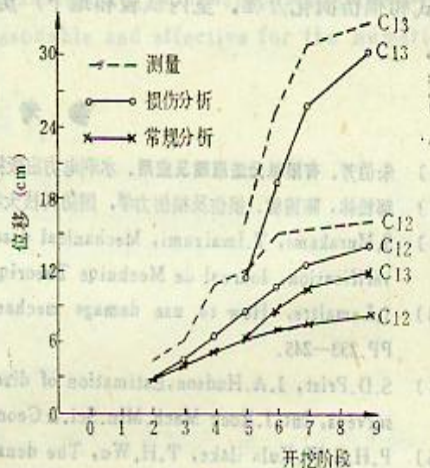


图9 洞室累积收敛位移

Fig.9 Accumulated convergence deformations

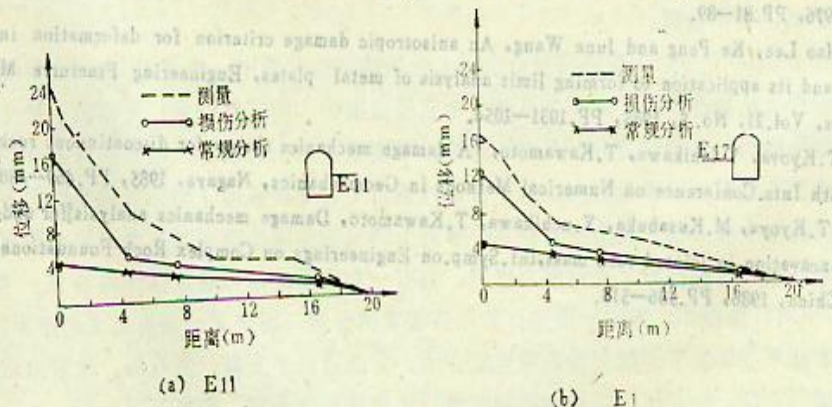


图10 最终开挖阶段岩体位移值

Fig.10 The final deformations for final excavation

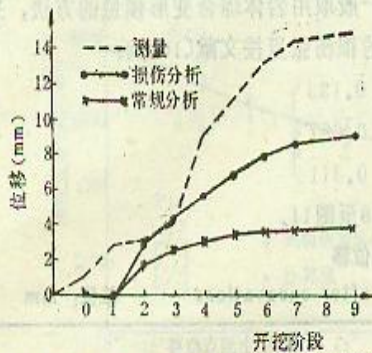


图11 EMI量测的累积位移及相应的的计算值

Fig.11 Accumulative deformations from EMI and computation

性岩体的变形及稳定性有限元数值分析, 损伤力学始于金属蠕变和疲劳破坏研究。作者将它用于岩体本构关系研究时, 提出了考虑裂隙岩体特点的损伤张量定义及算法、有效应力修正式和损伤演化方程。室内试验和地下厂房实测验算说明, 本文的本构模型是基本合理有效的。

从这些结果看, 损伤分析法计算出的变形量要常规分析结果大, 在规律和量值上都更接近实测结果。尽管常规分析中采用了数值较小的岩体变形模量。这说明细致考虑了裂隙岩体力学特性的弹塑性—损伤模型基本上能正确计算出裂隙岩体内大型地下洞室在各开挖阶段的变形状态, 并较常规有限元分析结果有所改进。

十、结 论

本文基于损伤力学原理, 提出了弹塑性—损伤本构模型。可用于含大量断续裂隙的裂隙

参 考 文 献

- (1) 朱伯芳. 有限单元法原理及应用. 水利电力出版社, 1979.
- (2) 郝松林、陈铸曾. 损伤及损伤力学, 国防科技大学学报, No.21, 1984.
- (3) S.Murakami, T.Imaizumi, Mechanical description of creep damage state and its experimental verification, *Journal de Mechniqe Theoriquee*, Vol.1, No.5, 1982, PP.743-761
- (4) J.Lemaitre, How to use damage mechanics, *Nuclear engineering and design*, Vol.80, 1984, PP.233-245.
- (5) S.D.Prist, J.A.Hudson, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, 1981, PP.183-197.
- (6) P.H.S.W. Kulatilake, T.H. Wu, The density of discontinuity trace in sampling window, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, No.6, 1984, PP.345-347.
- (7) B.Budiansky, R.I.O connell, Elastic moduli of a cracked solid, *Int. J. Solids structures*, Vol. 12, 1976, PP.81-89.
- (8) Hao Lee, Ke Peng and June Wang, An anisotropic damage criterion for deformation instability and its application to forming limit analysis of metal plates, *Engineering Fracturre Mechanics*, Vol.21, No. 5, 1985, PP.1031-1054.
- (9) T.Kyoya, Y Ichikawa, T.Kawamoto, A damage mechanics theory for discontinuous rock mass, 5th Ints. Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagaya, 1985, PP.469-480.
- (10) T.Kyoya, M.Kusabuka, Y.uchikawa, T.Kawamoto, Damage mechanics analysis for underground excavation in jointed rock mass, *Int. Symp. on Engineerings on Complex Rock Foundations*, Beijing China, 1986, PP.506-513.



An Elasto-Plastic Damage Mechanics Constitutive Model for jointed Rockmass

Sun Weijun Zhou Weiyuan

(Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract

Rockmasses generally contain a great many of intermittent fissures and joints. They affect the deformation and stability of the rockmass structure considerably. In this paper, an elastoplastic-damage constitutive model for rockmasses is proposed by the authors based on the principle of damage mechanics. The results of laboratory tests and the data of in-situ measurements of underground powerhouse excavations indicate that the model is reasonable and effective for the numerical analysis of rock engineering.