

文章编号:1673-2049(2019)04-0080-07

# 基于能量耗散特征的脆性岩土材料三轴压缩损伤模型

李忠友<sup>1</sup>,姚志华<sup>2</sup>,胡 柏<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军 93055 部队,辽宁 沈阳 110021; 2. 空军工程大学 机场建筑工程系,陕西 西安 710038;  
3. 成都军区房地产管理局工程环境质量监督站,四川 成都 600041)

**摘要:**从材料变形破坏过程中能量耗散特征入手,视脆性岩土材料为仅有损伤耗能的脆弹性部分和仅有塑性流动耗能理想弹塑性部分共同组成,建立了适用于三轴压缩等复杂应力状态的损伤本构模型。对于脆弹性部分,认为体积变形和剪切变形均会引起材料内部结构单元的断裂破坏而产生损伤,但二者损伤耗能机理不同,对材料的力学性能及强度影响也不同,因而从能量耗散的角度出发,分别定义了体积损伤变量和剪切损伤变量,并通过变形过程中的能量守恒原理建立了相应的增量型损伤演化方程,进一步揭示了脆性岩土材料在复杂应力状态下的损伤机理;对于理想弹塑性部分,采用 Mohr-Coulomb 强度准则反映材料屈服强度。以三峡地下电站典型花岗岩为例,采用提出的损伤模型进行了数值计算。结果表明:该模型能够较好预测材料在三轴压缩过程中峰值强度、峰值应变及残余强度随围压的变化规律,反映材料随围压增大逐渐由脆性向塑性转变的特征,具有广泛的工程应用价值。

**关键词:**岩土材料;能量耗散;三轴压缩;损伤;本构模型

**中图分类号:**TU452 **文献标志码:**A

## Triaxial Compression Damage Model of Brittle Geotechnical Materials Based on Energy Dissipation Characteristics

LI Zhong-you<sup>1</sup>, YAO Zhi-hua<sup>2</sup>, HU Bai<sup>3</sup>

(1. 93055 Troops of PLA, Shenyang 110021, Liaoning, China; 2. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 3. Engineering and Environment Quality Supervision Department of Real Estate Administration of Chengdu Military Command, Chengdu 600041, Sichuan, China)

**Abstract:** Starting from the characteristics of energy dissipation in the process of material deformation and failure, the brittle geotechnical material was considered to be a brittle elastic part with only damage energy dissipation and an ideal elastic-plastic part with only plastic flow energy dissipation. A damage constitutive model suitable to complex stress states such as triaxial compression was established. For the brittle elastic part, the research showed that both volume deformation and shear deformation could cause fracture damage of structural elements in materials, but the damage energy dissipation mechanisms were different, and they had different effects on mechanical properties and strength of materials. Therefore, from the point of view of energy dissipation, volume damage variable and shear damage variable were defined respectively. The incremental damage evolution equation was established based on the principle of energy

收稿日期:2018-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51509257)

作者简介:李忠友(1983-),男,辽宁阜新人,工程师,工学博士,E-mail:sklzy2013@sina.com。

conservation in deformation process. The damage mechanism of brittle geotechnical materials under complex stress state was further revealed. For the ideal elastic-plastic part, Mohr-Coulomb strength criterion was used to reflect the yield strength of materials. Taking the typical granite of Three Gorges underground power station as an example, the damage model presented was used for numerical calculation. The results show that the model can well predict the variation of peak strength, peak strain and residual strength with confining pressure during triaxial compression, and reflect the characteristics of material changing from brittleness to plasticity with increasing confining pressure. The model has wide application value in engineering.

**Key words:** geotechnical material; energy dissipation; triaxial compression; damage; constitutive model

## 0 引言

自 20 世纪 70 年代末, Dougill 等<sup>[1]</sup>首次将损伤理论应用于岩土材料的非线性描述,并逐渐得到了工程人员的广泛关注。对于岩石、混凝土等脆性岩土材料,损伤主要指材料内部的裂纹、孔隙等微缺陷在外荷载作用下萌生、发展和贯通,并导致材料宏观力学性能劣化的复杂过程,因而从材料细观缺陷的变化来推导损伤对宏观力学性能的影响十分困难。为此,国内外众多学者<sup>[2-15]</sup>从能量的角度出发,分析和描述了岩石的变形破坏行为,并取得了显著成绩。损伤的形式多样、变化各异,但它们都有一个共同的特点,即都是需要耗散能量的不可逆过程<sup>[2]</sup>,因此从材料变形破坏过程中的能量耗散特征研究损伤对宏观力学性能的影响,建立损伤本构模型是切实可行的。当前大部分研究主要集中在单轴拉压应力状态下,单元能量耗散与材料损伤和本构的关系以及单元内可释放应变能与单元破坏或破裂的关系等问题上<sup>[3]</sup>,而对三轴压缩等复杂应力状态下的能量耗散机制和损伤对材料力学性能、变形强度影响等问题研究相对较少。在实际工程中,岩土类材料的工作状态大多处于三轴压剪应力状态,此时的应力-应变关系及强度情况是工程人员最为关注的,因而建立能够适用于三轴应力状态的损伤本构模型就显得尤为重要。

现有试验<sup>[11-16]</sup>表明岩石、混凝土等脆性岩土材料具有随着围压的增加,峰值强度和残余强度逐渐增大,材料由脆性向塑性转变的性质。针对材料的这一特点,本文从材料变形破坏过程中的能量耗散特征入手,视脆性岩土材料为仅有损伤耗能的脆弹性部分和仅有塑性流动耗能理想弹塑性部分共同组成,建立了适用于三轴压缩等复杂应力状态的损伤本构模型。对于脆弹性部分,认为体积变形和剪

切变形均会引起材料的损伤,但其损伤耗能机理不同,因而分别定义了体积损伤变量和剪切损伤变量来描述 2 种变形作用下的损伤及其对材料力学性能的影响,并建立了与之相对应的损伤演化方程;对于理想弹塑性部分,则采用 Mohr-Coulomb 强度准则反映材料的屈服强度。模型能够较好地反映脆性岩土材料随围压变化而发生软化与硬化相互转化的特点,并能够合理解释三轴压缩变形过程中的耗能机理及加卸载路径上的滞回行为等。

## 1 变形破坏过程中的能量耗散特征

由热力学定律可知,能量转化是物质物理过程的本质特征,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象<sup>[8]</sup>。材料单元在荷载作用下,外力做功所产生的总输入能量(不考虑该物理过程与外界的热交换)将转化为材料内部的弹性应变能和耗散能,其中耗散能是由材料内部结构损伤及塑性流动产生的不可恢复的能量,由热力学第一定律得

$$W = U^e + \Phi^d + \Phi^p \quad (1)$$

式中:  $W$  为外力做功;  $U^e$  为弹性应变能;  $\Phi^d$  为损伤耗能;  $\Phi^p$  为塑性流动耗能。

损伤耗能是指材料内部的裂纹、孔隙等微缺陷在外荷载作用下萌生、发展和贯通所需的表面能,而塑性流动耗能是指材料发生塑性变形过程中晶格、裂纹间相互错动所需的摩擦能。2 种耗散能在材料变形破坏过程中所占的比例与材料受荷及破坏形式有关,以岩石为例,从岩石压缩破坏试验的 3 种典型破坏形式<sup>[12]</sup>中可以得出:在单轴拉伸及低围压压缩时,材料呈张拉型脆性破坏,此时变形破坏过程中的耗散能主要由损伤引起;随围压的增大,材料逐渐呈应变软化型的剪切破坏,当围压增大到一定值后,材料将呈应变硬化型的塑性破坏,此时受荷变形过程中的耗散能由损伤和塑性流动共同作用产生;当材

料进入残余强度时,无结构单元破损,因而耗散能将全部为塑性流动产生。材料变形破坏过程中的能量耗散揭示了材料随围压的增大,逐渐由脆性向塑性转变的根本原因。

将式(1)中的弹性应变能分为  $U_b^e$  和  $U_p^e$  两部分 ( $U_b^e$  为与损伤对应的弹性应变能,  $U_p^e$  为塑性流动对应的弹性应变能),为与损伤耗能和塑性流动耗能相对应,令  $U^e = U_b^e + U_p^e$ ,从而得到

$$W = U_b^e + \Phi^d + U_p^e + \Phi^p \quad (2)$$

因而外力做功产生的总输入能量可以分为  $W_b, W_p$  两部分,即

$$W_b = U_b^e + \Phi^d \quad (3)$$

$$W_p = U_p^e + \Phi^p \quad (4)$$

式中:  $W_b$  为与损伤部分对应的外力功;  $W_p$  为与塑性流动部分对应的外力功。

由此可知,材料变形破坏过程中,外力做功产生的总输入能量由式(3),(4)两部分共同承担。式(3)可视为脆弹性材料在变形破坏过程中的能量守恒关系。脆弹性材料变形过程中的能量关系如图1所示 ( $\sigma$  为应力,  $\epsilon$  为应变),外力做功产生的总输入能量转化为材料内部的弹性应变能和损伤耗能。当材料完全破坏后(损伤变量  $\omega = 1$  时),将不再具备任何承载能力。式(4)可视为理想弹塑性材料变形破坏过程中的能量守恒关系。理想弹塑性材料变形过程中的能量关系如图2所示,外力做功产生的总输入能量转化为材料内部的弹性应变能和塑性流动耗能。当材料屈服时,随应变的增加,材料的弹性应变能将保持不变,外力做功将全部转化为塑性流动耗能。

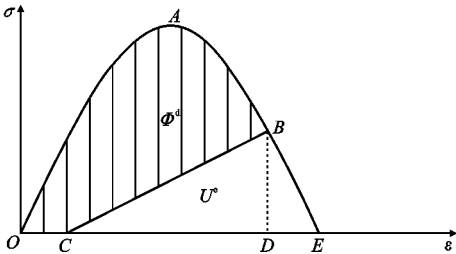


图1 脆弹性材料变形过程中的能量关系

Fig. 1 Energy Relationship of Elastic-brittle Materials in Deformation Process

基于上述分析,本文提出一种能够更为直观反映材料变形过程中2种耗能行为的脆性岩土材料本构模型,模型视脆性岩土材料为仅有损伤耗能的脆弹性部分和仅有塑性流动耗能的理想弹塑性部分共同组成,其中脆弹性部分起骨架的作用,在破坏后不

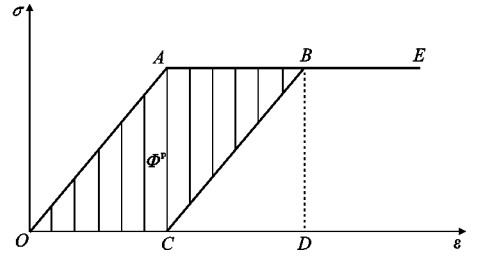


图2 理想弹塑性材料变形过程中的能量关系

Fig. 2 Energy Relationship of Ideal Elastic-plastic Materials in Deformation Process

再具有任何承载力。根据应变协调原理,两部分与整体之间的应力-应变关系为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_b + \epsilon_p \\ \sigma &= \sigma_b + \sigma_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_b, \epsilon_b$  和  $\sigma_p, \epsilon_p$  分别为脆弹性部分与理想弹塑性部分的应力和应变。

## 2 脆性岩土材料损伤本构关系

### 2.1 脆弹性部分损伤演化规律

脆弹性部分在荷载作用下的能量耗散仅由损伤引起,因而定义损伤变量为脆弹性部分在加载过程中的能量耗散量与其内部结构单元完全破损所需要的能量之比,即

$$d\omega = d\Phi^d / D \quad (6)$$

式中:  $D$  为材料内部结构单元完全破损所需能量。

在三轴压缩过程中,体积变形和剪切变形均会引起材料的损伤,体积变形作用会引起结构单元的受压破碎,破碎颗粒均匀分布于材料内部;剪切变形作用会引起结构单元的剪裂,形成的微裂纹一般具有方向性,并主要集中在剪切带附近,将其沿结构单元均匀化,如图3所示。在一般应力状态下,假设二者引起的损伤耗能相互独立(在不考虑脆弹性部分的剪胀性时,假设显然成立),因而可将脆弹性部分的损伤耗能分为两部分,即

$$\Phi^d = \Phi_v^d + \Phi_s^d \quad (7)$$

式中:  $\Phi_v^d$  为体积变形引起的损伤耗能;  $\Phi_s^d$  为剪切变形引起的损伤耗能。

相应的脆弹性部分能量守恒方程可分解为

$$\int p_b d\epsilon_v = p_b^2 / (2K_b^d) + \Phi_v^d \quad (8)$$

$$\int q_b d\epsilon_s = q_b^2 / (6G_b^d) + \Phi_s^d \quad (9)$$

式中:  $p_b, q_b$  分别为脆弹性部分所受的球应力和广义剪应力;  $\epsilon_v, \epsilon_s$  分别为体应变和广义剪应变;  $K_b^d, G_b^d$  分别为脆弹性部分损伤后的体积模量和剪切模量。

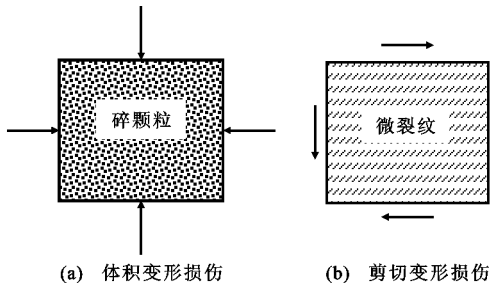


图3 2种变形作用下脆性破坏时损伤示意

Fig. 3 Damage Diagrams of Brittle Failure Under Two Kinds of Deformations

对应式(8),(9),分别定义体积损伤变量 $\omega_v$ 和剪切损伤变量 $\omega_s$ ,纯体积变形作用下的体积损伤变量和纯剪切变形作用下的剪切损伤变量可以表示为

$$d\omega_v = d\Phi_v^d / V \quad (10)$$

$$d\omega_s = d\Phi_s^d / S \quad (11)$$

式中: $V, S$ 分别为脆弹性部分在2种变形作用下完全损伤所引起的能量耗散量。

体积变形引起材料内部微单元的破损更为彻底,形成的破碎单元表面积远大于剪切变形作用下微裂纹的表面积,因而纯体积变形作用下材料完全破损所需的体积损伤耗能(表面能) $V$ 远大于纯剪切变形作用下的剪切损伤耗能 $S$ 。

在一般应力状态下,体积变形引起的损伤与剪切变形引起的损伤相互影响,即材料内部某一单元破损形成新的表面,所需表面能不能引起体积变形能和剪切变形能的重复耗散,因而式(10),(11)在一般应力状态下可表示为

$$d\omega_v = d\Phi_v^d / (V - \omega_s S) \quad (12)$$

$$d\omega_s = d\Phi_s^d / (1 - \omega_v) S \quad (13)$$

在实际工程中,岩石等脆性岩土材料一般为剪切破坏,即结构单元在变形过程中的损伤更容易引起剪切变形能的耗散,故在一般应力状态下体积损伤是一个较小值,并且在材料变形破坏过程中没有明显的增大<sup>[17]</sup>,因而近似认为在剪切过程中可忽略体积损伤变化的影响( $S\Delta\omega_v \approx 0$ )。另外考虑到 $V$ 远大于 $\omega_s S$ ,因而对式(12),(13)求和,得到在一般应力状态下体积变形和剪切变形引起的损伤分别为

$$\omega_v = \Phi_v^d / V \quad (14)$$

$$\omega_s = \Phi_s^d / [(1 - \omega_v) S] \quad (15)$$

对于脆弹性材料,不考虑损伤后材料的承载力,根据Lemaitre应变等价性假说<sup>[18]</sup>,相应的体积模量 $K_b^d$ 和剪切模量 $G_b^d$ 可以表示为

$$K_b^d = (1 - \omega_v) K_b \quad (16)$$

$$G_b^d = (1 - \omega_s) G_b \quad (17)$$

式中: $K_b, G_b$ 分别为脆弹性部分未无损伤状态下的体积模量和剪切模量。

在体应变作用下,根据式(8),(14),(16)可以得到体积变形能能量守恒方程,即

$$\int p_b d\epsilon_v = \frac{1}{2} \frac{p_b^2}{(1 - \omega_v) K_b} + V \omega_v \quad (18)$$

考虑到损伤不能为负,可得到体积变形作用下的损伤演化方程为

$$\omega_v = \left[ \int p_b d\omega_v + V - \sqrt{\left( \int p_b d\epsilon_v - V \right)^2 + \frac{2V p_b^2}{K_b}} \right] / (2V) \quad (19)$$

在剪应变作用下,根据式(9),(15),(17)可以得到剪切变形能能量守恒方程,即

$$\int q_b d\omega_s = \frac{1}{2} \frac{q_b^2}{3(1 - \omega_s) G_b} + S(1 - \omega_v) \omega_s \quad (20)$$

同理,令 $\bar{s} = (1 - \omega_v) S$ ,可得到纯剪切变形作用下的损伤演化方程为

$$\omega_s = \left[ \int q_b d\epsilon_s + \bar{s} - \sqrt{\left( \int q_b d\epsilon_s - \bar{s} \right)^2 + \frac{2\bar{s} q_b^2}{3G_b}} \right] / (2\bar{s}) \quad (21)$$

损伤演化方程的未知参数中体积变形引起材料破坏所需要的能量耗散量 $V$ 为定值,可以通过等向压缩试验获得。考虑到 $V$ 一般较大,使材料在等向压缩试验中完全损伤(材料结构单元全部被压碎)十分困难,因而本文给出一种间接的方法,结合式(8),(10)可以得到

$$V = \frac{\int p_b d\epsilon_v - p_b^2 / (2K_b^d)}{1 - K_b^d / K_d} \quad (22)$$

由此可知,在等向压缩试验中,得到一定压力作用下的完整加卸载曲线,就可以利用式(22)计算出体积变形引起材料破坏所需要的能量耗散量。

岩石、混凝土等脆性岩土材料三轴压缩试验表明<sup>[15]</sup>,材料在破坏时裂纹方向、数量及形状特征随围压的不同而不同,因而剪切变形作用下材料内部结构单元剪裂所需能量耗散量 $S$ 与围压有关,研究表明剪切断裂能随围压呈线性规律变化<sup>[13]</sup>,即

$$S = S_0 + \eta \sigma_3 \quad (23)$$

式中: $S_0$ 为单轴压缩时材料破坏所需能量耗散量; $\sigma_3$ 为围压; $\eta$ 为与围压有关的材料参数。

## 2.2 脆弹性部分应力-应变关系

一般应变状态下,脆弹性材料损伤本构关系可以表示为

$$\sigma_b = D_b^d \epsilon \quad (24)$$

式中:  $D_b^d$  为脆弹性部分损伤时的弹性刚度矩阵。

$D_b^d$  在平面应力状态下可表示为

$$D_b^d = \begin{bmatrix} K_b^d + \frac{4}{3}G_b^d & K_b^d - \frac{2}{3}G_b^d & 0 \\ K_b^d - \frac{2}{3}G_b^d & K_b^d + \frac{4}{3}G_b^d & 0 \\ 0 & 0 & 2G_b^d \end{bmatrix} \quad (25)$$

### 2.3 弹塑性部分应力-应变关系

当脆性岩土材料进入残余强度时,无结构单元破损,外力做功将全部转化为理想塑性部分的弹性应变能和塑性流动引起的耗散能,因而可以根据进入残余强度时的应力-应变关系建立理想弹塑性模型,残余强度即为屈服强度。

理想弹塑性部分屈服前的应力-应变关系为

$$\sigma_p = D_p \epsilon \quad (26)$$

式中:  $D_p$  为弹塑性部分的弹性刚度矩阵。

$D_p$  在平面应力状态下可表示为

$$D_p = \begin{bmatrix} K_p + \frac{4}{3}G_p & K_p - \frac{2}{3}G_p & 0 \\ K_p - \frac{2}{3}G_p & K_p + \frac{4}{3}G_p & 0 \\ 0 & 0 & 2G_p \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中:  $K_p, G_p$  分别为理想弹塑性部分的体积模量和剪切模量,由进入残余强度阶段卸载曲线得到。

杨圣奇等<sup>[13]</sup>给出的试验结果表明,残余强度与围压呈线性关系,可采用摩尔-库仑准则描述,即可以表示为

$$F = \sigma_{p1} - \sigma_{p3} \tan^2(\alpha) - 2c \tan(\alpha) \quad (28)$$

式中:  $\alpha = 45^\circ + \phi/2$ ,  $\phi$  为理想弹塑性部分的内摩擦角;  $c$  为理想弹塑性部分的黏聚力;  $\sigma_{p1}, \sigma_{p3}$  分别为理想弹塑性部分的轴压和环压。

弹脆性部分的体积模量和剪切模量分别为

$$K_b = K - K_p \quad (29)$$

$$G_b = G - G_p \quad (30)$$

式中:  $K, G$  分别为初始状态下脆性岩土材料整体的体积模量和剪切模量。

## 3 实例验证

### 3.1 材料参数

为了验证本文提出的脆性岩土材料损伤本构模型及其参数确定方法的合理性,引用文献[14]的资料(图4),材料为三峡地下电站典型花岗岩,为典型的脆性高强度岩石材料,通过相应的数据处理可得岩石初始体积模量  $K = 25$  GPa,剪切模量  $G = 18.75$

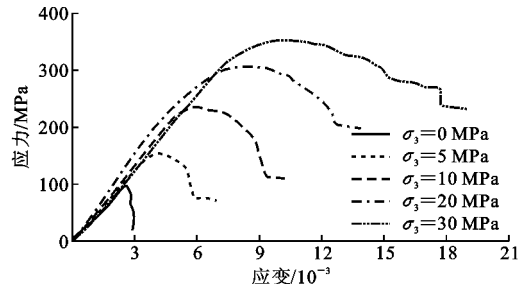


图4 应力-应变试验曲线

Fig. 4 Experiment Curves of Stress-strain

GPa,进入残余强度后黏聚力  $c = 3$  MPa,内摩擦角  $\phi = 50^\circ$ ,体积模量  $K_p = 10$  GPa,剪切模量  $G_p = 7.5$  GPa,单轴压缩时材料破坏所需能量耗散量  $S_0 = 150 \times 10^{-3}$  MPa,按式(23)通过试验数据拟合得到参数  $\eta = 0.025$ ,由于试验资料有限,考虑到  $V$  远大于  $S$ ,因而在计算中取  $V = 150$  MPa。

### 3.2 计算流程

模型数值计算流程如下:①确定初始应力状态,  $\sigma^0 = \sigma^{n-1} + \Delta\sigma$  ( $\sigma^0$  为初始应力张量,  $n$  为计算循环次数);②计算损伤刚度矩阵  $D_\omega, D_\omega = D_b^d + D_p$ ;③计算应变状态  $\epsilon, \epsilon = D_\omega^{-1}\sigma$ ;④计算应变增量  $\Delta\epsilon_i, \Delta\epsilon_i = \epsilon_i^n - \epsilon_i^{n-1}$  ( $i = 1, 2, 3$ , 表示主应变方向);⑤计算2组分应力  $\sigma_b^n$  和  $\sigma_p^n$ ;⑥修正应力状态  $\sigma^n, \sigma^n = \sigma_b^n + \sigma_p^n$ ;⑦计算损伤变量  $\omega_n$  和  $\omega_s$ ;⑧修正损伤刚度矩阵  $D_b^d$ ;⑨验算应力状态  $\Delta\sigma, \Delta\sigma = \sigma^0 - \sigma^n \geq a$ ,重复①~⑧步,否则进入下一步循环计算。

在数值计算过程中,系数  $a$  是确定每次循环时材料应力增量的误差,  $a$  取值越小,则计算结果越精确。在本文算例中取  $a < 0.1$ ,计算结果已能满足精度要求。

### 3.3 结果分析

图5为不同围压下材料的应力-应变关系曲线,通过计算结果与文献[14]给出的试验结果对比可以看出,本文模型能够较好地反映脆性岩土材料应变软化的特征以及随着围压的增大材料由脆性向塑性转变的现象。图6~8给出了峰值强度、峰值应变及残余强度随围压变化规律的计算结果与试验结果,两者吻合度高,验证了模型的合理性。

图9为峰值强度和残余强度随围压变化的拟合曲线。由图9可以看出,随着围压的增加,峰值强度逐渐增大,但其增加值逐渐减小,而残余强度随围压呈线性增长,残余强度对围压的敏感性显著高于峰值强度。通过图9拟合曲线可以发现,围压达到54 kPa后,残余强度超过了峰值强度,表明此时材料不再出现应变软化现象,表现为明显的塑性状态。

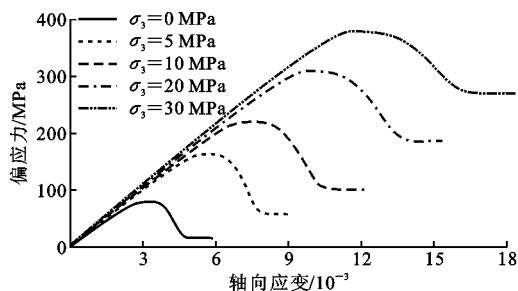


图5 不同围压下应力-应变计算曲线

Fig. 5 Computation Curves of Stress-strain Under Different Confining Pressures

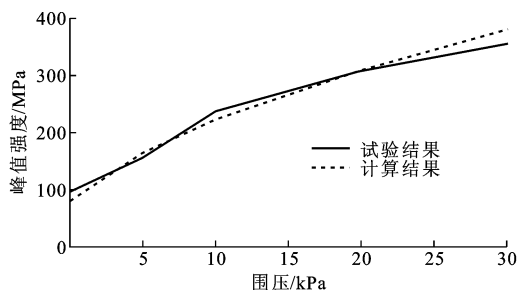


图6 峰值强度随围压变化曲线

Fig. 6 Change Curves of Peak Strength with Confining Pressure

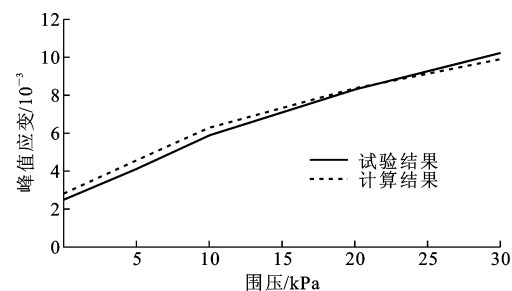


图7 峰值应变随围压变化曲线

Fig. 7 Change Curves of Peak Strain with Confining Pressure

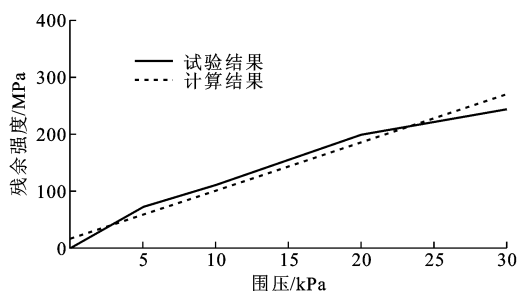


图8 残余强度随围压变化曲线

Fig. 8 Change Curves of Residual Strength with Confining Pressure

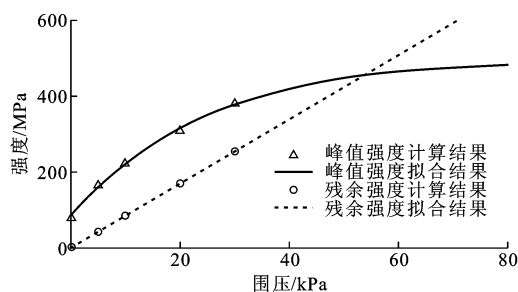


图9 峰值强度和残余强度关系曲线

Fig. 9 Relation Curves of Peak Strength and Residual Strength

手,视脆性岩土材料为脆弹性部分和理想弹塑性部分组成的复合体材料,建立了适用于三轴压缩等复杂应力状态的损伤本构模型。

(2)对于脆弹性部分,认为体应变和剪应变均会引起损伤,一般应力状态下的损伤是两者共同作用下的结果。由于体应变和剪应变损伤机理不同,各自遵循不同的损伤演化规律,因而本文利用能量守恒原理和 Lemaitre 应变等价性假说建立了相应的损伤演化方程。对于理想弹塑性材料,利用摩尔-库仑准则描述其屈服强度。

(3)算例计算结果能够较好地反映脆性岩土材料应变软化的特征及随着围压增大材料由脆性向塑性转变的现象。不同围压下的峰值强度、峰值应变及残余强度与实测结果较为吻合,验证了本文模型的合理性。

## 参考文献:

## References:

- [1] DOUGILL J W, LAU J C, BURT N J. Toward a Theoretical Model for Progressive Failure and Softening in Rock, Concrete and Similar Materials[J]. Mechanics in Engineering, 1976, 102: 333-355.
- [2] 杨殷豪, 李忠友. 基于能量特征的脆性岩土材料广义拉伸损伤模型[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2017, 38(增1): 154-157, 164.  
YANG Yin-hao, LI Zhong-you. Generalized Tension Damage Model for Brittle Geotechnical Materials Based on Energy Distinction[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 38(S1): 154-157, 164.
- [3] 王利, 高谦. 基于损伤能量耗散的岩体块度分布预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1202-1211.  
WANG Li, GAO Qian. Fragmentation Distribution Prediction of Rock Based on Damage Energy Dissipa-

## 4 结语

(1)从材料变形破坏过程中的能量耗散特征入

- tion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1202-1211.
- [4] MIKHALYUK A V, ZAKHAROV V V. Dissipation of Dynamic-loading Energy in Quasi-elastic Deformation Processes in Rocks[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1997, 38(2): 312-318.
- [5] 杨永明, 鞠 杨, 陈佳亮, 等. 三轴应力下致密砂岩的裂纹发育特征与能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 691-698.
- YANG Yong-ming, JU Yang, CHEN Jia-liang, et al. Cracks Development Features and Energy Mechanism of Dense Sandstone Subjected to Triaxial Stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 691-698.
- [6] 何明明, 陈蕴生, 韩铁林, 等. 不同应力路径下砂岩能耗特征的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 2632-2638.
- HE Ming-ming, CHEN Yun-sheng, HAN Tie-lin, et al. Study of Energy Properties of Sandstone Under Different Loading Paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S1): 2632-2638.
- [7] RAMULU M, CHAKRABORTY A K, SITHARAM T G. Damage Assessment of Basaltic Rock Mass Due to Repeated Blasting in a Railway Tunnelling Project — A Case Study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 208-221.
- [8] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1114-1122.
- ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Quantitative Evaluation of Rock Brittleness Based on Stress-strain Curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1114-1122.
- [9] 罗 曦, 彭 刚, 刘博文, 等. 用改进 Najar 能量法分析混凝土单轴受压损伤特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 103-108.
- LUO Xi, PENG Gang, LIU Bo-wen, et al. Analysis of Damage Characteristics of Concrete Under Dynamic Uniaxial Compression Based on Improved Najar Energy Method[J]. Hydro-science and Engineering, 2016 (5): 103-108.
- [10] 龙渝川, 侯鉴珊, 王玉山. 基于能量耗散的混凝土塑性-损伤模型[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 147-153.
- LONG Yu-chuan, HOU Jian-shan, WANG Yu-shan. A Plastic-damage Model of Concrete Based on Energy-loss Mechanism [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 147-153.
- [11] 闫东明, 林 皋. 三向应力状态下混凝土强度和变形特性研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9(6): 64-70.
- YAN Dong-ming, LIN Gao. Behavior of Concrete Under the Triaxial Compression [J]. Engineering Science, 2007, 9(6): 64-70.
- [12] 宋卫东, 明世祥, 王 欣, 等. 岩石压缩损伤破坏全过程试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 2): 4180-4187.
- SONG Wei-dong, MING Shi-xiang, WANG Xin, et al. Experimental Study of Rock Compression-damage-failure Process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4180-4187.
- [13] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136-142.
- YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on the Deformation Failure and Energy Properties of Marble Specimen Under Triaxial Compression [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136-142.
- [14] 黄 达, 黄润秋, 张永兴. 三轴加卸载下花岗岩脆性破坏及应力跌落规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(2): 1-6.
- HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Characteristics of Brittle Failure and Stress Drop Under Triaxial Loading and Unloading [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 1-6.
- [15] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock Mechanics and Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] LI L C, TANG C A, LI G, et al. Numerical Simulation of 3D Hydraulic Fracturing Based on an Improved Flow-stress-damage Model and a Parallel FEM Technique [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 801-818.
- [17] 沈珠江, 刘恩龙, 陈铁林. 岩土二元介质模型的一般应力应变关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 489-494.
- SHEN Zhu-jiang, LIU En-long, CHEN Tie-lin. Generalized Stress-strain Relationship of Binary Medium Model for Geological Materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 489-494.
- [18] LEMAITRE J. How to Use Damage Mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233-245.