

DOI: 10.11779/CJGE201410008

基于组合模型法的贯通节理岩体动态损伤本构模型

刘红岩^{1, 2, 3}, 吕淑然⁴, 张力民^{5, 6}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000; 3. 中国地质大学(北京)

国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083; 4. 首都经济贸易大学安全与环境工程学院, 北京 100026;

5. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 6. 河北承德钢铁公司, 河北 承德 067000)

摘要: 针对贯通节理岩体动态变形特点并结合已有岩石动态本构模型的相关研究成果, 将贯通节理岩体变形过程中的动态应力视为贯通节理岩体静态应力分量与相应动态应力分量的叠加。其中贯通节理岩体静态应力分量采用考虑岩石细观损伤的非线性元件、节理面闭合及剪切变形元件等3个基本元件的串联来模拟, 动态应力分量采用黏性元件来模拟, 从而建立了贯通节理岩体动态单轴压缩损伤本构模型。其次, 根据贯通节理岩体在单轴压缩荷载下往往沿节理面发生剪切破坏的特点, 在前述已建立的损伤本构模型中引入节理剪切破坏准则对该模型进行修正, 从而更好地考虑了节理剪切强度对该模型的影响, 最终建立了考虑节理剪切强度的贯通节理岩体单轴压缩损伤本构模型。最后利用该模型对贯通节理岩体在压缩荷载作用下的力学特性进行了分析计算, 重点讨论了节理倾角对岩体单轴动态压缩峰值强度的影响规律。研究结果表明随着节理倾角的变化, 节理岩体将发生岩块张拉或剪切破坏、沿节理面的剪切破坏及上述两种破坏模式的复合破坏, 相应地节理岩体的单轴压缩动态峰值强度也随之有较大变化。

关键词: 贯通节理岩体; 动态损伤本构模型; 节理剪切强度; 组合模型法; 黏性元件

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)10-1814-08

作者简介: 刘红岩(1975-), 男, 博士, 教授, 注册岩土工程师, 高级爆破工程师, 主要从事岩土工程方面的教学和科研。E-mail: lhy1204@cugb.edu.cn。

Dynamic damage constitutive model for persistent jointed rock mass based on combination model method

LIU Hong-yan^{1, 2, 3}, LÜ Shu-ran⁴, ZHANG Li-min^{5, 6}

(1. College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Engineering,

Tibet University, Lasa 850000, China; 3. Key Laboratory on Deep GeoDrilling Technology, Ministry of Land and Resources, Beijing

100083, China; 4. School of Safety and Environment Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100026, China;

5. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 6. Hebei Chengde
Iron and Steel Corporation, Chengde 067002, China)

Abstract: According to the dynamic deformation characteristics of the persistent jointed rock mass and the relevant results of the existing rock dynamic constitutive models, the dynamic stress of the persistent jointed rock mass is regarded as the summation of two components, which are the static stress and the dynamic stress components respectively. The static stress component of the persistent jointed rock mass is simulated using three basic deformation components connecting in series such as the nonlinear component reflecting the rock mesoscopic damage, joint closure and shear deformation components. The dynamic stress component is simulated using the viscous component. Then the uniaxial dynamic compression damage constitutive model is set up. Next, according to the fact that the persistent jointed rock mass often shears to fail along the joint face under the uniaxial load, the joint shear failure criterion is introduced into the damage constitutive model established above to revise it, which can perfectly consider the effect of the joint shear strength on this model, and the uniaxial compression damage constitutive model of persistent jointed rock mass considering the joint shear strength is established finally. Then this model is adopted to calculate the mechanical properties of the persistent jointed rock mass under compression load, and the effect law of the joint dip angle on the rock mass uniaxial compression dynamic climax strength is especially discussed. The results show that the failure modes of the jointed rock mass

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002113, 41162009); 中央高校
基本科研业务费专项资金项目(2-9-2014-019)

收稿日期: 2013-11-27

include the tensile or shear failure of the intact rock, the shear failure along the joint face and the mixed one of the above two ones with the joint dip angle, and accordingly the uniaxial compression dynamic climax strength of the jointed rock mass greatly varies with it.

Key words: persistent jointed rock mass; dynamic damage constitutive model; joint shear strength; combination model method; viscous component

0 引言

实际岩体都存在节理、裂隙等不连续面, 这里统称为节理。节理存在造成了岩体的不连续性, 使得岩体和完整岩石具有不同的动力学特性, 而且节理的物理力学参数均对岩体的动态强度、变形及破坏模式等产生很大影响^[1-2]。岩体动态本构模型的建立对于研究岩体工程在动载下的力学响应具有重要的理论意义和工程应用价值。

岩体动态本构关系是其内部宏、细观缺陷(这里称节理为宏观缺陷, 微裂纹等为细观缺陷)在动载下的宏观表现。由于岩体内部包含着宏细观等不同层次的天然损伤, 因此在外载下也表现出弹性、塑性及黏性等不同的力学特性。同时固体材料的力学性能实际上总是具有一定的应变率相关性, 如恒应力下应变随时间而增加的蠕变现象; 恒应变下应力随时间而降低的应力松弛现象; 应力波传播中的吸收和弥散现象; 中高应变率的冲击载荷下材料的强化与脆化现象等等, 都说明了材料的力学特性是与时间相关的。对于同时包含宏、细观缺陷的岩体来说, 其内部损伤及其演化对材料力学性能的影响也十分显著, 尤其是在冲击荷载下, 损伤软化效应十分明显, 并且很快超过应变硬化效应和应变率强化效应, 进而导致试件很快破坏^[3]。因此合理的岩体动态损伤本构模型必须能够反映损伤软化效应和应变率强化效应。总之, 已有研究表明^[4-6], 岩体的变形不仅与其结构及所处应力状态有关, 而且还与应变率有关。各国学者也基于固体力学的各种不同理论和方法, 提出了许多既有理论依据又有工程使用价值的动态本构模型, 大致分为4种: 经验和半经验模型^[7]、机械模型^[8]、损伤模型^[9-10]和组合模型^[4,11-13]。

总之, 较理想的岩体动态本构模型既要能反映加载速度或应变率的影响, 又要能反映岩体中宏、细观缺陷的影响。为此, 本文根据岩体在单轴动态压缩下的变形及破坏特征, 综合应用组合模型法和损伤模型法建立贯通节理岩体动态损伤本构模型。

1 贯通节理岩体单轴动态压缩变形本构模型

1.1 基于岩块和节理变形组合的岩体动态压缩本构方程

单仁亮等^[12]在经过大量的实验结果及总结已有本构模型的基础上, 提出了岩石冲击破坏的统计损伤时效模型, 将岩石试件看成是具有统计损伤特性的损伤体 D_a 和黏缸 η_b 组成的并联体, 如图1。这样既反映了岩石在冲击荷载下的损伤软化特性, 又反映了应变率强化效应。若假设岩石微元强度服从参数为 (m, ε_0) 的Weibull分布, 则其本构关系为

$$\sigma = E\varepsilon \exp(-\varepsilon/\varepsilon_0)^m + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

式中, η 为黏滞系数。

目前该模型已被众多学者所认可, 成为目前较为合理的岩石动力学本构模型之一。

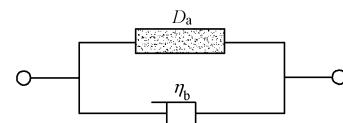


图1 岩石动态损伤时效模型

Fig. 1 Time-dependent dynamic damage model for rock

由式(1)可知, 式中第一项为载荷作用下假设微元强度服从Weibull分布时的岩石静态损伤本构模型, 而第二项是由于载荷应变率效应而导致的岩石附加动态应力分量, 即认为岩石在动、静载荷作用下力学响应的主要区别就是由载荷应变率效应而导致的应力附加分量。曹文贵等^[11]也认为岩石动力学与静力学的根本区别在于由于加载速度而导致的岩石应变率效应, 岩石在高应变率下其内部微结构变形将产生不可忽略的惯性力^[14], 因此岩石动态应力可视为“惯性力”与静态应力的叠加。

基于上述研究思路, 并结合图2所示贯通节理岩体在单轴动态压缩荷载作用下的变形可知, 节理岩体的轴向总变形不仅包括完整岩块的轴向变形, 而且还包括节理面的压缩闭合变形和剪切变形在轴向上的分量, 有的学者也将由节理面的剪切变形而产生的应变称为表观应变^[15]。

为此, 基于上述变形特征, 提出如图3(a)所示的贯通节理岩体静态损伤本构模型。类似地, 贯通节理岩体的动态损伤本构模型也可以看作是由相应的静态损伤本构模型并联一个考虑应变率效应的黏壶元件组成, 如图3(b)。需要说明的是, 岩石动态损伤本构模型中的黏性元件是用来描述岩石在动载下的应变

率效应, 而贯通节理岩体动态损伤本构模型中的黏性元件是综合反映了岩石与节理面二者的综合应变率效应。关于岩石的应变率效应目前已经有了很多研究, 而关于节理面的应变率效应问题, 李夕兵等^[16]通过对含人工节理的岩石试样进行了4种不同频率载荷下的动态压缩试验结果表明, 载荷应变率对节理的动态闭合变形有明显影响, 并建立了考虑率效应的节理动态本构模型。因此, 图3 (b) 中的黏性元件是综合反映了岩石与节理面二者的综合应变率效应。

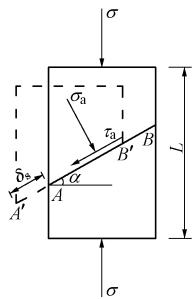


图 2 含一条倾斜节理的岩体

Fig. 2 Rock mass with one incline joint

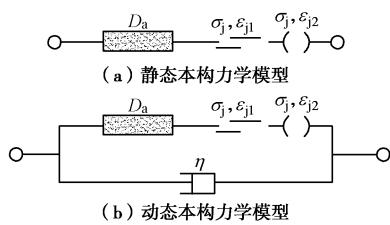


图 3 节理岩体的静、动态损伤本构模型结构图

Fig. 3 Structural maps of static and dynamic damage models for jointed rock mass

由图3 (b) 可知, 由4个基本变形元件 (即含细观的岩块变形元件、节理面剪切变形元件、节理面闭合变形元件和反映应变率效应的黏性元件) 通过串、并联组合而成的贯通节理岩体动态本构模型具有如下特征:

(1) 描述贯通节理岩体静态压缩变形特征的模型元件

该模型用来描述贯通节理岩体在静载下的力学特性, 它是由一个代表宏观完整岩石的损伤元件和分别描述节理面闭合及滑移的变形元件串联而成。其中损伤元件表示含有微裂隙等天然细观损伤的宏观完整岩石, 这里采用细观损伤力学观点, 即认为宏观上完整的岩块虽然不含节理、裂隙等宏观缺陷, 但是总不可避免地含有微裂隙、微孔洞等细观缺陷。基于此, Weibull^[17]提出了统计损伤力学的观点, 即认为岩石是由众多强度不等的细观单元即微元所组成, 而这些微元的强度服从 Weibull 分布、正态分布等统计分布规

律^[17-18], 随着外力增加, 岩石微元将逐渐发生破坏, 进而从宏观上表现出一定的塑性变形特征。而两个节理面变形元件则分别表示节理面在压缩荷载下所产生的闭合与剪切变形。

(2) 考虑应变率效应的黏性元件

如前所述, 动载下岩石和节理均表现出明显的应变率效应, 因此在这里采用黏性元件与节理岩体变形元件并联以综合反映二者的应变率效应。

结合图3 (b) 中4个元件模型的本构方程及串、并联关系可以推导出该图所示本构模型的微分方程。假设模型的总应力及总应变分别为 σ , ε , 其中贯通节理岩体静态损伤本构模型元件所受应力为 σ' , 描述应变率效应的黏性元件所受应力为 σ'' , 那么贯通节理岩体的动态损伤本构模型的推导过程如下:

a) 描述岩体静态单轴压缩变形的模型元件

该模型元件是由3个元件串联而成, 若假设岩块的应变、节理面的剪切变形在垂直方向上的应变和节理面的压缩闭合变形在垂直方向上的应变分别为 ε_r , ε_{j1} 和 ε_{j2} 。

首先对于含细观损伤的岩块, 其本构关系为^[17-18]

$$\sigma' = E_r \varepsilon_r (1 - D) = E_r \varepsilon_r \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \right)^m \right], \quad (2)$$

式中, E_r 为岩块初始弹性模量, 即在外力作用下岩块弹性模量将随微元的破坏而逐渐减小。 D 为在外力作用下岩块内部的损伤, 其值为0~1。该方法可以很方便地采用弹性损伤理论描述岩石初始弹性阶段、峰值阶段及峰后阶段等宏观塑性变形特征。

其次由图2可知, 当受到压缩荷载作用时, 试件将沿节理面发生剪切变形, 那么节理面在剪切变形过程中将产生剪切位移, 进而对试件轴向总应变产生影响, 因此在试件轴向应力应变关系中应考虑其沿节理面产生的剪切位移。根据节理在剪切荷载作用下的本构关系, 则有^[19]

$$\tau = k_s \delta_s, \quad (3)$$

式中, k_s 为节理面切向刚度 (Pa/m)。

由此可得

$$\varepsilon_{j1} = \frac{\sigma' \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot L}. \quad (4)$$

同时孙广忠^[20]提出在如图2所示的单轴压缩荷载下节理的闭合应变计算公式为

$$\varepsilon_{j2} = \varepsilon_{j0} \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma' \cos^2 \alpha}{E_j \varepsilon_{j0}} \right) \right] \cos \alpha, \quad (5)$$

其中, ε_{j0} 为结构面的最大闭合应变, E_j 为结构面闭合变形参数——节理面闭合模量 (MPa)。

b) 描述岩体动态应变率效应的模型元件

该模型元件为一个黏滞元件, 其本构关系为

$$\sigma'' = \eta \frac{d\epsilon}{dt}。 \quad (6)$$

那么由图3 (b) 所示的组合关系, 可得贯通节理岩体的动态本构方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sigma' + \sigma'' \\ \sigma' = E_r \epsilon_r \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_0} \right)^m \right] \\ \epsilon_{j1} = \frac{\sigma' \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot L} \\ \epsilon_{j2} = \epsilon_{j0} \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma' \cos^2 \alpha}{E_j \epsilon_{j0}} \right) \right] \cos \alpha \\ \epsilon = \epsilon_r + \epsilon_{j1} + \epsilon_{j2} \\ \sigma'' = \eta \frac{d\epsilon}{dt} \end{array} \right. \quad (7)$$

由式(7)可得到关于节理岩体动态应力应变的关系式, 即其本构方程为

$$\begin{aligned} \sigma - \eta \dot{\epsilon} &= E_r \left\{ \epsilon - \frac{(\sigma - \eta \dot{\epsilon}) \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot L} - \epsilon_{j0} \left[1 - \exp \left(- \frac{(\sigma - \eta \dot{\epsilon}) \cos^2 \alpha}{E_j \epsilon_{j0}} \right) \right] \cos \alpha \right\} \\ &\exp \left[- \left(\frac{\epsilon - \frac{(\sigma - \eta \dot{\epsilon}) \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot L} - \epsilon_{j0} \left[1 - \exp \left(- \frac{(\sigma - \eta \dot{\epsilon}) \cos^2 \alpha}{E_j \epsilon_{j0}} \right) \right] \cos \alpha}{\epsilon_0} \right)^m \right] \end{aligned} \quad (8)$$

由于本文所研究的动荷载均为恒应变速率的动荷载, 因此 $\dot{\epsilon}$ 为定值, 同时 E_r , E_j , ϵ_{j0} , η , k_s , α , L 和 m , ϵ_0 分别为岩块弹性模量、节理面闭合模量、节理面最大闭合应变、黏滞系数、节理面剪切刚度、节理倾角、试件在荷载作用方向上的长度和岩石微元服从 Weibull 分布时的统计分布参数等材料的力学或几何常数, 所以由式(8)可得到在恒应变速率载荷下贯通节理岩体的应力应变关系, 由于该方程两边同时含有应力 σ , 因此需要采用迭代法求解。

1.2 考虑节理动态剪切强度对模型的修正

研究表明^[21]目前岩体的破坏形式主要包括: 完整岩块的张拉和剪切破坏、沿节理面的剪切滑移、混合破坏及完整岩块的转动。然而最后一种破坏通常发生在节理连通率较差的岩体中, 因此本文主要考虑前3种破坏模式。

首先, 考虑完整岩块的张拉和剪切破坏。如前所述, 该模型采用基于微元强度服从 Weibull 分布的统计损伤本构模型来描述完整岩块的力学特征, 而该模型常采用拉应变破坏准则、Drucker-Prager 破坏准则及 Mohr-Coulomb 破坏准则等来描述完整岩块的破坏, 而在本文中则是采用拉应变破坏准则, 因此可以认为完整岩块的破坏准则已经包含在 Weibull 分布

模型中。

其次, 考虑节理动态剪切破坏准则。由前面推导可知, 该模型没有考虑岩块可能沿节理面发生的剪切破坏, 因而不甚合理。许多研究结果均表明, 节理是岩体中的软弱面, 岩体破坏往往沿节理面发生。因此下面就通过考虑节理面的剪切强度以对上述模型进行修正。目前常用的节理抗剪强度准则主要集中在静力学研究中, 主要有两个: 一是适用于平直节理面的 Mohr-Coulomb 强度准则, 二是能够考虑节理粗糙度的 Barton 强度准则^[22]。然而通过比较两种节理抗剪强度破坏准则可知, 虽然 Barton 强度准则很好地考虑了节理粗糙度, 但却没有考虑节理面的黏结强度, 因此对于有一定黏结强度的节理来说不甚合理。为此本文拟采用 Mohr-Coulomb 强度准则来考虑节理面的剪切破坏, 如图4, 当节理倾角 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时, 岩体沿节理面发生剪切破坏, 由此可求出

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\varphi_j}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_j \cot \varphi_j) \sin \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_3} \right], \\ \beta_2 &= \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_j}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_j \cot \varphi_j) \sin \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_3} \right], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, c_j , φ_j 分别为节理面的黏结力及内摩擦角。

由式(9)可看出, 若侧压力为零, 那么节理岩体的单轴抗压强度则为节理倾角 β 及节理强度参数即摩擦角和黏结力的函数, 即

$$\sigma_1 = \frac{2c_j}{\sin 2\beta - \cos 2\beta \cdot \tan \varphi_j - \tan \varphi_j}。 \quad (10)$$

因此, 当节理倾角及强度参数已知时, 即可求得岩体在单轴压缩荷载下沿节理面发生破坏的节理倾角范围及相应的轴向应力。

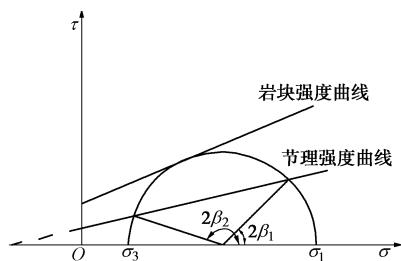


图4 节理倾角对岩体强度影响示意图

Fig. 4 Effect of joint dip angle on strength of rock mass

最后是混合破坏模式, 即当节理倾角较小时, 岩体在压缩荷载下可能会同时出现岩块张拉破坏及沿节理面剪切破坏的复合破坏模式, 此时岩体强度介于岩块的抗压强度与节理面的剪切强度之间。

当考虑节理面的剪切破坏后, 综合式(8)和式(10)即可得到符合节理岩体实际破坏特征的应力应

变曲线, 其具体方法简单介绍如下。

由前述可知, 即使不考虑节理面的剪切破坏, 由于完整岩块采用了微元强度服从 Weibull 分布的统计损伤本构模型, 因此仍可以得到包括峰后应变软化阶段的完整应力应变曲线, 如图 5 中的曲线 $OABCD$ 。而当考虑节理可能产生的剪切破坏时, 假设节理达到峰值抗剪强度时所对应的试件轴向压应力为 σ_0 , 那么当如图 2 所示的作用在试件轴向上的压应力 σ 增加到 σ_0 后, 试件将沿节理面发生剪切破坏, 因此曲线 ABC 将不再出现, 此后试件将沿节理面发生剪切滑移, 即对应于应力应变曲线中的应变增加, 应力降低, 即应变软化阶段。这里为简单起见, 拟采用 CD 段曲线作为节理试件沿节理面发生剪切破坏后的软化阶段, 即把 CD 段平移到 A 点, 那么曲线 OAE 即为考虑节理剪切破坏时的岩体应力应变曲线。

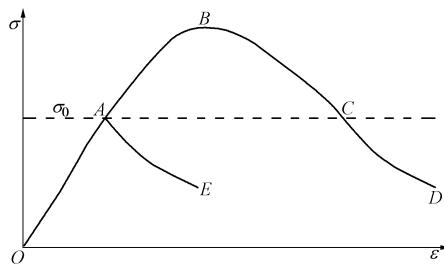


图 5 考虑节理剪切强度的岩体应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of rock mass considering shear strength of joint

2 算例分析

为了说明上述模型的合理性及讨论节理倾角对贯通节理岩体动态力学特性的影响, 这里以文献[23]试验资料为例, 采用本文所提出的本构模型进行讨论。试验所用岩石的弹性模量 $E_r=6949$ MPa, $m=3.3352$, $\varepsilon_0=0.0128$ 。含有如图6所示的倾角为 45° 的贯通节理, 由于没有对实际节理的参数进行测试, 这里参照有关文献[20]取 $E_j=1978$ MPa, $\varepsilon_{j0}=0.023$, $k_s=2$ GPa/m, $L=0.1$ m, $\eta=0.1$ MPa·s, $c_j=1$ MPa, $\varphi_j=35^\circ$ 。取动态载荷应变率为 $10/s$, 则由式(8)并考虑节理剪切强度对模型的修正可得其应力-应变曲线如图7。

由图7所示计算结果可知:

(1) 首先从应变上来看, 若把岩体看作是由完整岩块和节理面组成的复合体, 其在压缩荷载下的总变形则为岩块和节理面二者变形之和, 同时节理面变形在整个岩体变形中所占比例更大, 尤其是当节理面的闭合模量和剪切刚度较小而最大闭合应变较大时, 因而导致计算出的岩体总应变明显增加。就本算例而言, 当完整岩石的总应变仅为 0.015 时, 节理岩体的总应变

则达到了 0.03, 这其中的大部分都是由于节理的闭合及剪切滑移产生。

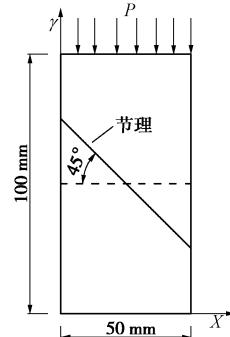


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Computational model

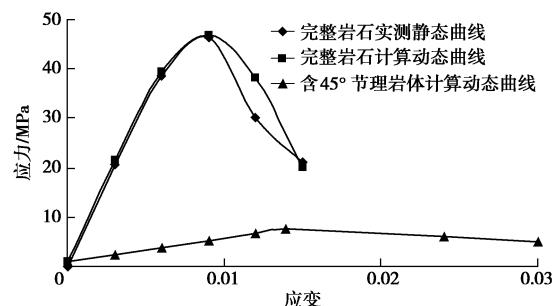


图 7 节理岩体动态应力应变曲线计算结果

Fig. 7 Dynamic stress-strain curves of jointed rock mass

(2) 其次从峰值强度上来看, 节理岩体的动态峰值强度为 7.67 MPa, 而对应计算完整岩石的静态峰值强度则为 45.92 MPa, 因此仅约为其 16.7%, 这说明节理对岩体强度的削弱十分明显, 而载荷应变率虽然能在一定程度上提高试件强度, 但就本算例而言, 其对岩体强度的提高程度远小于节理对其强度的削弱程度。

(3) 最后, 从应力应变曲线的斜率可以看出, 含 45° 节理的岩体应力应变曲线的斜率明显低于完整岩石, 由于应力应变曲线的斜率反映的是岩体的弹性模量, 因此可以得出节理岩体的杨氏弹性模量为 477 MPa, 而相应完整岩石的计算杨氏弹性模量则为 6894 MPa, 约为其 6.92%。因此可以认为节理岩体的弹性模量较完整岩石有明显降低, 这主要是由于节理充填物的弹性模量远远低于相应的完整岩石, 因此造成其弹性模量明显下降, 抵抗变形能力明显减弱。

下面利用上述本构模型讨论节理倾角试件力学特性的影响规律。

计算模型仍为图 6 所示, 取节理倾角分别为 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 及 90° , 其余计算参数仍同上, 计算结果如图 8 所示, 可以看出:

(1) 由单轴压缩动态应力应变曲线即图 8 (a) 可以看出, 7 种不同节理倾角岩体的应力应变曲线几乎各不相同, 其中 90° 节理试件的总应变最小, 峰值强度最大, 这主要是由于在如图 6 所示的压缩荷载下, 90° 节理不会受到压缩及剪切作用, 因而也不会产生闭合及剪切变形, 所以试件的垂直变形仅为完整试件的垂直变形, 而不包括节理面的变形, 因此其总变形量很小, 因此对应的峰值应变和总应变也很小; 而对于 0° 节理试件, 在垂直荷载作用下, 虽然没有沿节理面的剪切变形, 但却存在节理面的闭合变形, 因此其应变量大于 90° 节理试件。而在压缩荷载下, 0° 节理试件不会发生沿节理面的剪切破坏, 而仍为沿完整试件的张拉破坏或劈裂破坏, 因此其强度仍较高, 几乎和完整岩石试件相同; 然而当节理倾角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时, 在压缩荷载作用下, 节理面既有压缩闭合变形也有剪切变形, 因此这不但造成其变形增加, 而且还大大降低了其强度, 因此这些节理试件的总应变均有不同程度的增加, 而且其峰值强度也有明显降低。

(2) 为了研究节理倾角对试件峰值强度及破坏模式的影响, 取节理倾角由 0° 逐渐增加到 90° , 步长为 5° , 计算结果如图 8 (b) 所示。可以看出, 随着节理倾角的变化, 试件强度及破坏模式将分为 4 个阶段, 即当节理倾角为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 及 $85^\circ \sim 90^\circ$ 时, 试件强度基本与完整岩石相同, 破坏模式主要为完整岩块的张拉或剪切破坏; 当节理倾角为 $5^\circ \sim 40^\circ$ 时, 随着节理倾角的增加, 试件强度逐渐降低, 破坏模式主要为完整岩块的张拉或剪切破坏与沿节理面剪切破坏的混合破坏模式; 当节理倾角为 $40^\circ \sim 85^\circ$ 时, 试件强度随节理倾角呈抛物线规律变化, 其中当节理倾角约为 $60^\circ \sim 65^\circ$ 时, 试件强度最低, 约为 3.88 MPa , 破坏模式为沿节理面剪切破坏, 这与相关理论及试验结果是一致的^[8]。

由图 8 所示计算结果可以明显看出, 随着节理倾角的变化, 试件的峰值强度及破坏模式均有随之有明显变化, 但是这与相关研究者如 Wang 等^[24]所得出的结论则有一定差异, 最大的差别在于他们认为当节理倾角为小于其内摩擦角 φ 时, 节理试件强度等于完整试件强度, 相应的破坏模式为完整岩石的张拉或剪切破坏, 且节理试件的强度均等于完整岩石试件的强度。而本文的研究结果则认为当节理倾角小于其内摩擦角度时, 试件的破坏模式为可能为完整岩块的张拉或剪切破坏, 也可能为上述破坏模式与沿节理面剪切破坏的混合破坏, 相应试件的强度也介于完整岩石强度与节理剪切强度之间, 这与文献[25]中的阐述是一致的。王学滨^[26]也采用 FLAC 软件模拟了节理倾角对节理岩

样峰值强度的影响, 其中节理由实体单元模拟, 并分别采用莫尔库仑与拉破坏复合的破坏准则和莫尔库仑破坏准则来描述岩石和节理的破坏, 二者的本构模型均采用弹塑性本构模型。结果表明当节理倾角小于其内摩擦角 (文中取节理内摩擦角为 38°) 时, 试件并非都表现为完整岩石的破坏, 而且试件强度随着节理倾角在 $7.1^\circ \sim 33.7^\circ$ 变化时也有所不同, 且均不等于完整岩石的强度。同样陈新等^[27]的试验结果也表明当节理连通率为 0.8 时, 试件峰值强度随节理倾角的变化规律为 $\sigma_{90^\circ} > \sigma_{0^\circ} > \sigma_{75^\circ} > \sigma_{15^\circ} > \sigma_{30^\circ}$ 、 $\sigma_{60^\circ} > \sigma_{45^\circ}$, 因此该结果也说明当节理倾角小于其内摩擦角时, 试件峰值强度并非都相同, 且不等于完整岩石试件强度。分析认为 Wang 等^[24]得出“当节理倾角小于其内摩擦角时, 节理试件强度与完整试件相同”结论的前提是把岩块视为弹性体, 而这与实际存在误差, 尤其是当岩石强度较低且在压缩荷载下塑性变形不可忽略时, 误差更大。

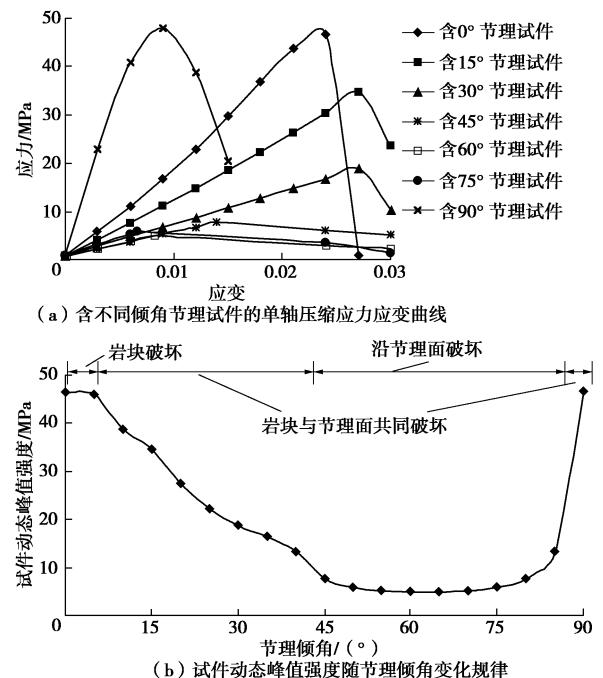


图 8 含不同倾角节理试件的力学特性

Fig. 8 Mechanical properties of jointed samples with different joint dip angles

3 结 论

(1) 本文提出的贯通节理岩体动态压缩损伤本构模型同时考虑了其内部宏、细观两类不同尺度缺陷及载荷应变率对其动态力学特性的影响。把贯通节理岩体的动态应力看作是相应试件的静态应力与反映应变率效应的动态附加应力的叠加。同时基于岩体结构力学观点, 把岩体在静载下的变形视为岩块变形与节

理面变形之和，并分别采用基于统计损伤模型的弹性损伤变形元件和考虑节理面闭合及剪切的变形元件描述岩块和节理面在压缩荷载下的变形规律。同时考虑节理剪切破坏对上述模型进行了修正，最终得到了贯通节理岩体的动态损伤本构模型。

(2) 通过引用相关试验资料对该模型的合理性进行了初步验证。对本算例而言，宏观节理对岩体动态强度的影响远大于载荷应变率，含单条 45° 的贯通节理岩体试件的动态峰值强度仅为相应完整岩石静态强度的 16.7%。这说明节理存在对岩体强度及变形特性有很大影响。

(3) 利用该模型研究了节理倾角对岩体单轴动态压缩应力应变曲线及峰值强度的影响，结果表明节理存在对岩体动态强度、变形及破坏模式均有明显影响。并重点讨论了节理倾角对岩体动态峰值强度的影响，通过与相关文献研究结果的对比分析认为，由本文所提出的岩体损伤本构模型同时很好地考虑了岩石的塑性变形、强度破坏及节理面的压缩和闭合变形与剪切破坏，与岩体的实际破坏特征比较吻合，说明了该模型的合理性。该模型的提出有望为贯通节理岩体单轴动态抗压强度及变形计算提供一条新方法。

参考文献：

- [1] LI Jian-chun, LI Hai-bo, MA Guo-wei. Stochastic seismic wave interaction with a rock joint having Coulomb-slip behavior[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, **2**(4): 321 – 330.
- [2] 廖志毅, 梁正召, 杨岳峰, 等. 刀具动态作用下节理岩体破坏过程的数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(6): 1147 – 1155. (LIAO Zhi-yi, LIANG Zheng-zhao, YANG Yue-feng, et al. Numerical simulation of fragmentation process of jointed rock mass induced by a drill bit under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(6): 1147 – 1155. (in Chinese))
- [3] KUMAR A. The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite[J]. *Geophys*, 1968, **33**(3): 501 – 510.
- [4] LI Jian-chun, MA Guo-wei, ZHAO Jian. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(B3): 1 – 10.
- [5] LU W B, YANG J H, YAN P. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, **53**(7): 129 – 141.
- [6] ZHANG Y H, FU X D, SHENG Q, et al. Study on elastic P-wave propagation law in unfavorable geologic structures with discontinuous deformation analysis method[J]. *Arab J Geosci*, 2013, **6**(11): 4557 – 4564.
- [7] LINDHOLM U S, YEAKLEY L M, NAGY A. The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt[J]. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, 1974, **11**(2): 181 – 191.
- [8] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. *Geological Magazine*, 1960, **97**(1): 65 – 79.
- [9] SAZID M, SINGH T N. Two-dimensional dynamic finite element simulation of rock blasting[J]. *Arab J Geosci*, 2013, **6**(10): 3703 – 3708.
- [10] JIA Peng, ZHU Wan-cheng. Dynamic-static coupling analysis on rockburst mechanism in jointed rock mass[J]. *Journal of Central South University*, 2012, **19**(11): 3285 – 3290.
- [11] 曹文贵, 赵衡, 张玲, 等. 恒应变率下的岩石三轴动态变形过程模拟方法[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(11): 1658 – 1664. (CAO Wen-gui, ZHAO Heng, ZHANG Ling, et al. Simulation method of dynamic triaxial deformation process for rock under invariable strain rate[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(11): 1658 – 1664. (in Chinese))
- [12] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(11): 1771 – 1776. (SHAN Ren-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage models of rock under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(11): 1771 – 1776. (in Chinese))
- [13] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 节理岩体复合型多弱面软化模型的研究及实现[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(2): 185 – 191. (ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, CAI Yong-cang. Mixed multi-weakness plane softening model for jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(2): 185 – 191. (in Chinese))
- [14] GRADY D E, KIPP M A G. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. *Int Rock Mech Min Sci*, 1980, **17**(2): 147 – 157.
- [15] 张平, 李宁, 贺若兰. 含裂隙类岩石材料的局部化渐进破损能模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(10): 2043 – 2050. (ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruo-lan. Research on localized progressive damage model for fractured rocklike materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(10): 2043 – 2050. (in Chinese))
- [16] 李夕兵, 王卫华, 马春德. 不同频率载荷作用下的岩石节

- 理本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(2): 247 - 253. (LI Xi-bing, WANG Wei-hua, MA Chun-de. Constitutive model of rock joints under compression loads with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 247 - 253. (in Chinese))
- [17] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. J Applied Mech, 1951, **18**(9): 293 - 297.
- [18] TANG Chun-an, TANG Shi-bin. Applications of rock failure process analysis (RFPA) method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, **3**(4): 352 - 372.
- [19] 夏才初, 孙宗祺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 87 - 93. (XIA Cai-chu, SUN Zong-qi. Engineering rock mass joint mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 87 - 93. (in Chinese))
- [20] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 124 - 127. (SUN Guang-zhong. Structural mechanics of rock mass[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese))
- [21] KULATILAKE PHSW, LIANG L, GAO H. Experimental and numerical simulations of jointed rock block strength under uniaxial loading[J]. J Eng Mech, 2001, **127**(12): 1240 - 1247.
- [22] BARTON N. Review of a new shear strength criterion for rock joints [J]. Eng Geol, 1973, **7**: 287 - 332.
- [23] 凌建明, 孙 钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, **12**(4): 304 - 312. (LING Jian-ming, SUN Jun. On mesocrack damage of brittle rocks and its time-dependent characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, **12**(4): 304 - 312. (in Chinese))
- [24] WANG Tai-tien, HUANG Tsan-hwei. A constitutive model for the deformation of a rock mass containing sets of ubiquitous joints[J]. Int Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009(46): 521 - 530.
- [25] 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 59 - 65. (XIAO Shu-fang, YANG Shu-bi. Rock mass mechanics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 59 - 65. (in Chinese))
- [26] 王学滨. 节理倾角对单节理岩样变形破坏影响的数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, **38**(2): 24 - 29. (WANG Xue-bin. Effect of joint inclination on deformation and failure of rock specimen with a single joint in plane strain compression[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2006, **38**(2): 24 - 29. (in Chinese))
- [27] 陈 新, 廖志红, 李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(4): 781 - 789. (CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, LI De-jian. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(4): 781 - 789. (in Chinese))