

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

考虑裂隙变形参数的岩体单轴压缩损伤模型

刘红岩,张光雄,邹宗山,和铁柱

A uniaxial compression damage model for rockmass considering the crack deformation parameter

LIU Hongyan, ZHANG Guangxiong, ZOU Zongshan, and HE Tiezhu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208017

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate 刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

高应力区岩石统计损伤本构模型研究

A study of the statistical damage constitutive model of rock in high stress areas 贾逸, 魏良帅, 黄安邦, 和铭, 黄细超, 蓝康文 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 118-118

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage 李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46–56

循环荷载作用下正融粉质黏土强度特征与滞回环演化规律

Strength characteristics of the melting silty clay under cyclic loading and the evolution law of hysteresis loop 崔宏环, 王文涛, 何静云, 王小敬, 金成勇, 徐磊 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 174–182

考虑基质吸力的非饱和土邓肯--张统计损伤修正模型

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction 谭维佳,魏云杰,王俊豪,高敬轩 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 84-91

锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble 封陈晨, 李傲, 王志亮, 王浩然 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 90-96



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208017

刘红岩,张光雄,邹宗山,等.考虑裂隙变形参数的岩体单轴压缩损伤模型 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 85-92. LIU Hongyan, ZHANG Guangxiong, ZOU Zongshan, *et al.* A uniaxial compression damage model for rockmass considering the crack deformation parameter[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 85-92.

考虑裂隙变形参数的岩体单轴压缩损伤模型

刘红岩1,张光雄2,邹宗山2,和铁柱2

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;

2. 保利民爆哈密有限公司,新疆哈密 839000)

摘要:为了更准确地预测裂隙对岩体压缩力学特性(如强度和刚度)的影响,需要建立更为合理的裂隙岩体压缩损伤模型。为此,基于相关试验数据和裂隙岩体单轴压缩力学行为,采用损伤及断裂理论对目前断续裂隙岩体压缩损伤模型中存在的不足进行了深入分析,并对其进行了3方面的改进,即:不再将裂隙变形参数视为定值、考虑了裂隙面上法向正应力产生的负第一应力强度因子(*K*₁)、考虑了裂隙面上有效剪应力产生的*K*₁,由此最终提出了考虑裂隙变形参数的岩体单轴压缩损伤本构模型。最后采用试验数据对该模型的合理性进行了验证,发现与现有模型相比,该模型明显提高了岩体单轴压缩弹性模量和损伤值的预测精度,尤其是当裂隙倾角为 0°时,该模型计算得到的弹性模量为 4.306 MPa,与实测弹性模量 4.310 MPa 几乎相同。因此,该模型能够很好地刻画岩体单轴压缩力学行为,这也说明考虑裂隙变形参数对岩体单轴压缩力学特性的影响是十分必要的。该研究可为准确预测裂隙岩体的单轴压缩力学行为提供参考。 关键词:断续裂隙岩体;应力强度因子;单轴压缩损伤模型;损伤变量;裂隙变形参数

A uniaxial compression damage model for rockmass considering the crack deformation parameter

LIU Hongyan¹, ZHANG Guangxiong², ZOU Zongshan², HE Tiezhu²

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Poly Explosive Hami Co. Ltd., Hami, Xinjiang 839000, China)

Abstract: In order to accurately predict the effect of crack on the rockmass compression mechanical property such as strength and stiffness, a more reasonable compression damage model for the cracked rockmass is needed to be established. On basis of the relevant experimental data and mechanical behavior of the cracked rockmass under uniaxial compression, some deficiencies in the existing compression damage models for the rockmass with intermittent cracks are analyzed in detail. Three improvements are made to improve the existing methods, e.g., the crack deformation parameter is not taken as a constant, the negative first stress intensity factor K_1 produced by the normal stress on the crack face is considered, and K_1 produced by the effective shear stress on the crack face is considered. A revised uniaxial compression damage model for rockmass considering the crack deformation parameter is proposed and the validity of the proposed model is verified with the experimental data. The results show that the prediction of the rockmass elastic modulus and damage under uniaxial compression with the

收稿日期: 2022-08-10; 修订日期: 2022-09-29 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:北京市自然科学基金项目(8222031);哈密市科技计划项目(hm2021kj08);国家重点研发计划项目(2019YFC1509701)

第一作者:刘红岩(1975-),男,博士,教授,主要从事岩体损伤与断裂方面的研究与教学工作。E-mail: lhyan1204@126.com

proposed model are more accurate than those obtained with the existing models. Especially, when the crack dip angel is 0°, the rockmass elastic modulus obtained with the proposed model is 4.306 MPa, which is nearly equal to its tested value 4.310 MPa. The proposed model can perfectly describe the rockmass mechanical behavior under uniaxial compression, which also indicates that it is very necessary to consider the effect of the crack deformation parameter on the rockmass uniaxial compression mechanical property. This study can provide references for accurately predicting the rockmass mechanical behavior under uniaxial compression.

Keywords: rock mass with intermittent cracks; stress intensity factor; uniaxial compression damage model; damage variable; crack deformation parameter

由于长期地质作用及人类工程活动影响,岩体内 存在大量的节理、裂隙(这里统称为裂隙)等不连续结 构面。众多试验、理论及数值模拟研究均表明裂隙 的存在将劣化岩体力学特性,如强度、刚度等^[1-3],并 对边坡、隧道等岩体工程的变形及稳定性产生重要影 响^[4-5],因而引起国内外研究者的广泛关注。

由于单裂隙岩体是开展裂隙对岩体力学特性影 响研究的基础,因此很多学者都对含单条断续裂隙的 岩体压缩力学特性进行了试验研究[6-8],发现试件强 度及弹性模量均随裂隙倾角(这里指裂隙面法向方向 与压缩荷载作用方向之间的夹角)由 0°~90°呈开口 向上的类抛物线变化。但是目前的理论预测结果与 实测值在某些情况下仍存在较大误差[2],如当裂隙倾 角小于裂隙面摩擦角时,尤其是当裂隙倾角为0°时, 二者误差最大。这是因为理论研究认为当裂隙倾角 小于裂隙面摩擦角时,裂隙试件的抗压强度与相应的 完整试件相同[2]; 而试验结果却表明[8], 无论是试件的 抗压强度还是弹性模量,均与完整试件相差较大。相 反,当裂隙倾角为90°时,裂隙试件的抗压强度或弹性 模量与相应完整试件较为接近。这说明目前的裂隙 岩体力学模型仍需进一步改进,为此本研究以 Liu 等[2] 建立的断续裂隙岩体损伤模型为基础,结合压剪应 力下裂隙面的变形特征及裂隙尖端起裂机理,对其 进行改进,以计算单轴压缩下断续裂隙对岩体造成 的初始损伤,进而对断续裂隙岩体的弹性模量及损伤 进行预测,并与试验结果进行对比以说明该方法的合 理性。

1 断续裂隙岩体压缩损伤模型研究现状及 存在问题

由于岩体内的裂隙多属于三、四级结构面,具有 数量多和随机分布的特点,为此不少学者引入损伤力 学描述裂隙对岩体力学特性的影响^[9-10]。它将裂隙视 为岩体的一种天然缺陷(即损伤),认为裂隙存在将导 致岩体强度降低、柔度增加,由此引入损伤张量定义 裂隙对岩体造成的损伤。损伤张量的定义方法主要 分为3类。

(1)裂隙几何损伤张量定义法:如 Kawamoto 等^[9] 和 Swoboda 等^[11] 采用裂隙密度、迹长或表面积、法向 矢量等几何参数表示的二阶损伤张量。该方法认为 裂隙对岩体造成的损伤由裂隙几何参数决定,与其力 学参数无关,因此该方法仅适用于描述拉伸而非压缩 下的岩体损伤。因为在压缩荷载下,裂隙面将闭合,其 闭合及摩擦效应必将阻碍岩体破坏,进而提高其强度。

(2)裂隙几何及强度参数的损伤张量定义法:Liu 等^[2]、陈文玲等^[10]、Li等^[12]针对几何损伤张量定义中 未考虑裂隙强度参数的不足,基于损伤和断裂力学中 的能量原理提出了同时考虑裂隙几何参数(如裂隙长 度、倾角、条数等)和强度参数(如裂隙面摩擦角等) 的损伤张量定义方法,很好地同时考虑了裂隙强度及 几何参数对岩体力学特性的影响。然而由于该方法 是以裂隙面上的有效剪应力是否大于0来判断其对 岩体造成的损伤,因此当裂隙倾角小于裂隙面摩擦角 时(忽略裂隙面黏聚力的影响),如裂隙倾角为0°时, 裂隙对岩体造成的损伤为 0, 即此时裂隙试件的强度 及弹性模量与完整岩石相同。易婷等四对标准圆柱形 试件(图1)进行单轴压缩试验,在试件中心制作一条 长为15mm的裂隙,裂隙倾角分别取为0°、15°、30°、 45°、60°、75°、90°。这里基于 Lemaitre 应变等效假设 用试件单轴压缩弹性模量定义其在压缩方向上的损 伤值(D)^[13]:

$$D = 1 - E_{\rm c}/E_0 \tag{1}$$

式中: E. 一裂隙试件弹性模量/MPa;

 E_0 ——完整试件弹性模量/MPa。

由图 1 可知, *E*。随裂隙倾角的变化而变化, 其中 裂隙倾角为 0°时, *E*。为 4.31 MPa, 远小于 *E*。(4.98 MPa),



Fig. 1 Variation of the sample elastic modulus and damage with the crack dip angle

而当裂隙倾角为90°时, *E*。为4.78 MPa, 与相应完整试件的 *E*。较为接近。但是按照有关学者的损伤变量定义方法^[2, 10, 12], 裂隙倾角为 0°和 90°试件的 *E*。均应与 *E*。相等。因此, 考虑裂隙几何及强度参数的损伤张量 定义法仍不能很好地反映裂隙对岩体的损伤特性。

(3)裂隙几何、强度及变形参数损伤张量定义法: 刘红岩等^[14]针对试件裂隙面在压缩过程中还会产生 一定的闭合及剪切滑移变形的情况,认为应同时考虑 裂隙变形参数(如法向及切向刚度)对试件力学特性 的影响,由此提出了同时考虑裂隙几何、强度及变形 参数的损伤张量计算方法,全面考虑了裂隙性质对岩 体力学特性的影响。

尽管刘红岩等[14]提出的损伤张量计算方法全面 考虑了裂隙3类参数的共同影响,但仍存在3个方面 的问题。①关于压剪裂隙尖端应力强度因子的计算, 尤其是第一应力强度因子(K₁)的计算仍存在较大分 歧。因为断续裂隙在压缩荷载下往往首先在裂隙尖 端出现应力集中,进而出现翼裂纹的起裂和扩展,最 终导致岩体破坏。因此在损伤张量的计算中必须考 虑裂隙尖端的应力强度因子。经典断裂力学主要研 究拉剪裂隙尖端应力强度因子的计算方法,对岩体工 程中常见的压剪裂隙研究较少,导致目前对压剪裂隙 尖端KI的计算存在诸多争议。第一种观点认为在压 缩荷载下裂隙面闭合,由于物质的不可侵入性,裂隙 尖端 I 型应力分量的奇异性将不复存在,因而 K_1 = 0, 如李世愚等[15]; 同时很多学者[16-17]采用复变函数方 法,经过严格理论推导,也得到同样的结论。第二种 观点认为压剪裂隙尖端的K1可取为负值,即将对应的 拉伸状态下的K1取负值即可。如周群力[18]认为法向 压应力引起的负K1对压剪裂隙的剪切滑移破坏有遏 制作用,所以应该予以考虑,并由此提出了相应的压 剪断裂准则。因此采用何种理论对裂隙尖端的 K₁进 行计算仍是亟待解决的一个理论难题。②该计算方 法虽然考虑了裂隙的法向及切向刚度,但是其认为二 者为定值,即不随裂隙面上法向及切向应力的变化而 变化。然而王芝银等^[19]和 Bandis等^[20]的研究均认为 裂隙法向和切向刚度与裂隙面上的法向压应力是成 正比的,即二者随着法向压应力的增加而增加。因 此,裂隙变形参数不应取为定值,而应为裂隙面上法 向压应力的函数。③该计算方法认为压剪裂隙面上 的有效剪应力仅对裂隙尖端 II 型应力强度因子(*K*_π) 有贡献,然而 Liu 等^[21]认为裂隙面上的有效剪应力还 将对裂隙尖端的*K*₁有贡献,而目前绝大多数研究均忽 略了这一点。

为此,本研究在前人研究基础上,对断续裂隙岩体在单轴压缩下的力学特性进行研究,针对上述3个问题,以含单条断续裂隙的岩体为例,对前人提出的 岩体损伤变量计算方法进行改进,进而提出考虑裂隙 变形参数的岩体单轴压缩损伤模型,并由此估算其单 轴压缩弹性模量及损伤。

2 断续裂隙岩体单轴压缩损伤模型

2.1 断续裂隙造成的岩体损伤变量计算

以单轴压缩下含单条断续裂隙的岩体(图 2)为例 进行研究,裂隙长为 2a、倾角为 a, E、v 分别为相应完 整岩石的弹性模量及泊松比。平面应力条件下,该裂 隙对岩体造成的垂直方向上的损伤(D_v)为^[12]:

$$D_{v} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{V} \frac{1}{\sigma^{2}} \int_{0}^{A} \left(K_{I}^{2} + K_{II}^{2}\right) dA}$$
(2)

式中: D,——裂隙对岩体造成的垂直向的损伤;

σ——作用于岩体的垂直应力/MPa;

 K_1 ——裂隙尖端 I 型应力强度因子/(MPa·m^{1/2});

K_Ⅱ——裂隙尖端 II 型应力强度因子/(MPa·m^{1/2});

V──岩石试件的体积/m³;

A——裂隙表面积/m²,对于单个中心裂隙, A=2Ba;

- a——裂隙半长/m;
- B——裂隙深度/m。

如前所述,周群力^[18]提出应考虑法向压应力引起 的负*K*₁对压剪裂隙剪切滑移破坏的遏制作用,这是因 为其通过试验发现随着法向应力的增加,裂隙面上的 摩阻力随之呈非线性增加,且表现为裂隙面上的摩擦 力和啃断效应产生的阻力之和。而以往研究大多仅 考虑了裂隙面上的摩擦力,且认为摩擦系数不变^[2,10,12-13], 显然这与实际情况存在较大误差。因此,本文采用周



群力¹¹⁸¹的观点,考虑负 K₁对岩体压剪破坏的影响。 但是按照该观点,拉伸和压缩下的 K₁仅符号不同,而 由式(2)可知,2种情况下的损伤是相同的,即拉伸 和压缩条件下,裂隙对岩体造成的初始损伤是相同 的。余贤斌等^[22]通过试验发现,岩石的压缩弹性模量 总是大于拉伸弹性模量,二者之比大多为1~2; Jeager 等^[23]更是断言,大多数岩石的拉伸弹性模量都小于 其压缩弹性模量。由此可认为同样的裂隙对岩体在 拉伸和压缩2种情况下造成的损伤则是不同的。为 此,本研究根据压缩下裂隙面的受力及变形特征,考 虑裂隙面有效剪应力对裂隙尖端受力特征的影响,并 通过引入裂隙面传压及传剪系数以考虑拉、压损伤的 不同。

2.2 断续裂隙尖端应力强度因子

对于完整岩石, 在倾角为α的斜面上, 其正应力 (σ'_a)和剪应力(τ'_a)分别为:

$$\sigma'_{\alpha} = \sigma \cos^2 \alpha, \, \tau'_{\alpha} = \sigma \sin \alpha \cos \alpha \tag{3}$$

而对于含有1条倾角为α、长度为2a的断续裂隙 岩体,由于裂隙的力学性质远低于相应的完整岩石, 因此该面上的正应力和剪应力将明显受控于裂隙的 力学性质。此时裂隙面上的正应力(σ_a)和剪应力(τ_a) 分别为:

$$\sigma_{\alpha} = (1 - C_{\rm n}) \cdot \sigma \cos^2 \alpha, \ \tau_{\alpha} = (1 - C_{\rm t}) \cdot \sigma \sin \alpha \cos \alpha \quad (4)$$

式中:
$$C_n$$
 一裂隙面传压系数^[21], $C_n = \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E}{(1-v^2)k_n}};$

 C_{t} 一裂隙面传剪系数^[21], $C_{t} = \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E}{(1 - \nu^{2})k_{s}}};$ k_{n} 一裂隙法向刚度/(MPa·m⁻¹);

 k_{s} —裂隙切向刚度/(MPa·m⁻¹)。

当 *a*=0 时,即岩体中不含裂隙,为完整岩石时,那 么 *C_n=C_i*=0,此时式(4)即为式(3)。

下面首先计算 σ_a 在裂隙尖端产生的应力强度因子。根据周群力^[18]的观点, σ_a 将在裂隙尖端垂直于裂隙面的方向上产生第一应力强度因子,这里记为 K_{11} ,其计算公式为:

$$K_{11} = -(1 - C_{\rm n}) \cdot \sigma \cos^2 \alpha \sqrt{\pi a} \tag{5}$$

其次,研究 τ_{α} 产生的裂隙尖端应力强度因子。若 设裂隙面摩擦角为 φ ,则裂隙面摩擦系数 $\mu = \tan \varphi$ 。忽 略裂隙面黏聚力,那么可得如图 2 所示的裂隙面上的 有效剪应力(τ_{eff})为:

$$\tau_{\rm eff} = \begin{cases} 0, & \alpha < \varphi \\ \tau_{\alpha} - \mu \sigma_{\alpha}, & \alpha \ge \varphi \end{cases}$$
(6)

由于裂隙面上的正应力垂直于裂隙面,因此其 不会使岩体在裂隙面产生剪切滑动,所以其不会在 裂隙尖端产生 K_{II} 。而由于裂隙面上的剪应力平行于 裂隙面,因此当 $\tau_{en}>0$ 时,其将会使岩体沿裂隙面产生 剪切滑移,进而在裂隙尖端产生 K_{II} ^[2,10,14–18],其计算公 式为:

$$K_{\rm II} = \begin{cases} 0, & \alpha < \varphi \\ \tau_{\rm eff} \sqrt{\pi a}, & \alpha \ge \varphi \end{cases}$$
(7)

然而当 $\tau_{eff}>0$ 时,由于裂隙面剪切滑移,将同时在 裂隙尖端出现拉应力,进而产生张拉破坏,这也是目 前裂隙尖端常出现的破坏形式。由此很多学者^[16-17] 引入最大周向拉应力准则来判断翼裂隙的起裂。在 剪切应力作用下,裂隙尖端将出现拉应力,进而将在 裂隙尖端产生第一应力强度因子,这里记为 K_{12} ,这是 目前绝大多数学者都忽略的问题。基于上述观点, Liu 等^[21]给出了 K_{12} 计算公式:

$$K_{12} = \frac{2}{\sqrt{3}} \tau_{\text{eff}} \sqrt{\pi a} \tag{8}$$

其方向沿着最大拉应力方向,通常与原裂隙走向 呈 70.5°。由此可知*K*₁₁、*K*₁₂的方向不同,所以二者不 能简单叠加。由于式(2)是基于能量方法得到的,无 需考虑应力强度因子的方向,所以式(2)可表示为:

$$D_{v} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{V} \frac{1}{\sigma^{2}} \int_{0}^{A} \left(K_{11}^{2} + K_{12}^{2} + K_{II}^{2}\right) dA}$$
(9)
将式(5)(7)(8)代入式(9)即可得:



进而通过将式(10)求出的损伤变量进行张量化即 可得到相应的损伤张量^[9]。由于本文仅考虑垂直方向 上的损伤,不再对其张量化。因此由该方法求出的损 伤变量同时考虑了裂隙的3类参数,即几何参数、强 度参数和变形参数的共同影响,因而也更符合实际情 况。但是由于裂隙变形参数的引入,导致式(10)无法 求得解析解,这里采用 Matlab 软件求其数值解。同时 需要说明的是式(10)中的裂隙法向及切向刚度 k_n、 k_s并非定值,而是随着裂隙面上应力的变化而变化, 这也是与刘红岩等^[14]提出的损伤变量计算方法的一 个不同之处。

2.3 裂隙变形参数的选取

如前所述,本研究的一个重要创新点就是引入裂 隙变形参数 k_n、k_s以考虑其对岩体力学特性的影响。 而它最早是由 Goodman 等^[24]、Bandis 等^[20]提出并用来 描述法(切)向应力与其相应位移之间的关系,由图 3 可将 k_n、k_s定义为:

$$k_{\rm n} = \frac{\partial \sigma}{\partial \delta_{\rm n}}, \quad k_{\rm s} = \frac{\partial \tau}{\partial \delta_{\rm s}}$$
 (11)

可以看出二者随载荷应力水平及裂隙面的变形 会有较大变化,而非定值,这一方面与荷载应力水平 有关,另一方面则与裂隙面性质如起伏度、充填及闭 合等有关。Barton 等^[25]的研究还发现 k_n、k_s具有明显 的尺寸效应,尺寸越小,其值就越大。因此 k_n、k_s的取





值范围也较大,约从 0.1 MPa/m 到 1 000 GPa/m 不等, 在实际工程中也难以准确测定,因此往往根据经验 选取。

3 算例分析

3.1 试验概况

以易婷等^[7]的试验为例进行研究,试验采用质量 比为1:1:0.4的石英砂:水泥:水的混合物配制类 岩石材料,将其制成标准圆柱形试件(直径 50 mm、 长度 100 mm),在试件初凝前拔出预埋的铝合金薄钢 片(长×宽×高=200 mm×15 mm×2 mm),在试件中心制 作一条长为15 mm 的裂隙,裂隙倾角分别取为0°、15°、 30°、45°、60°、75°、90°(图 1)。将试件静置 24 h 成型 后放入养护室养护 14 d,而后进行单轴压缩试验。采 用 MTS8150 电液伺服控制试验机以 0.02 mm/s 的速率 对试件进行匀速加载。测得完整岩石的单轴抗压强 度和弹性模量分别为 28.99 MPa、4.98 GPa。裂隙试件 的弹性模量及损伤如图 1。根据经验取岩石泊松比为 0.3,忽略裂隙摩擦角。

3.2 计算结果及分析

由于本文的一个重要创新点是在岩体损伤计算 中引入了裂隙变形参数,下面重点讨论其取值方法。 如前所述,由于裂隙法向及切向刚度与其受到的法向 压应力密切相关,因此其不能取为定值。同时由于其 随法向压应力的变化规律比较复杂,很难得到一个统 一的理论公式,大部分情况下只能通过试验获得其经 验公式。为此,本文给出裂隙法向及切向刚度选取的 2条原则:①法向及切向刚度的取值应符合图3所示 规律,即裂隙法向刚度随着裂隙面上法向应力的增加 而增加,而其切向刚度的变化规律则较为复杂。因 此,当裂隙倾角为0°时,试件峰值强度高,且裂隙面上 的应力全部为法向应力分量,而没有切向应力分量, 此时裂隙法向刚度应取大值,同时由于没有切向应力 分量,所以切向刚度对计算结果没有影响。随着裂隙 倾角的增加,裂隙面法向应力越来越小,相应地其法 向刚度也随之降低。②在符合上述总体规律的前提 下,裂隙刚度取值仍存在一定范围,此时以使岩体损 伤计算值与试验值的误差最小为标准,选取裂隙刚度 值。基于上述2条原则,通过试算,对不同裂隙倾角 的试件,其法向与切向刚度的取值如表1。

表 1 不同倾角时的试件裂隙变形参数 k_n、k_s Table 1 Crack deformation parameters k_n and k_s for the samples with different crack dip angles

$k_{\rm r/}({\rm GPa}\cdot{\rm m}^{-1})$ 1.95 1.85 1.55 1.3 1.0 0.1	a/(°)	0	15	30	45	60	75	90
	$k_{\rm n}/({\rm GPa}\cdot{\rm m}^{-1})$	1.95	1.85	1.55	1.3	1.0	0.1	/
$k_s/(\text{GPa·m}^{-1})$ / 1.5 1.6 2.0 1.55 0.001	$k_{\rm s}/({\rm GPa}\cdot{\rm m}^{-1})$	/	1.5	1.6	2.0	1.55	0.001	/

注:"/"表示可取任意值。

根据表1中的裂隙刚度和其他材料参数,由式 (10)可计算得到单轴压缩下裂隙试件的损伤值,进而 由式(1)计算得到裂隙试件的单轴压缩弹性模量,二 者随裂隙倾角变化规律如图4所示。为了进行对比 说明,同时给出未考虑裂隙变形参数的Li模型^[12]和 虽然考虑了裂隙变形参数,但是其认为裂隙变形参 数为定值的刘红岩模型^[14]的计算结果,其中刘红岩模 型^[14]中的裂隙刚度取值参考表1,均取为1.5 GPa/m, 其计算结果如图4所示。这里需要说明的是采用上







述2个模型计算时,均认为K1可取负值。

由图4可知,当裂隙倾角为0°时,本文模型计算 得到的弹性模量 4.306 MPa 与实测弹性模量 4.310 MPa 几乎相等; 而 Li 模型^[12] 和刘红岩模型^[14] 计算出的弹 性模量分别为 4.65 MPa 和 4.21 MPa,误差分别为 7.89% 和-2.32%, 与实测结果相差较大。这是因为当裂隙倾 角为0°时,由式(2)计算出的试件损伤较小,即含水平 断续裂隙试件与完整试件的弹性模量比较接近,而绝 大多数试验结果[7-8]均表明前者小于后者,这说明 Li 等^[12] 提出的损伤变量计算公式存在一定缺陷: 当不 考虑裂隙法向及切向刚度时,就无法考虑垂直压应力 下由于裂隙闭合而产生的不均匀变形以及裂隙尖端 出现的应力集中。试验测试结果表明¹⁸,在垂直压应 力下,往往会在裂隙尖端首先出现破坏,并产生张拉 翼裂纹。而本文提出的压缩损伤变量计算方法由于 引入了裂隙变形参数,因而能够很好地考虑由于裂隙 闭合及滑移变形而导致的裂隙尖端拉应力,所以计算 结果更接近实测值。刘红岩模型141也考虑了裂隙变 形参数的影响,其计算误差小于相应的 Li 模型^[12],这 说明考虑裂隙变形参数仍是十分必要的;但是其认为 裂隙变形参数为定值,不随应力而变化,由图3可知, 这显然不合理,因此其计算结果与实测值仍存在一定 误差。总之,本文模型的一个重要优点是通过引入裂 隙变形参数且不再将其视为定值,这使得本文模型对 裂隙岩体单轴压缩弹性模量的预测更符合实际情况, 尤其是当裂隙倾角为0°时。

当裂隙倾角为0°~90°时,可以通过调整裂隙法向 及切向刚度以获得与试验值较为接近的计算结果,这 也是本文模型的一个优势。当裂隙倾角为90°时,此 时裂隙面上既无正应力,也无剪应力,因而从理论上 来说,其损伤值为0,从试验结果来看,即弹性模量与 完整试件的弹性模量也较为接近,误差仅为4.02%,这 可能是由于试验误差或本文模型缺陷所导致。由表1 可知,当裂隙变形参数较大时,试件损伤较小,即裂隙 变形参数的增加可以提高岩体强度和弹性模量,这与 Prudencio 等^[26]的研究结论一致。在试算过程中还发 现,尽管裂隙变形参数对岩体力学特性有一定影响, 但是其影响不是很明显,尤其是当裂隙变形参数减小 到一定程度后,其对损伤几乎没有影响。从损伤计算 结果来看,本文模型得出裂隙倾角为30°时,试件损伤 最大,而Li模型^[12]和刘红岩模型^[14]则认为当裂隙倾 角分别为0°和15°时,试件损伤最大,而实测结果则表 明当裂隙倾角为30°时,试件损伤最大,这与本文模型

结果计算比较一致。因此,这也说明了本文模型的合 理性。

4 结论

(1)在前人提出的断续裂隙岩体单轴压缩损伤模型的基础上,对其进行了3方面改进,即:不再将裂隙变形参数(如法向及切向刚度)视为定值、考虑了裂隙面上法向正应力产生的负K₁、考虑了裂隙面上有效剪应力产生的K₁。通过上述改进,提出了更加符合实际情况的断续裂隙岩体单轴压缩损伤模型,进而更好地实现了对断续裂隙岩体压缩弹性模量及损伤的预测。

(2)算例分析表明由本文模型预测的断续裂隙岩 体单轴压缩弹性模量及损伤更符合试验结果,说明了 本文模型的合理性。尤其是当裂隙倾角较小时,由于 裂隙变形参数的引入,该模型很好地弥补了现有模型 的缺点,提高了弹性模量及损伤的预测精度。

参考文献(References):

- [1] 张科,潘哲,刘享华.含折线型裂隙砂岩试件翼型裂纹起裂与扩展机制研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3):103-111.[ZHANG Ke, PAN Zhe, LIU Xianghua. Investigation of the wing crack initiation and propagation mechanism of the sandstone specimen containing a folded fissure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 103 111. (in Chinese with English abstract)]
- [2] LIU Hongyan, ZHANG Limin. A damage constitutive model for rock mass with nonpersistently closed joints under uniaxial compression[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 40(11): 3107 – 3117.
- [3] 王星辰,王志亮,黄佑鹏,等.预制裂隙岩样宏细观力 学行为颗粒流数值模拟[J].水文地质工程地质, 2021,48(4):86-92. [WANG Xingchen, WANG Zhiliang, HUANG Youpeng, et al. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021,48(4):86-92. (in Chinese with English abstract)]
- [4] Fan L F, Zhou X F, Wu Z J, et al. Investigation of stress wave induced cracking behavior of underground rock mass by the numerical manifold method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103032.
- [5] GAO Wei, DAI Shuang, XIAO Ting, et al. Failure process of rock slopes with cracks based on the fracture mechanics

method[J]. Engineering Geology, 2017, 231: 190 – 199.

- [6] 周杰,刘礼标,黄龙生.人工单节理砂岩的三轴试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):85-90.
 [ZHOU Jie, LIU Libiao, HUANG Longsheng. Triaxial compression test on sandstone specimen with single artificial joint[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4):85-90. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 易婷,唐建新,王艳磊.裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J].地下空间与工程学报,2021, 17(1):98 - 106. [YI Ting, TANG Jianxin, WANG Yanlei. Effect of fracture dip angle and number on mechanical properties and failure modes of rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1):98 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [8] XU Lei, GONG Fengqiang, LUO Song. Effects of preexisting single crack angle on mechanical behaviors and energy storage characteristics of red sandstone under uniaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 113: 102933.
- [9] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, 12(1): 1 – 30.
- [10] 陈文玲,李宁.含非贯通裂隙岩体介质的损伤模型
 [J].岩土工程学报,2000,22(4):430-434. [CHEN Wenling, LI Ning. Damage model of the rock mass medium with intermittent cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4):430 434. (in Chinese with English abstract)]
- [11] SWOBODA G, SHEN X P, ROSAS L. Damage model for jointed rock mass and its application to tunnelling[J].
 Computers and Geotechnics, 1998, 22(3/4): 183 – 203.
- LI N, CHEN W, ZHANG P, et al. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1071 1079.
- [13] JEAN L. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233 – 245.
- [14] 刘红岩,李俊峰,裴小龙.单轴压缩下断续节理岩体 动态损伤本构模型[J].爆炸与冲击,2018,38(2):
 316-323. [LIU Hongyan, LI Junfeng, PEI Xiaolong. A dynamic damage constitutive model for rockmass with

intermittent joints under uniaxial compression [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 316 – 323. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 李世愚,和泰名,尹祥础.岩石断裂力学[M].北京:科学出版社,2016. [LI Shiyu, HE Taiming, YIN Xiangchu. Rock fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [16] FAN Yong, ZHU Zheming, ZHAO Yanlin, et al. The effects of some parameters on perforation tip initiation pressures in hydraulic fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 1053 – 1060.
- [17] TANG S B. The effect of T-stress on the fracture of brittle rock under compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 79: 86 – 98.
- [18] 周群力. 岩石压剪断裂判据及其应用[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(3): 33 37. [ZHOU Qunli. Compress shear fracture criterion of rock and it's application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 33 37. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王芝银,段品佳.基于岩体三轴压缩试验的节理力学参数确定方法[J]. 岩土力学,2011,32(11):3219-3224. [WANG Zhiyin, DUAN Pinjia. A new method for determining mechanical parameters of joints based on triaxial compressive test for rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3219 3224. (in Chinese with English abstract)]
- [20] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &

Geomechanics Abstracts, 1983, 20: 249 - 268.

- [21] LIU Taoying, CAO Ping, LIN Hang. Damage and fracture evolution of hydraulic fracturing in compression-shear rock cracks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, 74: 55 – 63.
- [22] 余贤斌,王青蓉,李心一,等.岩石直接拉伸与压缩变形的试验研究[J].岩土力学,2008,29(1):18-22.
 [YU Xianbin, WANG Qingrong, LI Xinyi, et al. Experimental research on deformation of rocks in direct tension and compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):18 22. (in Chinese with English abstract)]
- [23] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 3rd ed. London: Chapman and Hall, 1979
- [24] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(3): 637 – 659.
- BATRON N R, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121 – 140.
- [26] PRUDENCIO M, JAN M V S. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 890 – 902.

编辑:刘真真