

DOI: 10.11779/CJGE201412011

单轴压缩下节理间距和倾角对岩体模拟试件强度和变形的影响研究

陈 新^{1, 2}, 李东威², 王莉贤², 张市飞²

(1. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过含一组预置张开裂隙石膏试件的单轴压缩试验, 系统地研究了当节理连通率固定时, 节理组的间距和倾角对试件强度和变形特性的影响。研究发现: ①随着节理间距的增大, 试件的应力-应变曲线的由单峰型变为多峰型, 延性增大。试验中观察到的应力-应变曲线包括4种类型, 单峰型、软化段多峰型、多峰平台后软化型和多峰平台后硬化型。②当节理间距不变时, 试件的当量化强度、当量化弹性模量和第一峰值应变随节理倾角的变化曲线都呈V型, 其最小值发生在节理倾角为45°处; 而残余强度与强度之比和第二峰值应变随节理倾角的变化规律则反之。③当节理倾角不变时, 当量化弹性模、当量化强度和第一峰值应变都随节理化系数的增大而减小; 而残余强度与强度之比和第二峰值应变则反之。④各节理倾角下, 试件的当量化弹性模和当量化强度随节理化系数的变化规律可以用相同形式的幂函数来表示。⑤上述宏观力学行为与预制节理闭合、次生裂隙发展等细观损伤力学机制密切相关。上述研究表明, 节理间距对岩体的强度和变形特性的影响有显著的各向异性。

关键词: 节理岩体; 倾角; 间距; 单轴压缩; 强度; 变形

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)12-2236-10

作者简介: 陈 新(1973-), 女, 副教授, 主要从事岩石力学与土木工程方面的研究和教学。E-mail: chx@cumtb.edu.cn。

Experimental study on effect of spacing and inclination angle of joints on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression

CHEN Xin^{1, 2}, LI Dong-wei², WANG Li-xian², ZHANG Shi-fei²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: For the gypsum specimens containing a set of preexisting open flaws with fixed joint continuity factor, the influences of inclination angle and spacing of joints on the strength and deformation of the jointed specimens under uniaxial compression are systematically investigated through experiments. It is found that: (1) With the increase of joint spacing, the axial stress-axial strain curve changes from single-peak curve to multi-peak one, indicating that the ductility of the specimens increases. Four types of stress-strain curves are observed, i.e., single-peak, multi-peak during softening stage, softening after multi-peak yield platform and hardening after multi-peak yield platform. (2) For the specimens with constant joint spacing, the curves of the unified Young's modulus, the unified strength and the first peak strain with the inclination angle of joints are V-shaped, and the minimum occurs at the inclination angle of 45 degrees, while the ratio of the residual strength to the strength and the last peak strain have inverse tendency. (3) For specimens with constant joint inclination angle, with the increase of the jointing index (the reciprocal of the joint spacing), the unified Young's modulus, the unified strength and the first peak strain decrease, while the ratio of residual strength to strength and the last peak strain increase. (4) For each joint inclination angle, the relation between the unified Young's modulus and the jointing index and that between the unified strength and the jointing index can be expressed by the power functions. (5) The macroscopic behavior of the jointed specimens is correlated to the closure of pre-existing joints and the cracking process of the specimen matrix. The anisotropic influence of joint spacing on the strength and deformation of jointed rock masses is significant.

Key words: jointed rock mass; inclination angle; spacing;

uniaxial compression; strength; deformation

基金项目: 国家自然科学基金项目(11102224)

收稿日期: 2014-04-14

0 引言

天然岩体内广泛存在片理、裂隙、节理、断层等不连续面。这些不连续面在空间分布上的多样性和其在各应力状态下力学响应的高度非线性,使得岩体的强度和变形呈现出显著的各向异性、非线性和非弹性等复杂特点。

岩体中的节理、裂隙大多成组出现且沿一些优势方位排列,对每组节理(平行和接近于平行的节理裂隙),表征其空间分布特征的参数^[1]包括:产状、连通率、间距或频数、密度、排列形式(对齐、错排或雁形等)等,而表征节理面物理力学特征的参数有:形貌、粗糙度、张开度、充填情况等。

在岩体力学中广泛采用的 Hoek-Brown 经验强度准则中,节理裂隙的影响是以岩体等级 RMR 在两个材料常数 m 和 s 中加以反映的。在岩体分类系统 RMR 中,节理间距、粗糙度、连通程度等的影响是以各向同性的方式来粗略地加以考虑。然而,节理网络的这些几何参数都是随节理组产状而变化的^[2],其本质上是一类标量方向分布函数^[3]。

为反映节理裂隙对岩体力学行为的各向异性影响,几何损伤张量的概念被广泛用于建立岩体的本构模型。这些几何损伤张量由两个要素组成:①每组裂隙面的法向单位矢量的各阶并矢,以不同的精度反映了裂隙网络的各向异性力学效应;②反映每组裂隙空间几何分布特征综合影响的标量,它是一个方向分布函数。在各类几何损伤张量中,第一要素完全相同,唯一的区别在于第二要素,即标量方向分布函数的表达式。例如,在 Oda 等^[4]提出的二阶和四阶裂隙张量中,标量函数是裂隙总体积密度、裂隙的半径三次方和裂隙半径与方位的概率分布函数的乘积。在 Kawamoto 等^[5]提出的二阶裂隙几何张量中,标量函数是裂隙总表面积与岩体体积之比。在 Swoboda 等^[6]提出的二阶损伤张量中,标量函数为该组裂隙的体积密度。

为了探究在不同应力状态下,节理岩体的力学行为与节理网络几何参数的相关关系^[7-16],国内外学者开展了大量的物理模拟试验研究。相对于岩体的现场原位测试而言,裂隙岩体的物理模拟试验的优势是成本低,可重复,能系统和有控制地变化节理面物理力学参数和节理网络空间分布几何参数。按照模拟试件的类型,这些试验可分为两大类,岩块单元堆砌体试件^[7-8]和预置断续裂隙试件^[9-16]。按照加载情况,这些试验又可分为单轴压缩^[9, 11, 16]、双轴压缩^[11, 13]、三轴压缩^[7-8]和直剪^[12, 14-15]等。

试验研究^[10, 15-16]表明,岩体的抗剪强度随着节理连通率的增大而降低的规律呈非线性。Lajtai 等^[10]根据试验中观察到的岩桥在不同法向压力下的拉、剪及压碎 3 种破坏模式,引入了节理强度启动系数的概念,建立了节理岩体的抗剪强度组合包络线模型。笔者^[16-20]曾系统地研究了节理倾角和节理连通率的组合变化时岩体模拟试件在单轴压缩下的力学特性,包括强度和弹模、应力应变曲线、变形特性、裂隙扩展机制、破坏模式和破碎体块度分形特征等。研究结果发现,随着节理连通率的增大,岩体的强度显著降低,变形显著增加,且强度和弹模随节理连通率的非线性和各向异性变化规律可以用幂函数来表示。

目前这方面的试验研究中,关于节理产状、节理连通率的影响研究较多,而关于节理间距或频数、节理密度、排列方式等的研究则相对较少。

在节理间距的影响研究方面, Einstein 等^[7]对岩块单元堆砌体试件开展了三轴压缩试验,研究了不同节理方位和节理间距下的含单个、一组和两组贯通节理的试强度和变形特性。研究发现,随着节理间距的增加,试件的强度降低、变形增大;脆-延转换应力随着破坏面与节理面相交数的增加而减小;试件的强度、变形都与节理方位有关,即节理间距的影响具有显著的各向异性。Goldstein 等^[10]的岩块单元堆砌体试件单轴压缩试验表明,试件强度和纵波波速随节理化系数(定义为试件边长与小块体边长之比)增大而降低,其非线性关系可以用幂函数式来表达。Prudencio 等^[13]对预置断续裂隙试件开展了双轴压缩试验,研究了在节理连通率变化不大(绝大多数为 $k=0.71$)的情况下,几种特定的节理间距、节理倾角、节理排列方式和中间主应力下的岩体强度和变形特征。

上述关于节理间距影响的试验研究中,采用的裂隙几何分布各不相同,且缺乏节理间距与节理网络其他几何参数如产状、连通率、密度、排布方式等的组合影响研究。在本文中,通过预置断续裂隙试件的单轴压缩试验,来系统地探究当节理连通率固定时,节理倾角和节理间距两个参数的组合变化对岩体强度和变形特性的影响规律。

1 试验条件

1.1 试件尺寸和节理排列方式

试件尺寸为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ (高 \times 宽 \times 厚),预制节理为穿透厚度的对齐排列裂隙,见图 1。

固定节理中心距 $h = 3 \text{ cm}$ 和节理连通率 $k = 0.4$ (节理长度 $L_j = 12 \text{ cm}$)。试验中研究 2 个裂隙几何参数:节

理倾角 β 、节理层间距 s 的组合变化。节理倾角 β 为加载面与节理面间的夹角, 取值有 5 个, 分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 。节理层间距 s 取值有 4 个, 分别为 150, 75, 60, 30 mm。共有 16 种的节理倾角 - 节理间距组合, 对每种情况, 制作不少于 3 个试件。

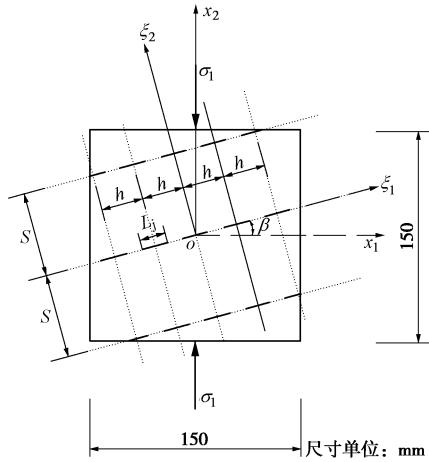


图 1 试验中研究的节理网络几何参数

Fig. 1 Joint arrangement and parameters of specimens

1.2 模型材料及试件制备

模型材料为水、石膏和水泥的混合物, 重量比为 $0.6:0.99:0.01$ 。预制节理为 0.3 mm 厚的张开裂隙, 通过将不锈钢片插入未凝固的模型材料混合物中形成。试件养护期为 21 d。

通过模型材料标准圆柱试件的单轴压缩试验、标准三轴压缩试验和圆盘试件的巴西劈裂试验, 测定了材料的单轴压缩强度、杨氏模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角和单轴抗拉强度。通过模型材料块体试件的剪切试验, 测定节理面的摩擦角。模型材料的各力学参数列于表 1。

表 1 模型材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of model materials

试件平均密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	单轴抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	杨氏模量 E /GPa	泊松比 ν	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 ϕ /($^\circ$)	节理面摩擦角 ϕ_f /($^\circ$)
1.149	8.31	1.65	2.94	0.23	2.0	34	32

1.3 试验设备及加载条件

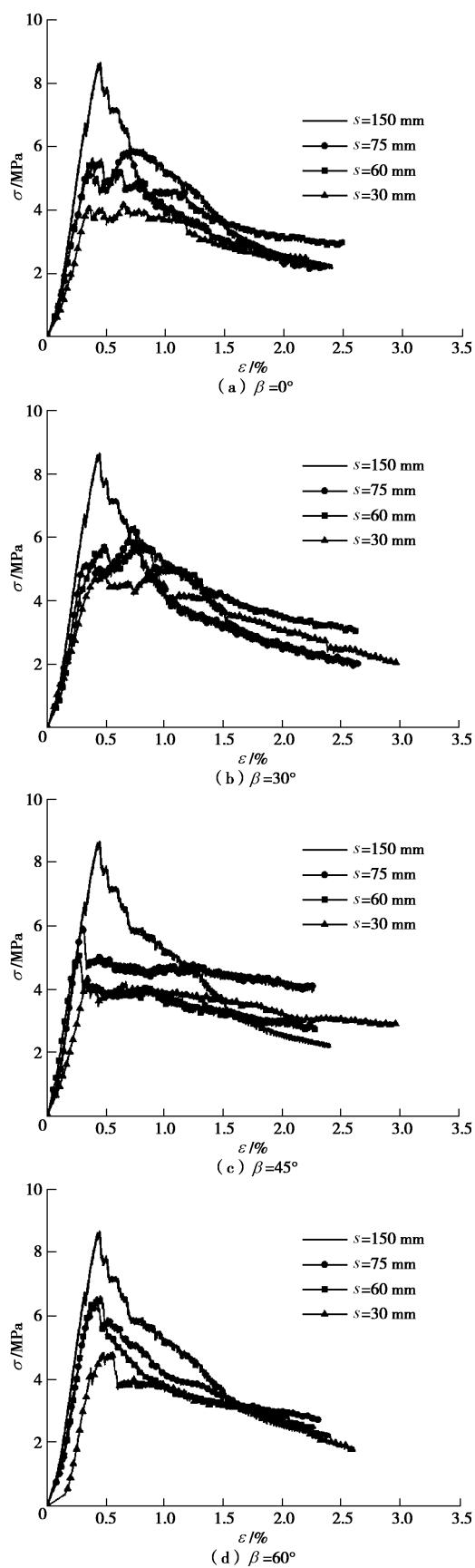
单轴压缩设备采用 INSTRON8506 四立柱液压伺服机。试验中, 主轴位移加载速率为 0.15 mm/min。在试验过程中系统输出主轴方向的荷载 - 位移, 并采用高清数码相机和录像机记录试件表面的破坏过程。

2 试验结果

2.1 应力 - 应变全曲线

对每种节理倾角 - 节理间距组合的各个试件, 根

据轴向的荷载和位移数据, 绘出轴向应力 - 应变全曲线。对各节理倾角 - 节理间距组合的代表性试件, 其轴向应力 - 应变全曲线见图 2。



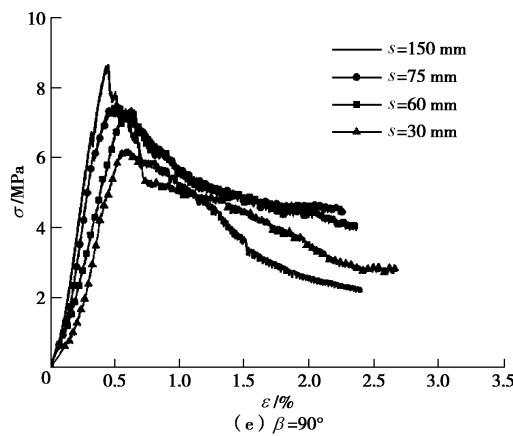


图 2 试件的轴向应力 - 应变全曲线

Fig. 2 Axial stress-axial strain curves for specimens with different joint spacings and inclination angles

笔者曾将各节理倾角 - 节理连通率组合下的岩体模拟试件应力应变全曲线划分为 4 个类型^[17]: 类型 I, 单峰型; 类型 II, 软化段多峰型; 类型 III, 多峰平台后软化型; 类型 IV, 多峰平台后硬化型。

在本次试验中, 各节理倾角 - 节理间距组合试件的应力应变全曲线也可以按这 4 种类型进行划分, 列于表 2。

可以看出, 各节理倾角的试件 (节理倾角 $\beta=90^\circ$ 的试件除外), 随着节理间距的减小, 应力 - 应变曲线由单峰变为多峰, 且出现较大的屈服平台, 延性增强。

表 2 各节理倾角和节理间距试件的应力应变曲线类型

Table 2 Types of axial stress-axial strain curves of jointed specimens with different joint inclination angles and spacings

节理倾角 β / (°)	节理间距 s			
	150 mm	75 mm	60 mm	30 mm
0		IV	III	III
30		IV	III	III
45	I	II	II	II
60		I	I	II
90		I	I	I

2.2 强度和变形参数随节理倾角的变化规律

对各节理倾角 - 节理间距组合的所有试件, 统计出每组试件的强度和变形参数的均值, 包括弹模、强度、残余强度、第一峰值应变和第二峰值应变。其中, 第一峰值应变和第二峰值应变分别指多峰应力 - 应变曲线的第一个峰值应力和最后一个峰值应力对应的应变。对于单峰曲线, 第一峰值应变和第二峰值应变相同。

为了度量节理对岩体强度和变形的影响程度, 引入如下的几个无量纲化参数^[17]: ①当量化弹性模量 E_{JR}/E_R , 定义为含节理试件的弹性模量 E_{JR} 与无节理试件的弹性模量 E_R 之比; ②当量化强度 σ_{JR}/σ_R , 定义为含节理试件的强度 σ_{JR} 与无节理试件的强度 σ_R 之比; ③残余强度与强度之比 σ_f/σ_f 。

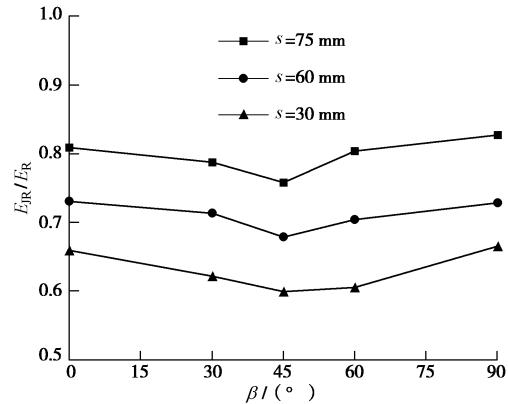


图 3 当量化弹模随节理倾角变化曲线

Fig. 3 Variation of unified Young's moduli with joint continuity factor of specimens with different joint spacings

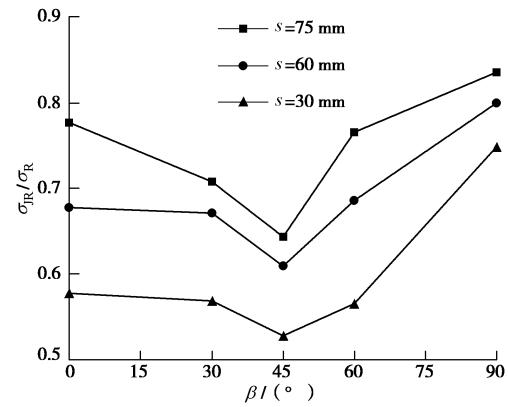


图 4 当量化强度随节理倾角变化曲线

Fig. 4 Variation of unified strengths with joint continuity factor of specimens with different joint spacings

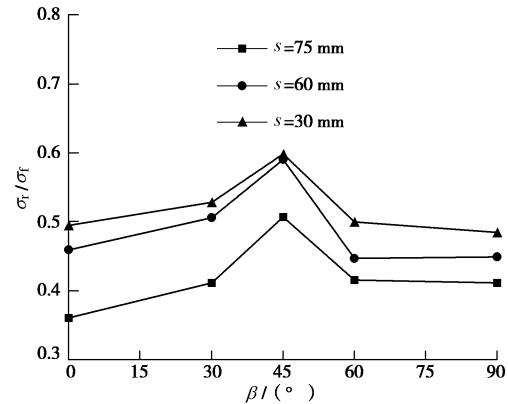


图 5 残余强度与强度之比随节理倾角变化曲线

Fig. 5 Variation of ratio of residual strength to strength with joint continuity factor of specimens with different joint spacings

上述强度和变形参数随节理倾角的变化曲线分别绘于图 3~7。可以看出, 各节理间距下, 当量化强度、当量化弹性模量和第一峰值应变随节理面倾角的变化曲线都呈 V 型, 其最小值发生在 $\beta = 45^\circ$ 处; 而残余强度与强度之比和第二峰值应变随节理面倾角的变化曲线都呈倒 V 型, 其最大值发生在 $\beta = 45^\circ$ 处, 它们

可作为度量试件延性或脆性程度的指标。

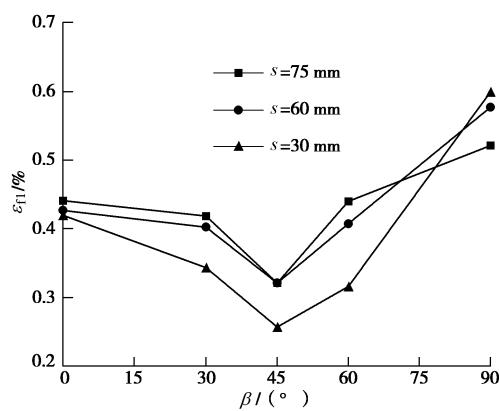


图 6 第一峰值应变随节理倾角变化曲线

Fig. 6 Variation of first peak strain with joint continuity factor of specimens with different joint spacings

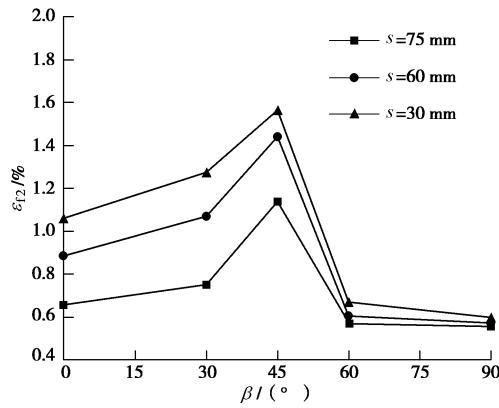


图 7 第二峰值应变随节理倾角变化曲线

Fig. 7 Variation of last peak strain with joint continuity factor of specimens with different joint spacings

2.3 强度和变形参数随节理间距的变化规律

在固定的节理连通率(节理长度)下,可以引入节理化系数 m 作为节理密度的无量纲化度量参数,定义为节理岩体的边长 L 与节理层间距 s 之比:

$$m = L/s \quad (1)$$

节理化系数 m 与节理层间距成反比,节理越密,节理间距越小,节理化系数越大。对本文试件,边长 $L=150\text{ mm}$, 相应于节理层间距 $s=150, 75, 60, 30\text{ mm}$ 的试件,节理化系数 m 分别为 $1.0, 2.0, 2.5, 5.0$ 。当量化弹模、当量化强度、残余强度与峰值强度之比、第一峰值应变和第二峰值应变随节理化系数 m 的变化曲线分别绘于图 8~12。

在各节理倾角下,当量化弹模、当量化强度和第一峰值应变(节理倾角 $\beta=90^\circ$ 为单峰型,除外)都随节理化系数的增大而减小;而残余强度与强度之比和第二峰值应变则反之,都随节理化系数的增大而增大。

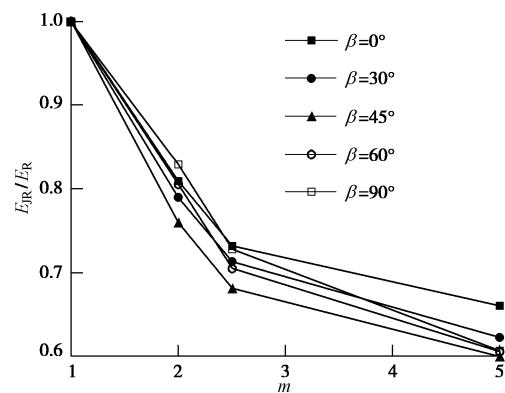


图 8 当量化弹模随节理化系数变化曲线

Fig. 8 Variation of unified Young's moduli with jointing index of specimens with different joint inclination angles

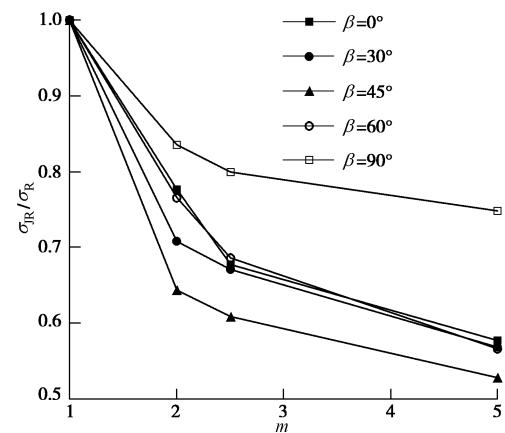


图 9 当量化强度随节理化系数变化曲线

Fig. 9 Variation of unified strengths with jointing index of specimens with different joint inclination angles

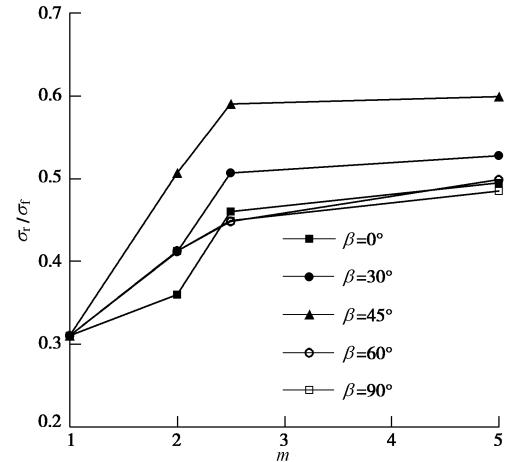


图 10 残余强度与强度之比随节理化系数变化曲线

Fig. 10 Variation of ratio of residual strength to strength with jointing index of specimens with different joint spacing

2.4 强度和弹模随节理间距变化的函数关系

Goldstein 等^[10]曾将试件强度与节理化系数的关系采用幂函数式来表达。孙卫军等^[21]则提出了与裂隙面面积、裂隙层距和裂隙中心距成指数函数关系的裂

隙几何损伤张量。前者表达式中的参数物理意义更为明确。

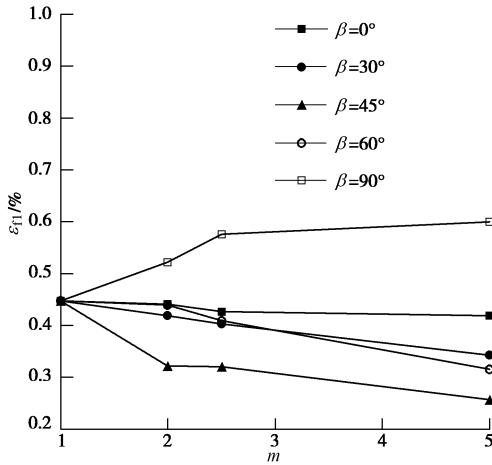


图 11 第一峰值应变随节理倾角变化曲线

Fig. 11 Variation of first peak strain with jointing index of specimens with different joint inclination angles

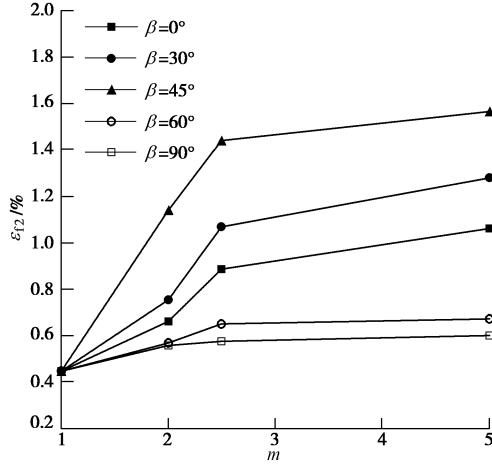


图 12 第二峰值应变随节理倾角变化曲线

Fig. 12 Variation of last peak strain with jointing index of specimens with different joint inclination angles

在本文中, 试件的节理中心距和节理长度固定, 可采用与 Goldstein 等^[10]相同形式的幂函数来拟合各节理倾角下节理试件当量化弹模随节理化系数 m 的非线性变化规律:

$$E_{JR} / E_R = a + (1 - a)m^{-b} \quad , \quad (2)$$

式中, a , b 为拟合参数。

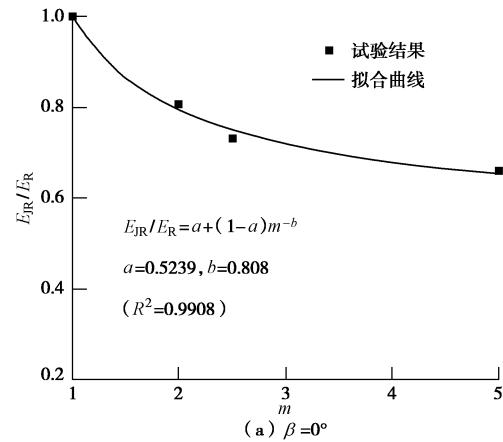
类似地, 各节理倾角下, 节理试件当量化强度随节理化系数的非线性变化规律也可表示为相同形式的幂函数:

$$\sigma_{JR} / \sigma_R = c + (1 - c)m^{-d} \quad , \quad (3)$$

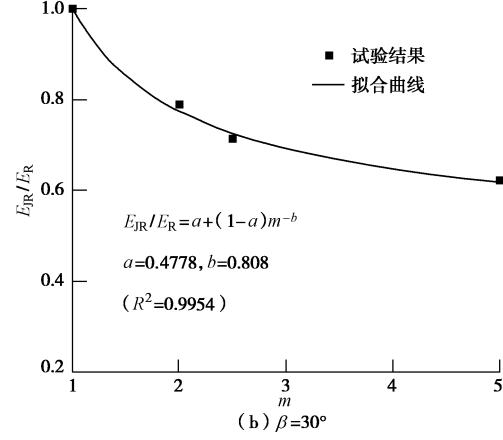
式中, c , d 为拟合参数。

显然, 参数 a 和 c 分别为节理化系数 m 趋于无穷大 (节理层间距趋于零) 时的当量化弹模和当量化强度值。而参数 b 和 d 则分别表征了随节理化系数 m 增大当量化弹模和当量化强度降低的速度。因此, 对各节理倾角试件, 可以取参数 b 和 d 为常数。在本文中,

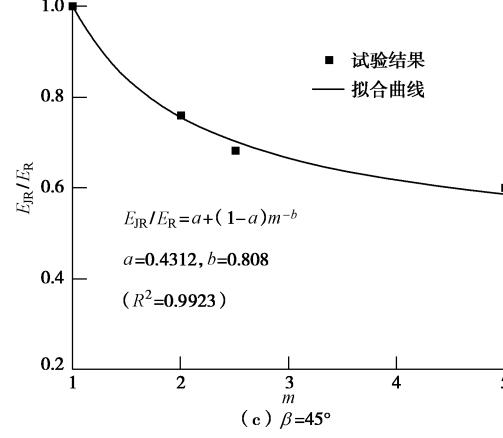
取 $b=0.808$, $d=1.07$ 。此时, 各节理倾角试件当量化弹模和当量化强度与节理化系数的拟合函数曲线分别见图 13, 14。



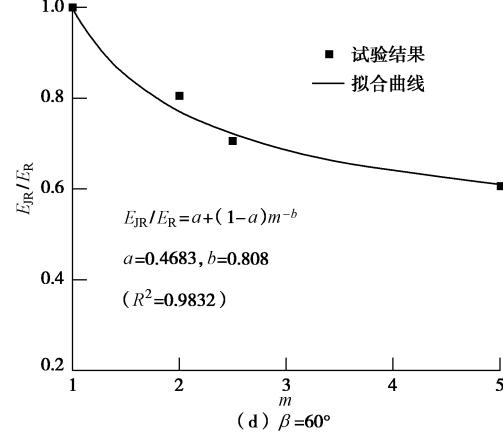
(a) $\beta = 0^\circ$



(b) $\beta = 30^\circ$



(c) $\beta = 45^\circ$



(d) $\beta = 60^\circ$

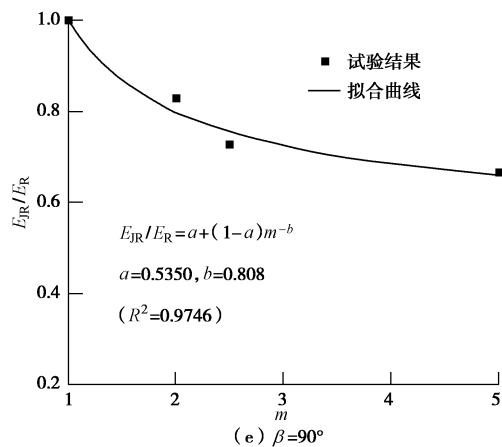


图 13 弹性模量与节理化系数幂函数的拟合参数

Fig. 13 Fitting of power functions between Young's Moduli and jointing index under different joint inclination angles

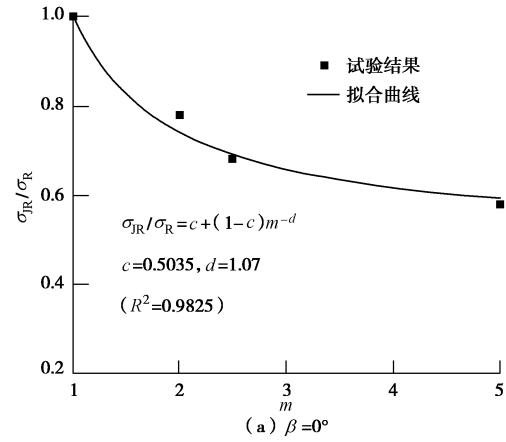
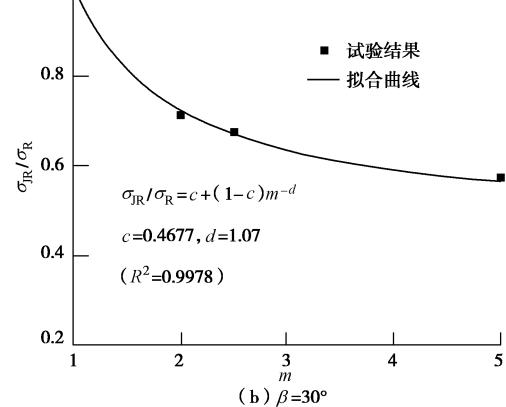
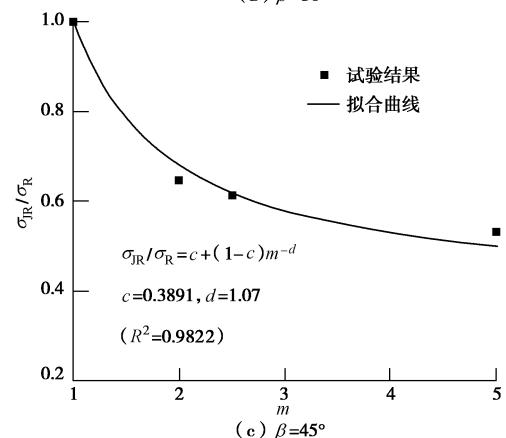
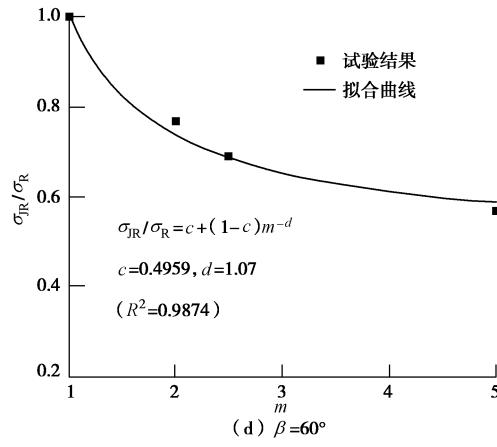
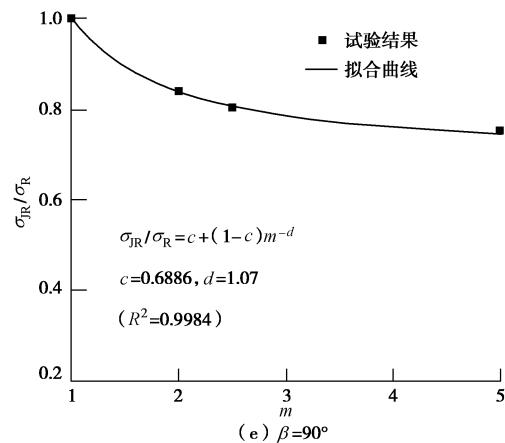
(a) $\beta=0^\circ$ (b) $\beta=30^\circ$ (c) $\beta=45^\circ$ (d) $\beta=60^\circ$ (e) $\beta=90^\circ$

图 13 弹性模量与节理化系数幂函数的拟合参数

Fig. 14 Fitting of power functions between strength and jointing index under different joint inclination angles

表 3,4 分别列出了不同节理倾角下节理岩体当量化弹性模量和当量化强度随节理化系数变化的各拟合曲线的参数、相关系数 R^2 和偏差平方和 RSS (residual sum of squares)。

表 3 试件当量弹性模量与节理化系数的幂函数参数

Table 3 Parameters of power function between Young's modulus and jointing index under different joint inclination angles

节理倾角 $\beta /(^{\circ})$	a	b	R^2	RSS
0	0.5239	0.808	0.9908	5.930×10^{-4}
30	0.4778	0.808	0.9954	3.590×10^{-4}
45	0.4312	0.808	0.9923	6.890×10^{-4}
60	0.4683	0.808	0.9832	1.430×10^{-3}
90	0.5350	0.808	0.9746	1.620×10^{-3}

表 4 试件当量化强度与节理化系数的幂函数参数

Table 4 Parameters of power function between peak strength and jointing index under different joint inclination angles

节理倾角 $\beta /(^{\circ})$	c	d	R^2	RSS
0	0.5035	1.07	0.9825	1.71×10^{-3}
30	0.4677	1.07	0.9978	2.29×10^{-4}
45	0.3891	1.07	0.9822	2.33×10^{-3}
60	0.4959	1.07	0.9874	1.26×10^{-3}
90	0.6886	1.07	0.9984	5.57×10^{-5}

图15, 16分别给出了参数 a 和 c 随节理倾角的变化曲线, 可以看出两条曲线都呈V型, 在 $\beta=45^\circ$ 取最小值。

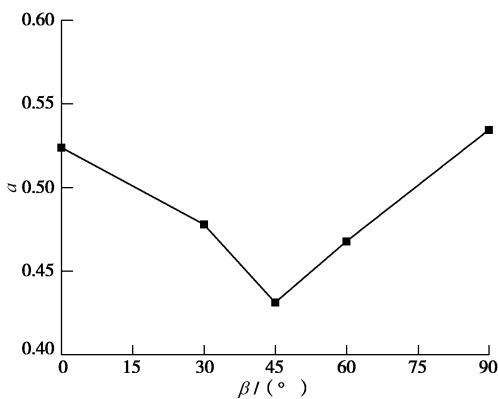


图15 拟合参数 a 随节理倾角的变化

Fig. 15 Variation of fitting parameter a with joint inclination angle

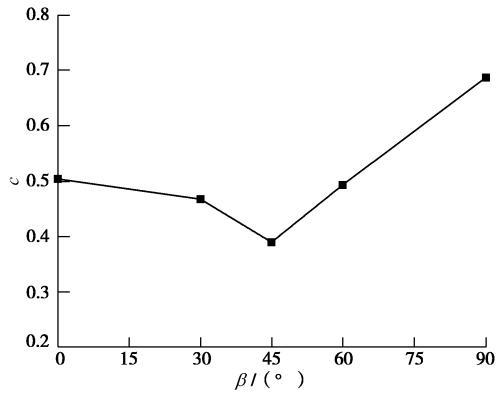


图16 拟合参数 c 随节理倾角的变化

Fig. 16 Variation of fitting parameter c with joint inclination angle

3 结果分析

上述节理岩体模拟试件的强度和变形随节理间距和节理倾角的变化规律, 与试件的细观损伤力学机制和破坏过程密切相关。图17给出了节理间距 $s=75$ mm、节理倾角分别为 $\beta=0^\circ$, 30° , 45° 和 90° 试件的破坏照片。图18给出了节理间距 $s=30$ mm, 节理倾角分别为 $\beta=0^\circ$, 30° , 45° 和 90° 试件的破坏照片。

可以看出, 对缓倾角的节理试件 ($\beta=0^\circ$ 和 30°) 预制节理在加载过程中发生了闭合, 同时试件内部出现了大量平行于加载轴方向的拉伸裂纹。预制裂隙的闭合将引起试件承载力的提高, 而拉裂纹的发展则引起试件承载力的降低, 两种机制并存导致了试件总的承载力保持不变, 从而在应力应变曲线中出现了较大的屈服平台 (类型 III 和 IV)。

对节理倾角为 45° 的试件, 节理间距的增加虽然导致次生拉裂纹的出现, 但并未改变试件的破坏模式,

两种节理间距下试件都是沿着对角线的节理面发生剪切贯通和滑移破坏。

对节理倾角为 90° 的两种节理间距试件, 在预制节理面上或岩桥内部产生了平行于加载轴方向的拉裂纹贯通, 并最终导致了劈裂破坏。由于短柱的受压承载力和平板试件的受压承载力差别不大, 从而并未造成试件强度随节理间距的显著降低。

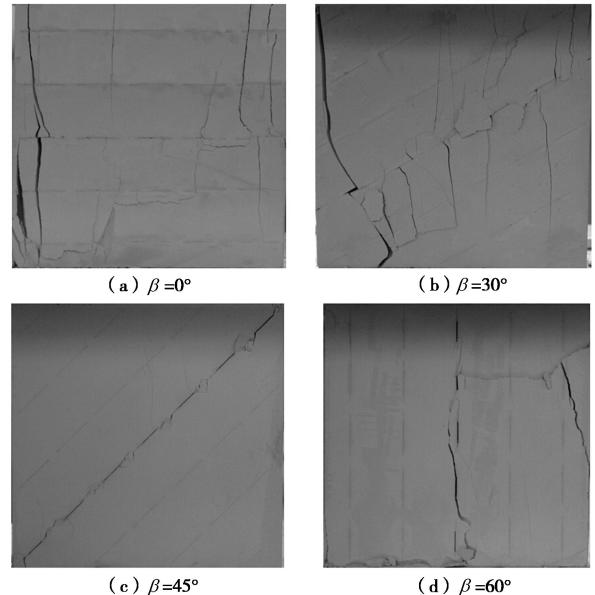


图17 节理间距 $s=75$ mm 各试件的破坏照片

Fig. 17 Failure of samples with joint spacing $s=75$ mm

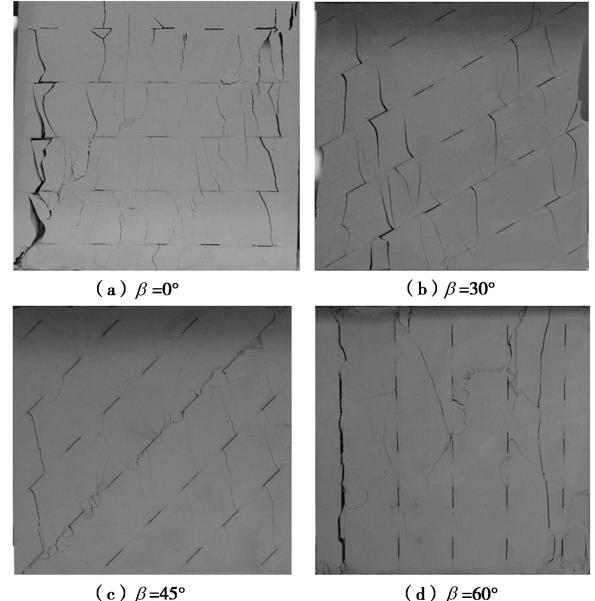


图18 节理间距 $s=30$ mm 各试件的破坏照片

Fig. 18 Failure of samples with joint spacing $s=30$ mm

4 结论

本文通过含一组张开预置裂隙石膏试件的单轴压缩试验, 系统地研究了节理组的产状和节理层间距的

组合变化对岩体强度和变形特性的影响。由试验结果可以得到以下 5 点结论。

(1) 随着节理层间距的增大, 节理试件的应力-应变曲线的由单峰型曲线变为多峰型曲线, 后者可进一步划分为软化段多峰型、多峰平台后软化型和多峰平台后硬化型 3 种类型。

(2) 当节理间距不变时, 当量化峰值强度、当量化弹性模量和第一峰值应变随节理面倾角的变化曲线都呈 V 型, 其最小值发生在 $\beta = 45^\circ$ 处; 而残余强度与强度之比和第二峰值应变随节理面倾角的变化曲线都呈倒 V 型, 其最大值发生在 $\beta = 45^\circ$ 处。

(3) 当节理倾角不变时, 当量化弹性模、当量化峰值强度和第一峰值应变都随节理化系数的增大而减小; 而残余强度与峰值强度之比和第二峰值应变则反之, 都随节理化系数的增大而增大。

(4) 各节理倾角下, 当量化弹性模和当量化强度随节理化系数(节理间距的无量纲化参量)的变化规律可以用相同形式的幂函数来表示。

(5) 岩体的上述宏观力学响应, 与预制节理的闭合、次生拉剪裂纹扩展、汇合贯通等细观损伤力学机制密切相关。

上述研究表明, 在节理连通率固定时, 节理间距对岩体的强度和变形特性的影响有显著的各向异性。

参考文献:

- [1] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles[M]. Oxford: Elsevier, 1997: 106 - 111.
- [2] KULATILAKE P H S W, WANG S D, STEPHANSSON O. Effect of finite size joints on the deformability of jointed rock at the 3D level[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, **30**: 479 - 501.
- [3] LUBARDA V A, KRAJCINOVIĆ D. Damage tensors and the crack density distribution[J]. International Journal of Solids and Structure, 1993, **30**(2): 2859 - 2877.
- [4] ODA M, YAMABE T, ISHIZUKA Y, et al. Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(2): 89 - 112.
- [5] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, **12**(1): 1 - 30.
- [6] 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.
- [7] EINSTEIN H H, HIRSCHFELD R C. Model studies on mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, **99**(3): 229 - 248.
- [8] TIWARI R P, SESHAGIRI K. Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement[J]. Engineering Geology, 2006, **84**(3/4): 112 - 129.
- [9] GOLDSTEIN M, GOOSEV B, PYROGOVSKY N, et al. Investigation of mechanical properties of cracked rock[C]// Proceedings of the 1st ISRM Congress, Lisbon, 1966(1): 521 - 524.
- [10] LAJTAI E Z. Strength of discontinuous rocks in direct shear[J]. Géotechnique, 1969, **19**(2): 218 - 233.
- [11] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type material under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(7): 863 - 888.
- [12] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(5): 687 - 700.
- [13] 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.
- [14] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 1999, **20**(2): 10 - 16. (BAI Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Research on the strength behavior of rock containing coplanar close intermittent joints by direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(2): 10 - 16. (in Chinese))
- [15] 陈洪凯, 唐红梅. 危岩主控结构面强度参数计算方法[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(1): 37 - 41. (CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Method for calculating strength parameters of structural planes controlling the rock block stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(1): 37 - 41. (in Chinese))
- [16] 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研究[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 on the effect of joint orientation and persistence on the 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))

[17] CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, PENG Xi. Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 213 - 221.

[18] CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, PENG Xi. Cracking process of rock mass models under uniaxial compression [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6): 1661 - 1678.

[19] 陈 新, 王仕志, 李 磊. 节理岩体模型单轴压缩破碎规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 898 - 907. (CHEN Xin, WANG Shi-zhi, LI Lei. Characteristics of fragments of jointed rock mass models under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 898 - 907. (in Chinese))

[20] 陈 新, 彭 曦, 李东威, 等. 基于两种破裂判据的裂隙岩体单轴压缩起裂分析[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 227 - 235. (CHEN Xin, PENG Xi, LI Dong-wei, et al. Analysis on cracking mechanism of fractured rock masses under uniaxial compression based on the two cracking criteria[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 227 - 235. (in Chinese))

[21] 孙卫军, 周维垣. 裂隙岩体弹塑性-损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(2): 108 - 119. (SUN Wei-jun, Zhou Wei-yuan. An elasto-plastic damage mechanics constitutive model for jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(2): 108 - 119. (in Chinese))

第二届全国大学生加筋土挡墙设计大赛(旭域杯)

(2015年5月22~25日 成都)

主办单位: 中国土工合成材料工程协会。

承办单位: 同济大学; 西南交通大学; 青岛旭域土工材料股份有限公司。

宗旨: 全国大学生加筋土挡墙设计大赛是培养大学生创新意识、合作精神和工程实践能力的学科性竞赛。本竞赛对高等学校开展创新教育和实践教学改革、加强高校与企业之间联系、推动学科创新活动将起到积极的示范作用。

参赛对象: 全日制在校土木工程或相关专业的本科生和硕士研究生。每个参赛队由2至3名学生和1名指导老师组成。

参赛流程: 报名 → 组委会审核 → 提交参赛作品设计方案 → 专家组初选, 产生入围决赛名单 → 成都决赛, 产生优胜者及各级奖项 → 颁奖。

大赛时间安排: 报名截止日期: 2014年9月15日, 通过E-mail报名。参赛资格确认日期: 2014年10月31日, 组委会审核后, 确认参赛资格。设计方案截止日期: 2014年12月31日, 以当地邮戳为准。设计方案按组委会提供的模板撰写。入围决赛资格: 对提交的所有有效作品, 组委会组织专家匿名评审, 确定获得决赛资格的参赛队名单, 通过E-mail通知参赛队

员, 并同时在本次大赛网站公告。决赛时间和地点: 2015年5月22~25日(第五届全国土工合成材料加筋土学术研讨会期间), 在西南交通大学进行现场决赛。

参赛费用: 本次大赛不对参赛队收取报名费、参赛费、专家评审费等费用。对于入围决赛的参赛队, 组委会免收参赛学生“第五届全国土工合成材料加筋土学术研讨会”会议注册费, 并适当补助差旅费。决赛阶段, 除组委会提供的基本材料外(详见比赛规则), 其他材料和简单工具购置费由参赛队自行解决。

比赛规则: 各参赛队务必仔细阅读本次大赛的比赛规则, 以免提交不符合要求的作品。本次大赛比赛规则、参赛报名表、参赛作品设计方案模板等可从本次大赛网站下载。

联系方式: 网址: <http://www.bostd.com.cn>; E-mail: 71zhangwan@tongji.edu.cn, techservice@bostd.com。地址1: 上海市杨浦区四平路1239号同济大学地下建筑与工程系, 邮编200092, 联系人: 张琬(15221835081); 地址2: 青岛旭域土工材料股份有限公司, 联系人: 陈丽丽(0532-87907189; 13626428415)。

(同济大学 供稿)