

DOI: 10.11779/CJGE2024S10008

玄武岩节理系数及其与强度和变形特性的关系研究

孔 洋¹, 阮怀宁², 张桂荣¹, 何 宁¹, 汪璋淳¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 节理密度、节理倾角与节理粗糙度情况等是控制玄武岩力学响应的三个关键因素。基于 3D 打印技术, 通过开展单轴压缩与界面剪切试验, 针对不同的模拟柱状节理玄武岩试样的破坏模式深入探究了特殊柱状节理的存在对玄武岩强度与变形的弱化作用, 分析了节理系数与试样各向异性效应的关系。研究结果表明随节理系数的增大, 模拟柱状节理玄武岩试样强度折减系数的线性减小程度及模量折减系数以指数关系式降低幅度受失效模式影响显著; 强度各向异性效应与模量各向异性效应数值越大, 表明柱状节理对玄武岩的岩块弱化作用越强; 不同失效模式工况下, 随节理系数的增加, 强度各向异性效应线性增大, 模量各向异性效应以指数关系式升高。研究成果可为工程岩体各向异性力学响应分析提供一定的技术支撑。

关键词: 玄武岩; 节理系数; 弱化效应; 强度; 变形; 各向异性

中图分类号: TU452; TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0132-06

作者简介: 孔 洋(1989—), 男, 山东宁阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事节理岩体力学特性与岩土工程安全监测等方面的科研工作。E-mail: ykong@nhri.cn。

Joint factor of basalt and its relationship with strength and deformation characteristics

KONG Yang¹, RUAN Huaining², ZHANG Guirong¹, HE Ning¹, WANG Zhangchun¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Institute of Geotechnical Research, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The joint density, joint inclination angle and joint roughness are the three key factors that control the mechanical response of basalts. Based on the 3D printing technology, the uniaxial compression and interfacial shear tests are carried out to deeply explore the weakening effects of the existence of special columnar joints on the strength and deformation of the basalts according to the failure modes of different columnar jointed basalt samples, and the relationship between the joint factor and the anisotropy effects of samples is analyzed. The research results show that with the increase of the joint factor, the linear reduction degree of the strength reduction coefficient and the exponential relation reduction degree of the modulus reduction coefficient of the simulated columnar jointed basalt samples are significantly affected by the failure mode. The larger the values of the strength anisotropy effects and modulus anisotropy effects, the stronger the weakening effects of columnar joints on basalt blocks. Under different failure modes, the strength anisotropy effects increases linearly with the increase of the joint factor, and the modulus anisotropy effects increase exponentially. The research results can provide some technical support for the anisotropic mechanical response analysis of engineering rock masses.

Key words: basalt; joint coefficient; weakening effect; strength; deformation; anisotropy

0 引言

特殊柱状节理及其柱体倾斜角度的不同显著影响着玄武岩试样的力学响应, 可引入强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} , 用于直观表达与量化柱状节理对无节理完整岩块试样峰值强度与变形模量的影响程度, 强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 数值越小, 则说明柱状节理对其弱化作用越强。Xiao 等^[1]有关强度折减系数 σ_{rc} 的试验值明显高于其他研究结果, 原

因是其试样中六棱柱体的单柱直径是其他学者的 2 倍, 同时, 原文指出在加工试样时, 部分试件会因切割、打磨破裂脱离, 原文作者用 502 等强力胶水对剥离柱体部分进行了粘合; 柯志强等^[2]因考虑了横向节

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240221); 国家自然科学基金重点项目(41831278); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y321003)

收稿日期: 2024-05-01

理的存在, 进一步弱化了柱状节理岩体的抗压能力, 强度折减系数 σ_{rc} 值较小。强度折减系数 σ_{rc} 的大小, 即柱状节理对岩体弱化作用的强弱, 与柱体直径、节理面黏结强度、完整试样与节理结构部分材料类型、及是否考虑横向节理等较多因素有关^[3-4]。

Singh 与 Ramamurthy 等学者发现^[5-6], 节理密度、节理倾角与节理粗糙度情况等是控制节理岩体力学响应的三个关键因素。Ramamurthy 等^[5]根据层状岩体试样试验, 提出了用以反映节理的存在对岩石强度弱化程度的节理系数 J_f 概念, 给出了 U 字型与肩字型各向异性特征曲线中节理倾斜参数 n 的计算方法, 并与针对节理岩体不同的失效模式, 详细探讨了强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 与节理系数 J_f 的关系。Ji 等^[7]与 Lin 等^[8]基于节理系数 J_f 概念, 对模拟柱状节理玄武岩试样相关试验结果进行了讨论, 但两位学者并未针对不同失效模式进行单独分析, 同时, 其论文中节理密度参数 J_n 与节理倾斜参数 n 取值也存在一定可商榷的地方。肖维民等^[9]引入节理系数 J_f 表征特殊柱状节理对玄武岩强度的影响, 建立了正六棱柱型模拟柱状节理玄武岩试样的各向异性强度准则, 指出了 J_f 随柱体夹角的变化可以反映岩体强度各向异性特征。

本文将基于 3D 打印技术, 通过开展单轴压缩与界面剪切试验, 针对不同的模拟柱状节理玄武岩试样的破坏模式深入探究特殊柱状节理的存在对玄武岩强度与变形特性的弱化作用, 分析试样各向异性效应。

1 试样制备与试验方案

成熟的工业级立体光固化 3D 打印技术具有打印精度强、试样表面平整度高、细节好等特点^[10], 本文基于 3D 打印技术, 以一种具备精确和耐久特性的类 ABS 的立体光造型树脂材料 (Lasty-R 光敏树脂) 打印柱状节理网络, 根据正六边形断面形式, 采用 CAD 三维模式构建了 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 与 90° 等 7 组柱体倾斜角度 β (正六棱柱顺时针旋转的角度) 工况的柱状节理网络试样如图 1 所示。

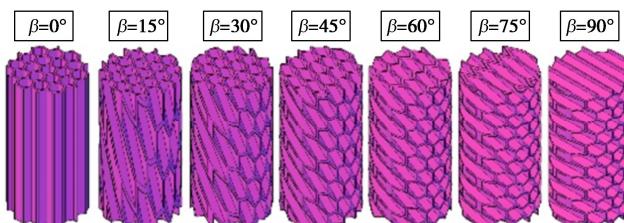
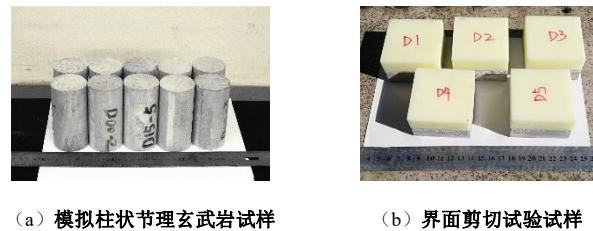


图 1 不同柱体倾斜角度的节理网络三维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional model for columnar joint network with different inclination angles

光敏树脂试件模拟柱状节理网络, 脆性类岩石模型材料模拟柱状玄武岩块体, 采用特殊灌注工艺后得到柱状节理玄武岩试样。本文所有模拟柱状节理玄武岩试样高径比约为 2, 在切割、打磨试样时, 采用游标卡尺控制试样高度为 100.0 mm。水泥砂浆与树脂材料的界面剪切试样以可以放入剪切盒为宜, 平均边长约为 59.46 mm, 平均总高度约为 38.21 mm。模拟柱状节理玄武岩试样与界面剪切试验试样如图 2 所示。



(a) 模拟柱状节理玄武岩试样 (b) 界面剪切试验试样

图 2 模拟柱状节理玄武岩试样与界面剪切试验试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of columnar jointed basalt samples and interfacial shear test samples

借助 MTS311.31S 型电液伺服试验机开展模拟柱状节理玄武岩试样单轴压缩试验, 采用 LVDT 位移传感器量测轴向变形, 试验采用位移控制模式, 加载速率均为 0.15 mm/min。界面剪切试验由 ShearTrac-II 型应变控制式直接剪切试验仪器开展。分别设置 500, 1000, 1500, 2000, 2500 kPa 等共 5 组竖向应力试验, 实际分别对应 1.77, 3.54, 5.31, 7.06, 8.84 kN 竖向荷载, 剪切速率设为 0.30 mm/min。为模拟实际分级加载过程, 在竖向应力加载阶段以每 100 kPa 速度递增竖向应力至设计值, 相邻 100 kPa 的荷载施加需稳定 10 s 以保证加载充分。

2 节理系数与试样强度和变形的关系

单轴压缩试验工况下, 不同柱体倾斜角度模拟柱状节理玄武岩试样典型轴向应力-应变 ($\sigma_1-\varepsilon_1$) 曲线如图 3 所示。

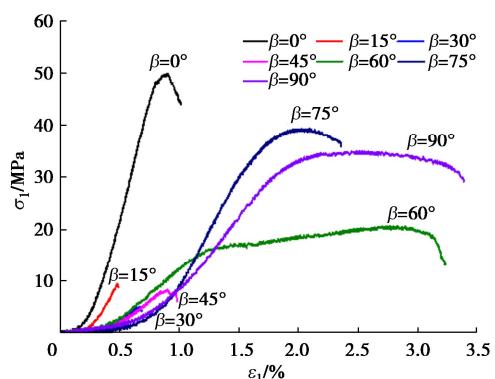


图 3 典型轴向应力-应变曲线

Fig. 3 Typical axial stress-strain curves

受柱体倾斜角度 β 的影响, 模拟柱状节理玄武岩试样破坏形态差异性较为显著, 可以总结出以下3类典型失效模式: 沿柱状节理网络的轴向劈裂失效模式 ($\beta=0^\circ$), 沿柱状节理面的剪切-滑移失效模式 ($\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) 与贯穿节理网络的张拉-剪切失效模式 ($\beta=60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$)。

2.1 强度折减系数与模量折减系数

强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 的计算方法如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rc} &= \frac{\sigma_{j\beta}}{\sigma_c}, \\ E_{rc} &= \frac{E_{j\beta}}{E_c}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{j\beta}$ 与 $E_{j\beta}$ 指不同柱体倾斜角度 β 模拟柱状节理玄武岩试样强度与变形模量计算结果; σ_c 与 E_c 指模拟完整玄武岩岩块的脆性类岩石模型材料单轴压缩试验峰值强度与变形模量值, 可由文献[11]得到, $\sigma_c=70.40$ MPa, $E_c=13.86$ GPa。强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 的各向异性曲线如图 4 所示。

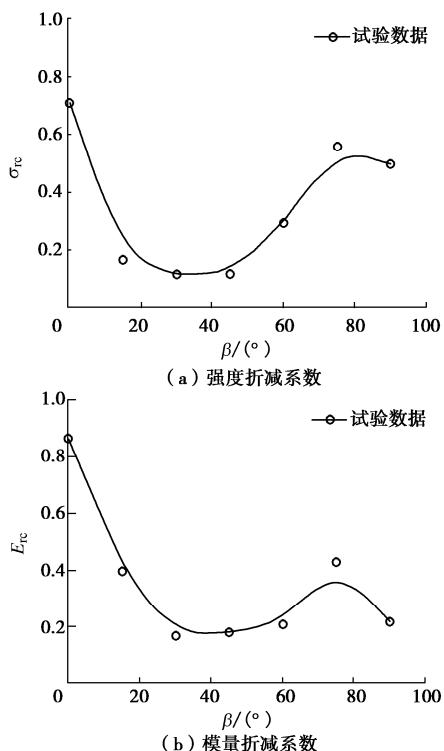


图 4 强度、模量折减系数各向异性曲线

Fig. 4 Anisotropy curves of reduction coefficient of strength and modulus

从图 4 可以看出:

(1) 强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 与柱体倾斜角度的关系, 同样表现为肩字型各向异性特征。本文设计的 $\beta=90^\circ$ 试样与加载方向平行的节理面最多, 同时 $\beta=90^\circ$ 光敏树脂节理网络破坏时极限荷载

最小, 继而导致 $\beta=90^\circ$ 试样比 $\beta=75^\circ$ 试样更容易发生贯穿节理面的张拉-剪切破坏模式。相应的, $\beta=90^\circ$ 试样的强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 值比 $\beta=75^\circ$ 试样的小。

(2) $\beta=0^\circ$ 试样因破坏时主要受到单柱抗压强度与界面抗剪强度的影响, 因单柱抗压强度与完整试样的抗压强度较为接近及受轴向劈裂破坏模式因素影响, $\beta=0^\circ$ 试样强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 最大。 $\beta>0^\circ$ 时的试样模量折减系数 E_{rc} 值均低于 0.40, 说明特殊柱状节理的存在对模拟柱状节理玄武岩试样的变形性能影响较大。模量折减系数 E_{rc} 值越小, 试样破坏时的垂直变形量越大。

2.2 试样的节理系数计算

节理系数 J_f 可由下式计算得到:

$$J_f = \frac{J_n}{nr}, \quad (2)$$

式中: J_n 为节理密度参数, 单位为 m^{-1} ; n 为节理倾斜参数, 无量纲; r 为节理强度参数, 无量纲。

J_n 指沿加载位置中心线方向上每米的节理数目。肖维民等^[9]基于节理密度计算模型与柱体空间几何关系, 推导了可信的节理密度参数 J_n 计算方法公式, 即

$$J_n = \frac{2}{3a} \sin \beta, \quad (3)$$

式中: β 为柱体倾斜角度; a 为单柱六边形截面的边长。当 $\beta=0^\circ$ 时, J_n 计算值为 0, 不符合实际情况, 故肖维民等^[9]在论述节理系数时, 未对 $\beta=0^\circ$ 进行讨论。因仅当 $\beta=0^\circ$ 时试样会发生沿垂直方向的劈裂破坏模式, 该角度可单独分析。

n 为节理倾斜参数, 其值受节理组的柱体倾斜角度、节理网络复杂程度与试样失效模式等因素影响; 当其他参数值固定时, n 越大, 节理系数 J_f 越小, 说明节理对岩石强度弱化作用越小。基于 Ramamurthy 等^[5]、肖维民等^[9]研究成果, 节理倾斜参数 n 可由下式计算:

$$n = \frac{\lg(\sigma_{rc,90})}{\lg(\sigma_{rc,\beta})}, \quad (4)$$

式中: $\sigma_{rc,90}$ 为当 $\beta=90^\circ$ 时柱状节理试样强度弱化参数; $\sigma_{rc,\beta}$ 为不同柱体倾斜角度试样节理弱化参数。

r 为节理强度参数, Ramamurthy 等^[5]、Singh 等^[6]指出 $r=\tan \varphi_j$, 其中 φ_j 为节理面内摩擦角, 基于 3D 打印技术的柱状节理试样中 φ_j 应取水泥砂浆与光敏树脂交界面的内摩擦角, 界面剪切试验 $\varphi_j=35.56^\circ$ 。

根据上述理论分析与界面剪切试验结果, 可得到不同柱体倾斜角度工况下, 模拟柱状节理玄武岩试样节理系数 J_f 的计算结果如表 1 所示。

表 1 不同柱体倾斜角度的模拟柱状节理玄武岩试样节理系数计算结果

Table 1 Calculated results of joint factor for simulated columnar jointed basalt samples with different inclination angles

$\beta/^\circ$	100 mm	J_n/m^{-1}		U型	n	本文	r	J_f/m^{-1}	
		等效为 1 m	本文					等效	本文
0	—	—	—	0.82	0.85	2.04	0.715	—	—
15	4	40	31	0.29	0.40	0.39	0.715	142.77	111.96
30	6	60	61	0.05	0.06	0.33	0.715	256.23	258.81
45	8	80	86	0.20	0.29	0.33	0.715	340.48	364.77
60	10	100	105	0.46	0.80	0.57	0.715	243.87	255.98
75	12	120	117	0.73	0.93	1.21	0.715	139.14	135.75
90	12	120	121	0.95	0.98	1.00	0.715	167.83	169.52

由表 1 可以看出:

(1) 节理密度参数 J_n 的计算结果由公式(3) 得到, 该公式基于节理密度计算模型与柱体空间几何关系推导, 物理意义明确, 与沿加载方向取试样长度范围内获取的与中心线交叉的节理数目, 然后等效至每米长度范围的结果规律相近, 数值上存在部分偏差。

(2) 节理倾斜参数 n 的计算结果由公式(4) 得到, 可以反映节理组的柱体倾斜角度、节理网络复杂程度与试样失效模式对试验结果影响。当其他参数值固定时, n 越大, 节理系数 J_f 越小, 说明节理对岩石强度弱化作用越小, 对应着 $\beta=90^\circ$ 试样比 $\beta=0^\circ$ 弱化效应显著问题。各向异性曲线并非传统意义上的“U”型特征, 不能按照 Ramamurthy 等^[5]给出表格范围直接取值。

(3) 节理强度参数 r 由单独进行的界面剪切试验结果得到, 文中不同柱体倾斜角度工况下, 模拟柱状节理玄武岩试样节理系数 J_f 的计算结果真实可靠。

2.3 强度、模量折减系数与节理系数的关系

模拟柱状节理玄武岩试样强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 与节理系数 J_f 的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出:

(1) 模拟柱状节理玄武岩试样节理系数 J_f 与强度折减系数 σ_{rc} 呈线性关系, 随着节理系数 J_f 的增大, 强度折减系数 σ_{rc} 线性减小。相关关系式可表达为

$$\sigma_{rc} = aJ_f + b \quad , \quad (5)$$

式中, a 与 b 为试验参数, 可通过试验数据拟合得到。

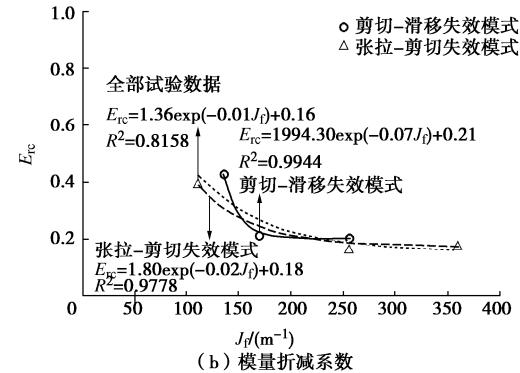
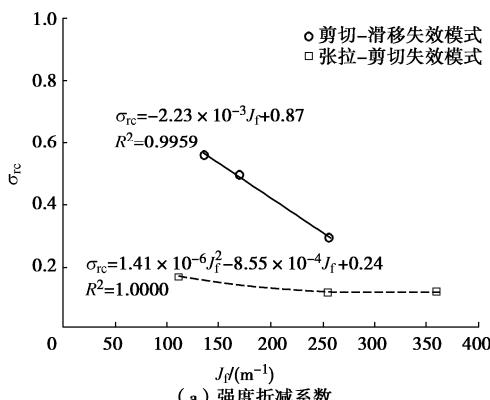


图 5 强度折减系数、模量折减系数与节理系数的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between reduction coefficients of strength and modulus and joint factor

因没有考虑 $\beta=0^\circ$ 试样数据, 并对不同的失效模式进行单独分析讨论, 笔者得到的结论与 Ji 等^[7]与 Lin 等^[8, 12]指数关系形式不同。因失效模式不同, σ_{rc} 随 J_f 增大而减小的程度不同, 其中柱体倾斜角度 $\beta=15^\circ$, 30° , 45° 对应的沿柱状节理面的剪切-滑移破坏模式, 笔者虽然给出了二次多项式拟合, 但实际二次项参数仅为 1.41×10^{-6} , 是一个非常小、可忽略不计的数值, 其线性降低的梯度为 8.55×10^{-4} , 低于贯穿节理网络的张拉-剪切破坏模式的梯度值 2.33×10^{-3} , 说明柱体倾斜角度 $\beta=60^\circ$, 75° , 90° 试样更容易受到节理系数的影响。

(2) 模拟柱状节理玄武岩试样节理系数 J_f 与模量折减系数 E_{rc} 呈非线性关系, 随着节理系数 J_f 的增大, 模量折减系数 E_{rc} 以指数关系式降低。相关关系式可表达为

$$E_{rc} = A \exp(BJ_f) + C \quad , \quad (6)$$

式中, A , B 与 C 为试验参数, 可通过试验数据拟合得到。

由图 5(b) 可以看到, $\beta=15^\circ$, 30° , 45° 对应的沿柱状节理面的剪切-滑移破坏模式更容易受到节理系数的影响, β 从 15° 增大到 30° 时, 模量折减系数 E_{rc} 显著的降低, 说明 $\beta=30^\circ$, 45° 试样, 更容易发生剪切-滑移模式, $\beta=15^\circ$ 试样的局部在一定程度上表现了劈裂破坏特征。需要说明的是, 不考虑失

效模式情况下, 模量折减系数 E_{rc} 与节理系数 J_f 之间也体现了较好的指数关系。

3 节理系数与各向异性效应的关系

除 Ji 等^[7]与 Lin 等^[8, 12]使用的强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 方法, 借助 Ghazvinian 等^[13]定义的各向异性效应概念, 可引入强度各向异性效应 $A_{e\sigma}$ 与模量各向异性效应 A_{eE} 参数研究柱状节理对无节理完整试样力学响应的影响。强度各向异性效应 $A_{e\sigma}$ 与模量各向异性效应 A_{eE} 的计算方法如下:

$$\left. \begin{aligned} A_{e\sigma} &= \frac{\sigma_c - \sigma_{j\beta}}{\sigma_c}, \\ A_{eE} &= \frac{E_c - E_{j\beta}}{E_c}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

与强度折减系数 σ_{rc} 及模量折减系数 E_{rc} 方法不同的是, 强度各向异性效应 $A_{e\sigma}$ 与模量各向异性效应 A_{eE} 数值越小, 表明柱状节理对岩块弱化作用越弱。模拟柱状节理玄武岩试样 $A_{e\sigma}$ 、 A_{eE} 与 J_f 的关系曲线如图 6 所示。

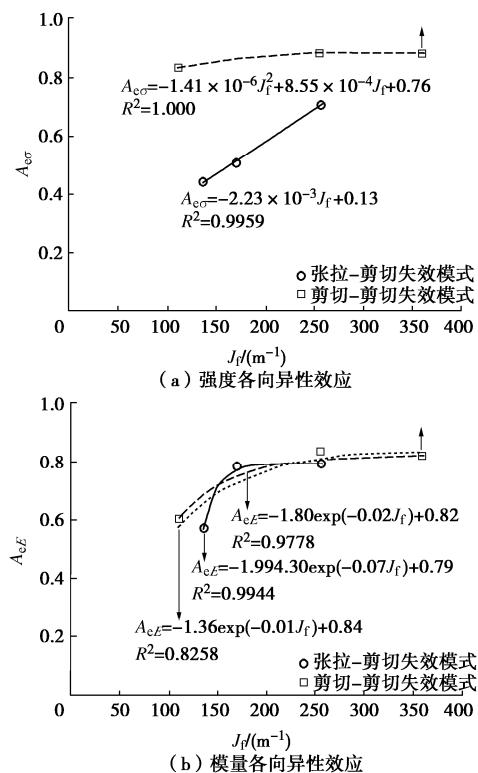


图 6 强度各向异性效应、模量各向异性效应与节理系数关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between strength and modulus anisotropy effects and joint factor

作为与强度折减系数 σ_{rc} 与模量折减系数 E_{rc} 相互补充的方法, 笔者对不同失效模式下 $A_{e\sigma}$ 、 A_{eE} 与 J_f 的

关系进行了单独分析, 从图 6 可以看出:

(1) 模拟柱状节理玄武岩试样节理系数 J_f 与强度各向异性效应 $A_{e\sigma}$ 呈线性关系, 随着节理系数 J_f 的增加, 强度各向异性效应 $A_{e\sigma}$ 线性增大。因失效模式不同, 线性增大趋势有明显差异, 剪切-滑移破坏模式的梯度值高于张拉-剪切破坏模式, 说明柱体倾斜角度 $\beta=60^\circ$, 75° , 90° 试样更容易受到节理系数的影响。

(2) 模拟柱状节理玄武岩试样节理系数 J_f 与模量各向异性效应 A_{eE} 呈非线性关系, 随着节理系数 J_f 的增大, 模量各向异性效应 A_{eE} 以指数关系式升高。 β 从 15° 增大到 30° 时, 模量各向异性效应 A_{eE} 显著地提升, 而后 $\beta=30^\circ$, 45° 试样的模量各向异性效应 A_{eE} 趋于稳定, 说明 β 从 15° 向 30° 过渡阶段, 是变形特性改变的一个重要转折点。不考虑失效模式情况下, 模量各向异性效应 A_{eE} 与节理系数 J_f 之间也体现了较好的指数关系。

4 结 论

(1) 反映柱状节理强度弱化效应的节理系数 J_f 中有关节理密度参数 J_n 的计算公式, 是基于节理密度计算模型与柱体空间几何关系推导, 物理意义明确; 节理倾斜参数 n 的计算结果可以反映节理组的柱体倾斜角度、节理网络复杂程度与试样失效模式对试验结果影响。当其他参数值固定时, n 越大, J_f 越小, 说明节理对岩石强度弱化作用越小, 对应着 $\beta=90^\circ$ 试样比 $\beta=0^\circ$ 试样弱化效应显著; 节理强度参数 r 由单独进行的界面剪切试验结果得到。

(2) 随着 J_f 的增大, 强度折减系数 σ_{rc} 线性减小, 因失效模式不同, σ_{rc} 随 J_f 增大而减小的程度不同, 柱体倾斜角度 $\beta=60^\circ$, 75° , 90° 试样更容易受到节理系数的影响; 随着 J_f 的增大, 模量折减系数 E_{rc} 以指数关系式降低。

(3) 强度各向异性效应 $A_{e\sigma}$ 与模量各向异性效应 A_{eE} 数值越大, 表明柱状节理对岩块弱化作用越强。随着 J_f 的增加, $A_{e\sigma}$ 线性增大, 柱体倾斜角度 $\beta=60^\circ$, 75° , 90° 试样更容易受到节理系数的影响; 随着 J_f 的增大, A_{eE} 以指数关系式升高。 β 从 15° 增大到 30° 时, A_{eE} 显著地提升, 而后 $\beta=30^\circ$, 45° 试样的 A_{eE} 趋于稳定。

参 考 文 献:

- XIAO W M, DENG R G, ZHONG Z B, et al. Experimental study on the mechanical properties of simulated columnar jointed rock masses[J]. Journal of Geophysics and

- Engineering, 2015, **12**(1): 80-89.
- [2] 柯志强, 王环玲, 徐卫亚, 等. 含横向节理的柱状节理岩体力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 660-667. (KE Zhiqiang, WANG Huanling, XU Weiya, et al. Experimental study of mechanical behaviour of artificial columnar jointed rock mass containing transverse joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 660-667. (in Chinese))
- [3] ZHANG T, XU W Y, WANG H L, et al. Anisotropic strength, deformability, and failure behavior of artificial columnar jointed rock masses under triaxial compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023(3): 1-14.
- [4] QUE X C, ZHU Z D, NIU Z H, et al. Deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock mass with different cross-sectional shapes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(9): 2416-2426.
- [5] RAMAMURTHY T, ARORA V K. Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, **31**(1): 9-22.
- [6] SINGH M, RAO K S, RAMAMURTHY T. Strength and deformational behaviour of a jointed rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, **35**(1): 45-64.
- [7] JI H, ZHANG J C, XU W Y, et al. Experimental investigation of the anisotropic mechanical properties of a columnar jointed rock mass: observations from laboratory-based physical modelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(7): 1919-1931.
- [8] LIN Z N, XU W Y, WANG H L, et al. Anisotropic characteristic of irregular columnar-jointed rock mass based on physical model test[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017, **21**(5): 1728-1734.
- [9] 肖维民, 邓荣贵, 邹祖银. 柱状节理岩体各向异性强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(11): 2205-2214. (XIAO Weiming, DENG Ronggui, ZHOU Zuyin. Anisotropic strength criterion for columnar jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(11): 2205-2214. (in Chinese))
- [10] 宗学文, 周升栋, 刘洁, 等. 光固化3D打印及光敏树脂改性研究进展[J]. 塑料工业, 2020, **48**(1): 12-17. (ZONG Xuwen, ZHOU Shengdong, LIU Jie, et al. Research progress in photo-curing 3D printing and photosensitive resin modification[J]. China Plastics Industry, 2020, **48**(1): 12-17. (in Chinese))
- [11] 孔洋, 阮怀宁, 汪璋淳. 玄武岩脆性类岩石相似模型材料比选与力学特性测试研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(11): 2308-2318. (KONG Yang, RUAN Huaining, WANG Zhangchun. Study on selection and mechanical properties testing of similar brittle rock-like model materials of basalts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(11): 2308-2318. (in Chinese))
- [12] LIN Z N, XU W Y, WANG W B, et al. Determination of strength and deformation properties of columnar jointed rock mass using physical model tests[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, **22**(9): 3302-3311.
- [13] GHAZVINIAN A, HADEI M. Effect of discontinuity orientation and confinement on the strength of jointed anisotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **8**(10B): 7143-7156.

(编校: 明经平)