

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.007

冻融循环作用下板岩弹性参数 及单轴抗压强度研究

傅鹤林^{1,2}, 张加兵^{1,2}, 黄 震^{1,2}, 黄宏伟^{3,4}, 史 越^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075;
3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 为揭示冻融循环作用对板岩弹性参数及单轴抗压强度的影响, 采用 DX-40 型低温数控箱、DNS100 微型控制电子万能试验机进行 7 种层理倾角 (β)、6 种冻融循环次数的单轴压缩试验, 对其 5 个弹性参数、单轴抗压强度及破坏类型的变化规律进行分析。试验结果表明: 板岩弹性模量、剪切模量和单轴抗压强度随冻融循环次数增加呈指数下降趋势, 泊松比随冻融循环次数增加呈线性增加趋势; 板岩单轴抗压强度随层理倾角增加呈先减后增的变化趋势; 冻融循环作用下板岩破坏类型有 3 种: 当 $0^\circ \leq \beta \leq 26.6^\circ$ 时, 沿与竖直轴线呈一定角度方向发生剪切破坏; 当 $26.6^\circ \leq \beta \leq 83.0^\circ$ 时, 沿层理面发生剪切破坏; 当 $83.0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 时, 沿垂直方向发生劈裂破坏。在 Jaeger 单弱面理论的基础上, 建立了以冻融循环次数和层理倾角为控制变量的板岩单轴抗压强度预测模型, 并通过试验数据验证了模型的合理性, 表明该模型能较好地描述冻融循环次数和层理倾角对冻融板岩单轴抗压强度的影响。

关 键 词: 板岩; 冻融循环; 层理倾角; 弹性参数; 单轴抗压强度; 破坏类型

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017)08—2203—10

Experimental study on elastic parameters and uniaxial compressive strength of slate under freeze-thaw cycles

FU He-lin^{1,2}, ZHANG Jia-bing^{1,2}, HUANG Zhen^{1,2}, HUANG Hong-wei^{3,4}, SHI Yue^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. National Engineering Laboratory for Construction Technology of High Speed Railway, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To reveal the effect of freeze–thaw cycle on elastic parameters and uniaxial compressive strength of slate, uniaxial compression tests were conducted on slate specimens with seven types of bedding angles under six types of freeze–thaw cycle. The DX-40 low-temperature control box and DNS100 miniature control electronic universal testing machine were applied for tests. We analyzed evolution laws of five elastic parameters, uniaxial compressive strength, and failure forms. Experimental results showed that the elastic modulus, shear modulus, and uniaxial compressive strength decreased exponentially with increasing the number of freeze–thaw cycles. While Poisson's ratio increased linearly with increasing the number of freeze–thaw cycles. Particularly, the uniaxial compressive strength firstly decreased and then increased with increasing bedding angle. It is found that there are three kinds of failure forms under uniaxial compressive stress. When the bedding angle was $0^\circ \leq \beta \leq 26.6^\circ$, shear failure occurred with a certain angle from the vertical axis. When the bedding angle was $26.6^\circ \leq \beta \leq 83.0^\circ$, shear failure occurred along the bedding plane. When the bedding angle was $83.0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, splitting failure occurred along the vertical direction. On the basis of the single discontinuity theory proposed by Jaeger, an empirical formula of uniaxial compressive strength was established and further verified by experimental data, in which bedding angles and the number of freeze–thaw cycles were considered as control variables. Therefore, the effects of the number of freeze–thaw cycles and bedding angles on compressive strength of freeze–thawed transversely isotropic rock can be well simulated by the model.

Keywords: slate; freeze–thaw cycles; bedding angle; elastic parameters; compressive strength; failure forms

收稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51578550, No. 51538009); 中南大学研究生自主探索创新项目 (No. 2017zzts153)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51578550, 51538009) and the Self-Innovation Research Projects for the Central South University (2017zzts153).

第一作者简介: 傅鹤林, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学及隧道工程等方面的教学与研究工作。E-mail: fu.h.l@csu.edu.cn

通讯作者: 张加兵, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学、隧道工程等方面的研究工作。E-mail: zhang_jb1@sohu.com

1 引 言

冻融循环引发的温度场和力场耦合是高寒区工程不可回避的岩土工程问题,受冻融循环作用影响,岩石物理力学特性将发生显著变化,这种变化往往会造成严重的灾害事故。因此,研究冻融循环作用下岩石弹性参数及单轴抗压强度具有重要的理论意义与工程应用价值。

板岩常表现为成层性,其特点是在各向同性面内物理力学特性大体相同,而在垂直此面方向内物理力学特性却有很大差别^[1-2],此类岩石通常被称为横观各向同性体。在横观各向同性岩石弹性参数及单轴抗压强度试验研究方面,Amadei^[3]采用单轴压缩试验测定横观各向同性岩石的弹性参数,给出了视弹性模量、视泊松比及单轴抗压强度随层理倾角的变化规律;Chen 等^[4]基于复变函数理论,提出 1 种采用巴西劈裂试验测定横观各向同性岩石弹性参数的方法;Ramamurthy^[5]、Tien 等^[6]通过大量试验研究,探讨了层理倾角对岩石单轴抗压强度的影响,得出横观各向同性岩石单轴抗压强度随层理倾角分布主要分为 U 型、波动型和钎肩型 3 大类;刘运思等^[7]对 7 种不同层理倾角下的板岩进行单轴压缩试验,测得板岩 5 个弹性参数,并基于单弱面理论研究了板岩单轴抗压强度和破坏形式与层理倾角之间的关系。此外,有关学者对冻融循环作用下岩石物理力学性能也做了大量试验研究,并取得突出的成果。Altindag 等^[8]借助单轴压缩和巴西劈裂试验手段,研究了凝灰岩在冻融循环作用下的力学特性及损伤劣化机制;Tan 等^[9]采用单轴压缩试验,研究花岗岩分别经历 0、50、100 和 200 次冻融循环后单轴抗压强度及弹性模量的变化规律,发现岩石单轴抗压强度和弹性模量随冻融循环次数增加而降低;Jamshidi 等^[10]对石灰岩在 2 种水化环境下分别进行冻融循环试验,并对岩样进行单轴压缩试验、巴西劈裂试验和超声波速测试,得到了在蒸馏水和硫酸钠溶液两种水环境下石灰岩单轴抗压强度、抗拉强度和超声波速随冻融循环次数的变化规律;吴安杰^[11]、张继周^[12]、张慧梅^[13]等针对不同岩石开展冻融循环试验,研究了岩石冻融破坏机制及经历不同冻融循环次数后的岩石物理力学性能变化规律。

综上所述,冻融循环作用下各向同性岩石的弹性参数及单轴抗压强度,国内外已做大量研究,但针对冻融循环作用下各向异性的岩石,如板岩等,其研究成果往往失真。鉴于此,本文针对板岩开展室内冻融循环和单轴压缩试验,研究含不同层理倾

角板岩在冻融循环作用下的弹性参数及单轴抗压强度特征。

2 板岩弹性参数测试方法

2.1 弹性本构方程

根据广义虎克定律,在局部坐标系 $y'O'z'$ 中,板岩的应力-应变关系可表示为^[14]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \varepsilon_{z'} \\ \gamma_{x'y'} \\ \gamma_{y'z'} \\ \gamma_{z'x'} \end{Bmatrix} = S' \sigma' = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_1}{E_1} & -\frac{\mu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_2}{E_2} & -\frac{\mu_2}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu_1)}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_{z'} \\ \tau_{x'y'} \\ \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{x'}$ 、 $\sigma_{y'}$ 、 $\sigma_{z'}$ 、 $\tau_{x'y'}$ 、 $\tau_{y'z'}$ 、 $\tau_{z'x'}$ 为局部坐标系中的六个应力分量; $\varepsilon_{x'}$ 、 $\varepsilon_{y'}$ 、 $\varepsilon_{z'}$ 、 $\gamma_{x'y'}$ 、 $\gamma_{y'z'}$ 、 $\gamma_{z'x'}$ 为局部坐标系中的六个应变分量; E_1 、 μ_1 分别为平行于板岩层理面的弹性模量和泊松比; E_2 、 μ_2 和 G_2 分别为垂直于板岩层理面的弹性模量、泊松比和剪切模量; β 为荷载方向与层理面法线之间的夹角,即层理倾角。

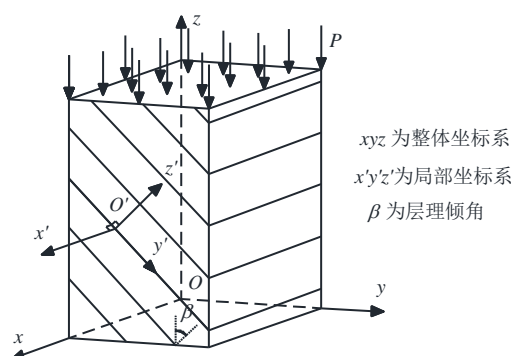


图 1 三维坐标变换模型

Fig.1 Three-dimensional coordinate transform model

如图 1 所示, 依据坐标变换原理, 将局部坐标系 $y'O'z'$ 绕 x' 轴逆时针旋转 β 角, 即可得到整体坐标系 yOz 下板岩的应力-应变关系为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{S} \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\boldsymbol{\sigma}$ 和 \boldsymbol{S} 分别为整体坐标系下的应变列阵、应力列阵和柔度矩阵。其中, 整体坐标系下的柔度矩阵可由局部坐标下的柔度矩阵求得, 表达式为

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{Q}^T \boldsymbol{S}' \boldsymbol{Q} \quad (3)$$

式中: \boldsymbol{Q} 为弹性参数坐标转换矩阵, 单轴压缩状态下其表达式为^[14]

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & 0 & -\sin 2\beta & 0 \\ 0 & \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 0 & \sin 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & \frac{\sin 2\beta}{2} & -\frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & \cos 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \beta & 0 & -\cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式 (3)、(4) 代入式 (2), 即可得到板岩在整体坐标系下的应力-应变关系为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & S_{15} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & S_{25} & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & S_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{46} & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 为整体坐标系中的六个应力分量; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 为整体坐标系中的六个应变分量。

由于采用单轴压缩试验方法测试板岩 5 个弹性参数 E_1 、 E_2 、 μ_1 、 μ_2 和 G_2 , 应力列阵中只有轴向应力 $\sigma_z \neq 0$, 因此, 柔度矩阵 \boldsymbol{S} 只需给出 S_{13} 、 S_{23} 、 S_{33} 和 S_{35} 的值。

其中

$$\left. \begin{aligned} S_{13} &= -\frac{\mu_1}{E_1} \sin^2 \beta - \frac{\mu_2}{E_2} \cos^2 \beta \\ S_{23} &= -\frac{\mu_2}{E_2} (\sin^4 \beta + \cos^4 \beta) + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_2} \right) \\ S_{33} &= \frac{1}{E_1} \sin^4 \beta + \frac{1}{E_2} \cos^4 \beta + \frac{\sin^2 2\beta}{4} \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2\mu_2}{E_2} \right) \\ S_{35} &= \left[\frac{1}{E_2} \cos^2 \beta - \frac{1}{E_1} \sin^2 \beta + \left(\frac{\mu_2}{E_2} - \frac{1}{2G_2} \right) \cos 2\beta \right] \sin 2\beta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.2 弹性参数测试

分别对层理倾角 $\beta = 0^\circ$ 、 45° 和 90° 的一组岩样进行单轴压缩试验, 再根据其应力-应变关系即可测得板岩弹性参数 E_1 、 E_2 、 μ_1 、 μ_2 和 G_2 。

(1) 当板岩层理倾角 $\beta = 0^\circ$ 时, 其应力-应变存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_x}{\sigma_z} &= -\frac{\mu_2}{E_2} \\ \frac{\varepsilon_y}{\sigma_z} &= -\frac{\mu_2}{E_2} \\ \frac{\varepsilon_z}{\sigma_z} &= \frac{1}{E_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式 (7), 对层理倾角 $\beta = 0^\circ$ 的岩样进行单轴压缩试验, 即可求得弹性模量 E_2 和泊松比 μ_2 。

(2) 当板岩层理倾角 $\beta = 90^\circ$ 时, 其应力-应变存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_x}{\sigma_z} &= -\frac{\mu_1}{E_1} \\ \frac{\varepsilon_y}{\sigma_z} &= -\frac{\mu_2}{E_2} \\ \frac{\varepsilon_z}{\sigma_z} &= \frac{1}{E_1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据式 (8), 对层理倾角 $\beta = 90^\circ$ 的岩样进行单轴压缩试验, 即可求得弹性模量 E_1 和泊松比 μ_1 。

(3) 当板岩层理倾角 $\beta = 45^\circ$ 时, 其应力-应变存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_x}{\sigma_z} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\mu_1}{E_1} + \frac{\mu_2}{E_2} \right) \\ \frac{\varepsilon_y}{\sigma_z} &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_2} \right) - \frac{1}{2} \frac{\mu_2}{E_2} \\ \frac{\varepsilon_z}{\sigma_z} &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{G_2} - \frac{2\mu_2}{E_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据式 (9), 再对层理倾角 $\beta = 45^\circ$ 的岩样进行单轴压缩试验, 并结合式 (7)、(8) 得到的 E_1 、 μ_1 、 E_2 、 μ_2 , 即可求得剪切模量 G_2 。

3 试验过程

3.1 试验材料

试验所用岩样均取自于西宁-格尔木铁路二线典型隧道中的板岩, 通过现场钻芯取样、室内切割、打磨等工序, 将岩块加工成直径为 50 mm, 高度为 100 mm 的标准岩样。岩样加工精度满足我国《工程岩体试验方法标准》^[15]。试验取不同层理倾角 ($\beta = 0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90°) 的板岩各 12 块, 分 6 组, 6 组对应 6 种冻融循环次

数 n (0、5、10、15、20 和 30 次), 共 84 个岩样。

3.2 冻融循环试验

先将试样放入电烘箱 ($105\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$) 中干燥, 干燥 24 h 后的试样放入干燥皿内冷却至室温。再将试样放置蒸馏水中, 采用真空饱和仪进行真空饱和, 真空压力值控制为 0.1 MPa, 抽气时间为 4 h, 试样真空浸泡 24 h, 并对试样饱水前后的物理参数进行测定, 得到板岩的干密度为 2.59 g/cm^3 , 天然含水率为 0.47%, 饱和含水率为 1.76%, 孔隙率为 3.46%。饱和后的岩样放入低温冻结恒温箱, 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下冻结 12 h, 然后再取出放入 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水槽中, 融化 12 h, 每个冻融循环周期为 24 h。冻融循环次数分别为 0、5、10、15、20 和 30 次。冻融循环试验设备采用 DX-40 型低温数控箱, 控温范围为 $-40\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控温精度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度自动控制恒温。

3.3 单轴压缩试验

试验采用 DNS100 微型控制电子万能试验机, 如图 2 所示。试验机的最大荷载为 100 kN, 力测量精度为 $\pm 0.5\%$, 位移分辨率为 0.001 mm。为了避免试验数据采集的误差, 试验过程中安装引伸计, 且使引伸计各引脚与试件表面紧密接触。试验以轴向变形 0.5 mm/min 的加载速率施加荷载, 直至试样破坏, 荷载-位移曲线由数据采集系统自动采集。



图 2 DNS100 微型控制电子万能试验机
Fig.2 Computer-controlled electronic versatile testing machine DNS100

4 试验结果分析

4.1 应力-应变曲线变化规律

图 3 是在自然状态下 (即冻融循环次数为 0 次) 不同层理倾角的板岩单轴压缩全过程应力-应变曲线, 由图可知, 板岩应力-应变全过程曲线大致可划分为 4 个阶段: ①压密阶段: 板岩内部微裂隙或张开型结构面在荷载作用下逐渐闭合, 岩石被压密, $\sigma-\varepsilon$ 曲线呈上凹型; ②线弹性阶段: 应力-应变呈线性关系, $\sigma-\varepsilon$ 曲线大致呈直线型; ③微裂隙发展

阶段: 此阶段板岩内部开始出现微裂隙。随着应力增加, 微裂隙数量增多, 表征板岩的破坏已经开始; ④应变软化阶段: 随着应力继续增加, 板岩迅速破坏, 而轴向应变变化较小, 横向应变急剧增加, 表现出应变软化现象。

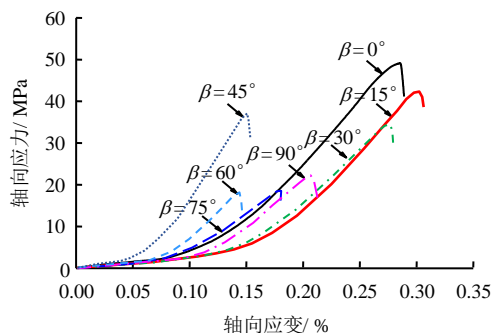


图 3 不同层理倾角的板岩单轴压缩应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of slate with different bedding angles under uniaxial compression

4.2 弹性参数变化规律

根据单轴压缩试验结果, 代入式 (6) ~ (8), 可计算得到板岩 5 个弹性参数, 如表 1 所示。

表 1 冻融循环作用下板岩弹性参数试验值
Table 1 Elastic parameters of slate under freeze-thaw cycles

冻融循环 次数	E_1 / GPa	E_2 / GPa	μ_1	μ_2	G_2 / GPa
0	24.67	17.25	0.275	0.203	8.45
	25.34	18.37	0.267	0.211	9.21
	21.65	15.14	0.318	0.234	7.23
5	20.97	15.83	0.309	0.242	7.46
	19.46	13.44	0.338	0.260	6.31
10	18.92	13.73	0.347	0.271	6.09
	17.99	12.21	0.361	0.277	5.83
15	17.27	12.07	0.375	0.284	5.49
	16.40	11.40	0.382	0.298	5.24
20	15.97	11.86	0.394	0.309	5.08
	14.87	10.25	0.454	0.343	4.63
30	15.49	10.87	0.448	0.351	4.58

(1) 弹性模量

由图 4 可见, 冻融循环后弹性模量 E_1 和 E_2 都有所降低, 且前 15 次冻融循环降低速度较快, 后期变得缓慢些, 呈指数下降趋势。故采用指数函数进行拟合, 拟合相关性系数分别为 $R_1^2 = 0.988\ 8$ 和 $R_2^2 = 0.977\ 1$, 拟合曲线方程为

$$E_1(n) = 14.08 + 10.885 \exp(-n / 12.879) \quad (10)$$

$$E_2(n) = 9.64 + 8.231 \exp(-n / 13.564) \quad (11)$$

式中: E_1 和 E_2 分别为平行于板岩层理面和垂直于板岩层理面的弹性模量 (GPa)。

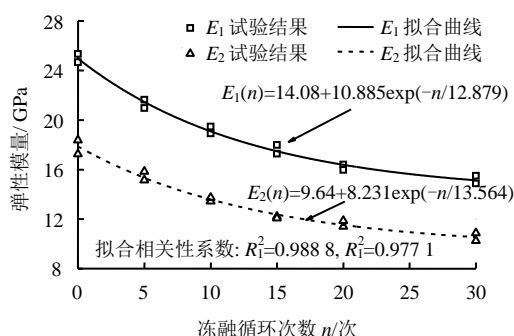


图 4 弹性模量与冻融循环次数关系曲线

Fig.4 Relationships between elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles

(2) 泊松比

由图 5 可见, 泊松比 μ_1 和 μ_2 均随冻融循环次数增加呈线性增加趋势。可采用直线方程进行拟合, 拟合相关性系数分别为 $R_1^2 = 0.9816$ 和 $R_2^2 = 0.9804$, 拟合直线方程分别为

$$\mu_1(n) = 0.279 + 0.0057n \quad (12)$$

$$\mu_2(n) = 0.213 + 0.0045n \quad (13)$$

式中: μ_1 和 μ_2 分别为平行于板岩层理面和垂直于板岩层理面的泊松比。

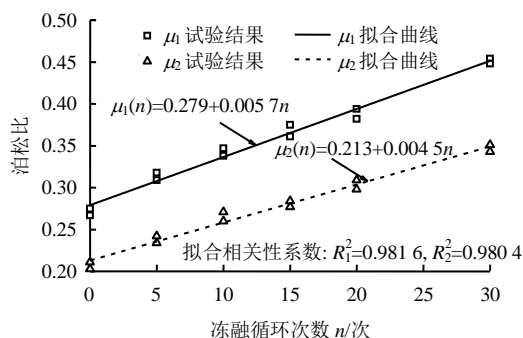


图 5 泊松比与冻融循环次数关系曲线

Fig.5 Relationships between Poisson's ratio and the number of freeze-thaw cycles

(3) 剪切模量

由图 6 可见, G_2 随冻融循环次数 n 的增加呈指数降低趋势。采用指数函数进行拟合, 拟合相关性系数 $R^2 = 0.9783$, 拟合曲线方程为

$$G_2(n) = 4.20 + 4.633\exp(-n/12.553) \quad (14)$$

式中: G_2 为垂直于板岩层理面的剪切模量 (GPa)。

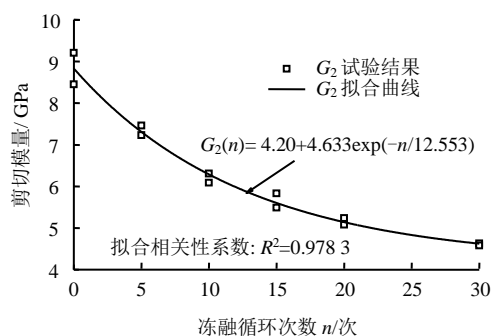


图 6 剪切模量与冻融循环次数关系曲线

Fig.6 Relationships between shear modulus and the number of freeze-thaw cycles

4.3 单轴抗压强度变化规律

从图 7 中可看出, 单轴抗压强度随层理倾角的变化表现出明显的各向异性特征。随层理倾角从 0° 增加至 90° , 板岩单轴抗压强度呈现出先减小后增加的变化趋势, 曲线基本上呈 U 型。以 0 次冻融循环次数作用下板岩强度曲线为例, 层理倾角为 0° , 单轴抗压强度达到最大值, 其值为 49.9 MPa; 层理倾角为 60° , 单轴抗压强度达到最小值, 其值为 18.2 MPa, 相比降低了 63.5%。可见, 层理倾角对板岩单轴抗压强度具有明显的影响。

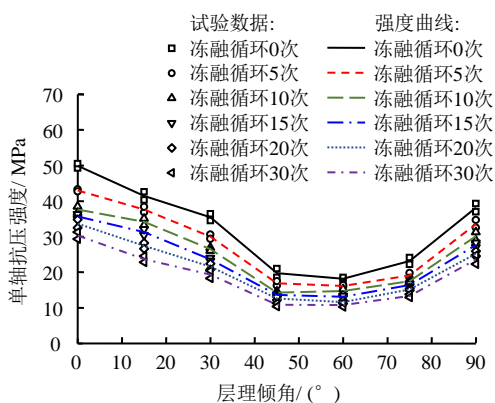


图 7 单轴抗压强度与层理倾角关系曲线

Fig.7 Relationships between uniaxial compressive strength and bedding angles

由图 8 可以看出, 随着冻融循环次数增加, 单轴抗压强度逐渐降低。当冻融循环次数从 0 次增至 30 次时, 层理倾角 $\beta = 0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 的板岩单轴抗压强度依次降低了 39.8%、42.9%、42.9%、45.1%、40.7%、42.3% 和 38.3%。其主要原因是: ①板岩具有高孔隙率 (孔隙率达到 3.46%), 吸水能力强 (饱和吸水率达到 1.76%), 遇水抗软化能力差及抗拉强度低等特性; ②在低温冻结状态下, 板岩中孔隙水或裂隙水将会冻结成冰引起 9%

的体积膨胀率,在其内部产生较大拉应力,造成内部微裂隙扩展;在常温融化状态下,板岩内部水分发生融解,冻胀力逐步释放,孔隙水或裂隙水在微孔隙中继续迁移,随着冻融循环次数增加,微裂隙受冻胀力的影响进一步扩展最终形成贯通裂缝,致使岩石单轴抗压强度逐渐衰减;③水分子进入岩石内部,会产生孔隙水压力,削弱了岩石颗粒间的黏结力,使得岩石抗压强度急剧下降。

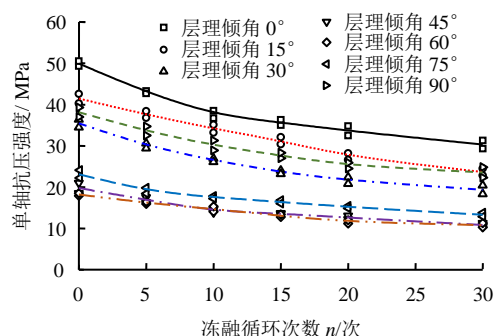


图8 单轴抗压强度与冻融循环次数关系曲线

Fig.8 Relationships between uniaxial compressive strength and the number of freeze-thaw cycles

4.4 试样破坏特征

图9是冻融循环作用前、后的板岩典型破坏类型,单轴压缩加载时,冻融循环作用对板岩破坏类型的影响不大,其破坏类型基本上属于剪切和劈裂破坏。但由于层理倾角不同,其破坏类型主要有3种:当层理倾角为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 时,岩样沿与竖向轴线呈一定角度的方向发生剪切破坏,破坏时需要剪断层理面间的岩石。此时板岩的单轴抗压强度较高;当层理倾角为 $15^\circ \sim 75^\circ$ 时,由于层理面对板岩的单轴抗压强度具有“弱化效应”,层理面附近会产生沿层理方向的剪切型裂纹,从而导致岩样在层理面处产生剪切滑移破坏。因此,板岩的单轴抗压强度较低;当层理倾角为 90° 时,岩样沿垂直方向产生典型劈裂破坏,破裂面位于层理面。由于层理面的抗拉强度较低,使得岩样的单轴抗压强度也有降低。

5 冻融循环作用下板岩单轴抗压强度

5.1 Jaeger 单弱面理论

如图10(a)所示,Jaeger^[16]单弱面理论认为,岩体中发育有一组弱面,例如板岩中的层理面。在单轴压缩状态下,假定此弱面的法线方向与荷载方向之间的夹角为 β ,根据平面应力状态可知,弱面上正应力 σ_β 和切应力 τ_β 的表达式为



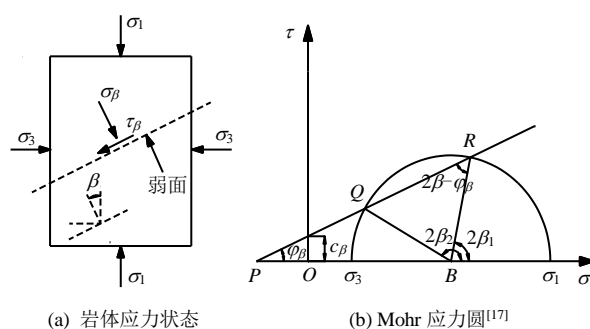
(a) 冻融循环作用前



(b) 冻融循环作用后

图9 岩样典型破坏类型

Fig.9 Typical failure forms of rock specimens



(a) 岩体应力状态

(b) Mohr 应力圆^[17]

图10 Jaeger 单弱面理论示意图

Fig.10 Schematic of the single discontinuity theory

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\beta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) \\ \tau_\beta &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

假定弱面的抗剪强度 τ_β 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,则有

$$\tau_\beta = \sigma_\beta \tan \varphi_\beta + c_\beta \quad (16)$$

式中: c_β 和 φ_β 分别为弱面的黏聚力与内摩擦角。

将式(14)代入式(15),并注意到单轴压缩试验条件下 $\sigma_3 = 0$ MPa,即可求得岩样沿弱面产生破坏的单轴抗压强度公式为

$$\sigma_1 = \frac{2c_\beta}{(1 - \tan \varphi_\beta \cot \beta) \sin 2\beta} \quad (17)$$

式中: σ_1 为岩体的单轴抗压强度(MPa); β 为岩

体的弱面倾角 ($^{\circ}$)。

如图 10(b)所示, 依据正弦定理, 又可求出单轴压缩试验条件下试样沿弱面产生破坏的两个极限角度 β_1 和 β_2 , 如式 (18)、(19) 所示^[16-18]:

$$\beta_1 = \frac{\varphi_{\beta}}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + 2c_{\beta} \cot \varphi_{\beta}) \sin \varphi_{\beta}}{\sigma_1} \right] \quad (18)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_{\beta}}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + 2c_{\beta} \cot \varphi_{\beta}) \sin \varphi_{\beta}}{\sigma_1} \right] \quad (19)$$

5.2 未经冻融循环作用板岩单轴抗压强度预测模型

表 2 是由试验得出的 6 种冻融循环次数作用下不同层理倾角的板岩单轴抗压强度。

为了便于分析, 将式 (17) 作如下数学变换, 令

$$Y = X \tan \varphi_{\beta} + c_{\beta} \quad (20)$$

其中: $Y = \sigma_1 \sin \beta \cos \beta$, $X = \sigma_1 \cos^2 \beta$ 。

基于最小二乘法理论, 可以求出参数 c_{β} 和 $\tan \varphi_{\beta}$ 分别为

$$\tan \varphi_{\beta} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (21)$$

$$c_{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{\tan \varphi_{\beta}}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (22)$$

将表 2 中两组冻融循环次数为 0 次的板岩单轴抗压强度试验数据代入式 (21)、(22) 中, 并剔除试验中不是沿弱面产生破坏 (层理倾角为 0° 、 15° 和 90°) 的数据, 即可拟合出弱面上的黏聚力 c_{β} 与内摩擦角 φ_{β} 分别为 5.83 MPa 和 20.1° 。再将弱面上的 c_{β} 与 φ_{β} 代入式 (17), 可以求得考虑层理倾角的单轴抗压强度公式为

$$\sigma_c(\beta) = \frac{11.66}{(1 - 0.366 \cot \beta) \sin 2\beta} \quad (23)$$

式 (23) 是在假定岩样沿弱面产生破坏的基础上提出的, 因此, 岩样层理倾角需要满足 $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ 的条件, 将 $c_{\beta} = 5.83$ MPa 和 $\varphi_{\beta} = 20.1^{\circ}$ 代入式 (17) ~ (19) 中, 并取两组单轴抗压强度平均值 $\sigma_1 = 49.9$ MPa, 可得两个极限角度 β_1 和 β_2 分别为 27.2° 和 82.9° 。

5.3 冻融循环作用下板岩单轴抗压强度预测模型

同理, 将表 2 中经历不同冻融循环次数作用的板岩单轴抗压强度数据代入式 (21)、(22) 中, 可分别拟合出弱面上的 c_{β} 与 φ_{β} , 再将 c_{β} 与 φ_{β} 代入式 (17)、(18) 和 (19) 中, 可分别求得两个极限角

度 β_1 和 β_2 , 如表 3 所示。

表 2 冻融循环作用下单轴抗压强度试验值

Table 2 Uniaxial compressive strengths under freeze-thaw cycles

冻融循环次数	不同层理倾角 $\beta(^{\circ})$ 下单轴抗压强度 / MPa						
	0	15	30	45	60	75	90
0	49.3	42.6	34.5	18.5	17.9	22.2	37.0
	50.5	40.3	36.4	21.0	18.5	24.1	39.3
5	43.3	36.8	30.6	16.3	15.9	19.8	32.5
	42.7	38.4	29.4	17.5	16.4	18.4	34.7
10	38.5	33.2	26.9	14.6	14.1	17.8	28.9
	36.7	35.1	26.1	13.9	15.3	17.2	31.3
15	35.0	30.4	24.0	13.5	12.8	16.8	27.0
	36.3	32.1	23.2	13.7	13.4	16.0	28.3
20	32.5	28.2	22.4	12.2	11.2	15.4	24.5
	34.8	26.6	20.8	13.1	12.0	14.9	25.9
30	29.3	24.5	20.4	11.3	10.3	13.8	22.3
	31.3	22.8	18.3	10.4	11.3	12.9	24.8

表 3 不同冻融循环次数下 c_{β} 、 $\tan \varphi_{\beta}$ 、 β_1 和 β_2 的大小

Table 3 Values of c_{β} 、 $\tan \varphi_{\beta}$ 、 β_1 and β_2 under different freezing-thawing cycles

冻融循环次数	黏聚力 c_{β} / MPa	$\tan \varphi_{\beta}$	β_1 / ($^{\circ}$)	β_2 / ($^{\circ}$)
0	5.83	0.366	27.2	82.9
5	5.00	0.362	27.0	83.0
10	4.50	0.356	26.9	82.7
15	4.18	0.353	26.3	82.9
20	3.80	0.351	26.2	83.2
30	3.40	0.350	26.1	83.2
平均值	4.45	0.356	26.6	83.0

图 11 是弱面上的 c_{β} 与 n 的关系, 随着 n 增加, 黏聚力呈指数降低趋势。因此, c_{β} 与 n 的关系曲线可用指数函数进行拟合, 拟合相关性系数为 $R^2 = 0.9954$, 易得到

$$c_{\beta}(n) = 2.946 + 2.855 \exp(-n/16.69) \quad (24)$$

式中: $c_{\beta}(n)$ 为冻融循环次数为 n 时岩体弱面上的黏聚力 (MPa)。

图 12 是弱面上的 $\tan \varphi_{\beta}$ 值与 n 的关系, 随着冻融循环次数增加, $\tan \varphi_{\beta}$ 值略有减小的变化趋势, 可用指数函数进行拟合, 拟合相关性系数为 $R^2 = 0.9698$, 拟合曲线方程为

$$\tan \varphi_{\beta}(n) = 0.3474 + 0.0192 \exp(-n/13.17) \quad (25)$$

将考虑 n 之后的 c_{β} 和 $\tan \varphi_{\beta}$ 代入式 (17), 可得

以 n 和 β 为控制变量的板岩单轴抗压强度公式为

$$\sigma_c(\beta, n) = \frac{a_1 + b_1 \exp(-n/c_1)}{\{1 - a_2 \cot \beta - b_2 \exp(-n/c_3) \cot \beta\} \sin 2\beta} \quad (26)$$

式中: 拟合参数 $a_1 = 5.892$, $b_1 = 5.710$, $c_1 = 16.69$, $a_2 = 0.3474$, $b_2 = 0.0192$, $c_2 = 13.17$; $\sigma_c(\beta, n)$ 为板岩单轴抗压强度 (MPa)。

由式 (26) 可建立冻融循环作用下层状岩体的单轴抗压强度预测模型, 只需通过拟合试验数据来确定参数 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 和 c_2 的值, 即可得到适用于该工程的单轴抗压强度预测模型。

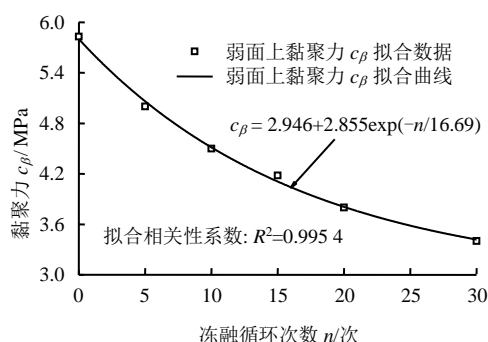


图 11 黏聚力与冻融循环次数关系曲线
Fig.11 Relationship between cohesion and the number of freeze-thaw cycles

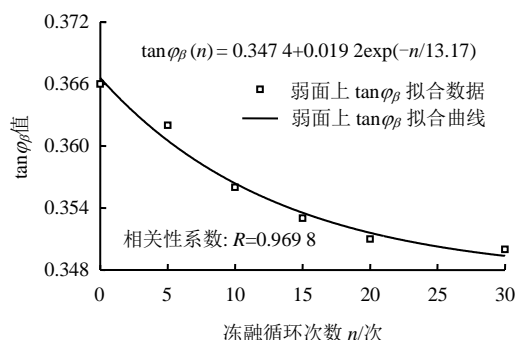
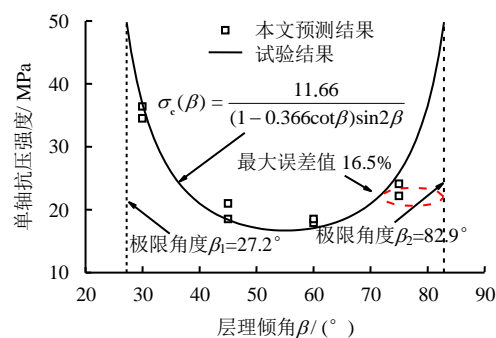


图 12 $\tan \phi_\beta$ 与冻融循环次数关系曲线
Fig.12 Relationship between $\tan \phi_\beta$ and the number of freeze-thaw cycles

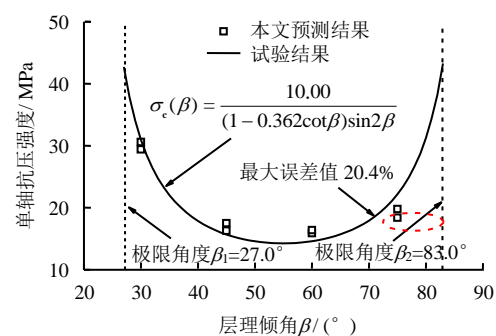
由表 3 还可知, 随着冻融循环次数改变, β_1 和 β_2 的变化均很小, 其平均值分别为 26.6° 和 83.0° 。因此, 冻融循环作用下板岩破坏类型为: 当 $0^\circ \leq \beta \leq 26.6^\circ$ 时, 板岩沿与竖向轴线呈一定角度方向发生剪切破坏; 当 $26.6^\circ \leq \beta \leq 83.0^\circ$ 时, 板岩沿层理面的发生剪切破坏; 当 $83.0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 时, 板岩沿垂直方向发生劈裂破坏。理论分析结果与试验现象相一致。

5.4 预测模型验证

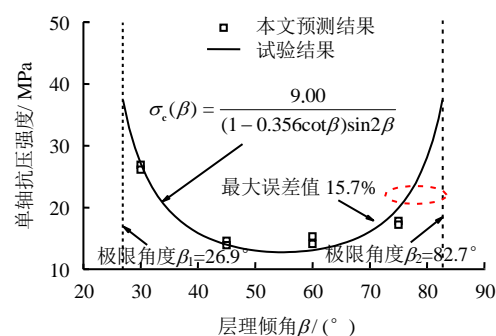
图 13 是经历不同冻融循环次数作用下的板岩单轴抗压强度随层理倾角变化的预测和试验结果。由图可知, 在满足 $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ 的条件下, 采用本文计算公式得出的单轴抗压强度与试验结果基本一致, 验证了本文预测模型的精确性。



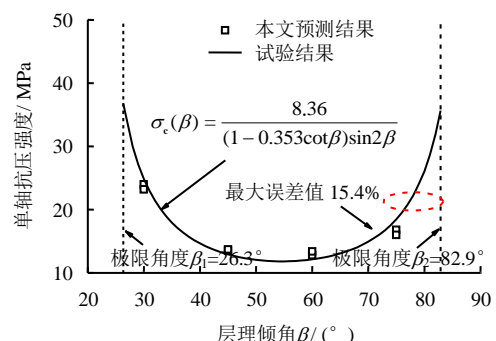
(a) 0 次冻融循环



(b) 5 次冻融循环



(c) 10 次冻融循环



(d) 15 次冻融循环

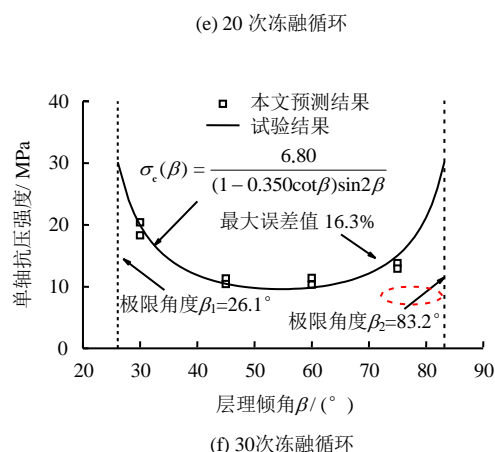
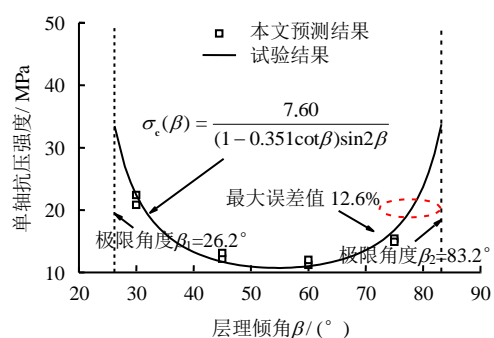


图 13 经历不同冻融循环次数作用下板岩单轴抗压强度
Fig.13 Uniaxial compressive strengths after different numbers of freeze-thaw cycles

6 结 论

(1) 借助室内冻融循环和单轴压缩试验手段, 获得了 7 种层理倾角 β 、6 种冻融循环次数 n 条件下的板岩单轴抗压强度。

(2) 采用单轴压缩试验测得了板岩 5 个弹性参数, 随着冻融循环次数增加, 弹性模量和剪切模量呈指数下降趋势, 泊松比呈线性增加的趋势。

(3) 基于 Jaeger 单弱面理论, 建立了以冻融循环次数 n 和层理倾角 β 为控制变量的板岩单轴抗压强度预测模型, 并通过试验数据验证了模型的合理性。

(4) 板岩单轴抗压强度随冻融循环次数增加呈指数降低趋势, 随层理倾角增加呈先减后增的变化趋势。

(5) 板岩在单轴压缩条件下主要有 3 种破坏类型: 当层理倾角 $0^{\circ} \leq \beta \leq 26.6^{\circ}$ 时, 沿与轴线呈一定角度方向发生剪切破坏; 当层理倾角 $26.6^{\circ} \leq \beta \leq 83.0^{\circ}$ 时, 沿层理面发生剪切破坏; 当层理倾角 $83.0^{\circ} \leq \beta \leq 90^{\circ}$ 时, 沿垂直方向发生劈裂破坏。冻融循环作用对板岩的破坏类型影响不大。

参 考 文 献

- [1] MOKHTARI M, SCHIPPER D J, VLEUGELS N, et al. Transversely isotropic viscoelastic materials: Contact mechanics and friction[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2016, 97: 116—123.
- [2] CHEN Q, NEZHAD M M, FISHER Q, et al. Multi-scale approach for modeling the transversely isotropic elastic properties of shale considering multi-inclusions and interfacial transition zone[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2016, 84: 95—104.
- [3] AMADEI B. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1996, 33(3): 293—325.
- [4] CHEN C S, PAN E, AMADEI B. Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(1): 43—61.
- [5] RAMAMURTHY T. Strength and modulus responses of anisotropic rocks[M]. HUDSON J A. Comprehensive Rock Engineering. Oxford: Pergamon Press, 1993: 313—329.
- [6] TIEN Y M, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2000, 37(6): 1001—1012.
- [7] 刘运思, 傅鹤林, 伍毅敏, 等. 横观各向同性岩石弹性参数及抗压强度的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3398—3404.
- [8] LIU Yun-si, FU He-lin, WU Yi-min, et al. Experimental study of elastic parameters and compressive strength for transversely isotropic rocks[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3398—3404.
- [9] ALTINDAG R, ALYILDIZ I S, ONARGAN T. Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41(6): 1023—1028.
- [10] TAN Xian-jun, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 68(3): 130—138.
- [10] JAMSHIDI A, NIKUDEL M R, KHAMEHCHIYAN M. Evaluation of the durability of Gerdooe travertine after

- freeze-thaw cycles in fresh water and sodium sulfate solution by decay function models[J]. **Engineering Geology**, 2016, 202(4): 36—43.
- [11] 吴安杰, 邓建华, 顾乡, 等. 冻融循环作用下泥质白云岩力学特性及损伤演化规律研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(11): 3065—3072.
- WU An-jie, DENG Jian-hua, GU Xiang, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of argillaceous dolomite under freeze-thaw cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3065—3072.
- [12] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(8): 1688—1694.
- ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, YANG Zhen-feng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1688—1694.
- [13] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. **中国矿业大学学报**, 2011, 40(1): 140—145.
- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Freeze-thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2011, 40(1): 140—145.
- [14] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京: 煤炭出版社, 1994: 177—179.
- CHEN Zi-yin. Analytic method of mechanical analysis for the surrounding rock[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 1994: 177—182.
- [15] 中华人民共和国电力工业部. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Ministry of Electricity Industry of People's Republic of China. GB/T50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [16] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rock[J]. **Geological Magazine**, 1960, 97: 65—72.
- [17] 冒海军, 杨春和. 结构面对板岩力学特性影响研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(20): 3651—3656.
- MAO Hai-jun, YANG Chun-he. Study on effects of discontinuities on mechanical characters of slate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3651—3656.
- [18] 宋彦琦, 李名, 刘江, 等. 含不同倾角天然软弱夹层的大理岩破坏试验[J]. **中国矿业大学学报**, 2015, 44(4): 623—629.
- SONG Yan-qi, LI Ming, LIU Jiang, et al. Experimental test on marble containing natural weak interlayer of different angles[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2015, 44(4): 623—629.
- 流模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(10): 2112—2119.
- KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2112—2119.
- [15] RAO C, TUTUMLUER E, KIM I T. Quantification of coarse aggregate angularity based on image analysis[J]. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2002, 1787(1): 117—124.
- [16] WANG Peng-cheng, LIU Jian-kun, LIU Li. The biaxial compression mechanical properties of crushed rock[J]. **Science of Cold and Arid Region**, 2013, 8(4): 433—439.
- [17] 王鹏程, 刘建坤, 李旭, 等. 双轴压缩条件下碎石集料静力剪切特性研究[J]. **铁道学报**, 2014, 36(6): 87—92.
- WANG Peng-cheng, LIU Jian-kun, LI Xu, et al. Static shear behavior of crushed rock aggregate subjected to biaxial compression[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2014, 36(6): 87—92.

上接第 2202 页

- [10] QIAN Y. Integrated computational and experimental framework for the assessment of railroad ballast life-cycle behavior[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2014.
- [11] INDRARATNA B, NGO N, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: A discrete element simulation[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2014, 14(1): 34—44.
- [12] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method[J]. **Granular Matter**, 2007, 12: 69—80.
- [13] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(8): 1281—1286.
- ZHANG Chong, SHU Gan-ping. Effect of particle shape on biaxial tests simulated by particle flow code[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1281—1286.
- [14] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒