

DOI: 10.11779/CJGE201803009

低温热力耦合下岩体椭圆孔（裂）隙中冻胀力与冻胀开裂特征研究

黄诗冰^{1,2}, 刘泉声³, 刘艳章¹, 程爱平¹

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 寒区岩体工程含水孔（裂）隙中低温水冰相变会产生冻胀力与温度应力, 岩体冻融损伤与断裂是由温度应力和孔（裂）隙中的冻胀力共同作用的结果。考虑温度应力对椭圆孔（裂）隙形变的影响, 推导了椭圆孔（裂）隙中的冻胀力解析方程; 基于最大拉应力准则, 得到了低温热力耦合下椭圆孔（裂）隙周围最大拉应力与冻胀开裂角, 建立了椭圆孔可简化为椭圆裂隙进行冻胀计算的临界条件; 最后采用改进的等效热膨胀系数方法对隧道单裂隙围岩冻胀力与裂隙尖端应力场进行了数值分析。研究结果表明: ①椭圆孔中的最大冻胀力与岩石的热膨胀性、裂隙倾角和裂隙长短轴比 χ 等因素有关; ②长短轴比 $\chi \geq 10$ 的扁平椭圆孔可简化为裂隙进行计算分析, 此时冻胀基本发生在裂隙尖端且尖端拉应力集中明显; ③改进的等效热膨胀系数方法可以很好的模拟裂隙中的冻胀力与裂尖应力场。

关键词: 椭圆孔（裂）隙; 冻胀力; 温度应力; 冻胀开裂角; 裂尖应力场

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)03-0459-09

作者简介: 黄诗冰(1989-), 男, 博士, 2011年毕业于中国地质大学(武汉)土木工程专业, 现任讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: huang1989.9@163.com。

Frost heaving pressure and characteristics of frost cracking in elliptical cavity (crack) of rock mass under coupled thermal-mechanical condition at low temperature

HUANG Shi-bing^{1,2}, LIU Quan-sheng³, LIU Yan-zhang¹, CHENG Ai-ping¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei

Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan, 430081, China; 3. State Key

Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan

430071, China)

Abstract: The frost heaving pressure is induced by water-ice phase transition in water-bearing cracks in addition to thermal stress at low temperature in rock engineering in cold regions. The freeze-thaw damage and cracking are caused by the combined action of frost heaving pressure with thermal stress. Considering the influence of thermal stress on elliptical cavity (crack), an analytical equation for the frost heaving pressure is deducted. Based on the maximum tensile-stress criterion, the maximum tensile stress and frost cracking angle on the elliptical cavity (crack) are derived. Besides, the critical condition for simplifying elliptical cavity to crack is also established under coupled thermo-mechanical condition at low temperature. Finally, the developed method for the equivalent thermal expansion coefficient is adopted to simulate the frost heaving pressure in crack and stress field at crack tip. The research results show that: (1) The maximum frost heaving pressure in the elliptical cavity is affected by the thermal expansion of rock, dip angle of crack, ratio of crack length to width χ and so on; (2) When $\chi \geq 10$, the flat elliptical cavity can be simplified as the crack, and the frost cracking appears at the crack tip with obvious stress concentration; (3) The frost heaving pressure and stress field at crack tip can be well simulated by the developed method for the equivalent thermal expansion coefficient.

Key words: elliptical cavity (crack); frost heaving pressure; thermal stress; frost cracking angle; stress field at crack tip

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目(41702291, 51604195); 国家自然科学基金青年基金项目(51604195)

收稿日期: 2017-01-17

0 引言

寒区高山隧道施工与运营、低温液化气储存以及露天矿山开采等寒区岩体工程建设都出现了岩体冻融损伤与断裂问题, 裂隙岩体冻融损伤与断裂对寒区工程安全与稳定构成了极大威胁^[1-2]。如今, 随着中国“一带一路”战略的提出, 其中涉及高铁建设里程达到了 2.6 万 km, 由于高铁的设计时速高达 400 km/h 以上, 这将引起隧道出入口以内的岩体段发生强烈的冻融损伤与断裂破坏, 从而引起围岩整体结构损伤与强度弱化, 岩体裂隙中的水冰相变过程会进一步加剧围岩的损伤程度。因此, 研究裂隙中的冻胀力量值与裂隙冻胀断裂机制显得尤为重要。

岩体冻融损伤是由于岩体孔(裂)隙中水冰相变过程中冻胀力反复萌生与消散引起岩体结构弱化的结果^[3]。关于孔(裂)隙中的冻胀力量值问题很早就已引起国内外学者关注。在国内较多是通过理论建模和数值模拟来探究孔(裂)隙中冻胀力大小。刘泉声等^[4]对柱状裂隙中的冻胀力萌生演化机制进行了研究, 建立了冻胀水压力与冻结温度和岩石渗透率的关系式; 赵鹏等^[5]将裂隙前缘假定为圆形, 得到了危岩主控结构面中的冻胀力计算方程; 刘泉声等^[6]还对无约束下扁平椭圆裂隙中的冻胀力量值进行了探究, 建立了椭圆裂隙冻胀力解析解与数值分析方法; 申艳军等^[7]从多场耦合的角度出发, 探究了地表裂隙硬岩内部温度场和裂隙冻胀力演化过程。在国外, 很早就有关于孔(裂)隙中冻胀力量值大小的探讨, 但由于受限于当时的实验技术, 早期研究主要停留在理论探究上, 通过理论计算得到的冻胀力量值也相差较大^[8-9]。近年来, 随着实验方法的完善, 一些学者开始通过室内直接测试的方法来研究冻胀力的萌生演化过程, 如 Davidson 等^[10]和 Arosio 等^[11]分别采用光弹性实验和薄膜压力传感器对裂隙中的冻胀力进行了监测分析, 得到了冻胀力随裂隙深度和冻结时间的演化规律。

目前关于裂隙冻胀开裂特征的研究根据研究方法不同可分为有限元模拟、单裂隙冻胀实验和断裂力学理论分析 3 个方面。刘泉声等^[12]采用有限元方法对裂隙尖端应力场进行了分析; 申艳军等^[13]通过预制饱和裂隙, 研究了裂隙冻胀过程中的端部断裂特性并结合断裂力学理论给出了裂隙冻胀开裂应力强度因子。

然而, 现有研究很少考虑温度应力和裂隙几何参数对裂隙冻胀力演化规律和冻胀开裂过程的影响, 基本上都假定非平直裂隙冻胀开裂仍发生在裂隙长轴处。目前在研究岩体非连续断裂与扩展问题时一般也不考虑裂隙厚度对裂纹扩展的影响以及外荷载对裂隙

厚度的改造, 但饱水夹冰裂隙不同于常规裂隙, 裂隙冻胀力大小以及裂隙断裂位置等都与裂隙几何尺寸有关, 而裂隙几何尺寸又受到温度应力的影响: 对于冻胀性岩石, 在低温下裂隙受到温度应力压缩作用; 对于膨胀性岩石, 在低温下裂隙反而会被拉开。

因此, 本文考虑椭圆孔中的水冰相变问题, 在已有研究基础之上^[6], 进一步探究温度应力和椭圆孔几何参数对冻胀力的影响规律; 利用弹性力学理论推导了温度应力与冻胀力耦合下的椭圆孔冻胀开裂判据, 进而给定了椭圆孔与椭圆裂隙的划分界限; 最后考虑水冰相变过程中的流-固转化特性, 对等效热膨胀系数方法进行了改进, 通过对比扁平椭圆裂隙中的冻胀力解析解和数值解, 说明了本文理论模型与数值分析方法的正确性, 本文研究可为进行裂隙岩体冻融损伤与扩展演化过程研究提供借鉴。

1 椭圆孔(裂)隙冻胀解析模型

1.1 概化模型

寒区隧道岩体中经常发生冻融开裂挂冰现象, 因此以寒区隧道围岩中的饱水椭圆孔(裂)隙为研究对象, 探究热-力耦合下孔(裂)隙中的冻胀力演化规律与冻胀开裂特征, 在充分考虑实际工况作如下假定:

- (1) 孔(裂)隙冻结前后始终保持椭圆形不变, 孔(裂)隙含水饱和, 冻结前长短轴分别记为 a 和 b 。
- (2) 围岩沿隧道走向可简化为无限大平面, 隧道边界条件为走向上受到固定位移约束(如图 1 所示)。
- (3) 由于冰体上未冻水膜存在^[14], 不考虑冰体与孔(裂)隙壁的摩擦力, 横断面上冻胀力均匀分布。
- (4) 冰体和岩石基质均视为均质各向同性弹性介质, 孔(裂)隙开裂满足最大拉应力准则。

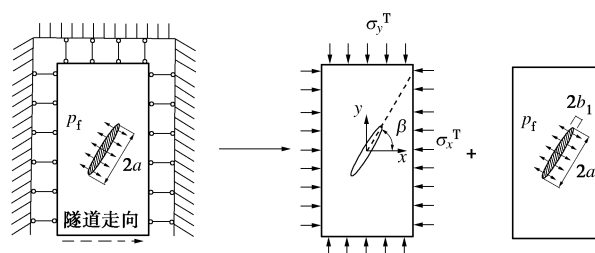


图 1 低温冻结围岩裂隙周围的应力状态分解

Fig. 1 Decomposition of stress state around crack in freezing surrounding rock at low temperature

1.2 体积膨胀耦合方程

孔(裂)隙总长度记为 l , 已冻结段长度记为 l_f , 在冻结段内, 水冰在无约束条件下的体积膨胀量为^[6]

$$\Delta V_f' = \beta(1 - \zeta)V_f^0 u^T, \quad (1)$$

式中, β 为自由水冰相变下的体积膨胀系数, 一般取 1.09, u^T 为温度 T 下孔(裂)隙水冻结率(%), ζ 为迁移出的孔(裂)隙水体积百分比。

冻结段冻结前容积为

$$V_f^0 = \pi a b l_f \quad (2)$$

冻结完成后冰体受到孔(裂)隙壁的约束, 在冻胀力 p_f 下冰体体积相对于自由膨胀状态时会发生压缩变形, 由弹性理论可知在平面应变下自由冰的体应变为

$$\varepsilon_i^v = p_f / K_i^T \quad (3)$$

式中, K_i^T 为冰的体积模量。

在孔(裂)隙壁约束下的实际冰体积为

$$V_f = (V_f^0 - \zeta V_f^0 + \Delta V_f)(1 - \varepsilon_i^v) \quad (4)$$

将式(1)~(3)代入式(4)中, 可得冻结了实际裂隙冰的体积为

$$V_f = \pi a b l_f (1 - \zeta)(1 + \beta u^T)(1 - p_f / K_i^T) \quad (5)$$

冻结了冻结段裂隙容积可记为

$$V_f^1 = \pi(a + \Delta a)(b + \Delta b)l_f \quad (6)$$

式中, V_f^1 为冻结段发生冻结后的裂隙容积; Δa , Δb 分别为在冻胀力和温度应力下裂隙横截面长短轴的总变化量。

冻结了裂隙冰将充满长度为 l_f 的裂隙段, 裂隙冰的体积与裂隙容积相等, 从而有膨胀耦合关系:

$$V_f = V_f^1 \quad (7)$$

1.3 低温冻结下的裂隙变形

(1) 冻胀力引起的裂隙变形

从孔(裂)隙水冰相变体积膨胀耦合关系可以看出, 要得到热力耦合下的孔(裂)隙冻胀力需要对孔(裂)隙容积扩展量进行求解, 对于平面椭圆形裂纹在均布内压下, 利用弹性力学结合复变函数理论可计算得到裂隙长短轴处位移(见图2中A, B点)。

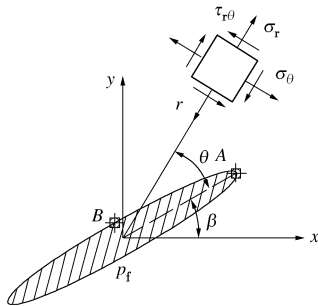


图2 裂隙横断面尖端应力场计算模型

Fig. 2 Computational model for stress field at crack tip

根据复变函数理论, 对于含孔洞问题, 弹性体内的位移场可表示为

$$\frac{1}{2G_s^T}(u_\rho + iu_\theta) =$$

$$\frac{\bar{\xi}}{\rho_s} \cdot \frac{\overline{\omega'(\xi)}}{|\omega'(\xi)|} \cdot \left[\frac{3 - \nu_s^T}{1 + \nu_s^T} \varphi(\xi) - \frac{\omega(\xi)}{\overline{\omega'(\xi)}} \overline{\varphi'(\xi)} - \overline{\psi(\xi)} \right] \quad (8)$$

式中, G_s^T 为温度 T 下岩石的剪切模量, 可表示为 $G_s^T = E_s^T / [2(1 + \nu_s^T)]$, 其中 E_s^T , ν_s^T 为温度 T 下岩石的弹性模量与泊松比。 $\varphi(\xi)$ 和 $\psi(\xi)$ 是根据边界条件选取的复变函数。

根据保角变换关系, 在 ξ 平面上有

$$\xi = \rho e^{i\theta} = \rho(\cos\theta + i\sin\theta) \quad (9)$$

其中 ρ , θ 为 z 平面上的极坐标; i 为虚数单位。

对于椭圆形孔(裂)隙, 采用保角变换可得在 ξ 平面上有

$$\omega(\xi) = R \left(\frac{1}{\xi} + m\xi \right) \quad (10)$$

如图1所示, 低温饱和围岩冻结过程受力可分解为由温度变化引起的温度应力和孔(裂)隙水冰相变引起的孔(裂)隙冻胀力。当裂隙岩体仅仅受到孔(裂)隙冻胀力作用时复变函数 $\varphi(\xi)$ 和 $\psi(\xi)$ 可分别表示为

$$\varphi(\xi) = -p_f R m \xi \quad (11)$$

$$\psi(\xi) = -p_f R (1 + m^2) \frac{\xi}{1 - m\xi^2} \quad (12)$$

将式(9)~(12)代入到式(8)中可得到在冻胀力下孔(裂)隙长轴中心点A处位移为

$$u_r^A = \frac{p_f R}{2G_s^T} \left(1 - \frac{3 - \nu_s^T}{1 + \nu_s^T} m \right) \quad (13)$$

同理可得短轴中心点B处位移为

$$u_r^B = \frac{p_f R}{2G_s^T} \left(\frac{3 - \nu_s^T}{1 + \nu_s^T} m + 1 \right) \quad (14)$$

式中, $m = (a - b)/(a + b)$, $R = (a + b)/2$ 。

因此, 由孔(裂)隙中冻胀力引起的孔(裂)隙长短轴比变化分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_f &= u_r^A \\ \Delta b_f &= u_r^B \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(2) 考虑温度应力下的裂隙冻胀变形

温度降低会引起低孔隙率与非饱和岩石收缩, 但对于高孔隙率饱和岩石而言, 温度降低岩石反而会发生膨胀变形^[15]。由于受到外部约束以及岩体内部变形协调要求, 岩石低温收缩与膨胀不能自由发生会在岩体中产生温度应力。在平面应变条件下, 如果岩体内的温度分布只是 x 与 y 的函数, 则物理方程可表示为

$$\sigma_{ij}^T = 2G_s^T \varepsilon_{ij}^T + \lambda_s^T \varepsilon_v^T \delta_{ij} - \frac{\alpha_s^T E_s^T \Delta T}{1 - 2\nu_s^T} \delta_{ij} \quad (16)$$

式中, i, j 取 x, y 或 z ; $\varepsilon_v^T = \varepsilon_x^T + \varepsilon_y^T + \varepsilon_z^T$ 为体应变; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; α_s^T 为温度 T 下岩石的等效线膨胀系数; ΔT 为冻结温度场。

结合几何方程, 用位移表示的平衡方程为

$$G_s^T \nabla^2 u_i + (\lambda_s^T + G_s^T) u_{k,ki} - \frac{\alpha_s^T E_s^T}{1-2\nu_s^T} \Delta T_{,i} = 0 \quad (17)$$

式中 λ_s^T 为拉梅常数; u_i 为围岩中由于温度变化引起的位移。

位移解法的应力边界条件为

$$\lambda_s^T u_{k,k} n_i + G_s^T n_j (u_{i,j} + u_{j,i}) - \frac{\alpha_s^T E_s^T}{1-2\nu_s^T} \Delta T n_i = 0 \quad (18)$$

位移边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= u \\ \bar{v} &= v \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

可以看出, 岩体内部的温度应力相当于在等效体力和等效面力共同作用下岩石内产生的应力。

平面应变问题下的等效体力为

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{\alpha_s^T E_s^T}{1-2\nu_s^T} \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \\ f_y &= \frac{\alpha_s^T E_s^T}{1-2\nu_s^T} \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

其中 $\Delta T = T_f - T_0$, T_f 为冻结温度, T_0 为初始温度。

平面应变问题下的等效面力大小为

$$P_x = P_y = \frac{\alpha_s^T E_s^T}{1-2\nu_s^T} \Delta T \quad (21)$$

认为孔(裂)隙附近在冻结过程中会形成统一的温度场, 那么 ΔT 为常数, 即

$$\partial \Delta T / \partial x = \partial \Delta T / \partial y = 0 \quad (22)$$

采用位移解法, 容易得到在图 1 所示的边界条件下岩体中的温度应力为

$$\sigma_x^T = \frac{2G_s^T}{2G_s^T + \lambda_s^T} \frac{\alpha_s^T E_s^T \Delta T}{1-2\nu_s^T} \quad (23)$$

$$\sigma_y^T = 0 \quad (24)$$

对于岩石类脆性材料, 拉应力为负, 由上述分析可知该温度应力若不引起孔(裂)隙变形, 则需在孔(裂)隙面上施加的法向正应力和切向剪应力分别为

$$\sigma_{cr} = -\sigma_\beta^T = -\frac{2G_s^T}{2G_s^T + \lambda_s^T} \frac{\alpha_s^T E_s^T \Delta T}{1-2\nu_s^T} \sin^2 \beta \quad (25)$$

$$\tau_{cr} = -\tau_\beta^T = -\frac{2G_s^T}{2G_s^T + \lambda_s^T} \frac{\alpha_s^T E_s^T \Delta T}{1-2\nu_s^T} \cos \beta \sin \beta \quad (26)$$

反之, 可理解为孔(裂)隙在温度应力下的变形可等效为裂隙表面受应力 (σ_{cr} , τ_{cr})。

因此, 在冻胀力和温度应力共同作用下的椭圆孔(裂)隙长短轴增量表达式(15)应改写为

$$\Delta a = \frac{(p_f - \sigma_\beta^T)R}{2G_s^T} \left(1 - \frac{3-\nu_s^T}{1+\nu_s^T} m\right) \quad (27)$$

$$\Delta b = \frac{(p_f - \sigma_\beta^T)R}{2G_s^T} \left(\frac{3-\nu_s^T}{1+\nu_s^T} m + 1\right) \quad (28)$$

考虑到椭圆孔(裂)隙在温度应力或冻胀力下 Δa 和 Δb 都是极小量, 因而可认为 $\Delta a \times \Delta b \approx 0$ 。

1.4 孔(裂)隙冻胀力解析方程

将式(27)和式(28)代入式(6)中可得冻结终了裂隙容积为

$$V_f^I = \pi a b l_f \left\{ 1 + \frac{(p_f - \sigma_\beta^T)R}{2G_s^T} \left[\frac{1}{b} \left(\frac{3-\nu_s^T}{1+\nu_s^T} m + 1 \right) + \frac{1}{a} \left(1 - \frac{3-\nu_s^T}{1+\nu_s^T} m \right) \right] \right\} \quad (29)$$

将式(5)、(29)代入式(7)中可得冻胀力与岩石和冰的力学参数、孔(裂)隙几何参数等物理量的关系式

$$p_f = \frac{1}{1/E_c + k_i/K_i^T} \left(k_i - 1 + \frac{\sigma_\beta^T}{E_c} \right) \quad (30)$$

式中, $k_i = (1 + \beta u^T)(1 - \zeta)$ 为考虑水分迁移后的孔(裂)隙水的体积膨胀系数; E_c 是与岩石力学参数和孔(裂)隙几何参数有关的等效弹性模量, 可表示为 $E_c = E_s^T / [2(\chi + 1/\chi + \nu_s^T - 1)]$, 其中 $\chi = b/a$ 。

2 冻胀力与冻胀开裂特征分析

2.1 计算模型参数选取

计算模型中的材料参数选取与文献[15]中的砂质泥岩相同, 以此说明该类膨胀性岩石中的椭圆孔(裂)隙低温冻胀开裂特征。模型位移边界条件如图 1 所示, 计算区域初始温度为 20℃, 隧道开挖后降到 -20℃。砂质泥岩与水冰介质的热-力参数取值如表 1 所示。

表 1 模型热-力学参数取值^[15-16]

介质 /	密度 (kg·m ⁻³)	弹模 /GPa	泊松 比	孔隙 率/%	比热 /(kJ· kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	线膨胀 系数 /(℃ ⁻¹)	导热系数 /(W· m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
砂质 泥岩	2500	11.5	0.25	8	816.43	4.89×10 ⁻⁶	2.00
冰	917	0.6	0.35	—	1.88	—	2.20
水	1000	—	—	—	4.2	—	0.56

对于低温含水岩石而言, 由于孔隙水冰相变影响, 高孔隙率饱和岩石在低温下表现为冻胀变形, 而低孔隙率岩石表现为冻缩变形^[17-18]。因此, 冻结过程中应该采用等效热膨胀系数来表征岩石低温效应。岩石等效热膨胀系数可以通过不同冻结温度下的冻胀变形测试获得, 根据刘泉声等^[15]的研究结果以及等效热膨胀系数定义, 可表示成如下形式

$$\alpha_s^T = \begin{cases} \alpha_{s0} - n \frac{p_i}{3K_s^T(T_f - T_0)} (1 - w_u) & T_f \leq T_m \\ \alpha_{s0} & T_f > T_m \end{cases} \quad (31)$$

上式中 α_{s0} 为冻结点 T_m 以上岩石热膨胀系数, T_m

为体积水冻结点, 一般取 273.15 K; n 为岩石孔隙率; p_i 为孔隙冰压力; $w_u = 1 - e^{-M(T_f - T_m)}$ 为岩石中的未冻水含量方程, 其中 M 是与岩石孔隙分布有关的参数, 可以通过冻胀变形测试确定。

根据砂质泥岩低温冻胀变形测试, 通过拟合可得到低温下岩石的未冻水含量方程。将未冻水含量方程代入式 (31) 中可得低温饱和岩石等效热膨胀系数为

$$\alpha_s^T = \begin{cases} [4.89 + 575.28 \frac{1 - e^{0.088(T_f - T_m)}}{T_f - T_0}] \times 10^{-6} & T_f \leq T_m \\ 4.89 \times 10^{-6} & T_f > T_m \end{cases} \quad (32)$$

2.2 椭圆孔(裂)隙冻胀力变化规律

从式 (30) 可以看出, 冻胀力量值与孔(裂)隙面上的等效正应力和椭圆孔(裂)隙几何参数等有关, 其中等效应力受倾角 β 控制。由图 3 可知, 随着 m 增加, 冻胀力减小, 说明随着孔(裂)隙长宽比增加, 孔(裂)隙冻胀力降低; 但随着 β 增大, 由于温度应力影响增强, 此时冻胀力受孔(裂)隙长宽比的影响则逐渐减弱。当裂隙形状固定不变时, 对于冻胀性砂质泥岩, 随着 β 增加, 冻胀力增大, 这主要是 β 越大, 岩体低温膨胀对孔(裂)隙的挤压作用越强, 水冰相变体积越难释放, 引起冻胀力增加。

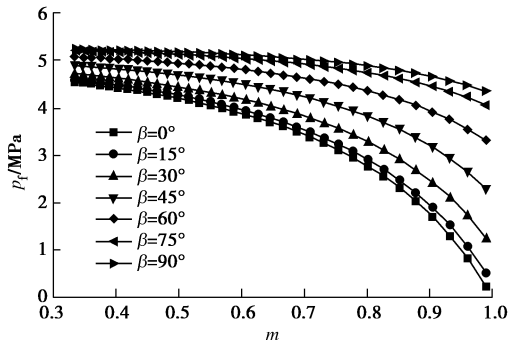


图3 不同倾角 β 下椭圆孔(裂)隙中冻胀力随 m 变化($a=0.02$, $\xi=0.075$)

Fig. 3 Variation of frost heaving pressure in elliptical cavity (crack) with m under different dip angles β ($a=0.02$, $\xi=0.075$)

2.3 冻胀开裂特征

(1) 开裂角 θ 的确定

对于低温下的饱水孔(裂)隙, 关注的重点是其冻胀开裂位置和扩展条件。定义 θ 为椭圆孔(裂)隙的开裂角, 确定开裂位置即是确定 θ 的值。根据弹性力学理论, 容易得到在温度应力下椭圆孔(裂)隙面上的应力场为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho^T &= \tau_{\rho\theta}^T = 0, \\ \sigma_\theta^T &= \sigma_x^T \frac{1 - m^2 + 2m \cos 2\beta - 2 \cos 2(\theta - 2\beta)}{1 + m^2 - 2m \cos 2(\theta - \beta)} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

同理可以得到在冻胀力下周边应力场为

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\rho\theta}^f &= 0, \\ \sigma_\rho^f &= p_f, \\ \sigma_\theta^f &= -p_f \frac{1 - 3m^2 + 2m \cos 2(\theta - \beta)}{1 + m^2 - 2m \cos 2(\theta - \beta)} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

利用叠加原理, 在冻胀力与温度应力共同作用下椭圆孔(裂)隙周边拉应力可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= -p_f \frac{1 - 3m^2 + 2m \cos 2(\theta - \beta)}{1 + m^2 - 2m \cos 2(\theta - \beta)} + \\ \sigma_x^T &= \frac{1 - m^2 + 2m \cos 2\beta - 2 \cos 2(\theta - 2\beta)}{1 + m^2 - 2m \cos 2(\theta - \beta)} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

根据最大拉应力准则, 开裂位置满足以下条件

$$\partial \sigma_\theta / \partial \theta = 0, \quad (36)$$

$$\partial^2 \sigma_\theta / \partial^2 \theta \geq 0. \quad (37)$$

将式 (35) 分别代入式 (36) 和 (37), 可以得到确定椭圆孔(裂)隙开裂角的方程为

$$A \sin \alpha + B \cos \alpha + C = 0, \quad (38)$$

$$A \cos \alpha - B \sin \alpha \geq 0. \quad (39)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 2(\theta - \beta), \\ A &= -2m(m^2 - 1)p_f + (1 - m^2)(\cos 2\beta - m)\sigma_x^T, \\ B &= -\sin 2\beta(1 + m^2)\sigma_x^T, \\ C &= 2m \cdot \sin 2\beta \cdot \sigma_x^T. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

(2) θ 随 m 的变化规律分析

对于扁平椭圆孔, 为简化计算常常被当作裂隙处理, 这样简化处理可避免求解复杂方程式 (38), 此时裂隙开裂位置认为发生在裂隙尖端; 此外, 采用该简化条件还可引入断裂理论对裂隙冻胀扩展过程进行理论分析与数值模拟。然而, 只有椭圆孔厚度(短轴长)相对于长度(长轴长)很小时, 椭圆孔开裂才会发生在长轴尖端, 此时椭圆孔开裂问题可简化为裂隙扩展问题处理。因此, 需要确定该简化成立时椭圆孔几何形状参数 m 应满足的条件。

将表 1 中的参数取值代入开裂角判定式 (38) 和式 (39), 可以得到不同 β 下开裂角 θ 随形状参数 m 的变化规律, 如图 4 所示。可见, 随着 m 值不断增大, 开裂角 θ 逐渐趋近于裂隙倾角 β , 说明开裂位置逐渐向椭圆孔(裂)隙长轴处靠近。从图 5 可以看出, 当 $\chi \geq 10$ 时, 椭圆孔(裂)隙开裂位置基本上发生在长轴尖端, 最大误差不超过 5° , 此时形状参数 $m \geq 0.818$ 。

孔(裂)隙面上最大拉应力随裂隙几何参数变化规律如图 6 所示, 可见, 当 $m \geq 0.818$ 时椭圆孔(裂)隙表面最大拉应力 σ_{\max} 的增加速率随形状参数 m 的增加明显加快, 说明椭圆孔(裂)隙尖端的最大拉应

力集中情况已较为明显，容易发生冻胀断裂。因此对于 $\chi \geq 10$ 的扁长椭圆孔洞而言，可以简化为常规裂隙处理，断裂位置将发生在裂隙尖端。从计算结果来看，当 $m \geq 0.818$ 时，除 $\beta = 90^\circ$ 时由于冻胀温度应力的挤压导致裂隙尖端应力集中不明显外，在 $0 \leq \beta \leq 75^\circ$ 的范围内，裂隙尖端拉应力都远远大于岩石抗拉强度，因此基本上都会发生冻胀扩展，从而引起岩体冻融损伤。

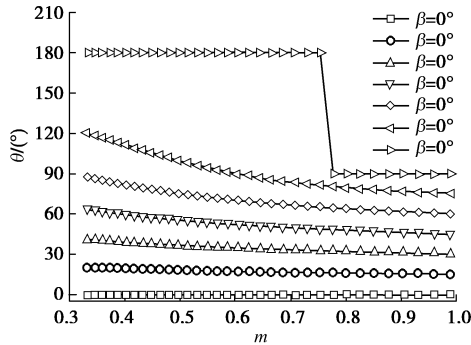


图4 砂质泥岩不同 β 下开裂角 θ 随 m 值变化 ($a=0.02, \zeta=0.075$)
Fig. 4 Variation of cracking angle θ with m under different tip angles β for sandy mudstone ($a=0.02, \zeta=0.075$)

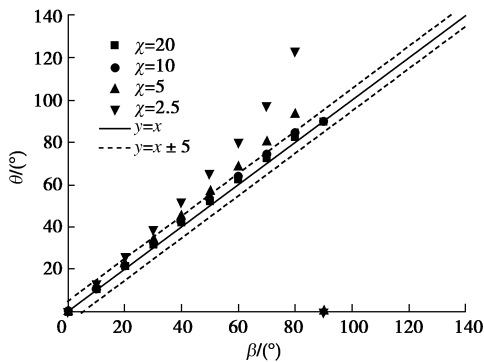


图5 砂质泥岩不同裂隙长宽比 χ 下裂隙周围开裂角 θ 与裂隙倾角 β 的关系 ($a=0.02, \zeta=0.075$)
Fig. 5 Cracking angle θ versus dip angle β under different ratios of crack length to width χ for sandy mudstone ($a=0.02, \zeta=0.075$)

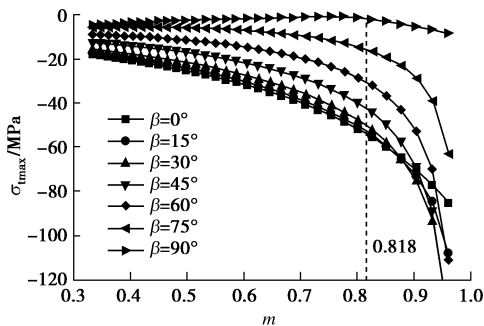


图6 砂质泥岩不同倾角 β 下孔(裂)隙面上最大拉应力 $\sigma_{t \max}$ 随 m 值变化 ($a=0.02, \zeta=0.075$)
Fig. 6 Variation of maximum tensile stress $\sigma_{t \max}$ on cavity (crack) surface with m under different dip angles β for sandy mudstone ($a=0.02, \zeta=0.075$)

3 裂隙冻胀数值计算

3.1 单裂隙隧道围岩数值计算模型

沿巷道走向选取对称围岩的一半为研究对象，模型上边界为巷道所在位置，巷道走向沿 x 方向，因此所选取的研究对象为巷道下半部分。椭圆裂隙长短轴分别为 $0.04 \text{ m} \times 0.004 \text{ m}$ ($\chi=10$)，隧道计算断面长宽分别取为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ ，远大于裂隙尺寸。位移边界如图7所示，温度边界为：巷道处施加 -20°C 的温度荷载，其他3个方向做绝热处理，初始温度设为 20°C 。计算模型参数取值见表1。

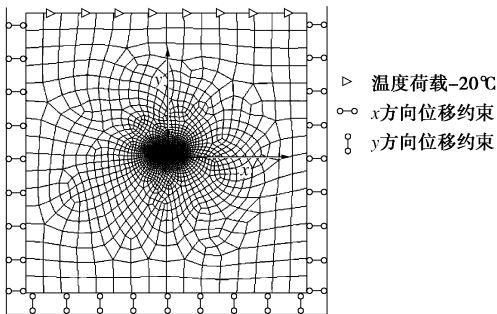


图7 巷道裂隙围岩冻胀计算模型
Fig. 7 Computational model for frost heave of fractured surrounding rock mass

3.2 改进的等效热膨胀系数法

在数值计算过程中，笔者曾探讨可采用等效热膨胀系数方法来模拟裂隙水冻结过程中的冻胀力演化过程^[6]。不考虑外部约束，采用等效热膨胀系数方法计算得到的裂隙水冰相变体积膨胀量应与自由状态下体积膨胀量相同，于是考虑水分迁移下的等效线热膨胀系数 α_e 可以从下式中求得

$$(1 + \alpha_e \Delta T)^3 = k_i \quad (41)$$

但由于水冰相变过程中，冻胀力将处于不断调整，到冻结完成在裂隙横截面上冻胀力应该是相等的，如果采用各方向大小相同的线热膨胀系数进行数值计算，得到的冻胀力在裂隙宽度和厚度方向上数值将相差较大，无法体现出裂隙水冻结过程中冻胀力的自动调整过程，因此需要对上述等效热膨胀系数进行修正。采用各向异性热膨胀系数进行裂隙冻胀过程的数值计算，若不考虑外部约束，将仍存在以下体积对应关系

$$(1 - \alpha_a \Delta T)(1 - \alpha_b \Delta T)(1 - \alpha_l \Delta T) = k_i \quad (42)$$

式中， α_a ， α_b ， α_l 分别为裂隙长度、宽度和走向方向上的线热膨胀系数。其中裂隙走向上线膨胀系数仍可用式(41)计算。

裂隙长度和宽度方向的等效线膨胀系数采用如下原则进行调整：裂隙水自由冻结后在冻胀力的约束下

长短轴之比与裂隙冻结后的长短轴之比相等, 满足体积耦合原理, 即冻结完成后裂隙冰充满裂隙。因此有

$$\frac{(1-\alpha_a \Delta T)a}{(1-\alpha_b \Delta T)b} = \frac{a + \Delta a}{b + \Delta b}, \quad (43)$$

式中, Δa , Δb 可由式 (27) 和 (28) 计算得到。

结合式 (41)、(42)、(43) 可得裂隙各方向上的等效线热膨胀系数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &= (1 - k_i^{1/3} \cdot d^{1/2}) / \Delta T, \\ \alpha_b &= (1 - k_i^{1/3} \cdot d^{-1/2}) / \Delta T, \\ \alpha_l &= (1 - k_i^{1/3}) / \Delta T. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

式中, $d = (1 + \Delta a / a) / (1 + \Delta b / b)$ 。

3.3 裂隙冻胀力

利用式 (44) 得到的各向异性热膨胀系数进行砂质泥岩饱和单裂隙低温冻胀数值计算, 其中冻胀力取为裂隙中心点处的应力 σ_θ 。将冻胀力数值解与式 (30) 得到的解析解进行对比 (如图 8 所示), 可以看出不同水分迁移量和裂隙倾角下裂隙冻胀力数值解与解析解吻合较好, 且随着裂隙倾角增加冻胀力呈增大趋势。

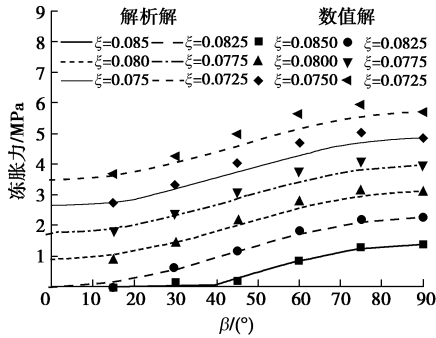


图 8 不同 ξ 下砂质泥岩裂隙中冻胀力解析解与数值解对比

Fig. 8 Analytical solution versus numerical solution of frost heaving pressure in crack under different ξ for sandy mudstone

3.4 裂隙尖端应力场

对于 $\chi \geq 10$ 的扁平椭圆形裂隙, 当裂尖应力超过岩体的抵抗强度时会引起裂隙冻胀开裂。对于低温热力耦合下的裂隙冻胀问题, 在裂隙尖端会产生拉应力和剪应力集中, 因此需对裂隙尖端的应力场进行分析。在内部均匀冻胀力和温度应力下, 裂隙尖端附近应力场解析解的极坐标形式可表示为

$$\sigma(r, 0) = \begin{cases} -p_f & (r \leq a) \\ \frac{(p_f - \sigma_\beta^T) r}{\sqrt{r^2 - a^2}} - p_f & (r > a) \end{cases}, \quad (45)$$

$$\tau(r, 0) = \tau_\beta^T \frac{r}{\sqrt{r^2 - a^2}} \quad 0 \leq r < \infty. \quad (46)$$

采用等效热膨胀系数方法对不同水分迁移通量下

的裂尖应力场进行模拟分析, 如图 9 和 10 所示。可以看出, 在裂尖拉应力和剪应力都出现了较强应力集中, 数值解与解析解计算结果一致。图 9 中 $-0.02 \text{ m} \leq r \leq 0.02 \text{ m}$ 的区域为裂隙内部, 可见冻胀力在裂隙中的分布基本上是均匀的。裂隙尖端应力场分布与裂隙水迁移量有关, 当 $\xi \leq 0.0775$ 时, 裂隙冻胀力占主导, 裂尖将产生拉应力集中; 当 $\xi \geq 0.08$ 时, 岩石膨胀应力占主导, 裂隙尖端将产生压应力集中。

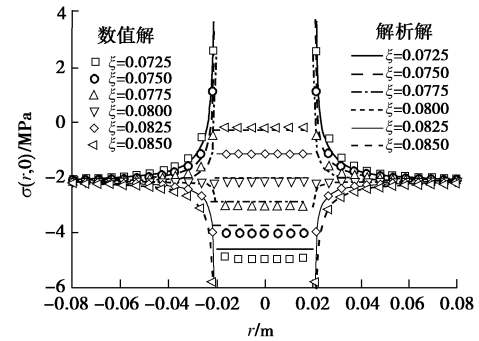


图 9 $\beta = 45^\circ$ 时 $\sigma(r, 0)$ 数值解与解析解对比

Fig. 9 Comparison between numerical and analytical solutions of $\sigma(r, 0)$ as $\beta = 45^\circ$

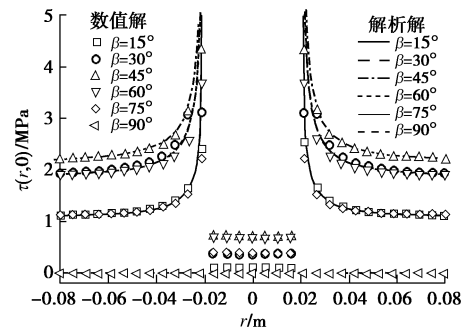


图 10 $\xi = 0.075$ 时 $\tau(r, 0)$ 数值解与解析解对比

Fig. 10 Comparison between numerical and analytical solutions of $\tau(r, 0)$ as $\xi = 0.075$

图 10 中裂隙中的剪应力解析解并没有给出, 主要是因为如果裂隙中的剪应力由裂隙冰承担, 而是否会产生剪应力与裂隙和岩石部分的冻结前后顺序有关: 若孔隙岩石部分先冻结, 则由于裂隙水无法承受剪切力导致最终裂隙中不会出现剪应力或剪应力很小; 若裂隙水先冻结, 则在岩石逐渐冻结过程中, 裂隙冰与裂隙面延长线同样会产生剪应力。裂隙冰中的剪应力不仅与裂隙岩体热力学过程有关, 还会受到岩石与裂隙冰力学参数差异性的影响, 因此裂隙冰中的剪应力解析解较为复杂, 很难给出。但通过采用等效热膨胀系数方法可以很方便的模拟这一过程, 从而得到裂隙冰上剪应力大小, 体现了数值方法的优越性。

4 结 论

低温水冰相变下孔(裂)隙冻胀力与冻胀扩展是引起孔(裂)隙岩体冻融损伤的主要原因,但由于涉及到热-水-力耦合效应以及相变问题,而孔(裂)隙中相变理论和实验手段也存在不足,此外,孔(裂)隙冻胀断裂问题属于有厚度的非平直裂隙扩展问题,所以获得孔(裂)隙冻胀力量值与进行裂隙冻胀扩展演化过程数值分析较为困难。但随着中国寒区工程建设的大力推进,孔(裂)隙岩体冻融损伤与破裂过程的研究势必引起更加广泛的关注。本文在前人研究基础之上考虑温度应力的影响对该问题进行了进一步的研究,可为进行寒区岩体工程中含水裂隙冻胀理论计算与裂隙岩体冻胀破裂演化过程模拟提供参考。基于本文可以得出如下结论:

(1)考虑孔(裂)隙几何形态和温度应力的影响,建立了椭圆孔(裂)隙中的冻胀力计算模型,结果表明孔(裂)隙冻胀力大小不仅受裂隙形状等因素的影响,还与裂隙倾角相关。

(2)基于弹性理论和最大拉应力准则,得到了椭圆孔(裂)隙冻胀开裂特征:开裂角 θ 随 χ 的减小而增大,当 $\chi \geq 10$ 时,冻胀开裂基本上发生在裂隙尖端,此时尖端应力集中明显,椭圆孔可简化为裂隙处理。

(3)利用改进的等效热膨胀系数法对低温热-力耦合下裂隙中的冻胀力和裂隙尖端冻胀应力场进行了数值分析,结果表明数值解与解析解吻合较好。

参考文献:

- [1] 徐彬, 李 宁, 李仲奎, 等. 低温液化石油气和液化天然气储库及相关岩石力学研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 2977 - 2993. (XU Bin, LI Ning, LI Zhong-kui, et al. Low-temperature LPG storage caverns and related research review of rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 2977 - 2993. (in Chinese))
- [2] 徐拴海, 李 宁, 袁克阔, 等. 融化作用下含冰裂隙冻岩强度特性及寒区边坡失稳研究现状[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(4): 1106 - 1120. (XU Shuan-hai, LI Ning, Yuan Ke-kuo, et al. Strength behavior of frozen fractured ice-filled rock mass and research status of slope instability during thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(4): 1106 - 1120. (in Chinese))
- [3] 刘 慧, 杨更社, 贾海梁, 等. 裂隙(孔隙)水冻结过程中岩石细观结构变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(12): 2516 - 2524. (LIU Hui, YANG Geng-she, JIA Hai-liang, et al. Experimental study on meso-structure of rock in the process of crack (pore) water freezing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(12): 2516 - 2524. (in Chinese))
- [4] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙冻胀压力及对岩体造成的劣化机制初步研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(6): 1530 - 1541. (LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Preliminary study on frost heaving pressure in crack and the degradation mechanism of rock mass caused by this pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(6): 1530 - 1541. (in Chinese))
- [5] 赵 鹏, 唐红梅. 危岩主控结构面的冻胀力计算公式研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, **27**(3): 420 - 423. (ZHAO Peng, TANG Hong-mei. Research on the damage mechanism due to freezing and thawing force of control fissure in perilous rock[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Nature Science), 2008, **27**(3): 420 - 423. (in Chinese))
- [6] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1572 - 1580. (LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. A numerical and theoretical study of frost heaving pressure in a single fracture of frozen rock mass under low temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1572 - 1580. (in Chinese))
- [7] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 低温环境下含表面裂隙硬岩温度场及冻胀演化过程分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 1): 521 - 529. (SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, RONG Teng-long, et al. Analysis of evolution of temperature field and frost heaving in hard rock with surface cracks under low temperature environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S1): 521 - 529. (in Chinese))
- [8] BRIDGMAN P W. Water, in the liquid and five solid forms, under pressure[J]. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 1912, **47**(13): 441 - 558.
- [9] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. Engineering Geology, 1968, **2**(5): 315 - 323.
- [10] DAVIDSON G P, NYE J F. A photoelastic study of ice pressure in rock cracks[J]. Cold Regions Science and Technology, 1985, **11**(2): 141 - 153.
- [11] AROSIO D, LONGONI L, MAZZA F, et al. Freeze-thaw

- cycle and rockfall monitoring[M]// *Landslide Science and Practice*, Berlin: Springer, 2013: 385 - 390.
- [12] 刘泉声, 康永水, 刘小燕. 冻结岩体单裂隙应力场分析及热-力耦合模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(2): 217 - 225. (LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, LIU Xiao-yan. Analysis of stress field and coupled thermo-mechanical simulation of single-fracture freezed rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(2): 217 - 225. (in Chinese))
- [13] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **37**(3): 562 - 570. (SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, RONG Teng-long, et al. Study on the localized damage effects of single-fractured quasi-sandstone and its joint-end fracture behaviors with cycles of freezing and thawing action[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(3): 562 - 570. (in Chinese))
- [14] DÖPPENSCHMIDT A, BUTT H J. Measuring the thickness of the liquid-like layer on ice surfaces with atomic force microscopy[J]. *Langmuir*, 2000, **16**(16): 6709 - 6714.
- [15] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(10): 2000 - 2012. (LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **35**(10): 2000 - 2012. (in Chinese))
- [16] 于天来, 袁正国, 黄美兰. 河冰力学性能试验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报 (自然科学版)*, 2009, **28**(6): 937 - 940. (YU Tian-lai, YUAN Zheng-guo, HUANG Mei-lan. Experimental study on mechanical behavior of river ice[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Nature Science)*, 2009, **28**(6): 937 - 940. (in Chinese))
- [17] 康永水, 刘泉声, 赵军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(12): 2518 - 2526. (KANG Yong-shui, LIU Quan-sheng, ZHAO Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(12): 2518 - 2526. (in Chinese))
- [18] NEAUPANE K M, YAMABE T, YOSHINAKA R. Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**(5): 563 - 580.

第十届全国基坑工程研讨会 (第1号征文通知)

由中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会主办, 兰州理工大学承办的“第十届全国基坑工程研讨会”将于2018年9月在甘肃省兰州市召开。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会

承办单位: 兰州理工大学

协办单位 (排名不分先后): 中铁西北科学研究院; 兰州大学; 西北民族大学; 兰州交通大学; 甘肃土木工程科学研究院; 《岩土工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部 (待增补)

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的新技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥黄土、软弱土等特殊

土地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑧超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑨基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑩重、大、特基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

重要日期安排: ①2018年4月30日前提供论文电子版一份, 发送至jikenghy2018@163.com。②论文将组织学术委员会专家评审, 录用通知及修改意见将在2018年5月31日前通知作者。③作者根据修改意见和排版要求定稿, 于2018年6月20日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会。

会议秘书处联系地址: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号, 兰州理工大学土木工程学院 (730050)。联系人: 周勇 13119308411, 叶帅华13893624445, 韦正德13639330876, 杨校辉15095338032。会议论文提交电子邮箱: jikenghy2018@163.com。

(第十届全国基坑工程研讨会会务组 供稿)