

冻结岩体单裂隙应力场分析及热-力耦合模拟

刘泉声^{1,2}, 康永水², 刘小燕¹

(1. 武汉大学土木建筑工程学院 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 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: 我国寒区分布面积广泛, 岩体冻融损伤问题涉及低温环境下温度场、渗流场和应力场的耦合, 严重威胁着寒区岩体工程的安全稳定。在考虑水分迁移的条件下, 以水冰相变为切入点, 结合断裂力学、弹塑性力学理论, 分析冻胀荷载作用下饱和岩体裂隙应力场分布规律与尖端应力强度因子。考虑温度对冻结率的影响, 采用等效热膨胀系数法模拟冻胀荷载, 运用 FLAC^{3D} 软件建立单裂隙冻胀热-力耦合模型, 编制 FISH 程序进行计算, 得出冻胀作用下裂隙附近应力场分布, 并与理论值进行对比分析。

关键词: 岩石力学; 裂隙岩体; 相变; 冻胀力; 应力强度因子

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2011)02-0217-07

ANALYSIS OF STRESS FIELD AND COUPLED THERMO-MECHANICAL SIMULATION OF SINGLE-FRACTURE FREEZED ROCK MASSES

LIU Quansheng^{1,2}, KANG Yongshui², LIU Xiaoyan¹

(1. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: There is a vast area of cold regions distributed in China. The problems that freezing-thawing damage will seriously threaten the stability of rock engineering need to be solved, which involve the thermo-hydro-mechanical (THM) coupling problem at a low temperature. Considering the migration of water and phase transition, the distributions of stress field and stress intensity factor near the fracture are analyzed by using the theories of fracture mechanics and elastoplastic mechanics. Considering the effect of temperature on freezing ratio, the frost load is simulated by method of equivalent coefficient of thermal expansion. Finally, the model for freezing fracture is established with FISH program to simulate the stress field near the fracture; and comparisons between numerical and analytical results are made.

Key words: rock mechanics; fractured rock mass; phase transition; frost force; stress intensity factor

1 引言

我国寒区分布面积广泛, 在寒区工程建设和资源开采过程中, 会遇到很多岩体工程冻融损伤破坏

的难题, 如寒区隧道常常出现衬砌开裂、剥落、挂冰及洞口处热融滑塌等病害, 严重威胁着围岩的安全稳定^[1]。规范^[2]规定, 最冷月平均温度低于-15℃和受冻害影响的隧道要考虑冻胀力的作用。在我国东北和西北地区的 30 多条铁路隧道都有冻害, 有的隧

收稿日期: 2010-09-07; **修回日期:** 2010-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072239)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿山建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

道因受冻害影响常年 8 个多月不能使用^[3]。裂隙中的水结冰时会产生约 9%的体积膨胀，对裂隙面产生压力，从而导致裂隙扩展^[4]。冻胀作用下岩石裂隙的应力强度因子及应力场分布是研究裂隙扩展与裂隙网络演化发展的基础。

国内外许多学者通过试验和理论方法对冻岩问题进行了研究。E. M. Winkler^[5]通过试验表明，若保持孔隙体积不变，孔隙冰在-5 °C，-10 °C和-20 °C时的膨胀压力分别达到 61.0，133.0 和 211.5 MPa，认为岩体受外荷载越大，内部产生的冻胀力也越大。赖远明等^[6]利用弹性、黏弹性相应原理导出了寒区隧道衬砌 - 正冻围岩 - 未冻围岩系统冻胀力在拉氏象空间中的有关算式，并采用数值逆变换法，得出隧道冻胀力和衬砌应力。杨更社等^[7]通过三向受力条件下煤岩和砂岩冻胀试验认为，岩石强度随温度降低而增大的主要原因是岩石冻结时矿物收缩，冰的强度和冻胀力提高了富水岩石的峰值强度。仇文革和孙兵^[8]通过模型试验法研究了隧道衬砌所受冻胀力的量值和分布规律，结果表明冻结深度越大则冻胀力越大，顶端约束越强，冻胀力越大。冻结活跃带的相变过程是冻岩问题的研究重点。冻融导致岩体内部应力状态发生改变，可能引起裂纹的萌生和扩展，并引起岩体渗流特性的改变。前人在试验和理论方面做了大量工作，也取得了一定的成果。但因冻结过程十分复杂，在细观尺度上对冻融环境下的岩体裂隙扩展机制的研究鲜见报道，因此值得深入探讨。水的冻结率和裂隙面的约束对冻胀荷载产生直接影响，以往数值模拟中冻胀荷载的施加缺乏有效方法，导致冻胀荷载作用下裂隙扩展的研究不够成熟。

本文尝试从细观尺度运用弹塑性理论分析冻胀荷载，结合断裂力学研究裂隙岩体在冻胀作用下的应力强度因子，并采用等效热膨胀系数法，模拟水冰冻胀效应，得出单裂隙尖端的应力场分布规律，并与解析解进行了对比，得到了较为理想的模拟结果，为进一步分析裂隙扩展及裂隙网络的演化作基础。

2 岩体冻融损伤涉及的几个问题

2.1 低温多场耦合

诱发岩体工程冻融损伤破坏的因素是岩体中水分的冻胀融缩作用。寒区昼夜和季节交替产生的温

度差异引起岩体中的水分反复冻融，水结冰会产生 9%的体积膨胀，受到约束时产生巨大的体积膨胀力造成岩体损伤。冻融损伤加剧了围岩的风化作用，围岩破碎程度的增加又为冻胀力的发育提供了更有利的条件，这种恶性循环严重威胁着围岩的稳定性^[9~12]。裂隙中水冰相变是冻岩损伤的主导因素，要预防和控制工程岩体冻害事故的发生，应以水冰相变为切入点。岩体的冻融损伤涉及低温环境下复杂的温度场、渗流场和应力场的耦合问题。低温 THM 耦合过程如图 1 所示(正温为相变点温度以上，负温为相变点温度以下)。

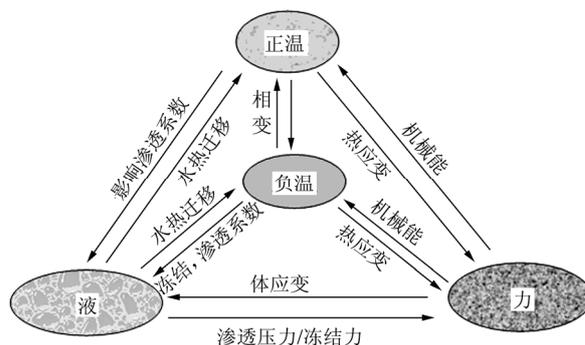


图 1 冻融条件下 THM 三场相互关系
Fig.1 Relationships between THM field under freezing-thawing conditions

低温多场耦合与常温、高温多场耦合的主要区别在于：低温条件下，裂隙水发生相变产生冻胀力，并对裂隙网络产生巨大影响，多孔介质的渗流性也会发生很大改变。裂隙中冰透镜体的形成导致裂隙的渗透系数急剧下降。同时，温度的改变会对未冻水的黏滞性产生影响。裂隙中的水结冰时产生体积膨胀，会对封闭的裂隙产生冻胀荷载，可能导致裂隙的扩展。冰融化时，水会渗入新扩展的裂隙面。反复的冻融循环导致岩体损伤。此外，冻结缘水分的补给是影响冻胀的重要因素，而此区域的水分迁移驱动问题也是低温渗流场区别于常温、高温的重要环节。

2.2 冻结岩石的力学性质

水冰相变是冻胀力产生的根源。裂隙中水和冰的存在对岩体的力学性质产生很大影响，导致冻岩出现一些特殊的力学性质。裂隙中冰的产生改变了岩体的结构，引起岩体弹性模量、强度、导热性等物理力学性质的变化。多年来，不少学者通过试验方法验证了冻岩与常温状态下相比力学性质的改变。徐光苗和刘泉声^[13]通过试验表明，温度在-20 °C~

20 °C 范围内变化时, 所测 2 类岩石的单轴抗压强度与弹性模量都随温度降低而增加, 在 -10 °C ~ 20 °C 范围内, 岩石的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 都随温度降低而增加, 还验证了 2 种干燥和饱和岩样从 -5 °C 降至 -10 °C 时导热系数均增大, 且温度相同时饱和岩石的导热系数比干燥岩石大得多。

2.3 裂隙网络

岩体裂隙网络可视为由数量巨大的单裂隙延伸、贯通而成, 单裂隙的几何特征、张开度等存在很大的随机性, 造成裂隙网络的复杂性。

根据裂隙的几何形态和渗流的性质, 可将裂隙划分为导通裂隙和微裂隙。导通裂隙在空间上扩展度较高, 为水分运移的主要通道, 为实现岩体与外界的水交换起主导作用。此类裂隙为典型的弱结构面, 对岩体的力学性质也有很大的影响。

岩体中通常存在大量的微裂隙, 但很难确定其分布状态。对此类裂隙网络的模拟常采用随机离散裂隙网络法和等效多孔介质替换法。与导通裂隙相比, 小裂隙的闭合度较高, 渗透性差, 但这些微小裂隙在岩体中分布广泛, 且在外力作用下, 易发生扩展贯通, 对岩石的损伤以及工程岩体的失稳破坏有重要影响。岩石细观损伤演化的试验表明, 岩石断裂破坏的实质是岩石在受力过程中微裂纹的萌生、扩展直至贯通的结果, 是岩石微观结构变形破坏的累积的宏观反映。在冻融循环过程中, 水的冻胀融缩作用导致微裂隙的扩展贯通, 从而显著影响渗流场和岩体的力学性质。另外, 微裂隙对岩体内水分场的分布起重要作用, 且分布广泛, 数量较多, 对冻结缘水分补给有重要影响^[14, 15]。

3 冻胀作用下应力强度因子分析

3.1 冻胀作用与冻胀荷载

水冰相变是裂隙冻胀力产生的必备条件。相变体积膨胀受到裂隙面的束缚作用就会产生冻胀力, 它是计算裂隙尖端应力强度因子和判断裂隙扩展的关键因素。冻胀力的大小受外界因素和内部因素影响, 外界因素包括冻结温度、冻结速率、冻结时间及冻结缘水分迁移补给等, 内部因素如裂隙面几何特征、岩石基质的力学性质等。冻胀力大小很难测量, 因为冻胀力是由冰体积膨胀受到裂隙面束缚而产生的, 岩石基质越坚硬, 产生的冰压越大。

作如下基本假设: 裂隙扩展源为已存裂隙; 裂隙饱和, 温度 T 下冻结率为 u^T ; 自由状态下水冰相

变体积膨胀系数为 β , 假定自由水不可压缩; 裂隙中水分迁移符合立方定律, 冰体和岩石基质均视为均质各向同性弹性介质, 冰透镜体的增长过程中总有未冻水薄膜覆盖, 体积膨胀过程中裂隙水压沿迹长方向均匀分布。假定的裂隙几何形态如图 2 所示。

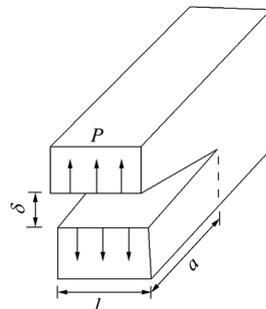


图 2 假定的裂隙几何形态

Fig.2 Assumed geometric shape of fracture

冻胀过程中裂隙水压增加产生水压梯度, 造成水分迁移(沿图 2 中 l 方向), 忽略自由水重力势和毛细势影响, 流量可表示为

$$Q = \int_l K_f J_f dt = \int_l -K_f \frac{\partial p}{\partial l} dt \quad (1)$$

式中: t 为时间; Q 为时间 t 内迁出的水体积; J_f 为沿裂隙方向的水力梯度; p 为冻结过程的冻胀力; K_f 为沿裂隙的等效渗透系数, 且 $K_f = 2\lambda a^3 \gamma / (3\mu)$, 其中, λ 为裂隙渗透系数修正系数, γ 为流体的重度, μ 为动力黏滞系数, a 为裂隙隙宽的一半。

图 3 为冻胀力示意图, 以冰晶体为研究对象, 考察冰的体积应变, 进而得出受约束状态下水冰相变的体积膨胀率。

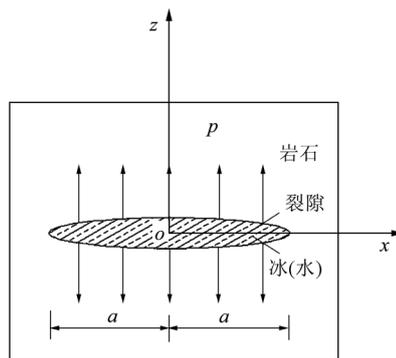


图 3 冻胀力示意图

Fig.3 Sketch of frost force

不考虑裂隙面束缚(即冰自由膨胀), 冻结温度 T 作用下的裂隙容积增量 $\Delta V_f'$ 为

$$\Delta V_f' = \beta(V_f^0 - Q)u^T \quad (2)$$

式中: V_f^0 为裂隙初始容积(m^3)。

考虑裂隙面束缚，结合弹性力学相关理论，可得冻胀力 p 作用下冰元体积应变 ϵ_v 为

$$\epsilon_v = \frac{1-2\nu_i^T}{E_i^T} I_1 = -\frac{3(1-2\nu_i^T)p}{E_i^T} \quad (3)$$

式中： E_i^T 为温度 T 时冰的弹性模量， ν_i^T 为温度 T 时冰的泊松比， $I_1 = \sigma_{kk} (k = 1, 2, 3)$ 为应力张量的第一不变量。则实际裂隙容积增量 ΔV_f 为

$$\Delta V_f = \Delta V_f' - \beta(V_f^0 - Q)\epsilon_v u^T / 100 \quad (4)$$

根据假设条件：冰透镜体的增长过程中总有未冻水薄膜覆盖，近似认为冰透镜体所受的各方向的围压均等，有 $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$ 。又因体积应变 $\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ ，得

$$\epsilon_z = -\frac{(1-2\nu_i^T)p}{E_i^T} \quad (5)$$

应力、位移连续边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz} = -p, \quad \sigma_{xz} = 0 \quad (z=0, |x| \leq a) \\ \sigma_{xz} = 0, \quad u_z = 0 \quad (z=0, |x| > a) \\ \sigma_{xx} \rightarrow 0, \quad \sigma_{xz} \rightarrow 0 \quad (\sqrt{x^2+z^2} \rightarrow \infty) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $\sigma_{ij} (i = x, y, z; j = x, y, z)$ 为应力分量； u_z 为 z 方向位移，根据对称性， x 轴上裂隙面以外的 z 向位移为 0。

3.2 冻胀作用下裂隙尖端应力强度因子

实际的岩体裂隙多为粗糙的不规则裂纹。在理论分析时，通常对裂纹的几何形状进行适当地简化。裂隙尖端单元体应力状态如图 4 所示。

$$\sigma_r = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (7)$$

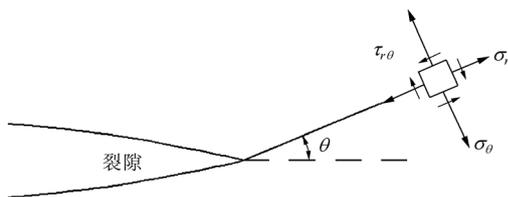


图 4 裂隙尖端应力场示意图

Fig.4 Sketch of stress field at fracture tip

冻胀作用下的裂隙尖端应力分量的极坐标表达式^[16-18]为

$$\sigma_\theta = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (9)$$

式中： K_1 为 Griffith 第一基本型(张开型)裂纹的应力强度因子。

根据断裂力学相关理论，认为导致裂纹失稳扩展的是垂直裂隙面方向的应力分量 σ_{zz} (即 $\sigma_\theta |_{\theta=0}$)，从而可得

$$\sigma_{zz}(x, 0) = \begin{cases} -p & (|x| \leq a) \\ \frac{p|x|}{\sqrt{x^2-a^2}} - p & (|x| > a) \end{cases} \quad (10)$$

图 5 为裂隙尖端 σ_{zz} 分布示意图。在裂隙尖端附近，有 $z = 0, x = a + \Delta x, \Delta x \ll a$ ，可知： $\sigma_{zz} \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta x}}$ 。

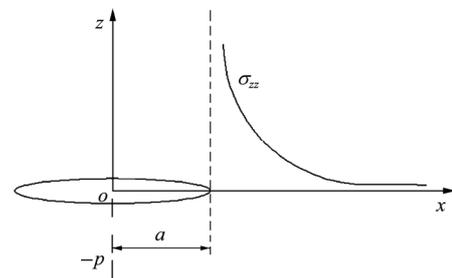


图 5 裂隙尖端 σ_{zz} 分布示意图

Fig.5 Distribution of σ_{zz} at fracture tip

参照 Griffith 裂纹的第一基本型(张开型)应力强度因子解法，计算冻胀作用下的应力强度因子为

$$K_1 = \lim_{x \rightarrow a^+} \sqrt{2\pi(x-a)} \sigma_{zz}(x, 0) \quad (11)$$

考虑冻胀力 p ，裂纹表面受均匀法向应力作用时的应力强度因子为

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_{zz}(x, 0) \left(\frac{a+x}{a-x} \right)^{\frac{1}{2}} dx = \\ &= \frac{p}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \left(\frac{a+x}{a-x} \right)^{\frac{1}{2}} dx = \sqrt{\pi a} p \end{aligned} \quad (12)$$

当应力强度因子 K_1 与临界应力强度因子 K_{Ic} 相等时，裂纹失稳扩展。

4 单裂隙冻胀热 - 力耦合模拟

岩体的裂隙网络是由数量庞大的单裂隙延伸、连接贯通构成的。下面尝试通过 FLAC^{3D} 软件进行单裂隙的冻胀热 - 力耦合试验，借助 FISH 程序模拟分析冻胀作用下单裂隙应力场分布规律，并与解析解进行对比分析。

4.1 单裂隙冻胀模型

岩石试件模型尺寸为 0.1 m×0.1 m×0.1 m(长×宽×高), 内含平直裂隙, 走向沿 y 向, 隙宽 20 mm, 厚度 2 mm, 内部充填冰水介质。模型如图 6 所示。

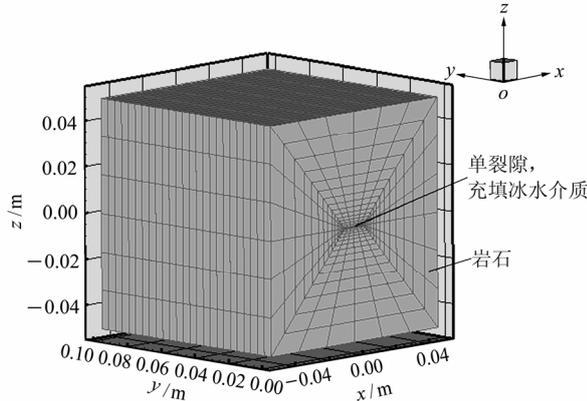


图 6 单裂隙冻胀热 - 力耦合模型

Fig.6 Coupled freezing thermo-mechanical model with a single fracture

为简化计算, 对冻胀模型作如下假定:

(1) 岩石基质和冰符合 Mohr-Coulomb 材料假定, 热学模型符合均质热导模型(th_isotropic)假定。

(2) 裂隙中充满冰(水)介质, 冻结率(即参与冻结的水分比例)分布函数为

$$u^T = \begin{cases} 0 & (0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T) \\ -T/20 & (-20 \text{ }^\circ\text{C} < T < 0 \text{ }^\circ\text{C}) \\ 1 & (T \leq -20 \text{ }^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (13)$$

模型初始温度为 0 °C, 初始内部应力为 0; 冻结温度为 -20 °C。

(3) 在冻胀过程中, 假定水冰介质混合均匀, 并忽略水分迁移, 冰(水)体冻胀各向均匀。水冰相变体积膨胀系数按 9% 计算, 忽略其热胀冷缩效应, 采用等效热膨胀系数法。冻结温度范围(-20 °C ~ 0 °C)内, 冰水混合体的热膨胀系数 $\alpha = -0.0015$ 。计算中取为负值, 表示体积随温度降低而增大。模型主要参数^[19]见表 1。

表 1 模型热 - 力学参数值^[19]

Table 1 Thermo-mechanical parameters of model^[19]

介质	重度 (/kN·m ⁻³)	体积模量 (/MPa)	剪切模量 (/MPa)	内摩擦角 (/°)	黏聚力 (/MPa)
岩石	24.10	14.1×10 ³	8.87×10 ³	35	4.0
冰	9.17	52	17.4	20	3.5

介质	抗拉强度 (/MPa)	比热/(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	热膨胀系数 (/°C ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
岩石	0.5	0.88	5.4×10 ⁻⁶	2.67
冰	0.4	1.884×10 ³	-0.0015	4.20

4.2 模拟结果分析

编制 FISH 程序, 进行计算, 程序运行约 3×10⁶ 步, 得到裂隙附近最大主应力分布, 如图 7 所示, 裂隙面附近最大主应力以压应力为主, 但在尖端存在拉应力集中区。

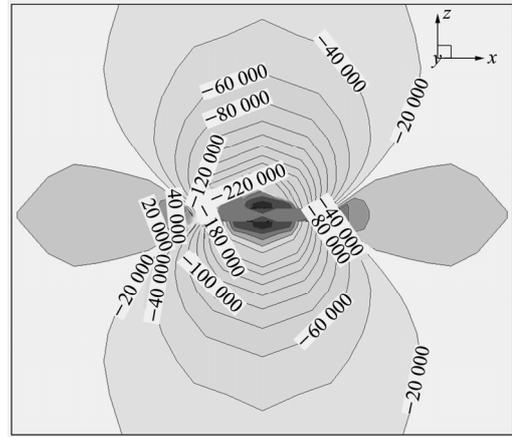


图 7 最大主应力分布图(单位: Pa)

Fig.7 Distribution of the maximum principal stresses(unit: Pa)

编制程序绘制截面 $y = 0.05 \text{ m}$ 处裂隙平面内应力分量 σ_{zz} 沿 x 轴的计算值和理论曲线(式(10)及图 5), 对比结果如图 8 所示。

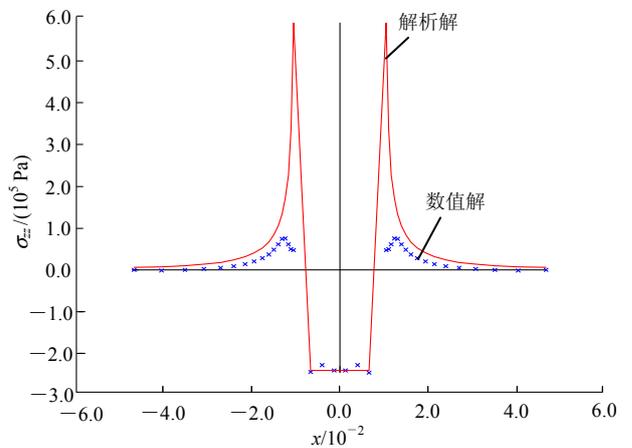


图 8 σ_{zz} 解析解与数值解的对比

Fig.8 Comparisons of numerical and analytical solutions of σ_{zz}

Griffith 裂纹的第一基本型(张开型)认为, 裂隙面法向应力分量 σ_{zz} 对裂纹扩展起主要作用。由图 8 可知: 冻胀荷载约 $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。因理论推导中未考虑岩石材料的热胀冷缩特性, 加之外边界条件假定与计算模型存在差异等因素, 数值解与解析解存在一定误差, 但二者分布规律总体十分近似, 且在尖

端都存在明显的拉应力集中区。

通过 FLAC^{3D} 后处理的切片操作, 在坐标原点处切得一垂直于 y 轴的平面, 在其上描绘位移矢量, 如图 9 所示。冰体的温度效应产生冻胀位移显著, 岩石基质热胀冷缩效应产生的位移量与冰的冻胀位移量相比非常微弱。

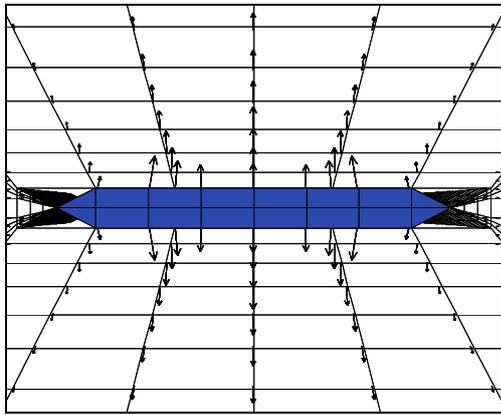


图 9 裂隙面位移矢量图

Fig.9 Vector diagram of displacement near fracture face

5 讨论

早期的寒区岩土工程研究多集中在冻土力学上。目前关于冻土的研究理论相对成熟, 而对冻岩问题的研究远未成熟, 很多研究处于试验探索阶段。

目前, 对冻岩的研究存在的主要问题是通常把岩体视为各向同性孔隙介质, 并直接运用冻土力学理论, 没有真正考虑裂隙(节理)的作用。笔者认为, 对冻岩损伤机制的研究须立足细观尺度, 以水冰相变对裂隙网络的损伤为研究重点, 立足裂隙岩体的特殊性, 综合运用热力学、损伤力学、断裂力学等学科相对成熟的理论, 研究裂隙岩体冻融损伤机制, 进而延伸至冻融作用对岩体裂隙网络发展的影响, 才能从本质上揭示冻岩损伤机制, 而目前国内外此方面的研究鲜见报道。

笔者认为, 要研究水冰相变对岩体裂隙网络的损伤, 需考察冻融损伤的 2 个关键环节: (1) 水冰相变对岩体裂隙网络的影响。这也是区别岩体冻融损伤与土体冻融破坏的重要标志。当温度降至一定值时, 岩体裂隙中的部分水结冰, 产生体积膨胀力造成裂隙扩展。围岩温度升高后, 冰融化为水进入新生成的裂隙, 冻结成冰的过程中再次产生冻胀作用, 造成新的损伤, 如此反复循环引起岩体裂隙网络的扩展演化。附加损伤形式还包括弹性模量、岩

体强度等力学参数的劣化。(2) 温度场、应力场以及裂隙网络的演化对水冰相变过程的影响, 此为低温 THM 耦合过程的重要特征。水冰相变的诱导因素是温度在冰点附近的交替变化, 温度场直接影响冻结率, 且温度梯度是未冻水迁移的重要驱动力; 岩体所处的应力状态控制裂隙的张开度, 从而影响裂隙对水冰冻胀融缩的约束作用; 渗流场可影响冻结缘水热迁移, 从而决定冻结活跃区的水分补给。

本文在研究冻胀荷载作用下岩体裂隙的扩展准则时考虑了水分迁移的影响, 但在数值模拟中只考虑了温度场和应力场的耦合, 未考虑渗流场的影响, 忽略了水分迁移作用。模型考虑了岩石基质的热胀冷缩效应, 但忽略了冰体的热胀冷缩效应。考虑温度对冻结率的影响, 采用等效热膨胀系数法模拟冻胀荷载, 与解析解进行对比分析, 取得了较为理想的结果, 为进一步研究冻胀荷载下裂纹的扩展提供重要参考。

6 结论

(1) 在考虑水分迁移的情况下, 立足水冰相变的特殊性, 从细观尺度上运用弹塑性理论分析裂隙冻胀扩容效应及冻胀裂纹应力场, 并结合断裂力学分析了冻胀荷载作用下饱和岩体裂隙尖端应力强度因子。

(2) 通过 FLAC^{3D} 软件建立单裂隙冻胀热-力耦合模型, 考虑温度对冻结率的影响, 采用等效热膨胀系数法模拟冻胀荷载, 编制 FISH 程序进行分析计算, 得出了裂隙周围应力场分布情况, 并与解析解进行对比, 表明二者较为吻合。模拟计算结果表明: 裂隙面附近以拉应力为主, 裂隙尖端存在裂隙面法向的拉应力集中区。冰体的温度效应产生的冻胀位移近似沿裂隙面法向, 并且岩石基质热胀冷缩效应产生的位移量与冰的冻胀位移量相比十分微弱。

参考文献(References):

- [1] 罗彦斌. 寒区隧道冻害等急划分及防治技术研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2010.(LUO Yanbin. Study on frost damage grades and its prevention and control technologies in cold region tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国行业标准编写组. TB1003 - 2005 铁路隧道设计

- 规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB1003 - 2005 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.(in Chinese))
- [3] 赖远明, 张明义, 李双洋. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.(LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, LI Shuangyang. Engineering theory and application in cold region[M]. Beijing: Science Press, 2009.(in Chinese))
- [4] DAVIDSON G P, NYE J F. Photoelasticity study of ice pressure in rock cracks[J]. Cold Regions Science and Technology, 1985, 11(2): 141 - 153.
- [5] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. Engineering Geology, 1968, 2(5): 315 - 323.
- [6] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 寒区隧道冻胀力的黏弹性解析解[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 70 - 74.(LAI Yuanming, WU Ziwan, ZHU Yuanlin, et al. Analytical viscoelastic solution for frost force of cold regional tunnels[J]. Journal of China Railway Society, 1999, 21(6): 70 - 74.(in Chinese))
- [7] 杨更社, 奚家米, 李慧军, 等. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 459 - 464.(YANG Gengshe, XI Jiami, LI Huijun, et al. Experimental study of rock mechanical properties under triaxial compressive and frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 459 - 464.(in Chinese))
- [8] 仇文革, 孙兵. 寒区破碎岩体隧道冻胀力室内对比试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 557 - 561.(QIU Wenge, SUN Bing. Model test study of frost heaving pressures in tunnels excavated in fractured rock mass in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 557 - 561.(in Chinese))
- [9] O'NEIL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 281 - 296.
- [10] PIPER D, HOLDEN J T, JONES R H. A mathematical model of frost heave in granular materials[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Permafrost. Norway: Tapir Publication, 1988: 370 - 376.
- [11] 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): 1 688 - 1 694. (ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. 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): 1 688 - 1 694.(in Chinese))
- [12] 谭贤君, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 含相变低温岩体水热耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 455 - 1 461.(TAN Xianjun, CHEN Weizhong, JIA Shanpo, et al. A coupled hydro-thermal model for low temperature rock including phase change[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 455 - 1 461.(in Chinese))
- [13] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机制分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 076 - 3 082.(XU Guangmiao, LIU Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 076 - 3 082.(in Chinese))
- [14] THARP T M. Conditions for crack propagation by frost wedging[J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(1): 94 - 102.
- [15] GLAMHEDEN R. Thermo-mechanical behaviour of refrigerated caverns in hard rock[Ph. D. Thesis][D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2001.
- [16] 尹双增. 断裂、损伤理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.(YIN Shuangzeng. Fracture and damage theories and their application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.(in Chinese))
- [17] CHEN W F, SALEEB A F. Elasticity and plasticity[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.
- [18] 张敦福, 李术才, 牛海燕, 等. 偶应力对裂纹扩展的影响及其尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 453 - 2 458. (ZHANG Dunfu, LI Shucai, NIU Haiyan, et al. Influence of couple stress on crack growth and its scale effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 453 - 2 458.(in Chinese))
- [19] 张玉军. 模拟冻-融过程中热-水-应力耦合模型及数值分析[J]. 固体力学学报, 2009, 30(4): 409 - 415.(ZHANG Yujun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and numerical analysis for simulation of freezing-thawing process[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2009, 30(4): 409 - 415.(in Chinese))