

文章编号: 1000 - 7598 (2012) 04 - 0971 - 08

裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况

刘泉声, 康永水, 黄 兴, 徐朝政

(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, 武汉 430071)

摘 要: 工程岩体冻融损伤问题是寒区常见的工程难题, 其主要诱因是岩体中水分的冻胀融缩作用。目前国内外学者关于冻岩问题的主要研究内容可大体归纳为冻岩物理力学性质、相变过程、低温多场 (THM) 耦合、冻融损伤模型及数值分析等 4 个大方面。几十年来, 国内外学者通过理论分析、数值模拟、现场及室内试验等多种途径对冻岩问题展开研究, 取得了丰硕的成果, 但目前对冻岩问题的研究远未成熟, 很多研究尚停留在试验探索阶段。要真正意义上揭示冻岩损伤机制, 应以水冰相变为切入点, 立足微观尺度, 充分考虑冻胀融缩作用与裂隙扩展的相互影响, 进而拓展至冻融作用对岩体裂隙网络发展的影响。

关 键 词: 裂隙岩体; 冻融损伤; 低温 THM 耦合; 水热迁移; 相变

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status

LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, HUANG Xing, XU Chao-zheng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The main inducement to freeze-thaw damage of engineering rock mass is the frost heave and thawing shrinkage of moisture in rock, which is quite common in cold regions. The research on freezing rock can be mainly concluded to four parts, which are the physico-mechanical properties of freezing rock, phase transition process, the thermo-hydro-mechanical (THM) coupling at low temperature, the model of freeze-thaw damage and numerical simulation. During the last several decades, researchers have put efforts on freezing rock by theory analysis, numerical simulation, field test and laboratory experiments. Although remarkable achievements have been obtained, there is still long way to go in the field of freezing rock and plenty of researches have stayed in the stage of experiment. Research on frost damage of rock should base on microscale and take the water-ice phase transition as entry point. Furthermore the relationship between freeze-thaw action and crack propagation should be investigated, and extend to the influence of freeze-thaw action on the whole fracture network of rock mass.

Key words: fractured rock mass; freeze-thaw damage; thermo-hydro-mechanical coupling at low temperature; hydraulic and heat transport; phase transition

1 引 言

我国寒区分布面积广, 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问题, 如: 岩质边坡的冻融剥蚀、滑塌, 隧道围岩的冻胀失稳等等, 严重威胁着岩体工程的安全稳定。在我国东北和西北地区的 30 多条铁路隧道都有不同程度的冻害, 有的隧道因受冻害影响常年 8 个多

月不能使用^[1], 严重影响正常交通运行。

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^[2-5]。

收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41072239)。

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

通讯作者: 康永水, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事裂隙岩体 THM 耦合及冻融损伤方面的研究工作。E-mail: kys85@163.com

数十年来,国内外学者针对冻岩工程问题,通过室内试验、理论分析、数值模拟和现场实践等多种途径开展了大量的研究,取得了可观的成果。本文从冻岩物理力学性质、相变过程、低温多场耦合、冻融损伤模型及数值分析等领域归纳分析了岩体冻融损伤的国内外研究状况,并以此为出发点,对未来冻岩学科的发展方向和待解决的关键问题进行了探讨。

2 岩体冻融损伤涉及问题及研究状况

冻岩与冻土问题有着紧密的联系,但同时存在鲜明的差异。早期的寒区岩土工程研究多集中在冻土力学上^[6-8]。目前关于冻土的研究较多,且理论相对成熟,而对冻岩问题的研究相对薄弱。对此领域的研究可大体归纳为冻岩物理力学性质、相变过程、低温多场 (THM) 耦合、冻融损伤模型及数值分析等方面。

2.1 冻结状态下岩石的力学性质

人们意识到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,不少科研工作者通过试验对低温环境下岩石的力学性质变化进行了研究。Kostromitinov 等^[9]测试了不同冻结温度下各种岩样的冻结强度,分析了尺寸对冻岩强度的影响;Inada 等^[10]通过单轴压缩和拉伸试验证明所测试的干燥和饱和岩样的抗拉、抗压强度均随温度降低而增加,还研究了岩石的冻胀应变与波速、冻结弹性模量与温度的关系;Yambae 等^[11]进行了岩石一次冻融循环热膨胀应变测试试验,并进行了不同温度下单轴压缩试验及不同围压下单轴压缩试验,发现在一次冻融循环时,干燥岩样的轴向变形为弹性变形,而饱和岩样则发生了塑性变形;何国梁等^[12]测试对比了冻融循环条件下干燥和饱和岩样的质量和超声纵波波速,验证了因冻融裂隙扩展导致纵波波速下降;徐光苗等^[13-17]通过试验证明:温度在 $-20 \sim 20$ 范围内变化时,所测两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 $-10 \sim 20$ 范围内,岩石的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值都随温度降低而增加,还验证了 2 种干燥和饱和岩样从 -5 降至 -10 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;Yoneda 等^[18]通过冻融损伤试验证明:注浆方法对提高岩体持久抵抗冻害能力有显著的效果,提供了防治岩体冻害有效的途径。

从以上的研究成果来看,室内试验成果都证明冻结状态下岩石的物理力学性质发生了显著的变

化,这种变化不仅与冻结状态相关,还与岩石自身的性质有紧密联系。与常温相比,冻结状态下岩石的强度、弹性模量、导热系数都有增大的趋势,且受含水率影响明显。

2.2 相变问题

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。裂隙中水冰相变是冻岩损伤的主导因素,因此,裂隙岩体中水冰相变一直备受研究学者的关注。

2.2.1 冻结缘

冻结缘的概念是由 Miller 提出的,最初运用于冻土的研究,被认为是存在于冻结锋面与最暖冰透镜底面之间的一个低含水率、低导湿率的无冻胀区域。Walder 等^[19]提出冻岩内的冻结缘水分迁移及透镜体增长模式,如图 1 所示。Konrad 等^[20-21]研究了冻结缘的厚度,提出分凝势的概念;Akagawa^[22]研究了冻结缘的结构特征、冰分凝增长速度及其影响因素;徐学祖等^[23]通过边界温度恒定的岩盘冻胀试验指出,冻结缘的厚度取决于冻结速度,且具有随冻结历时增大、恒定和减小 3 种模式;李萍等^[24]利用图像数字化技术反演分析了冻结缘和分凝冰的厚度和位置。Vlahou 等^[25]假定孔隙中的冰晶沿各向均匀对称增长,分析证明,若岩石的渗透系数很低,当孔隙中的水结冰膨胀时会产生很大的压力,但对渗透性系数大的岩石,因孔隙中水分随冻结过程发生迁移,导致冻胀力大大减弱。Vlahou 等还认为,岩石对孔隙水的压力降低了冰点。该理论对饱和和冻结岩体的水分迁移适用性较好,但对非饱和冻结裂隙岩体的水分迁移模式的适用性存在一定欠缺。

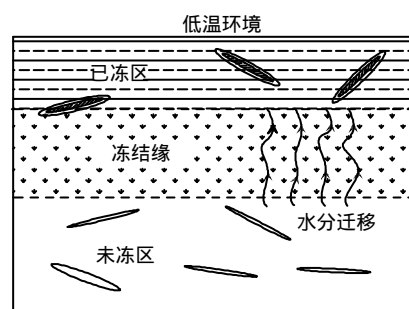


图 1 冻结缘示意图

Fig.1 Schematic diagram of frozen fringe

冻结缘对冻结锋面水分补给和热迁移有重要影响。因裂隙网络的复杂性,岩体中的冻结过程更为复杂,冻结锋线附近的水分迁移是一个值得深入研究的问题。冻结锋线迁移是冻结缘迁移的标志,锋

线迁移方向与裂隙面的位置关系不同可导致不同的冻胀效果。锋线与裂隙产状关系如图 2 所示^[26]（以正交和平行为例）。

如图 2 (a) 所示，当锋线与裂隙面正交时，冰晶增长过程体积膨胀，若裂隙饱和，则在裂隙内产生水压梯度，可造成水分向远离冻结缘方向迁移；若裂隙非饱和，则结晶过程吸附水分，吸附势起主导作用，水分向冻结缘方向迁移。此过程可描述为开放系统冻结。如图 2 (b) 所示，锋线与裂隙面平行时，随着锋线迁移，裂隙内的水分基本不发生迁移，随着降温过程，裂隙水分迅速冻结，产生冻胀力。此过程可描述为闭合系统冻结。实际裂隙与冻结锋线有一定夹角，可通过三角函数坐标转换方式加以描述。

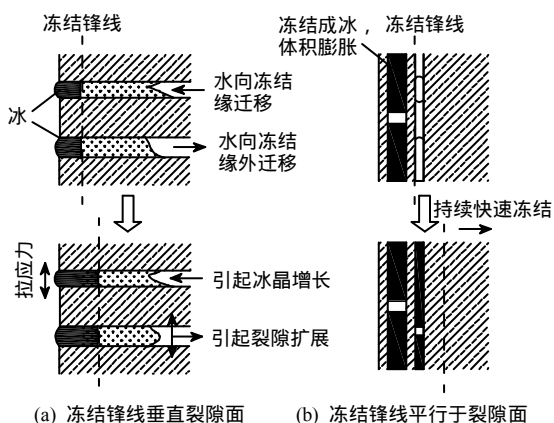


图 2 冻结锋线与裂隙面关系示意图
Fig.2 Relationship of freezing frontal line and fracture surface

2.2.2 冻融条件与冻胀力

20 世纪 70 ~ 80 年代，日本对寒冷地区隧道的调查分析结果表明，冻胀力是寒冷地区隧道变形破坏的外力根源。许多学者通过试验和理论方法对不同冻融条件下的冻胀力进行了研究。

Winkler^[27]通过试验证明：若保持孔隙体积不变，孔隙冰在 -5、-10、-20 时的膨胀压力分别达到 61.0、133.0、211.5 MPa，他认为，岩体受外荷载越大，内部产生的冻胀力也越大；赖远明等^[28]利用弹性与黏弹性对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，并采用数值逆变换的方法，求得了寒区隧道的冻胀力和衬砌应力；李宁等^[29]通过在砂岩样中预制裂隙的方法来模拟实际裂隙岩体，借助中低频率动循环加载和常规加载试验，发现在每级加载低周次循环荷载作用下，冻结裂隙砂岩样会产生明显的疲劳，并且该疲劳特性与砂岩冻结与否、

有无裂隙等条件有密切关系，但没有通过理论做具体分析；Seto^[30]通过长期监测日本中部边坡岩体和空气的温度，揭示了岩体冻融环境的影响，认为可把测试当地每年冻融周期划分为无冻期、每日 1 次冻融循环期、持久冻结期等阶段，但该研究成果难以适用于极地、高原等常年冻结区。

含水率对冻融损伤也有重要影响。王俐等^[31]通过红砂岩冻融循环扫描试验认为，对于初始损伤相同的岩石，初始饱水状态将决定冻融循环对其损伤扩展的影响程度。Chen 等^[32]测试了不同初始含水率的岩样在一次冻融循环后的单轴抗压强度，如图 3 所示。

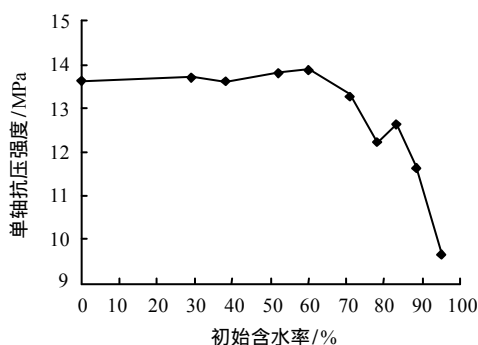


图 3 一次冻融循环后初始含水率与抗压强度的关系
Fig.3 Relationship between initial degree of saturation and uniaxial compressive strength after once freeze-thaw cycle

当初始含水率低于 60% 时，1 次冻融循环过程对单轴抗压强度几乎没有影响，但当初始含水率高于 70% 时，1 次冻融循环后单轴抗压强度明显降低，高于 80% 时，单轴抗压强度剧烈降低。

冻融循环周期的长短也会对冻融损伤产生一定影响。Matsuoka^[33]通过现场监测冻结砂岩岩体在 3 年内的裂隙的宽度与温度变化，证明在春季和秋季裂隙扩展最为活跃，他认为，此现象是春季和秋季的冻融循环周期较短造成的，如图 4 所示。

此外，杨更社等^[34]通过研究冻结速度对 3 种不同岩石损伤 CT 数变化规律的影响后指出：冻结速度对岩石强度较高、空隙（孔隙和裂隙）贯通程度较低的硬岩影响最大，冻结后岩石整体上密度增大，且增大的程度与冻结速度的快慢成反比。范磊等^[35]根据硬岩隧道冻胀力产生机制推导了冻胀力公式，认为衬砌所受冻胀力服从正态分布，采用半公式半经验法计算出冻胀力量值。杨更社等^[36]通过三向受力条件下煤岩和砂岩冻结力学特性试验认为，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。仇文革等^[37]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，顶端约束越强，冻胀力越大。

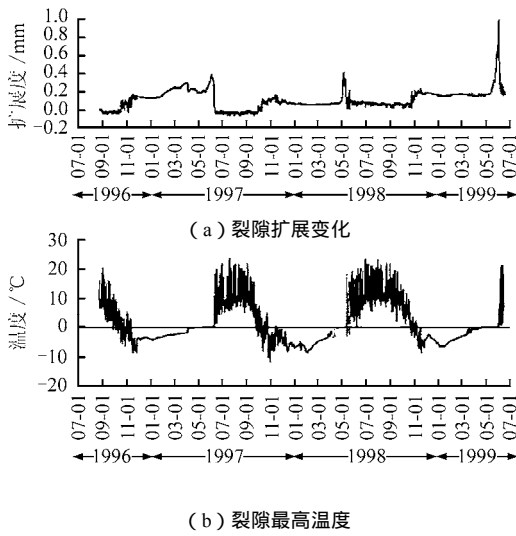


图4 裂隙宽度与温度实测瞬态变化
Fig.4 Variations in the width and temperature of the monitored joint

冻结活跃带的相变过程是冻岩问题的研究重点。前人在试验和理论上做了大量工作，也取得了一定的成果。但因相变涉及因素众多，过程复杂，此方面的研究存在争议。对冻胀作用下裂隙扩展的研究十分罕见，冻结率与锋面迁移的问题值得深入探讨。

2.3 低温 THM 耦合过程

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，水结冰会产生约 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。岩体的冻融损伤涉及低温环境下复杂的温度场 (Thermal)、渗流场 (Hydraulic) 和应力场 (Mechanical) 的耦合问题。低温 THM 耦合过程可大致归纳为图 5。(正温为冰点温度以上，负温为冰点温度以下)。

如图所示，低温 THM 耦合与常温、高温多场耦合的主要区别在于水冰相变的参与，当温度高于水的相变温度时，低温 THM 耦合机制与常高温相同。但当温度低至相变点温度以下时，岩体中的部分水结冰。相变过程对温度场的影响在于相变潜热释放影响温度场；对应力场的影响在于水结冰体积膨胀产生冻胀力，产生附加应力场；对渗流场的影响在于结冰造成裂隙网络渗流系数降低。

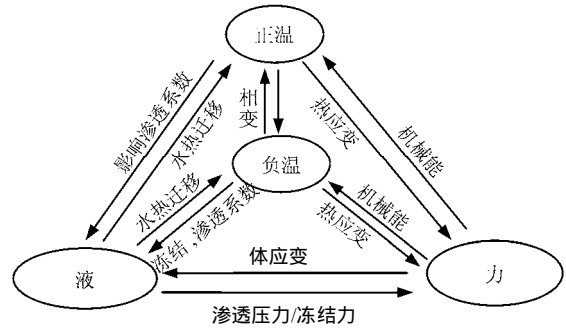


图5 冻融条件下 THM 3场主要相互关系
Fig.5 The main relationships between THM under freeze-thaw condition

相变热平衡主要考虑热传导、水冰相变潜热、热对流 3 种形式，得相变中热平衡方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + C_w \rho_w T \nabla \cdot (K \nabla \psi) = 0 \quad (1)$$

式中： C 为等效体积比热，体积比热为物的质量单位为立方米时的比热； T 为系统温度； λ 为岩体等效导热系数，冻岩和未冻岩取值不同； θ_i 为冰体积含量； ρ_i 冰的重度； C_w 为水的体积比热； ρ_w 为水的重度； K 为等效渗透系数； L 为水冰相变潜热系数； $\nabla \psi$ 为水势梯度。

水热迁移是影响水冰相变的重要环节，主要涉及渗流场与温度场。几十年来，不少学者对水热迁移的驱动力等问题进行了研究。Eveertt^[38]提出第 1 冻胀理论，把水分迁移归结为毛细作用，解释了水分迁移的原动力，但没有解释造成冻胀的最主要原因；Miller^[39]在其第 2 冻胀理论中提出：冻结缘带位于冻结锋面和最暖冰透镜之间，冻结缘处水分不断分凝成冰是造成冻胀的主要原因。徐光苗等^[40]基于不可逆热力学和连续介质力学理论，推导了冻结岩体的质量守恒方程、平衡方程及能量守恒方程，研究了冻结冰与岩石的膨胀耦合关系。杨更社等^[41]通过试验证明 温度梯度是水分迁移的主要驱动力，当温度梯度越大时，水分场则越快达到重新分布状态，孔隙率越高，则冻结过程越长。

冻结过程中的水热迁移问题一直倍受关注。关于水分迁移的驱动力问题，研究者分别从热力学、物理化学等角度提出了不同的假说。概况起来，岩体水分迁移机制可分为直接迁移和间接迁移。前者是水头势造成的渗流，多数符合层流假定及达西定律；后者一般包括温度梯度、溶质梯度等作用下的水分迁移。通常认为，温度梯度是正冻带中水分迁

移的主要驱动力。通常可用基于平衡态热力学原理描述温度与压力之间相互关系的Clapeyro方程^[42]

$$V_w(P_w - \pi) - V_i P_i = L(T_w - T_0)/T_0 \quad (2)$$

式中: V_w 和 V_i 分别为水和冰的比容, 比容为单位质量的物质所占有的容积; P_w 为液相静水压力; π 为溶质渗透压力; P_i 为冰所承受的压力; L 为相变潜热; T_0 为纯水冻结温度; T_w 为岩体中水溶液的冻结温度。

2.4 冻胀模型与数值模拟

基于第二冻胀理论, O'Neill 等^[43]首先提出刚冰模型 (rigid ice model), 认为孔隙水和孔隙冰之间应力分布存在一个合适的比例, 当有效孔隙应力达到或超过上覆荷载时, 新的冰透镜体形成。Holden 等^[44]、Piper 等^[45]相继改进了刚性冰模型; Ishizaki 等^[46]基于刚性冰理论, 通过试验解释了分凝冰的形成过程; Gorelik 等^[47]分析了刚性冰模型解的特性; 赖远明等^[48]运用经典渗流力学和传热学原理推导了寒区隧道围岩二维 HM 耦合及 THM 耦合的控制方程, 编制了有限元计算程序; 裴捷等^[49]根据实测隧道围岩温度, 采用一维热传导模型, 古典显式差分格式和最小二乘法, 对寒区隧道围岩的导温系数进行了反分析, 并用解析方法和数值计算分析了隧道衬砌内防水层对隧道围岩冻深的影响; 王星华等^[50]引入移动边界模型, 采用有限元方法计算, 得出隧道冻融区的变化规律; 张玉军^[51]考虑水冰潜热的影响, 并对热-水-应力耦合模型及二维有限元程序做了改进, 对岩土体冻融问题进行了分析。张慧梅等^[52]提出冻融损伤、受荷损伤与总损伤的概念, 并考虑岩石细观的非均匀性, 运用损伤力学理论及应变等价原理建立了冻融受荷岩石损伤模型; 邓刚等^[53]提出了冻胀压力类似于气体压力的约束冻胀模型, 认为增加衬砌刚度是提高抗冻能力的有效措施。

低温与常温多场耦合问题的主要区别在于是否存在水冰相变过程。冻岩与冻土损伤的主要区别之一一是相变作用造成岩体裂隙网络的扩展演化, 目前冻岩多场耦合研究上存在的主要问题是多把岩体视为各向同性孔隙介质, 并直接运用冻土力学理论, 并没有充分考虑裂隙 (节理) 的作用。

因此, 目前国内外对冻岩问题的研究尚未成熟, 很多研究仍停留在试验探索阶段。笔者认为, 对冻岩损伤机制的研究应立足细观尺度, 进而延伸至冻融作用对岩体裂隙网络发展的影响, 只有这样才能从本质上揭示冻岩损伤机制, 而目前国内外鲜有此方面的研究。

3 讨论

冻岩损伤的特殊性源自水冰相变冻胀产生的裂隙网络及次生裂隙网络中水分迁移的耦合过程。基于裂隙岩体流体压力变化下循环损伤机制分析, 构建裂隙的萌生扩展、搭接成网、网络贯通、主裂隙带破坏的演化模型, 多尺度力学特性的宏观描述及模型参数获取是研究的第 1 个难点; 水冰相变作用下的裂隙网络损伤演化还涉及裂隙损伤扩容过程中的水分迁移, 这增加了冻结锋面扩展分析的复杂性, 这是第 2 个难点; 以考虑裂隙网络演化为特征的 THM 全耦合效应分析是第 3 个难点。

岩体的冻融损伤涉及低温环境下复杂的 THM 多场耦合问题, 裂隙中水冰相变是冻岩损伤的主导因素。笔者认为, 要研究冻融作用对岩体裂隙网络的损伤, 应以水冰相变为切入点, 须考察冻融损伤的 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岩体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。

通过研究上述 2 个关键环节, 对揭示岩体冻融损伤机制具有十分重要的意义。

数值模拟是研究冻融损伤的重要方法, 裂隙岩体冻融损伤数值计算的主要难点在于:

(1) 围岩介质影响因素较多, 控制微分方程体现非线性特征, 且冻融条件下低温多场耦合岩石力学参数呈现非均匀各向异性 (如渗透系数不仅受岩石基质温度变化的影响, 而且受水冰相变的限制);

(2) 目前裂隙网络损伤演化模拟技术不成熟。水冰相变的冻胀融缩过程对裂隙网络的演化产生区别于常温岩体的特殊影响, 冻结缘的水热迁移的数值实现也是需要深入研究的问题。

(3) 此外, 冻融损伤模型具有明显的非线性特征, 表现为: 裂隙岩体弹性模量是裂隙几何特征、温度、冻融损伤历史的函数; 裂隙岩体的渗透系数是裂隙几何特征、温度、应力、裂隙水冻结率的函数; 多场耦合控制微分方程的非线性。

4 结 论

(1) 寒区低温环境下, 裂隙水相变产生的冻胀作用, 对岩体的损伤主要表现为裂隙的扩展和贯通、岩体强度下降等方面。与常温相比, 冻结状态下岩石的强度、弹性模量、导热系数都有增大的趋势, 且受含水率影响明显。

(2) 冻结缘对冻结锋面水分补给和热迁移有重要影响, 前人的研究多集中在冻土上, 而对冻岩的研究较少, 对冻胀作用下裂隙扩展的研究十分罕见。

(3) 岩体水分迁移机制可分为直接迁移和间接迁移。直接迁移是水头势造成的渗流, 间接迁移一般包括温度梯度、溶质梯度等作用下的水分迁移。

(4) 冻岩与冻土损伤的主要区别之一是相变作用造成岩体裂隙网络的扩展演化, 从裂隙网络的角度分析冻融损伤有待深入研究。

(5) 岩体的冻融损伤涉及低温环境下复杂的 THM 多场耦合问题, 裂隙中水冰相变是冻岩损伤的主导因素, 应以水冰相变为切入点, 考察水冰相变、温度场、应力场与岩体裂隙网络的相互影响。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 张全胜. 寒区隧道围岩损伤试验研究和水热迁移分析 [博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [6] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133 - 143.
QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 133 - 143.
- [7] 高志华, 赖远明, 熊二刚, 等. 循环荷载作用下高温-高含冰量冻土特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1744 - 1751.
GAO Zhi-hua, LAI Yuan-ming, XIONG Er-gang, et al.

- Experimental study of characteristics of warm and ice-rich frozen clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1744 - 1751.
- [8] 李双洋, 张淑娟, 赵德安, 等. 冻土路基动力分析模型及青藏铁路地震灾害评估[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2179 - 2201.
LI Shuang-yang, ZHANG Shu-juan, ZHAO De-an, et al. Dynamical analysis model for frozen embankment and seismic hazard assessment of Qinghai-Tibet railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2179 - 2201.
- [9] KOSTROMITINOV K, NIKOLENKO B, NIKITIN V. Testing the strength of frozen rocks on samples of various forms, increasing the effectiveness of mining industry in Yakutia[M]. Novosibirsk: [s. n.], 1974.
- [10] INADA Y K, YOKOTA. Some studies of low temperature of rock strength[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1984, 21(3): 145 - 153.
- [11] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2001, 38(7): 1029 - 1034.
- [12] 何国梁, 张磊, 吴刚. 循环冻融条件下岩石物理特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 52 - 56.
HE Guo-liang, ZHANG Lei, WU Gang. Test study of physical characteristics of rock under freezing-thawing cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 52 - 56.
- [13] 徐光苗. 寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究 [博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学所, 2006.
- [14] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2502 - 2508.
XU Guang-miao, LIU Quan-sheng, PENG Wan-wei, et al. Experimental study of basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2502 - 2508.
- [15] LIU QUANSHENG, XU GUANGMIAO. Study of basic mechanical behaviors of rocks at low temperatures[J]. **Key Engineering Materials**, 2006, 306 - 308: 1479 - 1484.
- [16] LIU QUANSHENG, XU GUANGMIAO, LIU

- XIAOYAN. Experimental and theoretical study of freezing-thawing damage propagation of saturated rocks[J]. **International Journal of Modern Physics B**, 2008, 22(9 - 11): 1853 - 1858.
- [17] LIU QUANSHENG, XU GUANGMIAO, WU YUEXIU. The thermo-hydro coupled model of low-temperature rock in consideration of phase change[J]. **Advanced Materials Research**, 2008, 33 - 37: 645 - 650.
- [18] YONEDA M, SUGIYAMA A, ISHIKAWA Y, et al. Freeze-thaw resistance of the bond-mortar used in rock-bond method[J]. **Advances in Concrete Structural Durability**, 2008, 1 - 2: 488 - 492.
- [19] WALDER J S, HALLET B. A theoretical model of the fracture of rock during freezing[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1985, 96(3): 336 - 346.
- [20] KONRAD J M, DUQUENNOI C A. A model for water transport and ice lensing in freezing soil[J]. **Water Resources Research**, 1993, 29(9): 3109 - 3123.
- [21] KONRAD J M, CAN N R. Segregation potential of freezing soil[J]. **Geotech Testing**, 1981, 18(4): 482 - 491.
- [22] AKAGAWA S. Experimental study of frozen fringe characteristics[J]. **Cold Regions Sciences and Technology**, 1988, 15(3): 209 - 223.
- [23] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [24] 李萍, 徐学祖, 蒲毅彬, 等. 利用图像数字化技术分析冻结缘特征[J]. **冰川冻土**, 1999, 21(2): 175 - 180.
- LI Ping, XU Xue-zu, PU Yi-bin, et al. Analyses of characteristics of frozen fringe by using the digital technique of picture[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1999, 21(2): 175 - 180.
- [25] VLAHOU I, WORSTER M G. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. **Journal of Glaciology**, 2010, 56(196): 271 - 277.
- [26] KEVIN HALL. Freeze-thaw simulation on quartz-micaschist and their implications for weathering studies on Signy Island, Antarctica[J]. **British Antarctic Survey**, 1986, (73): 19 - 30.
- [27] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. **Engineering Geology**, 1968, 2(5): 315 - 323.
- [28] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 寒区隧道冻胀力的粘弹性解析解[J]. **铁道学报**, 1999, 21(6): 70 - 74.
- LAI Yuan-ming, WU Wang-zi, ZHU Yuan-lin, et al. Analytical viscoelastic solution for frost force of cold regional tunnels[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1999, 21(6): 70 - 74.
- [29] 李宁, 张平, 程国栋. 冻结裂隙砂岩低周循环动力特性试验研究[J]. **自然科学进展**, 2001, 11(11): 1175 - 1180.
- [30] SETO M. Freeze-thaw cycles on rock surfaces below the timberline in a montane zone: Field measurements in Kobugahara, Northern Ashio Mountains, Central Japan[J]. **Catena**, 2010, 82(3): 218 - 226.
- [31] 王俐, 杨春和. 不同初始饱水状态红砂岩冻融损伤差异性研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(10): 1772 - 1776.
- WANG Li, YANG Chun-he. Studies of different initial water-saturated red sandstones' different damaged extension under condition of frost and thaw[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1772 - 1776.
- [32] CHEN T C, YEUNG M R, MORI N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2004, 38(2 - 3): 127 - 136.
- [33] MATSUOKA N. Microgelivation versus macro-gelivation: towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering[J]. **Permafrost and Periglacial Processes**, 2001, (12): 299 - 313.
- [34] 杨更社, 张全胜, 任建喜, 等. 冻结速度对铜川砂岩损伤 CT 数变化规律研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(24): 4099 - 4104.
- YANG Geng-she, ZHANG Quan-sheng, REN Jian-xi, et al. Study of the effect of freezing rate on the damage CT values of Tongchuan sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4099 - 4104.
- [35] 范磊, 曾艳华, 何川, 等. 寒区硬岩隧道冻胀力的量值及分布规律[J]. **中国铁道科学**, 2007, 28(1): 44 - 49.
- FAN Lei, ZENG Yan-hua, HE Chuan, et al. Magnitude and distribution of frost heave force for cold region strong rock tunnels[J]. **China Railway Science**, 2007, 28(1): 44 - 49.
- [36] 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 Geng-she, XI Jia-mi, LI Hui-jun, 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.
- [37] 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 Wen-ge, 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.
- [38] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. **Transactions of the Faraday Society**, 1961, (57): 1541 - 1551.
- [39] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. **Highway Research Record**, 1972, (393): 1 - 11.
- [40] 徐光苗, 刘泉声, 张秀丽. 冻结温度下岩体 THM 完全耦合的理论初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3709 - 3713.
- XU Guang-miao, LIU Quan-sheng, ZHANG Xiu-li. Theoretical analysis of full Thermo-Hydro- Mechanical coupling for rocks under freezing temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3709 - 3713.
- [41] 杨更社, 周春华, 田应国, 等. 软岩材料冻融过程中的水热迁移实验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 566 - 570.
- YANG Geng-she, ZHOU Chun-hua, TIAN Ying-guo, et al. Experiment study of the moisture and heat transfer of soft rock material under the condition of freezing and thawing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(5): 566 - 570.
- [42] 杨更社, 张全胜. 冻融环境下岩体细观损伤及水热迁移机理分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- [43] O'NEIL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. **Water Resources Research**, 1985, 21(3): 281 - 296.
- [44] HOLDEN J T, PIPER D, JONES R H. A mathematical model of frost heave in granular materials[C]//The 4th International conference on Permafrost. Washington, D C: National Academy Press, 1983.
- [45] PIPER D, HOLDEN J T, JONES R H. A mathematical model of frost heave in granular materials [C]//The 5th International Conference on Permafrost. Norway: Tapir Publication, 1988.
- [46] ISHIZAKI T, NISHIO N. Experimental study of frost heaving of saturated soils[C]// The 5th International Symposium on Ground Freezing. UK: Balkema, Rotterdam, 1988.
- [47] GORELIK J B, KOLUNIN V S, RESHETNIKOV A K. Rigid-ice model and stationary growth of ice[C]//The 7th International Permafrost Conference. Canada: Laval University, 1998.
- [48] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 529 - 533.
- LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress fields in cold region tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(5): 529 - 533.
- [49] 裴捷, 水伟厚, 韩晓雷. 寒区隧道围岩温度场与防水层影响分析[J]. 低温建筑技术, 2004, (4): 4 - 6.
- PEI Jie, SHUI Wei-hou, HAN Xiao-lei. Temperature field of adjacent rock of a tunnel in cold area and influence of the water proofing layer[J]. **Low Temperature Architecture Technology**, 2004, (4): 4 - 6.
- [50] 王星华, 汤国璋. 昆仑山隧道冻融特征分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1452 - 1456.
- WANG Xing-hua, TANG Guo-zhang. Analysis of frozen-thaw property of Kunlun Mountain tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1452 - 1456.
- [51] 张玉军. 模拟冻-融过程的热-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 Yu-jun. 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.
- [52] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471 - 476.
- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 471 - 476.
- [53] 邓刚, 王建宇, 郑金龙. 寒区隧道冻胀压力的约束冻胀模型[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 80 - 86.
- DENG Gang, WANG Jian-yu, ZHENG Jin-long. Model of constraint on deformation due to frost heave for tunnels in cold region[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2010, 23(1): 80 - 86.