

# 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟

康永水<sup>1</sup>, 刘泉声<sup>1</sup>, 赵军<sup>2</sup>, 张芳<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 运用应变片法测试低温环境下饱和及干燥岩样的低温应变特征, 研究岩样冻胀融缩效应, 给出严格的岩石冻胀变形规律。试验结果表明: 一个冻融循环内, 干燥岩样变形表现为线弹性特征, 而饱水岩样的变形大致经历冷缩、冻胀、融缩、热胀等阶段, 并产生残余应变。依据试验结论, 运用理论分析方法研究岩石冻胀应变, 并将其运用于工程实例, 模拟寒区隧道冻胀变形特征, 并得出一定冻结条件下围岩未冻区、正冻区和已冻区的分布状况。

**关键词:** 岩石力学; 冻胀变形; 冻胀力; 含水率; 相变; 冻结率

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2012)12-2518-09

## RESEARCH ON FROST DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ROCK AND SIMULATION OF TUNNEL FROST DEFORMATION IN COLD REGION

KANG Yongshui<sup>1</sup>, LIU Quansheng<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, ZHANG Fang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** In order to study the frost deformation of rock under subfreezing temperature, strains of dry and saturated rock samples at low temperature were tested by strain gauge method. The result proves that dry rock samples behave as linear elastic characteristics during one freeze-thaw cycle, while the deformation of saturated rocks experienced four stages as follows: thermal contraction stage, frost expansion stage, thawing contraction stage and thermal expansion stage, and the residual strains were evident. Based on the test results, frost expansion deformation of moist rock at low temperature was analyzed. Ultimately, the conclusions were applied to a tunnel in cold region and the frost deformation characteristics of tunnel is studied. Besides, the distribution of unfrozen, freezing and frozen zones under certain frozen condition are sketched.

**Key words:** rock mechanics; frost deformation; freezing pressure; water content; phase transition; frozen ratio

## 1 引言

寒区工程岩体的冻胀融缩受冻结温度、冻结历

时、含水率及岩石自身力学性质等多种因素的影响, 是个十分复杂的过程<sup>[1-3]</sup>。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。水结冰时会产生约 9% 的体积膨胀, 若受到岩石的约束, 则会产

**收稿日期:** 2012-05-02; **修回日期:** 2012-06-12

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41072239)

**作者简介:** 康永水(1985-), 男, 2012 年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位, 现任助理研究员, 主要从事裂隙岩体冻融损伤及多场耦合等方面的研究工作。E-mail: kys85@163.com。通讯作者: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

生体积膨胀力，从而引起岩石骨架冻胀变形，并可能造成岩体损伤<sup>[4-6]</sup>。

试验方法是探索冻融损害机制的重要途径。目前国内外关于冻岩的试验研究大体可归纳为低温岩体物理力学性质、冻结过程与水热迁移、冻融损伤等方面。Y. K. Inada 和 K. Yokota<sup>[7]</sup>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；李 宁等<sup>[8]</sup>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；徐光苗等<sup>[9]</sup>通过试验证明：温度在 $-20 \sim 20$  范围内变化时，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，岩石的黏聚力和内摩擦因数都随温度降低而增加；杨更社等<sup>[10]</sup>对煤岩和砂岩进行了常温(20 )和不同冻结温度及不同围压条件下的三轴压缩试验，分析了围压与冻结温度对岩样三轴抗压强度的影响。

目前对低温岩石力学特性的研究已十分充足，多数试验验证的结论基本一致，表明含水岩石冻结后的强度等力学参数与常温相比都显著增加。但是，针对岩石冻胀应变特征的试验研究相对较少。

绝大多数物体具有热胀冷缩的性质，一般岩石也具有此特性。但在低温环境下，当富水工程岩体中的水结冰时，会产生体积膨胀，对岩体的变形产生巨大影响，可能使岩体产生冻胀融缩效应，从而会对支护体的受力状态、岩体损伤及工程的稳定性产生显著影响。因此，研究富水岩体的低温变形特征对于寒区岩体工程设计和防御、控制岩体冻害具有重要意义。在分析岩体冻融损伤及低温工程岩体稳定性时，需要依据严格的冻胀变形规律。因而有必要通过试验揭示冻胀变形特征，从而为冻融损伤研究提供基础。

目前对含水岩石低温变形的试验研究报道不多。T. Yamabe 和 K. M. Neaupane<sup>[11]</sup>对干燥和饱和的 Sirahama 砂岩各一块进行了一次冻融循环热膨胀应变测试试验，证明温度荷载下干燥岩样的变形类似弹性连续介质的应力-应变线性关系，而一次冻融循环后含水岩样的变形不能完全恢复。但该试验结果未能体现冻胀应变随时间的变化规律，且只用了一类岩样，代表性不强。

本文拟通过测试低温环境下干燥和饱水岩样随降温产生的应变特征，研究岩石冻胀变形随时间、温度的变化规律。根据试验结论，通过理论方法分析岩石冻胀应变。最后，结合工程实例，运用理论分析结论研究寒区隧道围岩的冻胀变形特征。

## 2 试验研究

### 2.1 试验步骤

选取砂质泥岩、白砂岩、花岗岩 3 类岩石标准试件( $\phi = 50 \text{ mm}$ ,  $h = 100 \text{ mm}$ )分别代表较软岩、中硬岩和硬岩，进行低温应变测试。砂质泥岩和白砂岩由采自安徽省淮南矿区顾桥矿南区的岩芯制备，花岗岩由采自甘肃北山的岩块制取。同时选取黄铜块、铁块和铝块 3 种金属材料同步进行低温应变测试，作为对比。岩样制备方法如下：

(1) 饱和岩样：把岩样放入抽气容器中，密封容器，抽取容器中的空气值表头压力值为 0.1 MPa，稳定 4 h 后向容器中放入蒸馏水，并继续抽气至压力 0.1 MPa，稳定 4 h，然后将试样在水中浸泡 4 h，拭干表面水分。

(2) 干燥岩样：将试样放在烘箱中，80 温度下烘干 72 h。

试样制备前后变化见表 1。在每块试件上沿纵向和环向各贴一个应变片，并焊接导线。石英玻璃做补偿块，贴一个同一型号的应变片做补偿片；岩样放在恒温箱中，将试件分组连接预调平衡箱，在室温(16 )下将应变仪调零，放入恒温恒湿试验机，分别设置冻结温度为 -15 和 -30 ，每隔 1 h 读取应变数据。

表 1 岩样尺寸及质量

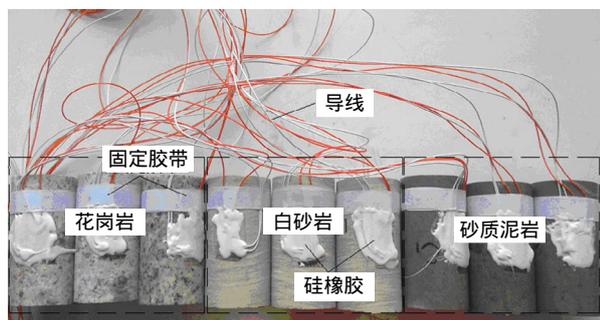
Table 1 Sizes and weights of rock samples

| 岩样类型 | 岩样编号 | 高/mm   | 直径/mm | 自然质量/g | 烘干质量/g | 饱水质量/g |
|------|------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 白砂岩  | A1   | 103.24 | 49.77 | 534.41 | 533.47 | -      |
|      | A2   | 99.17  | 49.75 | 512.63 | -      | 516.06 |
|      | A3   | 100.15 | 49.54 | 510.66 | -      | 515.26 |
| 花岗岩  | B1   | 99.80  | 49.21 | 495.85 | 495.25 | -      |
|      | B2   | 97.28  | 49.01 | 479.00 | -      | 479.88 |
|      | B3   | 100.02 | 49.53 | 483.04 | -      | 484.09 |
| 砂质泥岩 | C1   | 100.55 | 49.56 | 512.97 | 512.42 | -      |
|      | C2   | 100.82 | 49.55 | 515.03 | -      | 515.75 |
|      | C3   | 100.12 | 49.55 | 514.83 | -      | 515.86 |

### 2.2 主要试验设备、试验材料

- (1) BQ120-5AA 型耐低温应变片、导线、石英玻璃片(用作补偿块)；
- (2) H610 胶水(黏贴应变片)、704 硅橡胶膏、丙酮(擦拭岩块)、薄钢片、细铁丝；
- (3) YJ-X4 型静态电阻应变仪、10 通道 PX-10A 型预调平衡箱；
- (4) 程式恒温恒湿试验机；
- (5) 电子天平、游标卡尺；
- (6) 烘箱、抽真空饱和设备。

试验材料和主要试验设备分别如图 1, 2 所示。



(a) 岩石试样



(b) 金属材料

(c) 应变片布置

图 1 试验材料

Fig.1 Testing materials



图 2 主要试验设备

Fig.2 Main test apparatus

### 2.3 温度补偿

用低温应变片测量岩石变形具有价格低廉、操作简便等优点。王正道等<sup>[12]</sup>研究了应变片法测量材料线膨胀系数的原理,并用石英做补偿块,接半桥电路测试了成分为 Cu(90.5%), Al(6.5%), Fe(2.5%)的铜板在低温环境下线膨胀系数;铁道部科学研究院温度应力专题组用石英玻璃做补偿片,采用应变片测试方法测定了混凝土热膨胀系数。

理想的应变片阻值应只随应变变化,不受其他因素影响。而实际上应变片的阻值受环境温度(包括测试件)的影响很大。由于环境温度变化引起的电阻变化与试件应变所造成的电阻变化几乎具有相同的数量级,从而产生很大的测量误差,称为应变片的温度误差,也称作热输出<sup>[13]</sup>。

因环境温度改变而引起的应变片的电阻变化主要有两方面的因素:(1) 应变片的电阻丝(敏感栅)具有一定的温度系数;(2) 电阻丝材料与测试材料的线膨胀系数不同。

构件温度变化量为  $\Delta T$  ( )时,黏贴在试件表面的应变片敏感栅材料的电阻温度系数为  $\beta_1$ ,则应变片产生的电阻相对变化<sup>[14]</sup>为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 = \beta_1 \Delta T \tag{1}$$

式中:  $R$  为电阻,  $\Delta R$  为电阻变化量。

由于敏感栅材料和被测构件材料两者线膨胀系数不同,当  $\Delta T$  存在时,引起应变片的附加应变,相应的电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = K(\alpha_c - \alpha_g) \Delta T \tag{2}$$

式中:  $K$  为应变片灵敏系数,  $\alpha_c$  为试件材料线膨胀系数,  $\alpha_g$  为敏感栅材料线膨胀系数。

温度变化  $\Delta T$  形成的总电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = \beta_1 \Delta T + K(\alpha_c - \alpha_g) \Delta T \tag{3}$$

应变误差为

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t / K = \frac{\beta_1}{K} \Delta T + (\alpha_c - \alpha_g) \Delta T \tag{4}$$

桥路补偿是一种常用的消除温度应变误差的方法。一般而言,补偿片应黏贴在与工作片相同材料上,并置于相同的温度环境下,工作片加荷载而补

偿片不加载。这种情况下假设温度引起的工作块和补偿块的应变相等是合理的。但在测试温度应变时，因工作片也不加载，且岩石类材料内部结构十分复杂，不同岩块的热膨胀系数离散性较大，这种离散性对所测数据影响极大，因而本试验若用岩石材料做补偿片不合理。石英玻璃的热膨胀系数极低且十分稳定，其热膨胀系数值比一般的岩石材料低一个数量级，其值为  $(5.3 \sim 5.8) \times 10^{-7} \text{ } ^{-1}$  [15]，适合做温度补偿体。

如图 3 所示，半桥补偿电路中，由温度引起的观测应变  $\varepsilon_u$  由下式表示：

$$\varepsilon_u = (\alpha_c - \alpha_g)\Delta T + \frac{\beta_1}{K} \Delta T \quad (5)$$

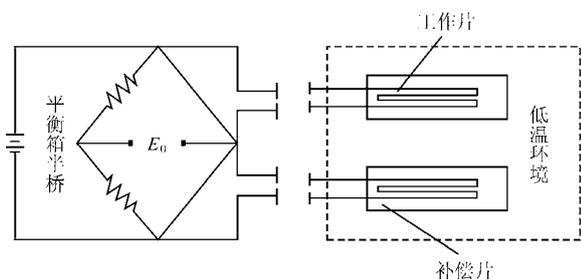


图 3 半桥电路示意图

Fig.3 Sketch of half-bridge circuit

按照图 3 将 2 个应变片半桥连接，产生等效于视应变的代数差的标准输出，差值可表示为

$$\varepsilon_u = (\alpha_c - \alpha_g)\Delta T \quad (6)$$

式中： $\alpha_c$  为石英玻璃的热膨胀系数，为已知量，取  $5.3 \times 10^{-7} \text{ } ^{-1}$ 。

则岩石试件的热膨胀系数表达式为

$$\alpha_c = \frac{\varepsilon_u}{\Delta T} + \alpha_g \quad (7)$$

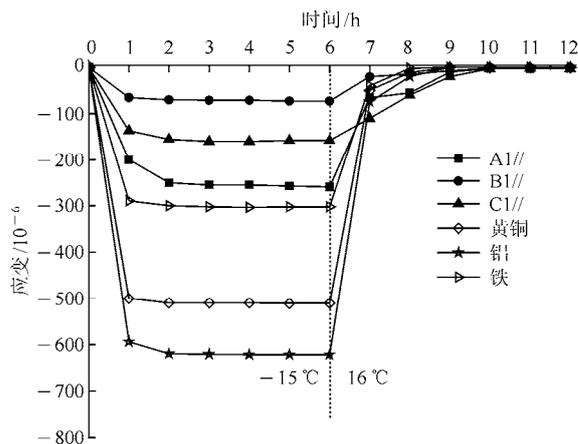
因此，岩石试样的实际应变值  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \alpha_c \Delta T \quad (8)$$

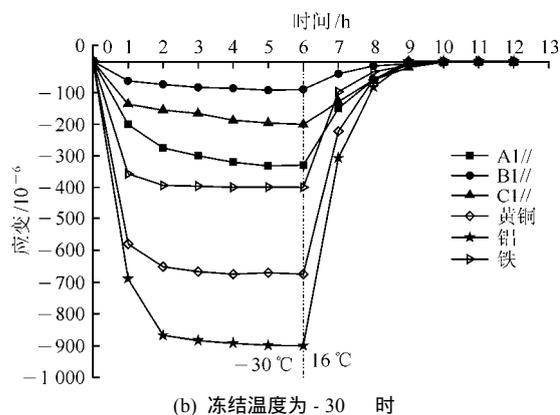
### 3 结果分析

#### 3.1 干燥岩样与金属材料

岩样在室温(16 )放置 4 h 后，放入冻融试验机，分别设置冻结温度为 -15 和 -30 时测得干燥岩样和金属材料的应变-时间曲线如图 4 所示。其中，图例如 A1//，表示 A1 岩样的纵向应变，其他类推。



(a) 冻结温度为 -15 时



(b) 冻结温度为 -30 时

图 4 干燥岩样与金属材料应变-时间曲线

Fig.4 Strain-time curves of dry rock samples and metals

由图 4 可知：干燥状态下的岩石和金属材料都表现出明显的热胀冷缩特性。岩石与金属材料的应变-时间曲线变化趋势稳定，整体趋势一致。且一个冻融循环后应变回归初始值，未产生残余应变。

按式(7)计算金属材料的热膨胀系数见表 2。其中，石英玻璃的热膨胀系数取为  $5.3 \times 10^{-7} \text{ } ^{-1}$ 。

表 2 金属材料的热膨胀系数

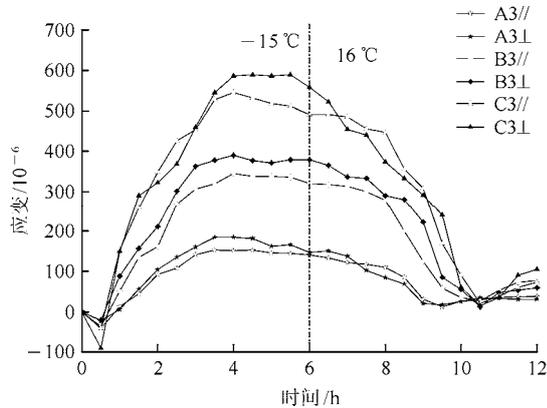
Table 2 Thermal expansion coefficient of metals

| 温度/       | 热膨胀系数/( $10^{-6} \text{ } ^{-1}$ ) |      |     |
|-----------|------------------------------------|------|-----|
|           | 黄铜                                 | 铝块   | 铁块  |
| +16 ~ -15 | 16.6                               | 20.0 | 9.4 |
| +16 ~ -30 | 16.2                               | 19.6 | 8.7 |

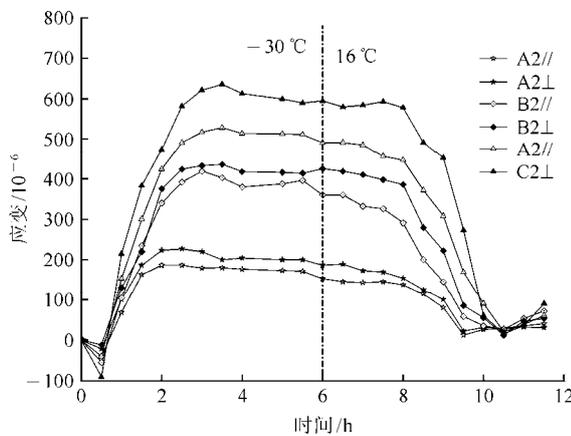
查阅相关资料，黄铜、铝块、铁块 3 种材料正温 (0 ~ 100 范围内)的热膨胀系数参考值分别为  $16.5 \times 10^{-6}$ ， $23.6 \times 10^{-6}$ ， $11.8 \times 10^{-6} \text{ } ^{-1}$ 。考虑到试验材料杂质等因素的差异，计算结果与参考值十分接近，表明该试验的可靠性较高。

#### 3.2 饱水岩样

选取一组饱水岩样在定温 -16 和 -30 条件下, 冻结 6 h, 然后置于 16 温度下, 测试应变规律, 如图 5 所示。图中, “ ” 表示环向。



(a) 冻结温度为 -15 时



(b) 冻结温度为 -30 时

图 5 定温条件下饱水岩样冻胀应变-冻结历时曲线

Fig.5 Frozen strain-frozen time curves of saturated rock samples under constant temperatures

由图 5 可见, 冻结温度越低, 初始阶段的冻胀应变增长率越大, 达到极值的时间越短。达到极值后继续维持冻结温度, 应变都略有降低, 分析该现象与岩石骨架的冷缩变形有关。一个冻融循环内, 饱水岩样的变形大致经历了冷缩 冻胀 融缩 热胀等阶段, 并产生了残余应变。

### 4 冻胀应变分析

干燥和饱水岩样低温应变测试结果表明: 岩石在低温环境下的变形含水量的影响显著。在低温环境下, 干燥岩样与金属材料一样, 发生明显的热胀冷缩变形。而对于饱水岩样, 水分冻结体积膨胀, 受到岩石骨架的束缚而产生冻胀冰压, 从而产生冻胀变形, 如图 6 所示。

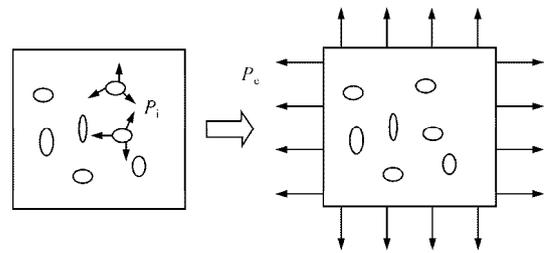


图 6 岩石骨架受力示意图

Fig.6 Sketch of freezing pressure on rock skeleton

在降温过程中, 岩石骨架会同时发生冷缩变形, 因此, 可将低温环境下含水岩石的变形视为两部分组成: (1) 岩石骨架的热胀冷缩应变; (2) 水冰冻胀融缩作用引起的应变。

为使问题简化, 考虑影响冻胀作用的主要因素, 忽略次要因素, 做如下假设:

- (1) 水冰体和岩石基质均视为均质各向同性弹性介质;
- (2) 冻胀冰压在岩体内均匀分布, 忽略气体的影响;
- (3) 忽略相变初期的过冷阶段, 假定水冰系统温度低于冰点时即开始冻结;
- (4) 符合小变形假设, 并忽略孔隙度变化。

降温产生的总应变  $\epsilon^T$  等于岩石骨架的热胀冷缩应变  $\epsilon_s^T$  和冻胀应变  $\epsilon_i^F$  的叠加, 即

$$\Delta \epsilon^T = \epsilon_s^T + \epsilon_i^F \quad (9)$$

考虑单元体孔隙度  $n$ , 饱和度  $S_r$ 。如图 6 所示, 将孔隙视为均匀分布于单元体内, 各向同性, 冻胀压力相当于附加了一个静水应力。冰体膨胀产生的冻胀冰压力为  $P_i$ , 在研究岩石骨架受力时, 将冻胀冰压等效至骨架表面应力  $P_e$  得

$$P_e = \kappa P_i \quad (10)$$

式中:  $\kappa$  为冻胀传压系数, 根据有效接触面积理论可近似取值为  $n$ 。若考虑非饱和状态, 在冻结压力的驱动下, 未冻水会迁移至非饱和区, 实现“假饱和”之后才出现明显的冻胀变形。

设水相变成冰的体积膨胀系数为  $\beta$ , 则无约束状态下的体积增量  $\Delta V_r'$  为

$$\Delta V_r' = [\beta n S_r u - n(1 - S_r)] H[u - \chi] \quad (11a)$$

其中,

$$H[u - \chi] = \begin{cases} 0 & (u < \chi) \\ 1 & (u > \chi) \end{cases} \quad (11b)$$

$$\chi = \frac{1 - S_r}{\beta S_r} \quad (11c)$$

式中： $H$  为阶跃函数； $u(0 \leq u \leq 1)$  为冻结率，即参与冻结的水分比例，其表达式为

$$u = \frac{m_i}{m_w + m_i} \quad (12)$$

式中： $m_i$  为已冻水(冰)的质量， $m_w$  为未冻水的质量。冻结率表征参与冻结的水分的多少，是控制冻胀力、冻胀应变的关键变量，对冻融损伤有非常重要的影响。 $u$  受温度、压力、冻结历时等多种因素的影响。

考虑骨架束缚作用时，骨架冻胀应变和冰体的压缩应变分别为

$$\varepsilon_{vs} = \frac{P_e}{K_s} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{P_i}{K_i} = \frac{P_e}{\kappa K_i} \quad (14)$$

式中： $K_i, K_s$  分别为冰和岩石骨架的体积模量。

根据体积连续性，在“假饱和”之后的冻胀阶段有如下关系：

$$\varepsilon_{vs} + nS_r\varepsilon_{vi} = [\beta nS_r u - n(1 - S_r)]H[u - \chi] \quad (15)$$

$$\left( \frac{1}{K_s} + \frac{S_r}{K_i} \right) P_e = [\beta nS_r u - n(1 - S_r)]H[u - \chi] \quad (16)$$

从而得

$$P_e = \frac{[\beta nS_r u - n(1 - S_r)]K_s K_i}{K_s S_r + K_i} H[u - \chi] \quad (17)$$

计算中，冻胀力以孔隙压力形式施加。

若岩体初始饱和，则  $S_r = 1$ ，且  $H[u - \chi] = 1$ ，可得

$$P_e = \frac{\beta n u K_s K_i}{K_s + K_i} \quad (18)$$

冰膨胀受到约束而产生冻胀力，岩石骨架的体积增量为

$$\varepsilon_{vs} = \frac{[\beta nS_r u - n(1 - S_r)]K_i}{K_s S_r + K_i} H[u - \chi] \quad (19)$$

冻胀应变可表示为

$$\varepsilon_{ij}^F = \frac{1}{3} \frac{[\beta nS_r u - n(1 - S_r)]K_i}{K_s S_r + K_i} H[u - \chi] \delta_{ij} \quad (20)$$

当岩石初始饱和时，冻胀应变可表示为

$$\varepsilon_{ij}^F = \frac{1}{3} \frac{\beta n u K_i}{K_s + K_i} \delta_{ij} \quad (21)$$

因而，温度变化引起的总应变为

$$\Delta \varepsilon^T = \varepsilon_s^T + \varepsilon_i^F = \alpha \Delta T \delta_{ij} + \frac{1}{3} \frac{[\beta nS_r u - n(1 - S_r)]K_i}{K_s S_r + K_i} H[u - \chi] \delta_{ij} \quad (22)$$

由式(20)~(22)可知，冻胀应变受孔隙度、饱和度、冻结率及冰和岩石骨架的体积模量等多种因素影响：

(1) 若饱和度较低，则岩石孔隙中被空气占据的空间较大，即使水分全部冻结(即  $u = 1$ )，仍不能达到“假饱和”状态，因而不能发生冻胀变形，此时满足以下关系：

$$\frac{1 - S_r}{\beta S_r} > 1 - u \quad (23)$$

(2) 冻结率较低时，冻胀应变小于冷缩变形，岩样整体表现为收缩变形。

(3) 孔隙度过低时，即使初始饱和且完全冻结 ( $u = 1, S_r = 1$ )，但冻胀应变较低，岩样整体仍表现为冷缩特征。

## 5 寒区隧道冻胀变形模拟

### 5.1 工程概况

连霍国道主干线永登—古浪国家高速公路乌鞘岭隧道位于天祝县陈家沟沟口，出口位于兰泉村，纵坡 1.715% ~ -1.150%，全长 4 905 m。隧道进、出口洞门均采用削竹式，永登端明洞长 55 m，该段最大埋深 189 m，属深埋石质特长隧道。

隧址区位于祁连山高寒亚干旱区，海拔高程为 2 850 ~ 3 050 m。年平均气温 12.4℃，最低气温达 -24℃，冰冻期长达 4 ~ 5 个月，为 11 月至次年 3 月。

隧道主洞内轮廓拱部采用  $R = 543$  cm 单心半圆，侧墙采用  $R = 793$  cm 大半径圆弧，仰拱半径为 1 500 cm，仰拱与侧墙间采用  $R = 100$  cm 小半径圆弧连接；隧道断层破碎带 VI 级围岩段内轮廓拱部采用  $R = 573$  cm 单心半圆，侧墙采用  $R = 823$  cm 大半径圆弧，仰拱半径为 1 500 cm，仰拱与侧墙间采用  $R = 150$  cm 小半径圆弧连接；主洞内路面宽度为 8.75 m，拱顶高 7.03 m。

隧道洞身段最大水平主应力  $S_H$  值一般为 3.76 ~

9.82 MPa, 最小水平主应力值  $S_h$  一般为 2.48~3.74 MPa。三向主应力值的比较结果表明, 隧址区的现今地应力场总体特征为:  $S_H > S_h > S_v$ , 即: 水平主应力为最大主应力, 垂直主应力值最小。构造应力作用占主导地位, 但强度不高。

隧址区属于祁连山东段水文地质区。隧址区地下水类型分为第四系松散空隙裂隙水和基岩裂隙水。前者赋存于隧道进出口第四系覆盖层、第四系砂卵石层, 后者分布于岩石的构造裂隙和十分发育的表部网状风化裂隙。

本段内特殊性岩土主要为季节性冻(岩)土, 在隧道进出口分布的土层黏粒含量较高, 上部土质含有较多腐植质, 此处气候高寒阴湿, 局部地下水位较高, 为季节性冻土, 冬天易形成冻裂、冻胀, 春融季节易形成翻浆及热融沉陷。

### 5.2 数值模拟

选取永登端洞口 50 m 深度范围内隧道段进行模拟。地处黄土梁坡脚, 山坡较缓, 坡度  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 植被不发育, 剖面如图 7 所示。上部分布薄层坡积黄土, 下部岩土体为第四系中更新统冲洪积碎石土, 围岩稳定性差。依据隧道地层剖面图, 建立模型如图 8 所示, 模型的主要参数见表 3。上部覆盖黄土层, 下部岩层考虑为连续介质, 设置厚 0.4 m 衬砌。

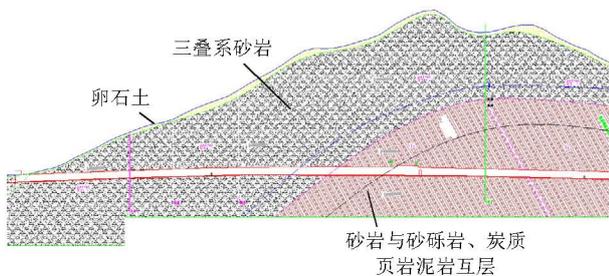


图 7 永登洞口地层剖面图

Fig.7 Stratigraphic section of Yongdeng portal of tunnel

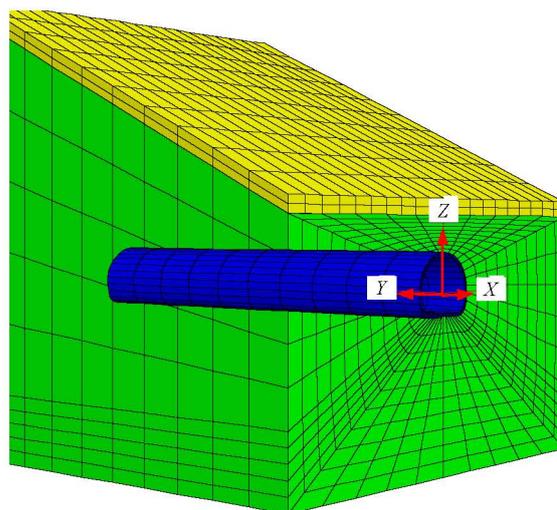


图 8 永登端口模型

Fig.8 Model for Yongdeng portal of tunnel

岩石孔隙度取 3.0%, 饱和度 0.5。上覆表土层孔隙率 0.3, 饱和度 0.5。根据地应力状况, 可知 X 方向施加水平构造应力 5 MPa。

模型先实现开挖平衡后再开启热 - 液 - 力耦合计算模式进行冻胀计算。计算中模型初始温度取  $5^\circ\text{C}$ , 冻结开始后, 外界温度设置为  $-20^\circ\text{C}$ 。力学模型选用 Mohr-Coulomb 模型, 热学模型选择各向同性热传导模型。

计算采用热力耦合计算模式。参照式(17), 通过编制 Fish 程序施加冻胀附加应力场。计算中通过单元遍历循环方法, 根据不同的单元温度施加相应的冻胀应力。

设冰点为  $-2^\circ\text{C}$ , 冻结 10 d 后, 温度场分布如图 9 所示。假定围岩温度低于  $-18^\circ\text{C}$  时冻结率即达到极值, 即  $-2^\circ\text{C}$  和  $-18^\circ\text{C}$  作为 3 区划分标准, 则编制 Fish 函数描绘冻结 10 d 后的围岩正冻区、已冻区和未冻区如图 10 所示。

表 3 模型主要参数

Table 3 Main parameters of model

| 土层材料 | 密度/ $(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 内摩擦角/ $(^\circ)$ | 黏聚力/MPa | 抗拉强度/MPa | 比热容/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ | 热膨胀系数/ $(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ | 热传导系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ |
|------|---|----------|------|------------------|---------|----------|---|---|---|
| 砂岩   | 2.5   | 35.00    | 0.25 | 35               | 15.0    | 2.0      | 800   | 5.4   | 2.6   |
| 上覆土层 | 1.3   | 0.01     | 0.22 | 30               | 0.5     | 0.0      | 300   | 2.0   | 1.5   |
| 衬砌   | 2.8   | 30.00    | 0.27 | 35               | 20.0    | 3.0      | 700   | 5.4   | 3.0   |

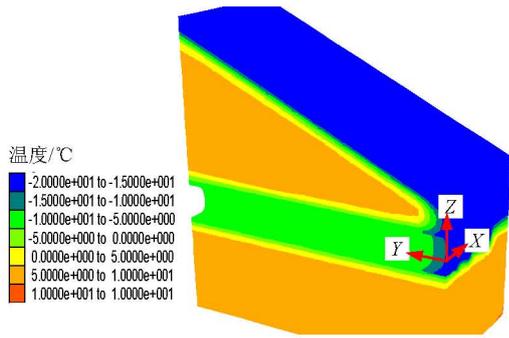


图 9 温度场分布

Fig.9 Distribution of temperature field

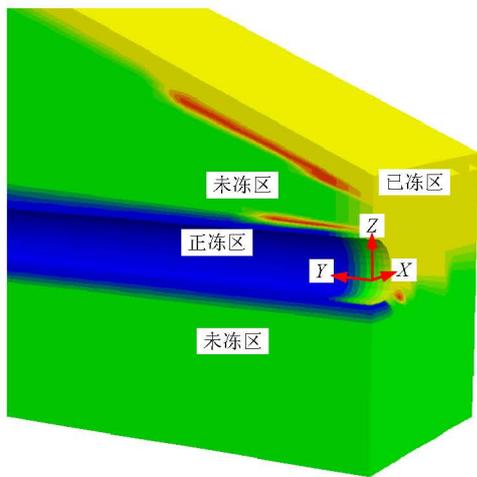


图 10 冻结区、未冻区与正冻区划分

Fig.10 Division of frozen, unfrozen and freezing zones

自洞口沿隧洞走向每 5 m 设置一个表面位移监测断面，监测顶底板和壁面的径向位移，监测结果如图 11~13 所示。

由图 11~13 可知：洞口端径向位移从洞口至深部逐渐增加。当温度降低时，冻胀作用引起的位移变化显著增加。

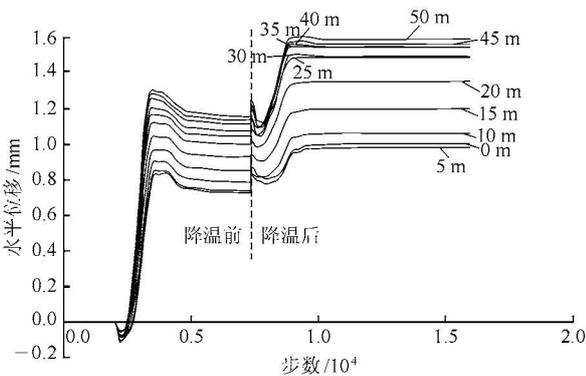


图 11 右侧壁面水平位移

Fig.11 Horizontal displacement of right side wall

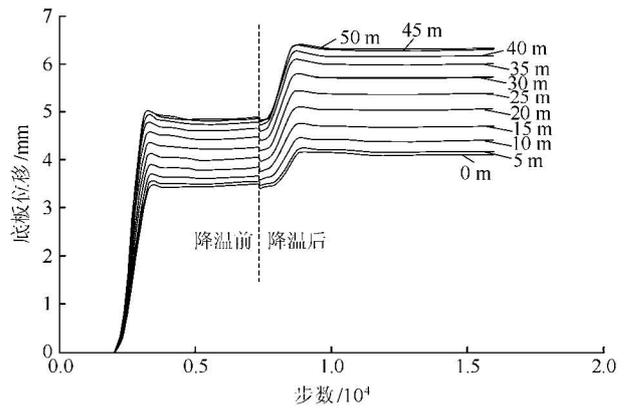


图 12 底板位移

Fig.12 Displacements of floor

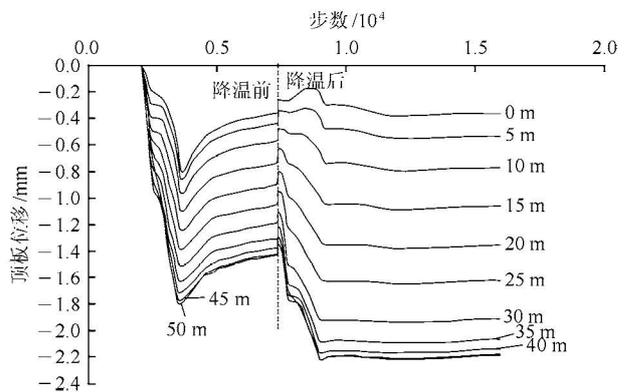


图 13 顶板位移

Fig.13 Displacements of roof

降温初始阶段岩石发生收缩变形，而随着冻结时间的推移，冻胀效应才逐渐显现。-20 ℃冻结 10 d 后位移变化相对微弱，基本趋于稳定。

## 6 结论

(1) 在负温环境下，岩体中的水结冰而产生体积膨胀，会对岩石骨架产生附加应力而引起冻胀变形。岩石冻胀变形受多种因素的影响，低温变形试验表明：干燥试样发生热胀冷缩变形，且整体上表现出显著的线弹性变形特征，一个冻融循环后应变回归初始值，未产生残余应变。而饱水岩样低温变形大致经历了冷缩→冻胀→融缩→热胀等阶段，并产生了残余应变。

(2) 运用理论分析方法研究了岩石的冻胀应变，将低温岩石因温度变化产生的应变视为岩石骨架热胀冷缩应变与冻胀应变之和。含水率对冻胀应变的影响显著，对于非饱和岩石，当冻结率达到一定值实现“假饱和”之后岩石才会产生冻胀变形。本文给出了发生冻胀变形需具备的条件。

(3) 通过对一个高寒区公路隧道的低温稳定性模拟,得出了一定冻结温度及冻结历时条件下的温度场及冻结区、未冻区与正冻区的划分,以及隧洞因降温作用产生的冻胀位移变化规律。

**致谢** 本文试验工作得到了中国科学院武汉岩土力学研究所陈卫忠研究员、刘继光高级实验师、谭贤君博士的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢!

### 参考文献(References):

- [1] 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))
- [2] 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2): 52-56. (HE Guoliang, ZHANG Lei, WU Gang. Test study on physical characteristics of rock under freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 52-56.(in Chinese))
- [3] 刘泉声, 康永水, 刘 滨, 等. 裂隙岩体水-冰相变及低温温度场-渗流场-应力场耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2 181-2 188. (LIU Quansheng, KANG Yongshui, LIU Bin, et al. Water-ice phase transition and thermal-hydro-mechanical coupling at low temperature in fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2 181-2 188.(in Chinese))
- [4] 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 Huimei, YANG Gengshe. 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.(in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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 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))
- [7] INADA Y K, YOKOTA K. 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.
- [8] 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): 1 175-1 180. (LI Ning, ZHANG Ping, CHENG Guodong. Experimental study on dynamic characteristics of frozen-fractured sandstone under low cycle[J]. Process in Natural Science, 2001, 11(11): 1 175-1 180.(in Chinese))
- [9] 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): 2 502-2 508. (XU Guangmiao, LIU Quansheng, PENG Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 502-2 508.(in Chinese))
- [10] 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))
- [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 and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1 029-1 034.
- [12] 王正道, 赵立中, 途志华, 等. 应变片法测量低温下材料线膨胀系数[J]. 低温工程, 1999, (1): 18-21. (WANG Zhengdao, ZHAO Lizhong, TU Zhihua, et al. Thermal expansion measurement at low temperature using strain gauges[J]. Cryogenics, 1999, (1): 18-21.(in Chinese))
- [13] 赵启林, 杨 洪, 陈浩森. 光纤光栅应变传感器的温度补偿[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(2): 310-314. (ZHAO Qilin, YANG Hong, CHEN Haosen. Temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2007, 37(2): 310-314. (in Chinese))
- [14] 王雪文. 传感器原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 46-60. (WANG Xuewen. Sensor principle and application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004: 46-60.(in Chinese))
- [15] 关振铎, 张中太, 焦金生. 无机材料物理性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 119-126. (GUAN Zhenduo, ZHANG Zhongtai, JIAO Jinsheng. Physical properties of inorganic materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992: 119-126.(in Chinese))