

文章编号: 1000-7598(2009)07-1974-07

# 单轴载荷下冻土的导电性及机敏性能试验研究

付伟<sup>1,2</sup>, 汪稔<sup>1</sup>, 李志清<sup>3</sup>, 胡明鉴<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, 武汉 430071; 2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 3.中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 针对青藏铁路北麓河粉质黏土, 利用电阻率-应力-应变试验设备, 获取了不同温度单轴压缩条件下的电阻率-应力-应变全过程曲线, 探讨了冻土导电性能及其机敏性。试验结果表明, 在含水率  $w=17.8\%$ 、干密度  $\rho_d=1.71\text{ g/cm}^3$ 、加载应变率为  $1\text{ mm/min}$  试验条件下, 初始电阻率  $\rho_0$ 、最大电阻率  $\rho_m$ 、最大切线模量对应的电阻率  $\rho_{tm}$  随温度降低而同步增大; 冻土在压缩过程中具有较强的压敏性, 随着压应力增大, 电阻率变化可分为电阻率减小区、平衡区和剧增区; 冻土单轴最大切线模量与温度之间呈线性关系, 最大切线模量对应的应力及应变  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$ 、峰值应力对应应变  $\epsilon_m$  表现出温度敏感性, 当  $T=-15\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_m$  值最小; 当  $T>-15\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_m$  值随  $T$  降低而增大, 冻土随温度降低延性增强脆性减弱; 当  $T<-15\text{ }^\circ\text{C}$  时  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_m$  值随  $T$  降低而增大, 冻土随温度降低, 脆性增强, 延性减弱。

**关键词:** 冻土; 单轴压缩; 切线模量; 应力-应变-电阻率; 机敏性; 温度; 青藏铁路

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

## Experimental study of electrical resistivity properties and alert performance of frozen soil under uniaxial load

FU Wei<sup>1,2</sup>, WANG Ren<sup>1</sup>, LI Zhi-qing<sup>3</sup>, HU Ming-jian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Using the frozen soil uniaxial compressive apparatus combined with electrical resistivity observation for whole process, a series of uniaxial compressive tests under different environmental temperatures are performed for the clay in Beilu River with an initial water content of  $17.8\%$  and dry density of  $1.71\text{ g/cm}^3$  under a loading strain rate of  $1\text{ mm/min}$ , in which the complete testing data for the stress-strain curve and the associated electrical resistivity-strain curve are obtained. The experimental results indicate that  $\rho_0$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_{tm}$  are increased with decrement of the temperature  $T$  and they are changed synchronically. The frozen soil performs highly pressure-sensitivity, with the increasing of stress, the procedure of electrical resistivity includes three stages: decreasing stage, balance stage and sharply increasing stage. There is the linear relationship between the largest tangent modulus and temperature.  $\sigma_m$ ,  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_m$  show sensitivity to temperature, the value of  $\sigma_m$ ,  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_m$  is minimum when the temperature is  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ . The ductibility of frozen soil is enhanced and its brittleness is reduced; at the same time  $\sigma_m$ ,  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_m$  are increased with the decreasing of the temperature, when  $T > -15\text{ }^\circ\text{C}$ . The frozen soil has opposite characters when  $T < -15\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Key words:** frozen soil; uniaxial compressive strength; tangent modulus; stress-strain- electrical resistivity; alert performance; temperature; Qinghai-Tibet Railway

## 1 引言

我国冻土分布面积广, 多年冻土与季节性冻土共存, 在寒区修筑工程中总是不可避免地遇到冻土冻胀、融沉引起的一系列病害, 因此, 很有必要积

极地探索研究冻土性状的新方法。电阻率是材料的固有属性, 土的电率特性与温度、孔隙度、饱和度、孔隙液电率、土体矿物成分、土颗粒形状、定向性和胶结状态等有着密切的关系<sup>[1-2]</sup>。冻土的力学性能、热稳定性都与温度有着密切的关系, 同

收稿日期: 2009-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40672193); 中国科学院冻土工程国家重点实验室开放课题 (No. SKLFSE200605) 资助。

第一作者简介: 付伟, 男, 1981年生, 博士研究生, 从事岩土工程加固、检测、地基处理与人工冻结技术研究。E-mail: fwwhrsm@126.com

时, 冻融循环也改变着冻土的孔隙度、水分的分布、土颗粒的胶结等结构性因素, 研究冻土的导电性及其机敏性也是必要的。

Archie<sup>[1]</sup> (1942 年) 最先把物体电阻率与其结构相连, 提出了结构因子  $F$  概念, 并利用土的电阻率, 研究饱和和无黏性土和砂岩的微结构特性。随后, Waxman 等<sup>[3]</sup> (1968 年) 修正了 Archie 模型, 提出适用于非饱和黏性土的电阻率模型。M. J. Senos Matias<sup>[4]</sup> (2002 年) 利用正方形分布电极, 测试了各向异性不均匀岩土的电率, 研究了岩体走向、倾向、倾角与电阻率的关系, 并给出了用电阻率估算岩体产状的方法。P. D. Jackson 等<sup>[5]</sup> 研究了热带红黏土路基, 现场观测了路基二维电阻率等值线图, 分析了红黏土体积含水率、密实度与电阻率的关系。William J. Seaton<sup>[6]</sup> (2002 年) 用二维电阻率方法, 研究了石英砂岩的裂隙分布。Etienne Rey 等<sup>[7]</sup> (2006 年) 研究了各向异性巨粒土中粗颗粒含量与其电阻率的关系, 有效地估计了巨粒土中砾石的含量。

在国内, 刘松玉、于小军等<sup>[8-9]</sup> 利用土体电阻率指标研究膨胀土的结构特性, 建立了描述膨胀土、膨胀改良土在膨胀过程中结构变化的电阻率评价方法, 探索了应用电阻率结构特性指标预测膨胀量的可行性, 将电阻率测试技术运用到水泥土深层搅拌桩中, 分析了水泥土电阻率的影响因素。缪林昌等<sup>[10]</sup> 分析了水泥土的电阻率特性, 并在室内进行了不同水泥配合比和不同龄期的水泥土样的电阻率与无侧限抗压强度的测试。房纯纲等<sup>[11]</sup> 对汉江遥堤土进行了电阻率测试, 建立了堤防材料的电导率与其物性参数的相关关系, 研究结果表明电导率与黏粒含量、含水率和孔隙比呈正相关, 与干密度呈负相关, 而与粉粒含量相关性不大。白武明等<sup>[12]</sup> 研究了高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征, 得到了在升温至岩石内部出现熔融电阻率有几个量级的增加。吴献等<sup>[13]</sup> 对石墨混凝土棱柱体试件进行了轴心受压全过程试验, 得到电阻率与变形模量一样, 可以很好地反映材料的损伤状况及破坏过程。董晓强等<sup>[14]</sup> 研究了硫酸侵蚀下水泥土的电阻率特性, 提出了利用电阻率来评价侵蚀程度的方法。

Allan J. Delaney<sup>[15]</sup> 对石油储存库场区的冻结细粒土进行了室内电阻率试验, 表明冻土中残余石油越多, 冻土电阻率越高。目前对冻土的电阻率研究还处于起步阶段, 对于冻土的电阻率-力学特性研究更是一片空白。本文基于对冻土单轴压缩应力-应变-电阻率全过程监测结果, 研究了冻土的导电

特性以及在压缩过程中导电机敏特性, 从导电性方面探讨冻土的导电机制。

## 2 试件制备与试验方案选择

### 2.1 冻土应力-应变-电阻率测试系统

#### 2.1.1 电极的选择与制作

电极的选择与制作对冻土的导电性能和机敏性能测试有非常重要的影响。导电混凝土的电极的制作方法目前主要利用导电胶外贴石墨布或铜导线, 预埋碳棒或粗铜线和预埋不锈钢片或不锈钢网等。考虑到本试验中试件本身的电阻较小, 为了尽量减少接触电阻带来的影响, 而又尽可能地减少电极对试件本身强度的影响, 本试验选用 0.3 mm 厚的薄铜板作为电极, 电极尺寸直径为 61.8 mm, 极板上间隔 5 mm 开设直径为 2 mm 小孔, 以增强电极与冻土之间的连接性能。

#### 2.1.2 电阻率测试装置与力学加载设备

电阻率通过图 1 所示装置, 测出电流垂直通过边长为单位长度立方体冻土时所观测的电阻的大小, 电路图如图 2 所示。测出土样两端的电压和通过土样的电流即可用下式计算出冻土的电阻率:

$$\rho = \frac{\pi U D^2}{4 I L} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为电阻率 ( $\Omega \cdot m$ );  $U$  为土样两端电压 (V);  $I$  为通过土样的电流 (A);  $L$  为土样的长度 (m)。

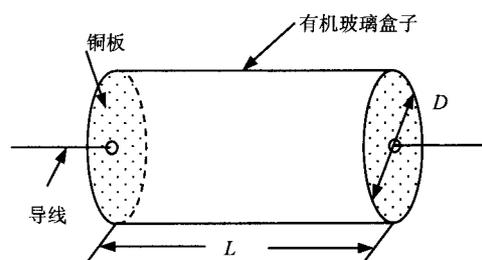


图 1 电阻率测试装置示意图

Fig.1 Sketch map of resistivity testing apparatus

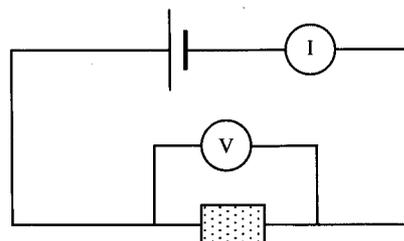


图 2 电阻率测试电路图

Fig.2 Circuit diagram of resistivity test

本次试验中去掉了有机玻璃盒(图1),将冻结土样放置在两铜板之间,安装在中国科学院冻土工程国家重点实验室css-1120型冻土单轴电子万能试验机上,作为电阻率试验装置。改进后可以同步观测单轴压缩时冻土应力-应变-电阻率变化全过程。

2.1.3 数据采集系统

用 datataker 的 DT500 数据采集仪采集电流值,精度为 0.001 mA。试验过程中应变控制加载,加载速率  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ mm/min}$ , 每间隔 1 s 采集电流值、压力及位移值。

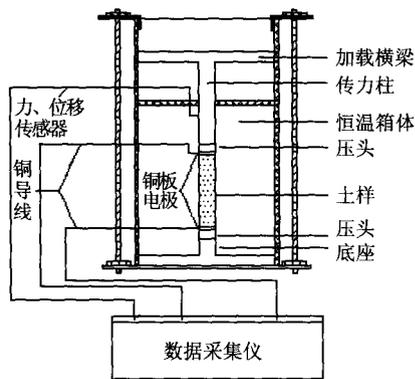


图3 单轴荷载下冻土应力-应变-电阻率测试系统示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the experimental system for stress, strain and electrical resistivity of frozen soil under uniaxial compression

2.2 土样的制备与养护

试验土样取自青藏铁路北麓段的路基填土,为便于准确地控制试验条件,对原始土样进行了筛分、风干、碾磨,剔除大于 2 mm 部分,其物性指标见表 1。

表 1 土的基本物理指标

Table 1 Physical parameters of the soil used in this study

土样名称	$G_s / (\text{g/cm}^3)$	$w_L / \%$	$w_p / \%$	$C_u$	$C_c$
粉质黏土	2.649	24.8	11.4	10.0	2.8

注:表中符号意义与文献[16]同。

粒径级配累积曲线如图 4 所示,其不均匀系数

为 10.0,曲率系数为 2.8,属级配良好的土。为了保持土样中各离子的种类,试验用水为蒸馏水,蒸馏水电阻率为  $12.5 \sim 13.1 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$ 。

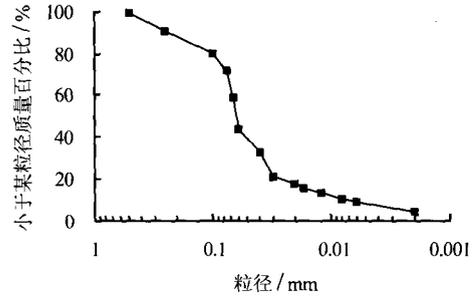


图 4 试样原始级配曲线  
Fig.4 Grain distribution of original specimen

按照《土工试验方法标准》<sup>[16]</sup>制作不同干密度直径为 61.8 mm、高 125 mm 试样,将两端放置压头的试样置于橡皮膜中密封后放入分样器,放在专用冰箱中冻结 48 h,移至恒温箱中按照预定的负温恒温冻结 24 h,每组试验制备 3 个平行试样。

试验前,将 css-1120 型冻土单轴试验机上温控箱设定到预定温度恒温 2 h。试验中,为减少试验误差增加电极与土样之间的黏结导电程度,在铜板电极上应充分涂抹导电胶水。

3 试验成果与分析

相同加载速率、相同初始含水率、干密度的冻土单轴压缩全过程的电阻率曲线表明,温度对导电性有较大影响。本文选取最大切线模量  $E_m$  对应的应力  $\sigma_m$ 、电阻率  $\rho_m$  和应变  $\epsilon_m$ 、峰值应力  $\sigma_m$  对应的应变  $\epsilon_m$ 、电阻率  $\rho_m$  以及初始电阻率  $\rho_0$  为特征量来讨论冻土导电性能及其压敏性能随温度变化特性,进而探讨冻土的导电机理。图 5 为含水率为 17.8%、干密度  $1.71 \text{ g/cm}^3$ 、温度为  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  时,电阻率-应力-应变及切线模量全过程对比曲线。表 2 为试验得到的不同温度下初始电阻率及峰值应力对应的应变、电阻率、最大切线模量对应的应力、电阻率和应变。

表 2 不同温度单轴荷载下电阻率-应力-应变关系试验结果

Table 2 Results of electrical resistivity-stress-strain experiment under uniaxial compressing at different temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	$\rho_0 / (\Omega \cdot \text{m})$	$\rho_m / (\Omega \cdot \text{m})$	$\rho_m / (\Omega \cdot \text{m})$	$\sigma_m / \text{MPa}$	$\sigma_m / \text{MPa}$	$\epsilon_m / \%$	$\epsilon_m / \%$	$E_m / \text{MPa}$
-5	207.907	224.874	205.569	2.918	0.865	4.428	0.788	1.666
-10	392.269	426.522	352.058	4.421	1.461	5.777	1.248	2.360
-15	1 610.740	1 648.826	1 479.966	6.221	2.820	5.898	1.538	3.932
-20	2 222.625	2 478.471	2 201.391	6.709	2.601	5.749	1.389	4.599
-25	6 369.024	6 787.172	6 170.426	8.129	2.448	5.011	1.158	6.105

注:  $\rho_0$  为初始电阻率;  $\sigma_m$  为峰值应力;  $\epsilon_m$ 、 $\rho_m$  为  $\sigma_m$  对应的应变和电阻率;  $E_m$  为最大切线模量;  $\sigma_m$ 、 $\rho_m$ 、 $\epsilon_m$  为  $E_m$  对应的应力,电阻率和应变。

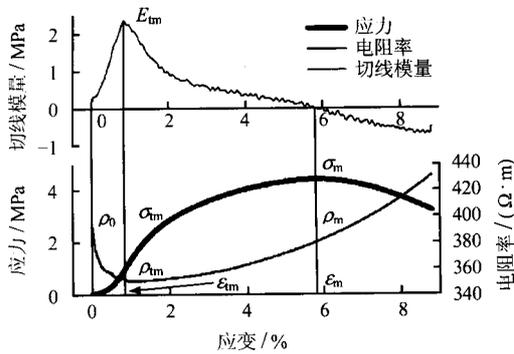


图5 冻土单轴载荷下电阻率-应力-应变与切线模量全过程曲线

Fig.5 Electric resistivity-stress-strain curves and tangent modulus of frozen soil during the whole process of axial compression

### 3.1 温度对冻土导电性能的影响

电阻率的大小是试样含水率、含盐量、矿物含量、胶结程度等多因素的函数，对应冻土这种特殊土来说，温度直接影响着未冻水含量，进而影响到导电离子的活跃程度，从而影响到冻土的电阻率。图 6 为  $\rho_0$ 、 $\rho_m$ 、 $\rho_{tm}$  随温度的变化曲线。

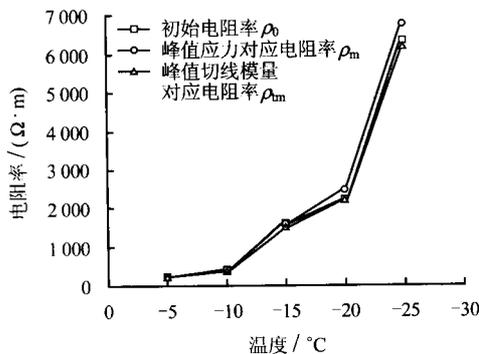


图6  $\rho_0$ 、 $\rho_{tm}$ 、 $\rho_m$  随温度变化关系曲线

Fig.6 Relationship between  $\rho_0$ ,  $\rho_{tm}$ ,  $\rho_m$  and temperature

从试验结果得知：

①  $\rho_0$ 、 $\rho_m$ 、 $\rho_{tm}$  均随温度的降低而增大。温度在  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间变化  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时， $\rho_0$  变化  $140.3\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ， $\rho_m$  变化  $142.4\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ， $\rho_{tm}$  变化  $127.4\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ，而温度在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  过程中变化  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时， $\rho_0$  变化量为  $475.8\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ， $\rho_m$  变化  $513.8\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ， $\rho_{tm}$  变化  $469.0\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ，分别是前者的 3.4、3.6、3.7 倍。由此可见， $\rho_0$ 、 $\rho_m$ 、 $\rho_{tm}$  都是从  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  开始，对温度的敏感性开始显著增大。

② 从不同温度下  $\rho_0$ 、 $\rho_m$ 、 $\rho_{tm}$  变化的一致性充分说明，可以定量地用初始电阻率  $\rho_0$  方便快捷地获取冻土单轴抗压强度  $q_u$ ，同时为电阻率手段研究冻土破裂全过程细观力学提供了保证。

③ 由图 4 可见，3 个电阻率关系为  $\rho_m > \rho_0 >$

$\rho_{tm}$ ，表明冻土在单轴载荷下经历了先压密，再产生微裂缝、裂缝扩展导致破坏。

### 3.2 基于电阻率的冻土单轴受压机敏性能分析

图 7 为不同温度下冻土单轴应力-电阻率-应变及切线模量全过程对比曲线。冻土的导电性会随外加载荷的变化而变化，这种性质就是冻土的压敏性。这种特性可以通过观测电阻的变化反映出冻土受力状况。图 8 为冻土应力与电阻率关系曲线。从图 7、8 可见，随着压力增大，电阻率的变化存在电阻减小区、平衡区和剧增区，分别对应于试块内原有缺陷裂纹的闭合张开、新裂纹的产生和裂纹扩展破坏 3 个阶段：

① 电阻率减小区 (AB 段)：当应力较小时，电阻率随压应力的增大而变小，压应力从  $0\text{ MPa}$  增加到  $0.96\text{ MPa}$ ，电阻率从  $392.3\text{ }\Omega\cdot\text{m}$  减小到  $352.1\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。其原因是试件原有的孔隙或微裂隙逐渐闭合，冻土被压密，土颗粒、冰颗粒之间距离减小，改善了导电环境。 $\sigma-\varepsilon$  曲线呈上凹型，形成了早期的非线性变形。

② 电阻率平衡区 (BC 段)：随着压应力的增加，电阻率几乎没有改变，压应力从  $0.96\text{ MPa}$  增加到  $1.69\text{ MPa}$ ，电阻率从  $352.06\text{ }\Omega\cdot\text{m}$  变化到  $352.65\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。这一阶段在冻土在压力作用下电阻处于动态平衡中，随压应力增大试样出现新的损伤产生新的微裂缝，使电阻率增加。与此同时，在压应力作用下原有的初始微裂缝和初始损伤也在闭合，使得电阻率减小。这两种作用相当，此阶段电阻率基本上没有变化。

③ 电阻率剧增区 (CD 段)：当压应力较大时，冻土试样进入非稳定破裂发展阶段，微破裂的发展出现了质的变化，破裂不断发展，直至试件完全破坏，试件由体积压缩转为扩容，轴应变迅速增大。破裂的不断发展，裂缝逐步加大，土颗粒之间距离加大，破坏了导电网络，电阻就迅速增加。

### 3.3 基于最大切线模量的冻土温度机敏性能分析

冻土即使在相同初始含水率、相同干密度、相同加载速率条件下，不同温度对其物理力学性质有很大的影响。随着温度降低未冻水逐步转化为冰晶，土颗粒之间胶结性增强，强度提高，脆性增加。图 7 为不同温度下冻土应力-应变-电阻率-切线模量关系曲线，表 2 为试验得到的  $E_m$ 、 $\sigma_m$ 、 $\varepsilon_m$ 、 $\sigma_{tm}$ 、 $\varepsilon_{tm}$  值。本文以最大切线模量  $E_m$ 、不同温度下冻土峰值强度  $\sigma_m$  及峰值强度对应的应变  $\varepsilon_m$ ， $E_m$  对应的  $\sigma_{tm}$  和  $\varepsilon_{tm}$  为标准讨论冻土不同温度下的机敏性。

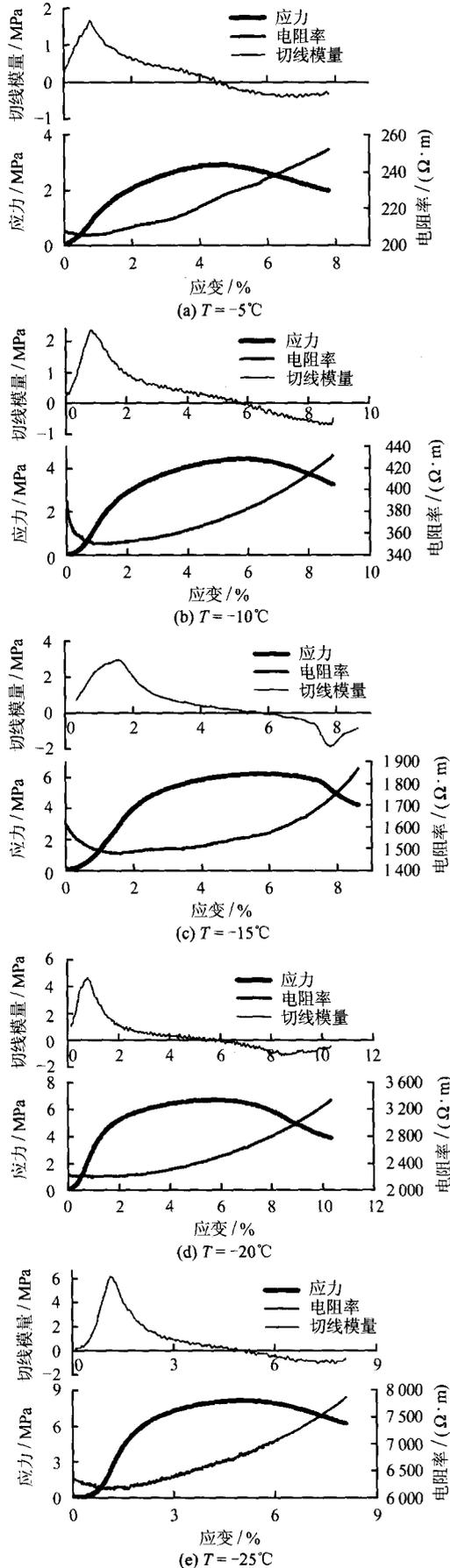


图7 不同温度下冻土单轴应力-应变-电阻率-切线模量关系曲线

Fig.7 Stress-strain curves, resistivity-strain and tangent modulus-strain curves of frozen soil during the whole process of uniaxial compression under different temperatures

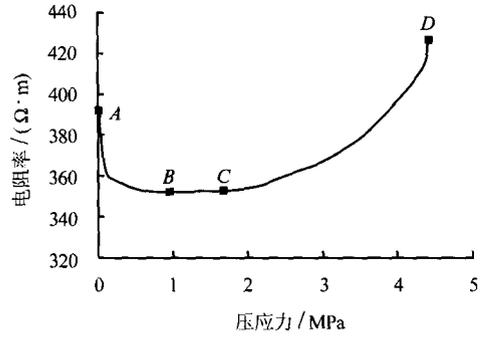


图8 冻土应力与电阻率关系曲线  
Fig.8 Relationship between compressive stress and electric resistivity

3.3.1 切线模量与最大切线模量的物理含义

切线模量指的是在  $\sigma - \epsilon$  曲线上任意一点切线的斜率，记为下式：

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (2)$$

式中： $E_t$ 、 $\sigma$ 、 $\epsilon$  分别为切线模量、应力、应变。

冻土的切线模量反映了冻土的变形特性。由图 5 可知，在冻土单轴压缩全过程中切线模量先增大后减小，此过程恰好对应于冻土的压密、弹性变形、屈服破坏阶段。由图 5 还可以看出，冻土在较低的应力水平下，冻土试件中孔隙或微裂隙逐渐闭合，冻土被压密；电阻率逐步下降，导电性增强；切线模量逐渐增至最大切线模量  $E_m$ 。最大切线模量  $E_m$  的物理含义是指冻土压密变形结束和线弹性变形开始，其对应的  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$  则分别表示冻土初始微裂隙完全闭合时的压应力和应变。

3.3.2 最大切线模量与温度  $T$  关系特征

图 9 描述出了冻土最大切线模量随温度变化实测曲线和拟合曲线。

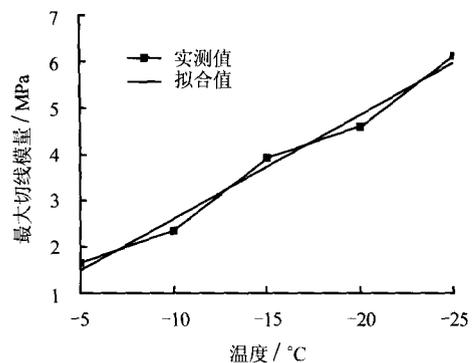


图9 冻土最大切线模量与温度关系曲线

Fig.9 Relationship between the largest tangent modulus of frozen soil and temperature

从实测值可看出，冻土试样的最大切线模量随

温度降低而增大。对比拟合曲线和实测值，冻土的最大切线模量与温度间满足：

$$E_{tm} = 0.397 + 0.222|T| \quad (3)$$

式中： $E_{tm}$  为冻土单轴抗压最大切线模量 (MPa)； $T$  为试样所处的负温 ( $^{\circ}\text{C}$ )，相关系数  $R = 0.97$ 。

### 3.3.3 $\sigma_{tm}$ 、 $\sigma_m$ 与温度 $T$ 关系特征

图 10 为通过试验数据分析出的  $\sigma_m - T$  和  $\sigma_{tm} - T$  曲线。 $\sigma_m$  随温度降低而增大，是由于温度降低未冻水含量减小，冰晶含量增加，增强了土颗粒之间的咬合力和胶结性。随温度降低， $\sigma_m$  先增大后减小，在  $T = -15^{\circ}\text{C}$  时  $\sigma_m$  最大。温度从  $-5^{\circ}\text{C}$  降至  $-15^{\circ}\text{C}$ ， $\sigma_m$  由 0.865 MPa 增至 2.82 MPa，但当温度继续降低到  $-25^{\circ}\text{C}$  时， $\sigma_m$  反而降低到 2.448 MPa。当  $T > -15^{\circ}\text{C}$  时，微裂隙主要是土颗粒之间形成的孔隙或裂隙，冰晶的增加增强了胶结性，闭合微裂隙需要更大的外力；当  $T < -15^{\circ}\text{C}$  时，温度进一步降低，冰晶的含量增加，冰饱和度提高，微裂隙主要是土颗粒与冰晶或冰晶之间的裂隙，这种接触使得冰晶局部应力集中，冰晶发生晶体滑移而闭合，冰饱和度越高，这种现象越明显，因此  $\sigma_m$  降低。

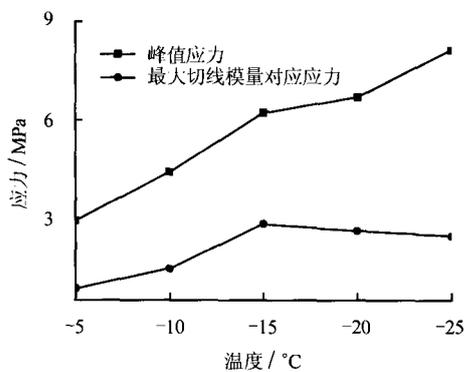


图 10  $\sigma_m$ 、 $\sigma_{tm}$  与温度  $T$  关系曲线  
Fig.10 Relationships between  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{tm}$  and  $T$

### 3.3.4 最大切线模量对应的应变、峰值应力对应的应变与温度关系特征

对不同温度下冻土单轴压缩电阻率试验成果分析，可得到不同温度下的峰值应力对应的应变  $\epsilon_m$  和最大切线模量对应的应变  $\epsilon_{tm}$ ，如图 11 所示。通过分析可以看出， $T = -15^{\circ}\text{C}$  时冻土峰值应力对应的应变和最大切线模量对应的应变均是最大的；当  $T > -15^{\circ}\text{C}$  时， $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_{tm}$  随温度降低而增加；当  $T < -15^{\circ}\text{C}$  时， $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_{tm}$  随温度降低而减小，曲线呈上凸型。

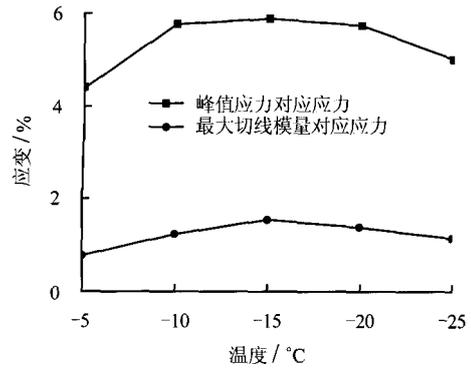


图 11 不同温度下的  $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_{tm}$  与  $T$  关系曲线  
Fig.11 Relationships between  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_{tm}$  and  $T$

## 4 结 论

通过对冻土在不同温度下进行单轴压缩和电阻率试验，获取应力-应变-电阻率与最大切线模量全过程曲线，探讨了冻土的导电特性，分析了冻土机敏性能，得出以下几点结论：

(1) 不同温度下峰值应力对应电阻率  $\rho_m$ 、初始电阻率  $\rho_0$ 、最大切线模量对应电阻率  $\rho_{tm}$  都随温度降低而增大，这种变化趋势的一致性使得用电阻率研究冻土细观力学更行之有效。

(2) 冻土具有较强的压敏性能，随着压应力增大，电阻率变化可分为电阻率减小区、平衡区和剧增区。

(3) 不同温度下冻土的最大切线模量与温度之间呈线性关系，随着负温降低冻土的最大刚度逐渐增加。

(4) 当  $T = -15^{\circ}\text{C}$  时， $\sigma_m$ 、 $\epsilon_{tm}$ 、 $\epsilon_m$  值最小；当  $T > -15^{\circ}\text{C}$  时， $\sigma_m$ 、 $\epsilon_{tm}$ 、 $\epsilon_m$  值随  $T$  降低而增大，冻土随温度降低延性增强脆性减弱；当  $T < -15^{\circ}\text{C}$  时， $\sigma_m$ 、 $\epsilon_{tm}$ 、 $\epsilon_m$  值随  $T$  降低而增大，冻土随温度降低脆性增强延性减弱。

致谢：中国科学院冻土工程国家重点实验室王贵荣主任、彭万魏高工对本次试验及设备给予了大力协助，在此深表感谢。

## 参 考 文 献

[1] ARCHIE G E. The electric resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering*, 1942, 14(6): 54-61.

[2] ARULANANDAN K, MURALEETHARAN K K. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties, Part II[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1988, 114(7): 771-790.

- [3] WAXMAN M H, SMITH L J M. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand[J]. **Society of Petroleum Engineers Journal**, 1968, 65(5): 1577—1584.
- [4] SENOS MATIAS M J. Square array anisotropy measurements and resistivity sounding interpretation[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2002, 49(3): 185—194.
- [5] JACKSON P D, NORTHMORE K J, MELDRUM P I, et al. Non-invasive moisture monitoring within an earth embankment—A precursor to failure[J]. **Independent Nondestructive Testing and Evaluation International**, 2002, 35(2): 107—115.
- [6] SEATON W J, BURBEY T J. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2002, 51(1): 21—41.
- [7] ETIENNE R, DENIS J, PHILIPPE G, et al. Characterization of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2006, 58(3): 188—201.
- [8] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(3): 393—396.  
YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Researches on application of electrical resistivity indices to the micro structure of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 393—396.
- [9] 于小军, 刘松玉. 电阻率测试技术在水泥土深层搅拌法工程中的应用研究[J]. **岩土力学**, 2003, 24(4): 592—597.  
YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Researches on application of electrical resistivity method to cement deep mixing pile engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24 (4): 592—597.
- [10] 缪林昌, 刘松玉, 严明良, 等. 水泥土的电阻率特性研究[J]. **工程勘察**, 2001, 3(12): 30—36.
- [11] 房纯纲, 贾永梅, 周晓文, 等. 汉江遥堤电导率与土性参数相关关系试验研究[J]. **水利学报**, 2003, (6): 119—123.  
FANG Chun-gang, JIA Yong-mei, ZHOU Xiao-wen, et al. Co-relationship between conductivity and geotechnical parameters of Yaodi dike of the Hanjiang river[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (6): 119—123.
- [12] 白武明, 马麦宁, 柳江琳. 地壳岩石波速和电导率试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(增): 899—904.  
BAI Wu-ming, MA Mai-ning, LIU Jian-lin. Testing study on elastic wave velocities and electrical conductivity of crustal rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 899—904.
- [13] 吴献, 吴勃, 田军, 等. 石墨混凝土应变与电导率关系的理论分析[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2005, 26(5): 492—495.  
WU Xian, WU Bo, TIAN Jun. Theoretical analysis of relation between strain and electrical conductivity of graphite concrete[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2005, 26(5): 492—495.
- [14] 董晓强, 白晓红, 赵永强, 等. 硫酸侵蚀下水泥土的电阻率特性研究[J]. **岩土力学**, 2007, 28(7): 1453—1458.
- [15] DELANEY A J, PEAPPLES P R, ARCONE S A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2001, 32(2-3): 107—119.
- [16] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.