文章编号：1000－7598－(2009) 01－0073－06

不同温度下冻土单轴抗压强度与电阻率关系研究

付　伟[1]，汪　稔[1]，胡明鉴[1]，向焱红[2]

（1.中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉 430071；2.武汉福德(香港)路桥管理有限公司，武汉 430000）

摘　要：为了研究青藏铁路路基在载荷下的力学行为，探索新型手段快速准确地估计冻土的单轴抗压强度参数，采用北麓河粉质黏土在室内进行了不同温度的冻土单轴压缩试验，并全过程监测土样电阻率的变化，得到了冻土的应力-应变-电阻率全过程曲线。试验结果表明，在干密度 $\rho_d = 1.71$ g/cm^3 且含水率 $w = 17.83$ %下，冻土的单轴抗压强度随温度降低而线性增加；初始电阻率 ρ_0 随温度降低逐渐增大，从−20℃对温度的敏感性开始显著增强；冻土单轴抗压强度与初始电阻率之间满足半对数线性关系，相关性很好，因此测定初始电阻率可准确估算冻土的 q_u。从应力-应变-电阻率全过程曲线来看，冻土在单轴载荷作用下经历的压密、弹性变形、塑性屈服、破裂后各阶段对应电阻率变化趋势是快速减小至最小、稳定增加、剧烈增加，这种关联的变化关系也说明用电阻率法来研究冻土强度及载荷下的变形问题是可行的。

关　键　词：冻土；单轴压缩强度；电阻率；应力-应变-电阻率；温度；青藏铁路

中图分类号：TU 445　　**文献标识码：**A

Study of relationship between uniaxial compressive strength and electrical resistivity of frozen soil under different temperatures

FU Wei[1],　WANG Ren[1],　HU Ming-jian[1],　XIANG Yan-hong[2]

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Wuhan Fude(Hong Kong) Road & Bridge Management Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to study the mechanical behaviour of frozen soil under the roadbed of the Qinghai-Tibet Railway and explore a new method to estimate the uniaxial compressive strength quickly and correctly, the stress-strain-electrical resistivity experiments for the clay in Beilu River are done under different temperatures during the whole process of uniaxial compression. The complete testing data for the stress -strain curve and the associated electrical resistivity -strain curve are obtained. The experimental results indicate that the uniaxial compressive strength q_u increases with decrement of the temperature T, and they follow the linear relationship. The initial electrical resistivity ρ_0 rises while the temperature decreases; however, initial electrical resistivity increases sharply with increment of T when $T > -20$ ℃. The relationship between uniaxial compressive strength and the initial electrical resistivity can be described as linear Semi-logarithmic equation , whose correlation coefficient is very high, so q_u can be quickly and correctly estimated by ρ_0 which can be measured more conveniently. The stress-strain curve can be separated into compression stage, elastic stage, plastic flow stage, break-up stage corresponding to decreasing fast stage, decreasing to minimum stage, steady increasing stage, unsteady increasing stage in resistivity-strain curve. This associated relationship indicates that the strength and displacement problem can be effectively solved by the electrical resistivity method.

Key words: frozen soil; uniaxial compressive strength; electrical resistivity; stress-strain-electrical resistivity; temperature; Qinghai-Tibet Railway

1　引　言

电阻率的大小取决于土的孔隙度、饱和度、孔隙液电阻率、土体矿物成分、土颗粒形状、定向性和胶结状态等[1−2]。Archie[1]（1942 年）利用土的电阻率来研究饱和无黏性土的微结构特性，并提出了 Archie 模型。Waxman 等[3]（1968 年）提出了适用于非饱和黏性土的电阻率模型。Mccarter[4]（1984 年）、Abu-Hassanein 等[5]（1996 年）系统地研究了击实土的电阻率特性，总结出击实土电阻率随含水

收稿日期：2008-02-26
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。
作者简介：付伟，男，1981 年生，博士研究生，从事岩土工程与人工冻结技术研究。E-mail:fwwhrsm@126.com

率、饱和度、渗透性的变化规律。Yoon 等[6−7]研究了砂土和非饱和黏土在受污染情况下的电阻率的变化规律以及影响电阻率的要素。Etienne Rey 等[8]研究了各向异性巨粒土中粗颗粒含量与其电阻率关系，有效地估计了巨粒土中砾石的含量。

国内，刘松玉等[9−10]（2000 年）首先研究了水泥土的电阻率变化规律，并在现场粉喷桩工程质量检测方面进行了初步应用，表明水泥土的电阻率与其水泥含量、无侧限抗压强度呈正相关关系。于小军等[11]利用土体电阻率指标来研究膨胀土的结构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，同时探索了应用电阻率结构特性指标预测膨胀量的可行性。房纯纲等[12]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[13]研究了地壳岩石在高温高压条件下纵波速度与电阻率变化特征得到了在升温至岩石内部出现熔融波速下降电阻率则有几个量级的增加。吴献等[14]对石墨混凝土棱柱体试件进行了轴心受压全过程试验，得到电阻率这个材料的本征量与变形模量一样，很好地反映材料的损伤状况及破坏过程。一系列研究表明，对土电阻率性质的研究可以很好地反映土的力学性质，是从土体的另外一个固有属性方面对土的结构性和力学性质进行研究。

但是，目前对土的电阻率研究还处于起步阶段，对于冻土的电阻率特性研究更是一片空白。本文定量地探讨冻土单轴抗压强度与其电阻率关系，建立了由地球物理参数向岩土工程力学参数转化的基本依据，提高地球物理探测结果的解释精度和可利用性。

2 试验方案

2.1 电阻率测定的理论依据

土的电阻率是土的固有属性之一，通过测定通过土样的电流 I 和土样两端的电压 U 的变化，根据电阻率定义：

$$\rho = \frac{US}{IL} \tag{1}$$

就可以得到冻土的电阻率。式中：ρ 为电阻率（Ω·m）；U 为电压（V）；S 为土样的横截面积（m^2）；I 通过土样的电流（A）；L 为两电极之间的距离（m）。

2.2 试验仪器与数据采集系统

2.2.1 仪器设备

本次试验是在中国科学院冻土工程国家重点实验室自行改装的 css-1120 型冻土单轴电子万能试验机上完成。土的电阻率室内试验装置有 Miller Soil Box 和圆形 4 电极电阻率测试装置（circular four probe resistivity cells）两种。圆形 4 电极电阻率测试装置稍复杂，且测得的视电阻率需换算才能得到土的真实电阻率。笔者对 Miller Soil Box 进行了适当改进，并安装在 css-1120 型冻土单轴电子万能试验机上，作为电阻率试验装置，观测冻土单轴压缩全过程的电阻率变化曲线。

2.2.2 数据采集系统

整个试验是在直流稳压电源恒定的电压（10 V）下进行，用澳大利亚 datataker 公司的 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 $\dot{\varepsilon} = 1\ \mathrm{mm/min}$，每间隔 1 s 采集电流值、压力及位移值。图 1 为系统示意图。

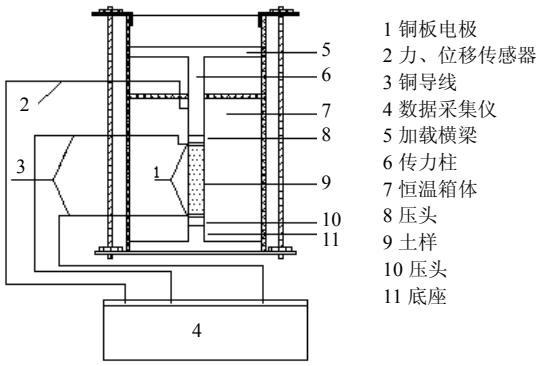

图 1 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

2.3 土样的制备与养护

2.3.1 试验材料

试验土样取自青藏铁路北麓段（Dk114+882）的路基填土，为暗红色，土样干燥。为便于控制试验条件和结果的分析，对原始土样进行了筛分、风干、碾磨，除掉大于 2 mm 颗粒，保留 2 mm 以下的所有部分，作为本次试验土样，其物性指标见表 1，粒径级配累积曲线如图 2 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。试验用水为蒸馏水，以保持土样中各离子的种类，蒸馏水电阻率为 12.5～13.1 MΩ·m 。

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 / (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

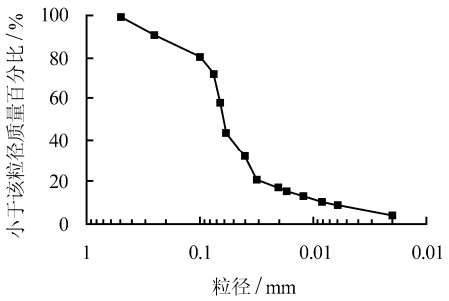

图 2　试样原始级配曲线

Fig.2　Grain distribution of original specimen

2.3.2　试样的制备与养护

按照《土工试验方法标准》[15]称取试验所需土量，根据试验含水率确定加水量，土水充分拌匀后盛入保湿缸内，润湿一个昼夜，确保润湿土样不同位置含水率差值符合规范要求。按照不同干密度要求分层击实成($\phi\times h$) 61.8 mm×125 mm 试样。将试样两端放置压头。为了防止土样在冻结过程中含水率和试样尺寸变化，必须将土样置于橡皮膜中，密封后放入分样器中，再放在专用冰箱中冻结 48 h 后移至恒温箱中，按照预定的负温恒温冻结 24 h。考虑到土样的离散性，每组相同的含水率、干密度、温度条件下制备 3 个平行土样。

试验时，先将 css-1120 型冻土单轴试验机上温控箱设定到预定温度并恒温 2 h，然后将冻结养护好的土样迅速移至压力机压头上进行试验。为减少试验误差，增加电极与土样之间的黏结导电程度，则在铜板电极上应充分涂抹导电胶水。

3　试验成果与分析

试验得到了在相同初始含水率、干密度、不同温度下冻土单轴压缩全过程电阻率-应力-应变关系曲线。图 3 为含水率为 17.8 %、干密度为 1.71 g/cm^3、温度为 – 10 ℃时的电阻率-应力-应变关系曲线。表 2 为试验得到的不同温度下初始电阻率 ρ_0 及单轴抗压强度 q_u 值。本文以应变 $\varepsilon=0$ 时的初始电阻率 ρ_0 和单轴抗压强度 q_u 为标准讨论各因素对电阻率和强度的影响。

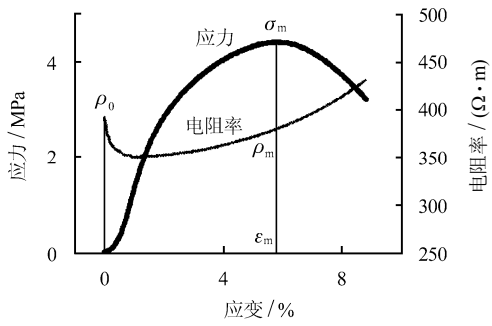

图 3　典型的电阻率-应力-应变关系

Fig.3　Typical strain-stress-electric resistivity curve

表 2　不同温度单轴载荷下电阻率试验结果

Table 2　Results of electric resistivity under uniaxial compressing at different temperatures

温度 / ℃	初始电阻率 / (Ω · m)	单轴抗压强度 / MPa	峰值强度对应电阻率 / (Ω · m)
-5	207.907	2.918	224.874
-10	392.269	4.421	426.522
-15	1 610.740	6.221	1 568.826
-20	2 222.625	6.709	2 478.471
-25	6 369.024	8.129	6 787.172

3.1　应力-应变-电阻率全过程曲线关系特征

在相同含水率为 17.8 %、干密度为 1.71 g/ cm^3 和不同温度下（T = – 5、– 10、– 15、– 20 ℃和 – 25℃）冻土单轴应力-应变-电阻率全过程曲线如图 4 所示。不难看出，北麓河冻土在 – 5 ℃到 – 25 ℃范围内应力-应变曲线都有明显的峰值，呈应变软化特性，电阻率都经历了先减小再增大的过程。这是因为冻土在单轴载荷作用下经历了压密、弹性变形、塑性屈服、破裂后阶段，诸阶段对应电阻率变化趋势是快速减小至最小、稳定增加、剧烈增加，这样一个很好的同步变化为应用电阻率法来研究冻土强度问题以及冻土在载荷作用下变形的宏观、细观分析问题都提供了方便。

3.2　不同负温下冻土单轴抗压强度特征

图 5 为冻土单轴抗压强度 q_u 随负温 T 的变化实测和拟合曲线。从实测值可以看出，冻土的抗压强度随着温度的降低而增大，从 – 5 ℃到 – 25 ℃范围内温度每降低 1 ℃强度平均增加 0.254 MPa。从拟合值与实测值的对比中发现，青藏线北麓河冻土的单轴抗压强度与温度间满足：

$$q_u = 1.867 + 0.254|T| \qquad (2)$$

式中：q_u 为单轴抗压强度（MPa）；T 为试样所处的负温（℃）。相关系数为 $R=0.99$。

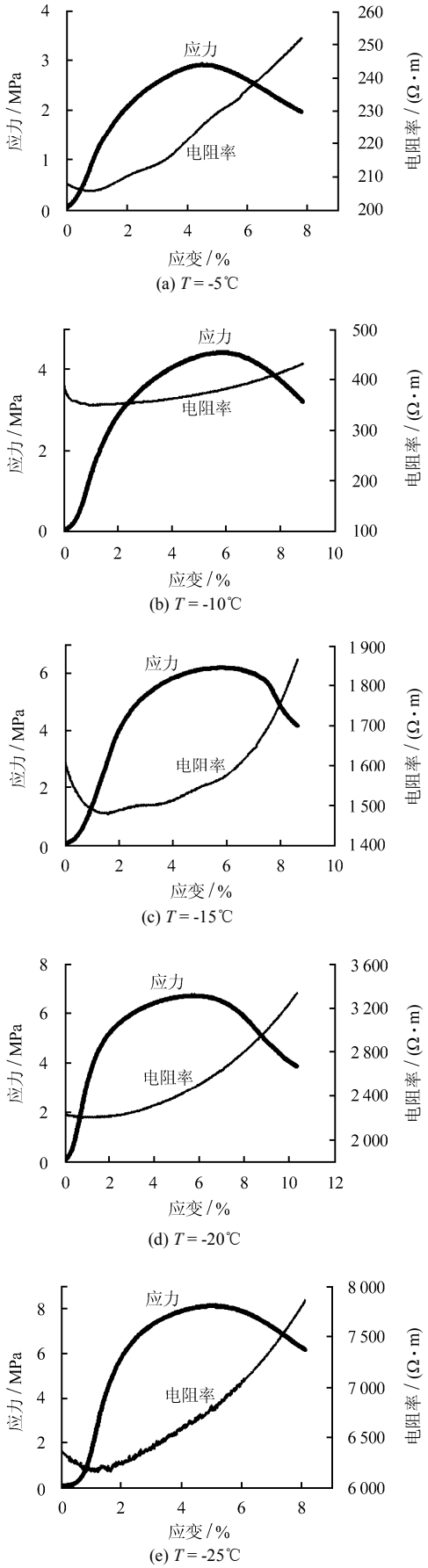

图 4 不同温度下冻土单轴应力-应变-电阻率关系曲线

Fig.4 Stress-strain curves and resistivity-strain curves of frozen soil during the whole process of uniaxial compression under different temperatures

由于所有的试样的干密度和含水率都相同，不同的负温对应的仅仅是土样的未冻水含量不同，冻土随负温降低强度提高的本质是土中未冻水减少，孔隙水减少，冰晶增多，冰土混合物强度的提高，同时由于冰晶的胶结作用使得土体强度提高。

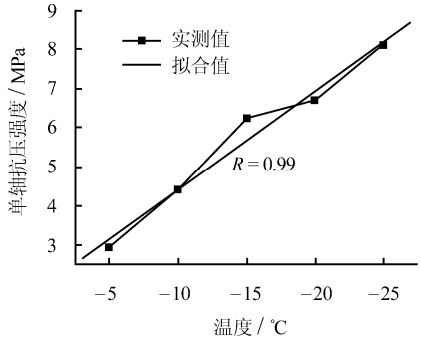

图 5 冻土单轴抗压强度与温度关系曲线

Fig.5 Relationship between uniaxial compressive strength and temperature

3.3 初始电阻率与温度关系特征

在试验过程中初始电阻率 ρ_0 随试验温度不断变化。电阻率是土体的固有属性，初始电阻率的变化是土体内部结构、未冻水含量、胶结程度等因素变化的综合反映。图 6 为初始电阻率随温度的变化曲线。从试验结果得知，－5 ℃下 ρ_0 为 207.91 Ω·m，－20 ℃下 ρ_0 为 2 222.63 Ω·m，－25 ℃下 ρ_0 为 6 369.02 Ω·m，从－5 ℃到－20 ℃温度变化 1 ℃初始电阻率变化 134.3 Ω·m，而从－20℃到－25 ℃过程中温度变化 1 ℃初始电阻率变化量为 829.3 Ω·m，是前者的 6.2 倍。由此可见，初始电阻率从－20 ℃对温度的敏感性开始显著增大。

3.4 初始电阻率与单轴抗压强度关系特征

电阻率和单轴抗压强度都是冻土的固有属性，图 7 为不同温度测得的单轴抗压强度与初始电阻率关系曲线，纵坐标为抗压强度，横坐标为初始电阻率的自然对数坐标。从图中可知，在不同温度下冻土单轴抗压强度与初始电阻率的对数呈线性关系，拟合表达式为

$$q_u = 1.473 \ln \rho_0 - 4.675 \qquad (3)$$

相关系数 $R = 0.994\ 8$。

单轴抗压强度是冻土力学性质中最基本的参数之一，然而要获取冻土的单轴抗压强度并不像获得常温土的抗压强度那样容易，需要在严格的温控环境下试验获得。但在任何负温下测定冻土的电阻率是很容易的，运用式（3）就可以得到单轴抗压强度的估计值，为寒区抢险工程及时提供试验数据。

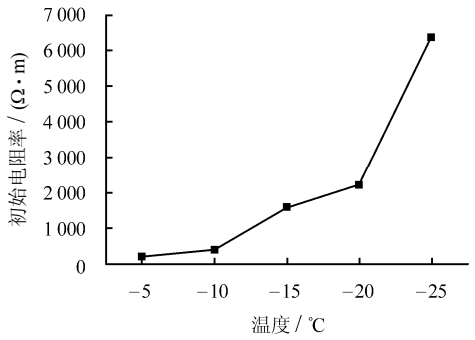

图 6　初始电阻率与温度关系曲线

Fig.6　Relationship between initial resistivity and temperature

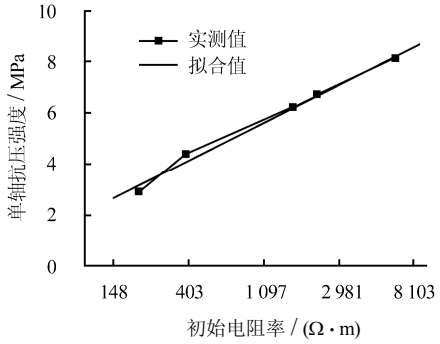

图 7　不同温度下初始电阻率与单轴抗压强度关系曲线

Fig.7　Relationship between initial resistivity and uniaxial compressive strength under different temperatures

4　结　论

通过对青藏线北麓河冻土在不同温度下进行的单轴压缩试验，获取全过程应力-应变-电阻率关系，结合试验成果进行分析，得出以下几点结论：

（1）在单轴载荷作用下冻土经历的压密、弹性变形、塑性屈服、破裂后阶段，诸阶段对应电阻率变化趋势是快速减小至最小、稳定增加、剧烈增加，这种相关联的变化关系为采用应力-应变-电阻率曲线来研究冻土强度问题，以及冻土在载荷作用下变形的宏观、细观分析问题都提供了方便。

（2）北麓河冻土的单轴抗压强度与温度间满足 $q_u = 1.867 + 0.254|T|$ 关系，相关系数为 0.99。冻土随温度降低强度提高的主要原因是未冻水减少、孔隙水减少、冰晶增多、冰土混合物强度提高、冰晶的胶结作用提高的结果。

（3）初始电阻率随温度降低逐渐增大，－20 ℃到－25 ℃阶段的单位温度初始电阻率变化率是－5 ℃到－20 ℃阶段的 6.2 倍，初始电阻率从－20 ℃对温度的敏感性开始显著增强。

（4）冻土单轴抗压强度与初始电阻率之间满足 $q_u = 1.473\ln\rho_0 - 4.675$ 拟合关系，相关系数为 0.994 7，该式可以简单地测定电阻率值来推算冻土的强度值。

（5）电阻率法是研究冻土强度与变形问题行之有效的方法。

致谢：中国科学院冻土工程国家重点实验室闵王贵荣主任、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 M. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties[J]. **Journal of the 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] MCCARTER W J. The electrical resistivity characteristics of compacted clays[J]. **Geotechnique**, 1984, 34(2): 263－267.

[5] ABU-HASSANEIN Z, BENSON C, BLOTZ L. Electrical resistivity of compacted clays[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering**, ASCE, 1996, 122(5): 397－406.

[6] YOON G L, PARK J B. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils[J]. **Journal of Hazardous Materials**, 2001, (B84): 147－161.

[7] YOON G L, OH M H, Park J B. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer[J]. **Environmental Geology**, 2002, 43(6): 18－28.

[8] ETIENNE R, DENIS J, PHILIPPE G, et al. Characterization of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2006, 58: 188－201.

[9] LIU S Y, YU X J, MA X B. The electrical resistivity characteristics of the cemented soil[C]//Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology Conference. Saga: [s. n.], 2000.

[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, 2000, (5): 32－34.
MIAO Lin-chang, LIU Song-yu, YAN Ming-liang, et al. Study of the electrical resistivity properties of cement-mixed soil[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2000, (5): 32－34.

[11] 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.

[12] 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-wei, et al, Corelationship between conductivity and geotechnical parameters of Yaodi dike of the Hanjiang river[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (6): 119－123.

[13] 白武明, 马麦宁, 柳江琳. 地壳岩石波速和电导率实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 899－904.
BAI Wu-ming, MA Mai-ning, LIU Jiang-ling, et al, Testing study on elastic wave velocities and electrical conductivity of crustal rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Suup.): 899－904.

[14] 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, et al, Theoretical analysis of relation between strain and electrical conductivity of graphite concrete[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2005, 26(5): 492－495.

[15] 中华人民共和国水利部. GB/T50123－1999 土的试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

上接第 66 页

[10] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下灰岩破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1465－1473.
FENG Xia-ting, DING Wu-xiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under the coupled stress-hydraulic-chemical environment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2005, 24(9): 1465－1473.

[11] 汤连生, 周萃英. 渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机制[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35(6): 95－100.
TANG Lian-sheng, ZHOU Cui-ying. Analysis on mechanicsm of permeation and hydrochemical action resulting in failure of loaded rock mass[J]. **Acta Sciatiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni**, 1996, 35(6): 95－100.

[12] 简浩, 李术才, 朱维申, 等. 含裂隙水脆性材料单轴压缩CT分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 587－591.
JIAN Hao, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. CT analyses of brittle materials under hydraulic pressure and uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 587－591.

[13] 朱珍德, 胡定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64－67.
ZHU Zhen-de, HU Ding. The effect of interstitial water pressure on rockmass strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 64－67.

[14] 王士民, 朱合华, 冯夏庭, 等. 细观非均匀性对脆性灰岩材料宏观破坏形式的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 224－227.
WANG Shi-ming, ZHU He-hua, FENG Xia-ting. Influence of heterogeneity on macroscopical crack form of the brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 224－227.