

DOI: 10.11779/CJGE202002011

冻融循环对冻土-混凝土界面冻结强度影响的试验研究

何鹏飞^{1, 2, 4}, 马巍^{2, 4}, 穆彦虎^{* 2}, 董建华³, 黄永庭^{2, 4}

(1. 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究冻融循环作用对冻土-混凝土界面冻结强度的影响, 对不同冻融循环次数、法向应力、试验温度及土体初始含水率条件下的冻结界面进行了系列直剪试验, 研究经历冻融循环后界面峰值剪切强度、残余剪切强度及强度参数的变化规律。试验结果表明: 冻融循环对界面剪切应力与水平位移曲线形态影响很小, 经历 20 次循环后曲线仍是应变软化型。冻融循环对峰值剪切应力的影响强于对残余剪切应力的影响, 表明其对界面胶结冰含量产生影响。当土体初始含水率较低且温度较高时, 冻融循环使界面峰值剪切强度增加, 但变化量较小。然而在含水率较高 (20.8%) 及试验温度较低时 (-5℃), 峰值剪切强度随着冻融循环增加而降低。因此在土体含水率较高且冻结温度较低时, 对于发生小变形的冻结界面需要重视冻融循环对峰值剪切应力的影响。不同初始含水率、试验温度下冻融循环对残余剪切强度的影响较小且变化规律不明显。在试验温度为-1℃, -3℃, -5℃时, 峰值黏聚力随冻融循环增加分别表现为增加、波动和下降, 推测是由于界面胶结冰含量不同而引起。峰值摩擦角和残余摩擦角随冻融循环次数增加略有变化。

关键词: 冻土; 冻融循环; 冻结强度; 接触面; 直剪试验

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)02-0299-09

作者简介: 何鹏飞(1989—), 男, 博士研究生, 从事冻土力学与工程方面研究工作。E-mail: hepfl7@163.com。

Experiment study on effects of freeze-thaw cycles on adfreeze strength at frozen soil-concrete interface

HE Peng-fei^{1, 2, 4}, MA Wei^{2, 4}, MU Yan-hu², DONG Jian-hua³, HUANG Yong-ting^{2, 4}

(1. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the effects of freeze-thaw cycles on the adfreeze strength between frozen soil and concrete interface, a series of direct shear tests are conducted with different numbers of freeze-thaw cycles under different normal stresses, test temperatures and initial water contents. The peak shear strength, residual shear strength, shear strength parameters are used to analyze the adfreeze strength at the interface. The test results show that the shear behaviors of the interface are still strain-softening after 20 cycles. The influences of freeze-thaw cycles on the peak shear stress are stronger than those on the residual shear stress, indicating that they have an effect on the content of ice crystal of the interface. When the water content of the soil is low and the test temperature is high, the peak shear strength lightly increases with the increasing cycles, and it decreases obviously at water content of 20.8% and test temperature of -5℃. Therefore, it is necessary to pay attention to the influences of freeze-thaw cycles on the peak shear stress under high water content, low test temperature and small deformation of the structural interface. The cycles have few influences on the residual shear stress. The peak cohesions of the interface increase, become stable and decrease with the increasing cycles at the test temperature of -1℃, -3℃ and -5℃, respectively, which is presumed to be caused by the water migration of the soil near the interface. The peak and residual interface friction angles are influenced slightly by the cycles.

Key words: frozen soil; freeze-thaw cycle; adfreeze strength; interface; direct shear test

53.5%^[1-2]。随着经济建设的不断发展, 在广袤的冻土

0 引言

中国是世界第三冻土大国, 多年冻土分布面积约占陆地总面积的 21.5%, 季节冻土面积更高达

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目 (2017YFC0405101); 国家自然科学基金项目 (41630636, 41772325)

收稿日期: 2019-04-02

***通信作者 (E-mail: muyanhu@lzb.ac.cn)**

地区已建成及拟建大量的交通、能源和水利工程，其中常见的桩基和衬砌等结构中均存在构筑物与土体界面问题。当构筑物受到平行于界面的切向作用力时，界面就会发生相对滑动从而影响构筑物稳定性。例如渠道衬砌在发生滑动后可引起衬砌断裂、接缝开裂等破坏现象，进而导致渗漏增加及渠基垮塌等工程病害。冻土地区地表层均存在冬冻夏融的冻结—融化层，在融化季节，构筑物与土体界面胶结力主要由黏聚力和摩擦力构成，在冻结季节，土体冻结后界面胶结力中增加了冰的胶结作用，从而使得界面对切向作用力的承载能力发生变化^[3]。在冻—融交替过程中，界面承载力不断变化会破坏构筑物原有稳定性，导致构筑物破坏。同时冻—融循环作用还会改变土体的物理力学性质，进一步影响界面的承载力变化。研究表明土体在经历冻结、融化循环过程中，由于内部水分的迁移、冰胶结及融化等作用会改变颗粒间的排列及连接方式，从而影响其原有物理力学性质^[4-5]。Qi等^[6]总结了冻融循环作用对土体物理力学性质的影响，表明随着冻融循环次数增加，松散土密度增大，而密实土则相反，渗透系数增大，土体结构性破坏增加及剪切模量减小。Xie等^[7]对青藏高原土壤物理力学性质研究表明黏聚力和单轴压缩强度随着循环次数增加而减小，尤其在前6次循环。候鑫等^[8]通过三轴试验和压汞试验对硅酸钠固化黄土力学性质进行研究，结果表明冻融循环作用增大平均孔隙直径和降低微孔隙含量，并导致土样产生裂缝。刘晖等^[9]对冻融循环时含砂粉土力学性质研究表明破坏强度和弹性模量随循环次数增加先增大后减小，经历3次循环后达到最大值。Lu等^[10]研究表明水分重新分布对土体力学性质有很大影响，在补水条件下土体力学性质更易达到稳定状态，7次循环后土体破坏强度和弹性模量分别下降85%和92%。

冻土与构筑物界面冻结强度对构筑物的稳定性至关重要，例如在高含冰量冻土中，桩基等结构承载力主要来自于冻土与桩基界面的冻结强度^[10-13]。因此，冻土与构筑物界面冻结强度研究得到了广泛关注。Penner等^[14]研究温度对冻结强度的影响，得到经验冻结强度计算公式。Bondarenko等^[15]对冻土与岩石界面的瞬时冻结强度和长期冻结强度进行试验研究，结果表明温度对界面黏聚力的影响很大，但对界面摩擦角的影响很小。Biggar等^[16]对灌注桩与冻土冻结强度试验表明冻土含盐量和温度使得桩基周围冻土中未冻水含量发生变化，进而影响冻结强度。Ladanyi^[17]研究砂与铝材界面冻结强度表明随着温度降低控制因素由内摩擦角变为黏聚力。吉延俊等^[18]对现浇混凝土与冻土界面冻结强度进行试验表明水化热使界面粗糙度发生变化，

进而影响界面冻结强度。Wen等^[19]对冻土与混凝土和玻璃钢界面剪切试验表明随着试验温度降低和土体初始含水率增加界面冻结强度增大。石泉彬等^[20]通过压桩法测定冻土与钢管接触面冻结强度，结果表明接触面温度和表面粗糙度影响显著。陈拓等^[21]对冻结黏土与钢板接触面开展正交直剪试验，结果表明土体含水率对冻结强度影响最大。孙厚超等^[22]对不同条件时冻土与结构物界面冻结强度研究表明界面冻结强度受冻结温度、法向应力、冻土性质及接触面粗糙度等因素影响。

对冻土—构筑物界面冻结强度的研究已经取得了丰硕的成果，但针对冻融循环作用下冻土与构筑物界面冻结强度变化规律的研究较少。本文通过系列直接剪切试验，研究冻融循环作用对冻土与混凝土界面冻结强度的影响，同时考虑土体初始含水率及试验温度对界面冻结强度的影响。

1 试验材料与试验方法

1.1 试样制备

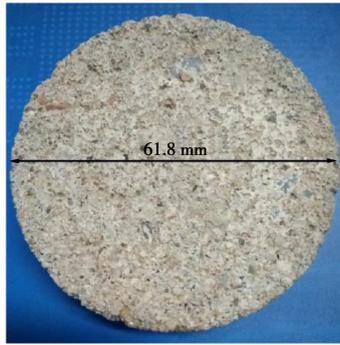
试验所用土料取自甘肃省永登县境内(36° 36' 34" N, 103° 22' 05" E)，采集区在中国湿陷性黄土工程地质图中属于陇西黄土区，处于季节性冻土地区，按照中国冻结作用灾害分布图属于季节冻土灾害区^[28]。土料特征为黄色，褐黄色，有少量虫孔、草根。按照土工试验规程^[29]进行物理性质测试，物理指标见表1，属于低液限黏土。

表1 试验用土物理性质

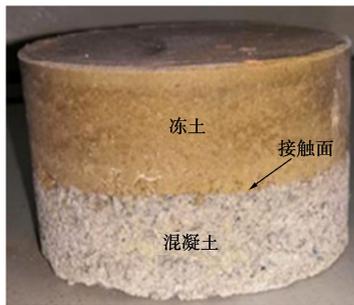
| 液限 /% | 塑限 /% | 土粒相 对密度 | 最大干 密度 (g·cm ⁻³) | 最优 含水 率/% | 粒径分布/% | | | |
|----------|----------|------------|------------------------------------|-----------------|-------------|---------------------|----------------------|--------------|
| | | | | | >0.25 mm | 0.05~ 0.25 mm | 0.005~ 0.05 mm | <0.005 mm |
| 26.29 | 18.24 | 2.7 | 1.912 | 13 | 1.22 | 14.53 | 65.07 | 19.18 |

试样的制备包括混凝土试样制备、土样制备和冻土—混凝土试样制备^[30]。其中混凝土试样制备过程共5步：①使用直径为61.8 mm，高20 mm的环刀作为模具，在环刀内壁均匀涂抹一层凡士林；②使用PO32.5普通硅酸盐水泥拌合天然河沙制作水泥砂浆，水泥、沙和水比例为1.8:3:1，由于试样尺寸较小，剔除砂浆中砾石等较大颗粒，确保试样尺寸达到颗粒5倍以上；③将水泥砂浆均匀的装入环刀中，振捣抹平使试样厚度与环刀高度相同；④将浇筑完成的混凝土试样按照标准程序养护28 d^[31]；⑤使用千斤顶将混凝土试样从环刀中顶出，测量试样厚度，选取厚2 mm的作为最终混凝土试样，如图1(a)所示。所有混凝土试样一次性制作完成，使表面粗糙度尽可能相近，肉眼观测为较粗糙状态。由于经过养护后的砂浆试块

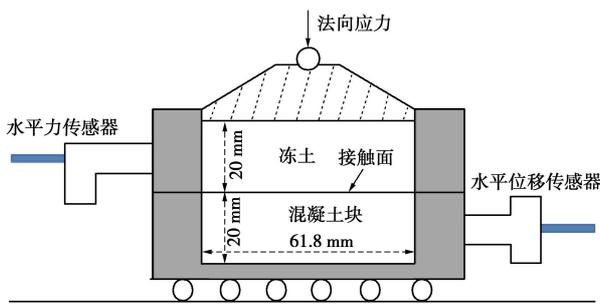
具备一定的强度, 在界面剪切试验中不会出现明显颗粒剥离, 因此可近似代替标准混凝土试块进行界面剪切试验。土样制备过程中, 首先将原状土料自然风干后充分搅拌, 然后碾压过 2 mm 筛, 测定初始含水率, 然后按照预定含水率配制土样, 完成后装入密封袋中 12 h 以使含水率均匀分布并测量土样含水率作为实际含水率。



(a) 混凝土试样



(b) 冻土-混凝土剪切试样



(c) 直剪仪示意图

图 1 试样图片及直剪仪示意图

Fig. 1 Concrete sample, frozen soil-concrete sample and shear test apparatus

冻土 - 混凝土试样使用高 40 mm, 内径为 61.8 mm 环刀作为试样仓, 制备过程共 4 步: ①用塑料胶带将试样仓一端封闭, 将混凝土试样放置入试样仓内靠近塑料胶带一侧; ②根据预定干密度和土样含水率, 称取一定质量湿土均匀的装入试样仓中; ③使用冻土工程国家重点实验室研制的标准压样机缓慢匀速的对装入试样仓的土样施加压力, 直到土样高度到达 20 mm, 试样中土体部分的干密度为 1.68 g/cm³; ④使用

保鲜膜对整个试样仓包裹防止水分散失, 然后在 -25 °C 环境下快速冻结 24 h, 待样品完全冻结后, 使用千斤顶将冻土-混凝土试样从样品舱中顶出, 得到试验样品, 如图 1 (b) 所示。

1.2 试验仪器

使用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 四联应变控制直剪仪开展冻土 - 混凝土界面剪切强度试验, 图 1 (c) 为直剪仪工作原理示意图。剪切盒由上、下两部分组成, 高度同为 20 mm。上、下剪切盒中间界面为剪切面, 冻土 - 混凝土试验样品接触面正好与剪切面重合, 直剪仪可自动记录剪切盒水平位移及界面剪切力。试验在冻土工程国家重点实验室低温实验室进行, 低温实验室内环境温度可自动控制, 温控精度为 ±0.5 °C。试验过程中实时测量调整环境温度, 使环境温度尽可能接近预定试验温度。

1.3 试验过程

试验过程中控制法向应力为 50, 100, 200, 300 kPa。兰州地区浅埋黄土天然含水率一般小于 10%, 但受降雨及埋藏深度的影响, 因此试验中土体土样初始含水率为 9.2%, 13.1%, 17.1%和 20.8%。典型粉质亚黏土的相转换区温度为 0 ~ -2.0 °C, 饱和黏土 0 ~ -5 °C, 在这一温度范围内, 温度变化 1 °C 时未冻水含量的变化量 ≥ 1%, 土体内存在于大孔隙和毛细管中所有自由水和一部分弱结合水冻结^[28], 因此试验温度选取为 -1 °C, -3 °C 和 -5 °C。剪切速率为 0.8 mm/min 的快剪试验, 试验在 10 min 内即可剪切完成, 从而确保低温实验室的温度波动对试样内部温度影响最小。在上述试验条件下, 同时考虑冻融循环作用对界面冻结强度的影响。在试样快速冻结完成后, 进入冻融循环过程。单次冻融循环包括在 -20 °C 恒温箱内冻结 12 h 及在接近 19 °C 室温下融化 12 h, 如图 2 所示。根据经验, 12 h 的冻结或融化时间可以保证样品内部温度到达平衡状态。冻融循环次数控制为 0, 5, 10, 20 次, 样品完成冻融循环后在恒温箱内按照试验温度恒温 24 h, 后移入低温实验室开展剪切试验, 并控制低温实验室的环境温度与试验温度相同。

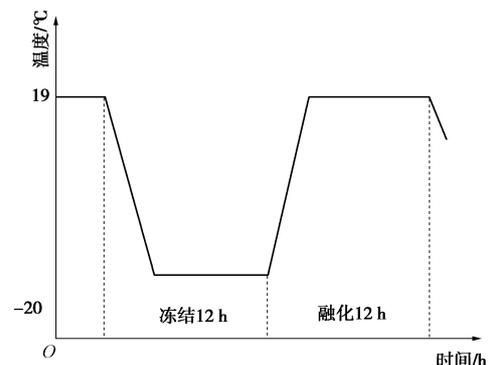


图 2 单次冻融循环温度示意图

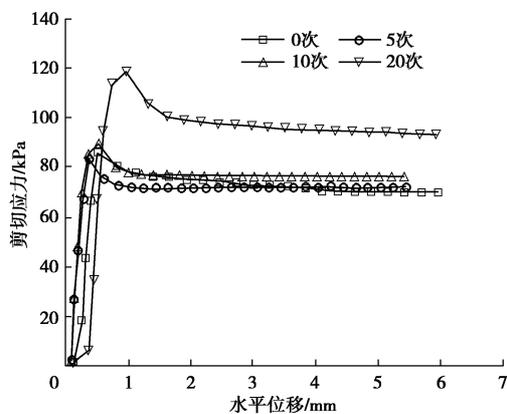
Fig. 2 Temperature path of a freeze-thaw cycle

2 试验结果

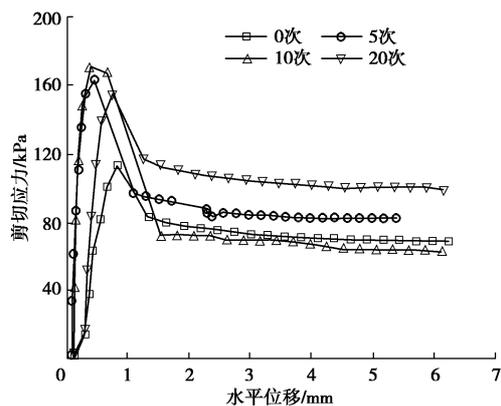
由于界面胶结冰的存在, 冻土-混凝土界面剪切试验中剪切应力-位移关系通常表现为应变软化型, 残余阶段强度参数对发生大变形时界面稳定性分析同样至关重要, 因此分别对冻融循环作用下界面峰值强度特征和残余强度特征进行分析, 其中剪切应力的最大值作为峰值强度, 剪切位移为 5 mm 时对应的剪切应力作为残余强度。

2.1 剪切应力-水平位移曲线

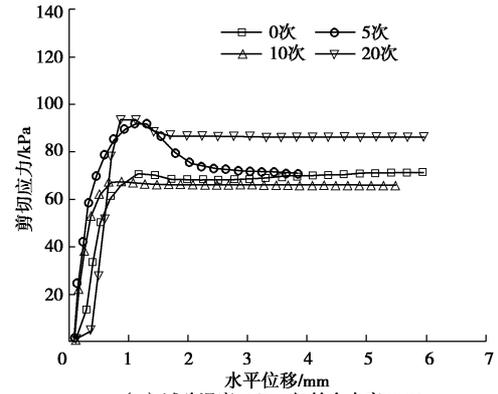
图 3 为法向压力为 100 kPa 时, 不同试验条件下剪切应力与水平位移过程曲线。可以看到界面力学行为表现为应变软化型, 曲线可明显分为峰值前剪切应力快速增长阶段、峰值后软化阶段及残余稳定阶段。在峰值前阶段界面胶结冰、颗粒间黏聚力同时承受剪切变形作用, 随着变形增加剪切应力快速增大, 随后部分冰晶断裂, 土颗粒和冰晶颗粒出现滚动和滑动导致界面发生塑性变形直至峰值应力。不同试验条件时界面剪切应力均在水平位移 ≤ 1.6 mm 时到达峰值。在峰值后软化阶段, 土颗粒和冰晶颗粒完全开始滑动, 界面胶结冰逐渐断裂直至完全破坏, 界面剪切应力也逐渐下降直至稳定值。



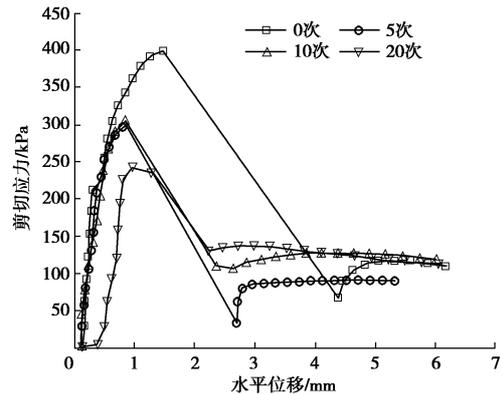
(a) 试验温度 -1°C , 初始含水率9.2%



(b) 试验温度 -5°C , 初始含水率9.2%



(c) 试验温度 -1°C , 初始含水率20.8%



(d) 试验温度 -5°C , 初始含水率20.8%

图 3 不同冻融循环次数时界面剪切应力与水平位移曲线

Fig. 3 Shear stress of interface vs. horizontal displacement at different freeze-thaw cycles

从图 3 (a), (b) 中可以看到, 后峰值阶段剪切应力出现较快速的下降是因为在 -5°C 时界面有较多胶结冰存在, 其在发生脆性破坏后引起界面剪切应力出现明显减小。随着界面胶结冰的完全破坏及土颗粒和冰晶颗粒的滑动, 界面进入残余稳定阶段, 剪切应力不再随着剪切位移的增大而明显变化。

从图 3 中可以看出, 冻融循环作用对剪切应力-水平位移曲线的变化形态影响较小, 但对峰值剪切应力和残余剪切应力有较明显影响。冻融循环作用使残余剪切应力出现变化表明其作用改变了界面颗粒与构筑物表面的接触状态, 在图 3 (a) ~ (c) 中残余剪切应力随循环次数增加而增大, 但在图 3 (d) 中变化较小, 推测是由于此时界面冰晶颗粒较多对土颗粒与构筑物表面接触状态产生影响。冻融循环作用使峰值剪切应力发生变化, 并且随着温度的降低表现的更为明显, 表明其作用不但改变了界面土颗粒的接触状态, 更主要的会引起界面土体水分的迁移。例如在图 3 (d) 中 (试验温度 -5°C , 初始含水率 20.8%), 峰值剪切应力的变化明显大于残余剪切应力的变化, 表明冻融循环作用改变了界面胶结冰含量。

2.2 峰值剪切强度特征

(1) 冻融循环对峰值强度影响

图 4 为界面峰值剪切强度与冻融循环次数关系。

图 4 (a) 为试验温度 -1°C , 初始含水率 9.2%时, 不同法向应力下的峰值剪切强度。可以看到, 峰值剪切强度随着冻融循环次数的增加变化较小。在 50 kPa 时, 经历 20 次冻融循环后, 峰值剪切强度由 61.5 kPa 下降至 51.5 kPa; 在 300 kPa 时, 峰值剪切强度由 205.4 kPa 增加至 234.9 kPa。图 4 (b) 给出了法向压力 100 kPa 及初始含水率 9.2%时, 不同试验温度下的峰值剪切强度。可以看到随着试验温度的降低, 峰值剪切强度有所增大。在同一试验温度时, 峰值强度随着冻融循环次数略有增加。经历 20 次冻融循环后, 在 -1°C 时峰值剪切强度由 86.1 kPa 增加至 118.7 kPa 增大了 37.9%, 在 -5°C 时峰值剪切强度由 113.1 增加至 154.4 kPa, 增大了 36.5%。图 4 (c) 给出了法向压力 100 kPa 及试验温度 -1°C 时, 不同初始含水率下峰值剪切强度。由图 4 (c) 可知, 在同一循环次数时, 初始含水率对峰值剪切强度的影响没有明显规律, 但随着循环次数的增加不同含水率间波动变大。在初始含水率 17.1% 时, 经历 20 次循环后, 峰值剪切强度由 71.3 kPa 增加至 127.2 kPa, 增大了 78.4%。图 4 (d) 给出了法向压力 100 kPa 及试验温度 -5°C 时, 不同初始含水率下峰值剪切强度。可以看到, 此时峰值剪切强度变化程度剧烈且不同含水率时变化规律不同。经历 20 次循环后, 在初始含水率 9.2%时, 峰值剪切强度增加了 36.5%; 在初始含水率 13.1%时, 峰值剪切强度先增加后减小, 在 10 次循环时达到 281.4 kPa, 随后在 20 次循环时下降至 175 kPa; 在初始含水率 17.1%时, 峰值剪切强度随着冻融循环次数增加数明显下降, 由 338.5 kPa 下降至 273.3 kPa, 下降了 19.3%, 同样在初始含水率 20.8%时, 由 399.5 kPa 下降至 245.0 kPa 下降了 38.7%。

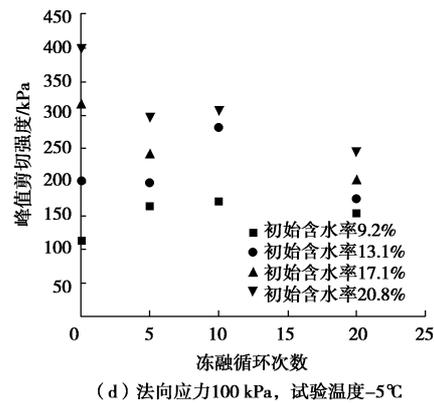
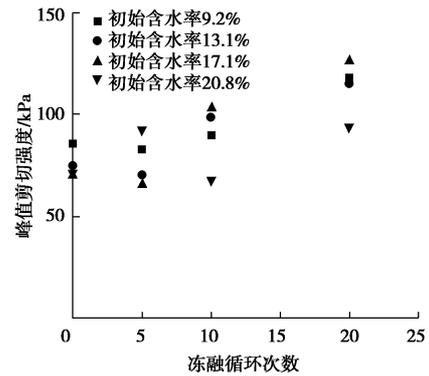
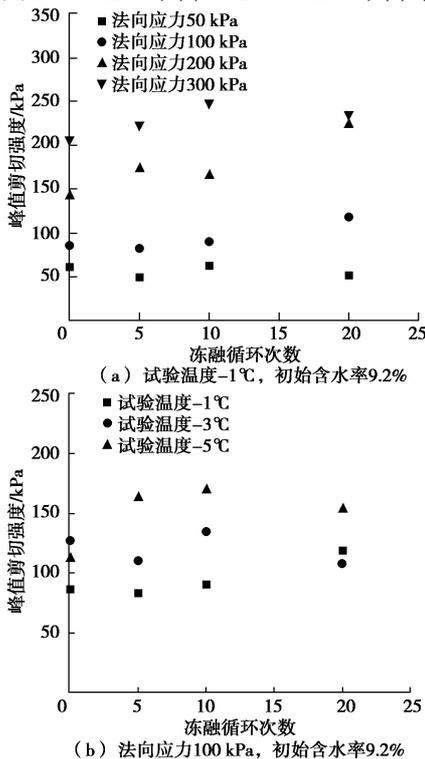


图 4 峰值剪切强度 - 冻融循环次数关系

Fig. 4 Peak shear strength vs. freeze-thaw cycles

(2) 冻融循环对强度参数的影响

土体抗剪强度及土体与构筑物界面抗剪强度取决于很多因素, 但莫尔-库仑剪切强度准则应用最为广泛, 如式(1)所示, 其强度参数为黏聚力和内摩擦角。这两个参数在描述界面剪切强度准则时可定义为界面黏聚力和界面摩擦角。

$$\tau_f = c + \sigma_N \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ_f 为抗剪强度, c 为界面黏聚力, φ 为界面摩擦角, σ_N 为法向应力。

表 2 为不同冻融循环次数时界面峰值黏聚力。可以看到, 随着试验温度、含水率及冻融循环次数的变化, 界面峰值黏聚力表现出不同的变化规律。在试验温度 -1°C 时, 峰值黏聚力随冻融循环次数的增加先减小后增大, 但在初始含水率 20.8% 出现相反变化规律, 不同含水率时变化都很大, 是因为 -1°C 时土体内胶结冰含量较少; 在试验温度 -3°C 时, 峰值黏聚力随冻融循环次数的增加出现不规律波动且变化较小; 在试验温度 -5°C 时, 在初始含水率为 9.2%时峰值黏聚力随冻融循环次数增加而增大, 在初始含水率 13.1%~20.8%时峰值黏聚力随冻融循环次数的增加而减小, 此时变化值较大因为土体内胶结冰含量增加, 冻融循环的影响变强。

表 2 不同冻融循环次数时峰值黏聚力

Table 2 Peak cohesions at different freeze-thaw cycles

| 温度 /°C | 初始含水率/% | 峰值黏聚力/kPa | | | |
|--------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| | | 0 次循环 | 5 次循环 | 10 次循环 | 20 次循环 |
| -1 | 9.2 | 30.16 | 15.94 | 20.90 | 36.27 |
| | 13.1 | 24.17 | 9.39 | 20.77 | 29.01 |
| | 17.1 | 23.73 | 7.64 | 27.77 | 42.81 |
| | 20.8 | 19.19 | 23.53 | 0 | 11.41 |
| -3 | 9.2 | 65.17 | 44.35 | 38.38 | 18.65 |
| | 13.1 | 54.13 | 78.46 | 66.55 | 57.92 |
| | 17.1 | 89.03 | 121.86 | 95.92 | 92.14 |
| | 20.8 | 79.37 | 103.27 | 77.27 | 102.88 |
| -5 | 9.2 | 52.71 | 67.42 | 79.40 | — |
| | 13.1 | 145.21 | 101.39 | 163.83 | 66.83 |
| | 17.1 | 199.23 | 146.02 | — | 96.95 |
| | 20.8 | 315.60 | 203.41 | 240.90 | 226.41 |

表 3 为不同冻融循环次数时峰值摩擦角，可以看到随着初始含水率和试验温度的变化，峰值摩擦角也表现出不同的变化规律。在试验温度为-1°C和-3°C时，不同含水率条件下界面峰值摩擦角随冻融循环次数增加略有增加，在试验温度-5°C时，初始含水率为9.2%~17.1%时界面峰值摩擦角仍然随冻融循环次数的增加而增加，但在20.8%时出现下降。

表 3 不同冻融循环次数时峰值摩擦角

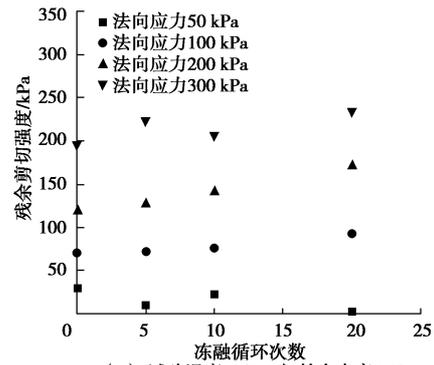
Table 3 Peak friction angles at different freeze-thaw cycles

| 温度 /°C | 初始含水率/% | 峰值摩擦角/(°) | | | |
|--------|---------|-----------|-------|--------|--------|
| | | 0 次循环 | 5 次循环 | 10 次循环 | 20 次循环 |
| -1 | 9.2 | 30.07 | 35.64 | 36.69 | 36.76 |
| | 13.1 | 27.70 | 35.75 | 35.60 | 36.72 |
| | 17.1 | 27.07 | 33.31 | 42.74 | 39.65 |
| | 20.8 | 27.38 | 34.81 | 34.95 | 39.85 |
| -3 | 9.2 | 30.37 | 36.61 | 42.65 | 43.99 |
| | 13.1 | 32.17 | 38.80 | 43.41 | 40.70 |
| | 17.1 | 28.10 | 35.64 | 35.45 | 39.70 |
| | 20.8 | 27.11 | 30.31 | 43.26 | 40.02 |
| -5 | 9.2 | 28.06 | 41.47 | 47.02 | — |
| | 13.1 | 26.57 | 41.02 | 37.08 | 43.09 |
| | 17.1 | 31.77 | 37.95 | — | 42.30 |
| | 20.8 | 39.99 | 39.30 | 36.04 | 30.47 |

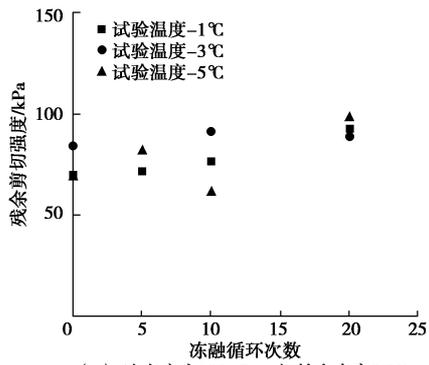
2.3 残余剪切强度特征

(1) 冻融循环对残余强度影响

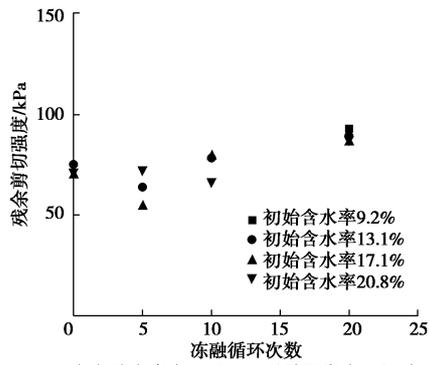
界面残余剪切强度是岩土工程设计中构筑物发生大位移时的重要参数。图 5 为残余剪切强度与冻融循环关系。从图 5 (a), (b) 中可以看出，在初始含水率为 9.2% 时，残余剪切强度随着冻融循环次数增加略有增大。如在法向应力 100 kPa 及试验温度-5°C 时，经历 20 次循环后残余剪切强度由 69.5 kPa 增加至 98.7 kPa 增大了 42%。从图 5 (c) 中可以看到不同的初始含水率时冻融循环对残余剪切强度影响仍然很小。从图 5 (d) 中可以看出，在试验温度-5°C 时，残余剪切强度随着含水率增加略有增大。



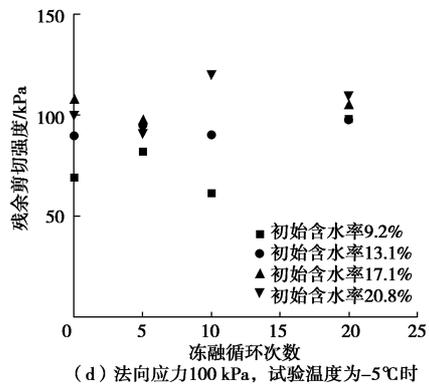
(a) 试验温度-1°C, 初始含水率9.2%



(b) 法向应力100 kPa, 初始含水率9.2%



(c) 法向应力100 kPa, 试验温度为-1°C时



(d) 法向应力100 kPa, 试验温度为-5°C时

图 5 残余剪切强度 - 冻融循环次数关系

Fig. 5 Residual shear strength vs. freeze-thaw cycles

(2) 冻融循环对残余摩擦角影响

在残余强度阶段，由于界面已经发生大位移变形，界面的胶结强度几乎完全破坏，因此在计算界面强度参数时假设界面黏聚力为 0，因而此时强度参数中只

有界面摩擦角。表3为不同冻融循环次数时残余摩擦角。可以看到随着冻融循环次数增加残余摩擦角略有增大。

表3 不同冻融循环次数时残余摩擦角

Table 3 Residual friction angles at different freeze-thaw cycles

| 温度 /°C | 初始含水 率/% | 残余摩擦角/(°) | | | |
|-----------|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | 0次循 环 | 5次循 环 | 10次循 环 | 20次循 环 |
| -1 | 9.2 | 32.66 | 35.11 | 34.84 | 38.73 |
| | 13.1 | 31.26 | 34.95 | 36.41 | 38.06 |
| | 17.1 | 31.37 | 33.03 | 34.37 | 37.03 |
| | 20.8 | 30.91 | 35.60 | 34.32 | 37.25 |
| -3 | 9.2 | 34.93 | 38.10 | 38.86 | 39.73 |
| | 13.1 | 34.03 | 36.97 | 40.81 | 40.55 |
| | 17.1 | 34.38 | 34.98 | 37.26 | 41.42 |
| | 20.8 | 32.96 | 36.14 | 39.54 | 38.51 |
| -5 | 9.2 | 33.72 | 39.22 | 40.52 | 38.21 |
| | 13.1 | 35.90 | 41.67 | 40.24 | 41.14 |
| | 17.1 | 35.21 | 38.31 | — | 41.62 |
| | 20.8 | 34.89 | 36.94 | 38.94 | 42.28 |

3 讨 论

冻土与构筑物接触面的峰值剪切强度可以认为是界面的冻结强度^[32]。冻结强度包括界面的冰胶结力、土颗粒与构筑物表面黏聚力及摩擦力等。界面冰胶结力受试验温度和土体初始含水率的影响明显,因此不同初始含水率和试验温度时峰值剪切强度变化明显。在残余剪切强度阶段,界面发生大变形使冰胶结力及土颗粒与构筑物表面黏聚力消失,而土颗粒与构筑物表面摩擦力受试验温度和初始含水率影响很小^[19],因此不同初始含水率和试验温度时残余剪切强度变化很小。

本文试验结束后发现界面处有冰膜,但遗憾未能拍照记录,Wen等^[19]和Volokhov等^[33]的试验中同样发现界面处存在冰膜。这表明在试验过程中试样内部水分发生迁移,推测其原因为在冻融循环过程中,由于土体(冻土)与混凝土导热性差异使得试样内部存在温度梯度,以及土体与混凝土之间含水率不同存在湿度梯度,致使水分发生迁移在界面处聚集。在含水率较低时,迁移至界面的水分较少,界面剪切带内土体初始含水率随冻融循环作用逐渐增大,因而剪切强度逐渐增大。但当初始含水率较大时,迁移至界面的水分较多导致剪切带土体含水率不断增大,因此界面剪切强度会随着冻融循环次数增加而下降。因为冻土强度在含水率较低时,随着初始含水率增加而增大,但当初始含水率较高时(超过饱和含水率),随着初始含水率的增加而减小,直至含水率为100%时接近冰剪切强度^[34]。

需要指出,本文研究中对混凝土接触面的粗糙度没有具体表征,只是间接且模糊地对其粗糙度进行了

统一假设,在以后工作中将对这些方面进行改进。

4 结 论

基于系列直剪试验,研究冻融循环作用对冻土-混凝土界面剪切强度的影响,同时考虑不同试验温度和初始含水率的影响,得到以下4点结论。

(1)冻融循环对界面剪切应力与水平位移曲线形态影响很小,经历20次循环后曲线仍是应变软化型。冻融循环对峰值剪切应力的影响强于对残余剪切应力的影响,表明其对界面胶结冰含量产生影响,因此对于发生小变形的构筑物界面需要重视冻融循环对峰值剪切应力的影响。

(2)当土体初始含水率较低,同时温度较高时,冻融循环使界面峰值剪切强度增加,但变化量较小。然而在含水率较高(20.8%)及试验温度较低时(-5℃),峰值剪切强度随着冻融循环增加而降低,易使构筑物失稳甚至导致破坏。

(3)不同初始含水率、试验温度下冻融循环次数对残余剪切强度的影响没有明显规律且影响程度较小。

(4)在试验温度为-1℃,-3℃和-5℃时,峰值黏聚力随冻融循环增加分别表现为增加、稳定和下降,推测是由于界面土体胶结冰含量变化引起。峰值摩擦角和残余摩擦角随冻融循环次数增加略有变化。

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.(ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 马巍,王大雁.中国冻土力学研究50 a回顾与展望[J].岩土工程学报,2012,34(4):625-640.(MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625-640. (in Chinese))
- [3] LAI Y, XU X, DONG Y, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 6-18.
- [4] 王大雁,马巍,常小晓,等.冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4313-4319.(WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet Clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319. (in Chinese))

- [5] 常 丹, 刘建坤, 李 旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1496 - 1502. (CHANG Dan, LIU Jian-kun, LI Xu, et al. Experiment study of effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinhai-Tibet silty sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1496 - 1502. (in Chinese))
- [6] QI J, VERMEER P A, CHENG G. A review of the influence of freeze - thaw cycles on soil geotechnical properties[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, **17**(3): 245 - 252.
- [7] XIE S B, QIU J J, LAI Y M, et al. Effects of freeze- thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2015, **12**(4): 999 - 1009.
- [8] 侯 鑫, 马 巍, 李国玉, 等. 冻融循环对硅酸钠固化黄土力学性质的影响[J]. 冰川冻土, 2018, **40**(1): 86 - 93. (HOU Xin, MA Wei, LI Guo-yu, et al. Effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of loess solidified by sodium silicate[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, **40**(1): 86 - 93. (in Chinese))
- [9] 刘 晖, 刘建坤, 邵博文, 等. 冻融循环对含砂粉土力学性质的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, **50**(3): 135 - 142. (LIU Hui, LIU Jian-kun, TAI Bo-wen, et al. Mechanical properties changes of sandy silt due to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, **50**(3): 135 - 142. (in Chinese))
- [10] LU Z, XIAN S, YAO H, et al. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **157**: 42 - 52.
- [11] PARAMESWARAN V R. Adfreeze strength of frozen sand to model piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15**(4): 494 - 500.
- [12] QIU M, LI H, WANG K, et al. Experimental study on failure pattern of piles in frozen soil[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, **32**(5): 39 - 42.
- [13] ALDAEEF A A, RAYHANI M T. Influence of exposure temperature on shaft capacity of steel piles in ice-poor and ice-rich frozen soils[C]// "International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology". Cham, 2018: 247 - 257.
- [14] PENNER E, IRWIN W. Adfreezing of leda clay to anchored footing columns[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1969, **6**(3): 327 - 337.
- [15] BONDARENKO G I, SADOVSKII A V. Strength and deformability of frozen soil in contact with rock[J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 1975, **12**(3): 174 - 178.
- [16] BIGGAR K W, SEGO D C. The strength and deformation behaviour of model adfreeze and grouted piles in saline frozen soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(2): 319 - 337.
- [17] LADANYI B. Frozen soil-structure interfaces[J]. Studies in Applied Mechanics, 1995, **42**(6): 3 - 33.
- [18] 吉延俊, 贾 昆, 俞祁浩, 等. 现浇混凝土-冻土接触面冻结强度直剪试验研究[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(1): 86 - 91. (JI Yang-jun, JIA Kun, YU Qi-hao, et al. Direct shear tests of freezing strength at the interface between cast-in-situ concrete and frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(1): 86 - 91. (in Chinese))
- [19] WEN Z, YU Q, MA W, et al. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, **131**: 108 - 115.
- [20] 石泉彬, 杨 平, 谈金忠, 等. 冻土与结构接触面冻结强度压桩法测定系统研制及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 139 - 147. (SHI Quan-bin, YANG Ping, TAN Jin-zhong, et al. Development of measuring system by pile-pressing method and experimental study on adfreezing strength at interface between frozen soil and structure[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 139 - 147. (in Chinese))
- [21] 陈 拓, 赵光思, 赵 涛. 寒区黏土与结构接触面冻结强度特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, **40**(3): 512 - 518. (CHEN Tuo, ZHAO Guang-si, ZHAO Tao. Experimental study on the freezing strength characteristic of clay-structure interface in cold regions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, **40**(3): 512 - 518. (in Chinese))
- [22] 孙厚超, 杨 平, 王国良. 冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3636 - 3641. (SUN Hou-chao, YANG Ping, WANG Guo-liang. Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3636 - 3641. (in Chinese))
- [23] 孙厚超, 杨 平, 王国良. 冻黏土与结构接触界面层单剪力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(9): 57 - 62. (SUN Hou-chao, YANG Ping, WANG Guo-liang. Monotonic

- shear mechanical characteristics and affecting factors of interface layers between frozen soil and structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, **31**(9): 57 - 62. (in Chinese))
- [24] WANG T L, WANG H H, HU T F, et al. Experimental study on the mechanical properties of soil-structure interface under frozen conditions using an improved roughness algorithm[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **158**: 6 - 68.
- [25] SHI Q B, YANG P, WANG G L. Experimental research on adfreezing strengths at the interface between frozen fine sand and structures[J]. Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering, 2018, **25**(2): 663 - 674.
- [26] 赵联桢, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 707 - 713. (ZHAO Lian-zhen, YANG Pin, WANG Hai-bo. Development and application of large-scale multi-functional frozen soil-structure interface cycle-shearing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 707 - 713. (in Chinese))
- [27] 石泉彬, 杨平, 张英明. 冻土与结构接触面冻结强度研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(6): 1298 - 1306. (SHI Quan-bin, YANG Ping, ZHANG Ying-ming. Adfreezing strength at the interface between frozen soil and structure: research status and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(6): 1298 - 1306. (in Chinese))
- [28] 陈肖柏, 刘建坤. 土的冻结作用与地基(精)[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun. Frost Action of Soil and Foundation Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [29] 土工试验规程: SL 237—1999[S]. 1999. (SL 237—1999 Specification of Soil Test: SL 237—1999[S]. 1999. (in Chinese))
- [30] 郑剑锋, 马巍, 赵淑萍, 等. 重塑土室内制样技术对比研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(3): 494 - 500. (ZHENG Jian-feng, MA Wei, ZHAO Shu-ping, et al. Development of the specimen-preparing technique for remolded soil samples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(3): 494 - 500. (in Chinese))
- [31] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 2002. (Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete: GB/T 50081—2002 [S]. 2002. (in Chinese))
- [32] LIU J, LÜ P, CUI Y, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, **104**: 1 - 6.
- [33] VOLOKHOV S S. Effect of freezing conditions on the shear strength of soils frozen together with materials[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2003, **40**(6): 233 - 238.
- [34] BAKER T H W. Strain rate effect on the compressive strength of frozen sand[J]. Engineering Geology, 1979, **13**(1/2/3/4): 223 - 231.