

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1193

冻土与结构接触面次峰值冻结强度试验研究

石泉彬^{1,2}, 杨 平¹, 于 可^{1,3}, 汤国毅⁴

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 泰州职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 泰州 225300;
3. 河海大学 土木与交通工程学院, 江苏 南京 210037; 4. 江苏南京地质工程勘察院, 江苏 南京 210041)

摘 要: 为探究冻土与结构接触面次峰值冻结强度影响因素、影响规律及其预估方法, 选取南京河西地铁施工区域典型粉细砂为试验土样, 利用改进后的大型多功能冻土直剪仪, 开展多影响因素条件下的冻结强度直剪试验研究。在对次峰值冻结强度定义和量化标准约定的基础上, 研究发现极限峰值后剪应力陡降、峰后剪应力周期性变化、软化衰变等典型变化规律。将次峰值冻结强度与接触面温度、粗糙度、法向应力拟合后发现其分别呈反比例线性、二次抛物线、正比例线性关系。通过关系数据库管理软件数据挖掘, 得出次峰值冻结强度关键影响因素及大小依次为接触面法向应力、粗糙度, 而接触面温度为非关键影响因素。经多元非线性回归, 构建了耦合接触面温度、法向应力及粗糙度三因素的次峰值冻结强度预估模型, 可为人工冻土区或天然冻土区冻结加固设计、盾构法施工、地下结构物设计等提供冻结强度参数选取依据。

关 键 词: 次峰值冻结强度; 影响因素; 影响规律; 预估模型; 冻土; 接触面

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2025-10

Sub peak adfreezing strength at the interface between frozen soil and structures

SHI Quan-bin^{1,2}, YANG Ping¹, YU Ke^{1,3}, TANG Guo-yi⁴

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. School of Architectural Engineering, Taizhou Polytechnical College, Taizhou, Jiangsu 225300, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
4. Jiangsu Nanjing Institute of Geo-Engineering Investigation, Nanjing, Jiangsu 210041, China)

Abstract: To study the influence factors of sub peak adfreezing strength at the interface between frozen soil and structure, the typical fine sand located in the Hexi area of Nanjing subway construction site was selected as test sample. The large-scale multi-functional frozen soil-structure interface shearing instrument was optimized and improved to conduct direct shear tests of adfreezing strength considering multi-influencing factors. Based on the specific definition and the agreement of quantitative criteria for sub peak adfreezing strength, it was found that the shear stress was typical of steepness after the limit peak, and the peak post shear stress changed periodically. The relationships among sub peak adfreezing strength, interface temperature, roughness and normal stress were fitted and found to be inverse proportional linearity, quadratic polynomial, proportional linear relationship respectively. Through the database management software, it was found that the normal stress and roughness were the key influencing factors, but the interface temperature was non-critical influencing factors. The three-element sub peak adfreezing strength prediction model coupled with interface temperature, normal stress and roughness was constructed by multivariate nonlinear regression. It can provide important adfreezing strength parameters for artificial freezing reinforcement design, shield construction and underground structure design in artificial freezing reinforcement area or permafrost area.

Keyword: sub peak adfreezing strength; influential factors; influence rule; prediction model; frozen soil; interface

1 引 言

冻土与基础接触面力学特性和变形规律是影响冻土区基础工程承载力、抗拔性能确定和结构物与

冻土相互作用分析的重要因素, 而探究冻土与结构接触面冻结强度影响因素, 准确预估接触面冻结强度大小则是合理确定冻土区桩基承载力及隧道人工冻结加固区盾构管片安全和盾构机顺利掘进施工参

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51278251); 住房和城乡建设部科学技术计划项目 (No.2017-K4-017); 江苏省青蓝工程项目 (苏教师[2016]15 号)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51278251), the Science and Technology Program of Ministry of Housing and Urban-Rural Development (2017-K4-017) and "the Qinglan Project" of Jiangsu Province (2016-15).

第一作者简介: 石泉彬, 男, 1978 年生, 博士研究生, 副教授, 主要从事环境岩土与城市地下工程方面的研究工作。E-mail: sqb.tz@163.com

通讯作者: 杨平, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与城市地下工程方面的研究工作。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

数的关键环节。因此,开展冻土与结构接触面冻结强度研究,无论对于天然冻土区地下结构物设计,还是隧道人工冻结加固工程施工,都具有重要的工程实际应用价值。

在接触面冻结强度定义方面,前苏联崔托维奇在《冻土力学》^[1]中最早对冻土与基础材料接触面冻结强度进行了定义:土与基础材料冻结面上的抗剪强度为冻结强度。邱国庆等在《冻土学辞典》^[2]中也对冻结力和冻结强度分别给予了定义:基础侧面与地基土冻结在一起的界面,在受力后所传递的剪力为冻结力,土与基础侧面冻结在一起所能承受的最大剪应力为冻结强度。

在接触面冻结强度试验仪器改进和研发方面, Lee 等^[3]将常规直剪仪置于步入式低温环境箱中用以进行冻土与结构接触面冻结强度试验研究。吕鹏^[4]、刘建坤^[5]等在常规直剪仪基础上增加动力加载系统和温控系统,进行接触面动直剪试验研究。上述接触面冻结强度试验仪器所使用的土样尺寸都较小,其尺寸效应对试验结果产生的影响较大。为此,赵联桢等^[6]研制出大型多功能冻土直剪仪,能进行大尺寸恒法向刚度条件下冻土与结构接触面循环剪切试验研究,并分析了粗糙度、加载条件等对接触面循环剪切强度的影响^[7-8]。刘建坤^[9]、吕鹏^[10]等研制出土工粗颗粒土大尺寸直剪试验系统,并研究了垂直压力、温度、含水率对冻土与混凝土接触面剪切强度的影响规律,但其未考虑接触面粗糙度的影响。王博等^[11]利用改进的 DRS-1 高压直剪试验系统开展正融土-结构面直剪试验研究发现接触面剪切强度受法向压力和解冻程度等因素影响显著。

在冻土与不同材料接触面冻结强度试验研究方面, Ko 等^[12]通过直剪试验研究了冻结砂土、冻结粉土与钢板、铝板接触面抗剪强度。Wen 等^[13]通过直剪试验对比冻土与玻璃钢、冻土与混凝土接触面冻结强度受温度及含水率的不同影响。Sumitani 等^[14]进行冻结砂土与弯曲界面钢管接触面冻结强度试验,并由此提出了冻结剪切破坏判定公式。

在接触面冻结强度现场和室内模型试验研究方面, Biggar 等^[15]在冻盐渍土地区进行灌注桩现场模型试验,研究温度和含盐量对冻结强度的影响。程永锋等^[16]开展室内桩基模型试验,研究冻土与桩基冻结强度及桩基承载力的变化规律。汪仁和等^[17-18]进行新疆地区高压输电线建设工程项目静载模型试验,研究桩土冻结强度及其分布规律。

在冻土与结构接触面剪切模型研究方面,杨平等^[19]应用循环直剪系统开展冻土与结构接触面力学性能及变形规律试验研究,建立冻土与结构接触面剪切行为的抗剪强度与压缩体应变损伤模型。

在接触面冻结强度值预估研究方面, Choi 等^[20]进行冻砂土与铝板接触面直剪试验,提出通过比值系数 r_s 并依据冻土自身剪切强度预测推算接触面冻结强度的方法。石泉彬等^[21]利用自行研制的大型多功能冻土直剪仪进行不同冻结温度、法向应力和粗糙度条件下接触面直剪试验,拟合出极限冻结强度多影响因素经验公式,但对残余冻结强度尚未进行深入定量分析,仅作一般规律揭示。

然而在实际工程中,盾构机在人工冻土加固区推进不仅要克服极限冻结强度,还需克服次峰值冻结强度;位于天然冻土区桩基础、地下连续墙、沉井等地下结构,其承载力也与次峰值冻结强度密切相关,尤其在地下结构发生极限承载破坏的后续阶段。但现有冻土与结构接触面冻结强度相关文献中,鲜有关于次峰值冻结强度的研究报道。因此,确有必要对接面次峰值冻结强度从影响因素、变化规律、形成机制、预估模型等方面进行系统试验研究。

2 试验方案

2.1 试验设备改进与优化

本次试验以项目组自行研制的大型多功能冻土直剪仪^[6]为基础,限于篇幅对直剪仪试验功能和具体参数不再赘述。为提高试验精度和可靠度,并更有利于接触面残余冻结强度试验,特别对原冻土直剪仪进行专门改进与优化。

(1) 研制制冷剪切板优化接触面冻结方式

为提高冻土与结构接触面冻结效率和冻结效果,研制新的具备制冷功能的剪切板:保持原剪切板外形尺寸不变在其内部迂回布置制冷铜管(见图1),制冷铜管的出入口与低温恒温冷浴冷液输出端和输入端相连接,通过循环冷液对剪切板制冷,从而达到对冻土与结构接触面进行有效冻结。实际测试表明,相比于普通剪切板,制冷剪切板不仅显著提高土样冻结效率,而且使表层土样冻结更为充分和均匀。

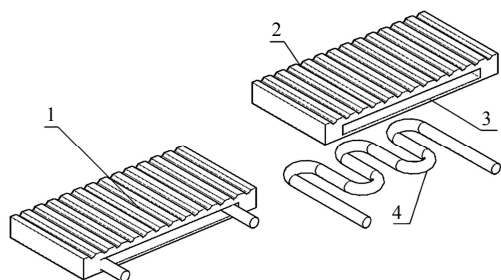
(2) 优化测温传感器并改进其测温方式

为克服原测温传感器测温精度不高、易剪切损坏等缺陷,将原热电阻温度传感器更新为热电偶温度传感器,并研制与热电偶温度传感器相配套的温度采集和转换模块。在冻土与结构接触面处增设3组热电偶温度传感器,同步升级原冻土直剪仪操作

软件系统、扩展温度采集通道、增加温度记录功能，以达到能在冻结和剪切过程中全程记录冻土与结构接触面处温度变化情况。

(3) 优化位移传感器并改进其固定方式

为提高冻土与结构接触面剪切试验位移测量精度，用 novotechnik TR 高精位移传感器替换原冻土直剪仪水平和法向位移计，该位移传感器的位移测量精度达 $\pm 0.01\text{ mm}$ ，且具有稳定性好、动态响应快的优点。与此同时，改进位移传感器固定方式，由单点支撑变为两点支撑，使其定位更为可靠稳定。



1—内置制冷铜管剪切板；2—剪切板表面凹痕；
3—剪切板内空腔；4—内置制冷铜管。

图1 内置制冷铜管剪切板

Fig.1 Shear plate with internal refrigeration copper pipe

该试验装置其他功能设置与试验参数设计同文献[21]，限于篇幅在此不再赘述。

2.2 试验材料

选取南京市河西地区地铁施工区域典型粉细砂为试验研究对象，其物理力学特性如表1所示，其级配曲线如图2所示。

表1 粉细砂物理力学特性
Table 1 Physical and mechanical properties
of fine silty sand

含水率	重度	孔隙比	压缩系数	压缩模量	直剪快剪
$\omega / \%$	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	e	α / MPa^{-1}	E_s / MPa	$\varphi / (^\circ)$
26.0	19.8	0.721	0.145	12.98	30.2

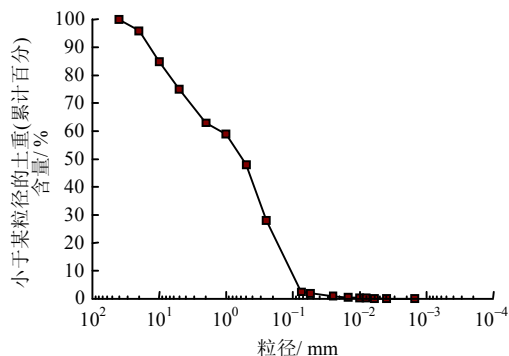


图2 粉细砂级配曲线

Fig.2 Particle size distribution curve of silty fine sand

2.3 试验参数与规划

(1) 改进剪切板安放顺序

传统剪切板安放顺序是：先对土样进行冻结，待土样表面初步冻结后再降下剪切板与土样接触。该方式易造成冻土样表面凸起，致使其与剪切板不能完全接触。故本次试验对剪切板安放顺序进行改进：待冻土盒准确就位后，随即降下剪切板，使剪切板在自重压力作用下与土样表面紧密接触，然后持续冻结至试验温度再施加法向荷载。经过试验测试，该剪切板安放顺序能有效克服冻土表面与剪切板不能完全接触的缺陷，使冻土试样表面积和冻土与结构接触面积完全相等，以利于准确进行冻结强度换算。

(2) 确定土样含水率及剪切速率

考虑到土样含水率及剪切速率可能会直接影响冻土与结构接触面冻结强度，因此，在试验前确定土样含水率及剪切速率的统一标准至关重要。为此，配置不同含水率土样、进行不同剪切速率直剪试验测试。从测试结果可以看出：冻土与结构接触面冻结强度受土样含水率影响显著（见图3），当含水率较小时其随含水率增加而增大，当含水率增至27%后其随含水率增加而减小；冻土与结构接触面冻结强度受剪切速率影响较小（见图4），当剪切速率较小时其随剪切速率增加而增大，当剪切速率增至7 mm/min后，其值渐趋平稳。

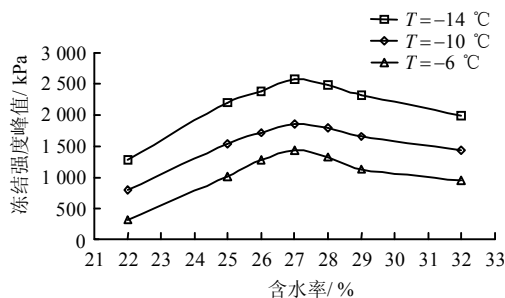


图3 不同温度条件下冻结强度峰值-含水率关系曲线

Fig.3 Peak of adfreeze strength-water content curves at different temperatures

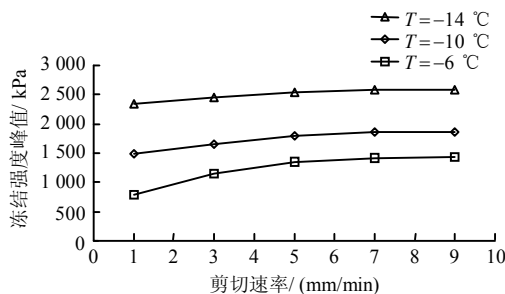


图4 不同温度条件下冻结强度峰值-剪切速率关系曲线

Fig.4 Peak of adfreeze strength-shear rate curves at different temperatures

在上述试验测试中, 接触面冻结强度最大值所对应的土样含水率为 27%、剪切速率为 7 mm/min。鉴于研究冻结强度上限值对于工程实际更具指导和应用价值, 故据此确定本次试验所选用的土样含水率 (27%) 及剪切速率 (7 mm/min) 两项参数。

(3) 试验总体安排

本文试验按 3 因素 4 水平试验规划设计: 接触面冻结温度 T (-2、-6、-10、-14 °C), 粗糙度 R (0、0.3、0.8、1.4 mm), 法向应力 σ (100、300、500、700 kPa), 要求每组试验安排不少于 3 次平行试验。单程直剪试验, 剪切行程为 11 mm。试验时由 4 组串联的电伺服气缸保持常法向应力条件, 气缸顶伸端连接弹簧将法向压力间接施加于剪切板上, 从而在剪切过程中允许剪切板发生竖向位移。

3 次峰值冻结强度定义及其量化标准

3.1 次峰值冻结强度定义

冻土与结构接触面冻结在一起所能承受的最大剪应力为冻结强度^[2], 发生剪切滑移破坏临界状态时的峰值剪应力为极限冻结强度, 发生剪切滑移破坏后的剪应力为峰后剪应力, 峰后剪应力的最大峰值即为次峰值冻结强度。

在实际工程应用中, 如盾构施工人工冻结加固区, 盾构刀盘启动瞬间需要克服峰值剪应力也即极限冻结强度, 正常转动后仍需克服峰后剪应力。只有确保盾构机提供的扭矩足以使刀盘与冻土接触面剪应力大于峰后剪应力最大值也即次峰值冻结强度, 方可保证盾构机在冻结加固区正常掘进施工。

3.2 次峰值冻结强度量化标准

当结构接触面粗糙时, 峰后剪应力波动并呈周期性变化; 当结构接触面光滑时, 峰后剪应力无明显周期性波动; 不论结构接触面粗糙光滑与否, 峰后剪应力均存在不同程度衰变趋势。因此, 次峰值冻结强度量化标准必须根据接触面粗糙度光滑与否区别约定。

用于冻结强度试验的多功能冻土直剪仪采用壁厚加强刚性机架、冻土盒与剪切板, 以尽可能减小剪切过程中仪器自身形变。但是, 任何仪器都只能实现有限刚度, 在剪应力达到峰值后破坏瞬间直剪仪必然存在弹性回复变形能量释放, 并由此直接影响剪应力-剪切位移关系曲线。当接触面粗糙时, 受仪器弹性回复变形能量释放直接影响的即为峰后剪应力第 1 个峰值, 因此, 考虑接触面粗糙时的次峰值冻结强度量化标准约定时必须回避峰后剪应力第 1 个峰值。当接触面光滑时, 通过前期大量试验发

现当剪切位移达到剪应力波峰跨度 2 倍 (剪切位移约 3 mm) 时, 仪器弹性回复变形能量释放后剪应力趋于稳定, 因此, 考虑接触面光滑时的次峰值冻结强度量化标准约定时应以剪切位移 3 mm 所对应剪应力为依据。

综合以上几方面因素, 约定次峰值冻结强度量化标准: 当结构接触面粗糙时, 将冻土接触面直剪试验剪应力-位移关系曲线中峰后剪应力第 2 个峰值定为次峰值冻结强度 (见图 5); 当结构接触面光滑时, 将剪应力-位移关系曲线中剪切位移 3 mm 所对应剪应力定为次峰值冻结强度 (见图 6); 次峰值冻结强度统一用符号 τ_r 表示。

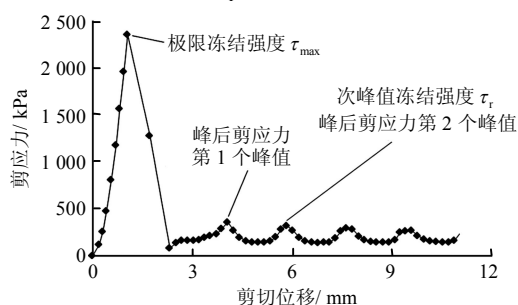


图 5 剪应力-剪切位移关系曲线
($R=0.3$ mm, $T=-10$ °C, $\sigma=300$ kPa)
Fig.5 Shear stress-shear displacement curve
($R=0.3$ mm, $T=-10$ °C, $\sigma=300$ kPa)

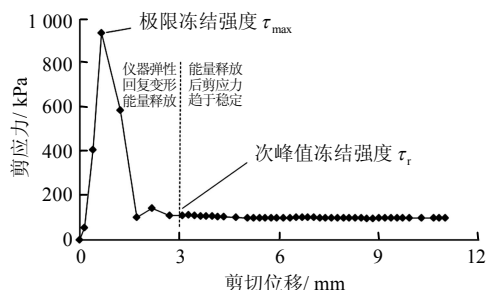


图 6 剪应力-剪切位移关系曲线
($R=0.0$ mm, $T=-10$ °C, $\sigma=300$ kPa)
Fig.6 Shear stress-shear displacement curve
($R=0.0$ mm, $T=-10$ °C, $\sigma=300$ kPa)

4 峰后剪应力变化规律

4.1 极限峰值后剪应力陡降规律

纵观不同接触面冻结温度、粗糙度和法向应力条件下的冻结强度试验结果发现, 均存在极限峰值后剪应力陡降现象 (见图 5、6)。究其原因: 当冻土与结构接触面间剪应力达到极限峰值冻结强度后, 即刻出现剪切破坏, 与此同时接触面处冰晶胶结力消失, 冻土与结构接触面由最大静摩擦转化为滑动摩擦, 其剪应力也相应呈现陡降变化规律。

图 7 是接触面粗糙度 $R = 0.3 \text{ mm}$ 、法向应力 $\sigma = 500 \text{ kPa}$ 时, 不同冻结温度条件下冻结强度试验结果。由该图可知: 试验温度范围内, 接触面冻结温度降低, 极限峰值后剪应力陡降幅度值 (极限冻结强度与次峰值冻结强度之差值) 随之线性增大。采用相同研究方法可发现: 极限峰值后剪应力陡降幅度值随法向应力提高而增大, 而与接触面粗糙度之间则无明显相关性。究其原因: 极限峰值后剪应力陡降主要是由于冻土与结构接触面冰晶胶结力突然消失, 接触面间由最大静摩擦转化为滑动摩擦引起的, 而冰晶胶结力随接触面冻结温度降低而增大, 故极限峰值后剪应力陡降幅度值随接触面冻结温度降低而增大; 最大静摩擦力与滑动摩擦力的差值取决于最大静摩擦系数与滑动摩擦系数的差值和法向应力之乘积, 故极限峰值后剪应力陡降幅度值随法向应力提高而增大; 最大静摩擦系数与滑动摩擦系数的差值与接触面粗糙度值无直接关系, 故极限峰值后剪应力陡降幅度值与接触面粗糙度无明显相关性。

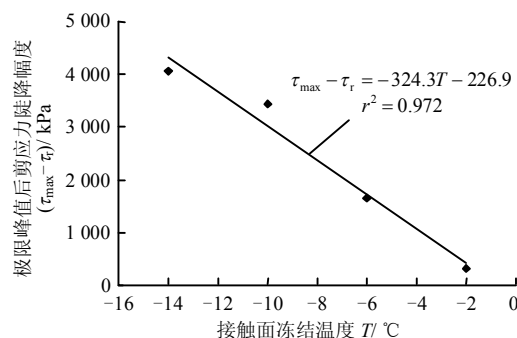


图 7 极限峰值后剪应力陡降幅度值-接触面冻结温度关系曲线 ($R = 0.3 \text{ mm}$, $\sigma = 500 \text{ kPa}$)

Fig.7 Steep drop of post-peak shear strength-temperature curve ($R = 0.3 \text{ mm}$, $\sigma = 500 \text{ kPa}$)

4.2 峰后剪应力周期性变化规律

峰后剪应力表现出典型周期性变化规律 (见图 8), 且其变化周期受接触面粗糙度影响。当接触

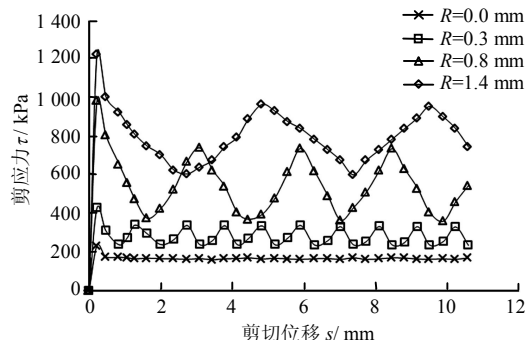


图 8 不同粗糙度条件下剪应力-剪切位移关系曲线 ($\sigma = 300 \text{ kPa}$, $T = -10 \text{ °C}$)

Fig.8 Shear stress-shear displacement curves at different roughnesses ($\sigma = 300 \text{ kPa}$, $T = -10 \text{ °C}$)

面粗糙度增加, 峰后剪应力变化周期随之增大; 当接触面光滑时, 峰后剪应力无周期性变化。

呈现上述变化规律是因为: 冻土与结构接触面发生剪切滑移破坏后, 粗糙剪切板沿表面有凹痕的冻土体表面错动滑移, 剪切板粗糙度是由其表面凹槽构成, 且其凹槽间距相等, 故峰后剪应力表现出与粗糙度相适应的周期性变化规律; 当接触面光滑时, 由于不存在错动滑移现象, 峰后剪应力也就因此无周期性变化。

图 9 为接触面冻结温度 $T = -10 \text{ °C}$ 、法向应力 $\sigma = 300 \text{ kPa}$ 时, 不同粗糙度条件下剪切板法向位移-剪切位移关系曲线。由该图可以看出: 当剪切板粗糙时, 剪切板法向位移在剪切过程中随剪切位移增加而呈周期性变化, 且其变化周期与图 8 中的剪应力变化周期同步; 当剪切板光滑时, 剪切板法向位移在剪切过程中无周期性变化。剪切板法向位移变化规律进一步验证了上述关于峰后剪应力周期性变化规律是由剪切板粗糙度引起的, 及其变化周期与粗糙度值相关的解释。

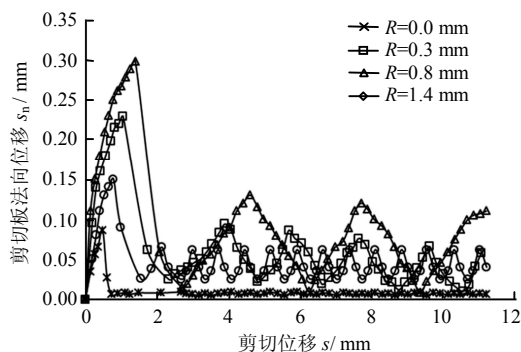


图 9 不同粗糙度条件下剪切板法向位移-剪切位移关系曲线 ($\sigma = 300 \text{ kPa}$, $T = -10 \text{ °C}$)

Fig.9 Normal displacement of shear plate-shear displacement curves at different roughnesses ($\sigma = 300 \text{ kPa}$, $T = -10 \text{ °C}$)

实际工况中, 结构表面粗糙度通常具有不规则性和随机性, 不可能如同试验用剪切板均由等间距、固定形状、标准尺寸的凹槽构成, 因此, 其峰后剪应力也不可能呈现标准的周期性变化。实际工况下的结构表面粗糙度通常是用一定面积区域内平均构造深度来衡量的, 也即从宏观上将结构表面粗糙度视为均匀分布, 因此, 本试验有关峰后剪应力随粗糙度变化规律在工程实际应用中仍具有一定的参考和借鉴意义。

4.3 峰后剪应力软化衰变规律

通过试验发现, 峰后剪应力呈线性软化衰变趋势。以接触面粗糙度 $R = 0.8 \text{ mm}$ 、冻结温度 $T = -$

6℃、法向应力 $\sigma = 300$ kPa 试验结果为例 (见图 10), 其软化衰减率为 10.187 kPa/mm。保持接触面冻结温度和法向应力条件不变, 当接触面粗糙度为 0.0、0.3、1.4 mm 时其峰后剪应力软化衰减率分别为 0.516、7.554、12.630 kPa/mm。由试验数据对比发现, 接触面粗糙度对峰后剪应力软化衰减率影响较为显著, 软化衰减率随接触面粗糙度增加而增大, 且其增长率先快后慢 (见图 11); 相对于接触面粗糙度来说, 接触面冻结温度和法向应力对峰后剪应力软化衰减率影响较小。

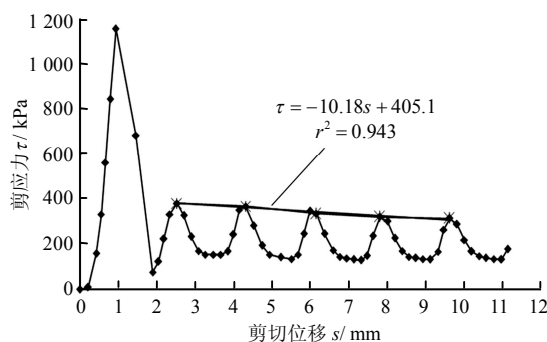


图 10 剪应力-剪切位移关系曲线

($R=0.8$ mm, $T=-6$ ℃, $\sigma=300$ kPa)

Fig.10 Shear stress-shear displacement curve

($R=0.8$ mm, $T=-6$ ℃, $\sigma=300$ kPa)

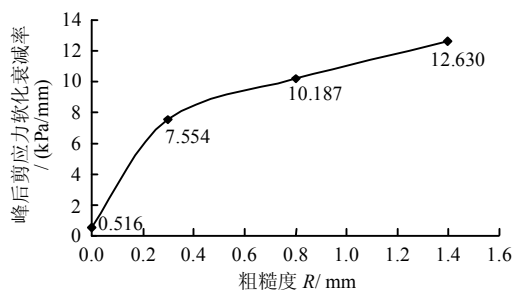


图 11 峰后剪应力软化衰减率-粗糙度关系曲线

($T=-6$ ℃, $\sigma=300$ kPa)

Fig.11 Softening decay rate of post-peak shear stress-roughness curve ($T=-6$ ℃, $\sigma=300$ kPa)

峰后剪应力之所以呈现软化衰变, 是由于冻土与结构接触面发生剪切滑移破坏后, 粗糙剪切板沿着有凹痕的冻土表面错动滑移。随滑移距离持续增加冻土表面凹痕深度因切削逐渐减小, 冻土体表面因剪压而损伤破坏扩展, 摩擦、压融产生热量造成冰晶融化等多方面因素共同作用, 致使峰后剪应力随剪切位移增加而软化衰变。而冻土体凹痕切削、剪压损伤破坏、摩擦压融等均与接触面粗糙度相关, 且均随接触面粗糙度增加而加剧, 故峰后剪应力软化衰减率也随接触面粗糙度增加而增大。

5 次峰值冻结强度影响因素与规律

5.1 接触面冻结温度对次峰值冻结强度的影响

图 12 为接触面粗糙度 $R=0.3$ mm 和法向应力 $\sigma=300$ kPa 条件下次峰值冻结强度与接触面冻结温度关系曲线, 经数据拟合发现次峰值冻结强度与接触面冻结温度之间满足线性关系, 其关系式为

$$\tau_r = 17.09T + 208.9 \quad (1)$$

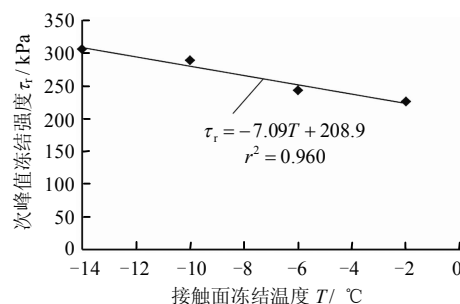


图 12 次峰值冻结强度-接触面冻结温度关系曲线

($R=0.3$ mm, $\sigma=300$ kPa)

Fig.12 Sub peak adfreeze strength-temperature curve

($R=0.3$ mm, $\sigma=300$ kPa)

通过其他接触面粗糙度和法向应力条件下试验发现, 次峰值冻结强度也均随接触面冻结温度降低而线性增长, 且其增长率随接触面粗糙度及法向应力增加而提高。

次峰值冻结强度是在接触面剪切滑移破坏后表现出来的, 期间冻土与结构接触面之间受冻结温度影响最为显著的冰晶胶结力已基本消失, 此时次峰值冻结强度主要取决于接触面处滑动摩擦力。因接触面冻结温度直接影响冻土体自身强度, 尤其是接触面处有凹痕冻土体的抗剪、抗压强度, 故随着接触面冻结温度降低, 接触面处有凹痕冻土体抗剪和抗压强度提高, 冻土体抵抗剪切板在其表面错动滑移的能力增强, 接触面处滑动摩擦力也因此增大, 所以次峰值冻结强度也随之提高。由于次峰值冻结强度主要依赖于滑动摩擦力, 而摩擦力随接触面粗糙度和法向应力增加而提高, 故次峰值冻结强度随接触面温度降低而增长的增长率也随接触面粗糙度和法向应力增加而提高。

5.2 接触面粗糙度对次峰值冻结强度的影响

结构表面粗糙度决定了冻土体表面形状, 而结构和冻土体表面形状是否粗糙或光滑是冻土与结构接触面处摩擦力产生的首要条件。因接触面处摩擦力是次峰值冻结强度的主要来源, 故次峰值冻结强度会受接触面粗糙度直接影响。图 13 为接触面冻结

温度 $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和法向应力 $\sigma = 700\text{ kPa}$ 条件下次峰值冻结强度与接触面粗糙度关系曲线, 由该图可知, 次峰值冻结强度与接触面粗糙度之间呈现二次抛物线函数关系为

$$\tau_r = 1\,664.60R^2 + 1\,205.00R + 147.10 \quad (2)$$

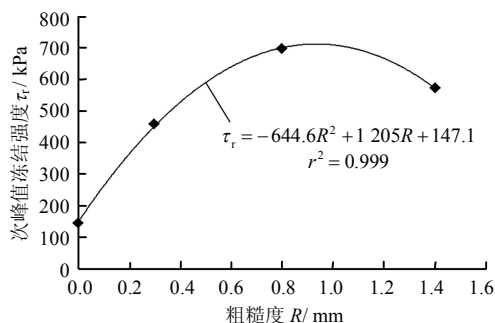


图 13 次峰值冻结强度-接触面粗糙度关系曲线
($T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 700\text{ kPa}$)

Fig.13 Sub peak adfreezing strength-roughness curve
($T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 700\text{ kPa}$)

其他接触面冻结温度和法向应力试验条件下, 次峰值冻结强度也具有相似规律 (见图 14)。由此可以推断, 在一定接触面粗糙度范围内, 随着接触面粗糙度增大, 次峰值冻结强度先逐渐增大, 当接触面粗糙度增至 $0.9 \sim 1.0\text{ mm}$ 时, 次峰值冻结强度达到某一峰值后又逐渐减小。究其原因: 当接触面粗糙度较小时, 冻土与结构接触面间法向错动较小, 其剪切过程类似滑动摩擦, 故次峰值冻结强度随接触面粗糙度增大而增大; 当接触面粗糙度较大时, 冻土与结构接触面间法向错动较大, 其剪切过程由滑动摩擦过渡为有上下错动的曲面滑移, 粗糙度增大反而有利于错动滑移, 故次峰值冻结强度随接触面粗糙度增大而减小。

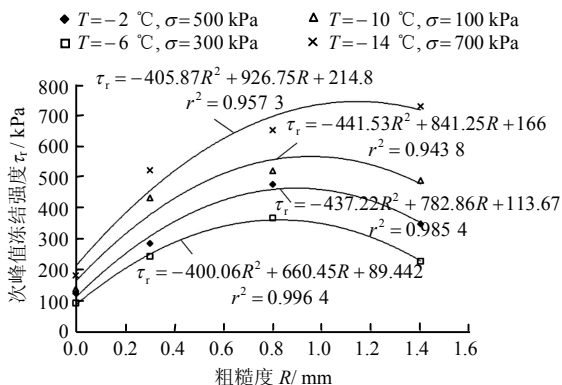


图 14 不同接触面温度和法向应力条件下次峰值冻结强度-接触面粗糙度关系曲线

Fig.14 Sub peak adfreezing strength-roughness curves under different temperatures and normal stresses

随着接触面粗糙度继续增加, 次峰值冻结强度并非持续减小, 而应当最终趋于某一恒定值。究其原因: 当接触面粗糙度很大时, 冻土嵌入接触面的深度和宽度会增大, 此时接触面冻结强度主要来源由接触面剪切强度转变为冻土体自身的抗剪强度, 粗糙度对接触面冻结强度影响减小, 而冻土体自身的剪切强度则是与粗糙度无关的定值, 故随着接触面粗糙度继续增加, 次峰值冻结强度会最终趋于某一恒定值。

5.3 接触面法向应力对次峰值冻结强度的影响

图 15 为接触面冻结温度 $T = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、粗糙度 $R = 0.8\text{ mm}$ 条件下次峰值冻结强度与接触面法向应力关系曲线。经数据拟合发现, 次峰值冻结强度与接触面法向应力之间满足的正比例线性关系式为

$$\tau_r = 0.89\sigma + 69.84 \quad (3)$$

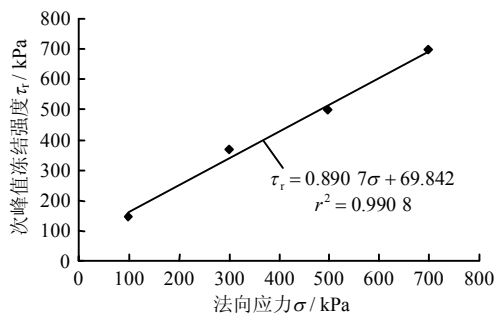


图 15 次峰值冻结强度-接触面法向应力关系曲线
($T = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 0.8\text{ mm}$)

Fig.15 Sub peak adfreezing strength-normal stress curve
($T = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 0.8\text{ mm}$)

其他接触面冻结温度和粗糙度条件下, 次峰值冻结强度试验也具有相似规律。由此可以得出次峰值冻结强度随接触面法向应力增加而线性增加的结论。原因为: 接触面法向应力促使结构接触面与冻土体相互挤压, 这正是冻土与结构接触面摩擦力产生的必要条件, 故必将对次峰值冻结强度产生直接影响, 且会随着接触面法向应力增加, 接触面摩擦力增大, 次峰值冻结强度也因此随之提高。

5.4 次峰值冻结强度多因素影响程度分析

上述已对次峰值冻结强度受接触面温度、粗糙度、法向应力 3 因素影响规律进行了分析, 但未对各影响因素的影响程度作出评价, 因此, 有必要对次峰值冻结强度进行多因素影响程度分析, 并探究其关键影响因素。

为此, 使用关系数据库管理系统软件 SQL Server 2008 数据挖掘功能模块“分析关键影响因素”工具对 64 组次峰值冻结强度试验数据进行多影响

因素分析评价,其关键影响因素柱状图如图 16 所示。

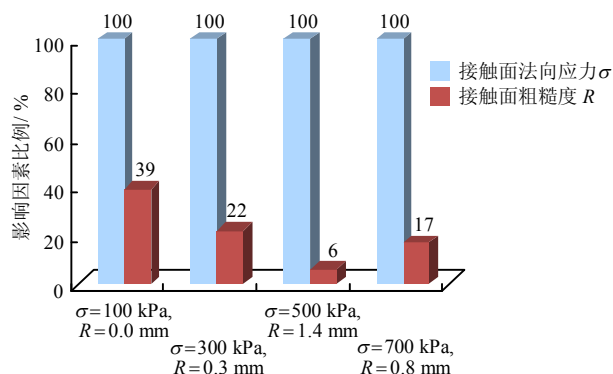


图 16 次峰值冻结强度关键影响因素柱状图
Fig.16 Key impact factor histogram of sub peak adfreezing strength

由图 16 可以看出:法向应力及粗糙度是次峰值冻结强度的关键影响因素,其中法向应力对次峰值冻结强度的相对影响更为显著;接触面温度在计算结果的关键影响因素报表中未显现,故为非关键影响因素,其对次峰值冻结强度影响最小。由此可得出结论:次峰值冻结强度的影响因素从大到小依次为法向应力、粗糙度、接触面温度。

6 次峰值冻结强度预估模型构建

上述试验分析逐一揭示了接触面冻结温度、粗糙度、法向应力 3 因素分别对次峰值冻结强度的影响规律,然而事实上次峰值冻结强度确受接触面冻结温度、粗糙度、法向应力等多因素共同作用和影响。另一方面,在工程实际中,冻土区地下结构物设计中必须提前对接触面次峰值冻结强度进行准确预估和判断,人工冻结加固工程施工中也应对接触面次峰值冻结强度进行有效参数控制。因此,确有必要对次峰值冻结强度进行综合影响因素分析,并实现对次峰值冻结强度的准确预估。

从前述有关次峰值冻结强度 τ_r 与接触面温度 T 、粗糙度 R 及法向应力 σ 3 种因素之间影响关系的分析可知: τ_r 与 T 及 σ 均呈线性关系(如式(1)及式(3)); τ_r 与 R 呈二次多项式函数关系(如式(2))。据此,可以假定 τ_r 与 T 、 R 及 σ 3 种因素之间关系式为

$$\tau_r = aT + b\sigma + cR^2 + dR + e \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 e 均为待定常数;其中 a 、 e 与接触面温度 T 有关; b 、 c 、 d 与法向应力 σ 及粗糙度 R 有关。

应用 MatlabR2014 数据分析软件进行多元非线性回归,以确定式(4)中 5 个待定常数项参数值。根据式(4)中各自变量的函数特征,初拟三元非线性数学模型如下:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3^2 + \beta_4 x_3 + \beta_5 \quad (5)$$

以次峰值冻结强度直剪试验数据为样本,将 y 与 τ_r 、 x_1 与 T 、 x_2 与 σ 、 x_3 与 R 相对应构建 4 个数组,经 Matlab 多元非线性回归拟合计算得到:

$$\beta_1 = -8.09, \beta_2 = 0.59, \beta_3 = -277.72, \beta_4 = 567.50, \beta_5 = -172.02.$$

Matlab 工作区传送结果显示,模型式(5)回归后剩余标准差也即回归系统拟合标准差 $R_{mse} = 21.43$ kPa,次峰值冻结强度样本平均值通过计算得知: $R_{mse}/\bar{\tau}_r = 7.26\% < 10\%$ 。计算结果表明,模型回归后剩余标准差较小,回归拟合效果较好。据此判定初拟数学模型式(5)合理,其计算结果回归参数有效。

基于上述多元非线性回归结果,可构建耦合接触面温度 T 、法向应力 σ 及粗糙度 R 3 因素的次峰值冻结强度 τ_r 预估模型如下:

$$\tau_r = 18.09T + 0.59\sigma - 277.72R^2 + 567.50R - 172.02 \quad (6)$$

鉴于式(6)是依据冻土与结构接触面直剪仪试验相关数据回归拟合形成的,故该直剪试验条件也应适用于式(6)。因此,确定次峰值冻结强度预估模型的适用条件为:冻结温度 $-2 \sim -14$ $^{\circ}\text{C}$ 、接触面粗糙度 $0.0 \sim 1.4$ mm、法向应力 $100 \sim 700$ kPa。通常情况下,混凝土盾构管片、混凝土预制桩、钢桩等材料的表面粗糙度,人工冻结加固区的设计冻结温度和天然冻土区地下结构物接触面温度,常规地下工程所在深度处的竖向和侧向土压应力,均介于上述预估模型适用条件范围内。

7 结 论

在改进大型多功能冻土直剪仪、优化加载方式、合理确定试验参数的基础上,以南京市河西地区地铁施工区域典型粉细砂为试验研究对象,完成多影响因素条件下冻土与结构接触面次峰值冻结强度直剪试验,以此探究接触面次峰值冻结强度形成机制及其变化规律,其主要研究结论如下:

(1) 对接触面次峰值冻结强度进行了具体定义,约定了次峰值冻结强度的量化标准,有助于对次峰值冻结强度科学定量分析研究。

(2) 通过接触面直剪试验探究出极限峰值后剪应力陡降、峰后剪应力周期性变化、软化衰变等变化规律, 并对其形成原因和机制给予合理解释。

(3) 系统分析了接触面温度、粗糙度、法向应力对次峰值冻结强度的影响规律, 并经拟合发现次峰值冻结强度与接触面温度、粗糙度、法向应力分别呈反比例线性、二次抛物线、正比例线性关系。

(4) 使用关系数据库管理系统软件数据挖掘功能寻找出法向应力、粗糙度为次峰值冻结强度关键影响因素, 其中法向应力影响更为显著, 接触面温度为非关键影响因素。

(5) 通过多元非线性回归, 构建了耦合接触面冻结温度、法向应力、粗糙度 3 种影响因素的次峰值冻结强度预估模型, 从而为人工冻结加固设计、冻土区盾构施工、冻土区地下结构物设计等提供冻结强度参数选取依据。

参 考 文 献

- [1] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 178—183.
TSYTOVICH H A. Frozen soil mechanics[M]. Translated by ZHANG Chang-qing, ZHU Yuan-lin. Beijing: Science Press, 1985: 178—183.
- [2] 邱国庆, 刘经仁, 刘鸿绪. 冻土学辞典[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994: 115—117.
QIU Guo-qing, LIU Jing-ren, LIU Hong-xu. Geocryological glossary[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994: 115—117.
- [3] LEE JOONYONG, KIM YOUNGSEOK, CHOI CHANGHO. A study for adfreeze bond strength developed between weathered granite soils and aluminum plate[J]. **Journal of the Korean Geo-Environmental Society**, 2013, 14(12): 23—30.
- [4] LÜ Peng, LIU Jian-kun, CUI Ying-hui. A study on dynamic shear strength on frozen soil-concrete interface[J]. **Sciences in Cold and Arid Regions**, 2013, 5(4): 408—412.
- [5] LIU Jian-kun, CUI Ying-hui, WANG Peng-cheng, et al. Design and validation of a new dynamic direct shear apparatus for frozen soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 106—107(5): 207—215.
- [6] 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 Ping, 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.
- [7] ZHAO Lian-zhen, YANG Ping, WANG Jian-guo, et al. Cyclic direct shear behaviors of frozen soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 102(2): 52—62.
- [8] ZHAO Lian-zhen, YANG Ping, WANG Jian-guo, et al. Impacts of surface roughness and loading conditions on cyclic direct shear behaviors of an artificial frozen silt-structure interface[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 106—107(5): 183—193.
- [9] LIU Jian-kun, LÜ Peng, CUI Ying-hui, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 104—105(3): 1—6.
- [10] 吕鹏, 刘建坤. 冻土与混凝土接触面直剪试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 106—110.
LÜ Peng, LIU Jian-kun. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2015, 37(2): 106—110.
- [11] 王博, 刘志强, 赵晓东, 等. 高压正融土与结构接触面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3540—3546.
WANG Bo, LIU Zhi-qiang, ZHAO Xiao-dong, et al. Experimental study on shearing mechanical characteristics of thawing soil and structure interface under high pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(12): 3540—3546.
- [12] KO SUNGGYU, CHOI CHANGHO. Experimental study on adfreeze bond strength between frozen sand and aluminium with varying freezing temperature and vertical confining pressure[J]. **Journal of the Korean Geotechnical Society**, 2011, 27(9): 67—76.
- [13] WEN Zhi, YU Qi-hao, MA Wei, et al. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength[J]. **Cold Regions Science & Technology**, 2016, 131: 108—115.
- [14] SUMITANI D, UEDA Y, OHRAI T. Study on adfreeze shear strength of frozen sand along curved interface[J]. **Journal of the Japanese Association of Snow and Ice**, 2007, 69(3): 347—356.

- [15] 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**, 2011, 30(2): 319—337.
- [16] 程永锋, 鲁先龙, 刘华清, 等. 青藏铁路 110 kV 输电线路冻土桩基模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4378—4382.
- CHENG Yong-feng, LÜ Xian-long, LIU Hua-qing, et al. Model test study on pile foundation of 110 kV transmission line of Qinghai-Tibet railway in frozen soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.1): 4378—4382.
- [17] 汪仁和, 王伟, 陈永锋. 冻土中单桩抗压承载力模型试验研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 188—193.
- WANG Ren-he, WANG Wei, CHEN Yong-feng. Model experimental study on compressive bearing capacity of single pile in frozen soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2005, 27(2): 188—193.
- [18] 汪仁和, 王伟, 程永锋. 冻土中单桩抗拔承载力的模型试验研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 766—771.
- WANG Ren-he, WANG Wei, CHEN Yong-feng. Model study of tensile bearing capacity of a single pile under frozen condition[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2006, 28(5): 766—771.
- [19] 杨平, 赵联桢, 王国良. 冻土与结构接触面循环剪切损伤模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1217—1223.
- YANG Ping, ZHAO Lian-zhen, WANG Guo-liang. A damage model for frozen soil-structure interface under cyclic shearing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1217—1223.
- [20] CHOI CHANGHO, KO SUNGGYU. A study for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen Soil[J]. **Journal of the Korean Geotechnical Society**, 2011, 27(10): 13—23.
- [21] 石泉彬, 杨平, 王国良. 人工冻结砂土与结构接触面冻结强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2142—2151.
- SHI Quan-bin, YANG Ping, WANG Guo-liang. Experimental study on adfreezing strength of the interface between artificial frozen sand and structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(10): 2142—2151.

上接第 2024 页

- [16] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1497—1503.
- YIN Guang-zhi, LI Wen-pu, LI Ming-hui, et al. Permeability properties and effective stress of raw coal under loading-unloading conditions[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(8): 1497—1503.
- [17] 尹光志, 秦虎, 黄滚. 不同应力路径下含瓦斯煤岩渗流特性与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1315—1320.
- YIN Guang-zhi, QIN Hu, HUANG Gun. Experimental study of characteristics of seepage and acoustic emission of gas-filled coal under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1315—1320.
- [18] 韦立德. 岩石力学损伤和流变本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- WEI Li-de. Rock mechanics damage and rheology constitutive models study[D]. Nanjing: Hohai University, 2003.
- [19] 张明, 王菲, 杨强, 等. 基于三轴压缩试验的岩石统计损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 1965—1971.
- ZHANG Ming, WANG Fei, YANG Qiang, et al. Statistical damage constitutive model for rocks based on triaxial compression tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(11): 1965—1971.