

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0457

冻结饱水砂卵石三轴压缩强度试验研究

张晋勋¹, 杨昊^{1,2}, 单仁亮², 隋顺猛², 薛东朝²

(1. 北京城建集团有限责任公司博士后工作站, 北京 100088; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究北京富水砂卵石地层冻结后的强度特性, 以北京某地铁暗挖车站砂卵石为研究对象, 进行不同温度(-5、-10、-15、-20℃), 不同围压(0.0、0.3、0.8、1.3、2.0、3.0、4.0、8.0 MPa)条件下三轴压缩试验。试验结果表明: 冻结砂卵石的应力-应变曲线以应变软化形态为主, 高负温、高围压条件下, 呈现理想塑性破坏形态; 砂卵石强度、黏聚力和摩擦角均随温度降低而增大, 其中强度呈指数分布, 黏聚力和摩擦角呈线性分布; 强度和弹性模量随围压增加而增大, 但增大趋势逐渐减小, 低围压压缩区强度满足线性 Mohr-Coulomb (简称 M-C) 准则; 冻结砂卵石的破坏形态以破裂面始/终于试样侧面的剪切破坏为代表, 张拉型破坏受冰影响显著, 仅存在于低围压条件下, 高围压、高负温时易出现体胀型破坏。

关键词: 冻土强度; 冻结砂卵石; 力学特性; 三轴压缩试验

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-3993-09

Experimental research on triaxial compressive strength of frozen saturated sandy gravel

ZHANG Jin-xun¹, YANG Hao^{1,2}, SHAN Ren-liang², SUI Shun-meng², XUE Dong-chao²

(1. Postdoctoral Workstation, Beijing Urban Construction Group Co. Ltd, Beijing, 100088, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083, China)

Abstract: This paper investigates the strength characteristics of water-rich sandy gravel subjected to freezing, as this soil is often encountered in Beijing. A series of triaxial compression tests has been performed on sandy gravel samples obtained at mining station of Beijing Metro at different temperatures (-5℃, -10℃, -15℃, -20℃) and confining pressures (0.0, 0.3, 0.8, 1.3, 2.0, 3.0, 4.0 MPa and 8.0 MPa). The results show that: the behavior of frozen sandy gravel is dominated by strain softening, and the ideal plastic failure mode occurs only when the soil experiences high negative temperature and confining pressure; the strength, cohesion and friction angle of the soil all increase with the decrease of temperature. The variation of strength with temperature satisfies an exponential distribution, while the changes in cohesion and friction angle follow a linear relationship; the strength and elastic modulus of frozen sandy gravel increase as the confining pressure increases, but the increasing rate descends gradually. The Mohr - Coulomb criterion can still be used effectively to characterize the soil's compressive response at low confining pressure. The failure mode of frozen sandy gravel is represented by shear failure with diagonal fractures on the lateral sides of the specimen. Tensile failure occurs when the specimen is subjected to a low confining pressure, and it is influenced by the formation of ice significantly. The mechanism of volumetric inflation has been found when a high level of temperature and confining pressure is applied to the specimen.

Keywords: strength of frozen soil; frozen sandy gravel; mechanical properties; triaxial compression test

1 引言

冻结法作为最有效的地下水治理方法, 广泛应用于煤矿立井建设中。近年来, 随着地铁工程的快速发展, 冻结法逐渐被应用于地铁联络通道、盾构端头加固、盾尾刷更换等工程中。由于冻结过程改

变原始地层土体的性质, 因此需要研究冻结后土体剪切强度特性(下称冻土强度)。为此, 国内外学者开展相关研究, 得到以下几点共识: ①影响冻土强度的内因有: 土质类型、地下水成分、含冰量、孔隙比、饱和度等; 外因有: 温度、温度梯度、围压、边界条件、加载速率等^[1-2], 其中温度和含冰量是主

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 北京市科学技术委员会资助项目(No. Z161100001116088)。

This work was supported by the Beijing Municipal Science & Technology Commission (Z161100001116088).

第一作者简介: 杨昊, 男, 1988年生, 博士, 博士后, 主要从事岩土体冻结技术研究工作。E-mail: yanghao380073@126.com

要因素^[3]；②应力-应变形态受围压影响显著，表现出应变硬化和应变软化两种形态^[4-5]，高围压对冻土产生压融效应^[6]；③冻土强度大于冰的强度和融土强度^[7]，M-C 准则依然适用冻土^[8-11]；④冻土破坏形态受微裂隙和孔隙冰共同影响，表现出胀开和腰鼓^[12-13]两种形态。

分析前人的研究成果，尚存以下两点不足：

①冻土体的强度参数和破坏特性研究多集中于细粒土（黏土/粉土/粉砂等），粗粒土（砂砾石/砂卵石）的相关研究较少；②影响冻土体宏观强度的因素分析较多，但各因素的影响机制分析较少。

因此，本文取材于北京某地铁暗挖车站，研究北京典型富水砂卵石地层冻结强度特性，研究成果为北京地铁砂卵石地层冻结止水技术应用提供理论参考和技术指导。

2 试验方案

2.1 原状土选取及参数测定

砂卵石土选自北京某地铁暗挖车站砂卵石 5# 层，勘察资料显示地下潜水二层位于该地层，车站施工前进行降水作业，实际开挖断面并无明显地下水（见图 1）。



图 1 砂卵石地层

Fig. 1 Pedosphere of sandy gravel

砂卵石密度采用现场灌水法测定，含水率采用室内烘干试验测定，卵石级配采用筛分法测定，渗透系数采用常水头渗透试验测定^[14]，相关物理参数如表 1 所示。

表 1 砂卵石地层物理参数

Table 1 Physical parameters of sandy gravel

土层性质	湿密度 ρ /(g/cm ³)	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	含水率 ω /%	渗透系数 k /(10 ⁻² cm/s)	孔隙比 e
砂卵石	1.923	1.785	7.72	6.67	0.629

2.2 砂卵石试样制备

试样尺寸采用 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体。按颗粒级配曲线（见图 2）控制试样的粒径构成比例，

使其与原状土一致；通过反复夯实试模内土体，压缩土体体积，确保试样密度与原状土一致。

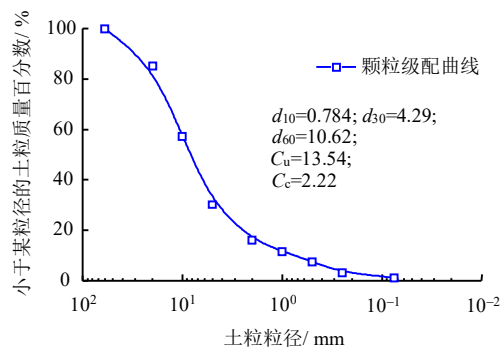


图 2 砂卵石的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain size grading curve of sandy gravel

图中， d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为小于该粒径的试样含量占总质量的 10%、30% 和 60% 的粒径； C_u 为颗粒不均匀系数； C_c 为曲率系数。

将试样浸没水槽内 48 h，饱水处理后放入单向冻结试验箱内冻结 7 d，取出水槽，凿除试模外的冰体，打开连接螺栓，取出冻结砂卵石试样，放入 -10°C 恒温储藏箱内保存备用（见图 3）。



图 3 冻结砂卵石试样

Fig. 3 Specimens of frozen sandy gravel

2.3 试验参数及加载条件

冻结三轴剪切试验在 TDW-200 冻土三轴试验机上进行，参考已往冻结工程、规范^[15]及试验机性能，确定试验温度为 -5 、 -10 、 -15 、 -20°C ，围压为 0.0、0.3、0.8、1.3、2.0、3.0、4.0、8.0 MPa，围压按静水压力条件施加，当围压达到设计值时，维持围压不变，轴压采用位移控制，加载速率为 1 mm/min，直至试样破坏，详细的试验过程及冷浴循环系统操作流程参见文献^[16-17]。

3 试验结果

3.1 冻结砂卵石应力-应变曲线

图 4 为不同温度条件下冻结砂卵石三轴应力-应变曲线，对比分析可知：①冻结砂卵石的应力-

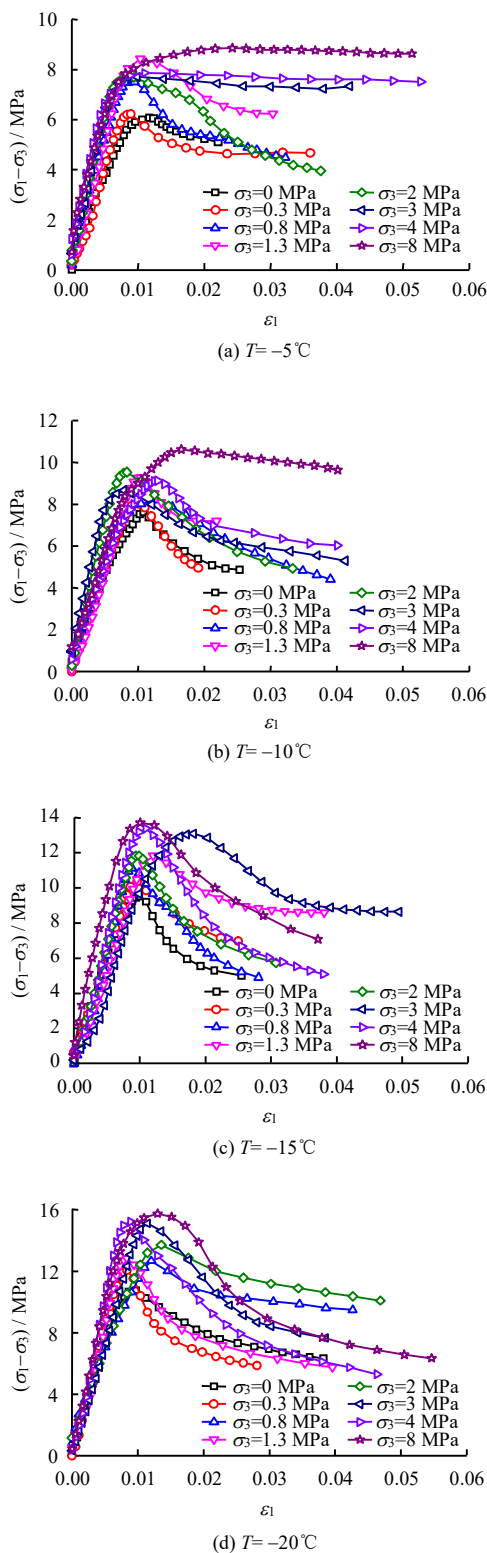


图 4 不同温度下冻结砂卵石的应力-应变曲线
Fig.4 Triaxial stress-strain curves of frozen sandy gravel at different temperatures

应变曲线呈现应变软化和塑性破坏两种形态，以应变软化形式为主，在温度较高（-5℃）、围压较大（> 3 MPa）的条件下，呈现塑性破坏，这与黏土^[3]、黄土^[4]、砂土^[6]应力-应变曲线不同，这一现象的主

要原因是砂卵石的含冰量较大，因而冰成为控制变形形态的主要因素；②围压和温度对应力-应变形态均有影响，温度越低，峰后强度下降越迅速，围压越大，峰后塑性变形越大；③本次试验中并未出现黏土/黄土中广泛存在的应变硬化形态^[12]；④围压较小时，冻结砂卵石三轴强度随围压增加显著，但围压大于 3 MPa 以后，三轴强度几乎不再随围压的增加而增大，笔者认为产生这一现象的原因是围压的增加，卵石间集中应力增大，冰透镜体融化，同时降低试样的含冰量和颗粒间的摩擦力，砂卵石骨架逐渐成为主要承载结构，最终导致冻结砂卵石的承载力未随围压增加而增大。

3.2 围压对冻结砂卵石强度特性的影响

将图 4 中冻结砂卵石不同围压条件下的最大主应力整理后列于表 2，分布状态绘于图 5。由图可知，冻结砂卵石最大主应力随围压增加而增大，但增大趋势逐渐减小。由于实际地层水平压力小于 3 MPa，且该水平压力条件下，各散点近似呈线性分布，因此，对其进行线性拟合，拟合结果为

$$\left. \begin{aligned} -5^{\circ}\text{C}: \sigma_1 &= 1.267 \sigma_3 + 6.915, & R &= 0.966 \\ -10^{\circ}\text{C}: \sigma_1 &= 1.313 \sigma_3 + 8.128, & R &= 0.979 \\ -15^{\circ}\text{C}: \sigma_1 &= 1.488 \sigma_3 + 10.664, & R &= 0.963 \\ -20^{\circ}\text{C}: \sigma_1 &= 1.579 \sigma_3 + 12.088, & R &= 0.958 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中： R 为相关系数； σ_1 为最大主应力； σ_3 为围压。

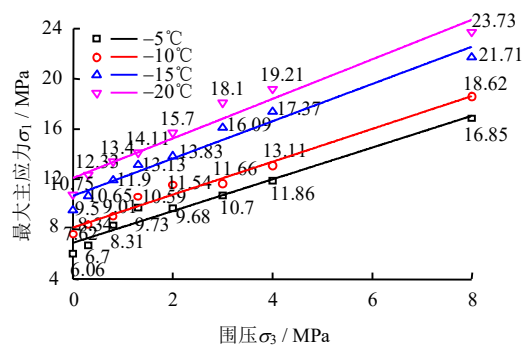


图 5 不同温度下抗压强度与围压的关系曲线
Fig.5 Curves of peak strength vs. confining pressure at different temperatures

通过式（1）的相关系数 R 可知，线性拟合结果较好，因此，式（1）可以用于描述不同温度条件下，冻结砂卵石的强度与围压的关系。

文献[11]认为冻土强度仍然满足 M-C 准则，于是按 M-C 准则计算冻结砂卵石的黏聚力 c 和摩擦角 φ ，结果列于表 2。

表 2 不同温度和围压条件下砂卵石强度参数

Table 2 Parameters of sandy gravel strength for different temperatures and different confining pressures

温度 /°C	σ_1 / MPa								黏聚力 c / MPa	摩擦角 φ / (°)
	$\sigma_3 = 0$ MPa	$\sigma_3 = 0.3$ MPa	$\sigma_3 = 0.8$ MPa	$\sigma_3 = 1.3$ MPa	$\sigma_3 = 2$ MPa	$\sigma_3 = 3$ MPa	$\sigma_3 = 4$ MPa	$\sigma_3 = 8$ MPa		
-5	6.06	6.70	8.31	9.73	9.68	10.70	11.86	16.85	3.07	6.76
-10	7.62	8.34	9.01	10.59	11.54	11.66	13.11	18.62	3.55	7.78
-15	9.50	10.65	11.90	13.13	13.83	16.09	17.37	21.71	4.37	11.31
-20	10.75	12.33	13.41	14.11	15.70	18.10	19.21	23.73	4.81	12.97

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

$$E = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} \quad (5)$$

式(2)所示,若以最大主应力作为冻结砂卵石的强度,则冻结砂卵石的强度与温度和围压关系为

$$\sigma_f = k_T \sigma_3 + b_T \quad (3)$$

式中: σ_f 为冻结砂卵石强度; k_T 、 b_T 为试验待定参数,与温度有关。于是将不同温度条件下的 k 、 b 值绘于图6,并根据其分布规律进行拟合。

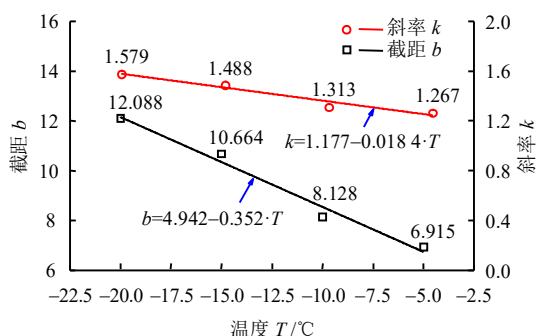


图 6 试验参数 k 、 b 取值

Fig.6 Values of parameter k and b

将 k 、 b 拟合式代入式(3)中,得

$$\sigma_f = (1.177 - 0.0184T)\sigma_3 - 0.352T + 4.942 \quad (4)$$

式中: T 为试验温度。不同温度、不同埋深条件下的冻结砂卵石强度可通过式(4)计算获得。

需要指出的是:①当温度接近冰点时(纯水冰点为0°C),水-冰相变会产生潜热,此处强度随温度的变化曲线产生突变、不再连续;②土颗粒外水分布依次为强结合水(冰点约为-180°C)、弱结合水(冰点约为-30°C)和自由水(冰点0°C)。因此,冻结试验和实际工程多以冻结自由水为主,而拟合式(4)的适用温度应在-30~0°C(结冰温度)之间。

参考文献[15],选取应力-应变曲线直线段斜率作为冻结砂卵石的弹性模量:

式中: σ_a 为应力-应变曲线上直线段起始点的应力值; σ_b 为应力-应变曲线上直线段终点的应力值; ε_a 为 σ_a 对应的轴向应变值; ε_b 为 σ_b 对应的轴向应变值。按式(5)计算,绘于图7。

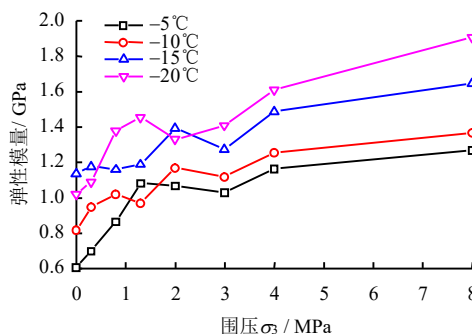


图 7 弹性模量与围压关系

Fig.7 Relationships between elastic modulus and confining pressure

如图7所示,同一温度条件下,冻结砂卵石弹性模量局部产生上下波动,但整体呈现随围压增加而增大的趋势,这一变化趋势符合多孔隙材料弹性模量随围压增加而增大的结论[16]。总体而言,冻结砂卵石在高围压条件下,会产生压融现象,削弱冰的黏结作用,导致冻结砂卵石的偏应力几乎不随围压变化,但由于围压压密作用,使得冻结砂卵石孔隙减小,弹性模量增大。

3.3 温度对冻结砂卵石强度特性的影响

将冻结砂卵石的强度随温度分布变化趋势绘于图8,可知冻结砂卵石强度随温度降低而增大,变化趋势近似服从指数分布[18],对各数据点进行拟合,待定参数列于表3。

$$\sigma_f = m \exp[n(T/T_0)] \quad (6)$$

式中: $T_0 = -1^\circ\text{C}$ 为无量纲化参考温度; m 、 n 均为试验参数。

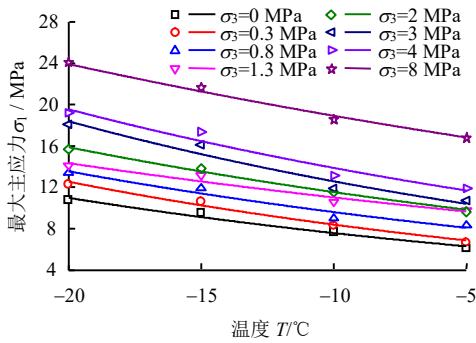


图 8 温度对于抗压强度的影响

Fig.8 Effects of temperature on compressive strength

如表 3 所示，各围压条件下，拟合参数的相关性较好，因此，可以推断冻结砂卵石的强度与温度近似呈指数分布。

表 3 参数 *m* 和 *n* 的取值
Table 3 Values of parameters *m* and *n*

围压 σ_3 / MPa	参数 <i>m</i> / MPa	参数 <i>n</i>	相关系数 <i>R</i>
0.0	5.22	0.037	0.981
0.3	5.61	0.040	0.988
0.8	6.80	0.034	0.961
1.3	8.46	0.026	0.957
2.0	8.37	0.032	0.993
3.0	8.60	0.038	0.952
4.0	9.84	0.034	0.957
8.0	14.96	0.023	0.989

图 9 是温度对冻结砂卵石黏聚力和摩擦角的影响。黏聚力和摩擦角随温度的变化趋势与强度随温度的变化趋势相同，均随温度降低而增大，对其线性拟合：

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 4.166 - 0.443T & R &= 0.937 \\ c &= 2.441 - 0.121T & R &= 0.978 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

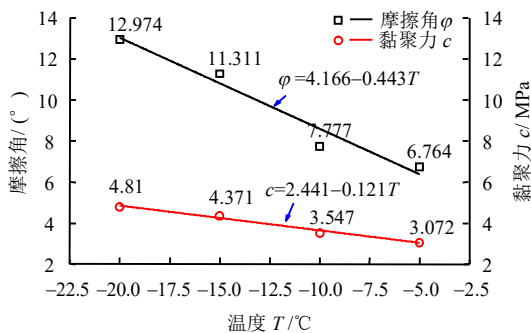


图 9 温度对于摩擦角和黏聚力的影响

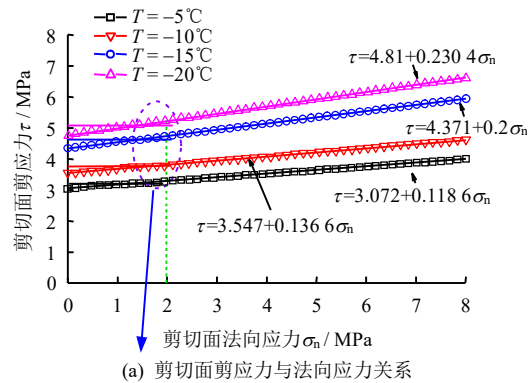
Fig.9 Effects of temperature on cohesion and friction angle

结合图 7 和图 9 分析，可以推断，冻结砂卵石强度随温度降低而增大的本质是同时增大了黏聚力和摩擦角，但黏聚力和摩擦角对砂卵石强度的影响作用尚不清楚，为此，进一步分析砂卵石剪切破裂面上的受力状态，按线性 M-C 准则，剪切面上的剪应力和法向应力满足

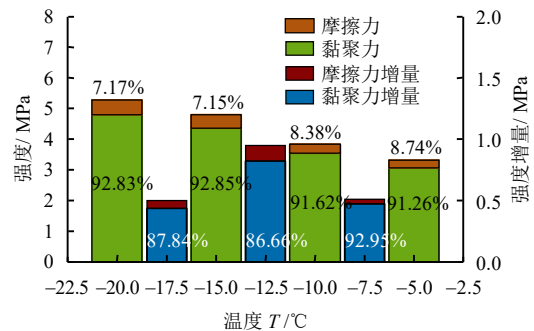
$$\tau = c + \tan \varphi \sigma_n \quad (8)$$

式中： τ 为剪切面上的剪应力； σ_n 为剪切面上的法向应力。

将表 2 中的数据代入式 (8)，并绘于图 10 中，可以看出，在试验围压范围内，黏聚力对试样强度的影响远大于摩擦角对强度的影响，以 $\sigma_n = 2$ MPa 的法向应力为例，-5、-10、-15、-20°C 条件下，黏聚力对冻结砂卵石强度的影响作用分别为 91.26%、91.62%、92.85%、92.83%，对温度变化导致的强度变化影响作用也超过 80%。由此可见，黏聚力是砂卵石强度的主要影响因素，且随温度的降低，影响作用逐渐增大。



(a) 剪切面剪应力与法向应力关系



(b) 黏聚力与摩擦力对试件强度影响比例

图 10 剪切面剪应力-法向应力关系

Fig.10 Relationships between shearing stress and normal stress of shear plane

值得注意的是随着围压的增加，摩擦力会逐渐增大，相应黏聚力的影响作用逐渐降低，若仍按线性 M-C 准则推算，当剪切面法向应力超过 20 MPa

时，摩擦力对强度的影响作用将会超过黏聚力。但马巍在文献[10]中记载，压力超过 13.5 MPa 时，冻土体的冰点将上升 1℃，剪切面上的剪应力与法向应力将不再满足线性变化，加速降低黏聚力对砂卵石强度的影响作用，推测摩擦力的影响作用会在 13~20 MPa 之间超过黏聚力。

3.4 冻结砂卵石破坏形态分析

图 11 为不同温度和围压条件下冻结砂卵石压缩破坏形态，将破坏形态划分为 3 类：①贯穿上下端面的张拉破坏，以 T5W0、T5W0.3、T10W0、T15W0、T15W0.3、T15W0.8 等为代表，此类破坏形态多发生于低围压条件，破裂面不显著且多沿冰透镜体扩展，该类型破坏形态与纯冰试件破坏形态

一致^[18]；②破裂面始/终于试件侧面的剪切破坏，以 T5W2、T5W8、T10W2、T10W4、T15W1.3、T15W8、T20W4、T20W8 等试件为代表，冻结砂卵石的破坏形态多以此类型破坏为主，具有一定的代表性，此类破坏形态多处于中等围压条件下；③试件发生体胀破坏，以 T5W4、T10W3、T15W4、T20W8 等为代表，发生体胀破坏时试样本身无明显裂纹，试样轴向尺寸减小，径向尺寸增大，此类破坏形态多发生于高围压条件下。

值得注意的是试件 T10W1.3、T15W3、T20W0、T20W0.3、T20W2、T20W3 破坏形态呈现一端破坏严重，另一端完好的特点。对照图 7 可以发现，此类试件的弹性模量较小，处于分布趋势“谷底”的

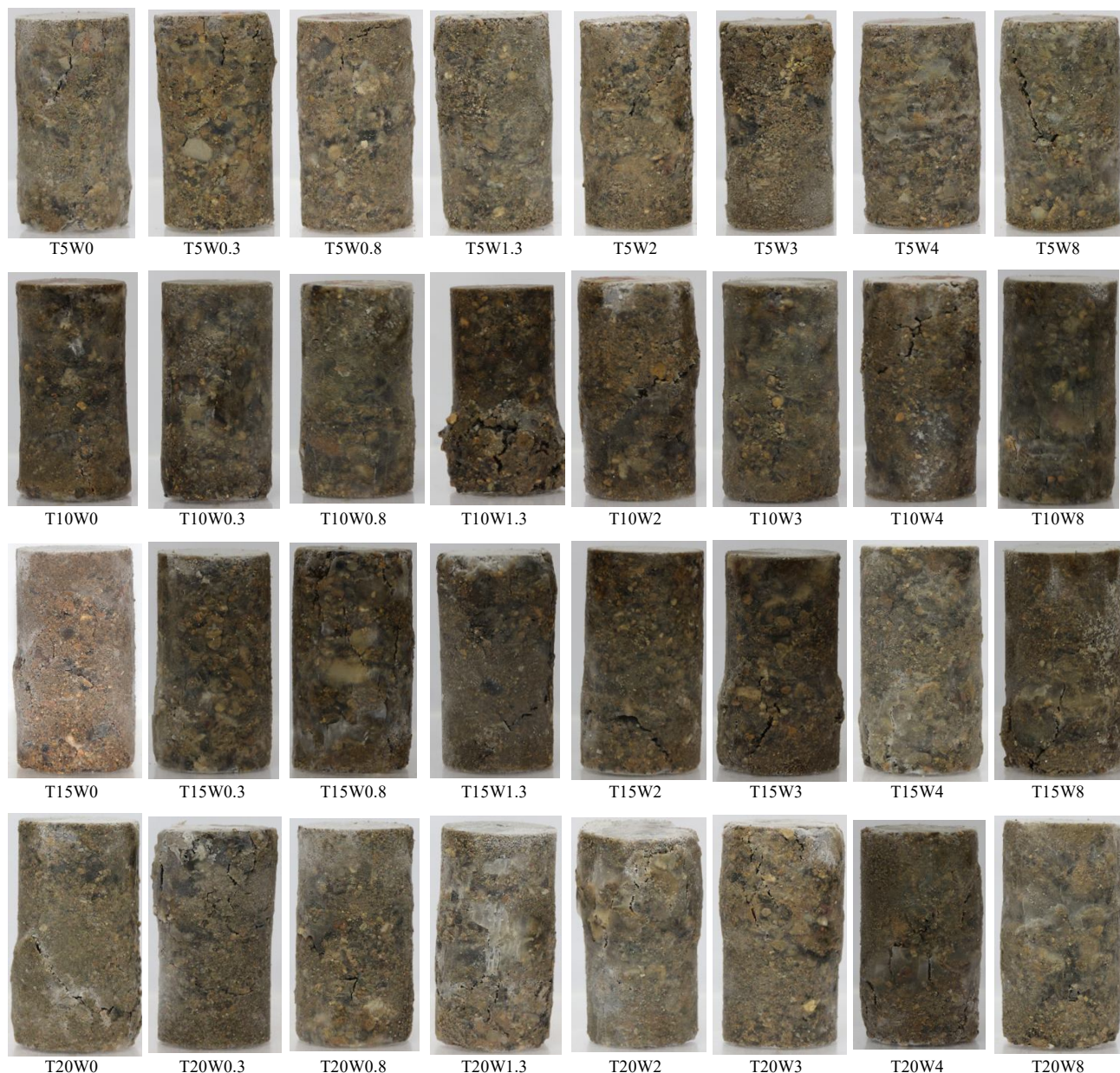


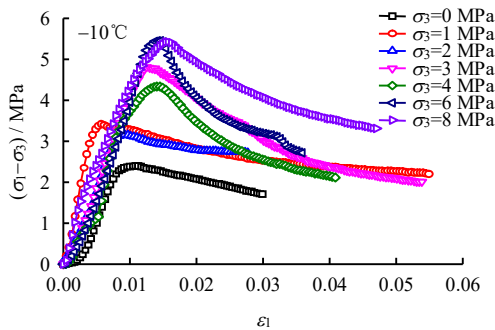
图 11 冻结砂卵石破坏性形态
Fig.11 Failure modes of frozen sandy gravel

位置，笔者查阅相关文献，并未见到此类型破坏形态，笔者猜测此类破坏形态可能与大粒径砂卵石的不均匀分布或温度的不均匀分布有关，此文不作详细分析。

3.5 冰的影响作用

冰的强度参数及破坏形态参考文献[19-20]，为排除人为因素对分析结果的影响，冰试样的制作、加工、试验条件、试验方法、数据处理方法等均与本文相同，不再赘述。鉴于篇幅限制，本节仅以 -10°C 为例，分析冰对冻结砂卵石力学特性的影响。

如图 12(a)所示，冰试样在强度达到峰值后，快速下降，呈应变软化形态，围压越高，峰后强度下降越快，脆性破坏越明显，与低围压条件下的冻结砂卵石应力-应变曲线相似；冰试样的破坏形态均为贯穿上下端面的张拉破坏（见图 12(b)），这与冻结砂卵石的破坏形态有一定差别（见图 11），由此可以推断，低围压条件下冻结砂卵石的变形破坏特性取决于冰的变形特性；中高围压条件下冻结砂卵石的变形特性受冰和砂卵石共同影响；冰和砂卵石骨架对变形特性的影响作用随围压的变化是此消彼长的过程。



(a) 应力-应变曲线



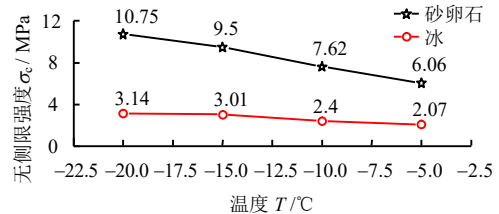
(b) 破坏形态

图 12 冰试样变形特性

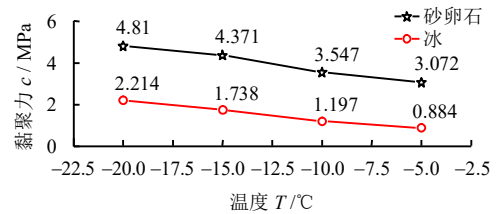
Fig.12 Deformation characteristics of ice sample

如图 13 所示，冰的无侧限抗压强度、黏聚力和摩擦角均随温度降低增加，变化趋势与冻结砂卵石

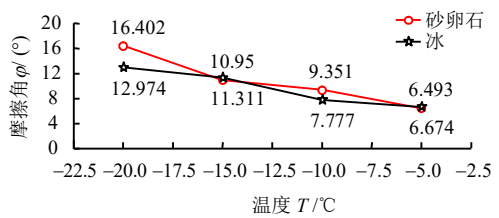
变化趋势一致，且相同条件下，冻结砂卵石的强度和黏聚力始终大于冰的强度和黏聚力，但摩擦角并无明显差别。由此可见，冻结作用的实质是增大了砂卵石颗粒间的黏聚力，而砂卵石颗粒的存在又增大了冰透镜体间的接触面积，最终形成冻结砂卵石强度 > 冰强度 > 融土强度的强度变化规律。



(a) 冰与砂卵石无侧限强度对比



(b) 冰与砂卵石黏聚力对比



(c) 冰与砂卵石摩擦角对比

图 13 冰与砂卵石强度参数

Fig.13 Strength parameters of ice and frozen sandy gravel

4 结 论

(1) 冻结砂卵石应力-应变曲线以应变软化形态为代表，峰后应力下降较快，与冰柱的应力-应变曲线形态^[19]相似，高负温、高围压条件下呈现理想塑性破坏形态，并未出现冻结黏/黄土中广泛出现的应变硬化形态。

(2) 冻结砂卵石的强度、黏聚力、摩擦角均随温度降低而增大；试验温度范围，强度呈指数分布，内黏聚力与摩擦角呈线性分布；黏聚力对砂卵石的强度起主导作用，温度影响的冻结砂卵石强度的实质是增大颗粒间的黏聚力。

(3) 冻结砂卵石强度和弹性模量均随围压增加而增大，但增加趋势逐渐减小，试验围压条件下，可按拟合式(4)计算不同温度和围压条件下冻结砂卵石的强度。

(4) 冻结砂卵石的破坏形态以破裂面始于试

件侧面的剪切破坏为主, 低围压条件下呈张拉型破坏, 受冰影响显著; 高围压、高负温条件下呈体胀型破坏, 破坏时试样本身不产生明显裂纹, 端部破坏形态分布离散, 无规律可循, 在下一步研究中重点关注。

参 考 文 献

- [1] 杜海民, 马巍, 张淑娟, 等. 三轴循环加卸载条件下高含冰冻结砂土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1675—1681.
DU Hai-min, MA Wei, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental investigation on deformation characteristics of ice-rich frozen silty sands under triaxial loading-unloading cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1675—1681.
- [2] 杜海民, 马巍, 张淑娟, 等. 应变率与含水率对冻土单轴压缩特性影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1373—1379.
DU Hai-min, MA Wei, ZHANG Shu-juan, et al. Effects of strain rate and water content on uniaxial compressive characteristics of frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1373—1379.
- [3] 赵晓东, 周国庆, 陈国舟. 温度梯度冻结黏土破坏形态及抗压强度分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1854—1860.
ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, CHEN Guo-zhou. Failure modes and compression strength of frozen clay under thermal gradient[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(12): 1854—1860.
- [4] 牛亚强, 王旭, 廖孟柯, 等. 冻结改良黄土三轴强度和变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 198—203.
NIU Ya-qiang, WANG Xu, LIAO Meng-ke, et al. Experimental study on triaxial strength and deformation characteristics of frozen-improved loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(Supp.2): 198—203.
- [5] EVIRGEN BURAK, TUNCAN MUSTAFA, TUNCAN AHMET. Stress - strain characteristics of frozen silty and clayey soils[C]//Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2015: 1798—1802.
- [6] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 7—11.
MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Yu. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(5): 7—11.
- [7] YAMAMOTO YUKO, SPRINGMAN SARAH M. Axial compression stress path tests on artificial frozen soil samples in a triaxial device at temperatures just below 0°C[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2014, 51(10): 1178—1195.
- [8] GE Xiao-xuan, YANG Zhao-hui, STILL Benjamin. Mechanical properties of naturally frozen ice-rich silty soils[J]. **New Astronomy**, 2013, 36: 19—25.
- [9] YANG Yu-gui, LAI Yuan-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2010, 64(1): 39—45.
- [10] 马巍, 吴紫汪, 张长庆. 冻土的强度与屈服准则[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 129—133.
MA Wei, WU Zi-wang, ZHANG Chang-qing. Strength and yield criteria of frozen soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2001, 15(1): 129—133.
- [11] 胡凯, 赖远明. 含盐冻结粉质砂土的强度参数和强度准则试验研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1199—1204.
HU Kai, LAI Yuan-ming. Experimental study on the strength parameters and strength criteria of saline frozen silty sand[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2014, 36(5): 1199—1204.
- [12] 马玲, 齐吉琳, 余帆, 等. 冻结砂土三轴试验中颗粒破碎研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 544—550.
MA Ling, QI Jin-lin, YU Fan, et al. Particle crushing of frozen sand under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 544—550.
- [13] 赵晓东, 周国庆, 李生生. 不同温度梯度冻结中砂加卸荷变形特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 158—162.
ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, LI Sheng-sheng. Deformation properties of frozen sand during loading and unloading in the presence of a thermal gradient[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2010, 39(2): 158—162.
- [14] 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.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.