

DOI: 10.11779/CJGE2022S1017

单粒组冻结砂土三轴压缩颗粒破碎规律研究

陈榕^{1,2}, 孙鹤^{1,3}, 郝冬雪^{1,2}, 武智勇^{1,2}, 高宇聪^{1,2}

(1. 东北电力大学, 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学, 吉林省电力基础设施安全评估与灾害防治重点实验室, 吉林 吉林 132012; 3. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 针对三种不同粒径的单粒组冻结砂土开展三轴剪切试验, 重点研究剪切过程中冻结砂土颗粒破碎演化规律及粒径对冻土颗粒破碎的影响。结果表明: 冻结温度为 -1°C 和 -2°C 时, 围压 $\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$ 情况下冻结砂土出现明显压融, 并且在 -1°C 时由于局部快速压融导致冻结砂土出现抗剪强度低于未冻土现象; 冻结砂土在剪切过程中出现颗粒破碎现象, 颗粒破碎率随轴向应变增大持续增长, 在高围压($\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$)下甚至出现加速增长趋势; 冻结砂土颗粒破碎率规律与未冻砂土不同, 小粒组冻结砂土颗粒破碎率最大, 该现象可能与冻土内部不同部位的冰晶作用有关。

关键词: 冻结砂土; 粒径影响; 围压; 颗粒破碎

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0092-06

作者简介: 陈榕(1979—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 主要从事土工合成材料加筋特性及软弱地基加固处理方法等方面的教学和科研工作。E-mail: lg1316cih@126.com。

Particle breakage characteristics of frozen ideal uniform sands under triaxial compression

CHEN Rong^{1,2}, SUN He^{1,3}, HAO Dong-xue^{1,2}, WU Zhi-yong^{1,2}, GAO Yu-cong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Key Lab of Electric Power Infrastructure Safety Assessment and Disaster Prevention of Jilin Province, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. Guiyang Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid, Guiyang 550001, China)

Abstract: The triaxial shear tests on three groups of frozen ideal sands are carried out to investigate the evolution rules of particle breakage during shearing process and the effects of particle size on the particle breakage. It is shown that obvious pressure melting of sand samples takes place under $-1^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$ when $\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$, and the strength of frozen sands is even less than the unfrozen strength due to rapid melting near shearing rupture plane at -1°C . The particle breakage of frozen sands occurs during shearing. The particle breakage rate continues to increase with the increase of the axial strain, and even develops with the acceleration after the peak strength under high confining pressure ($\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$). The influences of the particle size of frozen sands on the breakage rate is different from those of unfrozen sands. The particle breakage rate of the frozen sands of small particle group is the largest, which may be related to the action of ice crystals in different parts of frozen soils.

Key words: frozen sand; particle-size influence; confining pressure; particle breakage

0 引言

随着深部地下工程的发展, 土体受力已进入高应力范围。冻土场地的高压受荷稳定性评价、人工冻结凿井工程的设计施工等问题均与高应力下冻土力学特性息息相关。冻结砂土在高压下会发生颗粒破碎及压融现象, 影响其物理力学特性, 从而对工程建设产生显著的影响。

许多学者针对冻土强度影响因素、应力-应变行为和冻土本构模型等进行了研究。Arenson等^[1]、牛亚强等^[2]发现冻土的含冰率对其强度随着围压的变化程度有很大的影响。杜海民等^[3]基于冻结砂土三轴压缩

试验研究了围压与含水率对冻土破坏应变能密度的影响。王大雁等^[4]研究了 K_0 固结后冻土的初始切线模量、极限偏应力与围压、温度的关系。吴超等^[5]研究围压路径对冻土变形行为及强度的影响。赖远明等^[6]提出了冻结砂土的非线性莫尔准则和修正的邓肯-张模型。Qi等^[7]建议修正 Mohr-Coulomb 准则来描述冻土强度的非线性特征, 考虑了围压对冻土黏聚力和内摩擦角

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078108); 吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(20210509058RQ); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20210103KJ)

收稿日期: 2022-09-22

***通信作者:** (E-mail: haodongxue2005@126.com)

的影响。张德等^[8]建立不同围压影响下的冻结砂土损伤本构模型以反映低围压下的应变软化和高围压下的应硬化现象,探讨了冻土的强度和变形特性。

早在 1948 年 Terzaghi 的研究就引起了人们对土体颗粒破碎的重视^[9]。蒙进等^[10]对冰碛土在几种应力路径下的颗粒破碎特性进行了研究。张季如等^[11]通过侧限压缩试验研究了高应力下石英粗砂和细砾的颗粒破碎特性和石英砂砾破碎过程中粒径分布的分形行为。马巍等^[12]利用扫描电子显微镜对-5℃饱和冻结兰州砂土在 0~22 MPa 围压下进行观测,研究围压对颗粒破碎和冻土强度的影响。马玲等^[13]对冻结砂土进行了不同温度和围压下的三轴剪切试验,分析颗粒破碎对冻结砂土抗剪强度的影响。罗飞等^[14]基于能量原理建立了考虑颗粒破碎的冻结砂土非线性本构模型。

上述研究多为冻土强度特性、本构模型和非冻土颗粒破碎的研究,针对冻结砂土颗粒破碎所开展的研究十分有限,且多聚焦于温度、围压等影响因素。在冻结砂土粒径对其破碎演化规律及强度影响等方面的研究几乎未见。因此,本文针对三种单粒组冻结砂土进行不同围压下三轴压缩试验,并与相同粒径未冻土 CU 试验结果进行比较,重点探讨剪切过程中冻结砂土颗粒破碎演化规律及粒径对冻土颗粒破碎的影响。

1 试验方法

1.1 试验仪器及材料

本研究采用 GDS 公司生产的高压环境三轴试验系统 (HPETTS)^[15],包括 GDSLAB 数据采集软件、通道数据采集板、压力/体积控制器、500 kN GDSVIS 加载系统、三轴压力室及水浴控温系统。试样尺寸为 Φ 50 mm×100 mm。围压、反压控制器量程均为 0~16 MPa,轴压控制器量程为 0~32 MPa。偏应力、轴压、围压、应变等由传感器及数据转换装置自动采集。

试验砂样采用 ISO 福建标准砂,为探究粒径对颗粒破碎的影响,将标准砂进行筛分以获得三种单粒组砂样 d1, d2 和 d3。砂土相对质量密度为 2.65,制备相对密实度为 0.8 的密实砂样,各试样物理特性指标如表 1。

表 1 石英砂物理参数

Table 1 Physical parameters of quartz sand

砂样	粒径范围 d/mm	d ₅₀ /mm	e _{max}	e _{min}	e
d1	0.25~0.50	0.375	0.949	0.648	0.708
d2	0.50~1.00	0.75	0.804	0.552	0.602
d3	1.00~2.00	1.5	0.768	0.534	0.581

1.2 试验方案

为分析围压、温度对冻结砂土颗粒破碎发展规律的影响,制定饱和冻结砂土三轴试验方案。各粒组砂

样均在-5℃下进行围压 $\sigma_3 = 0.1 \sim 8$ MPa 的剪切试验,试验在轴向应变 $\varepsilon_1 = 20\%$ 时终止。为分析温度影响,又对 d2 砂样进行了-1℃和-3℃时不同围压下的剪切试验。为分析颗粒破碎演变规律,对砂样 d2 在温度为-5℃情况下的各围压剪切试验,选择不同的特征点终止试验(半峰值强度、峰值强度及轴向应变为 20%),进行颗粒破碎程度过程测量。共计进行冻结砂土剪切试验 28 个。所有试验均采用干砂击实法进行装样。为使砂样达到饱和状态,砂土抽气 2 h 后,注入蒸馏水,蒸馏水液面高于饱和器 10 cm 后,再次进行抽真空,直到水面不再产生气泡为止,然后进行 12 h 的饱水。将真空饱水后的试样连同模具浸没在水环境中放入恒温恒湿试验箱中,于-30℃的环境冻结 48 h。周围水环境可对冻结过程中砂样进行水分补给,有利于制备含冰量均匀的试样。砂样冻结后脱模,在低温条件下套入乳胶膜,随后将其快速装入三轴压力室,并立即注入低温硅油,以防止冻结试样出现融化的现象。利用德国 Julobo 水浴控温系统,将压力室中硅油温度逐步调节至预定温度,稳定保持 12 h 后施加相应围压,并以 0.1%/min 的轴向加载速率进行剪切试验。除在特征点终止的试样外,其余试样均剪切至轴向应变为 20% 时结束。将剪切完成后的砂样拆除,放入烘干箱烘干 10 h 后,利用振筛装置获得剪切后砂样颗粒级配曲线。

2 三轴试验结果

2.1 不同温度冻结砂土试验结果

图 1 为 d2 砂样在不同温度下的轴向应变与偏应力关系曲线。由图 1 可见,当围压由 0.1 MPa 增至 5 MPa 时,冻结砂土偏应力曲线也随之提高。但当围压提升至 8 MPa 时,温度为-1℃和-2℃的偏应力曲线出现明显降低,甚至在-1℃时 8 MPa 下冻结砂土峰值偏应力低于 0.1 MPa 时峰值偏应力。该现象表明,对于-1℃和-2℃的冻结砂土,当围压为 8 MPa 时,砂土出现明显压融现象,其强度曲线进入快速衰减阶段。而当温度为-5℃时,随着围压增加,冻结砂土峰值偏应力持续升高,这说明试样未出现明显压融现象。由此可见,冻结砂土的压融现象与冻结温度和围压均相关,冻结温度越高,围压越大,压融现象越明显。

将本次冻结砂土三轴试验数据与采用相同土样所进行的未冻结砂土不排水剪切试验^[16]偏应力峰值 q_t 相比较,如图 2 所示。可发现,当温度为-1℃,冻结砂土在围压为 0.1, 3, 5 MPa 下的峰值偏应力与相近密实度 ($D_r=0.83, 0.71, 0.77$) 下未冻砂土非常相近。由此可见,在-1℃时冻结砂土峰值强度几乎无变化,工程中无需考虑其冻结效应;在温度继续降低至-2℃

和 -5°C 时,砂土峰值强度呈现出不同程度的提高,冻结效应较明显;当 $\sigma_3=8\text{ MPa}$ 时,冻结砂土在 -1°C 和 -2°C 情况下峰值强度显著降低,甚至低于未冻土的不排水剪切强度。这可能是由于冻结砂土中剪切面处冰晶在较高温度和高应力共同作用下局部快速融化,形成了贯通的剪切面,其界面作用与未冻结砂土相比更低,从而引起了冻结砂土的强度快速下降。对于 -5°C ,其峰值偏应力随着围压增加持续升高,在 $0.1\sim 8\text{ MPa}$ 压力范围内未出现明显压融现象。文献[17]通过测定冻土在压力作用下未冻水含量的变化,也指出温度低于 -5°C ,围压在 10 MPa 以内,冻土的压融现象并不明显。本文所得的现象与该结论相吻合。

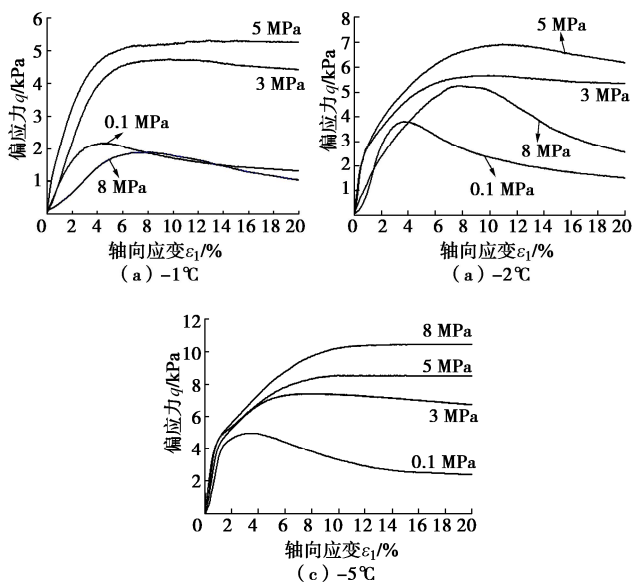


图1 不同温度下砂样d2的 $q-\varepsilon_1$ 关系

Fig. 1 Curves between q and ε_1 under different temperatures (Sample d2)

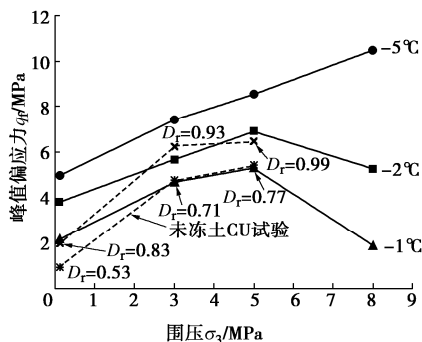


图2 不同温度下 q_f 与 σ_3 关系曲线(砂样d2)

Fig. 2 Relationship between q_f and σ_3 under different temperatures (Sample d2)

2.2 不同粒径冻结砂土试验结果

图3为不同单粒组砂土在 -5°C 冻结和 $0.1\sim 8\text{ MPa}$ 围压下获得的轴向应变-偏应力曲线。其中,曲线峰

值点用圆圈标出。由图3可见,三种粒径冻结砂土在轴向应变 $\varepsilon_1 < 1.5\%$ 时,偏应力迅速增长,此阶段曲线近似呈直线,表现为弹性性状;之后应力应变发展受围压影响明显不同。在 $\sigma_3=0.1\text{ MPa}$ 时,各组粒径试样的应力-应变关系均表现为应变软化型;随着 σ_3 的增加,应力-应变关系逐渐向应变硬化型转化。对于小粒径组d1, $\sigma_3 \geq 3\text{ MPa}$ 的曲线均表现为应变硬化,对于d2和d3粒径组, $\sigma_3=3\text{ MPa}$ 的曲线略呈现应变软化,而 $\sigma_3=5, 8\text{ MPa}$ 的曲线为明显的应变硬化。从整体规律上看,粒径较粗的冻结砂土峰值强度会比粒径小的冻结砂土峰值出现得更早。

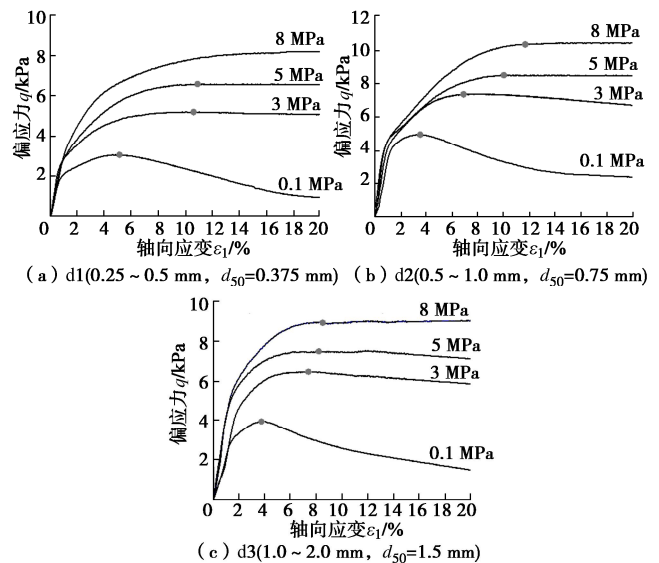


图3 三种粒径冻结砂土 $q-\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 3 Relationship between q and ε_1 for frozen sands with different d_{50}

3 冻结砂土颗粒破碎规律分析

3.1 冻结温度对颗粒破碎的影响

本文采用 Einav 提出的相对破碎率 B_r 对砂土在高压下的颗粒破碎程度进行量化[18]。不同温度下砂样颗粒相对破碎率随围压变化曲线绘于图4。由图4可见,冻结温度与砂土颗粒破碎率成反比,温度越低,颗粒破碎率越大。该现象与文献[13]的试验结果相一致。当 $\sigma_3 \leq 3\text{ MPa}$ 时,三种冻结温度下的颗粒破碎率差别较小;当 $\sigma_3 > 3\text{ MPa}$ 后,温度对颗粒破碎的影响明显增大,该现象主要与低温及高应力情况下砂土峰值偏应力提高程度更大有关,如图4(b)所示。还可发现, $\sigma_3 \leq 5\text{ MPa}$ 时,颗粒破碎率随围压增加快速增长,当 $\sigma_3 > 5\text{ MPa}$ 时增速明显减缓。但需要注意的是,当温度为 -1°C 时, σ_3 为 8 MPa 下的砂土颗粒破碎率出现了不符合上述规律的提高,一方面是由于围压的提高引起,另一方面也可能是由于 -1°C 下 8 MPa 围压使得土样出现明显的压融,剪切面处包裹砂粒的冰晶结构出

现融化, 导致砂粒外露, 从而引起了更大程度的颗粒破碎。

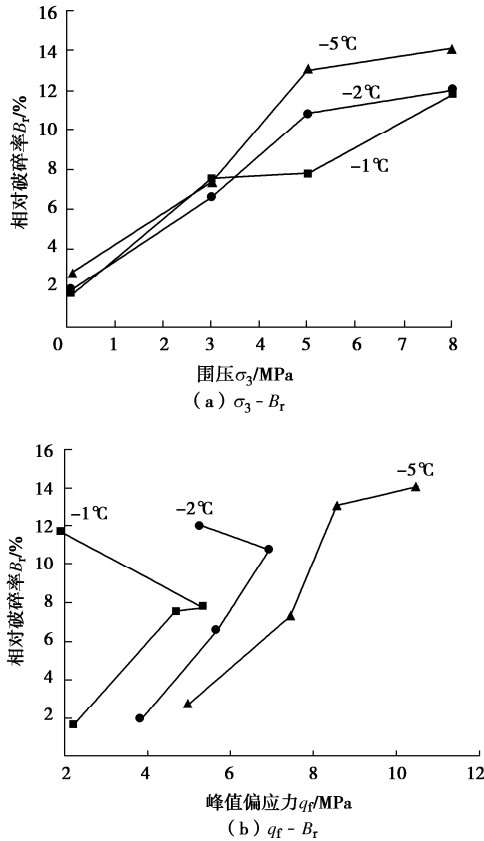


图 4 不同温度下剪切结束后的颗粒相对破碎率

Fig. 4 Values of B_r under different frozen temperatures ($\varepsilon_1=20\%$)

3.2 粒径对颗粒破碎的影响

为分析粒径对颗粒破碎程度的影响, 将不同粒组冻结砂样在剪切试验后 ($\varepsilon_1=20\%$) 的相对破碎率绘于图 5。同时与相同粒组未冻结砂样 CU 试验后的级配曲线结果进行对比, 其中未冻结砂样的颗粒破碎数据取自文献[16]中的 CU 试验结果。该试验的砂样粒径与本文相同, 所标注的 D_r 为砂样固结后的相对密度。

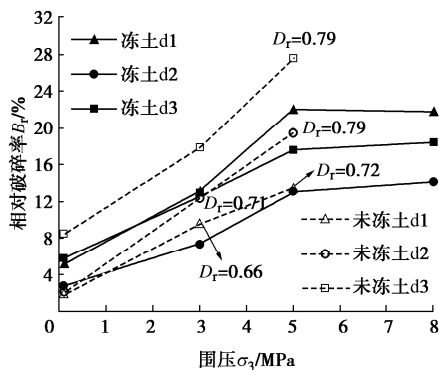


图 5 三种粒组砂样的颗粒相对破碎率

Fig. 5 Relative breakage rates of three sand samples

由图 5 可见, $\sigma_3 \leq 5$ MPa 时, 冻土与未冻土颗粒相对破碎率 B_r 随围压增大快速增加; 当 $\sigma_3 > 5$ MPa 后,

冻结砂土的颗粒破碎率明显减缓, 达到了临界粒径组。对于未冻砂土, 其粒组的颗粒粒径越大, 剪切结束后颗粒破碎程度越大, 这主要是由于粒径越大, 颗粒间接触点越少, 所引起的接触点应力水平更高。而对于冻结砂土, d1 粒组的颗粒破碎率 B_r 最大, 其次为 d3 粒组, 最小的为 d2 粒组; 并且 d1 粒组的冻土颗粒破碎率较未冻土大, d2 和 d3 粒组则呈现未冻土颗粒破碎率大于冻土, 这种现象主要与冻土中胶结冰和孔隙冰的作用有关。

颗粒破碎一方面是由于平均压力 p 的作用, 另一方面是由于偏应力 q 的作用。基于文献[16]中三种粒径未冻土的三轴试验 ($\sigma_3 \leq 5$ MPa) 可知, 砂样在固结过程中所出现的颗粒破碎量很小, 从侧面反映出颗粒破碎主要是在后继剪切过程中产生的, 即颗粒破碎的主要发生位置在剪切面附近。对于冻结砂土, 剪切面附近胶结冰对土颗粒有一定的包裹和分担剪应力的作用, 会使颗粒破碎量减小; 而更外围的孔隙冰包裹土体会抑制土体发生剪胀, 导致剪切面附近应力更大, 从而引起砂样颗粒破碎更多。可以说, 土样内部不同部位的冰晶对颗粒破碎发挥的作用不同。当由于剪切面外围孔隙冰的约束作用产生的颗粒破碎增加量大于剪切面附近胶结冰包裹阻碍作用产生的颗粒破碎减少量时, 冻土的颗粒破碎会大于未冻土; 反之, 未冻土颗粒破碎量大于冻土。因此, 对于 d1 粒组, 其孔隙率较 d2、d3 粒组大, 孔隙冰约束剪胀的作用更强, 从而引起颗粒破碎量增多。在较小应力时 ($\sigma_3=0.1$ MPa), d2 粒组冻结砂土的颗粒破碎率大于未冻结土, 除了孔隙冰的作用外, 在较小围压时, 冻土的强度较未冻土提高更多, 剪切过程中受更大的应力, 故在 $\sigma_3=0.1$ MPa 时冻土的颗粒破碎量更大。

3.3 颗粒破碎演化规律

图 6 显示了 d2 粒组冻结砂样和未冻结砂样^[16]在不同围压下剪切过程中相对颗粒破碎率 B_r 的发展情况。由图 6 可见, 冻结砂土相对颗粒破碎率随着轴向应变的增加持续快速增长, 在半峰值强度时 ($\varepsilon_1 < 2\%$) 应力应变关系呈现线弹性体的特征, 各围压下的颗粒破碎率均很小; 但超过半峰值点后, 偏应力和轴向应变的持续增加导致砂样出现了明显的颗粒破碎, 甚至在高围压 ($\sigma_3 \geq 5$ MPa) 下砂样在出现峰值强度后的相对颗粒破碎率呈加速增长趋势 (斜率变大)。这与其他学者所进行的宽粒径配比冻结砂土的破碎规律^[14]不同, 对于级配良好砂土, 其颗粒破碎率的增长速率随着轴向应变增加逐渐放缓。而本试验砂样为单一粒组, 粒径相对均匀, 导致颗粒更容易产生破碎现象, 且破碎所形成小颗粒对大颗粒产生了“研磨”作用, 在高应变下进一步加剧了颗粒破碎程度。

进一步比较 d2 组粒径下冻结砂土与未冻结砂土的颗粒破碎率差异 (图 6 (a)), 发现相同围压时, 峰值点处冻土的颗粒破碎率大于未冻土, 这可能是由冻结砂土较未冻土的偏应力更大所致。为统一分析, 将纵坐标表示为单位偏应力产生的颗粒破碎率, 即不同时刻的颗粒破碎率与峰值强度之比, 如图 6 (b)。由图可见, 对于峰值强度和终止加载时, 未冻土单位偏应力产生的颗粒破碎率更高, 如前文所述, 这也主要与孔隙中胶结冰和孔隙冰的作用有关。

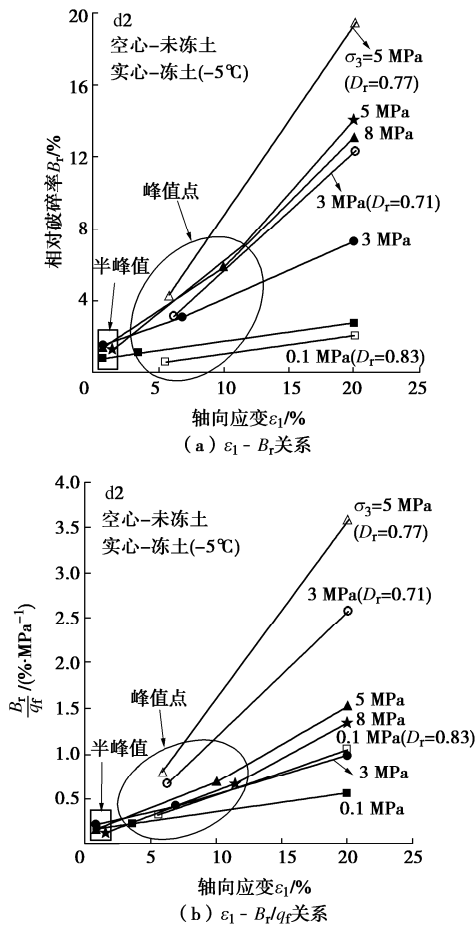


图 6 不同围压下相对破碎率的发展

Fig. 6 Development of B_r under various confining pressures

4 结 论

本文针对单粒组冻结砂土开展了一系列三轴剪切试验, 研究了冻结温度、砂土粒径及围压对冻结砂土颗粒破碎规律的影响, 主要结论如下:

(1) 冻结温度为 -5°C 时, 围压 $\sigma_3 \leq 8 \text{ MPa}$ 情况下冻结砂土未见明显压融; 冻结温度为 -1°C 和 -2°C 时, 围压 $\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$ 情况下冻结砂土出现明显压融, 并且在 -1°C 时由于局部快速压融导致冻结砂土出现抗剪强度低于未冻土现象。

(2) 与宽粒径配比冻结砂土颗粒破碎演化规律不同, 单粒组冻结砂土的相对颗粒破碎率随着轴向应变

的增加持续快速增长, 在 $\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$ 情况下冻结砂土相对颗粒破碎率甚至在峰值强度后呈加速增长趋势。

(3) 对于冻结砂土, 其粒径对颗粒破碎的影响规律与未冻土明显不同。三种单粒组冻结砂土的相对颗粒破碎率的大小关系为 $d1 > d3 > d2$ 。冻结砂土的颗粒破碎量不仅与颗粒大小有关, 还与冻土内部不同部位的冰晶作用有关。

参考文献:

- [1] ARENSON L U, JOHANSEN M M, SPRINGMAN S M. Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil samples[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2004, 15(9): 261 - 271.
- [2] 牛亚强, 赖远明, 王旭, 等. 初始含水率对冻结粉质黏土变形和强度的影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 499 - 506. (NIU Ya-qiang, LAI Yuan-ming, WANG Xu, et al. Research on influences of initial water content on deformation and strength behaviors of frozen silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 499 - 506. (in Chinese))
- [3] 杜海民, 马巍, 张淑娟, 等. 围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度影响特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1943 - 1950. (DU Hai-min, MA Wei, ZHANG Shu-juan, et al. Effects of confining pressure and water content on failure strain energy density for frozen silty sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1943 - 1950. (in Chinese))
- [4] 王大雁, 马巍, 常小晓. K_0 固结后卸载状态下冻土应力-应变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1252 - 1256. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Study on behavior of stress-strain for frozen soils subjected to K_0 consolidation by unloading triaxial shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1252 - 1256. (in Chinese))
- [5] 吴超, 张淑娟, 周志伟, 等. 围压路径对冻结粉质砂土变形行为及强度的影响研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1575 - 1582. (WU Chao, ZHANG Shu-juan, ZHOU Zhi-wei, et al. A study of the effect of confining pressure path on strength and deformation of frozen silty sand[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1575 - 1582. (in Chinese))
- [6] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1612 - 1617. (LAI Yuan-ming, CHENG Hong-bin, GAO Zhi-hua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1612 – 1617. (in Chinese))
- [7] QI J, MA W. A new criterion for strength of frozen sand under quick triaxial compression considering effect of confining pressure[J]. Acta Geotechnica, 2007, **2**(3): 221 – 226.
- [8] 张 德, 刘恩龙, 刘星炎, 等. 基于修正 Mohr-Coulomb 屈服准则的冻结砂土损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(4): 978 – 986. (ZHANG De, LIU En-long, LIU Xing-yan, et al. A damage constitutive model for frozen sandy soils based on modified Mohr-Coulomb yield criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(4): 978 – 986. (in Chinese))
- [9] 张家铭, 汪 稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊 2): 661 – 665. (ZHANG Jia-ming, Wang Ren, ZHANG Yang-ming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S2): 661 – 665. (in Chinese))
- [10] 蒙 进, 屈智炯. 高压下冰碛土的颗粒破碎及应力应变关系[J]. 成都科技大学学报, 1989, **21**(1): 17 – 22, 56. (MENG Jin, QU Zhi-jiong. Stress-strain behavior of glacial till under high confining pressure[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1989, **21**(1): 17 – 22, 56. (in Chinese))
- [11] 张季如, 胡 泳, 张弼文, 等. 石英砂砾破碎过程中粒径分布的分形行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 784 – 791. (ZHANG Ji-ru, HU Yong, ZHANG Bi-wen. Fractal behavior of particle-size distribution during particle crushing of quartz sand and gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(5): 784 – 791. (in Chinese))
- [12] 马 巍, 吴紫汪, 常小晓, 等. 围压作用下冻结砂土微结构变化的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(2): 152 – 158. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao, et al. Analysis of microstructural changes in frozen sandy soil under confining pressures by using scanning electronic microscope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(2): 152 – 158. (in Chinese))
- [13] 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 Ji-lin, YU Fan, et al. Particle crushing of frozen sand under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(3): 544 – 550. (in Chinese))
- [14] 罗 飞, 何俊霖, 朱占元, 等. 考虑颗粒破碎的冻结砂土非线性本构模型研究[J]. 地质力学学报, 2018, **24**(6): 871 – 878. (LUO Fei, HE Jun-lin, ZHU Zhan-yuan, et al. A study on nonlinear constitutive model of frozen sand considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2018, **24**(6): 871 – 878. (in Chinese))
- [15] 郝冬雪, 岳 冲, 陈榕, 等. 常压至高压下中砂剪切特性及应力-剪胀关系[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 765 – 772. (HAO Dong-xue, YUE Chong, CHEN Rong, et al. Shear characteristics and stress-dilation relation of medium sand under normal to high pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 765 – 772. (in Chinese))
- [16] 耿 爽. 高应力条件下中密砂和密砂颗粒破碎规律试验研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020. (GENG Shuang, Experimental Study on Particles Breakage Rules of Medium and Dense Sand Under High Pressure[D]: Jilin: Northeast Electric Power University, 2020. (in Chinese))
- [17] 马 巍, 吴紫汪, 张立新, 等. 高围压下冻土强度弱化机理分析[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(1): 27 – 31. (MA Wei, WU Zi-wang, ZHANG Li-xin, et al. Mechanisms of strength of frozen soils under high confining pressure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, **21**(1): 27 – 31. (in Chinese))
- [18] EINAV I. Breakage mechanics—part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, **55**(6): 1274 – 1297.

(编校: 明经平)