

DOI: 10.11779/CJGE201503020

冻结砂土三轴试验中颗粒破碎研究

马 玲^{1, 2}, 齐吉林^{3, 1*}, 余 帆¹, 尹振宇⁴

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 4. 南特中央理工大学土木工程系, 法国 南特 44321)

摘 要: 压力作用下颗粒发生破碎是引起砂土力学特性变化的重要因素之一, 冻结砂土也是如此。对冻结砂土进行了不同温度和围压下的三轴剪切试验, 并筛分得到三轴试验前后的颗粒大小分布曲线。通过引入 Hardin 定义的颗粒破碎率 B_r , 分析了围压与颗粒破碎的关系及颗粒破碎对冻土抗剪强度的影响。结果表明: 在温度为 -0.5°C , -1°C , -2°C , -5°C 和围压为 0.5, 2, 5, 10 MPa 的条件下, 三轴剪切过程中会产生较为可观的颗粒破碎; 颗粒破碎率 B_r 随围压增大, 到达一定围压后 B_r 不再随着围压的增大发生明显变化, 即存在一个颗粒不再发生明显破碎的临界围压 σ_c 。结合前人研究发现, -5°C 下一般工程关心的围压范围内压融对冻土力学特性没有显著影响, 而颗粒破碎起控制性作用。分析表明: -5°C 条件下在不同的围压范围颗粒破碎对抗剪强度具有不同的影响。试验所采用的围压范围内, 随着围压的增大, 颗粒破碎率增大使得冻土的抗剪强度降低; 破碎率达到极限以后, 由于破碎的颗粒重排列又导致抗剪强度有所提高。

关键词: 冻结砂土; 颗粒破碎; 三轴试验; 压融; 强度

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)03-0544-07

作者简介: 马 玲(1987-), 女, 宁夏西吉人, 博士研究生, 主要从事冻土力学与寒区工程等方面的研究。E-mail: maling0962@mails.jlu.edu.cn。

Particle crushing of frozen sand under triaxial compression

MA Ling^{1, 2}, QI Ji-lin^{3, 1*}, YU Fan¹, YIN Zhen-yu⁴

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Architecture and Civil

Engineering, Beijing 100044, China; 4. Department of Civil Engineering, Ecole Centrale de Nantes, Nantes 44321, France)

Abstract: Particle crushing is one of the important factors to change mechanical properties of frozen sand, which is hardly studied quantitatively so far. Triaxial compression tests are carried out on a saturated frozen sand at -0.5°C , -1°C , -2°C and -5°C under the confining pressure of 0.5, 2, 5 and 10 MPa, respectively. The particle crushing ratio, B_r , defined by Hardin is obtained through the particle-size distribution curves for samples before and after triaxial tests. It aims to analyze the relationship between confining pressure and particle crushing as well as the influence of the particle crushing on strength. The testing program presents a considerable particle crushing in triaxial compression of the frozen sand. There is a critical confining pressure σ_c . When $\sigma_3 < \sigma_c$, the particle crushing ratio, B_r , increases with the increase in confining pressure; otherwise, B_r does not increase obviously with the increase in confining pressure. Previous studies as well as the test results from this work show that under -5°C , pressure melting does not play important roles in mechanical properties of frozen soils. Therefore the test results under this temperature are taken for analysis without considering pressure melting. It is found that particle crushing has a dual influence on the strength of frozen sand. Under low pressure levels, particle crushing leads to weakening and strength decreases; with the increase in pressure, particle crushing reaches the maximum and particle rearrangement tends to improve the strength.

Key words: frozen sand; particle crushing; triaxial compression test; pressure melting; strength

0 引 言

人们很早就注意到砂土在压力作用下颗粒破碎的现象, 并发现一定条件下颗粒破碎对土体变形和破坏的影响不可忽略。1948 年 Terzaghi 等通过试验最早注意到砂土在高压下颗粒破碎显著^[1], DeBeer 在 1963

年进行了均匀砂样的一维压缩试验, 发现应力达到 15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172253); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目 (CIT&TCD20150101); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目 (SKLFS201210)

收稿日期: 2014-06-06

*通讯作者

MPa 时颗粒破碎相当明显, 而当应力超过 34 MPa 以上, 随着应力的增加破碎量逐渐降低^[2]。此后, 颗粒压碎的研究受到更为广泛的重视。早期主要是定性描述颗粒破碎的程度和影响因素及判断颗粒破碎发生条件。Kjaernsli 等通过砂土三轴压缩试验表明, 应力水平一定, 表面粗糙、不规则的颗粒更易压碎^[3]; Hall 等发现应力一定, 级配良好的砂破碎少于级配不良的砂^[4]。还有研究发现, 颗粒压碎还和颗粒形状及成分、围压大小等因素有关, 其他条件相同情况下, 棱角状、矿物成分硬度小的砂粒更易压碎, 围压大压碎相对严重^[5]。在大量定性研究的基础上, 人们提出了描述颗粒破碎的评价指标, 不断将颗粒破碎定量化。Marsal 提出了破碎程度的定义^[6], 为试验前后两条颗粒大小分布曲线上某一粒径最大距离之差 R ; Lade 定义试验前后重量百分比在 10% 时的颗粒粒径 D_{10} 比值作为破碎率^[7], 而 Lee 等定义试验前后颗粒大小分布曲线上重量百分比在 15% 时的颗粒粒径 D_{15} 之比为破碎率^[8]; Hardin 定义破碎率为总破碎量与破碎潜能之比^[9]。对于以上的量化指标, 尹振宇等进行了对比讨论, 明确了其优缺点, 表明 Hardin 定义的破碎率更为合理^[10]。

针对颗粒破碎对力学性质的影响, 杨光等分析得到颗粒破碎率增大导致峰值内摩擦角减小, 二者呈线性关系^[11]; 郭熙灵等通过试验发现颗粒破碎对剪胀性有明显影响^[12]; 汪稔等针对钙质砂在低应力水平下的破碎现象, 耦合颗粒破碎建立钙质砂的本构关系^[13], 其他学者也开展了考虑颗粒破碎的粗颗粒土本构关系模型的研究^[14-17]。综上所述, 在融土的颗粒破碎研究发展过程中, 首先通过简单的试验发现颗粒破碎现象的存在, 随后探明了影响颗粒破碎的因素, 通过提出定量化描述颗粒破碎的颗粒破碎率概念, 逐渐深化颗粒破碎对土力学性质的影响研究。

在冻土力学研究方面, Chamberlain 等在分析冻土从低压到高压下力学性质变化时提出了高压下抗剪强度主要受滑动摩擦、颗粒破碎和重新排列控制的假设^[18], 但是没有直接证据验证。马巍等利用扫描电子显微镜, 对饱和冻结兰州砂土在 -5°C 和围压 0~22 MPa 下进行观测发现: 低围压下以压密为主, 强度随围压的增大而增大; 围压再增大时, 颗粒出现破碎现象, 致使强度随着围压的增大而缓慢降低; 较大围压下, 颗粒破碎程度加剧, 某些团粒中出现大的裂隙, 结构联结破坏, 导致冻土强度急剧下降^[19]。以上研究都基于定性分析, 定量分析冻土颗粒破碎及其对力学特性影响将有助于研究冻土受力变形的机理, 并提出更为合理的本构关系, 但这方面的研究很少见诸文献。

本文采用冻结砂土试样进行三轴试验, 通过不同温度和围压下的三轴剪切和筛分试验, 得到不同条件

下试验前后的颗粒大小分布曲线并计算出颗粒破碎率, 定量分析颗粒破碎和围压的关系。并针对压融影响较小的情况, 定量研究压碎对冻结砂土强度的影响。

1 试验与方法

1.1 试验仪器

本试验采用了自主研发的多功能环境材料试验机, 如图 1 所示。该仪器采用的是模块组合结构, 由以下几个部分组成: 围压加载系统、轴压加载系统、制冷系统、控制系统等, 可以通过力控制和位移控制两种控制模式来实现三轴试验。轴向负荷、温度、位移、围压和体变的最小度量值分别为 1 N, 0.1°C , 0.001 mm, 1 kPa 和 1 mm^3 , 测试精度均在 $\pm 1\%$ 。



1- 计算机; 2- 台架; 3- 压力室; 4- 控制柜; 5- 冷浴; 6- 围压加载装置; 7- 储油罐; 8- 气泵

图 1 多功能环境试验机

Fig. 1 Multifunctional environmental test apparatus

1.2 试验材料

为便于同行参考, 试验选取中国 ISO 标准砂(厦门艾斯欧标准砂有限公司生产)作为研究对象。由于粗颗粒更易于受压破碎, 提高粗颗粒的比例便于筛分观测到更为显著的颗粒破碎量, 从而分析颗粒破碎对冻土强度的贡献。因此通过筛分选取 3~0.5 mm 粒径范围颗粒组, 按 2~3 mm : 1~2 mm : 0.5~1 mm = 1 : 2 : 3 比例配制而成。材料的其他基本参数见表 1。

表 1 试验材料基本参数

土的分类	Table 1 Basic indexes of test materials			干重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	
	粒径组成/%			$\gamma_{d,\max}$	$\gamma_{d,\min}$
	2~3 mm	2~1 mm	1~0.5 mm		
砂土	16.67	33.33	50	18.0	15.9

1.3 试验方法

制备砂土试样, 抽气饱水后将试样连同模具浸没在水环境中放入制冷冰箱, 于 -30°C 的环境中迅速多向冻结。冻结过程中从试样上部和四周进行水分补给, 有利于制备含冰量均匀的试样。冻结 48 h 后脱模, 制成直径 61.8 mm, 高 125 mm, 干重度为 17.6 kN/m^3 的冻结砂土试样, 套入橡皮膜置于特定试验温度下恒温 12 h 以上后进行试验。试验时, 快速将试样装入试

验机的压力舱, 然后密封舱室, 通过预冷的液压油提供温度和围压环境。热敏探头测量油温并调节至目标温度, 波动范围小于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 恒温级 3 h 试样温度稳定后, 保持围压不变的情况下以 $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的速度轴向加载, 直至变形达到 20%。在整个试验加载过程中, 记录轴向应力、轴向变形、径向应力和体积变形; 试验结束后取出破坏的试样, 烘干后进行筛分试验, 得到试验前后颗粒大小分布曲线。本试验项目所采用的温度分别为 -0.5°C , -1°C , -2°C 和 -5°C , 围压分别为 0.5, 2, 5 和 10 MPa。

2 试验结果分析

2.1 颗粒破碎量化指标的选取

颗粒破碎研究关键在于选取一个合理的量化指标进行度量^[9-10]。本文选用 Hardin 定义的破碎率 B_r 如下:

$$B_r = B_t / B_p, \quad (1)$$

式中, 总破碎量 B_t 是初始颗粒大小分布曲线与试验后颗粒大小分布曲线之间的面积, 初始破碎势 B_p 是试验前颗粒大小分布曲线与粒径线 $d=0.074 \text{ mm}$ (小于该量级的颗粒被认为不再发生破碎^[9]) 之间的面积, 见图 2。

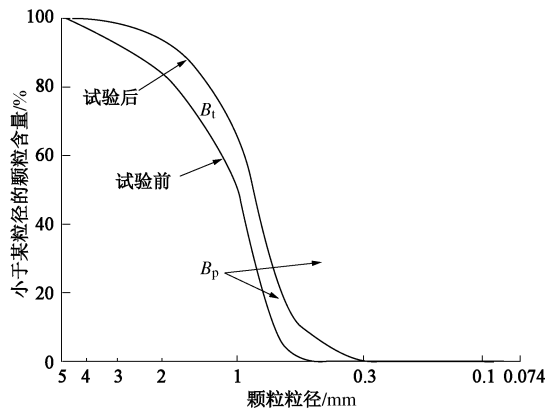


图 2 颗粒破碎率 B_r 定义的示意图

Fig. 2 Schematic of particle crushing ratio B_r

2.2 颗粒破碎与围压的关系

图 3 为三轴试验前后砂样筛分得到的颗粒大小分布曲线, 可看出随着围压的增大, 颗粒大小分布曲线逐渐向细颗粒比例增加的方向移动, 说明围压越大颗粒破碎越多, 细颗粒含量明显增大。

根据式 (1), 由图 3 颗粒大小分布曲线计算出颗粒破碎率 B_r , 可得到图 4 所示的颗粒破碎率和围压的关系。可见, 在 1~5 MPa 时, 随围压增大, 颗粒破碎率增大较快; 在 5~10 MPa 时, 随着围压增大, 颗粒破碎率增长缓慢, 折线近于水平, 说明已经到了临界粒径组, 围压再增大, 颗粒不再发生明显的破坏。从微观角度来看, 不规则的土颗粒初始接触面积较小, 在一定围压下剪切时, 接触点局部应力集中, 棱角颗粒局部边角折断、剪断, 粗颗粒破碎成细颗粒, 并使

得粗颗粒接触面变大, 接触点局部应力减小, 颗粒不易再发生破碎, 最后达到了临界粒径级配组, 已经破碎的细颗粒发生位移并重新排列。同时, 由于低温条件下土样的破坏需要较大的轴向应力, 其对颗粒破碎也有贡献, 因此相同围压下颗粒破碎率随温度的降低而增大。

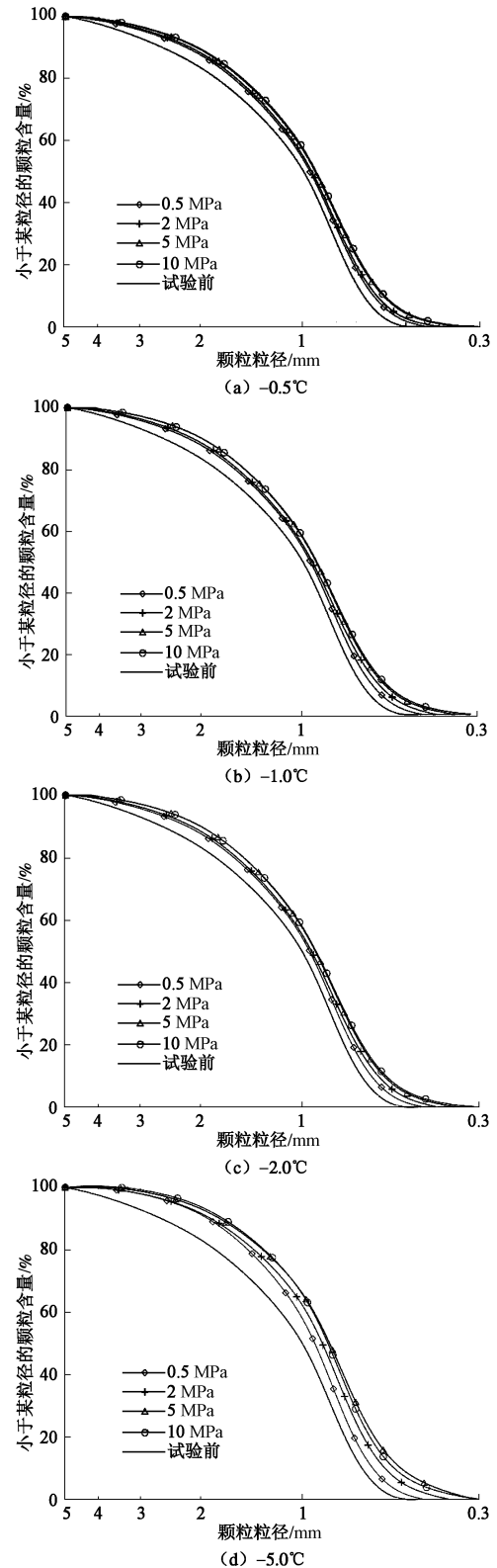


图 3 不同温度下三轴试验前后筛分曲线

Fig. 3 Particle-size distribution curves before and after triaxial compression tests under different temperatures

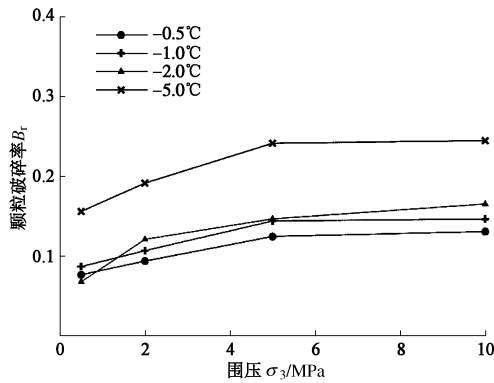
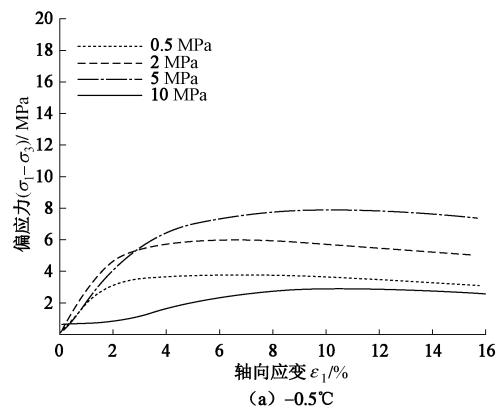


图4 不同温度下颗粒破碎率与围压关系曲线

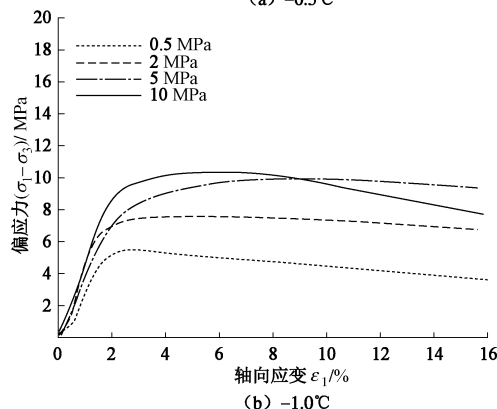
Fig. 4 Relationship between particle crushing ratio and confining pressure under different temperatures

2.3 不同温度下的压融分析

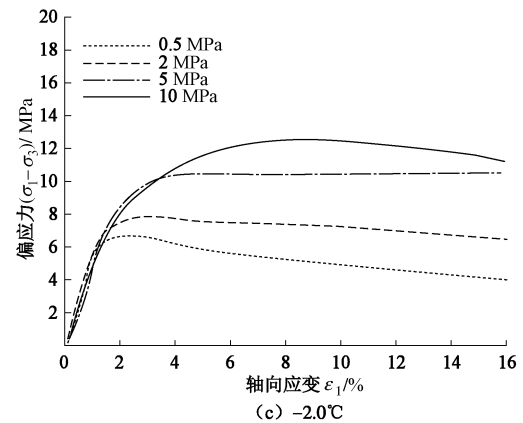
图5为不同温度下的冻结砂土三轴试验应力应变曲线。由图5可见-0.5℃时,抗剪强度随着围压增大而增大,当围压达到10 MPa时强度反而大幅度降低;-1℃时5 MPa和10 MPa出现交叉,强度相差不大;-2℃时围压10 MPa的强度比5 MPa明显增加;-5℃的低温条件,抗剪强度随围压的增大保持平稳增加。可看出随着温度由-0.5℃逐渐变化到-5℃,围压为10 MPa和5 MPa应力应变曲线的相对位置也发生变化。这是由于高温高压状态下压融现象显著造成了强度大幅降低,而低温下压融量较少,强度受其影响较小而随围压增大而大致增大,与常规土相似。压融和压碎都会导致冻结砂土的弱化,但是这两个现象在一定的条件下相互伴生很难分离^[20]。如果能找出压融影响较小可忽略的情况,就能讨论压碎对冻土抗剪强度的影响。



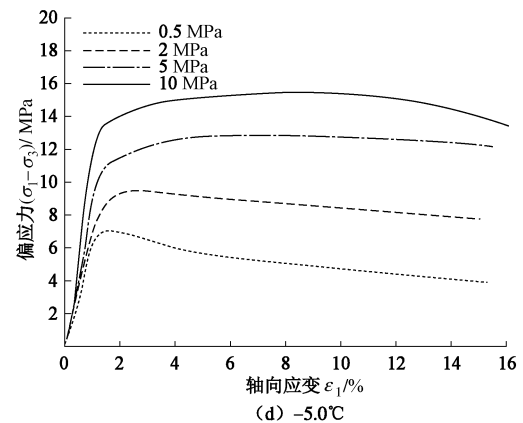
(a) -0.5℃



(b) -1.0℃



(c) -2.0℃



(d) -5.0℃

图5 不同温度下冻结砂土应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of frozen sand under different temperatures

图6为马巍等^[20]测定的冻土在压力作用下未冻水含量的变化。可以看出,温度低于-5℃,围压在10 MPa以内,压融并不明显。

由图5应力应变曲线中提取数据,按照下列关系式计算平均主应力:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2)$$

可得到试验中平均主应力与颗粒破碎率的关系,如图7所示。从图7中可以发现,在-0.5℃和-1℃两级温度下,平均主应力有折回现象,而-2℃和-5℃平均主应力随着颗粒破碎率持续增大。由图4可知,不同温度下颗粒破碎率随围压增大的规律大致相似,而图7显示高温条件下,围压为10 MPa时平均主应力比上一级围压反而减小,表明高温条件下压融对强度弱化影响大,低温条件下压融量小对强度影响不大。结合图7中未冻水含量与压力关系可以判断出,本论文中采用的-5℃条件下0.5~10 MPa压力范围未冻水含量变化不大,压融不会对强度产生显著的影响,冻结砂土强度的变化则主要归因于颗粒的压碎和其他因素。故下面采用-5℃的试验资料来分析颗粒破碎率对冻结砂土强度的影响。

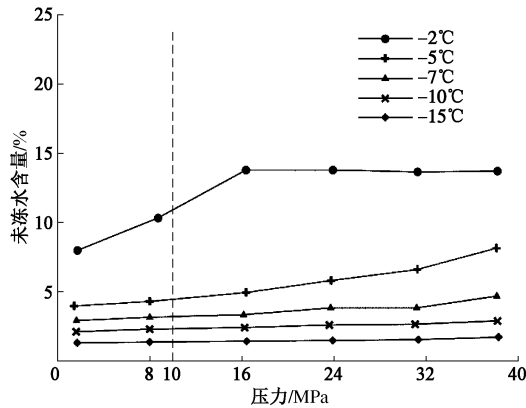
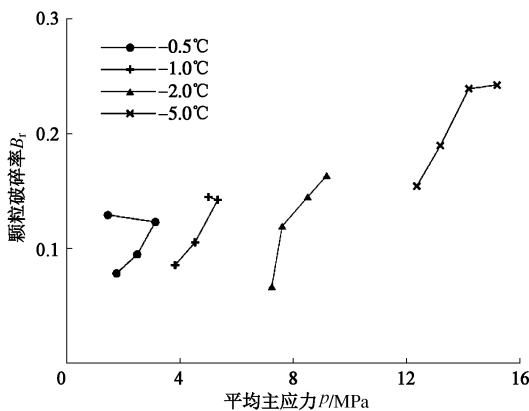
图6 冻土中未冻水含量随压力的变化关系^[20]Fig. 6 Change of unfrozen water content with pressure^[20]

图7 颗粒破碎率和平均主应力的关系

Fig. 7 Relationship between particle crushing ratio and mean principal stress

2.4 颗粒破碎对抗剪强度的影响

颗粒破碎主要影响冻结砂土的摩擦强度, 对其黏聚力影响较小, 因此下面分析 -5°C 下的强度包线及内摩擦角变化与颗粒破碎的关系。由试验所得冻结砂土的强度包线如图8, 可看出实测强度包线是斜率不断减小的曲线, 表明在围压增大过程中摩擦分量起到的作用逐渐减小。

土的摩擦分量变化由两方面因素决定, 一是由于剪切引起土体的体积变形对强度产生影响, 其中剪胀(+)会使土颗粒从低势能状态变为高势能状态, 消耗额外功而提高抗剪强度, 剪缩(-)反之。二是由于剪切引起颗粒破碎对强度会产生双重效应, 一方面颗粒破碎使得结构联结破坏, 从而使冻结砂土强度下降; 另一方面颗粒破碎后又开始重新排列, 这样趋向密实需要外力额外做功, 因而提高了冻结砂土的抗剪强度。从以上分析可以得到以下关系式:

$$\tau_f = f_c(T, \sigma_3) + \sigma \tan \varphi_r \pm f_{\varepsilon_v}(T, \sigma_3) \pm f_{B_r}(T, \sigma_3), \quad (3)$$

式中, τ_f 为冻结砂土的抗剪强度, f_c , f_{ε_v} 和 f_{B_r} 分别为黏聚力、剪胀和颗粒破碎与重排列对抗剪强度的贡献, 温度 T 和围压 σ_3 通过压融、压碎及控制体变而影

响三者的取值; σ 为法向应力, φ_r 为滑动摩擦角。其中, 滑动摩擦角反映材料沿固体表面滑动产生的摩擦, $\sigma \cdot \tan \varphi_r$ 是排除剪胀、颗粒破碎和重排列对强度影响之后的摩擦强度。通常滑动摩擦角与材料本身属性有关是定值。石英砂滑动摩擦角为 $22^{\circ} \sim 24.5^{\circ}$, 本文采用的标准砂主要成分为石英砂, 故取中间值 23° 用于以下计算。

本文选取 -5°C 的试验数据目的在于简化式(3)来分析颗粒破碎对抗剪强度的作用。之前讨论了 -5°C 情况下冻结砂土的压融量并不明显, 故可以忽略温度和围压影响下压融造成的黏聚力变化, 则可以近似假定式(3)中黏聚力 c 为定值。式中黏聚力和滑动摩擦强度 $\sigma \cdot \tan \varphi_r$ 也为定值, 而剪胀对强度的贡献可通过计算获得, 于是可以得到颗粒破碎对冻结砂土强度的贡献。

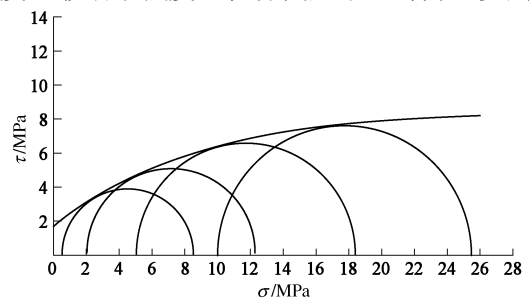
由李广信^[21]编著的《高等土力学》中理论可知破坏时的体积变形对内摩擦角的影响关系如下式:

$$\tan^2 \left(45^{\circ} + \frac{\varphi_r}{2} \right) = \tan^2 \left(45^{\circ} + \frac{\varphi_r}{2} \right) - \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_1}, \quad (4)$$

式中, φ_r 为不发生剪胀和颗粒破碎时标准砂的摩擦角, 即为滑动摩擦角 23° 。代入式(4)得在黏聚力和滑动摩擦力基础上仅考虑剪胀效应的强度包线如图9, 其中破坏时的 $\frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_1}$ 由 -5°C 三轴剪切体应变-轴向

应变曲线图10得到。将图8和图9结合起来可以得到图11, 其中①代表纯滑动摩擦强度包线, 为式(3)中 $c + \sigma \tan \varphi_r$; ②表示实际测量的强度包线, 即图8中考虑了黏聚力、滑动摩擦强度及剪胀和颗粒破碎影响的强度包线, 也是式(3)中冻结砂土的抗剪强度 τ_f ;

③表示在黏聚力和滑动摩擦力基础上仅由剪胀(+)和剪缩(-)引起的强度包线的变化, 即图9中的强度包线, 为式(3)中 $c + \sigma \tan \varphi_r \pm f_{\varepsilon_v}$ 代表的曲线。因此, 图11中②和③之间的强度是颗粒挤碎和重排列的贡献量。分离出该贡献量作为由颗粒挤碎和重排列引起的抗剪强度增量, 将其与颗粒破碎率随围压的变化规律作比较得图12。结合图11, 12分析可知: ①基于理想状态的滑动摩擦, 低围压下的剪胀提高冻结砂土强度, 高围压下的剪缩降低冻土强度; ②颗粒破碎一定程度上影响了强度, 在低围压下, 外力主要用于

图8 -5°C 冻结砂土实测强度包线Fig. 8 Measured strength envelope of frozen sand under -5°C

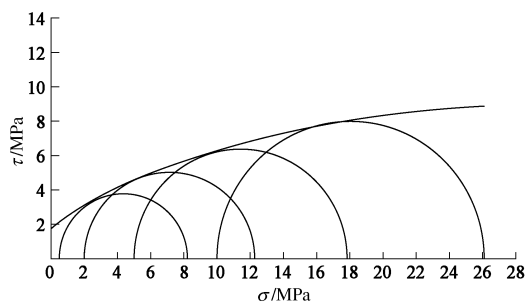


图 9 -5℃下不考虑颗粒破碎仅考虑剪胀的冻结砂土强度包线

Fig. 9 Strength envelope of frozen sand considering effect of dilatancy while without considering crushing under -5℃

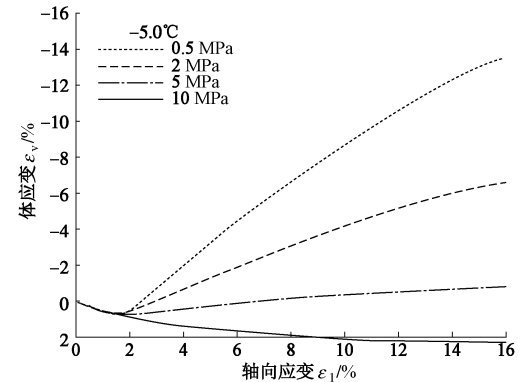


图 10 -5℃冻结砂土轴向应变-体应变曲线

Fig. 10 Axial strain-volumetric strain curves of frozen sand under -5℃

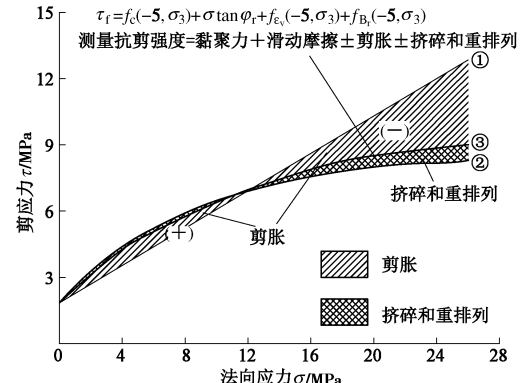


图 11 冻结砂土的强度包线及影响因素

Fig. 11 Strength envelope of frozen sand and influencing factors

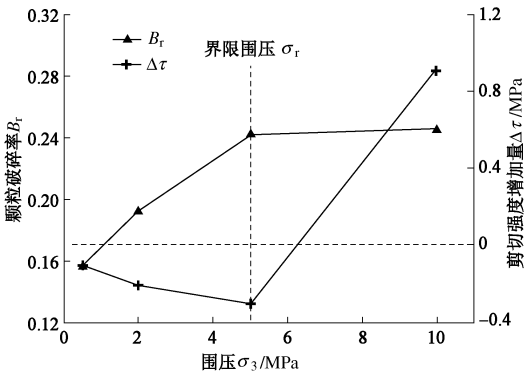


图 12 颗粒破碎率和抗剪强度增量关系

Fig. 12 Relationship between particle crushing ratio and shear strength increment

冻土的颗粒破碎导致的结构联结破坏还未能重排列，因此强度稍有减小；当围压继续增大，土体颗粒到达一定程度不再继续反生破碎反而进行位移、重新排列，增加了密实度故强度提高。

3 结 论

本文针对冻结砂土试样进行温度为-0.5℃，-1℃，-2℃，-5℃和围压为 0.5，2，5，10 MPa 的三轴剪切试验，试验前后的试样进行筛分得到颗粒大小分布曲线，采用 Hardin 定义的颗粒破碎率分析了围压与颗粒破碎关系。并结合本试验与前人研究成果，针对压融不显著的情况，定量分析了颗粒破碎对冻土抗剪强度的影响，得出如下结论：

(1)冻结砂土在三轴剪切过程中会产生较为可观的颗粒破碎，从而影响了冻结砂土的力学性质，而颗粒破碎对力学性质的影响主要表现在引起了内摩擦角的变化。

(2)本试验所采用的压力范围内，颗粒破碎率 B_r 随围压增大而增大，到达一定围压后，围压增大颗粒不再发生明显的破碎。因此冻结砂土存在一个界限围压 σ_r ，本文采用的材料及试验条件下，冻结砂土界限围压 $\sigma_r=5$ MPa。

(3)针对压融现象不显著的情况，冻结砂土的强度由围压增大引起的体积变形和颗粒破碎两个因素控制，其中颗粒破碎对抗剪强度起双重作用：应力较低范围内，随着围压的增大，颗粒破碎率增大使得冻土的抗剪强度降低；之后，由于破碎的颗粒重排列又导致抗剪强度提高。

参考文献：

[1] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1948.

[2] DE BEER E E. The scale effect in the transposition of the results of deep sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations[J]. Géotechnique, 1963, 13(1): 1 - 18.

[3] KJAERNSLI B, SANDE A. Compressibility of some coarse grained materials[C]// Proc European Conf. Soil Mech and Found Engrg. Weisbaden, 1963: 245 - 251.

[4] HALL E B, GORDON B B. Triaxial testing with large-scale high pressure equipment[J]. Laboratory Shear Testing of Soils Special Tech Publication, 1963, 361: 315 - 328.

[5] 张季如, 祝 杰, 黄文竞, 等. 侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性及其分形描述[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 783 - 789. (ZHANG Ji-ru, ZHU Jie, HUANG Wen-jing, et

- al. Crushing and fractal behaviors of quartz sand-gravel particles under confined compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 783 - 789. (in Chinese))
- [6] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [7] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [8] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, **4**(1): 68 - 86.
- [9] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [10] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究: 进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2170 - 2180. (YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: review and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2170 - 2180. (in Chinese))
- [11] 杨光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, **41**(3): 338 - 342. (YANG Guang, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(3): 338 - 342. (in Chinese))
- [12] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(3): 83 - 88. (GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 83 - 88. (in Chinese))
- [13] 汪稔, 孙吉主. 钙质砂不排水性状的损伤-滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002(7): 75 - 78. (WANG Ren, SUN Ji-zhu. Damage-slide coupled interaction behavior of undrained calcareous sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7): 75 - 78. (in Chinese))
- [14] 米占宽, 李国英, 陈铁林. 考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1865 - 1869. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying, CHEN Tie-lin. Constitutive model for rockfill material considering grain crushing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1865 - 1869. (in Chinese))
- [15] 孙海忠, 黄茂松. 考虑颗粒破碎的粗粒土临界状态弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1284 - 1290. (SUN Hai-zhong, HUANG Mao-song. Critical state elasto-plastic model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1284 - 1290. (in Chinese))
- [16] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2004, **24**(增刊): 661 - 665. (ZHANG Jia-ming, WANG Ren, ZHANG Yang-ming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **24**(S0): 661 - 665. (in Chinese))
- [17] HU W, YIN Z Y, DANO C, HICHER P Y. A constitutive model for granular materials considering grain breakage[J]. Science in China Series E, 2011, **54**(8): 2188 - 2196.
- [18] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM R. The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions[J]. Géotechnique, 1972, **22**(3): 469 - 483.
- [19] 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. Monitoring the change of structure in frozen soil under confining pressures by electron microscope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(2): 152 - 158. (in Chinese))
- [20] 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. Analyses of process on the strength decrease in frozen soils under high confining pressures[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, **21**(1): 27 - 31. (in Chinese))
- [21] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese))