

DOI: 10.11779/CJGE201703022

# 细粒土不均匀分布对粗粒土力学特性的影响

刘建坤, 于钱米, 刘景宇, 王冬勇

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 为了研究冻融循环条件下细粒土的不均匀分布特性对粗粒土力学特性的影响, 对不同冻融循环次数、冻结温度、围压条件下的含有不同细粒土分布的粗粒土进行常规的静三轴剪切试验, 研究冻融循环后具有不均匀细粒土分布的试样的最大剪胀位置、应力-应变关系曲线、起始屈服强度、起始屈服应变、静强度、破坏应变变化规律。研究结果表明, 在相同的细颗粒与粗颗粒不均匀分布的条件下, 试验后试样的最大剪胀位置随着试样上两层中细粒土含量的增加而沿着试样高度上升, 随着冻融循环次数的增加, 最大剪胀位置的上升速率是不断增加的。细颗粒与粗颗粒不均匀分布的程度越高, 尤其是粗颗粒的富集程度越高, 试样的脆性越高, 试样的应变软化程度越明显。冻融循环次数的增加, 降低了粗、细颗粒较均匀分布的3种试样的应力-应变软化程度的差异性, 即冻融循环次数的增加可以使粗颗粒和细颗粒的组合结构趋于稳定。在相同的围压条件下, 冻融循环次数的增加削弱了因细粒土不均匀分布而导致的起始屈服强度的差异性和静强度的差异性。试样中的粗颗粒和细颗粒分布越不均匀, 试样的起始屈服强度和静强度越大。当围压为100 kPa时, 静强度与起始屈服强度的比值随冻融循环次数波动较大, 当围压增加到300 kPa时, 比值随冻融循环次数的波动较为平缓。细粒土不均匀分布是起始屈服应变和破坏应变的最显著性影响因素, 但是围压对破坏应变的影响程度明显大于围压对起始屈服应变的影响程度。细粒土不均匀分布对破坏应变影响的显著性明显小于它对起始屈服应变影响的显著性。

**关键词:** 细粒土; 不均匀分布; 冻融循环; 力学特性

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)03-0562-11

作者简介: 刘建坤(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事冻土路基的研究工作。E-mail: jkliu@bjtu.edu.cn。

## Influence of non-uniform distribution of fine soil on mechanical properties of coarse-grained soil

LIU Jian-kun, YU Qian-mi, LIU Jing-yu, WANG Dong-yong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to study the influence of non-uniform distribution of fine soil on mechanical properties of coarse-grained soil under freeze-thaw cycles, triaxial shear tests are conducted on different specimens with different distributions of fine soil undergoing different freeze-thaw cycles and confining pressures. The variation trends of position of the largest dilatancy, stress-strain behavior, initial yield strength, initial yield strain, static strength, initial yield strain and failure strain are investigated. The test results show that the position of the largest dilatancy rises with height of specimens when the fine soil mass in the upper two layers of specimens increases under the same non-uniform distribution between fine and coarse-grained particles, and the rising speed becomes faster with the increase of freeze-thaw cycles. More non-uniform distribution between fine and coarse-grained particles and higher accumulation degree of coarse-grained particles let specimens have higher brittleness, which makes degree of strain-softening more obvious. Increasing freeze-thaw cycles decreases strain-softening difference of three specimens with different fine soil masses in their upper two layers, and makes composite structure of fine and coarse-grained particles more stable. The difference of the initial yield strength or the static strength caused by the non-uniform distribution of fine soil under the same confining pressure is respectively reduced by the increase of freeze-thaw cycles. The more non-uniform the distribution between fine and coarse-grained particles, the greater the initial yield strength or static strength. The ratio of the static strength to the initial yield strength under confining pressure of 100 kPa changes unstably the freeze-thaw cycles, and that under 300 kPa changes stably with freeze-thaw cycles. The non-uniform distribution of fine soil is the most significant influence factor for the initial yield strain and failure strain, but the confining pressure has a more

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB026104);  
中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016YJS107); 国家自然科学基金项目(41271072, 41371081, 51378057)

收稿日期: 2015-12-06



obvious influence on the failure strain than on the initial yield strain. The non-uniform distribution of fine soil has a more significant influence on the initial yield strain than on the failure strain.

**Key words:** fine soil; non-uniform distribution; freeze-thaw cycle; mechanical property

## 0 引言

粗粒土广泛应用于公路、铁路、机场、堤坝及矿山等工程建设中, 它是由彼此相联系的固体颗粒所共同组成的集合体, 主要特征是分散性、复杂性和易变性<sup>[1]</sup>。颗粒破碎会改变粗粒土的级, 也会影响粗粒土的强度和变形特性<sup>[2]</sup>, 其中, Marsal 等学者通过试验研究了土颗粒的破碎性质, 以及通过三轴无侧限压缩试验研究了颗粒破碎对内摩擦角和颗粒材料变形的影响<sup>[3-8]</sup>。目前, 国内外大量的研究主要是针对于颗粒破碎的现象、颗粒破碎的影响因素、颗粒破碎对材料强度和剪胀性的影响以及利用分形理论和方法来分析颗粒破碎后的级配变化。但是, 关于对颗粒破碎后细颗粒( $\leq 0.075\text{ mm}$ )生成量的分析与研究非常少。

冻胀对铁路路床(尤其是高铁路床)的影响得到越来越多的关注, 细粒土是引发冻胀和融沉的重要因素之一。能引发冻胀的细粒土的粒径范围是 $\leq 0.1\sim 0.05\text{ mm}$ , 能引发最大冻胀的细粒土的粒径范围是 $0.05\sim 0.002\text{ mm}$ 。当颗粒粒径 $<0.002\text{ mm}$ 时, 冻胀量就会减少, 原因是土颗粒分散性的增加降低了土的迁移<sup>[9]</sup>。马巍等<sup>[10]</sup>研究得出, 当粉土粒径的范围在 $0.05\sim 0.005\text{ mm}$ 内时, 最大冻胀就能够发生。同时, 研究认为, 细粒土含量和黏土矿物含量增加将提高粗粒土的冻胀敏感性<sup>[11-15]</sup>。小于 $0.075\text{ mm}$ 粉黏粒含量 $>15\%$ 的粗颗粒土和粉黏粒含量 $>10\%$ 的细砂在天然含水率 $\leq 12\%$ 和冻结期间地下水位距冻结面的最小距离 $\leq 1.0\text{ m}$ 时, 以及在 $12\% <$ 天然含水率 $\leq 18\%$ 和冻结期间地下水位距冻结面的最小距离 $>1.0\text{ m}$ 时会产生弱冻胀<sup>[16]</sup>, 随着冻结前天然含水率的增加, 冻结前地下水位距冻结面的最小距离的减少, 弱冻胀会向冻胀、强冻胀和特强冻胀发展。对于粗粒土而言, 如果粉土和黏土颗粒的含量 $\leq 12\%$ , 就会发生小的融沉( $<3\%\sim 4\%$ ), 如果粉土和黏土颗粒的含量 $>12\%$ , 随着含量的增加, 融沉也会急剧地增加<sup>[9]</sup>。目前, 很少有关于细粒土在粗粒土中不均匀分布特性的研究。

基于现有的研究经验, 为了研究冻融循环条件下细粒土的不均匀分布特性对粗粒土力学特性的影响, 在6种冻融循环次数和3种不同围压的条件下, 对具有不同细颗粒分布的8种试样, 进行了常规的静三轴剪切试验, 其中, 不同的细颗粒分布形式包括: 两种粗颗粒与细颗粒的空间分布形式(NUD1和NUD2), 4种不同土层细颗粒含量差异分布形式( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,

$S_3$ )。

## 1 试验方案

### 1.1 理论分析

对三轴试验结果的理论计算是基于假设试验试样中的各种粒径的土颗粒是均匀分布的, 但是, 由于天然粗粒土中不止含有一种粒径的土颗粒, 不同土颗粒的空间分布也总是不均匀的。路床填料中的粒级越多, 土颗粒空间分布的不均匀性就越高。对所有土的粒级同时进行研究是复杂而且耗时的。考虑到有限的试验条件以及土对冻融的敏感性问题, 试验选择粒径 $\leq 0.075\text{ mm}$ 的细粒土进行研究。影响细粒土空间分布的因素有很多, 其中包括水渗透、风、腐蚀以及因荷载引发的颗粒破碎等。为了降低不均匀试样的制作难度, 只将荷载引发的颗粒破碎作为细粒土不均匀分布产生的唯一原因。

单位面积上的动应力通过道床传递到路基面并继续向深层传递, 在传递过程中应力会逐渐扩散, 既大小会随着深度的增加而衰减<sup>[17]</sup>。如果严格按照规范进行铁路路床施工, 在荷载作用下, 颗粒破碎量会随着路床深度的增加而减小, 也就是说, 上层细粒土的产生量将大于下层的产生量。试样制作被设计为4层, 下两层中的细粒土含量是固定值, 上两层中的细粒土含量变化范围为 $5\%\sim 30\%$ , 通过上两层与下两层的细粒土质量差别来体现了细粒土分布的不均匀性(图1(c)、(d))。如图1中(a)、(b)所示, 试验还采用两种细颗粒与粗颗粒不均匀分布形式(第一种简称为NUD1, 第二种简称为NUD2), NUD1表示因为细颗粒土与粗颗粒土的拌合不均匀, 导致了粗颗粒土的互锁现象, 因此在粗颗粒土之间形成了不含有细颗粒土的空隙, NUD2表示细颗粒土与粗颗粒土的拌合比较均匀, 使粗颗粒土都能被细颗粒土包围而不产生粗颗粒土的互锁现象。土中的粒级越多, 其颗粒的空间不均匀分布越复杂。所以试样使用土的最大颗粒粒径是 $2\text{ mm}$ 。制作NUD2试样之前, 先混合烘干的、固定质量的各粒组土, 并给予充分搅拌, 再加水后进行第二次均匀搅拌, 闷料, 这样可以突显出试样上两层与下两层细颗粒含量差异性。制作NUD1试样之前, 为了突显粗颗粒与细颗粒的不均匀分布, 在混合烘干的、固定质量的各粒组土之前, 先分别加水搅拌、闷料,

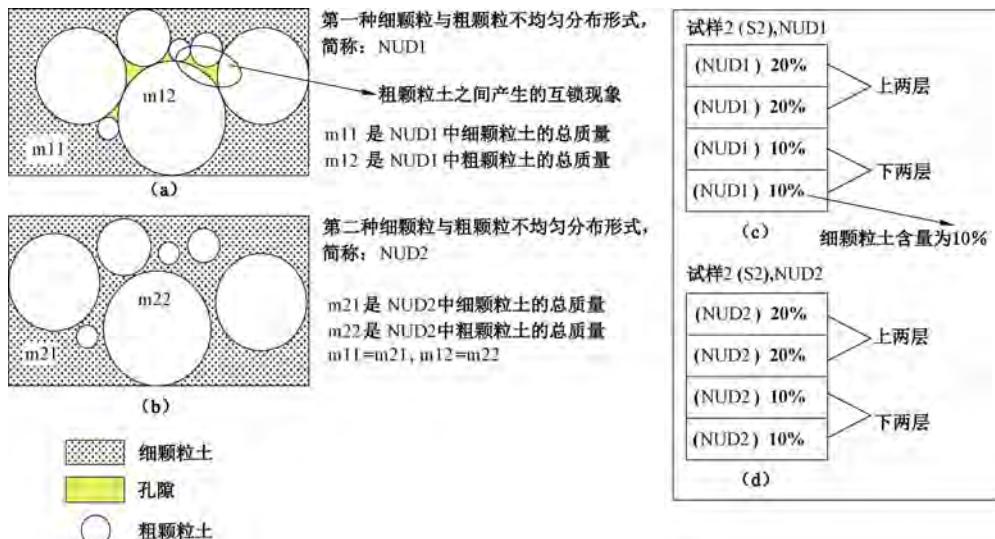


图1 细颗粒与粗颗粒不均匀分布的两种形式和以试样2为例的不均匀性设计示意图

Fig. 1 Two types of non-uniform distributions between fine- and coarse-grained particles and schematic diagram of non-uniformity design using specimen 2 as an example

然后再混合加水的各粒组土，进行不充分（不均匀）拌合，但要保证各层混合土的拌合方向、次数一致，不均匀拌合后，可以看到土中有明显的细颗粒和粗颗粒分别聚集的现象。

试验中冻融循环所采用的控制标准：①为了保持试样的含水率不变，试验中采用封闭系统对试样进行冻结。②试验中采用三向冻融循环模型。③冻结温度是-5℃，试验室的室内温度为15℃，融化温度采用先15℃。④冻结时间为12 h，融化时间也是12 h。

## 1.2 试验设备

### (1) YDT-II 多功能电动击实仪

圆柱形击实锤的质量是4.5 kg，击实锤的底部直径是51 mm，击实锤的落距是457 mm，击实筒的内部直径是102 mm，击实筒的高度是116 mm，护筒的高度是50 mm，击实功是2659 kJ/cm<sup>3</sup>。生产厂家：南京公路交通仪器厂。

### (2) TSZ-1型全自动三轴仪

试验参数设置为：剪切速率是0.013 mm/s，钢环系数是10 N/mm，轴向应变是25%，加载系数是1，稳定标准是0.2 N，读取数据的步长是0.2 mm。生产厂家：南京智龙科技开发有限公司。

## 1.3 试验材料与方法

试验用土来自于沈阳—丹东铁路路床所使用的粗粒土，这种粗粒土的主要物理参数如表1所示。根据

《铁路路基设计规范》(TB 10001—2005, J447—2005)，这种粗粒土属于级配良好的细角砾。各粒组的含量如表2所示。

表1 主要的物理参数

Table 1 Main physical parameters of coarse-grained soil

物理参数	值
最大干密度	2.2 g/cm <sup>3</sup>
最优含水率	7%
不均匀系数	10
曲率系数	1.05
细粒土含量	1.35%

通过3次击实试验模拟了动荷载作用下颗粒破碎的情况。在每次击实试验中，击实筒用3层（底层、中层和上层）相同级配、相同质量的粗粒土进行填筑，每层土的质量为700 g，含水率是7%，每层土中细粒土的质量是9.43 g，每层土之间用塑料膜隔开。击实过程：①状态0（3层土没有被击实），②状态1：底层土和中层土放置后的击实次数分别是27击，上层土放置后进行27击，③状态2：底层土和中层土的击实情况如状态1，上层土放置后进行108击，④状态3：底层土和中层土的击实情况如状态1，上层土放置后进行432击。如表3所示，随着上层击实次数的增加，3层土中细粒土含量的差异会越来越大。

根据《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010, J 1135—2010)准备三轴剪切试验需要的试样。试样为

表2 沈阳—丹东铁路路床中粗粒土的颗粒组成

Table 2 Composition of coarse-grained soil from Shenyang-Dandong Railway

直径/mm	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0
含量/%	0.80	4.10	5.90	14.90	33.80	10.60	13.10	9.96	5.49	1.35

表 3 不同土层中细粒土质量百分比随击实状态的变化值

Table 3 Mass percentage of fine soil of different layers versus compacted states

细粒土的质量百分比 /%	击实状态			
	状态 0	状态 1	状态 2	状态 3
上层	1.35	6.20	7.24	8.80
中层	1.35	6.43	7.09	7.24
底层	1.35	6.80	6.96	7.26

表 4 制作试样的其它参数

Table 4 Other parameters of making specimens

试样的类型	分层	试样每一层中各粒组的质量百分比/%					干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	制样的压 实度
		≤0.075 mm	0.075~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm		
NUD1	试样 0 (S <sub>0</sub> )	上两层 下两层	5 10	13.32 12.62	24.12 22.85	31.87 30.19	25.69	2.107
	NUD1 试样 1 (S <sub>1</sub> )	上两层 下两层	10 10	12.62 12.62	22.85 22.85	30.19 30.19	24.34	2.109
NUD2	试样 2 (S <sub>2</sub> )	上两层 下两层	20 10	11.22 12.62	20.30 22.85	26.84 30.19	21.64 24.34	2.109 0.95
NUD1	试样 3 (S <sub>3</sub> )	上两层 下两层	30 10	9.82 12.62	17.77 22.85	23.48 30.19	18.93 24.34	2.089 2.109
粗颗粒土中各粒组的质量比				0.42	0.76	1.00	0.81	

表 5 静三轴剪切试验方案

Table 5 Experimental cases of static triaxial shear tests

试样类型	围压/kPa	冻结温度/℃	冻融循环次数
NUD1	S <sub>0</sub> 100, 200, 300		0, 1, 3, 7, 9, 12
	S <sub>1</sub>		
	S <sub>2</sub> 300		1
	S <sub>3</sub>	-5	
NUD2	S <sub>1</sub>		
	S <sub>2</sub> 100, 200, 300		0, 1, 3, 7, 9, 12
	S <sub>3</sub>		

圆柱形, 直径为 39.1 mm, 高度 80 mm, 分 4 层击实, 含水率为 10%。其它参数如表 4 所示。试验方法属于不固结不排水剪 (UU) 试验。静三轴剪切试验的试验方案如表 5 所示。理论上, 需要试样的数目是 75, 为了使试验结果更准确, 补做 16 次试验, 共计 91 个试样。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 在冻融循环作用条件下, 细粒土不均匀分布对试样变形的影响

如图 2 所示, 通过测量试样在试验后的最大剪胀部位来研究细粒土不均匀分布对试样变形的影响, 由于不可避免的试验误差, 不同条件下, 3 种试样之间最大剪胀位置的高度差是不固定的, 有的通过肉眼观

察不是很明显, 需要测量才能更准确地确定。为了突显位置变化规律, 图 2 选用了一组比较明显的图片。S<sub>1</sub> (NUD2) 试样的上下层颗粒级配相同, 然而最大剪胀位置明显地出现在试样的下部, 其主要原因是受到粗颗粒与细颗粒不均匀分布的影响, 但这并不影响对整个试验规律的研究。如图 3 (a) 所示, H<sub>2</sub> (S<sub>i</sub>, n) 表示试样测试后的最大剪胀位置到试样顶面的距离, 通过 H<sub>2</sub> (S<sub>i</sub>, n) 值的变化来评价试样最大剪胀位置的变化规律, H<sub>0</sub> 是试样在试验之前的原始高度, H<sub>5</sub> (S<sub>i</sub>, n) 是因冻融循环作用而产生的, H<sub>3</sub> (S<sub>i</sub>, n) 是指试验中设置的 25% 应变, S<sub>i</sub> 表示试样 i, i=1~3, n 表示冻融循环次数。研究发现, 在 7 次冻融循环之内, 试样高度随着冻融循环次数的增加而增加, 在 7 次冻融循环之后, 试样高度不再随着冻融循环次数的增加而

增加<sup>[18]</sup>。研究发现，在相同的干密度和冻结温度条件下，冻胀量随着细粒土含量的增加而增加<sup>[15]</sup>。所以，理论上，应该采用  $H_2(S_i, n)/(H_1(S_i, n)-H_3(S_i, n))$  来描述最大剪胀部位的变化，但是因为  $(H_1(S_1, n)-H_3(S_1, n)) < (H_1(S_2, n)-H_3(S_2, n)) < (H_1(S_3, n)-H_3(S_3, n))$ ，以及通过  $H_2(S_i, n)$  的减小可以推断出  $H_2(S_i, n)/(H_1(S_i, n)-H_3(S_i, n))$  的减小，所以  $H_2(S_i, n)$  可以用来描述最大剪胀部位的变化。如图 3 (b) 所示，以围压=200 kPa 的情况为例， $H_2(S_1, n) > H_2(S_2, n) > H_2(S_3, n)$  表明最大剪胀部位随着试样  $S_i$  中  $i$  的增加而上升，即在第二种细颗粒与粗颗粒不均匀分布形式条件下，最大剪胀位置随着试样上层细颗粒含量的增加而上升，在围压=100 和 300 kPa 的情况下有相同的结论。如图 4 (a) 所示， $MD(i)$  表示试样  $i$  的上两层细粒土含量百分比与下两层细粒土含量百分比的差值， $MD(1)=0\%$ ， $MD(2)=10\%$ ， $MD(3)=20\%$ ，RATE 表示  $H_2(S_i, n)$  随  $MD(i)$  的变化速率，以围压=100 kPa，3 次冻融循环的情况为例，得到 RATE=-0.045。如图 4 (b) 所示，在

100 kPa 围压条件下，线性拟合①的斜率为-0.00191，在 200 kPa 围压条件下，线性拟合②的斜率为-0.00171，在 300 kPa 围压条件下，线性拟合③的斜率为-0.00203，所以 RATE 随冻融循环次数增加的总体变化趋势减小，说明随着冻融循环次数增加， $H_2(S_i, n)$  随  $MD(i)$  ( $i$  从 1 增加到 3) 的减小速率不断增加，最大剪胀位置沿试样高度的上升速率随着试样上层细粒土含量增加而不断增加。

## 2.2 在冻融循环作用条件下，细粒土不均匀分布应力 - 应变关系的影响

冻融循环作用能够使土颗粒产生移动并且分散土集料，扰乱了土颗粒之间的自锁作用，改变了土的结构、孔隙比、密度、土壤的饱和持水能力、导水率，降低了土的黏聚力和力学强度<sup>[19-22]</sup>。在冻融循环条件下，试验得到的所有应力 - 应变关系都属于应变软化型，应变软化是指应力 - 应变曲线中轴向应力随应变的增加而减小的现象<sup>[16]</sup>。这里引入应力 - 应变关系曲线峰值后所有应力增量

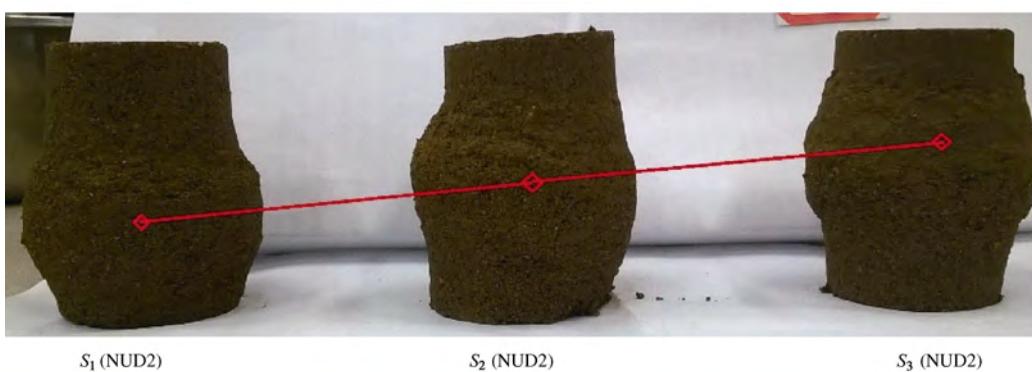


图 2 试样试验后的最大剪胀部位随试样类型的变化图（以围压为 100 kPa，经历 3 次冻融循环的试样为例）

Fig. 2 Position of largest dilatancy of tested specimen with types of specimens undergoing 3 freeze-thaw cycles under confining pressure

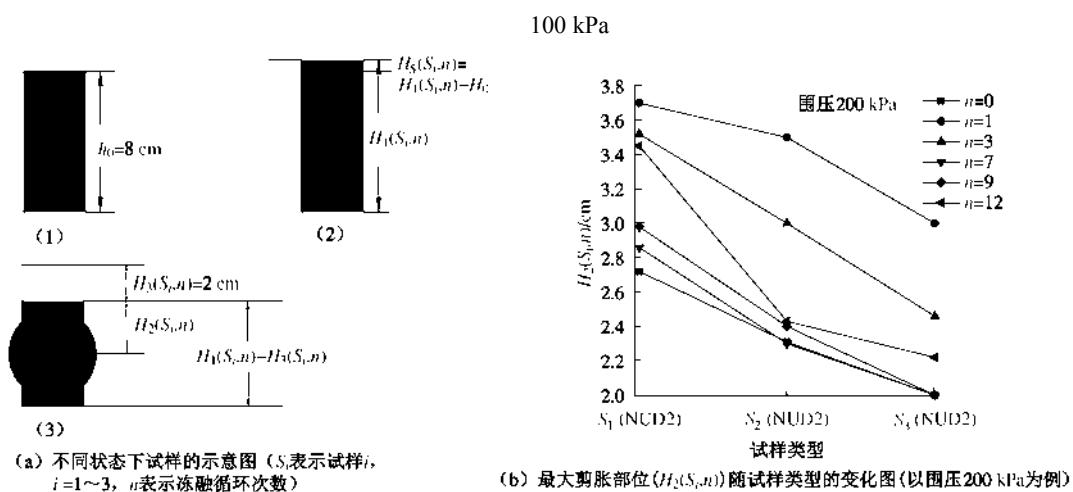


图 3 试样变形示意图及最大剪胀部位随细粒土不均匀分布的变化图

Fig. 3 Diagram of specimen deformation and largest dilatancy position versus uneven distribution of fine soil

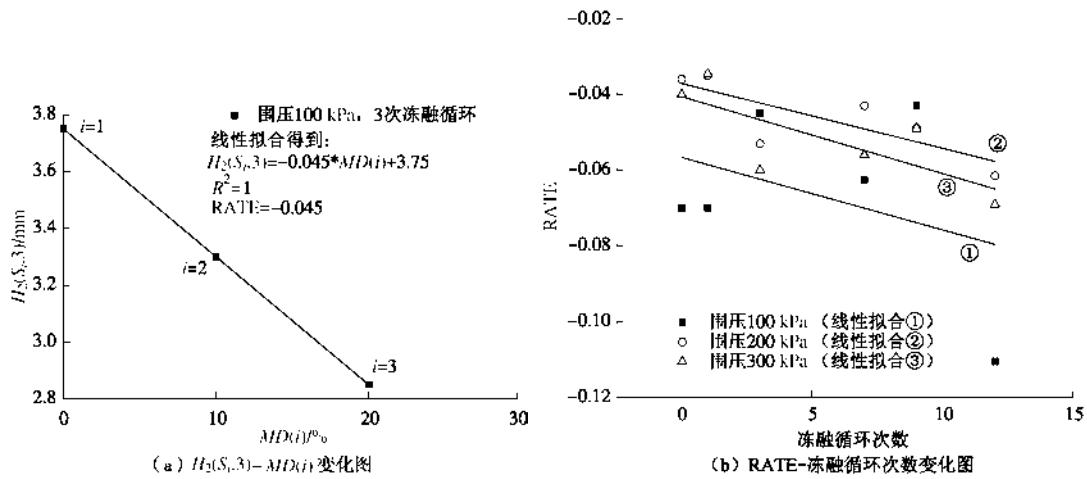


图 4 最大剪胀部位变化速率随冻融循环次数的变化图

Fig. 4 Changing rate of largest dilatancy position versus number of freeze-thaw cycles

与应变增量比值的平均值, 可通过最小二乘法线性拟合求得。以  $S_3$  (NUD2) 为例, 如图 5 (a) 所示, 高围压条件下的应变软化程度比低围压条件下的应变软化程度更明显。以围压为 00 kPa 为例, 如图 5 (b) 所示, 冻融循环次数的增加, 降低了 NUD2 试样应力 - 应变软化平均速率的差异性。如图 5 (b)、(c) 所示, NUD1 试样的应变软化程度比 NUD2 试样的应变软化程度更加明显, NUD1 试样的脆性大于 NUD2 试样的脆性, 因为, NUD1 试样细颗粒分布比 NUD2 试样的细颗粒分布更加不均匀, NUD1 试样中的粗颗粒有局部集中的现象, 导致 NUD1 试样中颗粒间的摩擦力和自锁作用比 NUD2 试样更严重。

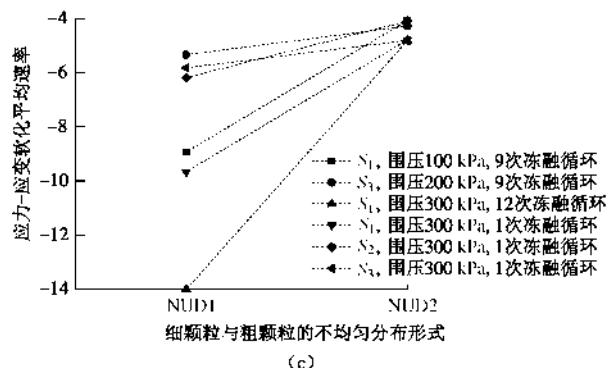
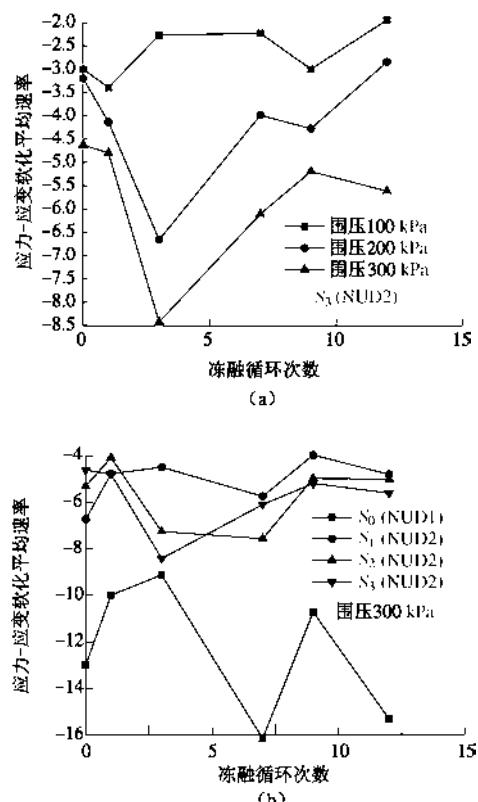


图 5 应力 - 应变软化平均速率变化图

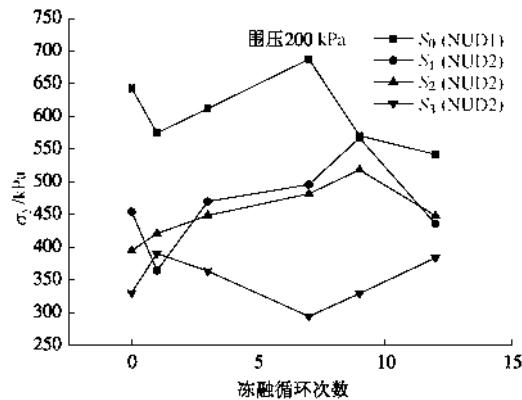
Fig. 5 Diagram of average speed of stress-strain softening

### 2.3 在冻融循环作用条件下, 细粒土不均匀分布对起始屈服强度 ( $\sigma_y$ ) 和静强度 ( $\sigma_m$ ) 的影响

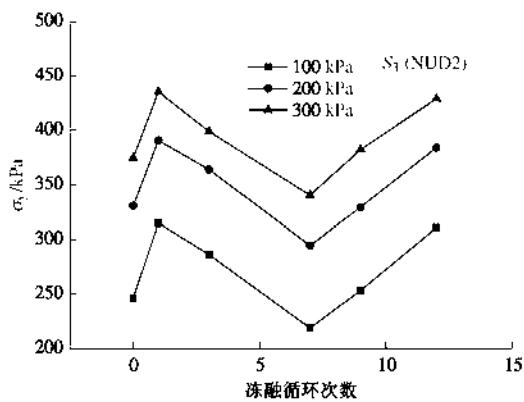
按照传统力学概念, 应力 - 应变曲线中起始屈服 (或弹性屈服) 点对应的应力定义为起始屈服强度<sup>[23]</sup>。冻融循环会使土从不稳定状态向稳定状态发展, 重复的冻融循环次数会使土的结构向动态稳定平衡状态发展<sup>[24]</sup>。如图 6 (a) 所示, 以围压为 200 kPa 条件下情况为例, 冻融循环次数的增加削弱了因细粒土不均匀分布而导致的起始屈服强度的差异性, NUD1 试样的起始屈服强度明显大于 NUD2 试样的起始屈服强度。如图 6 (b) 所示, 以试样  $S_3$  (NUD2) 为例, 在相同的细粒土不均匀分布条件下, 同一试样的起始屈服强度随冻融循环次数的变化趋势相同, 同一试样在冻融循环次数不变条件下的起始屈服强度随着围压的增加而增加。

对于应变软化型应力 - 应变关系曲线, 静强度取值为其峰值点的偏应力值; 冻融循环会使土从不稳定状态向稳定状态发展, 重复的冻融循环次数会使土的结构向动态稳定平衡状态发展<sup>[24]</sup>。如图 7 (a) 所示, 以围压为 300 kPa 条件下情况为例, 在相同的围压条

件下, 冻融循环次数的增加削弱了因细粒土不均匀分布而导致的静强度的差异性, NUD1 试样的静强度明显大于 NUD2 试样的静强度。如图 7 (b) 所示, 以试样  $S_1$  (NUD2) 为例, 在相同的细粒土不均匀分布条件下, 同一试样的静强度随着围压的增加而增加。



(a) 不同试样的起始屈服强度 ( $\sigma_y$ ) 随冻融循环次数的变化图

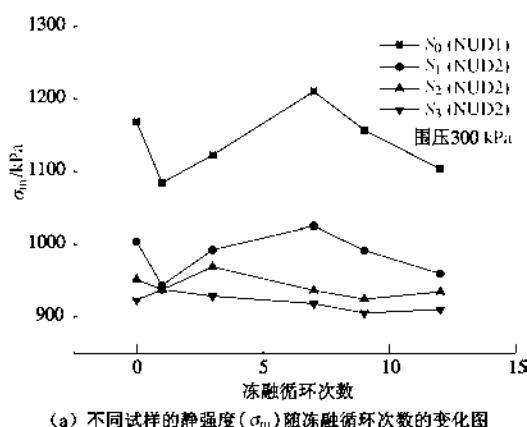


(b) 同一试样在不同压强条件下  $\sigma_y$  随冻融循环次数的变化图

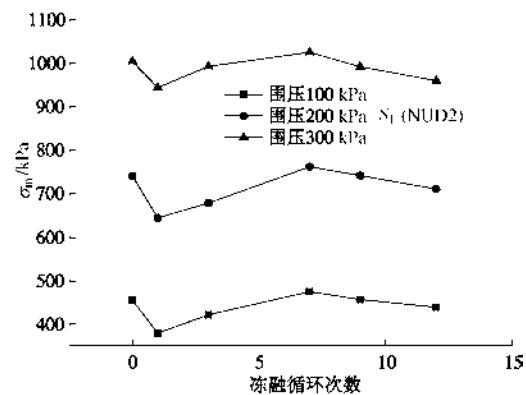
图 6 不同条件下起始屈服强度的变化图

Fig. 6 Variation diagram of initial yield strength under different conditions

如图 8 (a)、(b) 所示, 在围压=100 kPa 时, 静强度 ( $\sigma_m$ ) 与起始屈服强度 ( $\sigma_y$ ) 的比值随冻融循环次数波动较大, 当围压增加到 300 kPa 时,  $\sigma_m/\sigma_y$  随冻融循环次数的波动较为平缓, 当围压增加到 300 kPa 时, 与其他 3 个试样相比, 试样  $S_3$  (NUD2) 的  $\sigma_m/\sigma_y$  值成为最大值, 试样  $S_2$  (NUD2) 的  $\sigma_m/\sigma_y$  值次之。



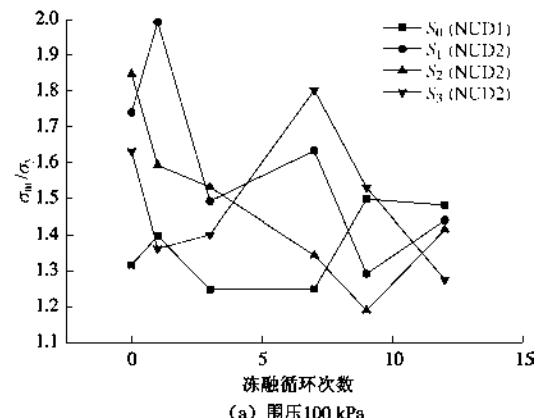
(a) 不同试样的静强度 ( $\sigma_m$ ) 随冻融循环次数的变化图



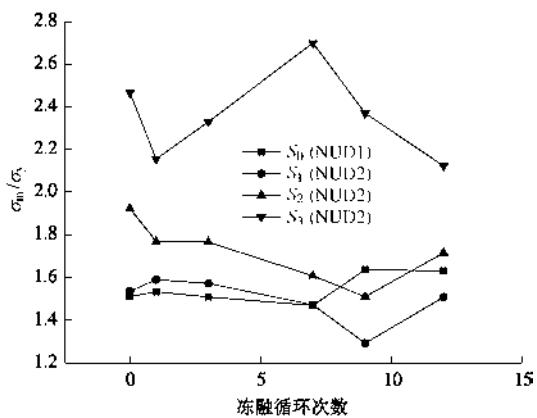
(b) 同一试样在不同压强条件下  $\sigma_m$  随冻融循环次数的变化图

图 7 不同条件下静强度的变化图

Fig. 7 Variation diagram of static strength under different conditions



(a) 围压 100 kPa



(b) 围压 300 kPa

图 8 静强度与起始屈服强度比值 ( $\sigma_m/\sigma_y$ ) 随冻融循环次数的变化图 (以围压为 100 和 300 kPa 为例)

Fig. 8 Ratio  $\sigma_m$  to  $\sigma_y$  versus freeze-thaw cycles under confining pressures of 100 and 300 kPa

## 2.4 在冻融循环作用条件下, 细粒土不均匀分布对起始屈服应变的影响

按照传统力学概念, 应力 - 应变曲线中起始屈服 (或弹性屈服) 点对应的应变定义为起始屈服应变<sup>[23]</sup>。如图 9 (a) ~ (c) 所示, 随着试样类型的变化, 即随着试样上两层中细粒土含量的增加, 起始屈服应变的变化趋势是: 减小—增大—减小, 此变化趋势受围

压和冻融循环条件的影响很小, 即细粒土不均匀分布是影响此变化趋势的最显著性因素。

为了研究细粒土不均匀分布对起始屈服应变在冻融循环条件下产生差异程度的影响, 引入变异系数 (coefficient of variation (CV)), 变异系数可以测量数据的变异程度以及消除单位和平均值对 2 个或 2 个以上数据变异程度的影响, 公式如下:

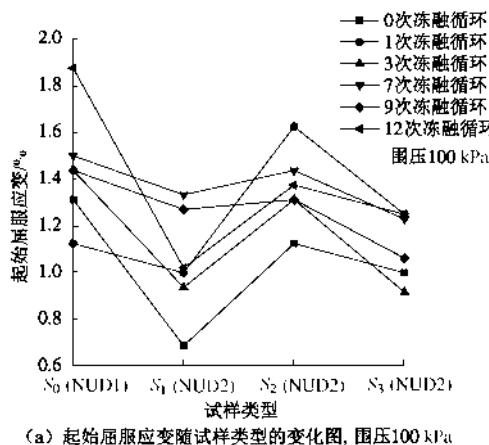
$$CV = (SD/M) \times 100\% , \quad (1)$$

$$M = \sum_{j=1}^m L(j)/m , \quad (2)$$

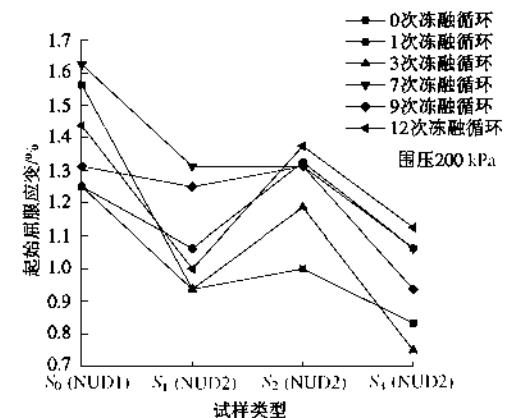
$$SD = \sqrt{(1/(m-1)) \times \sum_{j=1}^m (L(j)-M)^2} , \quad (3)$$

式中,  $M$  为  $m$  个数据的平均值,  $SD$  为  $m$  个数据的标准差。

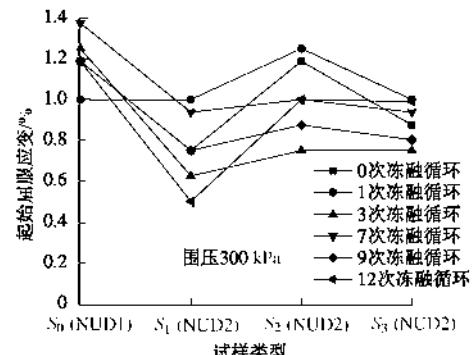
如图 9 (d) 所示,  $CV_{FT}(1)$  是冻融循环引起固定试样起始屈服应变的变异系数,  $CV_{FT}(1)$  差异性是不同围压条件下固定试样的  $CV_{FT}(1)$  值的最大值与最小值差值的绝对值。如图 9 (d) 所示, 在层间细粒土含量差异性和粗颗粒与细颗粒不均匀分布的双重影响下, 冻融循环引起  $S_0$  (NUD1) 试样起始屈服应变的变异系数在不同的围压条件下一致小于冻融循环引起  $S_1$  (NUD2) 试样起始屈服应变的变异系数, 但是  $S_0$  (NUD1) 与  $S_1$  (NUD2) 试样的  $CV_{FT}(1)$  值随围压的变化规律不一样, 在区域 I 中, 围压越小,  $CV_{FT}(1)$  越大。如图 9 (d) 区域 II 所示, 100 和 300 kPa 围压时, 随着试样上两层细颗粒含量的增加,  $CV_{FT}(1)$  具有减小的趋势, 说明层间细粒土含量差异性的增大削弱了冻融循环对起始屈服应变的作用程度, 在围压为 200 kPa 时, 随着试样上两层细颗粒含量的增加,  $CV_{FT}(1)$  的变化趋势比较平稳, 说明层间细粒土含量差异性的增大没有影响冻融循环对起始屈服应变的作用程度, 区域 II 中最下方的线显示,  $CV_{FT}(1)$  差异性随着试样上两层细颗粒含量的增加而减小, 说明层间细粒土含量差异性的增大削弱了围压对冻融循环的影响。综上所述, 细粒土不均匀分布是起始屈服应变的最显著性影响因素。



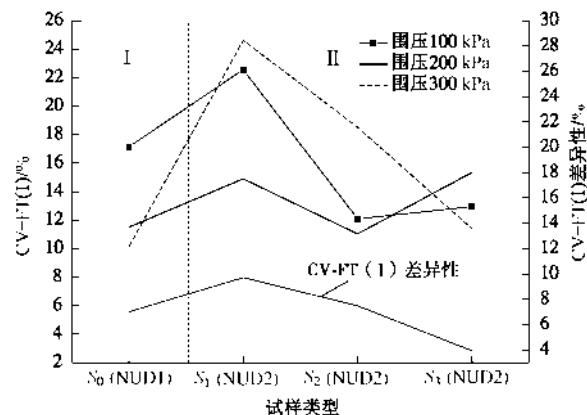
(a) 起始屈服应变随试样类型的变化图, 围压100 kPa



(b) 起始屈服应变随试样类型的变化图, 围压200 kPa



(c) 起始屈服应变随试样类型的变化图, 围压300 kPa



(d)  $CV_{FT}(1)$ 随试样类型的变化图和不同围压条件下  
 $CV_{FT}(1)$ 差异性随试样类型的变化图

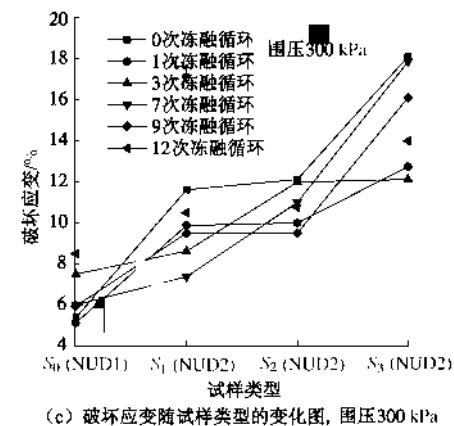
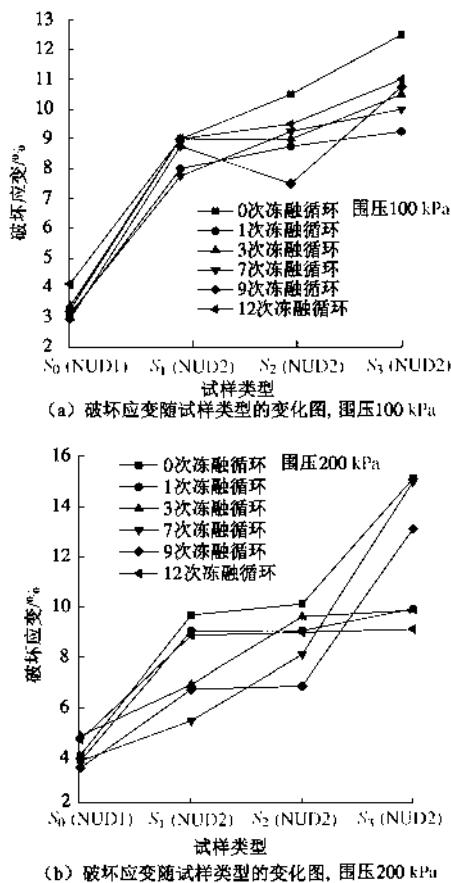
图 9 在受冻融循环与围压影响条件下起始屈服应变随细粒土不均匀分布的变化图

Fig. 9 Initial yield strain versus uneven distribution of fine soil influenced by freeze-thaw cycles and confining pressure

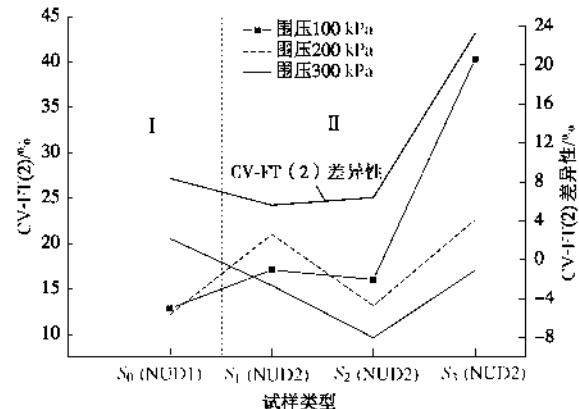
## 2.5 在冻融循环作用条件下, 细粒土不均匀分布对破坏应变的影响

破坏应变是应变软化型应力 - 应变关系曲线上静强度处对应的应变<sup>[23]</sup>。如图 10 (a) ~ (c) 所示, 随着试样类型的变化, 即随着试样上两层中细粒土含量的增加, 破坏应变的变化趋势是一直增加, 此变化趋势受围压和冻融循环条件的影响很小, 即细粒土不均匀分布是影响此变化趋势的最显著性因素。如图 10 (d) 所示, 根据式 (1)、(2) 和 (3) 求得冻融循环引起固定试样破坏应变的变异系数  $CV_{FT}(2)$ ,  $CV_{FT}$

(2) 差异性是不同围压条件下固定试样的 CV-FT (2) 值的最大值与最小值差值的绝对值。在层间细粒土含量差异性和粗颗粒与细颗粒不均匀分布的双重影响下, 在 100 和 200 kPa 围压条件下, 冻融循环引起  $S_0$  (NUD1) 试样破坏应变的变异系数都小于冻融循环引起  $S_1$  (NUD2) 试样破坏应变的变异系数, 300 kPa 围压条件下的结论相反, 说明冻融循环对破坏应变的作用受高围压的影响程度大于冻融循环对起始屈服应变的作用受高围压的影响程度。在区域 I 中, 300 kPa 围压条件下的 CV-FT (2) 明显大于 100 和 200 kPa 围压条件下的 CV-FT (2), 图 9 (d) 区域 I 中 300 kPa 围压条件下的 CV-FT (1) 最小。如图 10 (d) 区域 II 所示, 3 种围压条件下, CV-FT (2) 随着试样上两层细颗粒含量的增加而具有先减小后增大的趋势, 即围压没有改变层间细粒土含量差异性对 CV-FT (2) 产生的影响, 100 kPa 围压时, 随着试样上两层细颗粒含量从 20% 增加至 30%, CV-FT (2) 的增大趋势非常明显大于其在 200 和 300 kPa 围压条件下的增大趋势, 即与 200 和 300 kPa 围压条件下的情况相比较, 100 kPa 围压条件下层间细粒土含量差异性的增大加强了冻融循环对破坏应变的作用程度。区域 II 中最上方的线显示, CV-FT (2) 差异性随着试样上两层细颗粒含量的增加而增大, 说明层间细粒土含量差异性的增大加强了围压对冻融循环的影响。综上所述, 细粒土不均匀



(c) 破坏应变随试样类型的变化图, 围压 300 kPa



(d) CV-FT(2)随试样类型的变化图和不同围压条件下 CV-FT(2)差异性随试样类型的变化图

图 10 在受冻融循环与围压影响条件下破坏应变随细粒土不均匀分布的变化图

Fig. 10 Failure strain versus uneven distribution of fine soil

influenced by freeze-thaw cycles and confining pressure 分布也是破坏应变的最显著性影响因素, 但是围压对破坏应变的影响程度明显大于围压对起始屈服应变的影响程度。通过比较图 9 (d) 的 CV-FT (1) 差异性数值和图 10 (d) 的 CV-FT (2) 差异性数值可知, 细粒土不均匀分布对破坏应变影响的显著性明显小于它对起始屈服应变影响的显著性。

### 3 结 论

在冻融循环条件下, 细粒土的不均匀分布会对路床填料的力学性质产生不同的影响, 考虑细粒土的不均匀分布对于路床的设计与施工非常重要, 通过室内试验来研究冻融循环条件下细粒土的不均匀分布特性对粗粒土力学特性的影响, 初步结论如下:

(1) 在细颗粒与粗颗粒分布比较均匀的情况下, 试样的最大剪胀位置随着试样上两层中细粒土含量的增加 (从 10% 到 30%) 而沿着试样的高度不断上升, 随着冻融循环次数的增加, 最大剪胀位置的上升速率是不断增加的。

(2) 所有的应力 - 应变关系都属于应变软化型, 细颗粒与粗颗粒不均匀分布的程度越高, 尤其是粗颗粒的富集程度越高, 试样的脆性越高, 试样的应变软化程度越明显。冻融循环次数的增加, 降低了粗、细颗粒较均匀分布的3种试样的应力 - 应变软化程度(用应力 - 应变软化平均速率表示)的差异性, 即冻融循环次数的增加可以使粗颗粒和细颗粒的组合结构趋于稳定。

(3) 在相同的围压条件下, 冻融循环次数的增加削弱了因细粒土不均匀分布而导致的起始屈服强度的差异性和静强度的差异性。试样中的粗颗粒和细颗粒分布越不均匀, 试样的起始屈服强度和静强度越大。当围压为100 kPa时, 静强度( $\sigma_m$ )与起始屈服强度( $\sigma_y$ )的比值随冻融循环次数波动较大, 当围压增加到300 kPa时,  $\sigma_m/\sigma_y$ 随冻融循环次数的波动较为平缓。

(4) 随着试样上两层中细粒土含量的增加, 起始屈服应变的变化趋势是减小—增大—减小, 破坏应变的变化趋势是一直增加。细粒土不均匀分布是起始屈服应变和破坏应变的最显著性影响因素, 但是围压对破坏应变的影响程度明显大于围压对起始屈服应变的影响程度。细粒土不均匀分布对破坏应变影响的显著性明显小于它对起始屈服应变影响的显著性。

## 参考文献:

- [1] 杜俊, 侯克鹏, 梁维, 等. 粗粒土压实特性及颗粒破碎分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 155 - 161. (DU Jun, HOU Ke-peng, LIANG Wei, et al. Experimental study of compaction characteristics and fractal feature in crushing of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 155 - 161. (in Chinese))
- [2] SEYEDIHOSSEINIA E, MIRGHASEMI A A. Effect of particle breakage on the behavior of simulated angular particle assemblies[J]. China Particuology, 2007, 5: 328 - 336.
- [3] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, 1967, 93(2): 27 - 43.
- [4] BERTACCHI P, BELLOTTI R. Experimental research on materials for rockfill dams[C]// Tenth Congress on Large Dams, June 1970, Montreal, Canada. International Commission on Large Dams. Paris, 1970: 511 - 529.
- [5] FUMAGALI E, MOSCINI B, ROSSI P P. Laboratory tests on materials and static models for rockfill dams[C]// Tenth Congress on Large Dams, June 1970, Montreal, Canada. International Commission on Large Dams. Paris, 1970: 531 - 551.
- [6] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division American Society of Civil Engineers, 1972, 98(1): 95 - 114.
- [7] VENKATACHALAM K. Prediction of mechanical behavior of rockfill materials[D]. Delhi: Indian Institute of Technology, 1993.
- [8] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(3): 206 - 218.
- [9] 毛雪松, 马骉. 基于水热耦合效应的冻土路基稳定性研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (MAO Xue-song, MA Biao. The research on the stability of frost subgrade based on the effect of moisture-thermal coupling[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [10] 马巍, 王大雁, 等. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (MA Wei, WANG Da-yan, et al. Mechanics of frozen ground[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2014. (in Chinese))
- [11] VINSON T S, AHMAD F, RIEKE R. Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils[J]. Transportation Research Record, 1986: 124 - 131.
- [12] CHEN X, WANG Y. Control of frost heave in geotechnical engineering[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York, 1989.
- [13] 叶阳升, 王仲锦, 程爱君, 等. 路基的填料冻胀分类及防冻层设置[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 1 - 7. (YE Yang-sheng, WANG Zhong-jin, CHENG Ai-jun, et al. Frost heave classification of railway subgrade filling material and the design of anti-freezing layer[J]. China Railway Science, 2007, 28(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [14] 许建, 牛富俊, 牛永红, 等. 换填法抑制季节冻土区铁路路基冻胀效果分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 1 - 7. (XU Jian, NIU Fu-jun, NIU Yong-hong, et al. Analysis on the effect of replacing-soil method on inhibiting frost heave of railway roadbed in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 1 - 7. (in Chinese))
- [15] 王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗粒土冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359 - 363. (WANG Tian-liang, YUE Zu-run. Experimental study on the influence of fine grain content on the frost heaving characteristics of coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 359 - 363. (in Chinese))

- Tian-liang, YUE Zu-run. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 359 – 363.(in Chinese))
- [16] JTGT D31—04—2012 多年冻土地区公路设计与施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013. (JTGT D31—04—2012 Guidelines for design and construction of highway in permafrost area[S]. Beijing: China Communication Press, 2013. (in Chinese))
- [17] 刘建坤, 曾巧玲, 侯永峰, 等. 路基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (LIU Jian-kun, ZENG Qiao-ling, HOU Yong-feng, et al. Subgrade engineering[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2011. (in Chinese))
- [18] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, **48**: 34 – 43.
- [19] ANDERSLAND O B, LADANYI B. Frozen Ground Engineering[M]. 2nd ed. New York: Co-Published by American Society of Civil Engineers and John Wiley & Sons (ASCE Press), 2004.
- [20] AOYAMA K, OGAWA S, FUKUDA M. Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing[C]// KINOSITA S, FUKUDA M, eds. Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, 5–7 August 1985, Sapporo, Japan. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 1985: 217 – 222.
- [21] BENOIT G R, VOORHEES W B. Effect of freeze-thaw activity on water retention, hydraulic conductivity, density and surface strength of two soils frozen at high water content[R]. Hanover: USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990.
- [22] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, **13** (1/2/3/4):73 – 92.
- [23] 朱元林. 冻结粉砂在常变形速度下的单轴抗压强度[J]. 冰川冻土, 1986, **8**(4): 365 – 380. (ZHU Yuan-lin. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, **8**(4): 365 – 380.(in Chinese))
- [24] 杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(增刊 2): 2695 – 2699. (YANG Cheng-song, HE Ping, CHENG Guo-dong, et al. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(S2): 2695 – 2699. (in Chinese))