

## 冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯

### Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action

YANG Aiwu, WANG Binbin, and ZHONG Xiaokai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103013>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118

#### 冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

#### 固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100

#### 冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles

戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65-73

#### 冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩力学性质及破坏特征

On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing-thawing cycles

张立 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 74-80

#### 冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 96-104



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103013

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯. 冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 57-65.  
YANG Aiwu, WANG Binbin, ZHONG Xiaokai. Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 57-65.

## 冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

杨爱武<sup>1,2</sup>, 王斌彬<sup>2</sup>, 钟晓凯<sup>2</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620;  
2. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 冻融作用会影响污泥固化轻质土动力特性和结构特性。为研究不同冻融循环次数和冻结温度下的污泥固化轻质土动力特性及结构演化, 对冻融循环作用后的污泥固化轻质土进行动三轴试验和固结试验。试验结果表明: 在冻融循环作用下, 污泥固化轻质土动应力-应变曲线呈弱应变硬化型。污泥固化轻质土动强度和变形随着冻融次数( $n$ )的增加和冻结温度( $T$ )的降低而减小。经历前 4 次冻融作用后, 对固化土变形和动强度影响较大, 经历 8 次冻融循环后基本趋于稳定。冻融循环对土体动力特性的影响本质上是对土体结构性的影响。固化土冻融结构势( $m_{\text{den}}$ )的变化规律与动强度类似, 随冻融次数的增加和冻结温度的降低而下降。冻融循环次数是影响污泥固化轻质土动力特性和结构性的主要因素, 冻结温度为次要因素。  
**关键词:** 冻融循环; 污泥固化轻质土; 动力特性; 结构特性

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0057-09

## Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action

YANG Aiwu<sup>1,2</sup>, WANG Binbin<sup>2</sup>, ZHONG Xiaokai<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Freezing-thawing action will affect the mechanical and structural characteristics of sludge solidified light soil. In order to study the dynamic characteristics and structural evolution of sludge solidified light soil under different freezing-thawing cycles and freezing temperatures, dynamic triaxial tests and consolidation tests were carried out on the sludge solidified light soil after freezing-thawing cycles. The test results show that the dynamic stress-strain curve of light soil solidified by sludge is of weak strain hardening type under the action of freezing-thawing cycle. The dynamic strength and deformation of sludge solidified light soil decrease with the increase of freezing-thawing times ( $n$ ) and the decrease of freezing temperature ( $T$ ). The first four freezing-thawing cycles have a great influence on the deformation and dynamic strength of solidified soil, and the dynamic characteristics of soil tend to be stable after eight freezing-thawing cycles. The influence of freezing-thawing cycle on is essentially the influence on soil structure. The variation law of freezing-thawing structural potential ( $m_{\text{den}}$ ) of solidified soil is similar to that of dynamic strength, showing the decrease with the increasing freezing and thawing

收稿日期: 2021-03-03; 修订日期: 2021-06-02

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978440); 天津市科技计划项目 (19JCZDJC39700; 19JCQNJC06900); 天津市教委科研计划项目 (2018KJ165)

第一作者: 杨爱武 (1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事软黏土力学特性及土体微观结构研究。E-mail: [tulilab@163.com](mailto:tulilab@163.com)

times and the decrease with the decreasing freezing temperature. The number of freezing-thawing cycles is the main factor affecting the dynamic characteristics and structure of sludge solidified light soil, and the freezing temperature is the secondary factor.

**Keywords:** freezing-thawing cycle; sludge solidified light soil; dynamic characteristics; structural characteristics

随着城市化的加速发展,城市污泥的生成量越来越多,对于环境的影响也越来越严重。污泥具有含水量高、有机质含量大的特点,且力学性质差,重金属含量高<sup>[1]</sup>。如若不加以处理,会对环境产生严重影响,甚至会危及人类健康。通过污泥固化技术,使污泥变成一种新型的污泥固化轻质土。世界上很多国家和我国北方大部分地区各类土体存在冻融循环现象。

国内外很多学者对冻融循环作用下各类土体动力特性做了很多研究,取得较多的成果<sup>[2-6]</sup>。如魏海斌等<sup>[5]</sup>对粉煤灰土进行冻融循环后的动三轴试验,发现3次冻融循环后粉煤灰土动力性能指标优于粉质黏土,具有良好的稳定性和抗冻性。卢连长等<sup>[6]</sup>发现冻融过程中力学性质的变化不仅与土样的种类有关,也与土样的矿物成分有关,前10次冻融循环对高岭土及膨润土的长期强度影响很大。马玉涛等<sup>[7]</sup>对冻融循环作用下的路基粉质黏土进行动三轴试验,发现受冻融循环次数影响土体动强度、动黏聚力下降趋势明显,动内摩擦角有一定的下降趋势,但无明显规律性。Simonsen E.等<sup>[8]</sup>对冻融循环后的土进行动三轴试验,发现冻融作用对土体动弹性影响显著。宋金华等<sup>[9]</sup>对冻融循环作用下的石灰改良土进行动三轴试验,建立了一个预测冻融循环和动应力共同作用下的累计塑性变形模型。孙静等<sup>[10]</sup>研究了冻融循环对粉砂土动力特性影响,并建立了一个动模量比与动应变关系曲线的归一化拟合模型,建议将冻融循环5次后的土体动力参数作为基本参数,进行动力反应分析。杨爱武等<sup>[11]</sup>发现污泥固化土静、动长期强度随冻融次数的变化规律基本一致,在其他条件相同的情况下,土体静长期强度明显大于动长期强度。王静等<sup>[12]</sup>对3种不同塑性指数的季冻区路基土进行冻融循环后的动三轴试验,发现季冻区路基土动弹性模量和动剪切模量的大小与围压和塑性指数正相关,与冻融循环次数呈负相关,在6次冻融循环后均趋于稳定。JIN Qing等<sup>[13]</sup>发现冻融循环有利于粉土阻尼比的增加,动剪切强度和动模量随冻融次数的增加而减少。

目前,有关冻融循环作用下土体动力特性的研究成果较为丰富,但是冻融循环作用下土体结构特性变化研究还不多见,另外针对污泥固化土的相关研究也

很少。中国存在广大的多年冻土和季节性冻土区,这些地区的土体都遭受到不同程度冻融破坏,严重影响了工程质量,是冻土地区道路破坏的主要影响因素之一。本文对冻融循环作用下的污泥固化轻质土进行动三轴试验和固结试验,分析冻融循环作用对污泥固化轻质土动力特性和结构特性的影响,为污泥固化轻质土在实际工程的应用提供依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试样采用的污泥取自天津某污泥填埋场,伴有浓烈腐臭味,颜色呈黑褐色,呈流塑状。污泥从现场取回后,放置在阴凉处储存,并封箱覆盖防止雨水渗入和阳光直射。由于污泥本身强度低,加入适量的黏土以提供足够的土颗粒形成骨架结构,可以提高土体强度。黏土采用天津滨海新区的软黏土,将黏土捣碎成小块,在105℃温度下烘干24h后研磨、筛除杂质,将处理好的黏土密封保存,防止受潮。污泥和黏土的物理指标见表1。其中发泡剂为铝粉,固化剂为石灰、水泥。试验采用的材料配比(质量比)见图1。

表 1 试样物理特性指标

指标	污泥	黏土
含水量 $w/\%$	178.0	40.9
密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.81	1.76
液限 $w_L/\%$	73.0	38.9
塑限 $w_p/\%$	34.0	21.9
塑性指数 $I_p/\%$	39.0	17.0
液限指数 $I_L/\%$	3.69	1.12
有机质 $/\%$	43.81	-

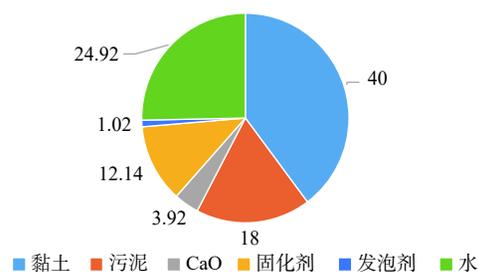


图 1 材料配比饼状图

Fig. 1 Pie chart of the material ratio

## 1.2 试样制备

污泥固化轻质土(固化土)具体制备步骤如下:在有机玻璃管内壁涂刷1层凡士林,用胶带和透气不透水布将一端封闭。按照配比将材料混合搅拌均匀后倒入模具。为防止断层和较大空隙,需边倒入边振捣以排出空气。装土完成后,封闭另一端,放入养护箱中养护后完成并模。

污泥固化轻质饱和土试样(饱和土)制备步骤如下:将固化土放置在饱和罐中,在真空抽气容器封闭后用抽气管将饱和罐内的空气抽出,直至饱和罐内压力为 $-0.1$  MPa,完成抽气。静置24 h至饱和罐内无气泡冒出,试样饱和。

污泥固化轻质重塑土(重塑土)制备步骤如下:将同一批次破碎后的固化土进一步碾碎,与水充分搅拌后用保鲜膜包裹,静置24 h后取出击实。击实后,用削土刀将土削成设计尺寸,包裹保鲜膜以防止含水率变化。

## 1.3 试验方案

### 1.3.1 冻融循环试验方案

将养护完成的固化土放入低温冷冻箱内,设置冻结温度,进行12 h低温冻结,之后取出并在室内放置12 h,即完成1次冻融循环。

考虑到天津地区冬季的低温波动、冻土深度以及路基厚度,试验冻结温度选择 $-5$  °C、 $-10$  °C、 $-15$  °C、 $-20$  °C。根据杨爱武等<sup>[14]</sup>对污泥固化土工程性质的研究,发现在养护28 d后,污泥固化土无侧限抗压强度趋于稳定。因此,选择固化土在标准养护条件下养护28 d后进行冻融试验。养护完成后,测得土体无侧限抗压峰值强度与冻融次数 $n$ (图2)。由图2可知,冻融循环8次之后,无侧限抗压峰值强度趋于稳定。因此试验设置有限次冻融循环次数为0, 1, 2, 4, 6, 8, 10次。

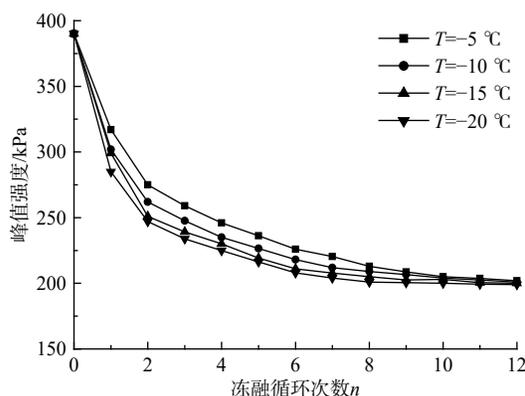


图2 峰值强度与冻融循环次数 $n$ 的关系曲线

Fig. 2 Relationship between the peak intensity and freezing-thawing cycle times  $n$

### 1.3.2 动三轴试验方案

采用DDS动三轴仪对冻融循环后的污泥固化轻质土进行不固结不排水动三轴试验。污泥固化轻质土主要作为路基填料,考虑到交通荷载对路基土的影响,试验设置围压为40 kPa,波形为类似交通荷载的正弦波。交通荷载的频率与车速及交通工具有关<sup>[15]</sup>,设置频率为1 Hz。

试验设计为单轴循环加载方式,根据三轴剪切试验结果确定动应力幅值。按照《土工试验规程》SL 237—2019要求,确定破坏标准为轴向累计应变达到5%。由于已在文献[11]中研究了冻融循环对固化土累积变形的影响,表明随着冻融次数的增加,土体临界动应力降低,且动应力幅值相同时,固化土应变趋势基本一致。因此,本文着重研究冻融循环次数和冻结温度对污泥固化轻质土动应力-应变曲线、动强度、动模量以及结构性的影响。试验的具体方案见表2。

表2 试验方案  
Table 2 Test scheme

指标	取值
冻结温度 $T$ /°C	-5, -10, -15, -20
冻融次数 $n$	0, 1, 2, 4, 6, 8, 10
幅值/kPa	100, 200, 250, 300, 350, 每级循环10周
其他	龄期: 28 d; 围压: 40 kPa; 频率: 1 Hz; 正弦波

## 2 冻融循环作用下污泥固化轻质土动力特性

### 2.1 冻融作用对动应力-应变关系的影响

不同冻结温度和冻融循环次数下的污泥固化轻质土动应力-应变曲线见图3。从图3可以看出,在不同冻融循环次数下土体动应力-应变呈弹塑性应力应变关系。曲线表现为弱应变硬化型。同一动应力下,随着冻融次数的增加,动应变幅值也增大。前4次冻融作用后,固化土变形较大,经历8次冻融后基本趋于稳定。这是因为未冻融前,土体结构未发生破坏。几次冻融循环使得土中水冻结膨胀、融化迁移,土体内部出现裂缝,土颗粒重新排列组合,进而导致土骨架失稳,土体结构开始破坏。经历8次冻融循环后结构性完全破坏,应力趋于新平衡,达到稳定状态。

随着冻结温度的降低,固化土动应变相差不大。特别是冻结温度为 $-15$  °C和 $-20$  °C时,动应力-应变曲线几乎重合。这说明冻结温度对固化土变形的影响十分有限,冻融次数是影响固化土变形的主要因素。

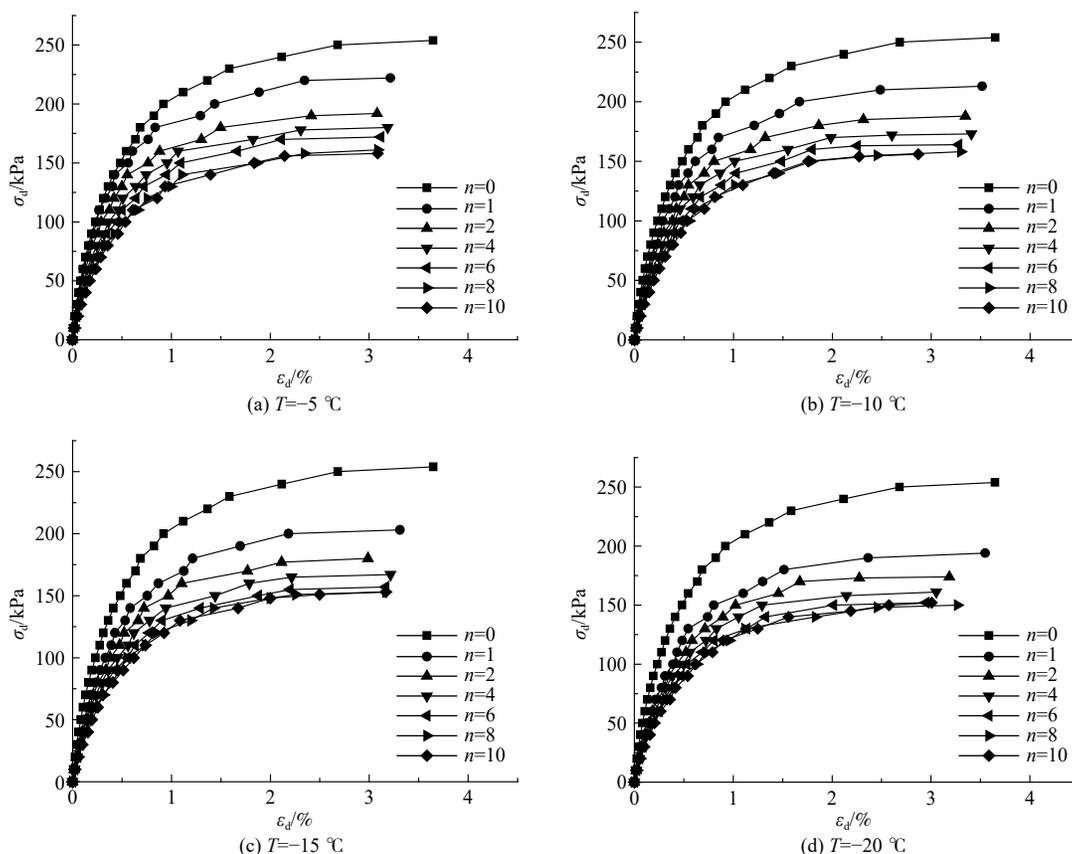


图 3  $\sigma_d$ - $\varepsilon_d$  曲线  
 Fig. 3  $\sigma_d$ - $\varepsilon_d$  curves

### 2.2 冻融作用对动强度的影响

动强度定义为在一定的振动次数 ( $N_f$ ) 下, 土体产生一定的允许动应变所需的动应力。在土力学中, 剪切强度为试样在  $45^\circ$  剪切面上的剪应力  $\tau_d = \sigma_d / 2$ , 因而土体的动强度曲线可表示为  $\sigma_d / 2 - N_f$  曲线。根据动三轴试验结果, 取允许应变为 1%<sup>[16]</sup>, 得到动强度曲线, 即  $\sigma_d / 2 - N_f$  关系曲线, 见图 4。由图 4 可知, 固化土动强度随着冻融次数的增大而降低。前 4 次冻融循环作用后, 动强度减小较大, 比  $n=0$  时降低了 21% ~ 25%。当  $n \geq 8$  以后动强度逐渐趋于稳定, 动强度由 200 kPa 降低到 140 kPa 左右, 比  $n=0$  时减小了 27% ~ 30%。这说明未经历冻融循环的固化土有较强的结构性, 土体动强度较高, 随着几次冻融循环后土体内部发生变化, 土颗粒间排列和联结发生改变, 颗粒间作用力逐渐减小, 土体结构性变弱, 动强度下降幅度较大。当  $n \geq 8$  后, 土体结构完全破坏, 并趋于一个新平衡, 动强度趋于稳定。

图 5 为污泥固化轻质土的峰值强度随冻融次数  $n$  变化的关系曲线。峰值强度为偏应力, 即轴向应力

与径向应力之差 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )。由图 5 可知, 冻结温度越低, 峰值强度越小。但随着冻融次数的增加, 动强度减小, 且最终趋于一点。这说明冻结温度会影响固化土动强度, 但随着冻融次数的增加, 冻结温度对固化土动强度的影响会减弱。冻融次数是影响污泥固化轻质土动强度的主要因素。

### 2.3 冻融作用对动初始弹性模量的影响

初始弹性模量: 在应力-应变曲线上相当于应力接近于零时的弹性模量, 即通过应力-应变曲线起始点所作切线的斜率。由动应力-应变曲线换算后得到  $E_d - \varepsilon_d$  曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 与动强度变化规律类似, 初始弹性模量  $E_d$  损失量随着冻融次数  $n$  的增加逐渐减小,  $n \geq 8$  时, 曲线几乎重合。这是由于在几次冻结和融化过程中, 土体结构发生变化且骨架重组, 土颗粒间排列发生变化, 进而导致土颗粒间接触面减少, 摩擦力和咬合力降低。随着冻融次数的增加, 土体结构趋于新的平衡状态。

冻结温度越低, 首次冻融后的  $E_d$  损失量越大。  $T = -15^\circ\text{C}$  时, 首次冻融后  $E_d$  损失量相当于之后多次冻

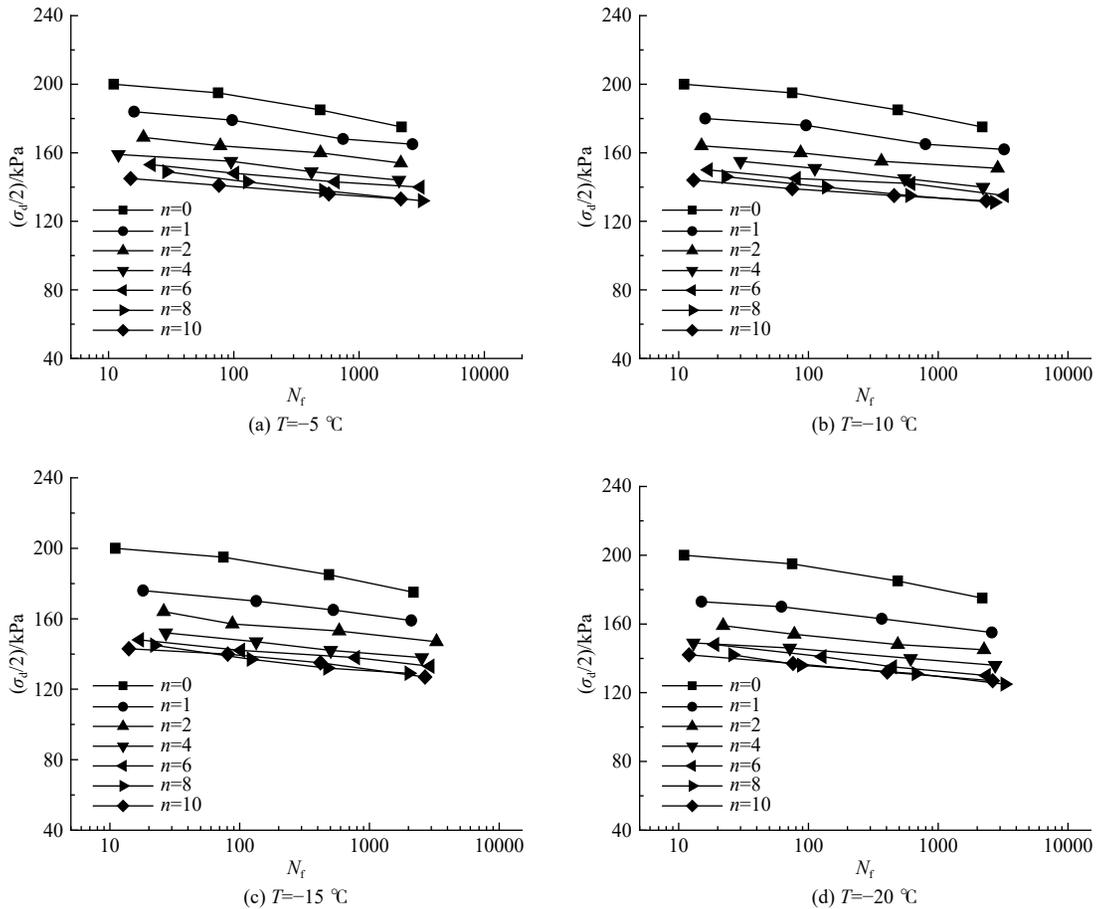


图 4 动强度曲线

Fig. 4 Dynamic strength curves

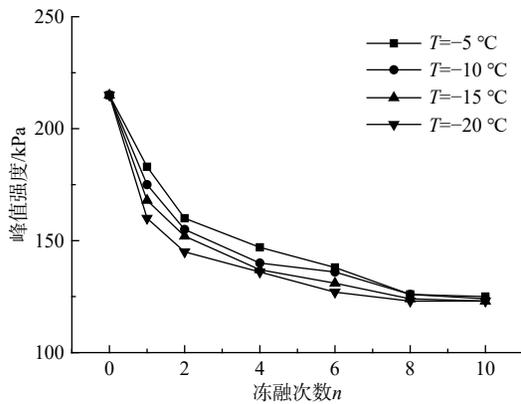


图 5 峰值强度与冻融次数  $n$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship between the peak strength and freeze-thaw times  $n$

融损失量的累积。当冻结温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,首次冻融后 $E_d$ 损失量相差不大。由于在首次冻融时,冻结和融化的温差越大,在融化初期土体“融胀”现象<sup>[17]</sup>越明显。“融胀”现象的出现导致冻结温度降低,土体变形加剧。

### 3 冻融与循环荷载作用下污泥固化轻质土结构特性演化分析

土体结构性是指土颗粒和孔隙的形态、排列特征以及颗粒间联结作用。土体结构性的强弱是导致土强度变化、变形的根本原因。

#### 3.1 固结压力作用下污泥固化轻质土结构性演化分析

土体原有结构一旦被破坏时,强度突然降低和变形量急剧增加的能力,即结构的可变性<sup>[18]</sup>。由于结构性土具有强的结构可稳性和结构可变性,因此利用扰动、加荷载等方式破坏土结构性,用结构性破坏时的难易程度和破坏后的变形程度,即结构势,来反映土体结构性的强弱,并提出一个一般土体的结构性定量参数——“综合结构势”。将“综合结构势”定义为:

$$m_p = \frac{m_1}{m_2} = \frac{S_s/S_0}{S_0/S_r} \quad (1)$$

$$m_1 = S_s/S_0, m_2 = S_0/S_r \quad (2)$$

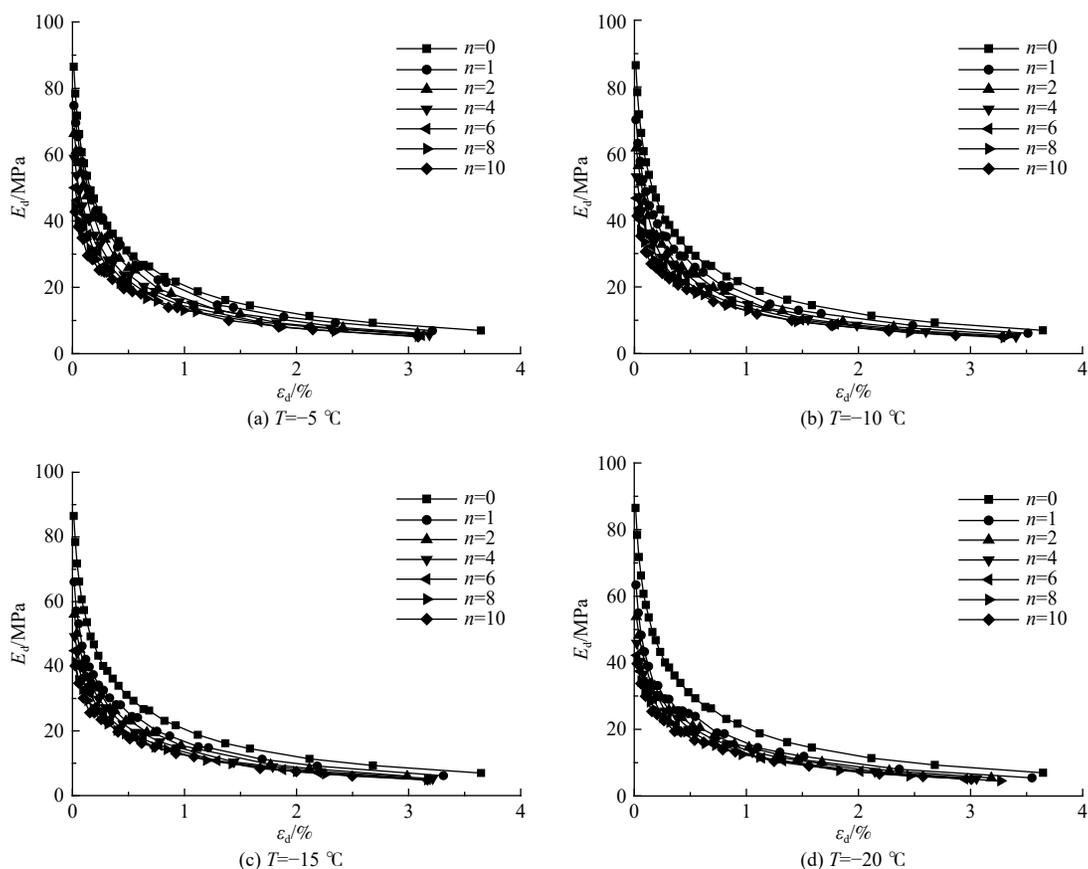


图 6  $E_d$ - $\varepsilon_d$  曲线

Fig. 6  $E_d$ - $\varepsilon_d$  curves

式中： $m_p$ ——土体在压力  $p$  下的综合结构势；

$S_r$ 、 $S_s$ 、 $S_0$ ——污泥固化轻质重塑土、饱和土、固化土在压力  $p$  下的应变变量；

$m_1$ 、 $m_2$ ——结构可变量、可稳性；

将污泥固化轻质土、重塑土和饱和土分别进行固结试验，得到 3 条  $e$ - $\lg p$  曲线(图 7)。由图 7 可知，随着外压增大，污泥固化轻质土和饱和土的曲线有明显的拐点。在拐点之前，变形慢慢增加。当压力大于拐点对应的固结压力  $p=200$  kPa 后，变形迅速增大，说明此时土的结构性开始丧失；重塑土曲线不具有拐点，说明重塑土不具有结构性。对比 3 条曲线，污泥固化轻质土的变形特性受结构性影响较为明显。

将固结试验结果代入式(1)(2)中，计算得到结构势参数  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_p$  随着压力  $p$  的变化曲线(图 8)。

由图 8 可知， $m_1$  随着压力的增大呈下降趋势，说明在压力作用下土颗粒排列受到影响，产生一定的变形，随着压力增大，下降趋势加快。当压力  $p$  为 200 kPa (即为  $e$ - $\lg p$  曲线中，固化轻质土曲线拐点对应的压力  $p$ )时， $S_0$  增大， $m_2$  增大，说明此时土颗粒间联结

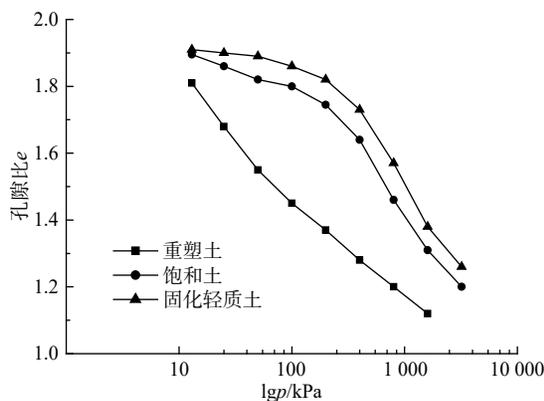


图 7  $e$ - $\lg p$  曲线

Fig. 7  $e$ - $\lg p$  curves

开始破坏，固化土结构性开始丧失。压力继续增大， $m_2$  加速增长，说明此时土结构中的联结多数已被破坏。

随着压力的增加， $m_p$  先增大后迅速减小，存在峰值点。这是由于较小的压力会挤压固结土颗粒使土颗粒间的摩擦力增加，使得  $m_2$  减小， $m_p$  增大。此时，较小的压力对土体结构有一定的增强作用。之后压

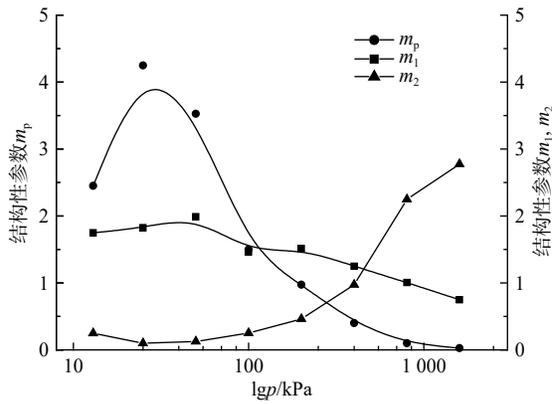


图 8  $m_1, m_2, m_p$  随压力  $p$  变化曲线

Fig. 8 Changes of  $m_1, m_2$  and  $m_p$  with pressure  $p$

力继续增大, 导致固结土中联结破坏, 土颗粒间发生移动,  $m_2$  迅速增加,  $m_p$  迅速降低, 结构性加速丧失。

### 3.2 冻融与循环荷载作用下污泥固化轻质土结构特性分析

郑勋等<sup>[19]</sup>在“综合结构势”的基础上, 提出建立一个既能考虑冻融循环扰动的影响、又能反映结构性随扰动程度不断增加的演化规律的定量参数——冻融结构势:

$$m_{pn} = \frac{S_s/S_n}{S_n/S_r} \quad (3)$$

式中:  $m_{pn}$ ——冻融作用下固化土在压力  $p$  下的冻融结构势;

$S_n$ ——冻融作用下固化土在压力  $p$  下的应变量。

为研究冻融与循环荷载双重作用下污泥固化轻质土结构特性, 在冻融结构势的基础上, 提出基于重塑土、饱和土和固化土动应力-应变关系的结构性参数  $m_{d\sigma n}$ :

$$m_{d\sigma n} = \frac{\sigma_{ds}/\sigma_{dn}}{\sigma_{dn}/\sigma_{dr}} \quad (4)$$

式中:  $m_{d\sigma n}$ ——冻融与循环荷载作用下污泥固化轻质土的冻融结构势, 下标  $d\sigma n$  为土体产生一定应变所需的动应力;

$\sigma_{dn}$ 、 $\sigma_{ds}$ 、 $\sigma_{dr}$ ——冻融与循环荷载作用下固化土、饱和土、重塑土相同动应变所需的动应力。

冻融与循环荷载作用下固化土结构性参数  $m_{d\sigma n}$  与动应变  $\varepsilon_d$  关系曲线见图 9。由图 9 可知, 曲线存在峰值点。这是因为荷载小于结构的峰值强度时, 土体

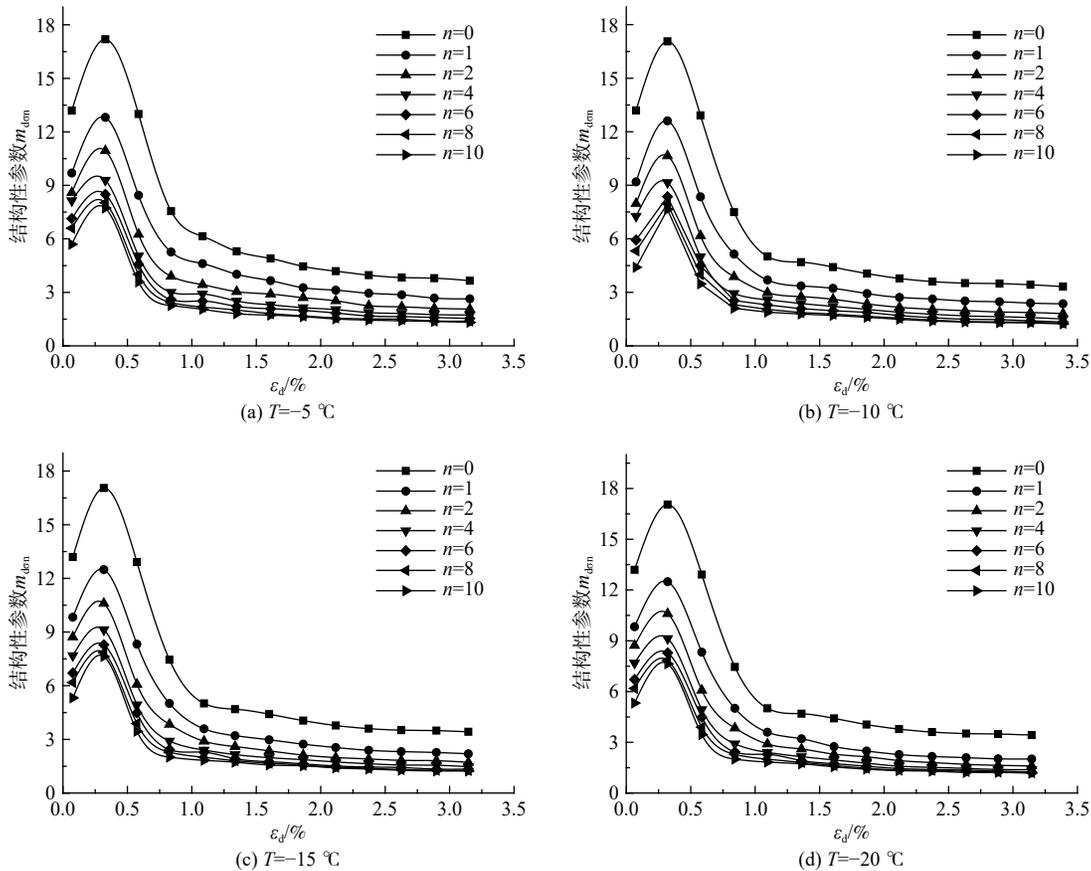


图 9 不同冻融循环作用下  $m_{d\sigma n}-\varepsilon_d$  曲线

Fig. 9  $m_{d\sigma n}-\varepsilon_d$  curves under different freezing-thawing cycles

处于弹性变形阶段,有较小的变形。较小的外力能够增强土颗粒间的咬合力和摩擦力,使得土体结构性有所增强。但随着荷载的增大,土颗粒间的联结被破坏,土颗粒间发生移动,进而导致土体内部结构开始破坏。当荷载进一步加大时,结构完全破坏,土体内部又趋于一个新平衡, $m_{pn}$ 变化不大。宏观表现为随着循环荷载的增加,土体内部结构先被加固,产生较小的变形,随后土体结构发生破坏,变形迅速加大。而动弹性模量先迅速减小后趋于平缓,动强度下降。

随着冻融次数的增加, $m_{pn}$ 损失量增大后趋于稳定。当 $n \leq 4$ 时, $m_{pn}$ 减小量较大。 $n \geq 8$ 时, $m_{pn}$ 减小量基本不变。随着冻结温度的降低, $m_{pn}$ 有所降低,但下降幅度并不大。从宏观角度来说,冻结温度降低,土体结构性降低,进而导致土体变形,动强度降低。而冻结温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,结构性有所降低,但十分有限,变形和动强度变化不明显。说明固化土结构性是影响土体变形和动强度变化的根本原因。

#### 4 结论

(1) 污泥固化轻质土动强度随着冻融循环次数的增加和冻结温度的降低而减小。前 4 次冻融循环作用后,动强度减小较大。当 $n \geq 8$ 时,动强度逐渐趋于稳定。冻结温度对土体动强度的影响较小。

(2) 随着冻融次数的增加,动应变增大。前 4 次冻融作用后,固化轻质土变形较大,经历 8 次冻融循环后基本趋于稳定。随着 $n$ 的增加, $E_d$ 损失量逐渐减小, $n \geq 8$ 时,曲线几乎重合。随着冻结温度越低,首次冻融后的 $E_d$ 损失量越大。当冻结温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $E_d$ 损失量相差不大。

(3) 当 $\varepsilon_d < 0.3\%$ 时,结构性参数 $m_{den}$ 增大,达到峰值。当 $\varepsilon_d > 0.3\%$ 时, $m_{den}$ 先迅速减小后趋于稳定。当 $n \leq 4$ 时, $m_{den}$ 减小量较大。 $n \geq 8$ 时,曲线几乎重合。随着冻结温度的降低, $m_{den}$ 有所降低,但下降幅度并不大。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 杨爱武,胡垚,杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4439 - 4449. [ YANG Aiwu, HU Yao, YANG Shaokun. New solidification technology and mechanical properties of municipal sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4439 - 4449. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 吕前辉,柴寿喜,李敏. 多因素影响下石灰固化盐渍土

抗剪性能的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 89 - 95. [ LYU Qianhui, CHAI Shouxi, LI Min. An experimental study of the shear properties of the solidified saline soil with lime concerning under the influence of multiple factors[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 89 - 95. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 3 ] 肖东辉,马巍,张泽,等. 冻融与静荷载双重作用下土体中水分场变化规律模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 155 - 160. [ XIAO Donghui, MA Wei, ZHANG Ze, et al. Model test on moisture's change law in the soil subjected to freezing-thawing and static load actions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 155 - 160. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 师华强,倪万魁,刘魁,等. 冻融循环作用对黄土压缩性的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 45 - 48. [ SHI Huaqiang, NI Wankui, LIU Kui, et al. The impact of the freezing-thawing cycle to compression of the loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(3): 45 - 48. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 魏海斌,刘寒冰,高一平,等. 粉煤灰土冻融循环后的动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1005 - 1008. [ WEI Haibin, LIU Hanbing, GAO Yiping, et al. Experimental research on dynamic properties of fly ash soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1005 - 1008. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 卢连长,张泽,冯文杰,等. 冻融循环作用下冻结黏土矿物物理力学性质研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 118 - 123. [ LU Lianchang, ZHANG Ze, FENG Wenjie, et al. Research on variability of freezing-thawing cycle on basic physical and mechanics properties of clay minerals[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 118 - 123. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 马玉涛,崔宏环,刘建坤,等. 冻融循环后路基粉质黏土动力特性研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(1): 81 - 83. [ MA Yutao, CUI Honghuan, LIU Jiankun, et al. Study on dynamic behavior of subgrade silty clays under freeze-thaw cycles[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2017, 39(1): 81 - 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] SIMONSEN E, ISACSSON U. Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests[J]. Canadian Geotechnical Journal,

- 2001, 38(4): 863 – 875.
- [ 9 ] 宋金华,李博楠,王亮,等.冻融循环作用下石灰改良土路基填料的动力特性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(2):47–54. [ SONG Jinhua, LI Bonan, WANG Liang, et al. Dynamic characteristics of lime modified soil subgrade filling under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(2): 47 – 54. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 孙静,公茂盛,熊宏强,等.冻融循环对粉砂土动力特性影响的试验研究[J].岩土力学,2020,41(3):747–754. [ SUN Jing, GONG Maosheng, XIONG Hongqiang, et al. Experimental study of the effect of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 747 – 754. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 杨爱武,杨少朋,杨少坤,等.冻融循环作用下城市污泥固化土动强度特性研究[J].工程地质学报,2020–033. [ YANG Aiwu, YANG Shaopeng, YANG Shaokun, et al. Study on dynamic performance of municipal sludge solidified soil under freeze-thaw cycle [J]. Journal of Engineering Geology, 2020 – 033. (in Chinese with English abstract) ] <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg>.
- [ 12 ] 王静,刘寒冰,吴春利,等.冻融循环对不同塑性指数路基土动力特性影响[J].岩土工程学报,2014,36(4):633–639. [ WANG Jing, LIU Hanbing, WU Chunli, et al. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 633 – 639. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] JIN Qing, ZHENG Yingjie, CUI Xinzhuang, et al. Evaluation of dynamic characteristics of silt in Yellow River Flood Field after freeze-thaw cycles[J]. J. Cent. South Univ. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4434-7>. (2020)27:2113-2122.
- [ 14 ] 杨爱武,胡焱,王韬,等.污泥固化及其应用、污泥固化土:中国, CN106277663A[P]. 2017-01-04. [ YANG Aiwu, HU Yao, WANG Tao, et al. Sludge curing agent and its application, sludge solidified soil: China, CN106277663A[P]. 2017-01-04. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 蔡袁强,赵莉,曹志刚,等.不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1238–1246. [ CAI Yuanqiang, ZHAO Li, CAO Zhigang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1238 – 1246. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 李志勇,曹新文,谢强.全风化花岗岩的路用动态特性研究[J].岩土力学,2006,27(12):2269–2272. [ LI Zhiyong, CAO Xinwen, XIE Qiang. Test study of dynamic characteristics of granitic residual soil for highway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2269 – 2272. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 齐吉林,马巍.冻融作用对超固结土强度的影响[J].岩土工程学报,2006,28(12):2082–2086. [ QI Jilin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082 – 2086. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 谢定义,齐吉林.土结构性及其定量化参数研究的新途径[J].岩土工程学报,1999,21(6):651–656. [ XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651 – 656. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 郑郎,马巍,李国玉,等.一个考虑冻融循环作用的结构特性定量参数的试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(7):1339–1344. [ ZHENG Yun, MA Wei, LI Guoyu, et al. Laboratory study on quantitative parameter of structural characteristics of soils considering effect of freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1339 – 1344. (in Chinese with English abstract) ]

编辑:张明霞