

正融粉质黏土在循环荷载作用下的变形特性研究

彭丽云, 刘建坤

(北京交通大学土木建筑工程学院城市轨道交通研究中心, 北京 100044)

摘要: 采用 MTS 动三轴仪, 对正融粉质黏土进行了循环荷载作用下的单轴试验, 研究了土样冻前含水率、顶端冷却温度、顶端融化温度和动应力幅值对土样变形特性的影响。试验结果表明: ①正融土样的累积塑性应变随其顶端冷却温度的升高、动应力幅值的增加而增大; 随冻前含水率的增加先减小后增大, 且以最优含水率为转折点; 顶端融化温度对其影响较小; ②对正融土而言, 除存在临界动应力外, 还存在一个临界冷却温度, 当冷却温度高于该值, 土样在若干次循环荷载作用下出现破坏; 当温度低于该值, 土样在循环荷载作用下的塑性累积变形最终趋于稳定; ③正融土能够承受的动应力幅值大于同含水率下的融土所能承受的动应力幅值, 尤其对高含水率土样, 这种现象更加明显; ④给出的正融粉质黏土的累积塑性应变和动应力幅值、加载循环次数, 累积塑性应变和顶端冷却温度、加载循环次数和之间的关系式能够和试验数据吻合良好, 可以对正融土的累积塑性应变进行简单预测。

关键词: 正融粉质黏土; 循环荷载; 含水率; 顶端融化温度; 顶端冷却温度; 变形特性

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)04-0567-06

作者简介: 彭丽云(1979-), 女, 甘肃临夏人, 博士后, 从事轨道交通工程、道路路基工程、冻土力学和非饱和土力学及其在工程中的应用研究。E-mail: auoxuan@188.com。

Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading

PENG Li-yun, LIU Jian-kun

(Urban Rail Transit Research Center, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Through the unconfined compression tests on thawing silty clay under cyclic loading by using an MTS dynamic triaxial apparatus, the deformation property analysis is made, and the influences of water content, amplitude of cyclic loading, cooling temperature and thawing temperature on the upside of the samples are taken into consideration. Some conclusions are drawn: ①The accumulated deformation of thawing silty clay increases with the increase of cooling temperature, and the soil with the higher amplitude of cyclic loading exhibits larger deformation. The thawing soil with the optimum water content expresses the lowest deformation and the influence of thawing temperature on soil deformation is very limited. ②Except for a critical dynamic loading, a critical cooling temperature is observed in thawing silty clay, the soil with the cooling temperature lower than that expresses the stable state of deformation after cyclic loading, and the soil with the cooling temperature higher than that will fail after some cyclic loading. ③Higher ability against the cyclic loading is observed of thawing soil than that of thawed soil, especially for the soil with the higher water content. ④The empirical model for deformation of thawing silty clay is given, which is in good agreement with the test data and can be used to predict the accumulated deformation of thawing silty clay simply.

Key words: thawing silty clay; cyclic loading; water content; thawing temperature; cooling temperature; deformation property

0 引言

冻土是一种对温度十分敏感且性质极不稳定的土体, 冻土的性质除受土颗粒的矿物和粒度成分、密度、含水率控制外, 还受含冰量的控制。冬季气温下降, 土体由非冻结状态逐渐进入冻结状态, 这种处于正在冻结过程中的土称为正冻土; 春季气温回升, 冻结完成的土体由于正负温差作用而融化, 这种处于正在融化过程的土体称为正融土; 土体中的温度全部为正温,

土体中没有冰的存在, 这时的土体即为融土。冻结的土体具有较高的强度, 其变形量受外界荷载影响较小; 而对正融土体而言, 由于其内部胶结冰的含量、土颗粒和冰之间的胶结强度随融化过程的进行不断降低, 因此土体抵抗变形的能力减弱, 在外荷载作用下会出现较大变形。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678020)

收稿日期: 2008-12-22

对循环荷载作用下冻土的研究, 主要集中在低温冻土。Chaichanavong^[1]通过低温动三轴试验对冻土的动杨氏模量和阻尼比进行了研究; Vinson^[2]对含盐冻土的动力特性进行了研究; Ting^[3]中研究了冻结砂土的动强度; 朱元林、何平等^[4]对冻结粉土在振动荷载作用下的变形特性及不同动载频率下的强度特性进行了试验研究; 徐学燕^[5]对青海高原风火山地区亚黏土进行了振动蠕变试验, 提出了双曲线型动弹模表达式; 仲丛利^[6]对冻土在振动荷载下的单轴、三轴疲劳强度及其模量进行了研究。

国内外对循环荷载作用下正融土性质的研究较少, 且有关正融土在循环荷载作用下变形特性的研究尚未见到相关报道。但在广大的季节性冻土地区, 出现破坏的往往是正冻土或正融土, 且该地区的路基工程在春融期间往往由于变形过大而不能正常使用。

因此, 本文采用 MTS 应力应变控制式动三轴仪, 配以相应的低温冷却装置, 融化装置和保温设备, 对京包包兰线上冻害频发地段的土样, 在单向融化过程中, 对其进行循环荷载作用下的单轴试验, 研究动应力幅值、加载频率、土样冻前含水率、顶端冷却温度和融化温度对其变形特性的影响。该研究是对冻土学科的补充与完善, 对季节性冻土地区的道路工程建设具有重要的指导意义。

1 试验方法

1.1 试验土样及其制备方法

试验采用京包、包兰线上冻害频发地段的路基填土, 其颗粒比重为 2.67, 液限为 30.7%, 塑限 20.1%, 粉粒含量 39.7%, 黏粒含量 24.3%, 最佳含水率为 18%, 该土为细颗粒含量较多的低液限粉质黏土, 属膨胀敏感性土。试样为直径 100 mm, 高 150 mm 的圆柱型试样, 用分层击实法制备, 控制试样干密度为 1.683 g/cm³, 对应的压实度为 0.95。对饱和土样用真空饱和法得到。

1.2 试验主要仪器设备

试验仪器主要由加载装置、保温装置和融化装置 3 部分组成, 各部分连接如图 1 所示。

加载装置采用美国 MTS 电液伺服式应力应变控制动三轴仪, 本试验采用其应力控制式轴向加载方式。

保温装置由螺旋硬塑料管、低温恒温冷浴和软质海绵组成。将硬塑料管螺旋环绕成筒状并用钢丝固定成型, 将其与冷浴连接形成一个闭合回路, 低温冷液在其中循环流动, 调节冷浴温度, 使其达到预定温度; 将筒套在土样周围, 再在筒外围用 20 cm 厚的软质海绵进行包裹, 进而达到保温的目的。将温度传感器放

在套筒和土样之间的孔隙中, 监测温度变化, 当测得温度值在 0℃~0.5℃ 之间时, 即认为保温良好; 若超过该温度范围, 就通过调节冷浴来达到需要温度。

为模拟不同温度下土样的融化过程, 在土样顶部放置冷端, 冷端与冷浴相连, 用恒温冷浴来控制土样顶端的融化温度, 冷浴控温精度为 ±0.1℃。

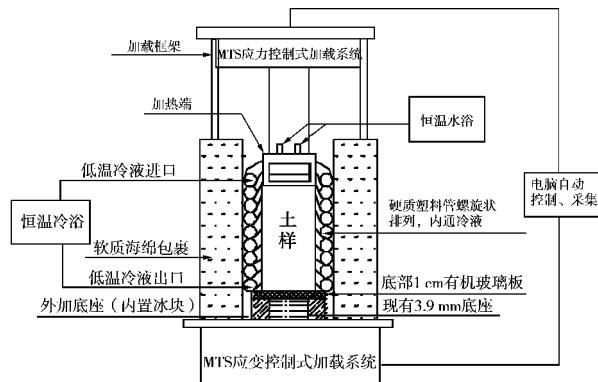


图 1 试验仪器设备示意图

Fig. 1 Test instruments

1.3 试验方法

(1) 土样的冻结过程

为确保土样内含水率均匀分布, 将制备好的土样连同有机玻璃圆筒一起在保湿箱内静置 12 h。然后取出放置于低温恒温箱内 1℃ 的温度下恒温 12 h 后, 按照预定的顶端冷却温度调节低温冷浴, 使土样在周围环境温度和底板温度恒定为 1℃ 的情况下, 仅在顶端冷却温度的作用下进行单向冻结。

具体的冻结时间, 在不同的顶端冷却温度下亦不相同。冻结完成的判定方法为: 对试验土样在制样过程中从顶端开始每隔 3 cm 埋设一个热电偶, 将其与试验室内的 256 通道的惠普采集仪相连接, 监测冻结过程中试样内的温度变化, 当在两个连续的 30 min 内, 同一传感器读数差值小于 0.02℃ 时, 认为冻结完成。

(2) 土样的加载融化过程

本试验中对正融土的加载融化过程是同时进行的, 但是在把土样从冻结装置中取出进行动力荷载施加之前, 先对加热端进行处理, 即调节与加热端连接的恒温水浴温度, 使加热端的温度达到试验中设定的融化温度, 维持水浴温度不变; 同时调节控制保温系统的冷浴温度, 使保温区域内的温度维持在 0 度附近, 维持冷浴温度不变; 上述步骤完成之后, 在低温室内将冻结好的土样用千斤顶快速取出, 并用橡皮膜套好, 装到 MTS 动三轴仪的加载框架下进行试验; 同时安装加热端, 使土样在之前调好预定融化温度下进行融化; 同时根据预定的加载程序, 开启 MTS 动三轴仪进行试验, 并用热电偶监测土样周围的环境温度, 并

按照 1.2 中所述的方法调节温度, 以确保保温效果。

1.4 试验设计

具体的试验安排如表 1 中所示。

表 1 试验条件和试验方法一览表

Table 1 Outline of the test program

土样 编号	冻前含 水率/%	顶端冷却 温度/℃	顶端融化 温度/℃	动应力幅值 /kPa	频率 /Hz
N1~N5	18	-5	10	20,30,40,50,80	
N6~N8	18	-5	5	20,50,80	
N9~N14	18	-10	10,5	20,50,80	
N15~N20	18	-3	10,5	20,50,80	1
N21	18	-2	10	50	
N22~N57	13,23	-10,-5,-3	10,5	20,50,80	

注: 18%为土样最佳含水率, 对应饱和度 82%; 23%为土样的饱和含水率。

2 循环荷载作用下正融土变形特性研究

2.1 动应力幅值对正融土变形特性的影响

图 2 给出了无侧限条件下 N 1~N 5 号土样的累积塑性应变和循环荷载周数之间的关系曲线。①、②、③、④、⑤代表的动应力幅值分别为 20, 30, 40, 50 和 80 kPa。上述 5 个土样的冻前含水率、顶端冷却温度和融化温度均相同, 仅动力应幅值不同。

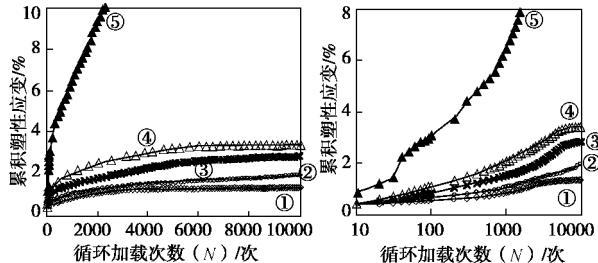


图 2 不同动应力幅值下 $e_p - N$ (lgN) 关系曲线

Fig. 2 Curves of e_p vs. $N(\lg N)$ at different cyclic loadings

从中可以看出, 在相同动应力幅值时, 土样的累积塑性应变随循环加载次数的增多而增大, 这是因为随着加载次数的增多, 土样由于荷载作用而产生的累积变形逐渐增大, 与此同时, 土样的融化过程不断进行, 土中有更多的冰相变成了水, 由于土样融化而产生的变形亦增加, 上述二者的综合作用表现为土样的变形随加载次数、融化时间的增长而增大。

在相同加载次数时, 动应力幅值较大的土样表现出较大的累积塑性变形, 原因在于荷载越大, 土样较容易被压密, 应变能减小较快, 此外, 土样融化过程中较大的荷载作用又加剧了土中水的排出, 变形增大。

此外, 从整个曲线簇来看, 在动应力幅值较小时, 在加载融化初期, 应变增加较快; 此后, 随加载次数增加, 融化时间增长, 试样被融化压缩, 应变能逐渐减小; 当加载融化一定时间后, 试样密度增大以至能够抵抗外荷载的作用, 且融化逐渐完成, 此时累积塑

性应变亦逐渐趋于稳定。当动应力幅值较大时, 一定加载次数后, 试样强度降低, 变形急剧增加, 土样即出现破坏。⑤中的试样在加载几周就出现破坏, 初步断定该土样的临界动应力在 50~80 kPa 之间。

除⑤中的土样在加载后出现变形急剧增加的现象外, 其余土样的累积塑性应变 $e_p - N$ 之间的关系可按照 Monismith 提出的简单幂函数模型来拟合:

$$e_p = aN^b \quad (1)$$

其中 a , b 为两个与土的类型、土的特性、应力状态和土的冻结融化状态相关的参数; 该参数比融土的相应参数具有更加丰富的内涵。

采用常用的对累积塑性应变和循环荷载作用周数进行归一化的思路, 对图 2 中的①、②、③、④曲线簇, 在用第 1000 次循环后的累积塑性应变 ($e_{p,n=1000}$) 进行归一化后得到一条新的曲线, 其表达式如下:

$$\frac{e_p}{e_{p,n=1000}} = AN^B \quad (2)$$

针对该正融土: $A = 0.1979$, $B = 0.2392$, $R^2 = 0.9756$ 。

图 3 给出了 $e_{p,n=1000} - s_d$ 关系曲线, 符合如下关系:

$$e_{p,n=1000} = as_d^b \quad (3)$$

式中, s_d 为施加的动应力, a , b 为试验参数。

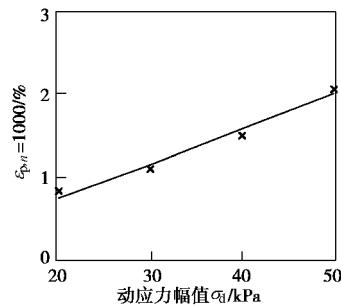


图 3 $e_{p,n=1000} - s_d$ 关系曲线

Fig. 3 Curve of $e_{p,n=1000}$ vs. s_d

针对该正融土: $a = 0.0296$, $b = 1.0787$, $R^2 = 0.9757$ 。

式 (2) 和式 (3) 进行联合, 即得到

$$e_p = AN^B as_d^b \quad (4)$$

图 4 中对试验数据用公式 (4) 进行了描述, 效果良好, 说明该公式可对相同温度状态下, 不同加载次数, 不同动应力幅值下土样的累积塑性应变进行预测。

为使试验结果能够更好的为实际工程的冻害防治服务, 表 2 中给出了客货列车不同轴重、运行时速下, 路基基床表层底面 (路基顶面以下 0.6 m) 处的设计动荷载值, 因基床表层 0.6 m 内的路基填料多为碎石, 本试验研究的土只能应用在基床表层以下, 因此, 取此处的动应力为参考。

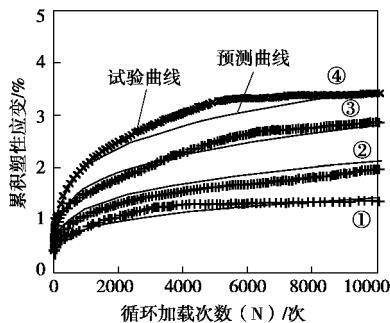


图 4 $e_{p,n=1000} - S_d$ 验证曲线
Fig. 4 Validated curves of $e_{p,n=1000}$ vs. S_d

表 2 设计动荷载

Table 2 Design cyclic loading

速度/(km·h ⁻¹)	轴重/t							
	客车		货车					
	14	20	23	23	25	27	30	
普通 线路	100	22.9	32.8	37.7	35.2	38.2	41.3	45.9
	120	24.4	34.9	40.2	37.2	40.4	43.6	48.5
	160	27.5	39.3	45.2	41.2	44.8	48.3	53.7
客运 专线	200	24.4	34.9	40.2				
	250	26.8	38.2	43.9				
300~350	29.1	41.5	47.7					

说明: 单位 kPa, 该表摘自文献[7], 在文献原表的基础上, 乘以了基床表层底面处的应力衰减系数, 参见文献[7]。

从中可以看出, 重载货车在较高时速下出现破坏的可能性最大。

2.2 顶端冷却温度对正融土变形特性的影响

土样在封闭系统中进行单向冻结, 在含水率、压实度相同的情况下, 顶端冷却温度决定了土样的冻结深度、冻结速率和冻结过程中的水分迁移, 最终决定了冻土构造。不同构造的土样, 在融化加载过程中会表现出不同的性质。

图 5 给出了无侧限条件下, 含水率 18%、顶端融化温度为 10°C 的土样, 在动应力幅值为 50 kPa、频率 1 Hz 的压-压型正弦荷载作用下的累积塑性应变和循环加载次数关系曲线。①、②、③和④代表的土样顶端冷却温度分别为 -10°C、-5°C、-3°C 和 -2°C。在本研究中, 固定土样含水率、顶端融化温度和土样所承受循环荷载的大小及频率, 仅考虑土样的冻结状态对其融化过程中的动力特性的影响。

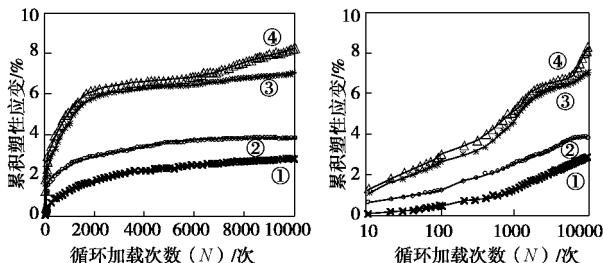


图 5 不同顶端冷却温度下 $e_p - N(\lg N)$ 关系曲线
Fig. 5 Curves of e_p vs. $N(\lg N)$ at different cooling temperatures

从中可以看出, 不同条件下冻结的土样, 在相同的融化加载过程中亦表现出不同的性质。在相同动荷载和顶端融化温度下, 土样的累积塑性应变随其冻结过程中顶端冷却温度的降低而减小, 顶端冷却温度较低的土样具有较强的抵抗变形的能力。原因在于相同初始含水率下, 在单向冻结过程中, 顶端冷却温度较低的土样其最大冻结深度较深, 冻结的水份多, 含冰量大; 且温度越低, 冰自身的强度越高, 和土颗粒之间的黏聚力越大; 此外, 冷却温度低, 冻结速率快, 大部分水在原位冻结, 对土初始结构改变程度小, 因此低温下冻结的土样表现出较高的抵抗动变形能力。

土样的累积塑性应变随其加载融化时间的增长而增大。对 -10°C 和 -5°C 的顶端冷却温度下冻结的土样, 由于其顶端冷却温度较低, 在相同的融化温度下融化需要较长的时间, 且其冻结段强度较高, 因此, 该试样的应变增加速率随加载融化时间的增长而减小, 累积塑性应变最终逐渐趋于稳定; 对 -3°C 和 -2°C 的顶端冷却温度下冻结的土样, 由于其顶端冷却温度较高, 在相同的融化温度下融化需要的时间较短, 且其冻结段强度较低, 试样的应变增加较快, 并使得土样最终由于变形过大而出现破坏。

由此可以推断, 当动应力幅值小于其临界动应力时, 对正融土而言, 存在一个临界冷却温度, 土样以该温度为界限, 当冻结时的温度高于该值, 土样融化加载过程中, 在若干次循环荷载作用后应变急剧增加, 土样出现破坏; 当温度低于该值时, 土样融化加载过程中其塑性累积变形最终趋于稳定。针对该土样, 此临界温度在 -5°C ~ -3°C 之间。

对 -10°C 和 -5°C 的顶端冷却温度下冻结的土样, 其累积塑性应变 ~ 循环加载次数 N 之间的关系和融土一样, 可以按照式 (1) 中给出的幂函数模型来描述。

图 6 中给出了不同加载次数下, 分别在 -10°C、-5°C、-3°C 和 -2°C 的顶端冷却温度下冻结的土样, 在 10°C 的顶端融化温度作用下, 其累积塑性应变和土样顶端冷却温度绝对值之间的关系曲线, 二者服从如下关系:

$$e_p = c |T|^d \quad (5)$$

式中 c 和 d 为试验参数, T 为土样的顶端冷却温度。针对该正融土: $N=1000$ 时, $c=9.3646$, $d=-0.78362$, $R^2=0.9452$; $N=5000$ 时, $c=0.0296$, $d=-0.6333$, $R^2=0.91642$; $N=10000$ 时, $c=13.9082$, $d=-0.71285$, $R^2=0.95566$ 。

从上面的试验数据分析中可以看出, 对 -10°C 和 -5°C 的顶端冷却温度下冻结的土样, 存在两个指数关系: 一是 $e_p \sim N$ 之间存在指数关系; 二是 $e_p \sim |T|$ 之间也

存在指数关系; 因此采用如下关系式, 对不同顶端冷却温度下正融土样的累积塑性应变进行预测:

$$e_p = g |T|^h N^q , \quad (6)$$

式中, T 为土样的顶端冷却温度, N 为循环加载次数, g , h 和 q 是依赖于土的类型、土的特性、应力状态和土的冻结融化状态相关的参数。

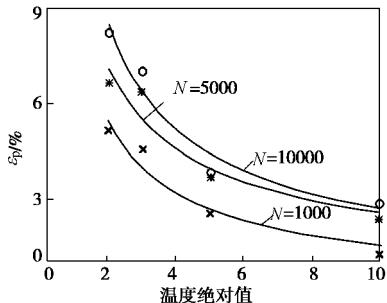


图6 e_p - $|T|$ 关系曲线

Fig. 6 Curves of e_p vs. $|T|$

下面给出了上述-10°C 和-5°C 的顶端冷却温度下冻结土样的 e_p - N 曲线的拟合参数及相关系数, 供工程参考。

$T_{\text{冷}}=-10^{\circ}\text{C}$, $g=0.9336$, $h=-0.4473$, $q=0.2345$, $R^2=0.9643$; $T_{\text{冷}}=-5^{\circ}\text{C}$, $g=0.9458$, $h=-0.3467$, $q=0.3245$, $R^2=0.9278$ 。

2.3 含水率对正融土变形特性的影响

冻前含水率对正融土的累积塑性应变有一定影响; 在试验的顶端冷却温度和顶端融化温度范围内, 正融土的累积塑性应变随含水率的增加先减小后增大, 以最优含水率18%作为其累积塑性应变的转折点。

在相同顶端融化温度下, 动应力幅值为20 kPa, 顶端冷却温度为-10°C时的累积塑性应变和循环加载次数关系曲线如图7所示。从中可以看出, 最优含水率土样表现出较小的累积塑性变形, 且该变形随加载循环次数的增多而逐渐趋于稳定, 土样在10000次的循环荷载作用下并没有出现较大变形; 在加载融化的初始阶段, 含水率为13%和18%的土样二者产生的累积塑性应变相差不多, 但随着加载循环次数的增加, 含水率13%的土样其累积塑性应变逐渐增加, 在10000次的循环荷载作用出现较大变形; 而此时, 含水率为23%的饱和土样其累积塑性应变随加载融化作用时间增长较快; 此外, 在上述动应力范围内, 随着土样顶端冷却温度的升高, 正融土样的累积塑性应变增加, 饱和含水率土样其累积塑性应变受温度升高的影响最为显著, 变化幅值最大。

在相同顶端融化温度下, 当动应力幅值增加至50 kPa, 顶端冷却温度同时升高到-5°C时的累积塑性应变和循环加载次数关系曲线如图8所示。可以看出, 最

优含水率土样其累积塑性应变随着加载循环次数的增多而逐渐增大; 并且含水率为13%的土样和含水率为18%的土样二者产生的累积塑性应变在加载融化过程中一直相差不多; 而此时, 饱和含水率的土样其累积塑性应变随加载次数迅速增加, 出现很大变形。

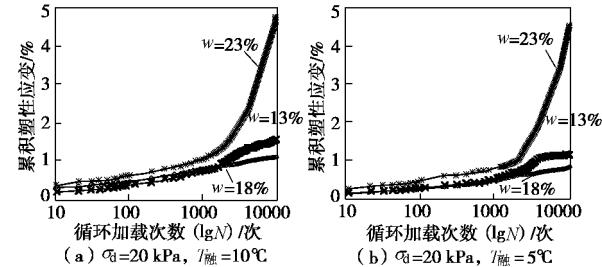


图7 $T_{\text{冷}}=-10^{\circ}\text{C}$ 时, 不同冻前含水率下 e_p - $\lg N$ 关系曲线

Fig. 7 Curves of e_p vs. $\lg N$ at different water contents

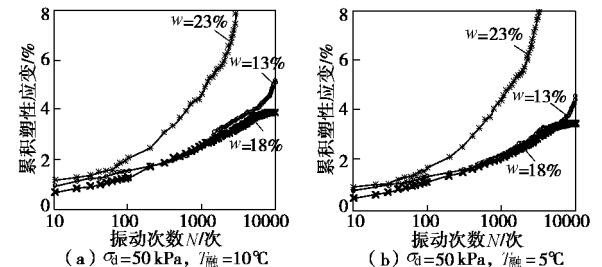


图8 $T_{\text{冷}}=-5^{\circ}\text{C}$ 时, 不同冻前含水率下 e_p - $\lg N$ 关系曲线

Fig. 8 Curves of e_p vs. $\lg N$ at different water contents

在相同顶端融化温度下, 当动应力幅值继续增大到8 kPa, 顶端冷却温度升高到-3°C时, 最优含水率18%, 13%和饱和含水率23%的土样, 其累积塑性应变均随加载循环次数的增多而迅速增大, 直至破坏。如图9中所示。

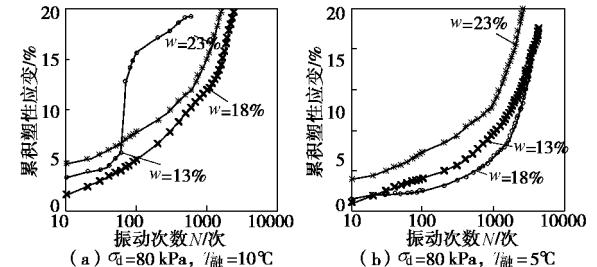


图9 $T_{\text{冷}}=-3^{\circ}\text{C}$ 时, 不同冻前含水率下 e_p - $\lg N$ 关系曲线

Fig. 9 Curves of e_p vs. $\lg N$ at different water contents

综上所述, 较大的动应力幅值, 较高的含水率和较高的土样顶端冷却温度是正融土出现破坏的关键因素。在实际路基工程中, 京包、包兰线路基填土天然含水率远比23%小, 但是在有地下水补给的地段, 冬季气温降低, 土体冻结过程中, 在外界冷源的作用下, 大量的水分源源不断的迁移到路基体内并在其中冻结成冰。环境冻结温度越高, 持续时间越长, 积聚的冰的含量越大, 可能形成较厚的冰透镜体, 出现较大冻

胀量；当春季气温回升，路基土体开始融化，大量的冰融化成水，原先较高的冻土强度迅速衰减；此外，在列车荷载作用下，路基土体内部融化土体的水分不能及时排出，并且由于该融化土体强度过低，不能承受较大荷载，因此该地段出现大幅融沉变形和翻浆冒泥现象。

2.4 顶端融化温度对正融土变形特性的影响

顶端融化温度的高低决定了土样融化速率的大小，融化温度越高的土样融化速率越快，完全融化所需要的时间越短。

图 7~9 中 (a) 图和 (b) 图分别代表不同的顶端融化温度。从中可以看出顶端融化温度对正融土的变形有一定影响，在其他条件相同的情况下，顶端融化温度较高为 10℃的土样其累积塑性应变普遍大于顶端融化温度较低为 5℃的土样；相同含水率下，当动应力幅值越小，顶端冷却温度越低的情况下，这种差异越不明显，随着动应力幅值的增加，顶端冷却温度的升高，差值逐渐增大；且当含水率增大至饱和时，在较高的顶端冷却温度下冻结的土样，当其承受较高的融化温度作用时，在数次循环后土样即出现较大应变，突然发生破坏。

此外，通过对试验数据的对比分析，还可以发现，尽管顶端融化温度对正融土的变形有影响，但其影响的程度远远小于土样含水率、动应力幅值和顶端冷却温度对正融土变形的影响。因此，在正融土变形特性的分析中，可以重点考虑后 3 种因素。其原因在于顶端融化温度只是改变了土样在融化过程中的融化速率，而对土样自身的构造改变较小，在循环荷载作用下，土样边融化边发生压缩变形，变形的速率尽管发生了变化，但土样最终表现出来的变形量并没有出现很大的变化。

3 结 论

(1) 土样冻前含水率、顶端冷却温度和动应力幅值是影响正融土累积塑性应变的关键因素；顶端融化温度对其影响较小。土样的累积塑性应变随其顶端冷却温度的升高、动应力幅值的增加而增大；随冻前含水率的增加先减小后增大，且以最优含水率为其转折点。

(2) 对正融土而言，除存在临界动应力外，还存在一个临界冷却温度，当冷却温度高于该值，土样在若干次循环荷载作用下出现破坏；当温度低于该值，土样在循环荷载作用下的塑性累积变形最终趋于稳定。

(3) 正融土能够承受的动应力幅值大于同含水率

下的融土所能承受的动应力幅值，尤其对高含水率土样，这种现象更加明显。

(4) 当作用在正融土样上的动应力幅值小于其临界动应力时，在相同冷却和融化温度下，土样的累积塑性应变和动应力幅值、循环荷载作用次数之间存在幂函数关系；当正融土样的顶端冷却温度小于其临界冷却温度时，在相同融化温度和动荷载作用时，土样累积塑性应变和顶端冷却温度、循环荷载作用次数之间亦存在幂函数关系；且关系式中的参数通过试验即可简单确定。

参 考 文 献:

- [1] CHAICHANAVONG T. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions[D]. East Lansing: Michigan State University, 1976.
- [2] VINSON T S, LI J C. Dynamic properties of frozen sand under simulated earthquake loading conditions[C]// Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, 1980: 65 - 72.
- [3] TING J M, MARTIN R T, LADD C C. Mechanisms of strength for frozen sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **109**(10): 1286 - 1302.
- [4] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 围压对冻结粉土在振动荷载作用下蠕变性能的影响[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊): 20 - 25. (ZHU Yuan-lin, HE Ping, ZHANG Jia-yi. Effect of confine pressure on creep behavior of frozen silt under dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(S): 20 - 25. (in Chinese))
- [5] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 77 - 81. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 1998, **20**(5): 77 - 81. (in Chinese))
- [6] 仲丛利. 冻融场地的动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1996. (ZHONG Cong-li. Study on dynamic properties of freezing and thawing site[D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996. (in Chinese))
- [7] 张千里. 铁路路基基床结构设计方法及参数的研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008. (ZHANG Qian-li. Research on design method and parameters determine of railway subgrade bed[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2008. (in Chinese))