

# 冻融循环下粉质黏土的动力损失模型

戴文亭<sup>1</sup>, 魏海斌<sup>1,2</sup>, 刘寒冰<sup>1</sup>, 高一平<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 应用技术学院, 长春 130022)

**摘要:**通过冻融循环后的粉质黏土的动三轴试验,研究了粉质黏土作为路基填料的动力特性,得出了动强度和循环荷载次数及冻融循环次数的数量关系和动模量与冻融循环次数的关系曲线。建立了动模量损失模型,能够预测每一次冻融循环后的动强度和最大动模量。通过与试验对比可知,预测模型具有较高的精度,可以用来评估冻融循环对粉质黏土路基使用寿命的影响。

**关键词:**道路工程; 粉质黏土; 冻融循环; 动强度; 动模量; 预测模型

**中图分类号:**U416.1    **文献标识码:**A    **文章编号:**1671-5497(2007)04-0790-04

## Dynamic damage model of silty clay after freeze-thaw cycles

Dai Wen-ting<sup>1</sup>, Wei Hai-bin<sup>1,2</sup>, Liu Han-bing<sup>1</sup>, Gao Yi-ping<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Applied Technology, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** From the dynamic triaxial tests on the silty clay after freeze-thaw cycles the dynamic characteristics of silty clay as roadbed filling were studied. The quantitative relationship between the dynamic strength and the number of dynamic load cycles and the freeze-thaw cycles, the relationship curve between the dynamic module and the the number of freeze-thaw cycles were obtained. A dynamic module damage model was built to predict the dynamic strength and maximum dynamic module of the silty clay after every freeze-thaw cycle. The built prediction model is characterized by high precision, can be used to evaluate the effect of the freeze-thaw cycles on the service life of the silty clay roadbed.

**Key words:** road engineering; silty clay; freeze-thaw cycles; dynamic strength; dynamic module; prediction model

在我国东北季节性冻土地区,路基的基层大部分为粉质黏土,在建设初期其强度较好,但经过几次冻融作用后强度明显下降。原因是冻结土中的水分结成冰透镜体,产生冻胀现象。在融化刚开始时,土基上层含水量增加,下层还没有完全溶

解,故排水不畅,其承载力显著降低。在荷载反复作用下,路面被破坏,形成纵、横向裂纹。目前的防治方法主要有改良加固法和药剂法。加固材料的冻稳定性等力学性质对材料的强度影响较大。已有学者对冻土力学性质的不同侧面进行了广泛

收稿日期:2006-08-28.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20030183025);吉林大学创新基金资助项目.

作者简介:戴文亭(1964-),男,副教授,博士.研究方向:道路灾害防治. E-mail:daiwenting64@163.com

通讯联系人:魏海斌(1971-),男,讲师,博士研究生.研究方向:季冻区路基稳定性及其改良加固.

E-mail:weihb@jlu.edu.cn

的研究<sup>[1,2]</sup>。但有些方面如冻土强度机理及其与流变性的关系、冻土冻融过程的结构性数学模型以及冻融循环对粉质黏土的力学性质的影响等尚缺乏深入系统的研究<sup>[3]</sup>。作者尝试利用室内冻融试验及动三轴试验分析冻融循环对粉质黏土力学性质的影响,并对冻融过程动强度衰变的数学模型及粉质黏土的冻融损伤模型进行了研究,研究结果可作为寒区地基和基础设计的依据。文献[4]认为材料的极限充水程度  $S_{cr}$  是衡量混凝土抗冻性优劣的关键参数。但是粉质黏土的孔隙水冰点较低且数量多,检测较困难。作者采用直接测得粉质黏土在每次冻融循环后的残余动模量(用相对动模量损失率表示)建立冻模量损伤模型。其优点是:经冻融循环后粉质黏土在循环荷载作用下的动力性能可直接获得,损伤度基本能够反映粉质黏土结构的损伤状态,不要求过多试样便能方便测试损伤过程,且与实际情况基本相符。

## 1 试样制备及试验方法

### 1.1 试样制备

试样来自长春市南岭取土场,其物理性质为:塑限 22.4%,液限 34%,塑性指数 11.6%,最佳含水率 21%,最大干密度 1.63。

根据公路路基土分类,本试验用土为粉质中液限黏土,经过烘干、碾碎、过筛的土样按最佳含水率、最大干密度采用标准击实方法,制成一批高 140 mm、直径 70 mm 的试样,密封保存 24 h 后进行动三轴试验。

### 1.2 试验方法

室内冻融试验的冻融温度确定在  $-5\sim0^{\circ}\text{C}$ ,把一批试样用薄膜封闭好放于冻融箱内,取温度梯度为  $1^{\circ}\text{C}$ ,从  $0\sim-5^{\circ}\text{C}$  每隔 24 h 调节一次,再从  $-5\sim0^{\circ}\text{C}$  每隔 24 h 回调一次,此过程为一个冻融循环。每经一个冻融循环取出 15 个试样进行不固结不排水动三轴试验,其他试件继续做冻融循环试验。采用的是 DTC-306 型多功能电液伺服动态三轴仪,并采用应力控制式循环加载,最大动应力为 700 kPa,最小动应力为 60 kPa,振动频率  $f=1\text{ Hz}$ ,以正弦波形式加载,围压分别为 100、200、300 kPa。试验数据由与动三轴仪匹配的自动数据采集系统完成,数据包括荷载循环次数、最大动应力、围压、应力-应变滞回圈。破坏标准按中规范<sup>[5]</sup>要求,将弹性应变与塑性应变之和  $\epsilon_d=5\%$  定为破坏标准。

## 2 冻融循环后动力特性及损伤模型

### 2.1 冻融循环后粉质黏土动强度特性

经过 8 次冻融循环后粉质黏土的动强度见图 1。在第 1、2 次冻融循环后粉质黏土的动强度下降较大,如表 1 所示,在经过 3 次冻融循环后粉质黏土的动强度趋于稳定,不随围压和冻融循环次数的变化而变化,与文献[6]一致。

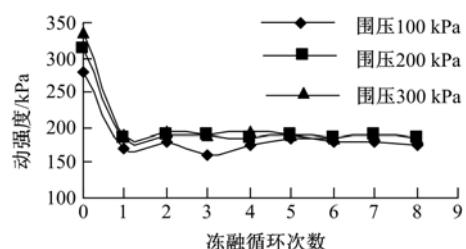


图 1 动强度随冻融循环次数变化曲线

Fig. 1 Change of dynamic strength of silty clay with number of freeze-thaw cycles

表 1 经第 1、2 次冻融循环后动强度下降率

Table 1 Strength reduction of silty clay by freeze-thaw cycles

围压/kPa	1 次冻融循环		2 次冻融循环	
	52%	65%	63%	72%
100	52%	65%		
200		63%	72%	
300	70%		75%	

根据动三轴试验的结果,按照粉质黏土动强度与冻融循环次数的关系,建立了满足如下指数方程的动强度衰减模型:

$$\sigma_d = ae^{bn} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_d$  为动强度;  $n$  为冻融循环次数;  $a$ 、 $b$  为试验常数,在不同围压下的  $a$ 、 $b$  值见表 2。模型模拟结果见图 2,相对误差为  $0.117\% \sim 2.5\%$ 。

表 2 试验常数  $a$ 、 $b$  值

Table 2 Value of  $a$  and  $b$

常数	围压/kPa	
	200	300
$a$	196.9	191.6
$b$	-0.0006	-0.0034

### 2.2 冻融循环后粉质黏土动模量特性

进行动模量试验时,在围压 100 kPa、初始动应力 60 kPa、振动 6 次后再加一倍作为下一级动应力,测定各级  $\sigma_d$  下的动应变  $\epsilon_d$ ,经过 8 次冻融循环后的应力-应变曲线如图 3 所示,再点绘出  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$  曲线。根据虎克定律,当  $\sigma_d$  趋于 0

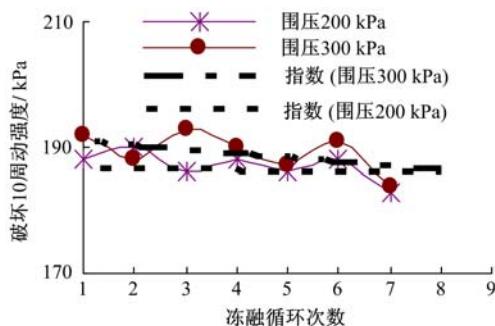


图2 动强度衰减指数模型与试验值对比  
Fig. 2 Result comparison of model and test

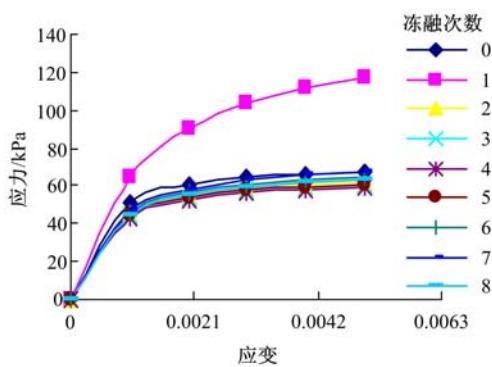


图3 应力-应变试验曲线  
Fig. 3 Stress-strain curves

时,  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$  曲线的初始切线斜率称为初始动模量<sup>[7,8]</sup>, 用  $E_i$  表示。每次冻融循环后的动模量与冻融循环次数的关系见图 4。这与 Simonsen 等<sup>[9]</sup>发现在常围压下测试冻融循环后土的动模量不总是降低这一结论相符。

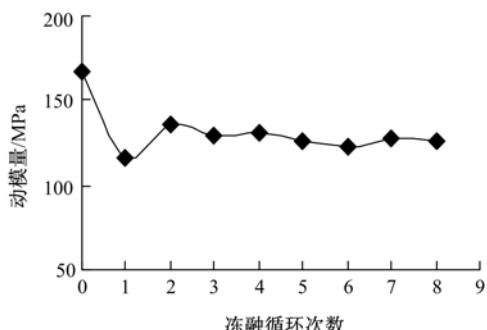


图4 动模量随冻融次数的变化曲线  
Fig. 4 Curve of dynamic modulus of silty clay with number of freeze-thaw cycles

设  $E_0$  为粉质黏土未冻融前的动模量, 而  $E_i$  也可称为粉质黏土经  $n$  次冻融循环后的剩余动模量, 根据图 4 所示实线, 建立了第一次冻融循环后的动模量和冻融循环次数的数学模型(双曲线模型):

$$E_i = \frac{n}{a + bn} \quad (2)$$

设  $E_i/n$  为动模量衰变速率,  $n/E_i$  为动弹性模量衰变度, 且满足:

$$\frac{n}{E_i} = a + bn \quad (3)$$

可以看出, 该动模量衰变度与冻融循环次数( $1 \sim n$ )成正比, 构成新的坐标系, 则双曲线变成直线。当  $n=1$  时, 其斜率  $b=0.009$ , 当  $n \geq 2$  时, 其斜率  $b=0.0085$ , 而截距都为  $a=-0.0005$ 。从图 5 看出, 预测模型拟合曲线与试验值比较吻合, 完全可以预测粉质黏土每次冻融循环后的剩余动模量。

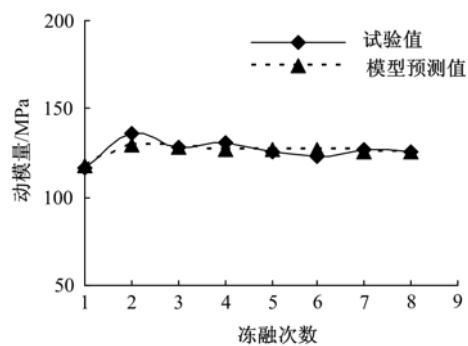


图5 动模量拟合模型曲线与试验值对比  
Fig. 5 Comparison of dynamic modulus of model calculation and tested result

### 2.3 冻融循环下的动力损失模型

根据损伤力学的基本理论, 用相对动模量来表征冻融循环后粉质黏土路基动模量的损伤度  $D^{[10]}$ , 其定义见式(4)。粉质黏土冻融循环后相对动模量愈低, 意味着损伤程度愈大。

$$D = 1 - E_i E_0^{-1} \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)得

$$D = 1 - E_0^{-1} \left( \frac{n}{a + bn} \right) (n \geq 2) \quad (5)$$

式(5)就是每次冻融循环后粉质黏土动模量损伤度的数学模型。通过此模型可以预测冻融循环对粉质黏土路基动力性能的影响, 可评估冻融循环对粉质黏土路基使用寿命的影响, 从而判断其使用寿命。从损伤度的结果看(见表 3), 粉质黏土冻融损伤度相对较大, 在第 3 次冻融循环后的粉质黏土的损伤度趋于一致, 表明粉质黏土路基在经过多次冻融和循环荷载后其动模量保持稳定, 但最大动模量相对未冻时下降了 30%。原因是冻融使其结构发生剧烈变化, 孔隙比增加、压缩系数增大<sup>[8,9]</sup>。

表3 试验结果损伤度与用数值模拟结果求得的损伤度比较(MPa)

Table 3 Comparison of cumulation damage between test and simulation(MPa)

结 果	冻融次数							
	1	2	3	4	5	6	7	8
试验值	116.48	135.825	128.47	130.234	125.45	123.271	126.758	125.46
模型拟合值	117.6471	129.0323	127.6596	126.9841	126.5823	126.3158	126.1261	125.9843
损伤度 D/%	29.2986	22.4566	23.2815	23.6874	23.9289	24.0891	24.203	24.2883

### 3 结 论

(1) 粉质黏土经过3次冻融循环后比较稳定,此时动强度比未冻前下降了52%~75%。粉质黏土作为路基填料不具有良好的抗冻性,在围压300kPa时,最初粉质黏土动强度好于其他两种围压情况,但随着冻融循环次数的增加趋于一致,不随围压变化而变化,另外随着循环荷载振动次数的增加,动强度衰减幅度不大。

(2) 根据试验建立的粉质黏土经冻融循环后的动强度衰减模型,可以预测粉质黏土经过冻融循环后动强度的衰减量,动强度衰减模型预测的相对误差为0.117%~2.5%。另外还建立了用粉质黏土未冻前的动模量和冻融循环次数来表示每次冻融循环后粉质黏土动模量的损伤度,动模量损伤的模型预测相对误差为0.417%~5.01%。

(3) 下一步希望在数学预报模型的基础上,研究出更方便有效的预报冻害方法,从而为粉质黏土在季冻地区的合理使用及为工程设计提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 李洪升,张斌,刘增利,等.一维冻结土体冻胀量的水热力耦合计算[J].大连理工大学学报,1999,39(5):621-624.  
Li Hong-sheng, Zhang Bin, Liu Zeng-li, et al. Calculation method for coupled moisture, heat and pressure of frost heave on one-dimensional freezing soil [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(5):621-624.
- [2] 李述训,南卓铜.冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J].冰川冻土,2002,24(2):109-115.  
Li Shu-xun, Nan Zhuo-tong. Impact of freezing and

thawing on energy exchange between the system and environment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2):109-115.

- [3] 齐吉琳,程国栋, Vemeer P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学进展,2005,20(8):887-894.  
Qi Ji-lin, Cheng Guo-dong, Vemeer P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(8):887-894.
- [4] Fagerlund G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw durability of concrete [J]. Materials and Structure, 1977, 10(4): 231-253.
- [5] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003:157-175.
- [6] 马巍,徐学祖. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报,1999,21(2):158-160.  
Ma Wei, Xu Xue-zu. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2):158-160.
- [7] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利出版社,1996:523-532.
- [8] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆,朱亢林译. 北京:科学出版社,1985:241-247.
- [9] Simonsen E, Isacsson U. Soil behavior during freezing and thawing using variable and confining pressure triaxial tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(4):863-875.
- [10] 刘志勇,马立国. 高强混凝土的抗冻性与寿命预测模型[J]. 工业建筑,2005,35(1):11-14.  
Liu Zhi-yong, Ma Li-guo. Durability and service life prediction model for freezing and thawing cycle of high strength concrete[J]. Industrial Construction, 2005, 35(1):11-14.