

DOI: 10.11779/CJGE201404006

冻融循环对不同塑性指数路基土动力特性影响

王 静¹, 刘寒冰^{2*}, 吴春利², 曲肖龙³

(1. 吉林建筑大学交通科学与工程学院, 吉林 长春 130118; 2. 吉林大学交通学院, 吉林 长春 130022; 3. 吉林省交通规划设计院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 取季节性冻土区 3 种不同塑性指数路基土, 在最佳含水率下制成压实度大于 95% 的试件, 在经历不同次数完整冻融循环过程后, 进行不同围压下的动三轴试验。试验结果表明: 在加载初期, 土的动模量 (包含动弹性模量和动剪切模量) 随着循环次数的增加呈下降趋势, 随着动荷载次数的继续增加, 动模量渐趋稳定。取荷载作用 5000~6000 次的动模量的平均值作为土在此状态下的稳定值, 得出规律如下: 季冻区压实路基土动模量随围压的增加而增大, 随冻融循环次数的增加而减小, 随塑性指数的增加而增加; 阻尼比随冻融循环次数、围压及塑性指数均无明显规律可循。通过数据分析得到动模量与围压、塑性指数和冻融循环次数的关系式, 对于季冻区缺乏动模量数据的路基土, 可依此公式进行冻融循环后的动模量推算, 进而为季冻区的路基设计提供参考。

关键词: 季节性冻土区; 冻融循环; 塑性指数; 动力特性

中图分类号: TU435; U416.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2014)04 - 0633 - 07

作者简介: 王 静(1980 -), 女, 吉林柳河人, 博士研究生, 从事道桥结构动态优化设计理论及应用研究。E-mail: wangjing0062@sina.com。

Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices

WANG Jing¹, LIU Han-bing², WU Chun-li², QU Xiao-long³

(1. School of Communication Science & Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Jilin Communications Planning and Design Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: The specimens with the maximum degree of compaction are prepared. Dynamic triaxial tests are carried out on the specimens under different confining pressures after 0 to 7-time complete freeze-thaw cycles. The test results show that at the initial stage, the dynamic moduli of the soils (including dynamic elastic modulus and dynamic shear modulus) exhibit a downward trend with the increase of the loading cycles. As the number of dynamic loads continues to increase, the dynamic modulus is stable. By taking the average dynamic moduli of 5000 to 6000 loading cycles as the soil dynamic properties in this state, the laws are summarized as follows: the dynamic moduli of the compacted soils in seasonally frozen region increase with the increase of the confining pressure, decrease with the increase of the number of the freeze-thaw cycles, and increase with the increase of the plasticity index. The damping ratio has no obvious rules to follow with the freeze-thaw cycles, confining pressure and plasticity index. The relationship among the dynamic moduli, confining pressure, plasticity index and number of freeze-thaw cycles is obtained though data analysis. It may provide a reference for the embankment design and construction in the seasonally frozen region.

Key words: seasonally frozen soil region; freeze-thaw cycle; plasticity index; dynamic characteristic

0 引 言

进行道路力学设计的先决条件是得到能够表征道路建筑材料非线性行为的可用的实际模型^[1], 国内外有很多人致力于研究这个问题。在寒区, 土的物理力学特征随季节更替表现出很大变化^[2-10], 而这些变化将给道路质量及运营水平造成很大影响甚至是破坏, 比如冬冻春融时, 寒区道路的冻胀、翻浆, 坑槽等, 对于该区所有实际道路的设计和评估都必须考虑这些

变化。因此对于不同冻融循环后道路材料的力学性能变化的研究是非常有必要的。包卫星等^[11]对典型天然盐渍土进行了多次冻融循环后的盐渍试验研究。王天亮等^[12]采用动三轴试验对水泥及石灰改良土进行了冻融循环后的动力特性研究。炳慧等^[13]采用单轴抗压

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308256)

收稿日期: 2013 - 06 - 03

*通讯作者

强度试验研究了冻融循环对含盐土物理力学性质的影响。主要研究季节性冻土区压实路基土在不同次数冻融循环后的动力特征变化。

为了得到压实路基土在不同冻融循环次数后的动力特性(动弹性模量和动剪切模量值及阻尼比),并明确其变化趋势,在查阅大量参考资料基础上,制定了动三轴试验方案,并对试验所得数据进行分析处理,以期得到动力特性随围压及冻融循环次数等因素的变化规律,为路基设计和施工提供有效参考。

1 试验土样和试验方案

1.1 试验土样

本研究在季节性冻土区选取了3种不同塑性指数的路基土, I_p 分别为 10.7, 15.98, 21.93, 将其定义为 1, 2, 3 号土。根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 进行路基土材料的颗粒分析试验, 结果见表 1。

用烘干法测得土样天然含水率, 环刀法测密度, 采用液塑限联合测定仪得到 3 种土的液限及塑限, 结果见表 2。3 种土的最佳含水率均由击实试验确定, 分别将 3 种土在最佳含水率下制成压实度均大于 95% 的试件。试件直径 38 mm, 试件高 80 mm。试验证明, 冻结时的负温度不同, 产生的冻融特性等都是不相同的, 冻融作用对土体结构的影响程度也不尽相同, 冻融后土体的物理力学性质的变化规律也随之不同^[14]。日本道路研究工作者进行了冻融试验时, 不同负温度的选取对土体强度影响的相关试验, 结果表明^[5]: 虽然冻融循环次数不同, 但冻结时负温度越低, 土体在融化后强度降低越显著, 但当冻结时负温度低于 -10°C , 强度的衰减将达到稳定状态。故本次试验将负温度设置为 -15°C 。以往研究表明, 经 6~7 次冻融循环后, 路基土物理参数趋于稳定^[6-7], 所以, 本项目亦对 3 种土样试件进行 7 次冻融循环。冻融循环采用可控温型冰柜, 设置温度为 -15°C , 将试件置于冰柜中 24 h, 模拟一次冻胀, 再将冰柜温度调至 15°C , 将试件置于冰柜中 24 h, 模拟一次融化, 如此便是一次完整冻融循环过程。在冻融过程中, 试件始终用保鲜膜包好, 不考虑冻融循环过程中的含水率变化。将经历不同次数冻融循环后融化的试件进行常温动三轴试验。

表 1 试验土样颗粒分析结果

试样	粒径/mm				
	<0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0
S1	38.2	19.9	7.7	20.8	13.4
S2	31.2	22.2	12.5	24.9	9.1
S3	30.4	19.4	12.4	26.8	11.0

表 2 试验土样基本物理性质

试样	密度 $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
S1	1.42	25.4	33.3	22.6	10.7	0.262 (可塑)
S2	1.62	24.2	35.5	19.5	16.0	0.294 (可塑)
S3	1.52	20.6	41.7	19.8	21.9	0.004 (硬塑)

1.2 试验方案

试验采用英国 GDS 公司生产的 DYNTTS (electromechanical dynamic triaxial testing system) ——电机控制的动三轴测试系统(见图 1)。

对每种土、每次冻融循环后的试件进行动三轴试验, 围压分别取 100, 200 及 300 kPa。采用常围压 (CCP——constant confining pressure) 测试方法, 即围压 σ_3 在整个测试过程中保持不变。试件轴向施加频率为 1 Hz 的正弦荷载, 采样时间为 0.1 s, 即每个循环采集 10 个点。不同围压条件下, 所施加轴向力的幅值亦不相同, 将典型半波正弦荷载绘至图 2。在试验中读取并记录以下: 循环荷载周数、围压、轴向应变、轴向应力、剪应变及剪应力等数值。



图 1 DYNTTS——电机控制的动三轴测试系统

Fig. 1 Electromechanical dynamic triaxial testing system

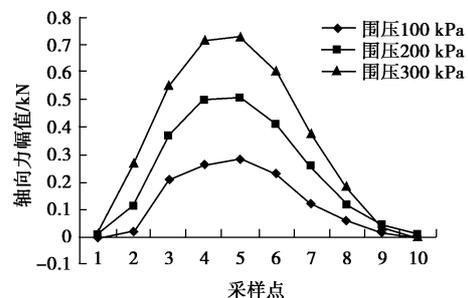


图 2 不同围压下的轴向力示意图

Fig. 2 Axial forces under different confining pressures

2 试验结果分析

对动三轴试验所得每次加载循环数据进行处理,

动弹性模量 E_d (dynamic elastic modulus)、动剪切模量 G_d (dynamic shear modulus) 和阻尼比按如下所述计算方法进行计算。

动弹性模量为

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (1)$$

式中, $\sigma_d = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ 为循环动应力, $\varepsilon_d = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$ 为动应变。

动剪切模量为

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} \quad (2)$$

式中, $\tau_d = (\tau_{\max} - \tau_{\min})/2$ 为循环动剪应力, $\gamma_d = (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/2$ 为动剪应变。

阻尼比为

$$\lambda = \frac{A_0}{4\pi A_T} \quad (3)$$

式中, A_0 为动应力 - 应变关系曲线滞回圈所包围的面积, A_T 为动应力 - 应变关系曲线原点到最大幅值点连线下的三角形的面积。

2.1 动弹性模量 E_d

(1) 动弹性模量取值及变化规律

通过式 (1), 得到 3 种土不同次数冻融循环后在不同围压下的动弹性模量值, 绘出了土动弹性模量随荷载作用次数的变化规律, 见图 3。图 3 (a) 为动荷载作用 0~6000 次时, 动弹性模量的变化趋势, 从图 3 (b) 可以看出, 在加载初期, 动弹性模量随着循环次数的增加呈下降趋势, 随着动荷载次数继续增加, 动弹性模量渐趋稳定。

为了明确加载初期动弹性模量的变化规律, 将 0~200 次荷载循环的动弹性模量变化趋势绘制成图, 具体见图 3 (b) 所示, 从图 3 (b) 中可以看出, 在加载初期, 动弹性模量随荷载循环次数的增加首先呈下降趋势, 之后经历一段下降上升的波动期, 然后再下降, 最后渐趋稳定。

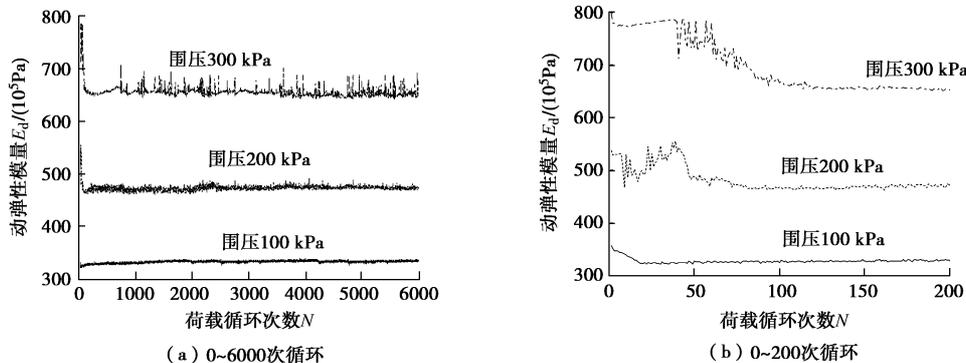


图 3 动弹性模量随荷载作用次数的变化规律

Fig. 3 Variation of dynamic elastic moduli with number of loads

取荷载作用 5000~6000 次动弹性模量值的平均值作为土在此状态下的稳定值, 得到 3 种土不同次数冻融循环后, 在不同围压下的动弹性模量值的变化规律 (见图 4), 其中图 4 (a), 4 (b), 4 (c) 为 3 种土在经历不同次数冻融循环后在不同围压下的动弹性模量值, 图 4 (d), 4 (e), 4 (f) 为相同围压条件的不同塑性指数土在不同冻融循环次数后的动弹性模量值。

(2) 多元非线性拟合

由以上分析可知, 季冻区路基土动弹性模量 E_d 与围压 σ_3 , 塑性指数 I_p 及冻融循环次数 n 均有关系。对不同 I_p 、 σ_3 及 n 条件下所得的 E_d 试验值进行多元非线性拟合, 构造 $E_d = f(\sigma_3, I_p, n)$ 关系式, 采用指数函数, 拟定回归公式如下:

$$E_d = p_1 \sigma_3 + p_2 \sigma_3 e^{\frac{p_3 I_p + 1}{p_4 n + p_5}} + p_6 \quad (4)$$

通过式 (4) 可以得到任意 σ_3 , I_p 及 n 下的 E_d 值, 但首先需确定 $p_1 \sim p_6$ 参数值。采用最大继承法 (max implementation optimization, 简称 MIO 法) 进行迭代计算, 得到以下参数值: $p_1 = 4$, $p_2 = -3.28$, $p_3 = -0.13$, $p_4 = 1.06$, $p_5 = 1.87$, $p_6 = 189$ 。由该拟合公式所得理论值与试验值计算所得相关系数 $r = 0.93$, 拟合效果较理想。不同围压下所得拟合曲面形状相似, 只绘出 $\sigma_3 = 200$ kPa 的拟合曲面, 见图 5。

由拟合公式 (4) 可以得出结论, 3 种土经历不同冻融循环后其动弹性模量总的变化趋势是随路基土的塑性指数的增加而增大, 随围压的增加而增大, 随冻融循环次数增加而减小。由图 4 可以看出, 2 号土及 3 号土在第三次冻融循环后其动弹性模量有大幅提升, 笔者分析因为经历前两次冻融循环, 土颗粒产生崩裂, 重组, 咬合等, 进行重新排列组合, 对其结构性产生影响, 具体原因应对不同冻融循环后的土微观结

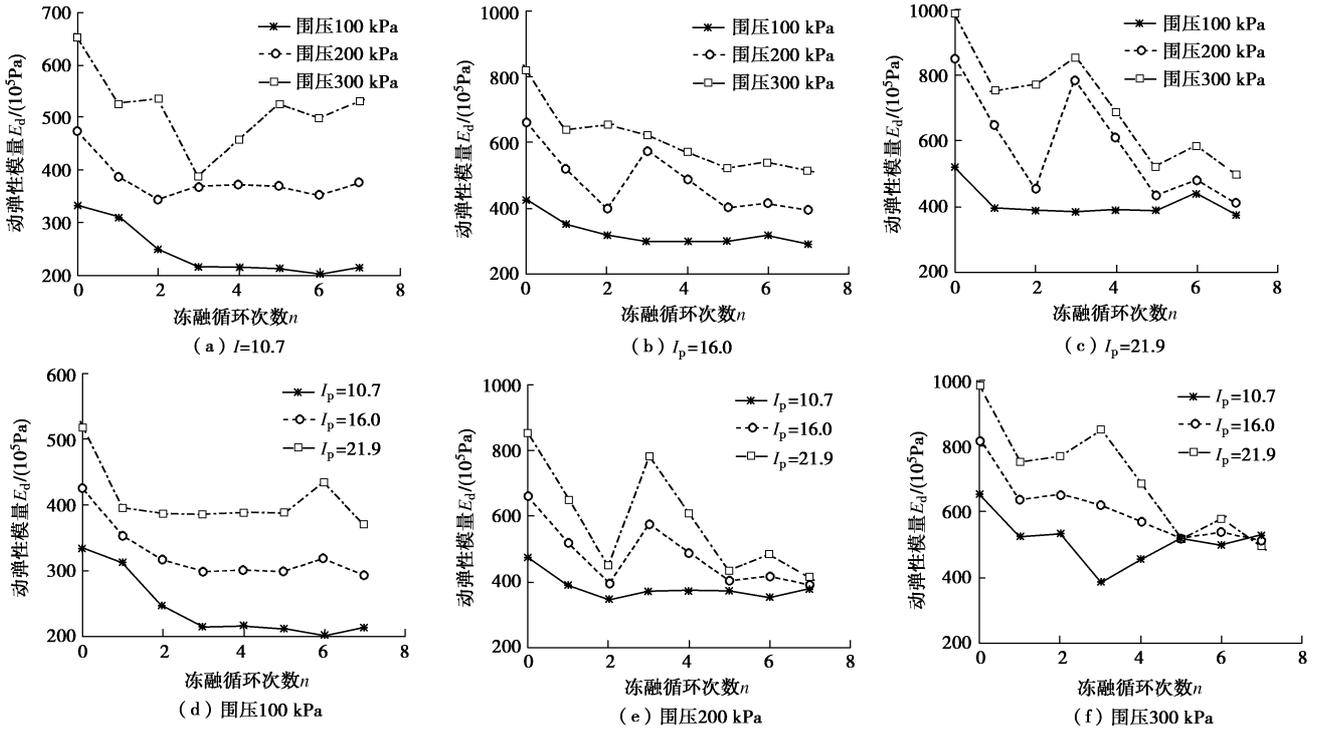


图4 不同冻融循环次数后在不同围压下的动弹性模量值

Fig. 4 Dynamic elastic moduli of soils after different freeze-thaw cycles under different confining pressures

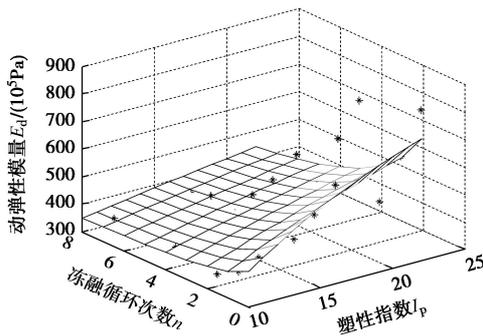


图5 动弹性模量随塑性指数及冻融循环次数变化规律

Fig. 5 Variation of dynamic elastic moduli with plasticity index and number of freeze-thaw cycles

构进行分析, 方可得出合理解释。对于季冻区缺乏动弹性模量数据的路基土, 可依此公式进行冻融循环后的动弹性模量推算, 进而为季冻区路基设计及施工提供参考。

2.2 动剪切模量 G_d

(1) 动剪切模量取值及变化规律

动剪切模量随荷载作用次数的变化趋势与动弹性模量相同, 在此不做赘述(图5)。取荷载作用 5000~6000 次动剪切模量值的平均值作为土在此状态下的稳定值, 通过式(2), 得到3种土不同次数冻融循环后, 在不同围压下的动剪切模量值(见图6), 其中图6(a), 6(b), 6(c)为同种土在经历不同次数冻融循环后在不同围压下的动剪切模量值, 图6(d), 6(e), 6(f)为在相同围压条件下, 不同塑性指数土在不同

冻融循环次数后的动剪切模量值。

由图6可见, 对同一种土来说, 在相同冻融循环次数条件下, 土动剪切模量随围压增加而增加; 相同围压下土动剪切模量随冻融循环次数基本呈下降趋势, 且前几次下降较为明显, 6~7次以后渐趋稳定值(此结果与戴文亭等^[15]研究结果规律基本相同); 在相同围压及相同次数冻融循环条件下, 土动剪切模量与塑性指数呈正比关系。2号土及3号土在第三次冻融循环后动剪切模量产生的突变, 原因见前述对动弹性模量变化的分析, 此不赘述。

(2) 多元非线性拟合

由以上分析可知, 季冻区路基土动剪切模量 G_d 与围压 σ_3 , 塑性指数 I_p 及冻融循环次数 n 均有关系。对不同 I_p , σ_3 及 n 条件下所得的 G_d 试验值进行多元非线性拟合, 构造 $G_d = f(\sigma_3, I_p, n)$ 关系式, 采用指数函数, 拟定回归公式如下:

$$G_d = p_1 \sigma_3 + p_2 \sigma_3^{\frac{p_3 I_p + 1}{p_4 n + p_5}} + p_6 \quad (5)$$

通过式(5)可以得到任意 σ_3 , I_p 及 n 下的 E_d 值, 首先需确定 $p_1 \sim p_6$ 参数值。本文采用模拟退火方法(simulated annealing, 简称 SA)进行迭代计算, 得到以下参数值: $p_1 = 0.055$, $p_2 = 0.3$, $p_3 = 0.53$, $p_4 = 1.33$, $p_5 = 6.17$, $p_6 = 62$ 。由该拟合公式所得理论值与试验值计算所得相关系数 $R = 0.94$, 拟合效果较理想。不同围压下所得拟合曲面形状相似, 本文只绘出 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 的拟合曲面, 见图7。

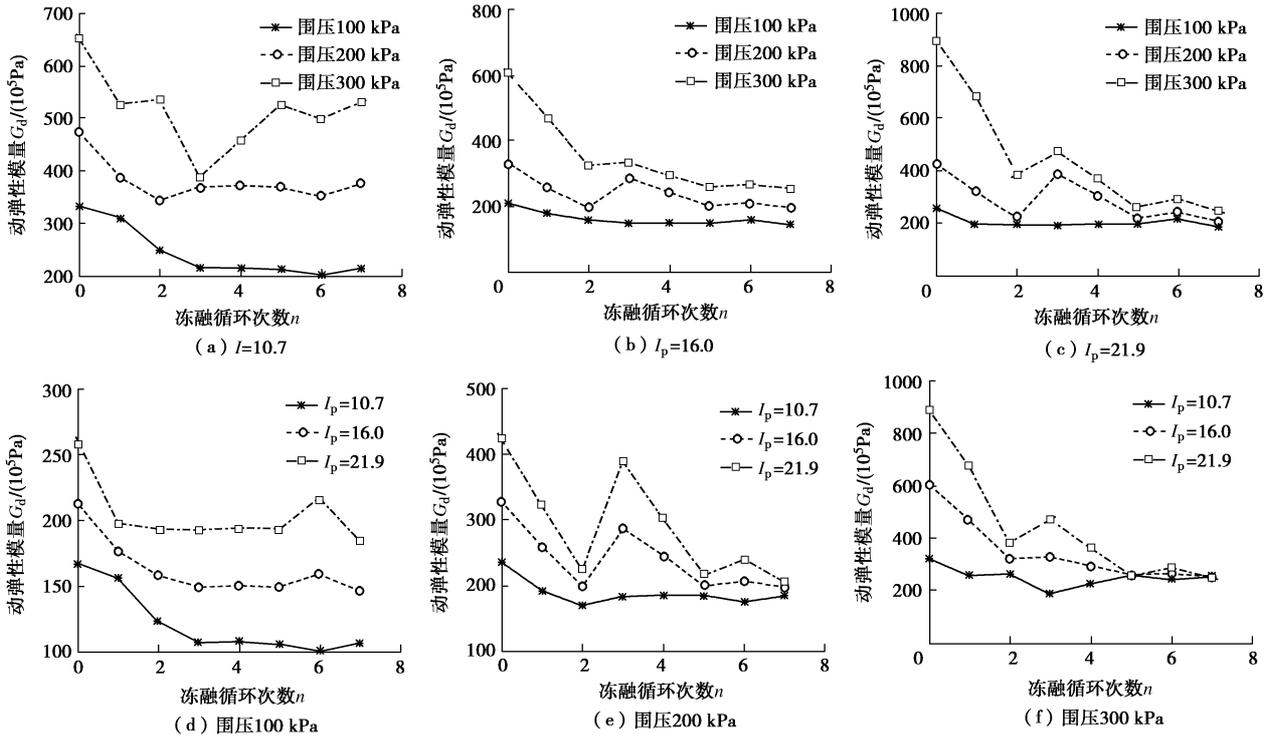


图 6 不同冻融循环次数后在不同围压下的动剪切模量值

Fig. 6 Dynamic shear moduli of soils with different freeze-thaw cycles under different confining pressures

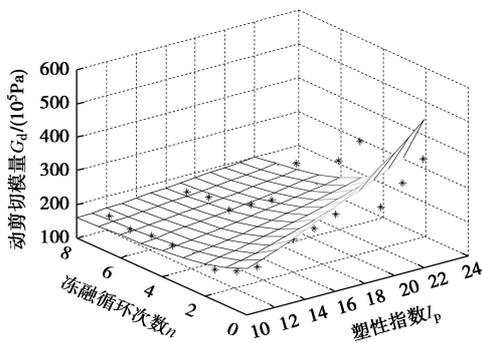


图 7 动剪切模量随塑性指数及冻融循环次数变化规律

Fig. 7 Variation of dynamic shear moduli with plasticity index and number of freeze-thaw cycles

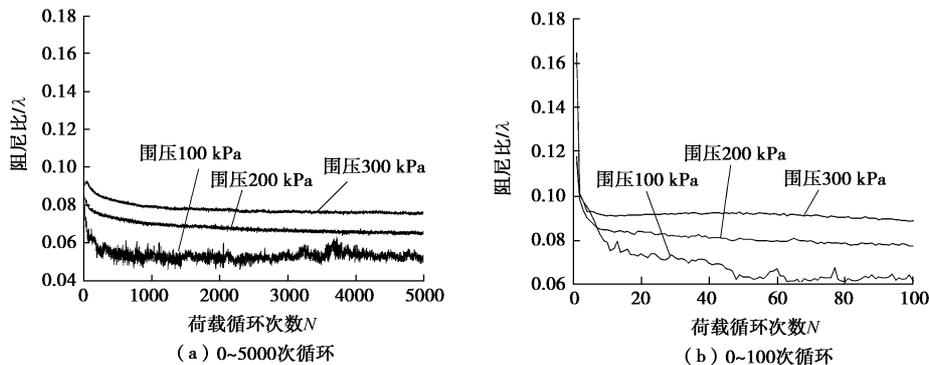


图 8 阻尼比随荷载作用次数的变化规律

Fig. 8 Variation of damping ratio with number of loads

由拟合式 (5), 可以得出结论, 动剪切模量随路基土的塑性指数的增加而增大, 随冻融循环次数增加而减小。对于季冻区缺乏动剪切模量数据的路基土, 可依此公式进行冻融循环后的动剪切模量推算, 进而为季冻区路基设计及施工提供参考。

2.3 阻尼比

根据式 (3) 对 3 种土不同冻融循环次数及不同围压下的动三轴数据进行处理, 得到阻尼比依围压和冻融循环次数的变化规律, 具体见图 8。

图 8 (a) 为动荷载作用 0~6000 次时阻尼比的变化趋势。由图中可以看出, 在加载初期, 阻尼比随着循环次数的增加呈下降趋势, 随着动荷载次数继续增加, 阻尼比渐趋稳定。为了明确加载初期阻尼比的变

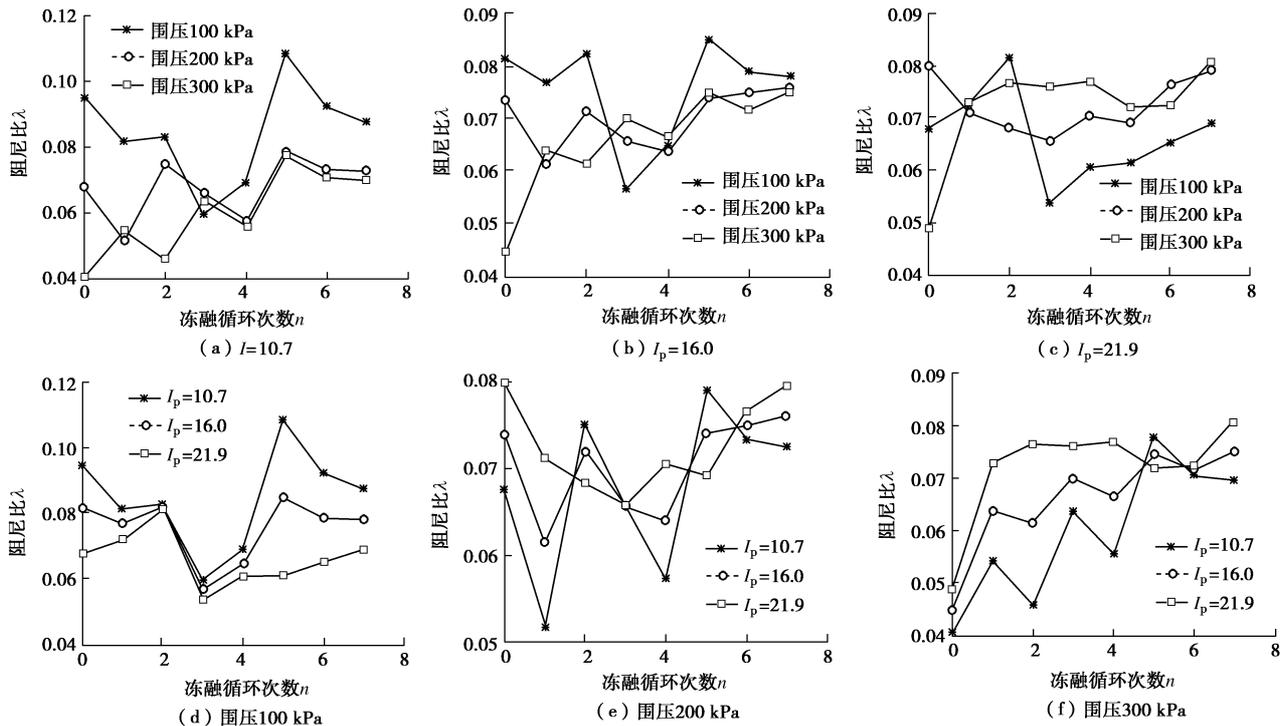


图9 不同冻融循环次数后在不同围压下的阻尼比

Fig. 9 Damping ratio of soils with different freeze-thaw cycles under different confining pressures

化规律, 将0~100次循环的阻尼比变化趋势绘出, 见图8(b), 从图中可以看出, 在加荷初期, 阻尼比随荷载循环次数的增加首先呈下降趋势, 之后会经历一段波动期, 然后再下降, 最后渐趋稳定。

与前述动模量取值方法类似, 取荷载作用5000~6000次的阻尼比平均值作为此状态下的稳定值。图9(a), 9(b), 9(c)为同种土在经历不同次数冻融循环后在不同围压下的阻尼比, 图9(d), 9(e), 9(f)为在相同围压条件下, 不同塑性指数土在不同次数冻融循环后的阻尼比。从图中可以看出: 阻尼比随冻融循环次数、围压及塑性指数均无明显规律可循。但是从统计数据中可以看出, 荷载作用之前, 压实路基土的阻尼比落在0.082~0.185之间, 经过多次循环荷载后, 阻尼比在0.041~0.109之间。

3 结 论

对季冻区3种不同塑性指数压实路基土进行0~7次冻融循环后在不同围压下进行动三轴试验, 试验结果表明: 随荷载作用次数的增加, 在加载初期, 土的动模量(包含动弹性模量和动剪切模量)随着循环次数的增加呈下降趋势, 随着动荷载次数再增加, 动弹性模量渐趋稳定。取荷载作用5000~6000次的动模量的平均值作为土在此状态下的稳定值。总结规律如下:

(1) 季冻区压实路基土动弹性模量随围压的增加而增大, 随塑性指数的增加而增加, 随冻融循环次数的增加而减小, 6~7次冻融循环后趋于稳定值。

(2) 季冻区压实路基土动剪切模量随围压的增加而增大, 随塑性指数的增加而增加, 随冻融循环次数的增加而减小, 6~7次冻融循环后趋于稳定值。

(3) 通过数据分析得到动模量与围压、塑性指数和冻融循环次数的关系式, 对于季冻区缺乏动模量数据的路基土, 可依此公式进行冻融循环后的动模量推算, 进而为季冻区路基设计提供参考。

(4) 不同围压及不同冻融循环次数后的阻尼比随冻融循环次数、围压及塑性指数均无明显规律可循。

参考文献:

- [1] ERIK Simonsen, VINCENT C Janoo. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16: 28 - 50.
- [2] 毛雪松, 侯仲杰, 王威娜. 基于含水率和冻融循环的重塑土弹性模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3585 - 3590. (MAO Xue-song, HOU Zhong-jie, WANG Wei-na. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3585 - 3590. (in Chinese))
- [3] KONRAD J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts[J]. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16(3): 291 - 303.
- [4] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 22(增刊2): 2690

- 2694. (QI Ji-lin, ZHANG Jian-ming, ZHU Yuan-lin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soils mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **22**(S2): 2690 - 2694. (in Chinese))
- [5] 邴文山. 道路冻害与防治[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1991. (BING Wen-shan. Road frost damage and prevention[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [6] 何 岩. 聚丙烯纤维改良粉煤灰土动、静力学参数研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010. (HE Yan. Dynamic and static mechanical properties study on polypropylene fiber improving fly ash soil[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese))
- [7] 王大雁, 马 巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(33): 4314 - 4319. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(33): 4314 - 4319. (in Chinese))
- [8] 穆彦虎, 马 巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1919 - 1925. (MU Yan-hu, MA Wei, LI Guo-yu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1919 - 1925. (in Chinese))
- [9] 赵 刚, 陶夏新, 刘 兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1952 - 1957. (ZHAO Gang, TAO Xia-xin, LIU Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1952 - 1957. (in Chinese))
- [10] 王效宾, 杨 平, 王海波, 等. 冻融作用对黏土力学性能影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(11): 1768 - 1772. (WANG Xiao-bin, YANG Ping, WANG Hai-bo, et al. Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(11): 1768 - 1772. (in Chinese))
- [11] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (BAO Wei-xing, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (in Chinese))
- [12] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1733 - 1737. (WANG Tian-liang, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu. Dynamic properties of cement and lime-improved soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1733 - 1737. (in Chinese))
- [13] 炳 慧, 何 平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1958 - 1962. (BING Hui, HE Ping. Influence of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1958 - 1962. (in Chinese))
- [14] 王威娜, 支喜兰, 毛雪松, 等. 冻融循环作用下路基土回弹模量试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(5): 954 - 959. (WANG Wei-na, ZHI Xi-lan, MAO Xue-song, et al. Experimental study of resilience modulus of subgrade soil under circles of freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(5): 954 - 959. (in Chinese))
- [15] 戴文亭, 魏海斌, 刘寒冰, 等. 冻融循环下粉质黏土的动力损失模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, **37**(4): 790 - 793. (DAI Wen-ting, WEI Hai-bin, LIU Han-bing, et al. Dynamic damage model of silty clay after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, **37**(4): 790 - 793. (in Chinese))