

地铁列车荷载下冻融土刚度软化试验研究

丁 智, 魏新江, 庄家煌, 蔡知进

(浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015)

摘要: 冻结法在地铁联络通道和进出洞施工中被广泛应用, 但冻融作用会对土体刚度产生影响, 列车运营期循环荷载作用下, 会对地铁运营安全造成隐患。基于动三轴试验, 模拟地铁循环荷载作用下冻融土的动应力, 得到地铁列车荷载作用下土体刚度软化曲线, 并建立刚度软化数学模型。研究表明: 冻融土体在循环荷载作用下的刚度软化可以用分段函数描述, 在循环加载初期, 刚度 G 与循环次数 N 之间存在半对数关系, 当 $\ln N$ 达到 8.25~9.5 时软化曲线出现拐点, 此后继续加载循环应力土体刚度不再有明显的下降; 随着冻结温度的降低, 循环加载前的初始刚度 G_1 以及循环后的残余刚度 G_w 均有所减小, 刚度损失比 w 逐渐增加; 同时, 冻融还对刚度软化具有明显的加速作用; 土体固结对整体刚度有加强效应, 提高冻融土体固结度能够使土体刚度显著增大, 刚度损失比 w 有所减小, 并降低了土体软化速度。研究结果可为控制地铁冻结法施工区域的工后沉降、保证地铁安全运行提供有益指导。

关键词: 土力学; 冻融土; 循环荷载; 刚度; 固结度; 冻结温度

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)04 - 0987 - 09

Experimental study on stiffness softening of frozen-thawed soil under subway loading

DING Zhi, WEI Xinjiang, ZHUANG Jiahuang, CAI Zhijin

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract: Freezing technology is frequently used in the construction of connection tunnel between metro tunnels and in the operation of shield break-in and break-out. The freezing-thawing action has the negative effect on the stiffness of soil. When the subway comes into service, its safety could be undermined under metro loading. In this paper, the undrained dynamic triaxial test was conducted in laboratory to simulate the dynamic stress state of frozen-thawed soil under metro loading. The variation of soil stiffness was obtained and a stiffness softening model was established. A piecewise function was found to describe the stiffness softening of frozen-thawed soil under cyclic loading. When the metro loading is firstly loaded on the sample, there is a semi logarithmic correlation between the stiffness G and the loading times N . When the value of $\ln N$ reaches to 8.25 to 9.5, a turning point of the softening curve appears, and the stiffness declines little after this turning point. The freezing-thawing operation also accelerates the stiffness softening process under the metro loading. The stiffness can be increased by raising the consolidation degree. The higher the consolidation degree of the frozen-thawed soil is, the lower the stiffness loss ratio and softening speed are.

收稿日期: 2017 - 09 - 30; **修回日期:** 2017 - 12 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508506); 浙江省自然科学基金项目(LQ16E080008); 杭州市科技计划项目(20172016A06)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51508506), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China(Grant No. LQ16E080008) and Hangzhou Science and Technology Guiding Projects of China(Grant No. 20172016A06)

作者简介: 丁 智(1983 -), 男, 博士, 2005年毕业于合肥工业大学大学水利水电工程专业, 现任副教授, 主要从事地铁施工及运营对周边环境影响方面的教学与研究。E-mail: dingz@zucc.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1276

Key words: soil mechanics; frozen-thawed soil; subway loading; stiffness; consolidation; freezing temperature

1 引言

冻结法施工采用人工制冷技术,对土体进行临时加固,能够有效地提高土体强度,且不受支护范围和深度的限制,被广泛应用于地铁联络通道和进出洞的施工。但软土人工冻结法施工区域在地铁运行后的沉降较为显著,如杭州地铁1号线自2012年11月正式运营以来,采用冻结法施工的地铁道床(近联络通道处)6个月内的最大沉降量达到23.6 mm^[1]。若沉降控制不当,容易引发联络通道漏水、管片错位等问题^[2],对地铁的安全运营造成隐患。

现有研究表明,冻融作用会使土体刚度发生软化,且现有研究主要集中在季节性冻土冻胀融沉等不利影响方面。在静力学方面,汪仁和和李晓军^[3]通过直剪试验和三轴试验发现原状土在受到冻融循环后,单轴和三轴抗剪强度明显降低,压缩系数明显增加。S. Erik^[4]通过室内测试发现冻融作用过后的冻土回弹模量会有20%~60%的降低。杨平和张婷^[5]发现冻融土的无侧限抗压强度为原状土的1/2~1/3。严晗等^[6]对粉砂土进行冻融和循环加载试验,发现冻融次数越多,刚度越小。W. Lee等^[7]对冻融后黏土进行无侧限压缩试验,发现冻融后弹性模量会发生一定衰减,并推导出弹性模量衰减的经验计算公式。对于冻融土动力特性的研究,主要有:于啸波等^[8]通过低温共振柱试验,发现随负温增加,冻土初始模量增大,剪切模量比降低。王静等^[9-10]发现冻结过程中,冰晶的生长将在土体内部产生楔形力,应力不断累积直至超过颗粒间黏结力时,颗粒间联结受到破坏,得出季冻区土体动弹性模量与冻融循环次数有关。地铁冻结法施工产生的冻融土属于人工冻土,与天然冻土在形成过程和温度梯度方面存在差异。上述关于冻融土的研究,主要集中在人工冻土的静力学以及天然冻土的动力学领域,较少涉及动荷载对人工冻融土的弱化作用研究。

循环荷载作用下土体的刚度模型主要有:早期I. M. Idriss等^[11]提出了软化指数概念,建立了软化指数与循环次数之间的表达式;K. Yasuhara等^[12]推导了软化指数与循环次数之间的半对数关系式;M. Neven和V. Mladen^[13]通过对不同地区的海相软黏土进行动力加载测试,建立了正常固结黏土刚度软化指数与孔压之间相互关系的模型;蔡袁强等^[14]

提出可以用二阶对数函数计算软化指数;张涛^[15]发现当循环应力较小时,刚度随振动次数的增加表现为硬化,当循环应力较大时,刚度表现为软化,据此建立了相应的模型。上述模型针对的都是非冻融土体的刚度,关于冻融土在列车荷载作用下的刚度软化模型还有待进一步研究。

现有的研究中,尚缺少地铁列车荷载作用下人工冻融土刚度软化的深入研究,且欠缺合适的模型来描述人工冻融土的刚度发展规律;同时现有的研究几乎没有考虑冻结温度和冻融土体固结度等因素对人工冻融土刚度的影响,因此深入研究人工冻融土的动刚度发展规律十分必要。本文通过动三轴试验模拟了地铁循环荷载作用,对不同冻结温度和不同固结度的土样进行循环加载,得到其刚度变化规律。并进一步建立了分段函数描述冻融土刚度的变化过程,得到了若干软化参数描述动载作用下土体的软化程度和软化速度,从而揭示了冻结温度和固结效应对冻融土体刚度软化的具体影响。

2 试验概况

2.1 试样制备

试验采用的土为杭州典型饱和软黏土,取自杭州地铁二号线良渚站沿线。同时为了确保各试验之间的可比性,减少试验土样均一性对研究结果的影响,试验采用的土样为重塑土。本文试验使用的重塑土采用新型智能多联通重塑土真空预压仪制得,得到的重塑土样均一性好、含水量相同、饱和度^[16-17]高。土样物理力学参数指标如表1所示。

表1 土体物理参数指标
Table 1 Physical properties of soil

密度/(g·cm ⁻³)	相对密度	含水率/%	塑限/%	液限/%	塑性指数/%
1.81~1.83	2.75	32.9~37.5	33.4	51.6	18.2

在实际工程中,当采用冻结法对地铁联络通道进行施工时,冻结壁的设计平均温度通常为-10℃,冷却介质为-30℃,因此本文研究冻融土的刚度软化特性时分别采用-10℃,-20℃和-30℃的冻结温度对土样进行冻结,并保留未冻融土与冻融土做对比。

试验模拟冻融过程时,将土样置于低温冻结箱冻结48 h^[17-18],后再置于恒温恒湿养护室中于室温

(20 °C)下融化 48 h。一次冻融处理后将土样制成直径 38 mm，高度为 76 mm 的试样，并对试样进行饱和处理，制得的冻融土试样孔隙水压力系数检测值 B_p 能达到 0.97 以上，满足试验的要求^[17, 19]。

2.2 GDS 试验方案

本文试验采用英国 GDS 双向动三轴试验系统对地铁循环荷载进行模拟，该系统加载频率为 0.1~5 Hz，最大动荷载 10 kN，最大围压 2 MPa。已有研究表明^[15, 17]，地铁刚开始运营时，隧道施工引起的冻融土超孔隙水压尚未完全消散，固结未完成，所以本文试验设置了不同固结度的冻融土进行对照。固结度根据平均固结度公式计算： $U = 1 - \Delta u / p$ ，其中， U 为土体平均固结度， Δu 为超孔隙水压力， p 为有效固结应力，本文试验有效固结应力 $p = 200$ kPa (围压 550 kPa，反压 350 kPa)。试验时采用单面排水等向固结，试验过程中实时观察孔压。

冻融土试样等向固结至相应固结度之后，进行动力加载。张 涛^[15]指出偏压正弦波能够更好地体现地铁荷载的真实性。因此本文选取偏压正弦波模拟地铁循环荷载。在地铁列车运行时，地基土受到循环荷载作用的同时，也会承受车辆自重荷载，因此，试验静偏压的施加与循环应力同步。循环应力比 $\tau = \sigma_d / (2p)$ ，其中， σ_d 为循环应力幅值。本文试验循环应力幅值 $\sigma_d = 80$ kPa，循环应力比 $\tau = 0.2$ ，静偏应力为 40 kPa。试验全程不排水，具体试验方案见表 2。

表 2 GDS 试验方案

Table 2 GDS experimental scenarios

试样编号	循环应力比	静偏应力/kPa	频率/Hz	冻结温度/°C	固结度	加载次数
C-1	0.2	40	1	未冻融	1	20 000
C-2	0.2	40	1	-30	1	20 000
C-3	0.2	40	1	-20	1	20 000
C-4	0.2	40	1	-10	1	20 000
C-5	0.2	40	1	未冻融	0.9	20 000
C-6	0.2	40	1	-30	0.9	20 000
C-7	0.2	40	1	-20	0.9	20 000
C-8	0.2	40	1	-10	0.9	20 000
C-9	0.2	40	1	未冻融	0.8	20 000
C-10	0.2	40	1	-30	0.8	20 000
C-11	0.2	40	1	-20	0.8	20 000
C-12	0.2	40	1	-10	0.8	20 000

3 冻融土刚度发展规律

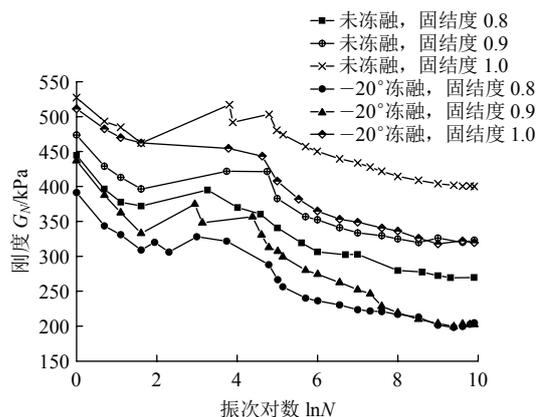
3.1 刚度软化的分段性

现有相关研究显示了刚度的软化与循环加载次

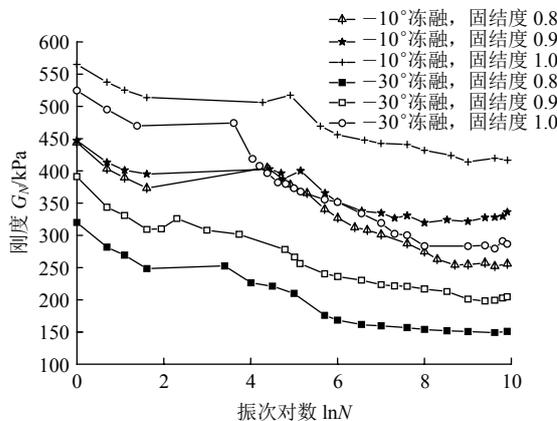
数的对数值 $\ln N$ 之间具有一定的线性关系^[12]，因此研究循环荷载作用下冻融土刚度的发展规律可以从刚度随 $\ln N$ 的变化进行分析。图 1 为循环加载过程中冻融土刚度变化曲线，图中纵轴为刚度 G_N ，横轴为 $\ln N$ 。 G_N 表示第 N 次循环加载时土体的刚度，它是滞回曲线两尖端连线的斜率，计算公式如下：

$$G_N = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \quad (1)$$

式中： q_{\max} ， q_{\min} 分别为一次循环中的最大和最小偏应力； ε_{\max} ， ε_{\min} 分别为一次循环荷载中的最大和最小轴向应变。整个加载过程中刚度呈明显软化趋势，中途软化速度有所减慢，其中部分试样的曲线出现少量硬化，但随即又恢复软化，最终曲线变平缓， G_N 稳定在某一值附近，其趋势与王 军等^[20]通过试验得出的刚度随循环次数的增加其衰减幅度逐渐减少的结论是相符合的。根据该趋势，大体上可以将刚度变化过程分为软化和稳定 2 个阶段，前一阶段刚度随着 $\ln N$ 的增大大体上呈线性减小，第二阶段则随着循环次数增加土体刚度趋于不变。



(a) 未冻融土、-20 °C 冻结土样



(b) -10 °C 冻结土样、-30 °C 冻结土样

图 1 刚度软化曲线

Fig.1 Stiffness softening curves

3.2 冻融土刚度软化模型

在现有研究中，循环作用下土体的刚度软化模型多根据试验结果模拟分析得到。K. Yasuhara 等^[12]采用半对数表达式 $\delta = Geq / Geq_{N=1} = 1 - D \lg N$ 描述软土在循环荷载作用下剪切刚度的软化，其中， δ 为软化指数，表示循环加载过后的土体刚度与初始刚度的比值， D 为软化系数， N 为循环次数， Geq 与 $Geq_{N=1}$ 分别是第 N 次循环对应的刚度和初始刚度值。该式认为刚度呈半对数线性函数软化，节 2.1 中所描述的阶段一符合这种关系。但在循环加载后期，刚度大小逐渐稳定，其变化趋势与阶段一相比发生了改变。因此，随着循环加载次数的增加，采用这种半对数线性关系表达式来反映循环加载过程中的刚度软化已经不太合适。事实上，根据图 1，刚度不会按照线性规律永远软化下去，不论如何加载，土体最后总能剩下一部分残余刚度。蔡袁强等^[14]把软化函数上升到二阶函数，认为软化指数 $\delta = 1 - A \lg N - B (\lg N)^2$ ，该模型同样未解决循环加载后期软化速度变慢的问题，且函数的软化参数 A 和 B 与门槛应力比、循环应力比以及一系列的试验常数有关，求解较为困难。

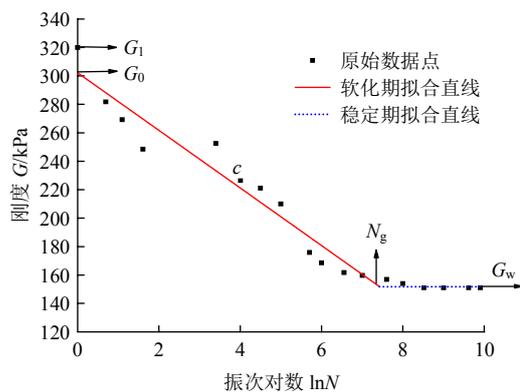
基于节 2.1 中所分析的刚度软化所呈现的阶段性的，在第一阶段中刚度持续软化，总体上可将刚度视为随着振次对数的增加而线性减小，这阶段的刚度软化模型可以参照 K. Yasuhara 等^[12]的半对数表达式，建立起刚度线性软化阶段的表达式；到了循环加载后期，刚度的变化较小，不再呈现出线性软化的规律，对这个阶段内刚度取均值，将其定义为循环加载后期的稳定刚度 G_w ；结合 2 个阶段的函数，建立冻融土刚度软化分段函数模型。由于冻融作用也会使土体发生软化，为了便于分析冻融作用在整个加载过程中对于刚度软化的影响，建立的分段函数模型是直接关于土体刚度 G 的表达式，而不再通过软化指数 δ 描述刚度的软化。公式如下：

$$G = \begin{cases} G_0 - c \ln N & (N \leq N_g) \\ G_w & (N > N_g) \end{cases} \quad (2)$$

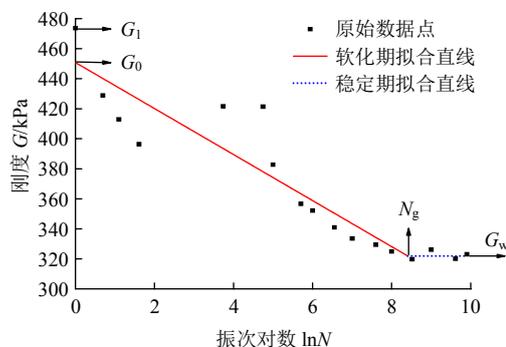
式中： G_0 为线性软化阶段软化直线与坐标纵轴的截距，它不是实际加载时的初始刚度值，与 G_1 (第一次加载的刚度值) 有所区别； c 为软化速度，不同于软化系数 A ， c 与刚度的单位一致，其物理意义是随振次对数的增大刚度衰减的速度； G_w 为循环末段的残余刚度，可以通过使循环次数达到足够大后取后

期的刚度均值得到； N_g 为临界振次，为软化直线段与稳定直线段的交点，是土体刚度从软化向稳定过渡的拐点。

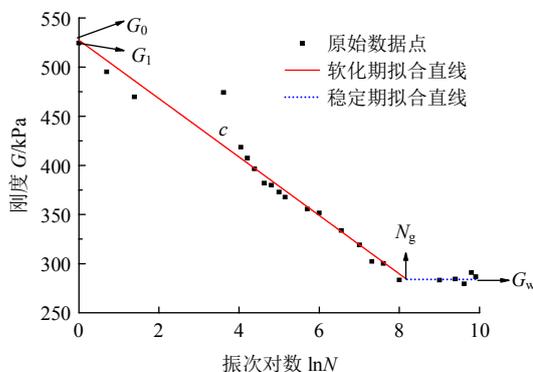
式(2)中的 G ， c ， G_w 以及 N_g 根据实验数据采用分析软件进行分段拟合得到。图 2 显示了采用式(2)对试验数据拟合的情况，图中选取了不同固结度和冻结温度的 3 组试验，便于观察函数的模拟效果。可以看到在不同冻融温度以及不同固结度的情况下，拟合结果与试验数据都较为吻合，其中除了固结度为 0.8 和 0.9 的 -10°C 冻融土的拟合优度为 0.942 和 0.927，以及固结度为 0.9 的未冻融土拟合



(a) -30°C ，固结度 0.8



(b) 未冻融，固结度 0.9



(c) -30°C ，固结度 1.0

图 2 分段函数拟合刚度软化

Fig.2 Matching the softening curves with a piecewise function

优度为 0.930 以外，其余土样的拟合优度均达到 0.95 以上，因此拟合效果较为良好，具体拟合参数见表 3。

表 3 拟合参数
Table 3 Fitting parameters

冻结温度	固结度	G_0	c	G_w	$\ln N_g$
未冻融	0.8	421.3	-16.93	270.6	8.90
	0.9	450.7	-15.30	322.3	8.39
	1.0	525.3	-13.27	400.7	9.39
-10 °C	0.8	435.2	-18.78	254.5	9.62
	0.9	435.3	-13.02	327.9	8.25
	1.0	554.2	-15.02	418.3	9.05
-20 °C	0.8	364.7	-19.54	203.3	8.26
	0.9	416.3	-23.21	201.8	9.24
	1.0	506.9	-21.40	319.9	8.74
-30 °C	0.8	303.4	-20.76	152.3	7.28
	0.9	450.7	-19.39	292.1	8.18
	1.0	527.5	-29.73	284.9	8.16

图 3 以固结度为 0.8 的未冻融土在循环荷载作用下的刚度发展为例，选取周 建等^[21, 14]的刚度软化模型与本文提出的刚度模型的结果进行对比，可以看出周 建等^[21, 14]的模型对于未冻融土在循环荷载作用下刚度发展的拟合效果都不甚理想。且周 建和龚晓南^[21]与蔡袁强等^[14]各自建立的预测模型在振次较少($\ln N < 6$)的情况下与试验值较为接近，但是随后阶段刚度软化速度开始减缓并最终达到稳定，此时模型与试验值的差距慢慢变大。

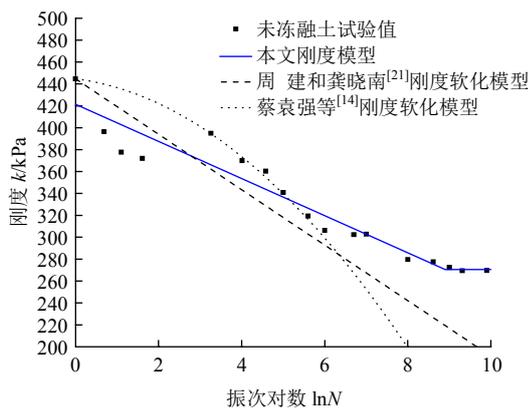


图 3 各刚度软化模型拟合效果对比

Fig.3 Comparison of fitting effect among different stiffness degradation models

分析以上关于循环荷载作用下刚度软化的试验研究，笔者发现这些试验研究进行的循环加载次数较少，其中周建的试验循环加载的次数为 2 500 次，蔡袁强的试验循环加载次数为 10 000 次，远低于本

文试验所采用的 20 000 次的加载次数；且从表 3 可以看到，多数情况下，达到稳定阶段时振次 N 要达到 8 000 次左右，因此当循环加载次数较少的时候，刚度往往还没有稳定，或者刚刚展现出稳定的趋势加载就停止了，容易被忽略。所以已有的研究大多未体现刚度最终趋于稳定这一特征。

临界振次的确定是通过七维高科(1stOpt)软件进行分段拟合，采用全局优化算法寻找拟合度最优的分段点得到。从图 2 可以看到，该方法得到的拐点与原始数据的拐点较为符合。图 4 为 12 组冻融试样刚度软化曲线的拐点($\ln N_g$)值，从图中可以看到，这些拐点基本集中在 8.25~9.5，也就是说大多数冻融土样在循环加载 4 000~13 000 次之后刚度软化基本完成，此后随着振次增加刚度基本保持稳定。这说明土体刚度的软化主要集中在地铁运营初期，经过一定时间后刚度基本不再变化。在预测冻融法施工区域的工后沉降时，建议先通过室内试验得到临界振次 N_g ，根据 N_g 的大小大致确定土的软化区间，预测刚度软化结束的时间，在该时段内对土体的变形进行重点监控，防止冻结法施工区域与其他区域之间差异沉降过大，保障地铁安全运行。

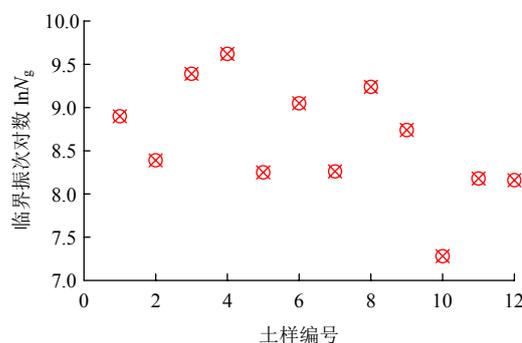


图 4 软化拐点的分布

Fig.4 Distribution of the deflection point of softening curves

4 冻融和固结度对刚度软化的影响

软化速度 c 的大小可以直观地反映循环加载过程中冻融土刚度的软化速率，但是不同固结度、不同冻结温度的冻融土初始刚度各异，某些工况下的软化速度不大，但如果初始刚度较小，刚度在短时间内降低到很小的值，从而造成过大的变形，对地铁运行造成不利的影 响。因此为了更全面地分析冻融和固结效应对地铁列车荷载作用时刚度软化的具体影响，在软化速度的基础上定义了相对软化速度 $a = c/G_0$ ， a 为刚度软化速度的量纲值一化的值，排除了初始刚度对软化速度的影响，计算时采用拟合

直线截距 G_0 而不是土体实际的初始刚度 G_1 是因为： G_0 和 c 都属于拟合值，而 G_1 与 c 一个是实际值一个是拟合结果， G_0 和 c 之间才具有相对应的关系。除此之外，本文还定义了刚度损失 $G_s = G_1 - G_w$ ，以及刚度损失比 $w = G_s/G_1$ ，两者可以分别用于描述循环加载前后土体刚度的绝对值和相对值。根据节 2.4 中得到的拟合结果，可以求出不同冻结温度和固结度下 a ， G_s ， w 的值，并根据这些指标来分析冻融和固结度对刚度软化的影响，分析指标的值如表 4 所示。

表 4 刚度软化参数

Table 4 Parameters of stiffness degradation

试样编号	G_1	G_w	G_s	w	c	a
C-1	445	270.6	174.4	0.39	-16.93	0.040
C-2	320	152.3	167.7	0.52	-20.76	0.068
C-3	391	203.3	187.7	0.48	-19.54	0.054
C-4	444	254.5	189.5	0.43	-18.78	0.043
C-5	474	322.3	151.7	0.32	-15.30	0.034
C-6	391	292.1	98.9	0.25	-19.39	0.043
C-7	437	201.8	235.2	0.54	-23.21	0.056
C-8	447	327.9	119.1	0.27	-13.02	0.030
C-9	527	400.7	126.3	0.24	-13.27	0.025
C-10	525	284.9	240.1	0.46	-29.73	0.056
C-11	511	319.9	191.1	0.37	-21.40	0.042
C-12	565	418.3	146.7	0.26	-15.02	0.027

4.1 冻融对刚度软化的影响

在地铁列车荷载作用前，冻融作用已经使土体刚度发生软化，具体效果体现在初始刚度 G_1 的大小上。对表 3 中的初始刚度 G_1 进行提取和分析，得到图 5。可以发现冻融效应降低了土样的初始刚度，且冻结温度越低 G_1 越小。根据丁智等^[18]关于冻融作用后软土微观结构的试验研究，冰晶的发展破坏了土体结构，包括骨架结构、土颗粒之间的联结等，

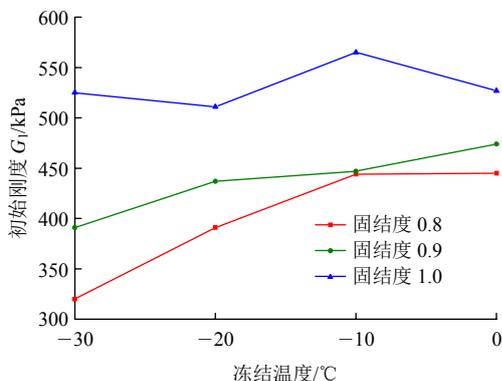


图 5 冻结温度对 G_1 影响

Fig.5 Effect of freezing temperature on G_1

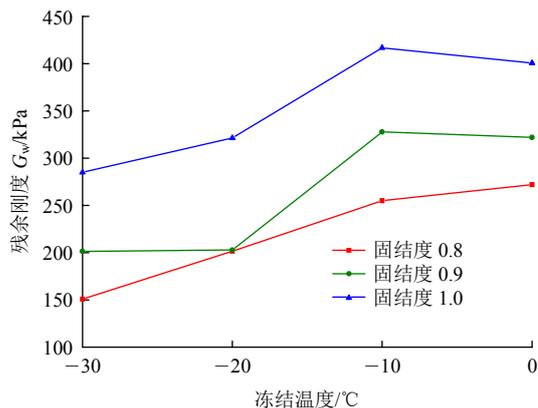


图 6 冻结温度对 G_w 影响

Fig.6 Effect of freezing temperature on G_w

冻融后的土体试样孔隙体积相应增大，且冻结温度越低，孔隙体积越大。结合本文的试验现象，笔者认为冻融造成土体刚度软化主要有 2 点原因：一方面冻融过后孔隙体积的增大使得土的密实度较低，在受到与冻结前等量的荷载作用时会产生更大的变形；另一方面，冻融作用会造成土体结构的弱化，从而产生刚度软化的现象。

图 6 显示的是循环加载结束后的残余刚度 G_w ，并将它的值同初始刚度 G_1 对比，可以发现冻结温度对残余刚度的影响与对初始刚度的影响较为接近。如图 6 所示，随着冻融温度下降 G_w 也会随之减小。这说明循环荷载虽然对冻融产生的大孔隙具有挤密作用，但是土体结构破坏在循环作用下不可发生逆转，因此冻融的刚度弱化效应并不随循环荷载而全部消失，两者的作用具有一定独立性。图 7 显示了大体上更低的温度对应更大的刚度损失比，不同固结度的土体经过 -30 °C 的冻融作用后，在地铁列车荷载作用下，土体的刚度损失比均达到 0.5 左右。该结果表明，在进行冻融土工后沉降计算的时候，应充分考虑不同温度冻融土体在循环荷载作用过后的刚度损失。

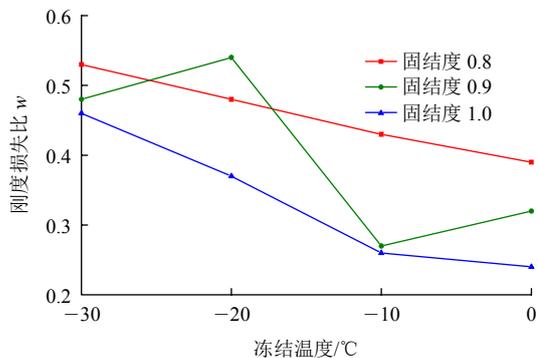


图 7 冻结温度对 w 的影响

Fig.7 Effect of freezing temperature on w

图 8 为冻结温度与 2 个软化速度指标 c 和 a 的关系。由图可知冻结温度降低两者均会增大。这说明冻融作用会对土体刚度的软化起到加速效应。软化速度过大，会使沉降速率过快，进而对地铁运营的安全造成不利影响。且冻结温度越低，这种加速效应越需要引起重视。因此采用冻结法施工时，在冻结温度较低的情况下，应对工后土体变形进行密切监测。

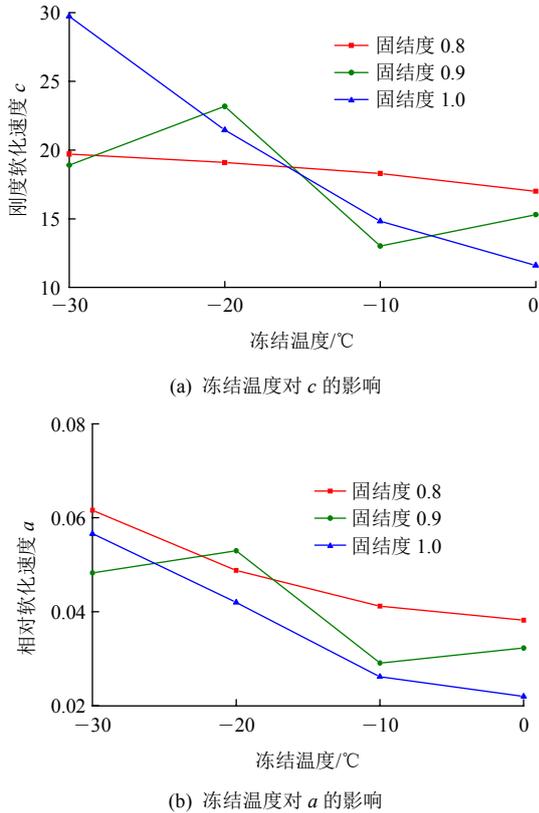


图 8 冻融温度对 c , a 的影响

Fig.8 Effects of freezing temperature on c and a

4.2 固结对刚度软化的影响

地铁联络通道采用冻结法施工后，冻土融化过程中冰晶的消融速度远大于孔隙水的排出速度^[19]，所以在地铁建成投入使用后，冻融土地基的超孔隙水压仍未消散完全。另外，原状土本身存在一定的固结度，地铁在开挖过程中又会对土体造成扰动，改变地基土初始固结度的大小。因此，在地铁运营初期冻结法施工区域土体一般未完全固结，且由节 2.2 中的分析可知该阶段土体刚度软化较为严重，所以有必要研究初始固结度对刚度软化的影响。

图 9, 10 为不同冻结温度土样的初始刚度 G_1 和残余刚度 G_w 大小的变化情况，从图中可以得到，在一定的固结度下 G_1 和 G_w 随着固结度的增加均有增大的趋势。固结度主要影响饱和土样的含水率和

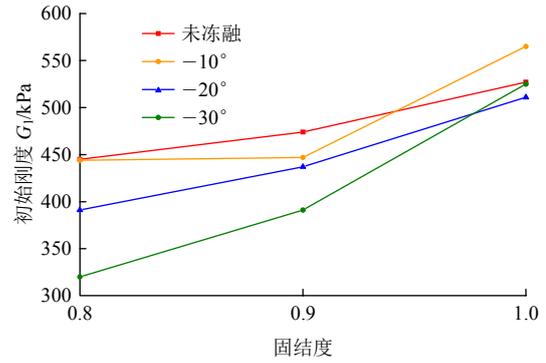


图 9 固结度对 G_1 的影响

Fig.9 Effect of consolidation degree on G_1

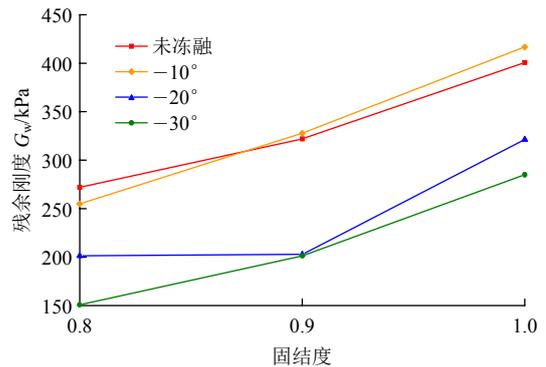


图 10 固结度对 G_w 的影响

Fig.10 Effect of consolidation degree on G_w

有效应力，固结度高的土样的有效应力大，孔压小，土颗粒密实度好，对冻融土体的初始刚度 G_1 和残余刚度 G_w 均起到强化作用。这也说明了固结度对于初始刚度的增强能够贯穿整个循环加载过程从而影响残余刚度。

图 11 为对同一冻融情况下不同的固结度土体的刚度损失比 w 进行对比得到的关系图。从图中可以看出，固结度较大的土样其刚度损失比一般会更小。特别是未冻融土和 -10°C 冻融土，其固结度为 0.8 的土样和固结度为 1 的土样刚度损失比的差值分别达到 0.15 和 0.17。魏新江等^[22-23]研究表明，固结度的增大会减缓土体软化指数的衰减。如图 12

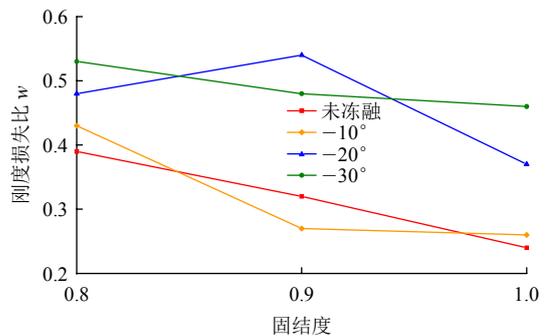


图 11 固结度对 w 的影响

Fig.11 Effect of consolidation degree on w

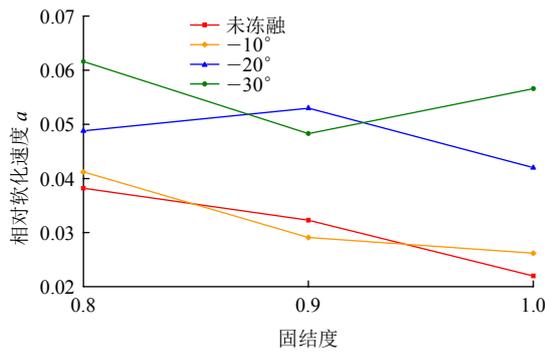


图 12 固结度对 a 的影响

Fig.12 Effect of consolidation degree on a

所示, 总体而言, 在一定的冻融温度下相对软化速度 a 随着固结度的上升呈现出下降的趋势。

以上分析结果表明, 软土区地铁采用冻结法施工时, 应采用适当的施工措施, 如电渗法、真空(堆载)预压法等, 加快地基土的排水, 提高冻融土体的初始固结度。这样能够有效地减小后期地铁列车荷载作用下地基土的软化效应, 减弱刚度损失, 从而减小地铁运营期间的工后沉降, 保护地铁隧道的结构安全。建议正式运营前其固结度以大于 0.9 为宜。

5 结 论

本文对地铁列车荷载作用下冻融土刚度软化规律和影响因素做了较为详细的研究, 并建立了分段函数描述土体刚度的变化规律, 分析了冻结温度和固结度对刚度软化的具体影响, 得到了如下结论:

(1) 人工冻融土受循环荷载作用时, 刚度 G 先随着振次对数 $\ln N$ 减小, 最终稳定在残余刚度 G_w 附近。可以用分段函数对刚度软化过程进行描述, 分段函数的拐点 $\ln N_g$ 在 8.25~9.5 范围, 拐点前函数呈线性递减, 到达拐点后刚度不再变化。地铁正式运行时可根据拐点的位置判断刚度软化较为严重的阶段, 并对地铁工后沉降进行加密监测。

(2) 冻融对土体刚度的削弱作用表现在三方面: ① 初始刚度及稳定刚度随冻融温度下降而减小; ② 刚度损失比受到冻融作用影响, 冻融温度越低, 损失比越大; ③ 冻融对土体刚度的衰减具有加速作用。因此在进行地铁运营阶段的长期工后沉降计算和分析时应充分考虑冻融作用的影响。

(3) 土体固结对刚度有加强效应。固结度的增加会使土体初始刚度和稳定刚度均变大, 损失比和相对软化速度减小。在冻结法施工区域地铁运营前, 应尽可能考虑提高冻融区域土体的初始固结度。

参考文献(References):

[1] 丁 智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2 328 - 2 336.(DING Zhi, ZHANG Mengya, WEI Xinjiang, et al. Study on pore pressure and microstructure of frozen and thawed soft soil under subway cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2 328 - 2 336.(in Chinese))

[2] 丁 智, 洪其浩, 魏新江, 等. 地铁列车荷载下人工冻融软土微观试验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(7): 1 291 - 1 299. (DING Zhi, HONG Qihao, WEI Xinjiang, et al. Experimental study on micro-structure of artificial freezing and thawing soft soil under subway train load[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(7): 1 291 - 1 299.(in Chinese))

[3] 汪仁和, 李晓军. 冻结温度场的叠加计算与计算机方法[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2003, 23(1): 25 - 29.(WANG Renhe, LI Xiaojun. Superposition calculation of frozen temperature field and its computer method[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2003, 23(1): 25 - 29.(in Chinese))

[4] ERIK S, JANOO V C, ISACSSON U. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16(1): 28 - 50.

[5] 杨 平, 张 婷. 人工冻融土物理力学性能研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 665 - 667.(YANG Ping, ZHANG Ting. The physical and the mechanical properties of original and frozen-thawed soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 665 - 667.(in Chinese))

[6] 严 晗, 王天亮, 刘建坤, 等. 反复冻融条件下粉砂土动力学参数试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 683 - 688.(YAN Han, WANG Tianliang, LIU Jiankun, et al. Experimental study of dynamic parameters of silty soil subjected to repeated freeze-thaw[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 683 - 688.(in Chinese))

[7] LEE W, BOHRA N C, ALTSCHAEFFL A G, et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 559 - 568.

[8] 于啸波, 孙 锐, 袁晓铭, 等. 负温对土动剪切模量阻尼比的影响规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1 453 - 1 465.(YU Xiaobo, SUN Rui, YUAN Xiaoming, et al. Influence of negative temperature on dynamic shear modulus and damping ratio of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1 453 - 1 465.(in Chinese))

[9] 王 静. 季冻区路基土冻融循环后力学特性研究及微观机理分析[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2012.(WANG Jing. Research on

- the mechanical properties of subgrade soil after several freeze-thaw circles in seasonally frozen soil region and microscopic mechanism analysis[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2012.(in Chinese))
- [10] 王 静, 刘寒冰, 吴春利. 冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3 665 - 3 668.(WANG Jing, LIU Hanbing, WU Chunli. Influence of freeze-thaw cycles on elastic modulus of subgrade soil with different plasticity indices[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3 665 - 3 668.(in Chinese))
- [11] IDRISSE I M, SINGH R D, DOBRY R. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1978, 104(12): 1 427 - 1 447.
- [12] YASUHARA K, HYDE A F L, TOYOTA N, et al. Cyclic stiffness of plastic silt with an initial drained shear stress[C]// Proceedings of Geotechnique Symp. on Prefailure Deformation of Geomaterials. London: Thomas Telford Ltd., 1998: 373 - 382.
- [13] NEVEN M, MLADEN V. Generalized cyclic-degradation-pore-pressure generation model for clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(1): 33 - 42.
- [14] 蔡袁强, 陈 静, 王 军. 循环荷载下各向异性软黏土应变 - 软化模型[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(6): 1 058 - 1 064.(CAI Yuanqiang, CHEN Jing, WANG Jun. Strain degradation model for anisotropic soft clay under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 42(6): 1 058 - 1 064.(in Chinese))
- [15] 张 涛. 地铁列车荷载下不同固结度重塑粘土动力特性试验研究[硕士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2014.(ZHANG Tao. Experimental study on dynamic characteristics of remolded clay with different consolidation degree under subway loading[M. S. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(in Chinese))
- [16] 丁 智, 章珊珊, 魏新江, 等. 重塑土真空预压设备: 中国, ZL 2014 2 0262633.5[P]. 2014.(DING Zhi, ZHANG Shanshan, WEI Xinjiang, et al. The vacuum preloading device for remolded soil: China, ZL 2014 2 0262633.5[P]. 2014.(in Chinese))
- [17] 丁 智, 魏新江, 张孟雅, 等. 不同固结度冻融软土动载下孔压模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45(5): 692 - 698.(DING Zhi, WEI Xinjiang, ZHANG Mengya, et al. Experimental study on the dynamic pore pressure model of frozen-thawed soft clay for different degree of consolidation under dynamic loading[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(5): 692 - 698.(in Chinese))
- [18] 丁 智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁冻结法工后融土微观结构试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 106 - 112.(DING Zhi, ZHANG Mengya, WEI Xinjiang, et al. Experimental research on the microstructure of thawed soil after the subway construction of freezing method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 106 - 112.(in Chinese))
- [19] 王 伟, 池旭超, 张 芳, 等. 冻融循环对滨海软土三轴应力应变曲线软化特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2): 140 - 144.(WANG Wei, CHI Xuchao, ZHANG Fang, et al. Effect of freeze-thaw circles on softening behaviors of triaxial stress-strain curve of coastal soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp.2): 140 - 144.(in Chinese))
- [20] 王 军, 蔡袁强, 徐长节. 循环荷载作用下软黏土刚度软化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2 138 - 2 144.(WANG Jun, CAI Yuanqiang, XU Changjie. Experimental study on degradation of stiffness of saturated soft clay under undrained cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2 138 - 2 144.(in Chinese))
- [21] 周 建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75 - 78.(ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic loading[J]. China Civil Engineer Journal, 2000, 33(5): 75 - 78.(in Chinese))
- [22] 魏新江, 张孟雅, 丁 智, 等. 初始固结度影响下地铁运营引起的长期沉降预测[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(2): 114 - 120.(WEI Xinjiang, ZHANG Mengya, DING Zhi, et al. Prediction of long-term settlement caused by subway operation under the influence of initial consolidation[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(2): 114 - 120.(in Chinese))
- [23] 王 军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下饱和软粘土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1 713 - 1 719.(WANG Jun, CAI Yuanqiang, XU Changjie, et al. Study on strains softening model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 713 - 1 719.(in Chinese))