

文章编号:1671-6833(2022)06-0083-07

上覆荷载对重塑粉质黏土补水冻胀特性影响

杨平,王岩梓,刁鹏程

(南京林业大学 土木工程学院,江苏 南京 210037)

摘要:在冻胀融沉预测与控制问题中,外荷载特别是较大荷载抑制冻胀的作用及冻胀变形规律是预测与控制冻胀变形的关键。通过补水条件下荷载对重塑粉质黏土冻胀试验,研究不同荷载水平对重塑粉质黏土冻胀特性的影响及演变规律。结果表明:不同荷载作用试样降温规律类似,主要分为恒温、温度迅速下降、温度缓慢降低和温度稳定 4 个阶段,总体表现为荷载越大,温度下降速度越快;不同荷载作用下冻结锋面随时间变化的发展曲线均呈对数增长趋势,随荷载增大,冻结前期冻结锋面发展速度加快,中后期锋面发展速度减慢,锋面位置高度随荷载增大而降低;随荷载增大,起始冻胀量出现的时间延后,冻胀量发展达到稳定的时间缩短,冻胀量发展速率减小,且冻胀量减小,无荷载作用下土样最终冻胀量为 200 kPa 下的 6.4 倍;冻胀率随上覆荷载的增大呈指数规律递减,无荷载作用下土样最终冻胀率为 200 kPa 下的 5.6 倍。

关键词:荷载作用;补水环境;单向冻结;水分迁移;冻胀特性

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2022.06.001

0 引言

国内外学者对小荷载条件影响下的冻土冻胀融沉特性进行过深入研究,主要包括两方面。一是从土体本身物理性质对冻胀特性的影响,研究认为,随细粒土含量和含水率的增大,土的冻胀率先增大而后波动较小;随干密度的增大,黏土和粉质黏土的冻胀率先增大后减小^[1-4]。如 Konrad 等^[5-6]通过室内冻结试验模拟现场温度条件研究细粒土对基层碎料冻胀敏感性影响;Li 等^[7]研究了补水条件下细粒土含量对饱和粗粒土冻胀变形的影响;Darrow 等^[8]经过一系列的试验发现,除去胶状有机质后土的冻胀率减弱。二是外部条件的影响,如荷载、温度、冻结时间与程度等。王永涛等^[9]开展了饱和青粉土在补水环境下不同温度梯度条件下单向冻结试验,揭示了冻胀率变化的内在机理;张婷等^[10]通过单向冻结试验研究了水分迁移规律,土中水分迁移量及迁移范围受干密度和温度梯度影响,干密度增大,迁移量减少,梯度越大,迁移量、迁移范围越大^[11-13];黄建华^[14]研究了冻结围护工程中冻胀变形及其卸荷

作用下的力学性状,通过卸压(槽)卸荷可减轻冻胀变形影响。

以上研究均为小荷载条件下的冻土冻胀融沉特性分析,而地铁隧道所在埋深一般在地表 10 m 以下,冻结工程土体上覆荷载达 200 kPa,因此,针对地铁工程实际较大荷载影响下的冻胀特性研究显得十分必要。

本文选取上海地区典型软黏土层粉质黏土进行补水条件下荷载对重塑粉质黏土冻胀特性影响试验,分析了较大荷载对重塑粉质黏土冻结过程中温度分布、冻结锋面发展、冻胀变形变化的影响规律。

1 试验内容及方法

1.1 试验装置

本试验采用南京林业大学冻土实验室自行研制的冻胀融沉仪,如图 1(a)所示。该装置可实现补水和补水条件下,施加不同荷载作用的冻胀试验,判断冻结锋面位置和锋面发展速率,控温精度为 ± 0.1 ℃。试验原理示意图如图 1(b)所示。试验装置主要参数如下:试验控温环境箱温度范

收稿日期:2022-01-28;修订日期:2022-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178337)

作者简介:杨平(1964—),男,江西樟树人,南京林业大学教授,博士,博士生导师,主要从事环境岩土与地下工程研究,E-mail: yangping@njfu.edu.cn。

围为-30~50℃,温度传感器测温范围为-200~350℃,试样筒外径为90 mm,内径为79.8 mm,长度为150 mm,补水盘管最大补水量为94.2 cm³。

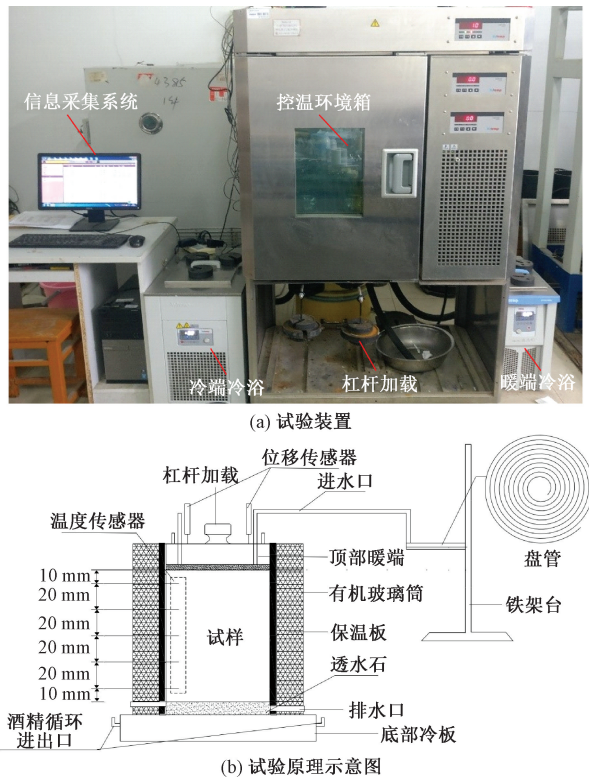


图1 冻胀试验装置及原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of frost heave test device

1.2 试验方案

试验主要包括室内重塑粉质黏土土性试验与重塑粉质黏土冻胀试验。

(1)对重塑粉质黏土进行土性试验,试验包括密度、含水率、热物理指标(初始冻结温度)等基本土工试验,土性试验依据土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)进行。

(2)进行补水条件下荷载对重塑粉质黏土冻胀特性影响试验,冻胀试验荷载条件选择4种,分别为0、50、100、200 kPa。为更接近现场实际情况,采用补水盘管进行水分补给以模拟地下水对冻结黏土的补水状态,每隔一段时间人工读取盘管里液面的读数,即可得到冻胀期间补水量。在冻结过程中实时监测温度、补水和冻胀变形,以研究对比0、50、100、200 kPa 荷载水平对重塑粉质黏土冻胀特性的影响及演变规律。

1.3 试样制备及试验方法

土样选取上海地区典型软黏土层3层粉质黏土,试样制备方法:①将烘干过2 mm 筛的干粉质黏土按干密度1.40 g/cm³ 分层压实成直径

79.8 mm、高130 mm 的干土样;②干土样放置在真空饱和缸内抽真空1 h,将清水徐徐注入真空饱和缸内,待水淹没饱和器后再抽真空1 h,随后静置12 h 以上,使试样充分饱和;③施加竖向200 kPa 进行单向压缩固结(因试验最大外荷载为200 kPa),待试样高度稳定后(1 h 内试样高度变化值≤0.01 mm),再切削成高度100 mm 土样,即为冻融试验重塑土样。经测试重塑粉质黏土土样基本物理指标为密度2.03 g/cm³、含水率24%、饱和度98%、冻结温度-0.21℃。

室内冻胀试验:安装好试样、温度传感器和位移传感器,启动数据采集仪,将恒温箱、底板和顶板温度调至1℃,连接补水装置进行排气,每隔一段时间人工读取盘管里液面的读数,即可得到冻胀期间的补水量。利用杠杆对试样进行加载(0、50、100、200 kPa);待试样恒温至1℃,将底板温度调至-5℃进行单向冻结,连续冻结72 h 结束试验,试验过程中自动采集记录温度、补水量、冻胀量等。

2 结果分析

2.1 冻结过程中温度分布变化分析

冻胀试验过程中试样竖向各点温度变化趋势基本相同,以100 kPa 为例,竖向各点处(距离试样底部高度)降温规律如图2所示(图中-8为试样开始冻结前8 h)。不同荷载下重塑粉质黏土温度变化类似,可划分为4个阶段:①恒温阶段(-8~0 h,以开始冻结时为0 起点);②温度迅速下降阶段(0~10 h);③温度缓慢降低阶段(10~42 h);④温度稳定阶段(42~72 h)。

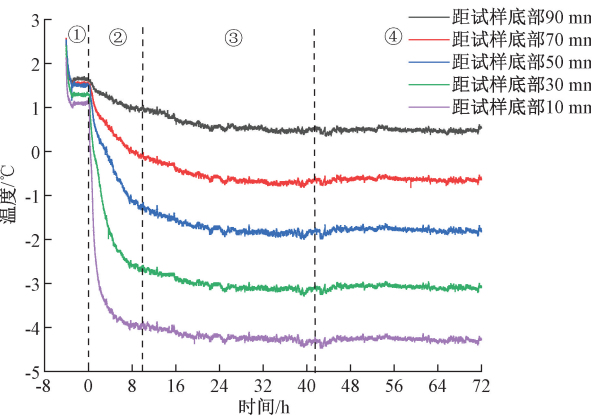


图2 100 kPa 荷载下冻胀过程不同部位温度曲线

Figure 2 Frost heave temperature curve at 100 kPa

为分析各级荷载对试样温度分布的影响,快速降温过程中7 h 时与冻结温度稳定阶段72 h 时

不同荷载作用下试样不同高度处温度分布如图 3 所示。

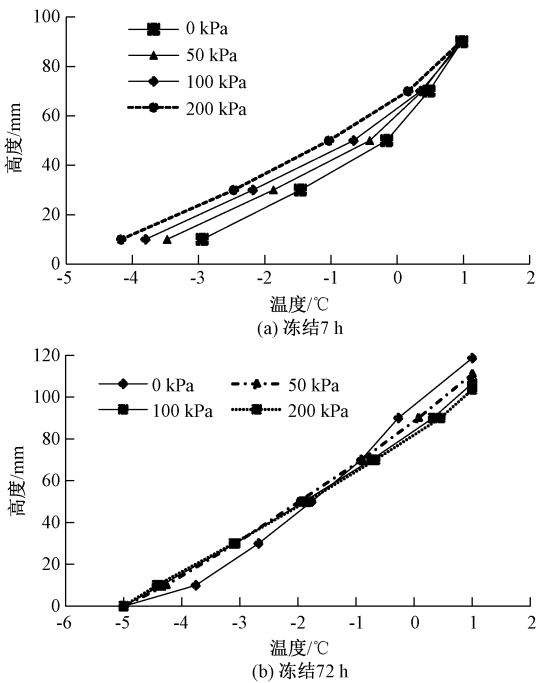


图 3 冻结 7 h 和 72 h 不同荷载作用下温度分布曲线
Figure 3 Temperature distribution curves with different loads at 7 h and 72 h

由图 3(a)可知,7 h 时冻结试样温度分布随荷载增大而呈现中部至下部依次降低而顶部降低较小的规律,其分布曲线随荷载增大由非线性关系趋于线性分布。这是因为试样底部(10~30 mm)靠近冷端,受冷端温度影响大,而试样顶部(70~90 mm)受暖端影响大,温度靠近暖端温度。比较 0 kPa 与 200 kPa 曲线,在距底部 10 mm 处温度差异达到 1.2 ℃。究其原因:随着荷载增大,荷载抑制水分补给和土体冻胀作用增加,因迁移水分减小,温度更易下降,则同一时间温度降低更多,因此荷载越大温度下降速率越快。

补水条件下 72 h 后试样冻胀发展已较为充分,在 0、50、100、200 kPa 荷载作用下试样冻结后高度分别达到 118.7、111.0、106.5、103.6 mm。由图 3(b)可知,冻结 72 h 时试样温度分布随荷载增大呈现底部(10~30 mm)温度变化逐渐减小、中部(50 mm)变化差异较小而顶部(70~90 mm)温度变化增大,最终温度沿高度趋于线性的变化规律,顶部 100 mm 处 0 kPa 与 50 kPa 温度差异达到 0.5 ℃。究其原因:冻结前期荷载作用加快了土样冻结,使试样底部温度随荷载增大下降速度越快,而中后期,冻结温度变化开始趋于稳定后,各高度处温度呈线性分布并保持整体下降趋势,逐

渐接近冻结梯度,在此过程中,荷载越大,温度趋于稳定的时间越短,造成试样底部温度分布随荷载增大而降低;试样顶部,由于荷载越大冻胀量越小,受暖端影响大,温度自然越高;由于冻结达到稳定后,温度沿高度呈线性分布,因此中部温度差异较小;而无荷载条件下,试样底部温度与 50 kPa 差值较大,这和无荷载条件下冻结发展速度较慢,冻胀发展较为充分,在 72 h 时,冻胀仍未达到稳定有关。

2.2 冻结锋面发展规律分析

2.2.1 冻结过程中锋面发展规律

冻结锋面是冻结缘与未冻土之间的接触界面,在一定范围内,土层层状分布变化不大,且相同时间内提供的冷量也是均匀的,因此冻结锋面是一个平行于冷端界面的平面。判断土体是否已经冻结的方式是土体某处实时温度低于土的起始冻结温度(−0.21 ℃)。

不同荷载作用下补水量随冻结时间变化关系如图 4 所示,不同荷载作用下冻结锋面高度发展随冻结时间变化关系如图 5 所示。由图 4、5 可知,不同荷载作用条件下冻结锋面随时间发展呈对数增长,拟合如下:

$$H = a - b \ln(t + c)。$$
 (1)

式中: a 、 b 、 c 为系数,取值与试验条件有关; H 为冻结锋面发展高度,mm; t 为冻结时间,h。拟合关系如表 1 所示。

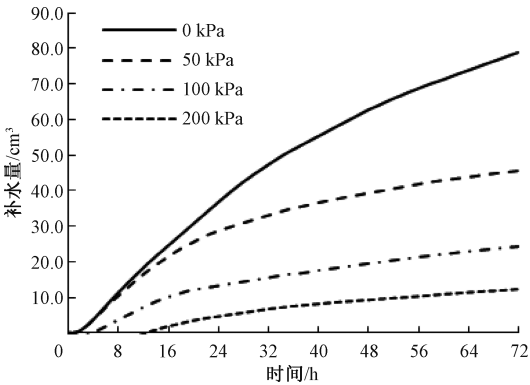


图 4 补水量随冻结时间变化曲线
Figure 4 The curve of water quantity with time and different loads

不同荷载作用下,冻结锋面随时间发展曲线相似,但发展速度存在明显差异。冻结 0~12 h 时,荷载越大,锋面发展速度越快,但冻结 24 h 后,锋面发展速度随荷载增大而变慢,锋面高度随荷载增大而降低;当冻胀变形稳定后,土样中温度场分布基本达到稳定。荷载每增大一级,锋面发展速度小于上一级荷载的时间提前 12 h,究其原因

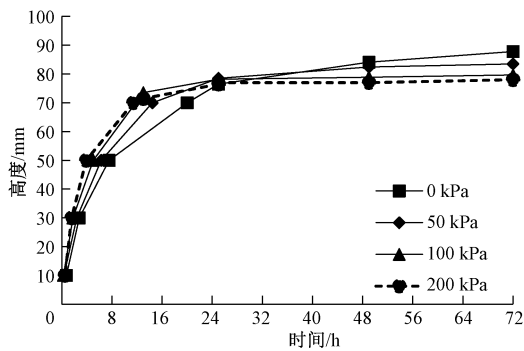


图5 冻结锋面高度随冻结时间发展曲线

Figure 5 The curve of soil freezing front height with time and different loads

表1 各荷载冻结锋面高度与时间拟合关系

Table 1 The development fitting formula of freezing front with different loads

试验 编号	补水 条件	荷载/ kPa	回归公式	方差 R^2
1#	补水	0	$H = 17.363 \ln t + 16.133$	0.991 9
2#	补水	50	$H = 15.033 \ln t + 24.178$	0.969 2
3#	补水	100	$H = 13.97 \ln t + 27.393$	0.950 4
4#	补水	200	$H = 13.623 \ln t + 28.8$	0.937 1

因:冻结前期荷载越大,对冻胀抑制效果越不明显。冻结前期补水量较少,土体内水分迁移与冻结量受此影响而降低,单位时间内同一高度土体冻结消耗冷量减少,导致冻结锋面发展速度加快,而中后期锋面位于高处,暖端影响增大,冷端影响减小,受温度影响的冻胀作用减小。随着荷载增大,冻胀产生的冻胀力难以克服有效应力使土体变形增加,锋面难以继续向上发展,土体冻胀开始达到动态平衡,导致中后期锋面发展速率减缓。中后期,随荷载增大,72 h 时补水量由最大 79.0 cm³ 减少至 12.3 cm³,土体内水分迁移量减少且冻胀量减少,因此锋面位置高度随荷载增大而降低。

2.2.2 冻结完成时冻结深度变化规律

土体在单向冻结过程中,试样高度发生改变,冻胀变形特性主要由冻胀率表示,土工试验方法标准给出如下冻胀率计算方法:

$$\eta = \Delta h / H_f \times 100\%。$$
 (2)

式中: η 为冻胀率,%; Δh 为冻胀量,mm; H_f 为冻结深度(不包含冻胀量),mm。

单向冻结试验,冻结深(高)度,即冻结锋面高度是计算冻胀率的重要参数,冻结深度减去冻胀量后即可得到参与冻结的土样高度。由于土样冻结分原位冻结和水迁移冻结,而参与冻结的土样高度一定程度上可以反映出原位冻结对冻胀量贡献大小,因此可通过对比冻胀量与参与冻结的

土样高度,考量不同条件下试样的水分原位冻结与迁移冻结的差异。

图6给出了不同荷载条件下冻结深度变化和参与冻结土样高度与冻胀量变化曲线。由图6可知,随荷载增大,土样冻结深度减小,且当荷载小于100 kPa时,随荷载增大冻结深度呈线性减小,超过100 kPa后,冻结深度减小幅度衰减。说明外荷载对试样冻结深度发展具有明显抑制作用,且随荷载增大,抑制效果逐渐衰减;随荷载增大,土样参与冻结高度增大,冻胀量呈衰减性减小的变化规律。究其原因:0 kPa时,冻结发展速率较慢,迁移冻结较充分,一定程度上抑制了原位冻结。随荷载增大,试样中迁移水分受抑制越明显,迁移水分量减少一方面导致冻胀量急剧减小,另一方面由于能量守恒,反而促进了土样原位冻结。

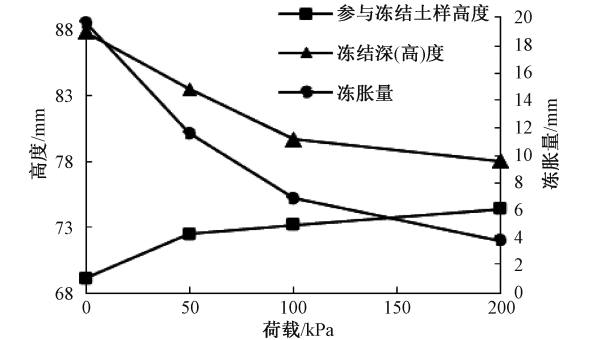


图6 荷载与参与冻结土样高度、冻结深度及冻胀量关系曲线

Figure 6 Variation curve of height,freezing depth and amount of frost heaving with different loads

2.3 冻胀变形变化规律

2.3.1 冻结过程中冻胀变形变化规律

图7为补水条件冻结过程中冻胀量变化曲线和冻胀量发展速率曲线。由图7可知,冻胀量发展变化均呈现先恒定保持不变,起始冻胀发生后冻胀进入快速发展阶段,此阶段冻胀快速增长,冻胀量增速迅速达到峰值,随后冻胀量增速放缓,冻胀增速呈迅速衰减变化规律。但不同荷载影响下,冻胀变形存在如下变化规律。

- (1)起始冻胀变形发生时间随荷载增大而延后。无荷载试样开始冻结短时间内不产生明显冻胀量,随荷载增大,产生起始冻胀量时间由开始冻结后0.5 h左右逐渐增加到3.5 h左右,且冻胀量发展达到稳定的时间缩短。随着荷载的增大,冻胀量发展速率减小,冻胀量减小,无荷载作用下土样最终冻胀量为200 kPa作用下的6.4倍。
- (2)荷载越大,冻胀变形发展速率越低,最终冻胀量也越小,由图7(b)可知,荷载越大,各阶段

冻土冻胀量发展速率均呈现越来越慢的趋势,且冻结前期降低幅度大,随时间推移,冻胀变形速率降低幅度越来越小。

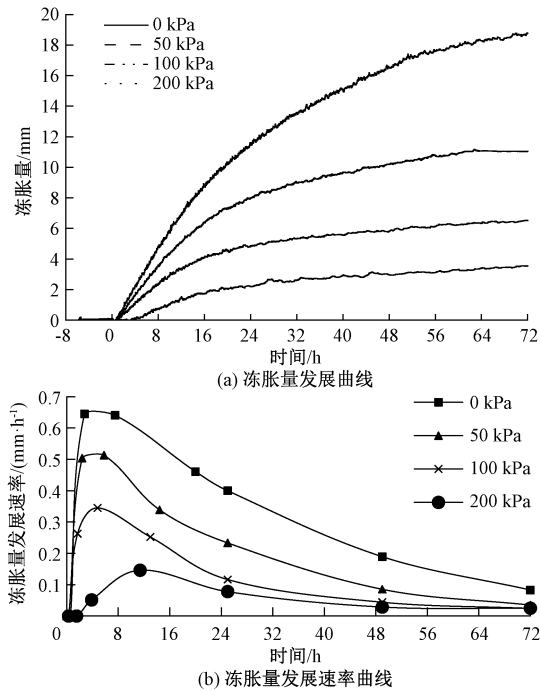


图 7 补水条件不同荷载作用下冻胀位移-时间曲线
Figure 7 Frost heave displacement-time curve of water supplement with different loads

2.3.2 荷载对冻胀率的影响

图 8 为补水条件冻结过程中冻胀率变化曲线和冻胀率发展速率曲线。由图 8 可知,补水条件下冻胀率发展曲线随荷载增大,冻胀率各阶段均呈衰减性增大变化规律,且曲线变化由无荷载时指数增长逐渐变为先指数增长后近似线性增长。各阶段冻胀率越来越小,这是由于荷载加快了冻结速度,减缓并抑制水分迁移冻结,降低各阶段冻胀变形速率,从而由指数增长逐渐变为近似线性增长。这与荷载作用下,冻结后期土体自身水分迁移冻结基本停止,外界水分以恒定速率迁移并相变,冻胀率发展速度基本恒定有关。

图 9 为冻胀率与外部荷载的关系曲线。由图 9 可知,最终冻胀率随上覆荷载的增大均呈指数规律递减,说明荷载达到一定数值后继续增加,抑制冻胀效果并不明显。冻胀率随荷载变化关系经指数回归拟合如下:

$$\begin{cases} \eta = 24.2e^{-0.008P}; \\ R^2 = 0.9733. \end{cases} \quad (3)$$

式中: η 为冻胀率,%; P 为外部荷载, kPa; R 为相关系数。

由冻胀率曲线可以看出,随外荷载增大,冻胀

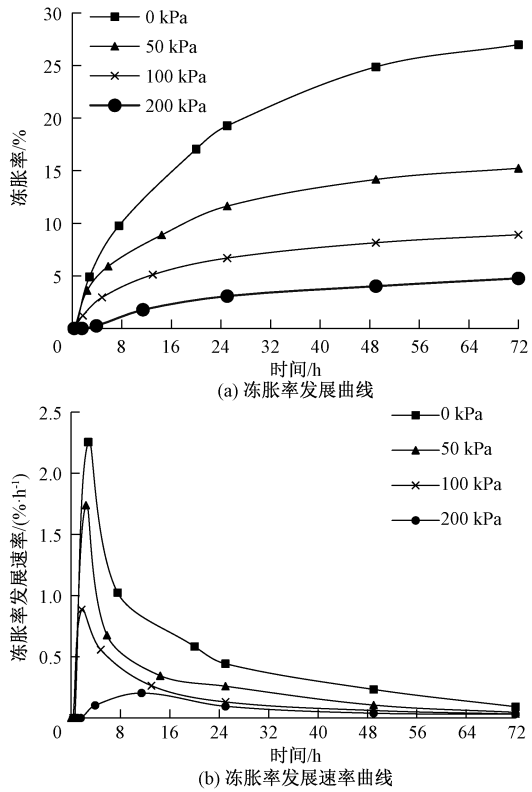


图 8 补水条件不同荷载作用下冻胀率-时间变化曲线
Figure 8 Frost heave rate-time curve of water supplement with different loads

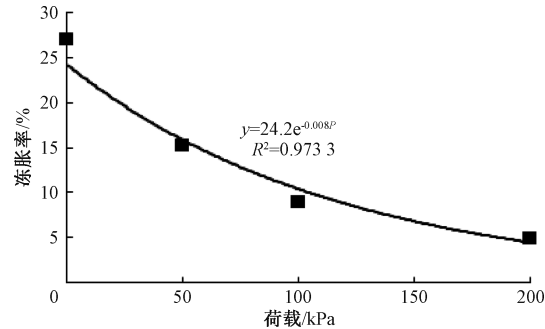


图 9 补水条件下不同荷载作用最终冻胀率
Figure 9 Final frost heave rate of water supplement with different loads

率衰减十分明显,冻胀率呈指数规律递减,由 0 kPa 时 27.0 % 衰减为 200 kPa 时 4.8%,无荷载作用下土样最终冻胀率为 200 kPa 作用下的 5.6 倍。究其原因:在补水条件下,外界补给的水源冻结,体积增大 1.09 倍,但随着顶部施加外荷载,试样本身有效应力增大,土体产生冻胀时孔隙扩充更难,一方面抑制了土体自身原位水冻结,另一方面荷载阻碍了冻结土体发生膨胀,冻胀力作用随之更加明显,冻胀力作为一种压力势施加于未冻结区中引起未冻水势减小,而荷载越大时压力势越大,此时由外界水冻结产生的冻胀量迅速

减少,冻胀受抑制明显。因此综合考量土体承载力,尽可能利用较大外界荷载削弱冻胀是一种有效抵抗冻胀的方法。

3 结论

选取上海地区典型软黏土层粉质黏土,通过室内补水条件下冻土单向冻胀试验,探讨了补水条件下较大荷载对重塑粉质黏土冻胀特性的影响,主要结论如下。

(1)不同荷载作用下试样降温规律类似,主要分为恒温阶段、温度迅速下降阶段、温度缓慢降低阶段和温度稳定阶段 4 个阶段,但随荷载变化,试样各阶段持续时间不同,总体表现为荷载越大,温度下降速度越快、温度分布越早达到稳定状态。

(2)不同荷载作用下冻结锋面随时间变化的发展曲线均呈对数增长规律,随荷载增大,冻结前期冻结锋面发展速度加快,中后期锋面发展速度变慢,锋面位置高度随荷载增大而降低。

(3)不同荷载条件下冻胀量发展曲线差异较明显,随荷载增大,起始冻胀量出现的时间延后,冻胀量发展达到稳定的时间缩短。随着荷载的增大,冻胀量发展速率减小,冻胀量减小,无荷载作用下土样最终冻胀量为 200 kPa 作用下的 6.4 倍。

(4)冻结过程中随荷载增大,冻胀率在各阶段均呈现越来越小的变化规律,冻胀率随上覆荷载的增大呈指数规律递减,无荷载作用下土样最终冻胀率为 200 kPa 作用下的 5.6 倍。

参考文献:

[1] 孙谷雨. 南京地铁典型土层冻土热物理力学特性研究[D]. 南京:南京林业大学,2013.
SUN G Y. The research on Nanjing subway typical soil frozen thermal physical and mechanical property[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.

[2] 陈湘生,濮家骝,殷昆亭,罗小刚. 地基冻-融循环离心模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 531-534.
CHEN X S, PU J L, YIN K T, et al. Centrifuge modelling tests of foundation undergoing two cycles of frost heave and thaw settlement[J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2002, 42(4): 531-534.

[3] 程桦,姚直书,张经双,等. 人工水平冻结法施工隧道冻胀与融沉效应模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 80-85.

CHENG H, YAO Z S, ZHANG J S, et al. A model test study on the effect of freeze heaving and thaw subsidence for tunnel construction with artificial horizontal ground freezing[J]. China civil engineering journal, 2007, 40(10): 80-85.

[4] 杨国清,杨平,何文龙,等. 海相人工冻土热物理特性试验研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 170-176.
YANG G Q, YANG P, HE W L, et al. Experiment study of thermal physical properties of marine artificial frozen soil[J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2017, 41(1): 170-176.

[5] KONRAD J M. Influence of overconsolidation on the freezing characteristics of a clayey silt[J]. Canadian geotechnical journal, 1989, 26(1): 9-21.

[6] KONRAD J M, LEMIEUX N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material[J]. Canadian geotechnical journal, 2005, 42(2): 515-527.

[7] LI A Y, NIU F J, ZHENG H, et al. Experimental measurement and numerical simulation of frost heave in saturated coarse-grained soil[J]. Cold regions science and technology, 2017, 137: 68-74.

[8] DARROW M M, HUANG S L, SHUR Y, et al. Improvements in frost heave laboratory testing of fine-grained soils[J]. Journal of cold regions engineering, 2008, 22(3): 65-78.

[9] 王永涛,王大雁,郭妍,等. 青藏粉土单向冻结冻胀率变化特性研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 409-415.
WANG Y T, WANG D Y, GUO Y, et al. Experimental study of the development characteristic of frost heaving ratio of the saturated Tibetan silt under one-dimensional freezing[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2016, 38(2): 409-415.

[10] 张婷,杨平. 土体单向冻结对土中水分迁移的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 117-121.
ZHANG T, YANG P. Effects of unilateralist freezing on the moisture migration of soil[J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2013, 37(1): 117-121.

[11] 魏厚振,周家作,韦昌富,等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2547-2552, 2560.
WEI H Z, ZHOU J Z, WEI C F, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil[J]. Rock and soil mechanics, 2016, 37(9): 2547-2552, 2560.

[12] 陈爱军, 张家生, 陈俊桦, 等. 重塑黏土单向冻结过程中水分迁移试验研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 115-120.
CHEN A J, ZHANG J S, CHEN J H, et al. Experimental study on moisture migration in remolded clay during unilateral freezing[J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2016, 40(5): 115-120.

[13] 鲍俊安, 杨平, 王许诺. 水泥土冻胀特性试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(1): 5-9.
BAO J A, YANG P, WANG X N. Experimental study on frost heave properties of cement-improved soil[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2013, 34(1): 5-9.

[14] 黄建华. 考虑卸压孔卸荷作用的人工冻土冻胀特性研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 141-148.
HUANG J H. Research on frost heaving characteristics of artificial frozen soil based on unloading effect by discharge holes[J]. Engineering mechanics, 2010, 27(12): 141-148.

[15] 王升福, 樊文虎, 戴道文, 等. 人工冻结作用下原状软黏土冻融特性试验[J]. 林业工程学报, 2020, 5(4): 154-160.
WANG S F, FAN W H, DAI D W, et al. Experimental study on freeze-thaw characteristics of undisturbed soft clay under artificial freezing[J]. Journal of forestry engineering, 2020, 5(4): 154-160.

[16] 张雅琴, 杨平, 江汪洋, 等. 含水率及应变速率对冻结粉质黏土强度特性影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 79-84.
ZHANG Y Q, YANG P, JIANG W Y, et al. Effect of water content and strain rate on the strength characteristics of frozen silty clay[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2020, 41(3): 79-84.

Influence of Load on Frost Heaving Characteristics of Remolded Silty Clay

YANG Ping, WANG Yanzi, DIAO Pengcheng

(School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In the prediction and control of frost heave and thaw settlement, the effect of external load, especially large load, on inhibiting frost heave and the law of frost heave deformation are the key to predict and control frost heave deformation. Through the frost heave test of remolded silty clay in the condition of water replenishment, the influence and evolution law of different load levels on the frost heave characteristics of remolded silty clay were studied. The results showed that the cooling law of samples with different loads was similar, which was mainly divided into four stages: constant temperature, rapid temperature drop, slow temperature drop and temperature stability. The overall performance was that the greater the load, the faster the temperature drop. The development curves of freezing front with time with different loads showed a logarithmic growth trend. With the increase of load, the development speed of freezing front in the early stage of freezing was accelerated, and the development speed of front in the middle and late stages was slowed down. The height of front position decreased with the increase of load. With the increase of load, the time when the initial frost heaving amount appeared delayed, the time when the frost heaving amount reached stable development shortened, the development rate of frost heaving amount decreased, and the frost heaving amount decreased. The final frost heaving amount of soil sample without load was 6.4 times that under 200 kPa. The frost heaving ratio decreased exponentially with the increase of the overlying load, and the final frost heaving ratio of soil samples with no load was 5.6 times that under 200 kPa.

Keywords: load action; water replenishment; unidirectional freezing; water migration; frost heaving characteristic