

文章编号:1671-6833(2020)03-0079-06

含水率及应变速率对冻结粉质黏土强度特性影响

张雅琴¹, 杨平¹, 江汪洋¹, 张婷¹, 陈亮²

(1.南京林业大学 土木工程学院,江苏 南京 210037; 2.常州市轨道交通有限公司,江苏 常州 213000)

摘要:人工冻土单轴抗压强度和弹性模量是人工冻结法设计的关键参数,准确掌握其变化规律极为重要,为此开展了不同含水率及应变速率条件下粉质黏土人工冻土单轴抗压强度试验研究。结果表明:大部分试样呈现腰鼓型破坏,随着含水率的增加,应力-应变曲线逐渐由应力软化型向应力硬化型转变,存在一达到强度峰值的最优含水率,对于南京典型粉质黏土该含水率为22%,接近饱和含水率;重塑粉质黏土的弹性模量随含水率的增大而增长,但增长率呈下降趋势;单轴抗压强度和弹性模量均随应变速率的增加呈衰减性增大;回弹模量随加卸荷次数的增加逐渐增大,当加卸荷次数达7次后,回弹模量值基本稳定。

关键词:人工冻结粉质黏土;含水率;加载速率;强度特性;回弹模量

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.006

0 引言

国内外学者对冻土强度展开了大量研究^[1-3],主要从两个方面入手,一方面是土体本身物理性质^[4-11]对强度的影响,主要包括含水率、干密度、含冰量、试样形状等。存在最佳含水率使冻土抗压强度最大,抗压强度随干密度增大而减小。冰含量越多,承受荷载能力越强,冻土强度越大。随着含盐量升高,冻土强度先增大后减小,存在最大强度。冻结粉土抗压强度和破坏应变与试件形状有关,试验条件相同情况下,正方体试件性能高于圆柱体试件。另一方面是试验条件^[12-18]的影响,主要包括围压、试验温度、应变速率、冻融循环次数等。

冻土强度随应变速率增加呈幂函数上升状态,因此试验中应慎重选择应变速率。温度对冻土强度的影响与冰结晶有关,总体呈负相关。冻融循环对粗粒土试件回弹模量有一定弱化作用。但关于含水率及应变速率对粉质黏土单轴抗压强度影响的认识还不深刻,特别是对冻土弹性模量、回弹模量及其影响因素的研究较少。

南京位于长三角地区,地层软弱,地下水丰富,地铁建设发展迅速,加固软弱土层隔绝地下水

影响是施工难点,人工冻结法的出现有效解决了这一难题,因此南京地铁联络通道、盾构隧道端头加固等多采用人工冻结法,大量人工冻土问题亟需解决。人工冻结法设计要考虑冻结壁厚度及后续变形问题,常选取冻土单轴抗压强度和弹性模量为主要力学参数指标,因此有必要明确其变化规律及内在机理。

基于人工冻结粉质黏土单轴抗压强度试验,研究了含水率、应变速率对南京地区粉质黏土冻土应力应变特性、单轴抗压强度、弹性模量与回弹模量的影响规律。

1 试样制备及试验方法

试验用土来自南京地铁5号线,选取最典型的粉质黏土进行试验,该土样基本物理特性指标见表1。采用微机控制多功能冻土压力试验机(WDT-100B)进行试验,该试验机最大轴向荷载为100 kN,精度为1%,温度控制范围为-50~50℃,上下波动±0.2℃。通过设置参数自动采集试样荷载和变形数据,并实时自动显示数据曲线图。

研究原状土和重塑土两种土样状态,将现场取回的原状粉质黏土削成φ50 mm×100 mm的圆柱形可得原状土试样。将土样烘干后进行粉碎

表 1 试验用土基本物理特性指标
Table 1 Physical indexes of the soil

土质	基本描述	埋深/m	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重	液限/%	塑限/%
粉质黏土	灰青色,可塑	19.1~27.3	2.03	20.62	1.68	2.71	29.6	17.5

并过 2 mm 筛,在干土中掺入一定量纯水达到试验含水率后养护 24 h。然后进行分层击实使其干密度与原状土样一致,试样尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。最后将试样在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境箱中放置 24 h,使试件内温度一致,可得重塑土试样。

具体试验规划如表 2 所示。每组试验进行 3 组平行试验,实验离散值超 20%时补做一组平行试验。在类似试验中,应变速率取值较小的成果较多,因此本次试验将研究大应变速率对强度和弹性模量的影响,具体取值为 1、10、20、 $40\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$ 。

表 2 试验规划
Table 2 Testing plans

试验类型	土样 状态	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变速率/ ($\%\cdot\text{min}^{-1}$)	含水率/ %
	原状土		10	20.62
抗压试验	重塑土	-10	10	16、18、20.62、 22、24、26
	重塑土		1、10、20、40	20.62
回弹试验	重塑土	-10	10	20.62

注:回弹应力为 $\sigma_s/2$,加卸荷次数为 10。

在峰值应力对应的应变基础上再加 5%应变值作为抗压强度试验终止条件,如果没有明显峰值则取 20%应变为终止条件。试验结束后观察试样破坏形态。回弹试验具体步骤为:①将试验放在加载台中央,避免偏心受力;②第一次加载前进行 10 kPa 小荷载持续 30 s 的接触性预压;③进行轴向加载,当轴向应力达到抗压强度 50%时开始轴向卸载,将轴向应力卸载至零;④轴向应力卸载至零后稳定 5 min(回弹间隔时间),重新将轴向应力加载至抗压强度 50%然后卸载到零,按加载-卸载-稳定-再加载的顺序重复循环 10 次后加载至试样破坏,结束试验。

2 试验结果与分析

2.1 原状与重塑粉质黏土破坏形态

在试验结果中选取部分具有代表性的原状与重塑粉质黏土试样的破坏形态如图 1~图 3 所示。

破坏形态以塑性破坏为主,冻土试样为中部凸起的腰鼓型破坏,并伴随竖向裂纹。此种破坏

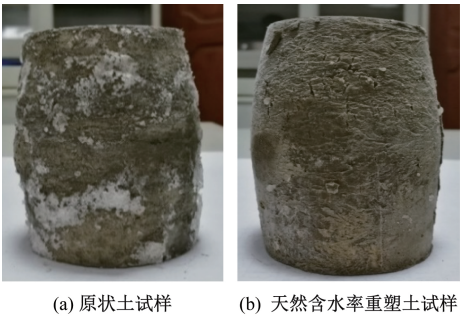


图 1 原状和重塑土破坏形态($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率 $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$)

Figure 1 Destructive form of original and remolded silty clay($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, strain rate is $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$)

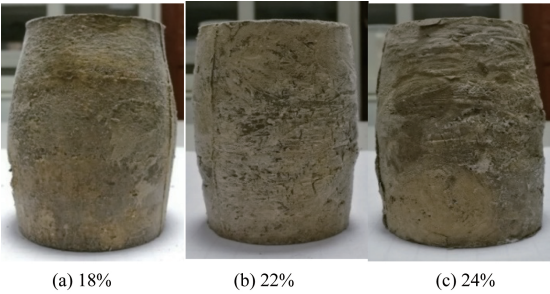


图 2 不同含水率重塑土破坏形态($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率 $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$)

Figure 2 Destructive form of remolded silty clay with different water content($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, strain rate is $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$)

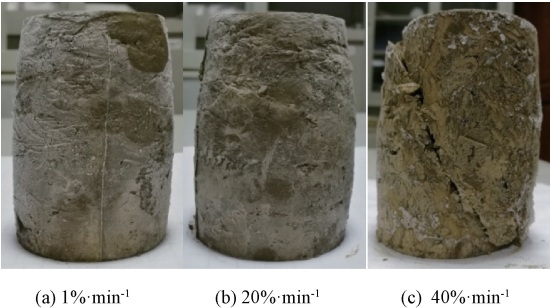


图 3 不同应变速率重塑土破坏形态($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 含水率 22%)

Figure 3 Destructive form of remolded silty clay with different strain rate($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, water content is 22%)

形态与试样中孔隙水相态有关,液态孔隙水为主时承受荷载能力较弱,土体向较高应力状态处滑动,表面土体颗粒间胶结力不足以抵抗挤压,因此产生裂缝,同时受试验装置两端摩擦力限制,两端变形有限,最终试样呈现腰鼓型塑性破坏。

图1为-10℃、10%·min⁻¹下原状土和重塑土的冻土破坏形态,两者略有区别。前者腰鼓位置偏离中心且腰线有所起伏,后者腰鼓位置则较为居中且腰线圆滑,相对于原状土,重塑土更为均匀,破坏形态更为一致。

图2为不同含水率重塑粉质黏土冻土破坏试样,表面竖向裂缝随含水率增加逐渐减少,但裂缝宽度增加且分布分散,腰线弧度趋于平缓。

图3为不同应变速率重塑粉质黏土冻土破坏试样,在40%·min⁻¹应变速率下重塑粉质黏土试样呈现剪切破坏,其剪切破坏角略大于45°。

2.2 含水率对强度和弹性模量的影响

不同含水率下重塑粉质黏土冻土应力-应变关系如图4所示。由图4可知,不同含水率重塑粉质黏土冻土应力在峰值应力对应的应变基础上再加5%应变值作为应变关系曲线线性段大致相同,但最终曲线形态存在差异。当含水率≥22%时,试样呈现应变硬化形态;当含水率≤20.6%时,试样呈现应变软化形态,且随含水率的减小,应变软化更加显著,说明含水率对试样应力-应变关系曲线破坏形态有显著影响,存在含水率分界点(22%)。颗粒间胶结力主要为冰-土胶结力,低于分界点时,胶结力较小,脆性破坏为主;高于分界点时,胶结力逐渐增强,塑性破坏为主。

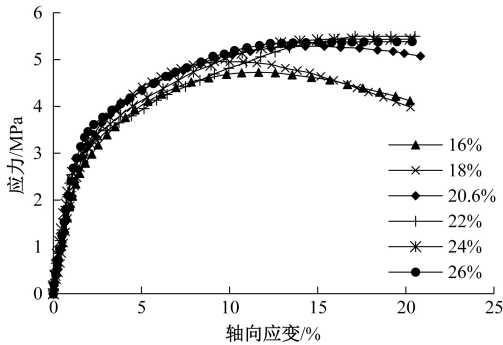


图4 不同含水率下冻结粉质黏土试样应力-应变关系曲线

Figure 4 The stress-strain curves of frozen soil with different water content

单轴抗压强度及弹性模量与含水率关系如图5所示。由图5(a)可知,重塑粉质黏土的冻土单轴抗压强度与含水率关系曲线存在峰值,峰值前后皆近似线性关系,可用线性函数进行拟合,但峰值前后单轴抗压强度随含水率变化的变化速率不同,减小速率仅为增长速率的1/4。说明含水率对重塑粉质黏土单轴抗压强度的影响与土体饱和

度有关。土体未饱和时,含冰量随含水率上升而增加,冰-土胶结力增强,抵抗荷载能力提升,单轴抗压强度增大;土体饱和后,由于成冰能力有限,存在大量未冻水使颗粒表面水膜增厚,导致土颗粒间摩擦力减小,胶结力减弱。荷载主要由固态冰承担,因此冰的含量开始起支配作用,越来越多呈现出冰的特性,而冰的强度约为3~4 MPa^[19],明显低于重塑粉质黏土冻土强度。冰强度受到粒径尺寸影响,粒径尺寸小的冰强度要大于粒径尺寸大的强度。粒径越小,颗粒间接触面越多,对相对运动阻碍越大,对材料变形阻力就越大。因此,试样中含水率越大,冰粒径尺寸越大,抗压强度越小。但在纯人工冰中影响值不超过0.5 MPa,相对于冻土整体强度而言影响较小,因此强度下降缓慢。此外,由于冻结产生的新的体积膨胀已不能完全被孔隙容纳,将破坏土体骨架产生新裂隙,故达到饱和含水率后单轴抗压强度随着含水量的增加而略减小。

由图5(b)可知,重塑粉质黏土冻土的弹性模量随含水率增长而衰减性增大,可见含水率对弹性模量影响主要集中在饱和含水率以下,达到饱和含水率后,含水率对弹性模量影响逐渐减小,弹性模量趋于稳定,饱和含水率亦为分界点。

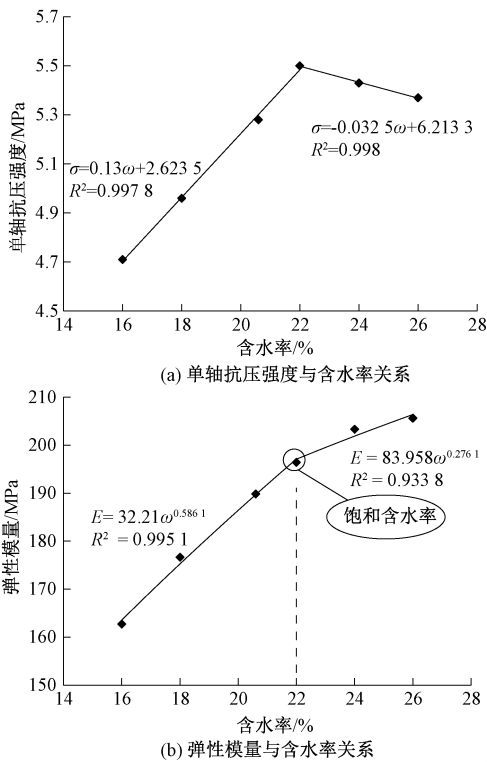


图5 单轴抗压强度及弹性模量与含水率关系曲线

Figure 5 The curve of uniaxial compressive strength and elastic modulus with water content

2.3 应变速率对强度和弹性模量的影响

不同应变速率下重塑粉质黏土试样应力-应变关系如图 6 所示。不同应变速率下试样均呈应变软化形态,说明破坏形态受应变速率影响较小,主要影响试样强度与模量。应变速率增加,线性段应力增速提高,线性转折点应力值增大。

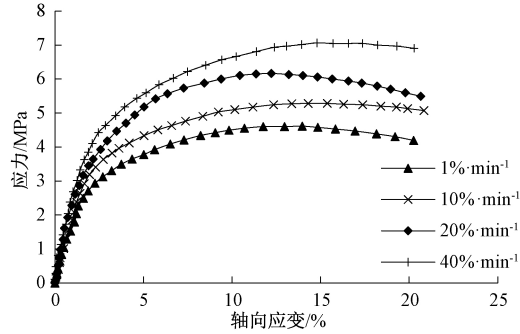


图 6 不同应变速率下冻结重塑粉质黏土试样应力-应变关系曲线

Figure 6 The stress-strain curves of frozen soil with different strain rates

单轴抗压强度及弹性模量与应变速率关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,冻结重塑粉质黏土单轴抗压强度和弹性模量均随应变速率增加而增大,应变速率由 $1\% \cdot \text{min}^{-1}$ 增至 $40\% \cdot \text{min}^{-1}$ 时,单轴抗压强度增强约 50%,弹性模量的提高也超过了 40%,可见单轴抗压强度和弹性模量受应变速率影响较大,对比冻土单轴抗压强度及弹性模量时要在应变速率统一的基础上进行,因此冻土试验规范规定试验应变速率为 $1\% \cdot \text{min}^{-1}$,以减少应变速率变化影响。

南京冻结粉质黏土单轴抗压强度随应变速率大致呈幂指数($y=mx^a$)增长,其中系数 a 小于 1,即单轴抗压强度增长率随应变速率增长逐渐变小;青藏高原高含水率粉质砂土规律类似,但抗压强度总体低于南京,应变速率影响较小,在小于 $0.6 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时敏感度相对较高;兰州冻结黄土也呈幂指数形式增长,但系数 a 大于 1,增长率变大,在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 间灵敏度最高;杭州冻结淤泥质黏土在应变速率小于 $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时呈线性增长,强度在 $2 \sim 5 \text{ MPa}$ ($-10\text{ }^\circ\text{C}$)。说明不同土质单轴抗压强度对应变速率的灵敏度及变化规律是不同的。

2.4 重塑粉质黏土回弹模量特性

对冻结重塑粉质黏土回弹试验回弹应力取单轴抗压强度值 (5.28 MPa) 的一半,得到应力-应变曲线如图 8 所示。卸载后再加载使曲线形成滞

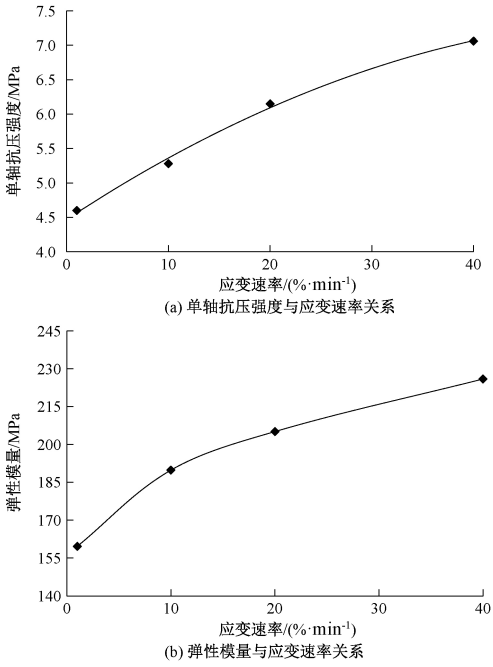


图 7 单轴抗压强度及弹性模量与应变速率关系曲线
Figure 7 The curve of uniaxial compressive strength and elastic modulus with strain rate

回圈,且在回弹间隔时间内,回弹变形随着时间的延长不断增大,说明存在滞后回弹现象,总回弹变形量为瞬时回弹量与滞后回弹量的总和。初始加载产生的变形量远大于第一次的卸载总回弹变形量,但两者之差随加卸荷次数增加而逐渐减小,说明初始加载时以塑性变形为主,弹性变形只有很小一部分,但随着频繁加卸载,弹性变形比例迅速提升甚至在后期成为变形主体,此时冻土处于弹性压密状态。第 10 次卸载完成后开始持续加载直至破坏。若延长初始加荷段将发现应力-应变曲线与第 10 次加载至破坏曲线重合,若直接将两者相连,整个曲线形态类似于单轴抗压强度关系曲线,这一发现与前人描述一致^[20]。

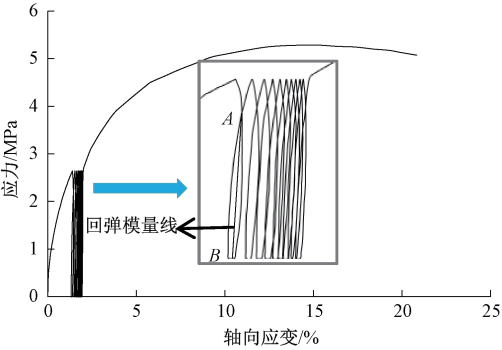


图 8 回弹试验重塑粉质黏土应力-应变关系曲线
Figure 8 The stress-strain curve of frozen soil under resilient modulus test

回弹模量为应力幅值与弹性应变的比值,即

$$E_d = \sigma_d / \varepsilon_e, \tag{1}$$

可近似看成滞回圈顶点连线斜率(如线 AB)。图 9 为重塑粉质黏土回弹模量与加卸荷次数的关系。

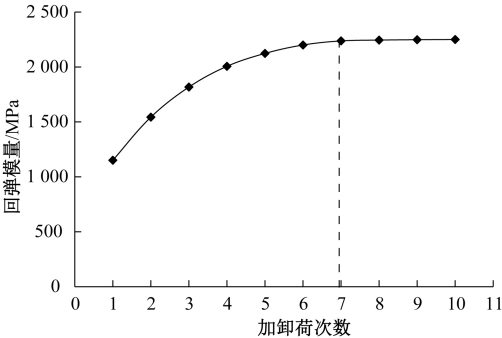


图 9 回弹模量与加卸荷次数关系曲线

Figure 9 The curve of resilient modulus with the number of times of loading

回弹模量随加卸荷次数的增加先迅速增大,反复 7 次卸载后趋于平缓,冻土塑性变形在反复加卸载中迅速减小,导致稳定时的回弹模量值是弹性模量值的 12 倍。对回弹模量与加卸荷次数关系用双曲线公式进行拟合,见式(2):

$$E_e = \frac{n}{a + bn}, \tag{2}$$

式中: E_e 为回弹模量,MPa; n 为加卸荷次数; a 和 b 为试验常数,对关系进行拟合得到: a 值为 0.000 5, b 值为 0.000 4; 相关系数为 0.994 4。

3 结论

选取南京地铁 5 号线粉质黏土,通过冻土单轴抗压试验探讨了人工冻结状态下,含水率及加载速度对单轴抗压强度的影响,主要结论如下:

(1)人工冻结原状及重塑粉质黏土试样大部分呈现腰鼓型破坏,仅在高应变速率下才可能呈剪切破坏形态。

(2)重塑粉质黏土冻土单轴抗压强度受含水率影响,随着含水率的增加,应力-应变曲线逐渐由应力软化型向应力硬化型转变。存在最优含水率使冻土强度达到峰值,该最优含水率接近饱和含水率。

(3)冻结重塑粉质黏土的弹性模量随含水率的增长而呈衰减性增长,含水率对弹性模量影响主要集中在饱和含水率以下,达到饱和含水率后,含水率对弹性模量影响逐渐减小,弹性模量趋于稳定,饱和含水率为分界点。

(4)冻结重塑粉质黏土的单轴抗压强度和弹性模量均随应变速率的增加而增大,但弹性模量

的增长速率随应变速率增大逐渐减小。

(5)重塑粉质黏土回弹模量随加卸荷次数的增加先迅速增大,反复 7 次卸载后趋于平缓,可用双曲线公式 $E_e = \frac{n}{a + bn}$,对回弹模量与加卸荷次数关系进行拟合。

(6)对比了原状土与重塑土破坏形态的区别,从宏观上详细描述了不同含水率及应变速率下的破坏形态,并发现存在使强度最大的最优含水率,且最优含水率接近饱和含水率。

参考文献:

[1] 程国栋,周幼吾.中国冻土学的现状和展望[J].冰川冻土,1988,10(3):221-227.

[2] 朱元林,吴紫汪,何平,等.我国冻土力学研究新进展及展望[J].冰川冻土,1995,17(增刊1):6-14.

[3] 马巍,王大雁.中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J].岩土工程学报,2012,34(4):625-640.

[4] 贺俊,杨平,何文龙.苏州地铁典型土层冻土力学特性研究[J].水文地质工程地质,2010,37(5):72-76.

[5] 陈有亮,王明,徐珊,等.上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(7):1046-1051.

[6] CHRIST M, KIM Y C. Experimental study on the physical-mechanical properties of frozen silt [J]. KSCE journal of civil engineering, 2009, 13(5): 317-324.

[7] 杜海民,张淑娟,马巍.初始含冰量对冻结粉质砂土变形与强度的影响[J].岩土力学,2014,35(10):2855-2860.

[8] 何平,程国栋,杨成松,等.非饱和冻土的强度分析[J].冰川冻土,2002,24(3):260-263.

[9] 蔡正银,吴志强,黄英豪,等.含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(9):1580-1586.

[10] 孙立强,路江鑫,李恒,等.含水率和含盐量对人工冻土强度特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(S2):27-31.

[11] 李海鹏,杨维好,黄家会,等.试件形状对冻结粉土抗压强度影响的试验研究[J].冰川冻土,2005,27(6):920-925.

[12] 陈忠达,陈冬根,陈建兵,等.冻融循环对不同含水率粗粒土回弹模量的影响[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(4):9-13.

[13] HU X D, WANG J T, YU R Z. Uniaxial compressive and splitting tensile tests of artificially frozen soils in tunnel construction of Hong Kong[J]. Journal of Shanghai Jiaotong university (science), 2013, 18(6): 688-692.

[14] LI H P,ZHU Y L,ZHANG J B,et al. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay[J]. Cold regions science and technology, 2004,39(1):39-45.

[15] 尹珍珍,陈有亮,王鹏. 上海人工冻结黏土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012,33(3): 788-792.

[16] XU X T,WANG Y B,YIN Z H, et al. Effect of temperature and strain rate on mechanical characteristics and constitutive model of frozen Helin loess[J]. Cold regions science and technology, 2017,136:44-45.

[17] 江汪洋,杨平,陈斌,等. 宁波海相软弱土层人工冻土强度特性试验研究[J]. 林业工程学报, 2017,2(5):126-131.

[18] 孙谷雨,杨平,刘贯荣.南京地区冻结粉质黏土邓肯-张模型参数试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2014,33(S1):2989-2995.

[19] 张丽敏,李志军,贾青,等. 人工淡水冰单轴压缩强度试验研究[J].水利学报, 2009, 40(11): 1392-1396.

[20] 徐湘田,赖远明,周志伟,等.循环与单调加载作用下冻结黄土的变形与损伤特性[J].冰川冻土, 2014,36(5):1184-1191.

Effect of Water Content and Strain Rate on the Strength Characteristics of Frozen Silty Clay

ZHANG Yaqin¹, YANG Ping¹, JIANG Wangyang¹, ZHANG Ting¹, CHEN Liang²

(1.School of Civil Engineering,Nanjing Forestry University,Nanjing 210037,China; 2.Changzhou Rail Transit Co., Ltd.,Changzhou 213000,China)

Abstract: Uniaxial compressive strength and elastic modulus of the artificial frozen soil were the key parameters of artificial ground freezing method design, it was extremely important to grasp their variation accurately. So the experimental study on uniaxial compressive strength of artificial frozen silty clay was carried out under the different water content and strain rate. The results showed that most samples were drum-type damaged. With the increase of water content, the stress-strain curve gradually changed from stress softening to stress hardening. There was an optimum water content for Nanjing typical silty clay, under which, the compressive strength was highest. The optimum water content was 22%, which approached saturated water content. Elastic modulus of remolded silty clay showed a increasing trend as water content increasing, but the growth rate declined. The uniaxial compressive strength and elastic modulus increased with the strain rate. The resilient modulus increased with the loading times, when loading times up to 7 times, the resilient modulus was basically stable.

Key words: artificial frozen silty clay; water content; loading rate; strength characteristic; resilient modulus