

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.021

冻融循环作用后饱和黏土的应变速率效应试验研究

林 波¹, 张 锋¹, 冯德成¹, 马宏岩¹, 冯 鑫²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 辽宁省交通科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 为研究不同应变速率加载对融化饱和黏土力学效应的影响, 对不同初始压实度的融化饱和黏土进行了不同应变速率和围压下的固结不排水三轴剪切试验, 分析了融化饱和黏土的应力-应变关系曲线特征、孔隙水压力、割线模量 (E_{50})、峰值强度、残余强度、抗剪强度指标的变化规律。结果表明: 随着应变速率的增大, 融化饱和黏土峰值强度和残余强度均先增大后减小, 随后持续增大; 而 E_{50} 模量则一直增大。应变速率未改变偏应力峰值所对应的应变大小; 初始压实度不影响融化饱和黏土峰值强度对应的应变值, 且在围压为 120 kPa、应变速率为 0.15%/h 时初始压实度对融化饱和黏土孔隙水压力发展趋势的影响不大, 而当应变速率超过 1.5%/h 时, 初始压实度的影响显著。随着围压增大, 融化饱和黏土峰值强度对应的应变值及孔隙水压力明显增大。应变速率小于 15%/h 时, 内摩擦角随着应变速率增大而减小, 应变速率大于 15%/h 时, 内摩擦角则随着应变速率增大而增大; 黏聚力随着应变速率的增大持续增大。其研究结果对加深融土应变速率效应的理解具有一定的理论意义。

关键词: 融化饱和黏土; 应变速率; E_{50} 模量; 峰值强度; 残余强度; 孔隙水压力; 抗剪强度指标

中图分类号: U 416.1+68

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 07-2007-09

Experimental investigation on strain rate effects of saturated clay subjected to freeze-thaw cycles

LIN Bo¹, ZHANG Feng¹, FENG De-cheng¹, MA Hong-yan¹, FENG Xin²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090 China;

2. Liaoning Communications Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110015, China)

Abstract: Consolidated undrained triaxial shear tests on thawed saturated clay with different initial compaction degrees were conducted under different strain rates and confining pressures to study the effect of strain rates on the mechanical properties of the thawed saturated clay. The stress-strain characteristic curve, pore water pressure, secant modulus (E_{50}), peak strength, residual strength and shear strength index of thawed saturated clay were analyzed. The results show that when the strain rate increases, the peak and residual strengths of the saturated clay first increase then decrease, then continue to increase; but the secant modulus E_{50} increases continuously. The strain rate does not change the strain magnitude corresponding to the deviatoric stress peak. The initial compaction does not affect the strain value corresponding to the peak strength of the thawed saturated clay. And the initial compaction degree has little effect on the development trend of pore water pressure of thawed saturated clay at confining pressure of 120 kPa and strain rate of 0.15% / h. The effect of initial compaction is significant as the strain rate exceeds 1.5% / h. The confining pressures have great impact on the developments of the pore water pressures and the strain values at the peak strengths. With the increase of confining pressure, the strain value and the pore water pressure corresponding to the peak strength of the thawed saturated clay increase. Internal friction angles decrease with the increase of strain rates when the strain rates slower than 15%/h, but increase with the increasing strain rates when the strain rates exceed 15%/h. Cohesion of the thawed saturated clay increases with the increase of strain rates. The results of this study imply theoretical significance to understand the effect of increasing the strain rate of molten soil.

Keywords: thawed saturated clay; strain rates; E_{50} modulus; peak strengths; residual strengths; pore pressures; shear strength indexes

收稿日期: 2015-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51408163, No. 51578200); 黑龙江省自然科学基金重点项目(No. ZD201218); “十二五”国家科技支撑计划项目(No. 2014BAG05B07)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51408163, 51578200), the Key Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (ZD201218) and the Projects in the National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2014BAG05B07).

第一作者简介: 林波, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事路基工程与冻土工程方面的研究工作。E-mail: linbohit@163.com

通讯作者: 冯德成, 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事寒区路基减灾防灾、路面材料与结构等相关研究工作。

E-mail: fengdecheng@hit.edu.cn

1 引言

随着国家在高速公路、铁路、地铁和机场等重大交通设施建设上的大力投入,由土质基础变形和破坏引起的病害等问题日益突出,尤其在占据国土面积 53.5% 的季节性冻土区,冻融作用更是加剧了土质基础的变形和破坏,造成基础融沉、翻浆等病害频发,严重威胁着交通设施的安全运营。因此,学者们关注于冻融循环作用过程中土体回弹模量^[1]、弹性模量^[2]、抗剪强度指标^[3]、压缩特性^[4]等力学性质的变化规律。而经历过若干冻融循环作用后力学性能趋近稳定的融化土应对荷载的力学响应如何,仍缺乏关注,尤其是单次荷载作用的快慢对融化土引起的速率效应,目前仍缺乏清晰地认识。实际工程中,以标准试验方法取得的抗剪强度,由于不考虑土的加载速率效应,导致岩土构筑物在施工期或者工后产生沉降过大^[5-6]。经历冻融循环作用后仍需具备承载力的融化土,其加载速率效应同样不容忽视。

早在 20 世纪 30 年代, Buisman^[7]即指出,土体的应力-应变关系具有不可忽略的速率相关性。近年来国内外学者针对岩土体的速率效应进行研究并取得一系列成果,廖红建等^[8]应用三维弹黏塑性模型模拟了软岩的应变速率效应。高彦斌等^[9]推导出应变率参数 ρ 的理论表达式。但汉波等^[10]分析了应变率对一维先期固结压力和三轴不排水抗剪强度的影响。蔡羽等^[11]研究了剪应变速率对强结构性黏土力学性状的影响。程海涛等^[12]对压实黄土进行不同加载速率下的 K_0 固结试验,并提出了应变-应力-时间关系模型。彭芳乐等^[13]研究了饱和砂土在恒定加载速率下的应力-应变响应。Rowe 等^[14]利用黏弹塑性模型验证了加固路堤中软土的应力-应变特性对时间的依存性。Bragov 等^[15]提供了一种获取软土在高应变压缩速率下主要参数的方法。刘添俊等^[16]研究了长期循环压缩荷载作用下饱和软黏土的累计应变速率效应。Yin 等^[17]建立了可反映软黏土在不同加载状况下对时间依存性的黏弹塑性模型。Tsutsumi 等^[18]研究了温度和应变速率同时作用下重塑黏土的固结特性。Omidvar 等^[19]综述了高应变速率下砂土力学性能的研究现状。岳夏冰等^[20]建立了加载和孔压消散两个过程中饱和重塑黄土的应变-加载速率-时间关系计算模型。Watanabe 等^[21]研究了加载速率对于丰浦砂力学响应的影响。Martin 等^[22]研究了应变速率对干砂三轴压缩特性的影响。朱启银等^[23]研究了软黏土加载速率效应特性在一维和三维、压缩与伸

长、不同超固结比条件下的统一性。Xu 等^[24]建立了高应变速率下砂土的边界面塑性模型。可见学者们对应变速率的研究取得一定成果,但研究对象多集中于常规岩土,而对季节性冻土区常见的融化土未有涉及,尤其经历过冻融循环后仍需承受荷载作用的路基融化土,相关的研究很少。

本文以土体的应力-应变关系具备速率相关性为出发点,研究融化土在不同速率的单调荷载作用下的应力-应变曲线特征、孔隙水压力、 E_{50} 模量、峰值强度和残余强度以及有效抗剪强度指标的变化规律。该研究结论对加深融土应变速率效应的理解具有一定的理论意义。

2 试验概况

2.1 试验土样

试验用土取自哈尔滨市,该土为东北地区路基填料的常用土。利用 Winner2308A 型激光粒度仪测得的颗粒级配曲线如图 1 所示。

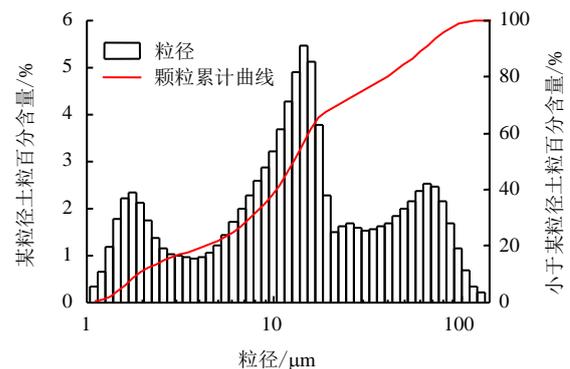


图 1 试验用土颗粒大小分布曲线

Fig.1 Particle size distribution of tested soil

根据《公路土工试验规程》^[25]分别进行土体相对密度试验、界限含水率和重型击实试验,测得的主要物理参数见表 1,并定义该土为低液限黏土。

表 1 试验用土的基本物理参数

Table 1 Basic physical properties of soil samples

| 土的相对密度 | 液限 | 塑限 | 塑性指数 | 最大干密度 | 最优含水率 |
|--------|----------|----------|----------|---------------------------------|--------------|
| G_s | $w_L/\%$ | $w_p/\%$ | $I_p/\%$ | $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | $w_{opt}/\%$ |
| 2.75 | 36.98 | 25.19 | 11.79 | 1.74 | 17.4 |

2.2 试样制备与冻融循环

试验用土经自然风干后过 2 mm 筛,按照最优含水率配制成湿土,密封静置 12 h 以确保水分均匀分布。之后,按照所选定的压实度称取不同质量的湿土进行双向静压成型,制样尺寸高度为 125 mm,直径为 61.8 mm。按照《土工试验方法标准》^[26]的

要求对试件进行抽真空饱和后，用保鲜膜和透明胶带将试样密封严实，防止水分散失。

将饱和后试件在室内进行封闭体系的冻结与融化。根据前人关于冻结与融化持续时间和循环次数的研究成果^[2, 27-28]，本文的冻融循环过程为：首先，将封闭的土样置于恒温-25℃的冷冻室内，冻结 24 h；之后，将其取出置于恒温 20℃的室内融化 12 h；如此循环 7 次，并测定试件的质量变化可忽略时，即可得到融化饱和黏土试件。

2.3 试验方案与过程

根据朱启银等^[23]的分析，不排水抗剪强度随着加载速率增长的幅度与土体固结状态、固结应力及试验类型均无关，而是与土体的物理力学性质相关。因此，本试验以应变速率、初始压实度和围压为变量。根据《公路土工试验规程》^[25]对黏质土不排水剪切速率的建议，综合考虑路基融化饱和黏土的实际状况，选取 5 种应变速率，依次为 0.15、1.5、15、30 和 60%/h；初始压实度根据公路路基设计标准选取为 86%、92% 和 98%；围压依次选取为 60、120 和 240 kPa，具体试验方案见表 2。

采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 TSZ-3 型全自动三轴仪进行固结不排水三轴试验，该仪器的剪切速率范围为 0.004 8%/h~230.4%/h。试验中，仪器首先判定融化饱和黏土试件是否需要反压饱和，然后进行 24 h 的等压固结，以孔隙水压力消散 95% 为固结结束的标准；随后立即进行剪切试验，以完成 15% 的应变为试验终止条件。整个试验过程中反压饱和、固结、剪切及数据采集均由仪器自动完成。

表 2 融化饱和黏土应变速率效应试验方案

Table 2 Testing program of strain rate effect

| 试件编号 | 初始压实度/% | 围压/kPa | 应变速率/(%/h) |
|---------|---------|--------|-------------------|
| T1~T5 | 86 | 120 | 0.15、1.5、15、30、60 |
| T6~T10 | 92 | 60 | 0.15、1.5、15、30、60 |
| T11~T15 | 92 | 120 | 0.15、1.5、15、30、60 |
| T16~T20 | 92 | 240 | 0.15、1.5、15、30、60 |
| T21~T25 | 98 | 120 | 0.15、1.5、15、30、60 |

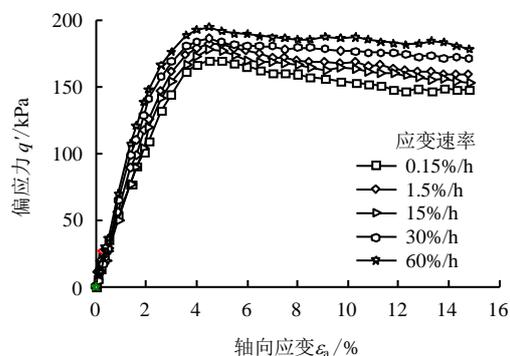
3 试验结果与分析

3.1 应变速率对应力-应变曲线特征的影响

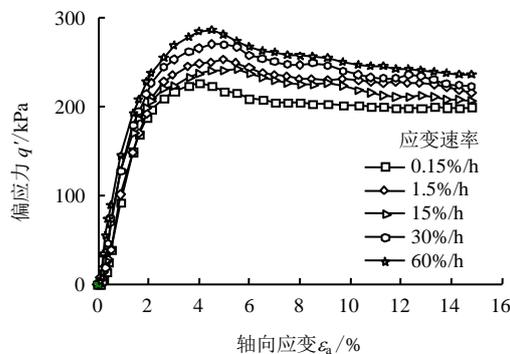
图 2 为围压为 120 kPa 时不同初始压实度(86%、92% 和 98%) 融化饱和黏土的应力-应变关系。由图可见，融化饱和黏土的应力-应变曲线均表现为应变软化特性。3 种压实度下，各试件的偏应力值均随着应变速率的增大而增大，但增大幅度有所不同；

除了应变速率为 1.5%/h 之外，融化饱和黏土的强度随应变速率的增大而增大。出现这种现象的原因，是因为应变速率为 1.5%/h 时，孔隙水压力缓慢消散，融化饱和黏土有足够的时间继续固结，有效应力得到大幅提高；而应变速率为 0.15%/h 时，融化饱和黏土表现出蠕变特性，因此，强度最小。结合图 2 反映出来的规律，发现 5 种应变速率对同一初始压实度融化饱和黏土强度增长的影响依次为：60%/h>30%/h>1.5%/h>15%/h>0.15%/h。

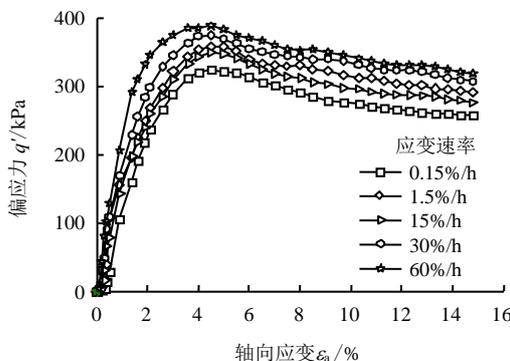
利用各应变速率下对应的峰值强度对图 2 的数据进行归一化处理得到应力-应变关系，可以发现，不同应变速率下的应力-应变曲线均几乎重合，以



(a) 86%的初始压实度($\sigma_3=120$ kPa)



(b) 92%的初始压实度($\sigma_3=120$ kPa)



(c) 98%的初始压实度($\sigma_3=120$ kPa)

图 2 不同初始压实度下融化饱和黏土的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of thawed saturated clays at different initial compaction degrees

92%的初始压实度曲线为例，如图3所示。在围压小于240 kPa时，应变速率提高了融化饱和黏土的强度值，但没有改变其应力-应变曲线的形状；初始压实度一定时，融化饱和黏土峰值对应的应变大小未随着应变速率的增大而发生变化，均维持在相对一致的峰值应变水平，说明三轴不排水抗剪强度峰值对应的应变与应变速率无关，这一结论，与现有的研究结果^[29-30]一致。此外，初始压实度发生变化时，融化饱和黏土的峰值均出现在4.5%~5%的应变之间，说明初始压实度对本试验融化饱和黏土的峰值应变影响较小。

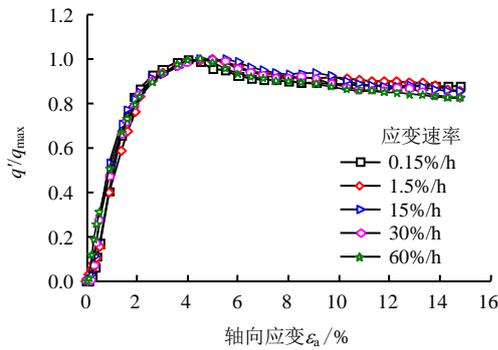


图3 初始压实度为92%时应力-应变曲线归一化

Fig.3 Normalized stress-strain curves of thawed saturated clay at the initial compaction degree of 92%

图4为初始压实度为92%的融化饱和黏土在不同围压(60、120和240 kPa)下应力-应变关系。可以看出，融化饱和黏土在3种围压下对应的峰值强度依次出现在2.8%、4.1%和5.2%左右，即随着围压的增大，峰值对应的应变值随之增大，换言之，围压对峰值应变的大小有着显著的影响。

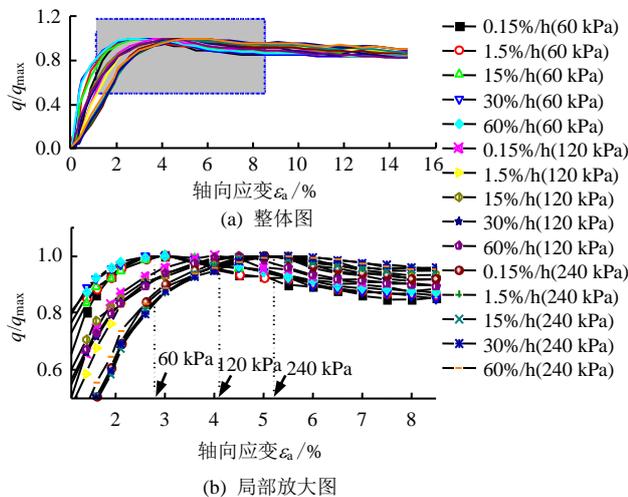


图4 不同围压下融化饱和黏土的应力-应变曲线归一化

Fig.4 Normalized stress-strain curves of thawed saturated clay at different confining pressures

3.2 应变速率对孔隙水压力的影响

图5为围压为120 kPa时不同初始压实度(86%和98%)融化饱和黏土孔隙水压力随应变变化曲线。可以看出，不同的剪切速率可能会造成孔隙水压力的发展趋势不同：从峰值上看，随着初始压实度提高，融化饱和黏土的孔隙水压力峰值降低(0.15%/h除外)；从曲线形状上看，融化饱和黏土在各应变速率下的孔隙水压力均随着应变发展不甚明确，但应变速率为0.15%/h时对应的孔隙水压力均明显大于其他应变速率，究其原因，是因为本试验所用黏土为饱和黏土，缓慢的剪切速率才有利于孔隙水压力的增长。此外，初始压实度由86%、92%提高到98%，融化饱和黏土的孔隙水压力，除了应变速率为0.15%/h时持续上升之外，其余应变速率对应的孔隙水压力均由硬化型演变成软化型，出现这种情况的原因，可能是由于初始压实度为98%的试件初始含水率最小，在低围压下试件的破坏形式由鼓型向斜剪型发展，一旦超过偏应力峰值，孔隙水的连通性迅速破坏，孔隙水压力开始下降。而0.15%/h对应的孔隙压力能够持续上升，推测其原因为缓慢的应变速率下，孔隙水压力有充分的时间均匀分布^[11]。

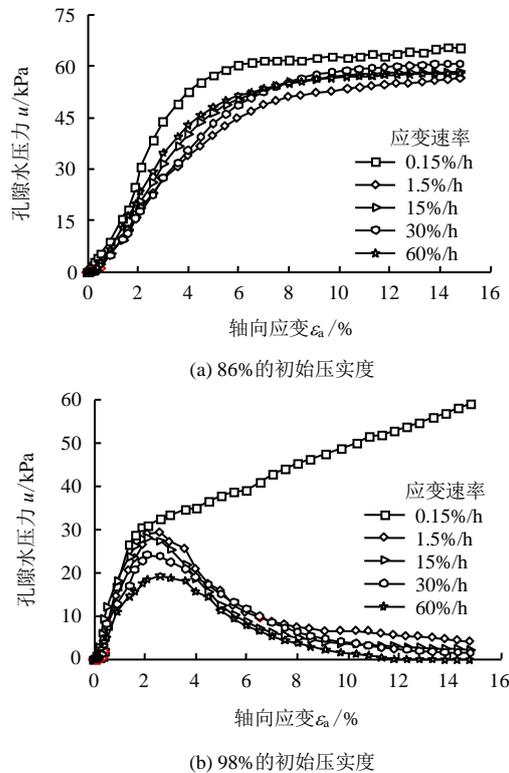


图5 不同初始压实度融化饱和黏土孔隙水压力-应变曲线

Fig.5 Pore water pressure-strain curves of thawed saturated clays at different compaction degrees

换言之，当围压一定、初始压实度提高时，应

变速率对融化饱和黏土孔隙水压力的影响表现为：应变速率为 0.15%/h 时孔隙水压力增大的趋势未变，均为硬化型增长，但孔隙水压力的峰值（取 15% 的应变）约降低了 9.8%；其余 4 种应变速率下孔隙水压力的发展趋势，由硬化型变成软化型，对应的孔隙水压力峰值降低了 50.27%~66.84% 不等。由此可见，低围压下（120 kPa）、低应变速率（0.15%/h）下初始压实度对融化饱和黏土孔隙水压力发展趋势的影响不大，但当应变速率超过 1.5%/h 时，初始压实度对融化饱和黏土孔压的发展影响显著。

图 6 为初始压实度为 92% 的融化饱和黏土在围压为 60 kPa 和 240 kPa 时孔隙水压力随应变变化曲线。可以看出，围压为 60 kPa 时孔隙水压力的变化曲线呈现软化特征，且应变速率越大，软化特征越明显；而围压为 240 kPa 时孔隙水压力均呈现硬化特征，其中 0.15%/h 应变速率对应的孔隙水压力同比增加显著，约是其他 4 种应变速率的 1.62~2.15 倍。此外，围压由 60 kPa 增加到 240 kPa 时，0.15%/h 应变速率对应的孔隙水压力峰值增长 5.95 倍，其他应变速率对应的孔隙水压力峰值增长 4.73~7.25 倍不等。由此可见，应变速率一定时，围压的提高不但使孔隙水压力的发展趋势由软化型转变成硬化型，同时也使孔隙水压力水平得到相应提高。

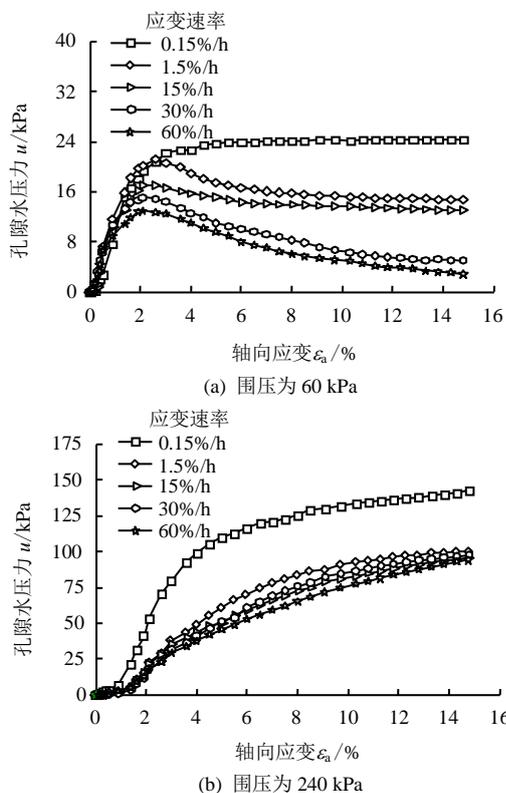


图 6 不同围压下融化饱和黏土孔隙水压力-应变曲线
Fig.6 Pore water pressure-strain curves of thawed saturated clays at different confining pressures

3.3 应变速率对 E_{50} 模量的影响

加载速率可引起岩土的 E_{50} 发生变化^[31]。 E_{50} 定义为 50% 峰值强度对应的割线模量，是描述土体应力发展速度的特征量，因此，常被用来进行岩土体弹塑性计算^[32]。本文采用 E_{50} 来描述应变速率对融化饱和黏土力学性能的影响，取法如图 7 所示。

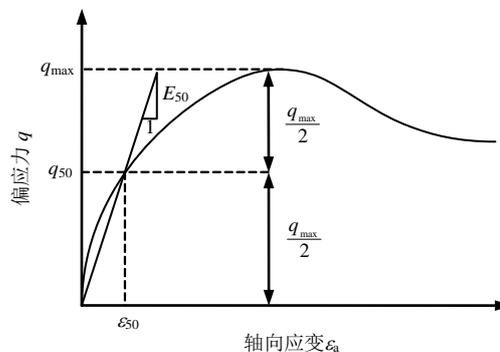


图 7 E_{50} 模量的取法^[33]
Fig.7 Method of E_{50} modulus^[33]

图 8 为围压为 120 kPa 时，3 种初始压实度的融化饱和黏土 E_{50} 值与应变速率关系图。由图可见，对应于每种应变速率，融化饱和黏土的 E_{50} 值均随初始压实度增大而增大。当应变速率小于 15%/h 时， E_{50} 模量均随着应变速率的增大而增大，增幅为 1.90%~31.43% 不等。由于试件离散性的原因，86% 初始压实度融化饱和黏土在 15%/h 时的 E_{50} 稍有降低；当应变速率大于 15%/h 后， E_{50} 则随着应变速率增大持续增大，增大幅度为 1.45%~52.32% 不等。换言之，融化饱和黏土的 E_{50} 随着应变速率增大而增大，即应变速率和融化土的应力发展速度呈现正相关。

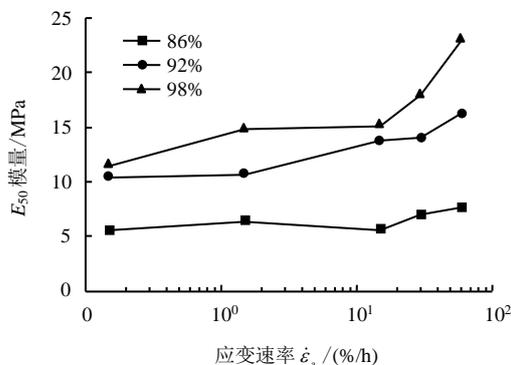


图 8 E_{50} 模量与应变速率的关系
图 8 Relations between E_{50} modulus and strain rate

3.4 应变速率对峰值强度和残余强度的影响

图 9、10 为融化饱和黏土的峰值强度 q_p 和残余强度 q_r 与应变速率 $\dot{\epsilon}_a$ 的关系图，采用 15% 轴向应变

对应的偏应力值为残余强度 q_r 。

可以看出，在应变速率小于 15%/h 时，融化饱和黏土的峰值强度和残余强度均经历先增加后减小的过程，即应变速率 1.5%/h 对应的峰值强度和残余强度，均大于应变速率 0.15%/h 和 15%/h。这是因为融化饱和黏土以 0.15%/h 的应变速率完成 15% 的轴向应变需要 100 h，这个过程中融化饱和黏土表现出蠕变特性，因此，强度值最小；而 1.5%/h 的应变速率下，融化饱和黏土有足够的时间完成继续固结，继而峰值强度比 0.15%/h 提高了 2.93%~10.62%，比 15%/h 提高了 2.24%~3.75%。当应变速率超过 15%/h 之后，峰值强度均随着应变速率的增大而增大，这个阶段的特征与文献[11]结论一致。

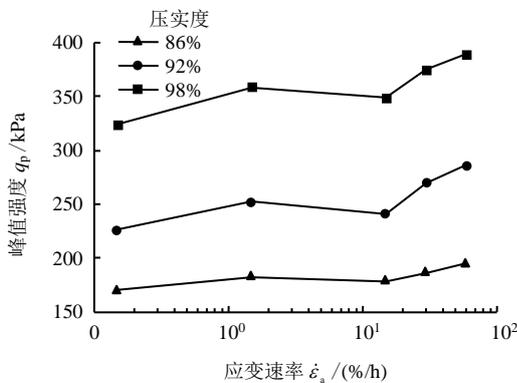


图 9 峰值强度与应变速率的关系

Fig.9 Relations of peak strengths with strain rates

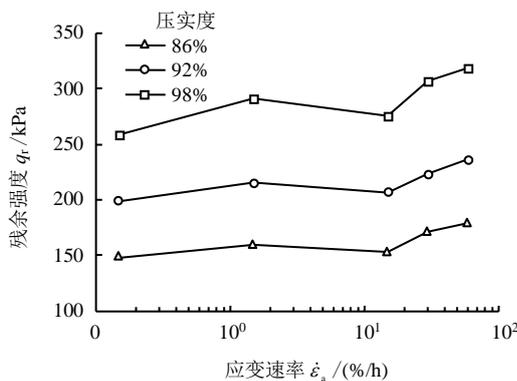


图 10 残余强度与应变速率的关系

Fig.10 Relations between residual strength and strain rate

3.5 应变速率对黏聚力和内摩擦角的影响

图 11 为 92% 初始压实度的融化饱和黏土试件在不同围压 (60、120 和 240 kPa) 下的有效抗剪强度指标与应变速率关系。

可以看出，黏聚力随着应变速率的增大而增大，而内摩擦角在应变速率以 10 倍从 0.15%/h 增大至 15%/h 的过程中逐渐减小，当应变速率超过 15%/h，

内摩擦角则随着应变速率的增大而增大。这与部分研究成果认为冻融循环作用导致土体黏聚力降低、内摩擦角增大^[27, 34-36]的结论稍有不同。究其原因，是因为饱和黏土在冻结和融化的循环作用下，水分发生来回迁移，即冻结过程中，温度的降低是由试件表层向内部传递的，这个过程会导致水分往试件表层迁移继而积聚、冻结在试件表层；融化过程中，温度的升高是由表层向内部传递，造成融化的水分向试件内部迁移^[37]，如此重复若干冻融循环后形成的融化饱和黏土试件，实际上已经具备一定的结构性。而融化饱和黏土的强度发挥来源于土颗粒之间的滑动摩擦和咬合摩擦共同作用，在应变速率小于 15%/h 时，土颗粒之间的摩擦以滑动摩擦为主，应变速率增加 (如 1.5%/h)，克服滑动摩擦需要的阻力则变小，对应的内摩擦角变小；当应变速率超过 15%/h，由于应变速率加快，土颗粒之间来不及发生滑动摩擦，而是以咬合摩擦占主导，摩擦角开始增大，且应变速率越大，内摩擦角越大。

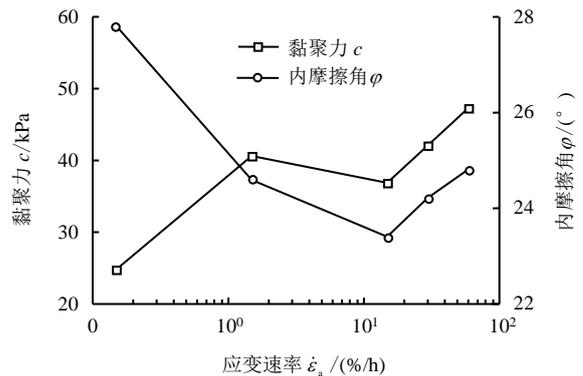


图 11 应变速率与融化饱和黏土黏聚力和内摩擦角关系

Fig.11 Relations between strain-rates and cohesion, internal friction angles of thawed saturated clays

可见，饱和融化黏土的应变速率效应以 15%/h 应变速率为节点，可分为两种情况：①当应变速率小于 15%/h 时，由于剪切过程中蠕变、固结和滑动摩擦的综合作用，试件的强度随着应变速率的增加先增加后减小，即存在最大应变速率对应的强度值最大 (本试验中为 1.5%/h)；②当应变速率大于 15%/h 时，蠕变和固结作用不明显，剪切过程中土颗粒间的摩擦以咬合摩擦为主，表现为应变速率越大，试件的强度越大。

4 结 论

(1) 随着应变速率的提高，融化饱和黏土的不排水抗剪强度随之增大，但偏应力峰值对应的应变

值没有改变; 初始压实度对融化饱和黏土强度峰值对应的应变值影响较小, 而围压则有着显著的影响; 利用峰值强度作为归一化因子得到的各应变速率下应变-应变关系曲线归一化良好。

(2) 围压为 120 kPa、应变速率为 0.15%/h 时, 初始压实度对融化饱和黏土孔隙水压力发展趋势的影响较小, 当应变速率超过 1.5%/h 时, 初始压实度对融化饱和黏土孔隙水压力的影响显著; 围压以倍数增大时, 各应变速率对应的孔隙水压力峰值以此倍数的 1.2~1.8 倍增长, 孔隙水压力曲线由软化型转变成硬化型。

(3) 融化饱和黏土的 E_{50} 随着应变速率的增大而增大; 而峰值强度和残余强度则随着应变速率的增大均先增大, 后减小, 随后持续增大。

(4) 当应变速率不超过 15%/h 时, 融化饱和黏土的内摩擦角随着应变速率增大而减小, 超过此应变速率后, 内摩擦角则随着应变速率增大而增大; 黏聚力随着应变速率的增大持续增大。

参考文献

- [1] LEE W, BOHRA N, ALTSCHAEFFL A, et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1995, 32(4): 559—568.
- [2] WANG D, MA W, NIU Y, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2007, 48(1): 34—43.
- [3] 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2082—2086.
QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(12): 2082—2086.
- [4] GRAHAM J, AU V. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1985, 22(1): 69—78.
- [5] KABBAJ M, TAVENAS F, LEROUEIL S. In situ and laboratory stress-strain relationships[J]. **Géotechnique**, 1988, 38(1): 83—100.
- [6] HANZAWA H, TANAKA H. Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 30(1): 132—148.
- [7] BUISMAN A. Results of long duration settlement tests[C]//Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge: [s. n.], 1936: 103—107.
- [8] 廖红建, 蒲武川, 殷建华. 软岩的应变速率效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3218—3223.
LIAO Hong-jian, PU Wu-chuan, YIN Jian-hua. Study on strain rate effect on soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3218—3223.
- [9] 高彦斌, 汪中为. 应变速率对粘土不排水抗剪强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5779—5783.
GAO Yan-bin, WANG Zhong-wei. Effect of strain rate on undrained shear strength of clays[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 24(Supp. 2): 5779—5783.
- [10] 但汉波, 王立忠. K_0 固结软黏土的应变速率效应研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 718—725.
DAN Han-bo, WANG Li-zhong. Strain-rate dependent behaviors of K_0 consolidated clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(5): 718—725.
- [11] 蔡羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变速率对湛江强结构性黏土力学性状的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1235—1240.
CAI Yu, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1235—1240.
- [12] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土连续加载 K_0 固结特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3203—3208.
CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. K_0 consolidation characteristics of compacted loess under continuous loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp. 1): 3203—3208.
- [13] 彭芳乐, 李福林, 李建中, 等. 砂土应力-应变关系的加载速率效应分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 16—20.
PENG Fang-le, LI Fu-lin, LI Jian-zhong, et al. Loading rate effects on stress-strain relation of sandy soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp. 1): 16—20.
- [14] ROWE R K, TAECHAKUMTHORN C. Combined effect of PVDS and reinforcement on embankments over rate-sensitive soils[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2008, 26(3): 239—249.

- [15] BRAGOV A, LOMUNOV A, SERGEICHEV I, et al. Determination of physicommechanical properties of soft soils from medium to high strain rates[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2008, 35(9): 967—976.
- [16] 刘添俊, 莫海鸿. 长期循环压缩荷载下饱和软黏土的应变速率特性[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1): 17—22.
LIU Tian-jun, MO Hao-hong. Behaviour of strain rate of saturated soft clay under long-term cycle compression loading[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2009, 22(1): 17—22.
- [17] YIN Z, KARSTUNEN M. Modelling strain-rate-dependency of natural soft clays combined with anisotropy and destructuration[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 2011, 24(3): 216—230.
- [18] TSUTSUMI A, TANAKA H. Combined effects of strain rate and temperature on consolidation behavior of clayey soils[J]. **Soils and Foundations**, 2012, 52(2): 207—215.
- [19] OMIDVAR M, ISKANDER M, BLESS S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2012, 49(0): 192—213.
- [20] 岳夏冰, 赵丽娅, 谢永利, 等. 重塑饱和黄土应变-加载速率-时间计算模型[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6): 101—104.
YUE Xia-bing, ZHAO Li-ya, XIE Yong-li, et al. Strain-loading rates-time model of remolded saturated loess[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2012, 34(6): 101—104.
- [21] WATANABE K, KUSAKABE O. Reappraisal of loading rate effects on sand behavior in view of seismic design for pile foundation[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(2): 215—231.
- [22] MARTIN B, KABIR ME, CHEN W. Undrained high-pressure and high strain-rate response of dry sand under triaxial loading[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2013, 54(10): 51—63.
- [23] 朱启银, 尹振宇, 朱俊高, 等. 软黏土加载速率效应特性试验研究: 进展与趋势[J]. 岩土力学, 2012, 35(1): 7—24.
ZHU Qi-yin, YIN Zhen-yu, ZHU Jun-gao, et al. Progress and trend of experimental investigation on rate-dependent behavior of soft clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 35(1): 7—24.
- [24] XU T, ZHANG L. Numerical implementation of a bounding surface plasticity model for sand under high strain-rate loadings in LS-DYNA[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 66(0): 203—218.
- [25] 交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E40-2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [26] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The Ministry of Water Resources of the Peoples Republic of China. GB/T 50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [27] 于琳琳, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻融作用对饱和粉质黏土抗剪性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2448—2452.
YU Lin-lin, XU Xue-yan, QIU Ming-guo, et al. Influence of freeze-thaw on shear strength properties of saturated silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2448—2452.
- [28] 常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1496—1502.
CHANG Dan, LIU Jian-kun, LI Xu, et al. Experiment study of effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinghai-Tibet silty sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(7): 1496—1502.
- [29] ZHU J, YIN J. Strain-rate-dependent stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(6): 1272—1282.
- [30] DÍAZ-RODRÍGUEZ J A, MARTÍNEZ-VÁSQUEZ J J, SANTAMARINA J C. Strain-rate effects in Mexico City soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(2): 300—305.
- [31] 尹骥, 陈宝, 李煜, 等. 上海第②层粉质黏土非饱和强度与变形模量的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1619—1625.
YIN Ji, CHEN Bao, LI Yu, et al. Triaxial tests on strength and deformation modulus of No. 2 layer silty clay of Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1619—1625.