

DOI: 10.11779/CJGE201607010

考虑温度影响的饱和软黏土累积变形特性研究

刘干斌¹, 范思婷¹, 陈斌², 陶海冰¹, 叶俊能²

(1. 宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通工程建设指挥部, 浙江 宁波 315010)

摘要: 通过开展饱和软黏土温控动三轴试验, 研究了不同温度作用下土的不排水累积变形、孔压、阻尼比及动弹性模量变化规律, 建立了考虑温度、初始静偏应力、围压、超固结比等影响的应变模型, 并获得了模型参数与温度的关系。结果表明: 温度对土的累积塑性变形、孔压、阻尼比及动弹性模量有较大影响, 土体的累积塑性应变、孔压、阻尼比均随着温度升高而减小, 动弹性模量则随着温度升高而增大, 土体表现出热硬化特征; 在不同温度作用下, 考虑温度影响的应变模型计算结果与试验结果较为吻合, 验证了模型的合理性, 可用于预测同一试验工况下任意温度时土的累积塑性应变结果。

关键词: 温控动三轴试验; 温度效应; 应变模型; 累积塑性应变

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)07-1238-08

作者简介: 刘干斌(1976-), 男, 江西吉安人, 博士, 教授, 从事多物理场土力学方面的研究。E-mail: liugb76@163.com。

Characteristics of cumulative deformation of saturated soft clay considering temperature effect

LIU Gan-bin¹, FAN Si-ting¹, CHEN Bin², TAO Hai-bing¹, YE Jun-neng²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Urban Rail Transit Project Construction

Headquarters, Ningbo 315010, China)

Abstract: The temperature-controlled cyclic triaxial tests on Ningbo soft clay are carried out to study cumulative deformation, pore pressure, damping ratio and dynamic modulus of soils under different temperatures and undrained conditions. A strain constitutive model is developed considering the effects of temperature, initial static deviator stress, confining pressure, overconsolidation ratio and other factors, and the relationship between the model parameters and temperature is obtained. It is shown that the temperature has great influence on the cumulative plastic deformation, pore pressure, damping ratio and dynamic modulus of soils. The cumulative plastic strain, pore pressure and damping ratio decrease gradually with the increase of temperature, and the dynamic elastic modulus increases with the increase of temperature, thus heat hardening characteristic is revealed. In addition, the calculated results using the strain constitutive model considering the influence of temperature are consistent with the experimental ones, which verify the rationality of the model. Furthermore, the proposed model can be used to predict the cumulative plastic strain results of soils under the same condition of arbitrary temperature.

Key words: temperature-controlled cyclic triaxial test; temperature effect; strain model; cumulative plastic strain

0 引言

在核废料处理、地热开采、热力管线埋设、公共交通系统等诸多工程建设领域及广大季节性冰冻区域中, 温度对土体力学性质的影响受到越来越多的关注, 开展不同温度作用下土的动/静力特性试验研究十分必要。

目前, 国内外有关土的温度效应研究主要集中于热固结、热变形、热强度试验及理论方面。例如 Houston 等^[1]对伊利石和蒙脱石进行正常固结排水加热($4^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$), 展开了各向等压不排水三轴剪切试验, 结果表明加热导致不排水抗剪强度和刚度增大。

Kunti Wattanakul 等^[2]对黏土分别进行正常固结和超固结排水加热($20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$), 并进行了各向等压不排水三轴剪切试验, 研究发现在正常固结下土的不排水抗剪强度和刚度随着温度升高而增大, 但在超固结下强度和刚度保持不变。Mitchel^[3]的试验结果表明高温下固结的抗剪强度大于低温下固结的强度。ABUEL-NAGA 等^[4]通过对饱和黏土的加热试验和数值模拟结果对比, 发现土样温度越高, 破坏偏应力越

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278256, 51478228)

收稿日期: 2015-07-02

大, 应力路径有一定扩张, 并呈现热硬化趋势。Laloui等^[5]在22℃和90℃下, 开展了高岭土和MC土循环三轴剪切试验(静力特性试验), 通过试验得到土样温度越高, 轴向应变和孔压越小的结果。

关于土的动力特性, 国内外学者已开展了大量研究, 取得了诸多成果, 而有关于温度对土的动力特性试验研究成果较少。在人工冻土方面, 焦贵德等^[6-7]对-1℃的冻土试样在频率3, 5, 8 Hz的循环荷载下进行了单轴压缩试验, 探讨了冻土在循环荷载下的滞回圈演化规律及冻土在循环荷载下的累积变形和动强度。罗飞等^[8]采用分级加载方式逐级施加动荷载, 对不同加载频率、围压和负温条件下青藏冻结黏土和兰州黄土的动应变幅值变化特征进行了试验研究。刘干斌等^[9]通过设计内外联合加热温控装置, 研制了温控动三轴试验系统, 并初步开展了不同温度下淤泥质软黏土的动力特性试验。叶俊能等^[10]基于该温控动三轴试验系统, 开展了淤泥质粉质黏土的动力特性试验研究, 探讨了不同温度作用和应力特征(频率、动应力幅值)对土体的累积塑性应变、动弹性模量、阻尼比和孔压等的影响。

本文在温控动三轴试验系统上开展不同温度下饱和软黏土不排水动力特性试验, 分析温度对土的塑性累积变形、孔压、阻尼比及动弹性模量的影响, 并建立考虑温度、初始静偏应力、围压等因素的土体应变模型, 以预测同一工况下任意温度对土的累积塑性应变的影响。

1 土的温控动三轴试验

1.1 试验土样

利用温控动三轴试验系统^[9], 对宁波软黏土进行固结不排水动三轴试验。试验土样取自镇海区轨道交通2号线沿线②₂层淤泥质黏土, 土样基本物理力学指标: $w=40.3\%$, $w_L=40.9\%$, $w_p=21.8\%$, $I_p=19.1$, $G_s=2.74$, $e=1.28$, $c=13 \text{ kPa}$, $\varphi=9.4^\circ$, $\lambda=0.184$, $k=0.035$ 。其中 λ , k 分别 $e-\ln p$ 空间中正常固结线和回弹线斜率。

1.2 试验方案

按《土工试验规程》制样, 试样高80 mm, 直径39.1 mm, 采用真空抽气加水饱和, 使饱和度 $S>95\%$, 装样后按照表1的试验方案(轴压、围压)进行排水固结, 同时设定目标温度进行温控加热, 加温速率为3 h/10℃, 试样达到目标温度后恒温24 h, 待试样固结度达到95%以上时, 完成固结, 再进行不排水振动试验, 振动波形为正弦波, 振动次数10000次, 振动频率1 Hz。文献[9, 10]中已初步研究了不同动应力、围压下黏土、粉质黏土动力特性的温度效应, 本文重

点研究不同温度作用下淤泥质黏土的动力特性及应变模型, 故试验方案综合考虑温度、动应力、围压及初始静偏应力的影响, 见表1。

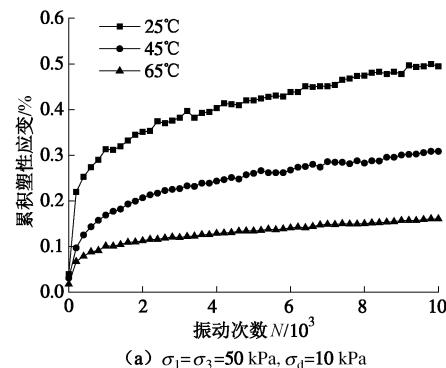
表1 试验方案

Table 1 Test plans

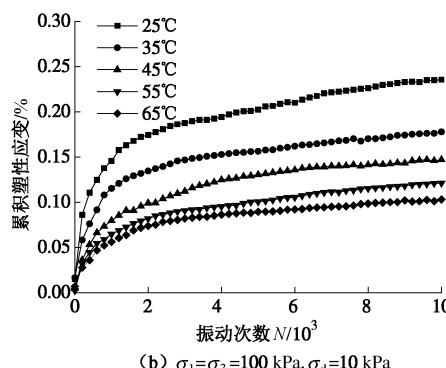
序号	σ_1/kPa	σ_3/kPa	σ_d/kPa	q_s/kPa	$T/(\text{℃})$
①	50	50	10	0	25, 45, 65
②	100	100	10	0	25, 35, 45, 55, 65
③	100	100	20	0	25, 35, 45, 55, 65
④	100	70	20	30	25, 45, 65
⑤	150	105	30	45	25, 45, 65

1.3 试验结果

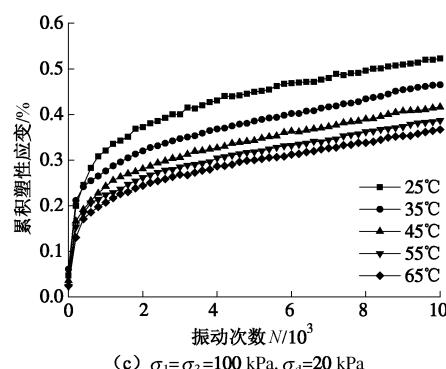
根据表1的试验方案进行温控动三轴试验, 得到淤泥质黏土试样在不同温度荷载作用下的累积塑性应变、孔压、阻尼比、动弹性模量与振动次数的系曲线如图1~5所示。



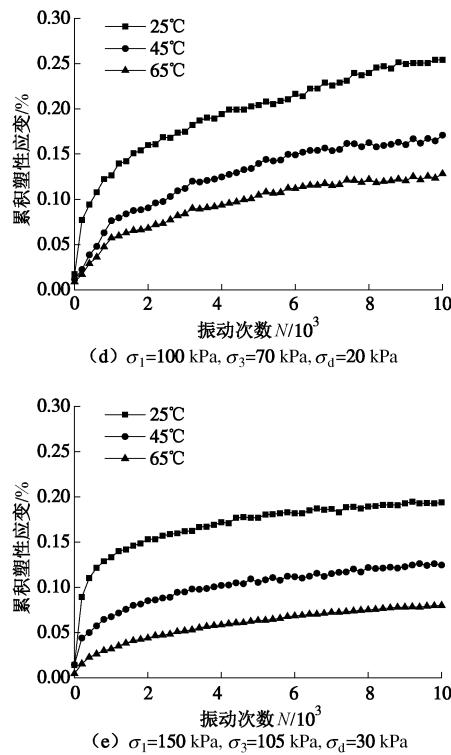
(a) $\sigma_1=\sigma_3=50 \text{ kPa}, \sigma_d=10 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_1=\sigma_3=100 \text{ kPa}, \sigma_d=10 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_1=\sigma_3=100 \text{ kPa}, \sigma_d=20 \text{ kPa}$

图1 不同温度下淤泥质黏土的 ε_p -N 曲线Fig. 1 ε_p -N curves of silty clay under different temperatures

由图1可以看出,在不同围压和动应力下,土的累积塑性应变随围压的升高而减小,随动应力的增大而增大;在振动初期,试样的累积塑性应变增加较快,随着振动次数的增加,土体压密,应变增量减小,累积塑性应变增加速度变缓,并最终趋于稳定。在围压、动应力及振动次数相同条件下,试样温度越高,累积塑性应变越小。

为了阐明温度对累积塑性应变的影响,以图1(a)、(b)为例说明。图1(a)为3个试样分别在25℃, 45℃, 65℃时的累积塑性应变,25℃工况的应变稳定时间较长,45℃次之,65℃稳定时间最短;在振动次数为10000次时,25℃时应变约为0.5%,而65℃时的应变约为0.15%,土体呈现热硬化特征。图1(b)为目标温度从25℃到65℃下5个试样的累积塑性应变结果,各试样温度增量均为10℃。在相同振次下,25℃与35℃两试样的应变差值较35℃与45℃试样的应变差值大,55℃与65℃两试样应变差值最小,振动次数为10000次时,各温度之间的应变差值分别为0.06%,0.027%,0.023%,0.021%,可见温度升高后,土体发生热硬化。

在 $k_0=0.7$ 固结条件下,图1(d)、(e)分别为围压 $\sigma_3=70$ 和105kPa, $\sigma_d=20$ 和30kPa, 25℃, 45℃, 65℃下土的累积塑性应变,可以看出 k_0 固结条件下的影响规律同上。

为了更直观地反映温度对累积塑性应变的影响,

以方案②中累积塑性应变为纵坐标, T/T_0 ($T_0=25^\circ\text{C}$)为横坐标,给出累积塑性应变-温度关系,如图2所示,可以看出:随着振次的增加,应变曲线变密,应变曲线斜率也增大,而相邻两振次间的应变增量减小,这说明了土体出现了振动挤密效应。在振动初期($N=100$ 次),温度对累积塑性应变影响较小;随着振动次数的增加,温度的影响增大, $T/T_0=1.0$ (25℃)~2.6(65℃)间的应变差也随之增大。在相同振次下,温度越高,累积塑性应变越小。

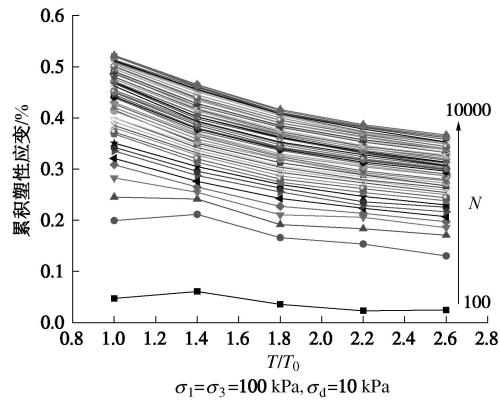
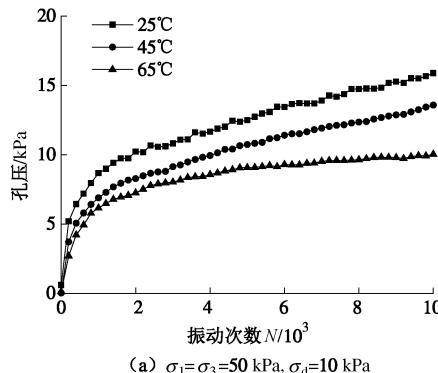
图2 不同温度下淤泥质黏土的 ε_p - T/T_0 曲线Fig. 2 ε_p - T/T_0 curves of silty clay under different temperatures

图3为不同温度下淤泥质黏土孔压与振动次数的关系曲线。在不排水条件下,孔压随围压50→105kPa、动应力10→30kPa、振动次数0→10000的增加而增大;相同围压、动应力和振动次数条件下,试样温度越高,孔压越小,且孔压差值变化规律与塑性累积应变类似。实际上,土样在加热固结过程中,由于孔隙水热膨胀系数大于土颗粒热膨胀系数,导致孔隙水压力随着温度的升高而增大^[11],但另一方面,孔隙水的粘滞系数随着温度升高而减小,使得土样的渗透性改善,排水固结过程中的排水速率增大、排水量增加,试样含水量减少,孔隙比减小。由于土样中含水量减少,使得不排水振动试验中残余孔压的上升幅值随着土样温度的升高而减小。以图3(a)为例,在 $\sigma_3=50$ kPa, $\sigma_d=10$ kPa, 振动10000次时,25℃条件下的孔压约为15.5kPa, 45℃时约13.5kPa, 65℃时约10.0kPa。



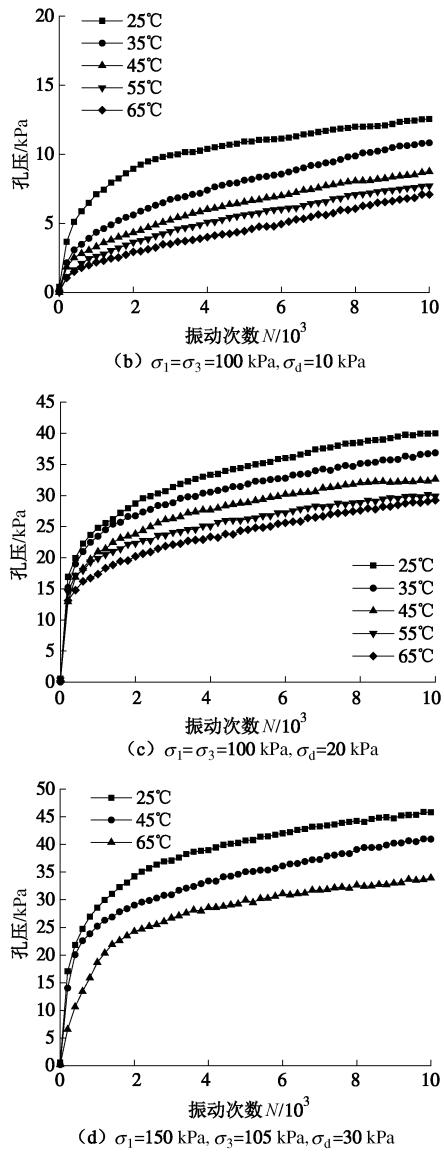


图3 不同温度下淤泥质黏土的孔压与振动次数曲线

Fig. 3 Variation of pore pressure with number of cycles of silty clay under different temperatures

图4为不同温度下试样阻尼比与振动次数的关系。随着振动次数的增加, 各工况下试样的阻尼比均有一定的增大(图4(a)~(d)); 随着围压的增大(图4(a)、(b)), 25°C 条件下的阻尼比由 $\sigma_3=50 \text{ kPa}$ 时的0.128减小到 100 kPa 时的0.94; 随着动应力 σ_d 的增大, 各试验工况下的阻尼也随之增大(图4(b)~(d))。由于温度升高, 试样累计塑性应变减小, 孔隙比减小, 残余孔压也减小, 土颗粒之间变紧凑, 试样越来越密实, 相应的阻尼比也有减小的趋势。在相同振次下, 温度越高, 阻尼比越小。

图5为不同温度下淤泥质黏土的动弹性模量与振动次数的关系。从图5(a)~(d)可以看出, 随着振动次数的增加, 土体累积塑性应变增大(图1), 使得计算得到的动弹性模量减小。围压、动应力、温度对动弹性模量的影响规律也与塑性累积应变、孔压、

阻尼比相反。

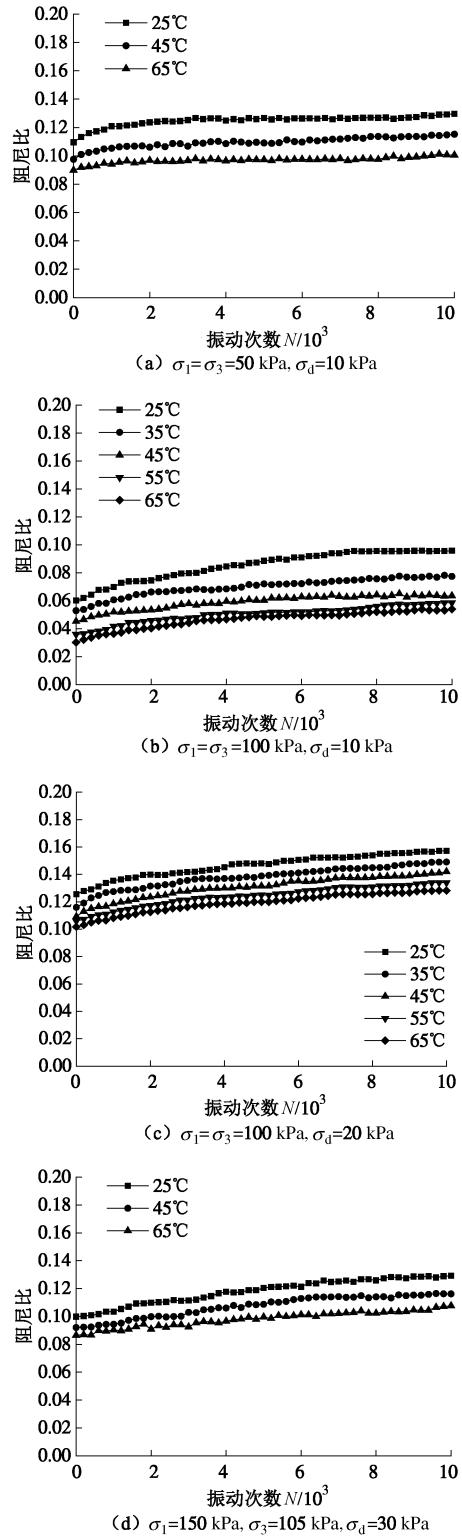


图4 不同温度下淤泥质黏土的阻尼比与振动次数曲线

Fig. 4 Variation of damping ratio with number of cycles of silty clay under different temperatures

在相同振次下, 试样温度越高, 累积塑性应变越小, 使得由动应力-动应变关系曲线计算获得的动弹性模量呈增大趋势。以 $\sigma_3=50 \text{ kPa}$, $\sigma_d=10 \text{ kPa}$ 为例, 动弹性模量由 25°C 时的10 MPa(10000次)增大到

65℃时的15 MPa,且温度越高,动弹性模量衰减稳定速度越快。

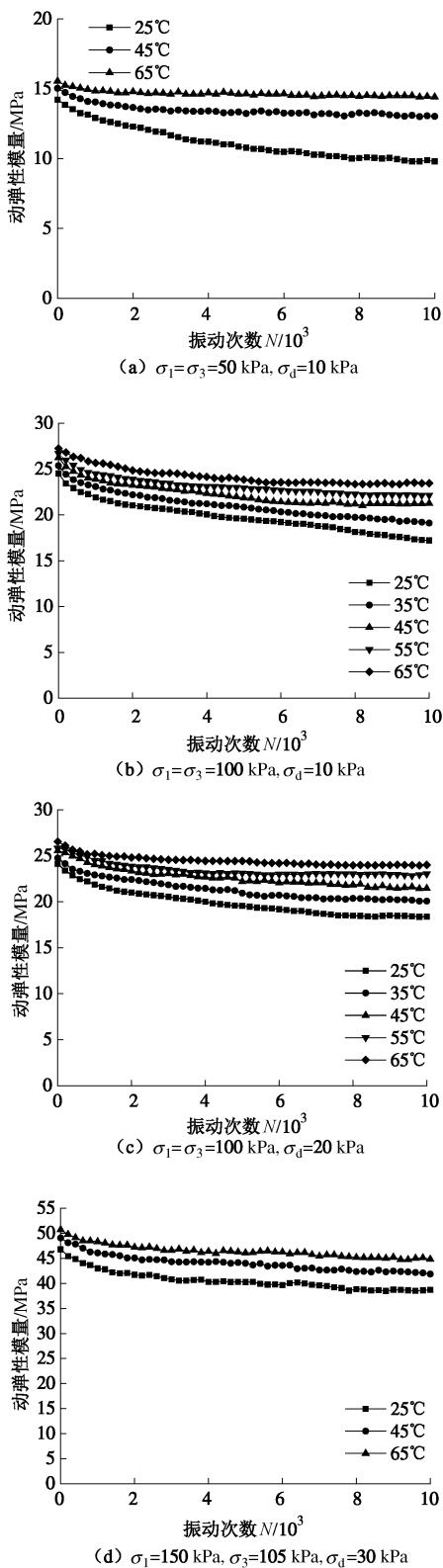


图5 不同温度下淤泥质黏土的动弹性模量与振动次数曲线

Fig. 5 Variation of dynamic elastic modulus with number of curves

of silty clay under different temperatures

综上,在相同的振动次数下,随着试样温度的升

高,累积塑性应变、孔压、阻尼比减小,动弹性模量则增大,土体呈热硬化现象,这是由于温度升高使得土的渗透系数增大,试样固结排水量增多,孔隙比减小,使得一些矿物和土中原存的水发生物理化学反应生成难溶沉淀或结晶物,吸附于土孔隙中或晶格体上,从而导致胶结作用加强,土体应变减小,不排水振动残余孔压的上升幅值减小,土体的动弹性模量和强度增大^[9-10]。

2 考虑温度影响的应变模型

在室内试验基础上,国内外学者利用试验数据建立了诸多理论模型或经验公式,例如Monismith等^[12]提出的指数模型:

$$\varepsilon = AN^b \quad . \quad (1)$$

该模型主要考虑了应变与循环次数的指数关系,计算简单,但参数A包含了诸多因素,物理意义不明确,很难确定。

Li等^[13]和Chai等^[14]考虑初始静/动偏应力、静破坏偏应力的影响,将指数模型进一步扩展:

$$\varepsilon = a \left(\frac{q_d}{q_f} \right)^m \left(1 + \frac{q_s}{q_f} \right)^n N^b \quad , \quad (2)$$

式中, q_d 为动应力, q_s 为初始静偏应力, q_f 为静破坏偏应力,该模型的参数值没有规律性。

黄茂松等^[15-16]基于临界状态理论和室内试验,引入相对偏应力水平参数 D^* ,提出在等向固结下土体的变形计算模型,其中相对偏应力水平 D^* 的概念如下:

$$D^* = \frac{d_p - d_s}{d_{\max} - d_s} \quad , \quad (3)$$

式中, $d_p = \frac{q_d + q_s}{q_{ult}}$, $d_s = \frac{q_s}{q_{ult}}$, $d_{\max} = 1$, q_{ult} 为不排水极限强度,其表达式为

$$q_{ult} = M p_c \left(\frac{M + \alpha}{2M} \right)^{(\lambda - \kappa)/\lambda} \quad , \quad (4)$$

式中, $p_c = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ 为平均有效围压, M 为临界状态线斜率, $\alpha = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0}$ 为各项异性张量 α_{ij} 的第二不变量,由初始固结应力状态决定, K_0 为偏压固结系数, λ , k 分别 $e - \ln p$ 空间中正常固结线和回弹线斜率。

刘明等^[17]在文献[15, 16]基础上,建立了 K_0 固结条件下软黏土的不排水累积应变计算公式如下:

$$\varepsilon = a(D^*)^m N^b \quad , \quad (5)$$

式中, a , m , b 为模型参数。

在上述应变模型基础上,考虑温度效应、动应力、围压、超固结比(试验考虑的是正常固结土,故 $c=1$)、

初始静偏应力等因素的影响, 本文建立考虑温度影响的应变模型如下:

$$\varepsilon = a(D^*)^m (N/N_{\max})^b \text{OCR}^c , \quad (6)$$

式中, OCR 为超固结比, D^* 根据式(3)计算, 其中 q_{ult} 定义为

$$q_{ult} = \bar{M} (p_{cT_0} + \Delta p_{cT}) \left(\frac{\bar{M} + \alpha}{2\bar{M}} \right)^{(\lambda - \kappa)/\lambda} , \quad (7)$$

其中, \bar{M} 为不同温度下的临界状态线斜率, 可由温控静三轴试验确定^[18], Δp_{cT} 为不同温度下土的先期固结压力增量, 它与温度的关系如下^[19]:

$$\Delta p_{cT} = -\gamma p_{cT_0} \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) , \quad (8)$$

其中, γ 为温度影响参数, Laloui 等^[19]建议取 $\gamma = 0.3 \sim 0.4$, 本文取 0.3, p_{cT_0} 为初始温度 T_0 时土体的固结压力, T_0 为初始温度 ($T_0 = 25^\circ\text{C}$), T 为试验目标温度。

利用温控静三轴试验得出不同温度下土的临界状态线斜率 \bar{M} 值: T 为 $25^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}, 55^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}$ 时, M 为 1.03, 1.129, 1.206, 1.265, 1.315, 以及土的温控动三轴试验数据, 由式(6)~(8)计算获得各工况下的应变模型参数, 如表 2 所示。对这些参数进行回归分析, 结果如图 6 所示, 从而建立了各工况条件下模型参数与温度之间的关系。

表 2 应变模型的参数

Table 2 Parameters of strain model

序号	T/T_0	q_{ult}	D^*	a	m	b
①	1.0	29.379	0.3404	0.0320	1.7400	0.2190
	1.8	31.765	0.3148	0.0240	1.8360	0.2542
	2.6	32.839	0.3045	0.0178	1.9820	0.2794
②	1.0	58.758	0.1702	0.0910	2.0490	0.2180
	1.4	61.582	0.1624	0.0836	2.0958	0.2300
	1.8	63.530	0.1574	0.0742	2.1026	0.2532
③	2.2	64.751	0.1544	0.0638	2.1194	0.2708
	2.6	65.678	0.1523	0.0574	2.1262	0.2884
	1.0	58.758	0.3404	0.0340	1.7450	0.2170
④	1.4	61.582	0.3248	0.0332	1.7594	0.2280
	1.8	63.530	0.3148	0.0324	1.7938	0.2306
	2.2	64.751	0.3089	0.0319	1.8082	0.2474
⑤	2.6	65.678	0.3045	0.0310	1.8226	0.2542
	1.0	69.015	0.5126	0.0074	1.6100	0.3100
	1.8	71.271	0.4846	0.0062	1.7240	0.3528
	2.6	71.988	0.4763	0.0048	1.7738	0.3856
	1.0	103.52	0.5126	0.0055	1.5250	0.1760
	1.8	106.91	0.4846	0.0041	1.5466	0.2696
	2.6	107.98	0.4763	0.0026	1.5682	0.3632

由表 2 和图 6 可以看出, 模型参数 a, m, b 与温度

基本呈线性关系, 在不同试验工况下, 模型参数 a, m, b 斜率不同, 但其变化趋势一致。模型参数 a 值小于 0.1, 且随着温度的升高而减小; 模型参数 m 值范围在 1.5~2.2 之间, 模型参数 b 值范围在 0.17~0.4 之间, 均随着温度的升高而增大。

另外, 在应变模型中, D^* 和 N/N_{\max} 的值均小于 1, 故参数 a 随温度升高而减小, 参数 m 和 b 增大的变化趋势也验证了土体的累积塑性应变随着温度的升高而减小的规律, 即土体呈现热硬化趋势。

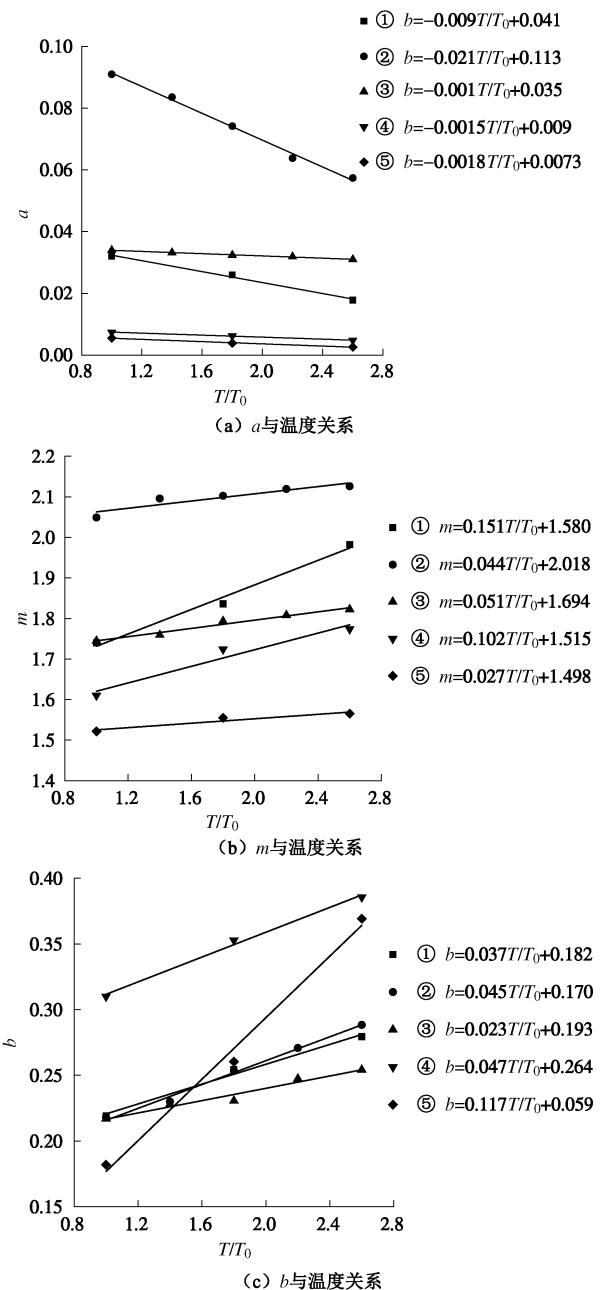


图 6 参数 a, m, b 与温度的关系图

Fig. 6 Relationship between parameters a, m, b and temperature

在建立了考虑温度效应、动应力、围压、超固结比、初始静偏应力等影响的应变模型后, 利用试验数据获得模型相关参数, 需对该模型可靠性进行验证,

为此将图1中5种试验工况下的累积塑性应变试验结果与对应工况下采用模型计算得到的结果进行比较,如图7所示,结果表明,试验结果与模型计算相吻合,表明所建立的应变模型能较好地描述土体各工况下的温度效应。

由于图6所表现出来的应变模型参数 a , m , b 与温度呈线性关系,故可以利用 a , m , b 与 T/T_0 关系式来预测同一试验工况下不同温度时的累积塑性应变,结果如图7所示,其中图7(a)、(d)、(e)中35℃和55℃时累积塑性应变即为利用模型获得的预测结果。

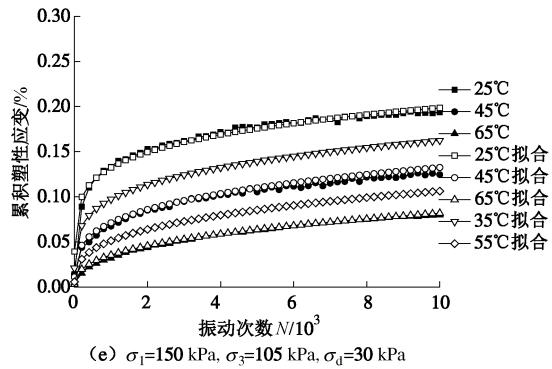
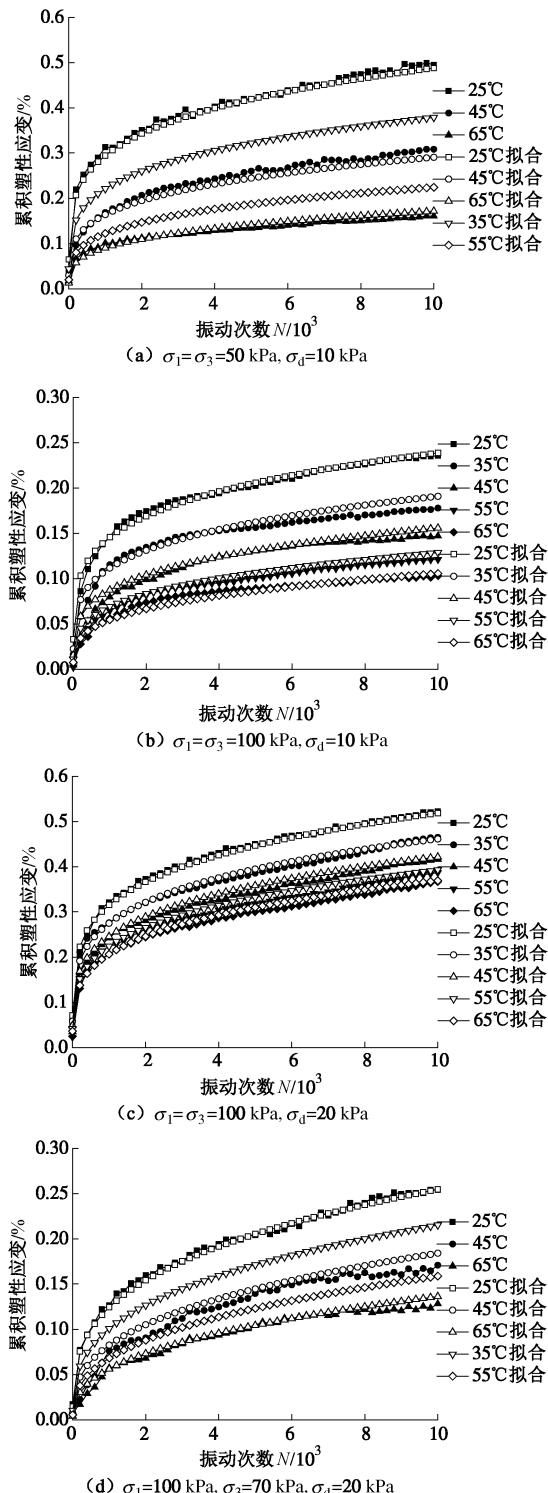


图7 淤泥质黏土的 ϵ_p - N 拟合与试验曲线对比

Fig. 7 Comparison between fitting curves of ϵ_p - N and test curves of silty clay

3 结 论

利用温控动三轴试验系统,对宁波淤泥质黏土开展了动力特性试验,建立了考虑温度、动应力、围压、超固结比、初始静偏应力等因素影响的应变模型,主要结论如下:

- (1) 在相同振动次数下,土样温度越高,累积塑性应变、孔压、阻尼比越小,动弹性模量则越大,土体表现出热硬化现象,且土体在硬化过程中的累积塑性应变、孔压、阻尼比和动弹性模量变化幅度减小。
- (2) 考虑温度、围压、超固结比、初始静偏应力等因素影响建立的应变模型能较好地描述土的应变累积变形特性。

(3) 各工况下的模型参数与温度呈线性关系,其中 a 随着温度升高而减小, m 和 b 随着温度升高而增大,其变化规律验证了土的累积塑性应变随着温度升高而减小的规律,即土体呈现热硬化趋势。

(4) 利用模型参数与温度的关系,可以较好地由应变模型预测同一工况下不同温度时的累积塑性应变。

参考文献:

- [1] HOUSTON S L, HOUSTON W L, WILLIAMS N D. Thermo-Mechanical behaviour of seafloor sediments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(11): 1249 – 1263.
- [2] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay[J]. Soils and Foundations, 1995, 35(1): 147 – 162.
- [3] MITCHEL J K. Shearing resistance of soils as a rate process[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1964, 90(1): 231 – 251.
- [4] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZA A, et al. Thermomechanical model for saturated clays[J].

- Géotechnique, 2009, **59**(3): 273 – 278.
- [5] LALOUI L, CEKEREVAC C. Non-isothermal plasticity model for cyclic behaviour of soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, **32**(5): 437 – 460.
- [6] 焦贵德, 赵淑萍, 马巍, 等. 循环荷载下冻土的滞回圈演化规律[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1343 – 1349. (JIAO Gui-de, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Evolution laws of hysteresis loops of frozen soil under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1343 – 1349. (in Chinese))
- [7] 焦贵德, 赵淑萍, 马巍, 等. 循环荷载下高温冻土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1553 – 1558. (JIAO Gui-de, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Deformation and strength of warm frozen soils under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1553 – 1558. (in Chinese))
- [8] 罗飞, 赵淑萍, 马巍, 等. 分级循环荷载作用下冻土动应变幅值的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 123 – 129. (LUO Fei, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Experimental study of dynamic strain amplitude of frozen soil under stepped axial cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 123 – 129. (in Chinese))
- [9] 刘干斌, 范思婷, 叶俊能, 等. 温控动三轴试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(7): 1345 – 1352. (LIU Gan-bin, FAN Si-ting, YE Jun-neng, et al. Application and development of a temperature-controlled dynamic triaxial test system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(7): 1345 – 1352. (in Chinese))
- [10] 叶俊能, 范思婷, 刘干斌, 等. 淤泥质粉质黏土温控动三轴试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, **36**(4): 1 – 7. (YE Jun-neng, FAN Si-ting, LIU Gan-bin, et al. Temperature-controlled dynamic experimental study of mucky silty clay[J]. China Railway Science, 2015, **36**(4): 1 – 7. (in Chinese))
- [11] 白冰, 张鹏远, 贾丁云, 等. 不同幅值温度荷载下一种饱和红黏土的固结效应[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 1972 – 1978. (BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, JIA Ding-yun, et al. Consolidation effects of a saturated red clay subjected to temperature loading with different amplitudes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 1972 – 1978. (in Chinese))
- [12] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subsoil due to repeated loading[J]. Transport Research Record, 1975, **537**: 1 – 17.
- [13] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(12): 1006 – 1013.
- [14] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, **128**(11): 907 – 916.
- [15] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 891 – 895. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 891 – 895. (in Chinese))
- [16] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 325 – 311. (HUANG Mao-song, YAO Zhao-ming. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 325 – 311. (in Chinese))
- [17] 刘明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(11): 1703 – 1709. (LIU Ming, HUANG Mao-song, LIU Yan-hua. Long-term settlement of tunnels across a river induced by vehicle operation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(11): 1703 – 1709. (in Chinese))
- [18] 祁良, 郑荣跃, 陶海冰, 等. 考虑温度影响的宁波软土临界状态参数研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(5): 79 – 83. (QI Liang, ZHENG Rong-yue, TAO Hai-bing, et al. Study on critical state parameter of Ningbo soft clay considering the effect of temperature[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2015, **42**(5): 79 – 83. (in Chinese))
- [19] LALOUI L, CEKEREVAC C. Thermo-plasticity of clays: an isotropic yield mechanism[J]. Comput Geotech, 2003, **30**(8): 649 – 660.