

DOI: 10.11779/CJGE201810021

上海软土小应变三轴试验及本构模拟

杨同帅¹, 叶冠林¹, 顾琳琳²

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 软土地区新建地下工程为了减少对周边的影响, 周边土体的变形通常要求控制在小应变范围内(0.001%~0.1%)。近年来随着环境要求的不断提高, 软土在小应变范围内的力学特性日益受到关注。目前国内在三轴试验中测量软土小应变力学特性的研究相对较少, 也缺乏相应的试验数据。利用安装有 LVDT 局部位移传感器的三轴仪, 对上海②~⑥层软土进行了 K_0 固结不排水剪切试验, 成功获得了上海软土从 0.001% 小应变到 20% 大应变范围内的剪切模量变化规律。通过分别用初始剪切模量和有效平均主应力来对剪切模量进行归一化处理, 揭示了上海软土的非线性特征、土体剪切模量的衰减规律等。考虑土体应力状态、孔隙比和超固结比的经验公式能够合理地描述上海软土层初始剪切模量; 经典的骨干曲线模型能较好地拟合各土层的剪切模量衰减规律。

关键词: 小应变; 软土; 剪切模量; 三轴试验; 本构模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1930-06

作者简介: 杨同帅(1992-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事软黏土力学特性和隧道工程研究。E-mail: yangts@sjtu.edu.cn。

Small-strain triaxial tests and constitutive modeling of Shanghai soft clays

YANG Tong-shuai¹, YE Guan-lin¹, GU Lin-lin²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: In order to reduce the influence of the existing buildings in the surrounding area, the surrounding soil of the new project usually requires the control of the small strain state (0.001%~0.1%). In recent years, the construction scale of underground projects has been continuously expanded, and the mechanical properties of soft clay in the small strain range have received increasing attention. At present, the study on the small-strain mechanical properties of soft soils in triaxial tests is relatively few and lack of the relevant test data. A small strain is developed based on an the LVDT sensors with high-accuracy triaxial apparatus, and K_0 consolidation undrained shear tests on layer ②~⑥ soils are performed of Shanghai soft using the triaxial apparatus. The change of modulus of Shanghai soft soils in the small strain range of 0.001%~20% is obtained. The shear modulus is normalized by using the initial shear modulus and effective average principal stress, so as to reveal the nonlinear characteristics of Shanghai soft soils as well as the shear stiffness attenuation characteristics with strain, etc. The empirical formula considering stress state, pore ratio and overconsolidation ratio of soils can reasonably describe the initial shear modulus of Shanghai soft soils. The classical model for backbone curve can better fit the attenuation rules of shear modulus of each soil layer.

Key words: small strain; soft clay; shear modulus; triaxial test; constitutive model

0 引言

越来越多的地下工程项目位于建筑密集的城市中心区域, 控制工程建设产生的土体变形, 从而保证邻近建筑及市政设施的安全变得至关重要。Atkinson 等^[1]将土体应变划分为非常小应变(小于 0.001%)、小应变(0.001%~1%)和大应变(大于 1%) 3 部分(如图 1 所示)。对于上海软土小应变范围内土体剪切模量的变化规律, 缺乏相应的试验数据, 参数取值只能

凭借经验。因此获得土体小应变刚度曲线, 对于理解土体在小应变下的变形特性、确定小应变土体本构模型的计算参数, 以及分析基础、隧道和深基坑等地下工程周围土体变形具有重要的意义。

在土体小应变三轴试验方面, 国内外已有一些学者针对不同地区的不同类型的土体进行了研究^[2-6]。对

表 1 上海各层土基本物理力学特性

Table 1 Basic physical and mechanical properties of soils in Shanghai

地层编号及名称	②层粉质黏土	③层淤泥质粉质黏土	④层淤泥质黏土	⑤1-1 层粉质黏土	⑤1-2 层灰色粉质黏土	⑥层粉质黏土
土样深度/m	2.7	5	18	32.00	36	39
天然含水率 $w/\%$	34.7	40.6	44.5	29.20	31.4	21.4
初始孔隙比 e_0	0.88	1.51	1.48	0.97	0.93	0.67
超固结比 OCR	8.16	1.26	1.18	1.24	1.36	2.22
液限 $w_L/\%$	43.9	41.3	41.9	30.50	34.4	32.4
塑限 $w_p/\%$	25.9	24.9	24.7	19.00	21.9	18.4

于上海黏土, 江娟^[7]、汪中卫^[8]进行了初步研究。近两年, 梁发云等^[9]利用共振柱、李青等^[10]利用弯曲元对上海软土小应变特性进行研究, 但是弯曲元和共振柱只能获得土体的初始剪切模量, 无法获得整个剪切进行的过程中, 试验土体从极小应变状态到小应变状态最后到大应变状态下的剪切模量的变化规律。

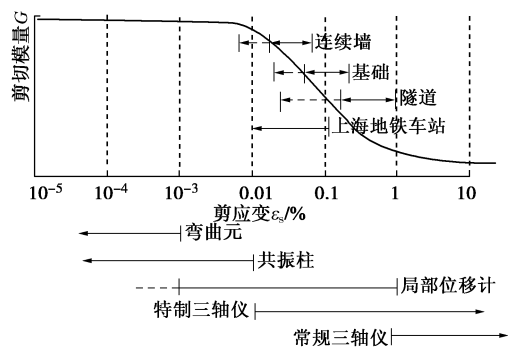


图 1 各种岩土工程条件及不同测量仪器土体应变值范围

Fig. 1 Strain limits for reliable measurement of soil stiffness

本文为了获得上海浅层②~⑥层软土小应变范围内的力学特性, 利用安装有 LVDT 局部位移计的三轴仪进行了一系列 K_0 固结不排水剪切试验, 由于 LVDT 的高精度以及足够的线性段长度, 可以在剪切试验中获得土体在小应变状态到大应变状态的剪切模量的变化情况, 得到上海软土的小应变范围内剪切模量的变化规律。找到合适的本构关系式计算出上海软土的初始剪切模量, 并应用经典的骨干曲线模型对试验结果进行拟合, 为以后上海软土小应变范围的剪切模量变化规律的研究以及确定小应变土体本构模型的计算参数提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

本次试验所用土样取自上海市杨浦区某地, 该场地的土层基本上是比较典型的上海土层。②层粉质黏土(土层范围 2.5~3.8 m)、③层淤泥质粉质黏土(土层

范围 3.8~9.9 m)、④层淤泥质黏土(土层范围 9.9~19.8 m)、⑤1-1 层粉质黏土(土层范围 19.8~34.0 m)、⑤1-2 层灰色粉质黏土(土层范围 34.0~38.9 m)、⑥层粉质黏土, 取土深度为 1.8~40.5 m, 采用薄壁取土器。表 1 为各层土的基本物理力学特性。

1.2 试验仪器

仪器采用安装有 LVDT 局部位移传感器的三轴仪, LVDT 传感器安装在试样轴向, 可直接测出试样轴向位移, 进而得到试样变形过程中的变形模量。LVDT 局部位移传感器有几十毫米的线性工作段, 测量分辨率达到 0.3 μm , 满足试验要求, 极大的提高了三轴试验应变测量精度。小应变三轴仪的详细介绍见文献[11]。

1.3 局部位移安装方法

试验采用高 80 mm, 直径为 39.1 mm 的圆柱形试样。将 LVDT 局部位移传感器安装在试样中间, 根据前人的研究经验, 局部位移计测量高度一般取试样高度的 2/3, 由于本文使用的试样尺寸较小, 为了减少端部影响, 经多次实验后确定测量距离为试样高度的 1/2, 测量间距为 40 mm, 如图 2 所示。

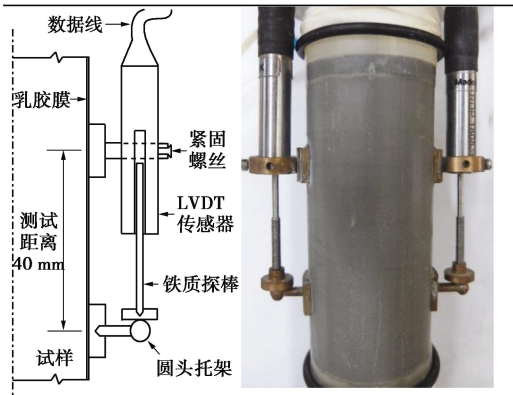


图 2 LVDT 安装示意图

Fig. 2 Mounting diagram of LVDT sensors

1.4 试验步骤

试验过程主要包括以下 4 个阶段:

(1) 饱和

饱和方法采用反压饱和, 对于上海软土, 100 kPa 的反压能够保证空隙水压力系数 B 大于 0.95^[12], 所以试样反压取用 100 kPa, 围压 110 kPa 进行饱和。

(2) B 检测

B 检测过程中关闭试样排水阀门, 将围压增加至 200 kPa, 并维持 5 h, 通过检测得到孔压系数 B 值。当 B 值大于等于 0.95 的时候, 认为试样饱和。

(3) 固结

试样饱和之后进行 K_0 固结, 所有土层 K_0 均取值为 0.6。当试样排水速率 $< 5 \text{ mm}^3/\text{min}$, 固结完成。

(4) 剪切

采用位移控制不排水剪切, 围压保持不变, 试验进行的是单调静力加载。为保证剪切过程中孔压在试样中保持均匀分布^[13], 加载速率为 0.0022 mm/min 。

2 试验结果

试验记录试样的轴向应力和对应的轴向位移, 从而可以计算出试样的变形模量, 由变形模量 E 和剪切模量 G 的关系, 可以得到试样的剪切模量 G 。

$$E = \Delta q / \varepsilon_a, \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{1 + \nu}, \quad (2)$$

对于饱和土取泊松比 ν 为 0.5。

由剪应变 γ 和轴向应变 ε_a 和 ε_r 的关系, 以及试验进行的是不排水剪切试验, 体应变 ε_v 为零, 由式(3)~(6)的剪应变 γ 与轴向应变 ε_a 的关系见式(7)。

$$\gamma = \varepsilon_a - \varepsilon_r, \quad (3)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r, \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = 0, \quad (5)$$

$$\varepsilon_r = -0.5\varepsilon_a, \quad (6)$$

$$\gamma = 1.5\varepsilon_a. \quad (7)$$

图 3 为试验得到上海浅层软土的偏应变和轴向应变的关系图, 由于试验进行 K_0 固结不排水剪切, 所以在剪切开始时, 各层土存在初始偏应力, 随着应变的增大, 偏应力逐渐增大, 直到试样剪切破坏后达到最大偏应力。由于第②层土具有较强的超固结性, 所以其偏应力大于第③层土, 而其它土层偏应力的随着土层深度的增加而增加。根据偏应力和应变由式(1)可以得到出变形模量随轴向应变的变化规律, 由式(2)~(7)得到剪切模量随剪应变的变化规律。

图 4 所示为小应变范围内有效偏应力 Δq 与轴向应变的关系图, 从图中可以看出, 在剪切开始阶段到应变到 0.005% 的范围内, 应力应变呈线性关系, 及试样处于弹性阶段, 此时的模量为初始模量模量。

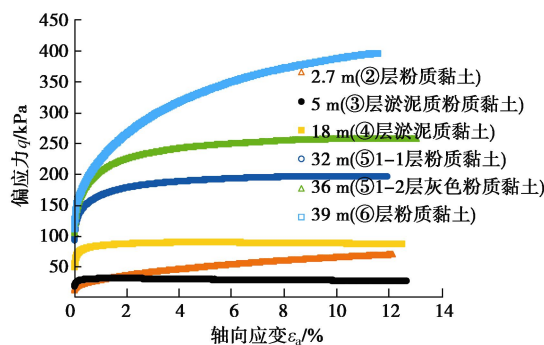


图 3 偏应力与轴向应变关系

Fig. 3 Relationship between deviatoric stress and axial strain

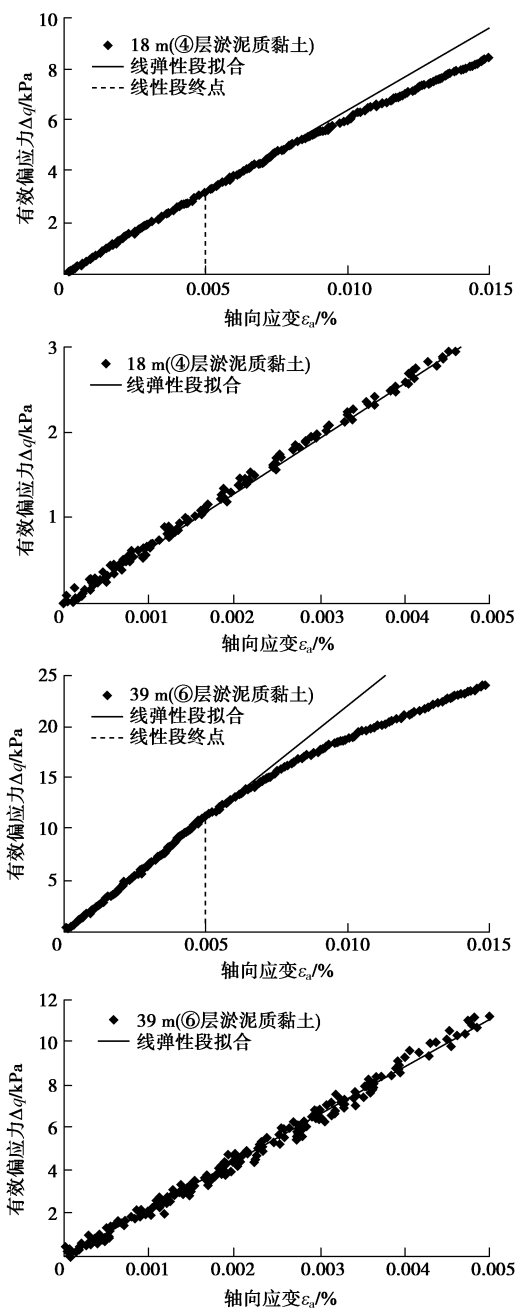


图 4 小应变范围内偏应力与轴向应变关系

Fig. 4 Relationship between deviatoric stress and axial strain within small strain range

图 5 所示是所有土层的剪切模量和剪应变的关系, 从图中我们可以看出, 剪切开始后, 试样的剪应变逐渐增大。剪应变小于 0.005% 时, 剪切模量不变, 即试样的初始剪切模量。当剪应变达到 0.005% 时, 随着应变的不断增加, 剪切模量迅速衰减, 直到剪应变达到 0.5% 左右; 然后试样的剪切模量衰减趋于稳定。

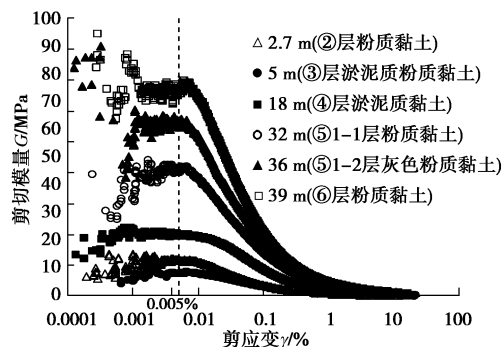


图 5 剪切模量与剪应变关系

Fig. 5 Relationship between shear modulus and shear strain

将各层土的剪切模量对初始剪切模量 G_0 进行归一化处理, 如图 6 所示, 可以看出个土层对初始剪切模量归一化后的初始值相近, 所有不同深度的土样的归一化剪切模量 G/G_0 的变化趋势相近, 这表明土样在剪切过程中, 剪切模量的衰减规律和初始剪切模量 G_0 无关。

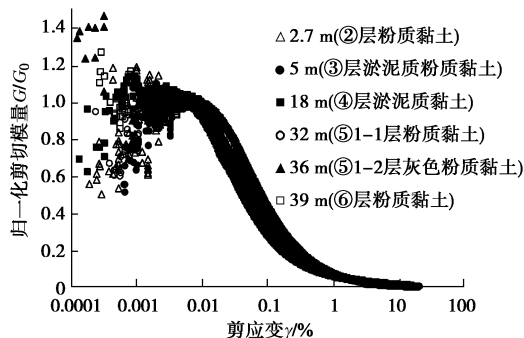


图 6 归一化剪切模量和剪应变的关系

Fig. 6 Relationship between normalized shear modulus and shear strain

土体的剪切模量受土体状态的影响, 例如土体的应力状态和超固结比等, 所以研究土体的剪切模量衰减时, 将剪切模量进行归一化以用以比较不同试验的土样的试验结果。图 7 为用有效平均主应力 p' 值归一化的剪切模量曲线。土体的剪切模量和土体的超固结性有关, 第 2 层土和第 6 层土是超固结性土, 所以其归一化的剪切模量 G/p' 较大, 而其他土层属于正常固结土, 归一化剪切模量 G/p' 随土层的深度递增, 上海第 4 层土为正常固结的高灵敏海相软土, 所以第四层土的归一化割线剪切模量 G/p' 最小。

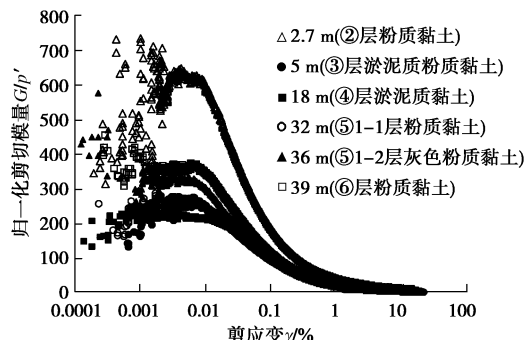


图 7 归一化剪切模量和剪应变的关系

Fig. 7 Relationship between normalized shear modulus and shear strain

3 小应变刚度简易模型

剪切模量是土体应力应变关系中的一个参数, 能直观反映土体的变形特征。初始剪切模量 G_0 在常被用来确定应力应变关系曲线的起点。适用于黏性土的初始剪切模量 G_0 的公式^[15]:

$$G_0 = Af(e)OCR^k(p'/p_{ref})^m \quad (8)$$

式中, e 为 100 kPa 时的土体孔隙比, OCR 为超固结比, p' 为有效平均主应力, $p_{ref}=100$ kPa, A , $f(e)$, k , m 是相关函数和参数。

由 Kim 等^[16]提出的黏性土的经验公式为

$$G_0 = 16 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sqrt{\frac{p'}{p_{ref}}} \quad (9)$$

则得到各层土的剪切模量参数如表 2 所示。

试验测得的初始剪切模量和式 (9) 计算得到的初始剪切模量的关系如图 8 所示。

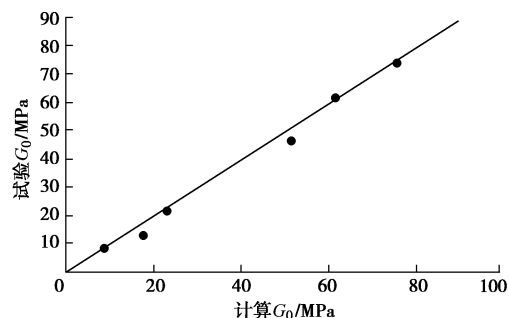


图 8 试验 G_0 和计算 G_0 关系图

Fig. 8 Relationship between test and calculated shear moduli

从表 2 中可以看出, 在②层粉质黏土、③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土和在⑤₁₋₁层粉质黏土中, 式 (9) 得到的初始剪切模量大于试验得到的初始剪切模量, ⑤₁₋₂层灰色粉质黏土和⑥层粉质黏土中, 式 (9) 得到的初始剪切模量和试验得到的初始剪切模量相近。从图 8 中可以看出计算初始剪切模量和试验初始剪切模量在斜率为 1 的直线附近, 所以认为式 (9) 能够得到与试验数据相符的初始割线剪切模量。

根据 Hardin-Drnevich 模型^[17] (简称 HD 模型), 剪切模量, 初始剪切模量以及剪应变的关系为

表 2 上海各层土初始剪切模量及其材料参数

	Table 2 Initial shear moduli of Shanghai clays at different depths					
地层编号及名称	②层粉质黏土	③层淤泥质粉质黏土	④层淤泥质黏土	⑤ ₁₋₁ 层粉质黏土	⑤ ₁₋₂ 层灰色粉质黏土	⑥层粉质黏土
孔隙比 e ($p=100$ kPa)	0.85	1.43	1.20	0.84	0.76	0.65
有效平均主应力 $p'/$ /kPa	21	73	100	171	192	208
G_0 试验值/MPa	13.68	8.32	21.52	46.05	61.21	73.68
G_0 计算值/MPa	17.72	9.05	22.93	51.83	61.34	75.43

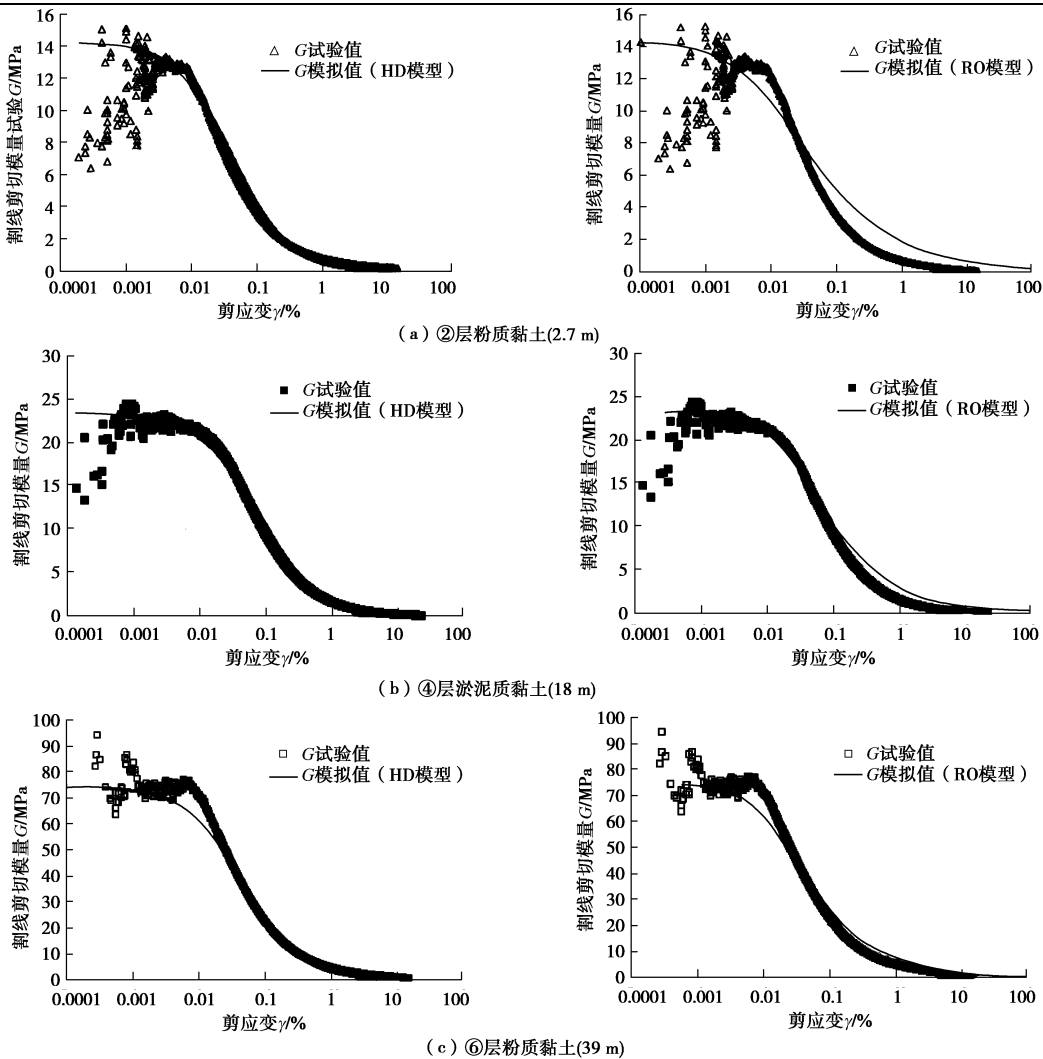


图 9 剪切模量试验值和模拟值对比

Fig. 9 Experimental and calculated values of shear modulus

$$G = \frac{G_0}{1 + |\gamma/\gamma_r|} \quad , \quad (10)$$

式中， γ 为剪应变， γ_r 为对应的的剪应变阈值，本文取 γ_r 为 $G=0.5G_0$ 时对应的剪应变。

根据 Ramberg-Osgood 模型^[18]（简称 RO 模型），剪切模量，初始剪切模量以及剪应力的关系为

$$G = \frac{G_0}{1 + \alpha \left| \tau/\tau_{\max} \right|^\kappa} \quad , \quad (11)$$

式中， α ， κ 为材料常数， τ 为剪应力， τ_{\max} 为最大剪应力。

根据式（10）可得到割线剪切模量和剪应变之间的关系，将模拟值与试验值画出，如图 7 所示。从图

9 的两个骨干曲线模型对试验结果的拟合比较，可以看出 HD 模型更加吻合试验结果，所以对于上海软土的小应变本构模型，建议使用 HD 模型。

4 结 论

（1）利用 LVDT 小应变三轴仪，对上海软土进行 K_0 固结不排水剪切实验，首次获得上海软土在 0.001% 小应变到 20% 大应变范围内的割线剪切模量，以及剪切模量随剪应变的变化规律。0.001%~0.005% 应变范围内，试样处于完全弹性状态，应力与应变呈线性关系，剪切模量不变，为初始剪切模量；0.005%~0.5% 应变范围内剪切模量快速衰减；0.5% 应变之后逐渐稳定。

(2) 用初始割线剪切模量 G_0 对刚度衰减曲线进行归一化处理后可以看出, 上海各层软土具有相似的剪切模量衰减规律。用平均有效主应力值 P' 对剪切刚度衰减曲线进行归一化处理, 各土层割线剪切模量衰减趋势不同, 说明土体刚度与孔隙比、超固结、结构性有关。由于上述三个因素之间存在相关性, 单个参数对于土体刚度的影响还需进一步研究。

(3) 上海软土的初始剪切模量可用经验公式 (8) 进行预估。利用经典的两种骨干曲线模型 (HD 模型和 RO 模型) 对上海软土进行模拟, 与试验值对比后发现 HD 模型更适用于上海软土, 从而可以为上海地区基坑施工和小应变数值计算提供参考。本课题组正在进行基于这些模型的有效应力弹塑性本构模型的开发工作, 今后将陆续发表相关研究成果。

致谢: 本课题组已毕业硕士生陈超斌参与了大量试验工作, 特此感谢。

参考文献:

- [1] ATKINSON J H, SALLFORS G. Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests[C]// Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brasilia, 1991: 915 - 956.
- [2] CLAYTON C R I, HEYMANN G. Stiffness of geomaterials at very small strains[J]. *Géotechnique*, 2001, **51**(3): 245 - 255.
- [3] VIGGIANI G, ATKINSON J H. Stiffness of fine-grained soil at very small strains[J]. *Géotechnique*, 1995, **45**(2): 249 - 265.
- [4] CLAYTON C R I, HIGHT D W, HOPPER R J. Progressive destructuring of Bothkennar clay: implications for sampling and reconsolidation procedures[J]. *Géotechnique*, 1992, **42**(2): 219 - 239.
- [5] NG C W W, PUN W K, PANG R P L. Small strain stiffness of natural granitic saprolite in Hong Kong[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(9): 819 - 833.
- [6] WANG Y, NG C W W. Effects of stress paths on the small-strain stiffness of completely decomposed granite[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, **42**(4): 1200 - 1211.
- [7] 江 娟. 上海软土小应变特性与长期变形规律试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. (JIANG Juan. Test study on the small strain characteristics and long-term deformation of shanghai soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [8] 汪中卫. 上海软土小应变刚度的高精度试验研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2012, **29**(3): 160 - 162. (WANG Zhong-wei. Study on high-precision experiment on small strain rigidity of soft soil in Shanghai[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2012, **29**(3): 160 - 162. (in Chinese))
- [9] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017(2): 269 - 278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on the parameters of HSS model of Shanghai soft soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017(2): 269 - 278. (in Chinese))
- [10] 李 青, 徐中华, 王卫东, 等. 上海典型黏土小应变剪切模量现场和室内试验研究[J]. *岩土力学*, 2016(11): 3263 - 3269. (LI Qing, XU Zhong-hua, WANG Wei-dong, et al. Experimental study on the small strain shear modulus of typical clay in Shanghai[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016(11): 3263 - 3269. (in Chinese))
- [11] 陈超斌, 武朝军, 叶冠林, 等. 小应变三轴试验方法及其在上海软土的初步应用[J]. *岩土工程学报*, 2015(增刊 2): 37 - 40. (CHEN Chao-bin, WU Chao-jun, YE Guan-lin, et al. Small-strain triaxial test method and its preliminary application in Shanghai soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015(S2): 37 - 40. (in Chinese))
- [12] WU Chao-jun, YE Guan-lin, ZHANG Lu-lu, et al. Depositional environment and geotechnical properties of Shanghai clay: a comparison with Ariake and Bangkok clays[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, **74**(3): 717 - 732.
- [13] YE Guan-lin, WU Chao-jun, WANG Jian-feng, et al. Influence and countermeasure of specimen misalignment to small strain behaviour of soft marine clay[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2015, **35**(2): 170 - 175.
- [14] BALDI G, HIGHT D W, THOMAS G E. A reevaluation of conventional triaxial test methods[C]// *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988: 219 - 263.
- [15] CLAYTON C R I, KHATIRUSH S A. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens[J]. *Géotechnique*, 1986, **36**(4): 593 - 597.
- [16] KIM T C, NOVAK M. Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario. *Canadian Geotech. Journal*, 1981, **18**(3): 371 - 389.
- [17] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, **98**(SM60): 603 - 624.
- [18] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curve by three parameters[C]// *Technical Note 902*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D C, 1943.