DOI：10.11779/CJGE2019S2034

土体小应变剪切模量的现场和室内试验对比及工程应用

陈少杰[1, 2]，顾晓强[*1, 2]，高广运[1, 2]

（1. 同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点试验室，上海 200092）

摘 要：土体小应变剪切模量 G_0 在场地地震响应和基坑变形等计算分析中有着重要作用。统计了上海典型土层的室内共振柱试验和现场原位波速测试测得的小应变剪切模量，给出了两种试验方法下的 G_0 的经验公式，并对比分析了室内试验和现场原位测试结果的差异。研究结果表明土体的 G_0 值主要由土体类别、孔隙比和平均有效应力决定，且现场试验的结果远高于室内试验的结果。进一步采用 HS-Small 本构模型对上海新金桥广场基坑工程的开挖变形进行数值模拟，分析了小应变剪切模量对于基坑工程变形的影响。分析结果表明，采用现场原位测试测得的小应变剪切模量进行基坑变形计算的结果与现场变形监测数据更为接近。

关键词：小应变剪切模量；共振柱实验；现场波速测试；HSS 模型；基坑开挖

中图分类号：TU411 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2019)S2－0133－04

作者简介：陈少杰(1995—)，男，河南周口人，硕士研究生，从事土体小应变刚度特性及基坑开挖变形分析等研究。E-mail: ch_shaojie@tongji.edu.cn。

Comparison and application of small strain shear moduli from field and laboratory measurements

CHEN Shao-jie[1, 2], GU Xiao-qiang[1, 2], GAO Guang-yun[1, 2]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The small-strain shear modulus plays an important role in the calculations of ground seismic response and deformation in deep excavations. The values of the small strain shear modulus G_0 of Shanghai soils by field and laboratory tests are investigated and compared, and empirical formulas are proposed to predict the values of G_0. The results indicate that G_0 mainly depends on the soil type, void ratio and mean confining pressure. The values of G_0 from field tests are considerately higher than those from laboratory tests. The correlation between the small strain shear moduli from field and laboratory is also proposed. The numerical analysis is also carried out to calculate the deformation in a deep excavation in Shanghai. The small strain hardening model (HSS) is used, together with the measured small strain shear modulus. The values of G_0 are essential for the deformation of the excavation, and the predicted deformation using the G_0 value from field measurement is more accurate than that using the laboratory data based on the measured deformation in the excavation.

Key words: small strain shear modulus; resonant column test; field shear wave measurement; HSS model; excavation

0 引 言

随着基坑工程的发展，基坑工程周边环境越来越复杂，对开挖引起的变形要求也越来越高。上海市基坑工程规范对一级基坑变形要求极为严格，围护结构最大水平位移和地表最大沉降量控制要求分别为小于 0.18%H 和小于 0.15%H（H 为开挖深度，单位 m）。Atkinson 等[1]将应变分为 3 类：很小的应变，应变范围小于或等于 0.001%；小应变，变化范围为 0.001%～0.1%；大应变，应变范围大于 0.1%。因此，上海深基坑开挖问题大多处于小应变状态，需要考虑小应变状态下土体的模量。研究已表明，土体小应变模量随应变呈现高度的非线性，这就要求变形分析中采用的土体本构模型能反映小应变特性。

Benz[2]在土体硬化 HS（harding soil）模型基础上考虑小应变阶段刚度随应变的非线性变化，提出了小应变硬化 HSS（HS-small）模型。徐中华等[3]对比分析了各种土体本构模型在深基坑工程中的适用性，指出 HSS 模型更适用于深基坑工程的精细分析。王浩然[4]

基金项目：国家自然科学基金项目（51822809，51738010）

收稿日期：2019－04－30

*通讯作者（E-mail：guxiaoqiang@tongji.edu.cn）

通过参数分析表明 HSS 模型中对基坑变形影响最大的参数为 G_0，$\gamma_{0.7}$ 及 m，其余参数影响相对较小。王浩然[4]还收集了上海地区 8 个基坑工程实例，研究发现黏土的 $\gamma_{0.7}$ 取值范围约为（2～3）×10^{-4}，变化范围较小。而 G_0 在不同土体、不同状态下变化较大，因此准确测定 G_0 对于基坑开挖变形预测十分关键。

本文统计分析了采用共振柱法和现场波速试验法测定的上海典型土体的小应变剪切模量 G_0 数据，分别建立了两种试验方法所得到 G_0 值的经验公式，并以室内和现场试验 G_0 参数的比值评价试样的扰动性。进一步采用小应变硬化本构模型通过有限元分析了实际基坑开挖的变形，分析了采用不同试验方法所得到的 G_0 对变形的影响，并和现场变形实测结果进行对比。

1 室内共振柱试验

土的小应变剪切模量主要由土体孔隙比以及平均有效围压有关，通常采用归一化的公式进行量化[5-6]：

$$G_0 = AF(e)\left(\frac{\sigma'}{p_a}\right)^m \quad , \tag{1}$$

式中 A 为跟土颗粒特性和结构等相关的常数；$F(e)$ 为孔隙比 e 函数，反映 e 对 G_0 的影响；p_a 为参考应力；m 为应力指数，反映有效围压 σ' 对 G_0 的影响。

本文统计了在同济大学开展的大量共振柱试验测定的上海典型土体 G_0 数据。图 1～3 分别给出了上海黏土、粉土、砂土孔隙比归一化的 G_0 值与平均有效应力之间的关系。从图 1～3 可知，总体上相同孔隙比和围压下砂土的 G_0 值要大于粉土和黏土。

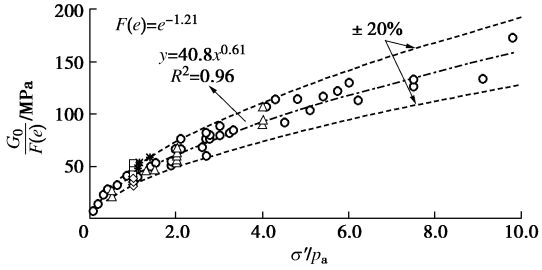


图 1 上海黏性土 G_0 值的室内试验统计结果

Fig. 1 Values of G_0 of Shanghai clay from laboratory tests

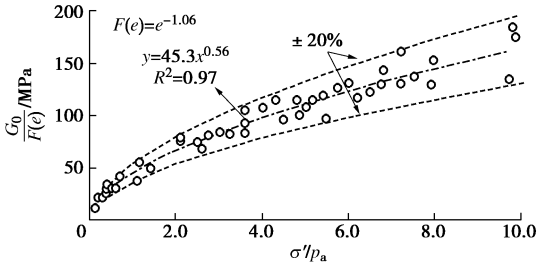


图 2 上海粉土 G_0 值的室内试验统计结果

Fig. 2 Values of G_0 of Shanghai slit from laboratory tests

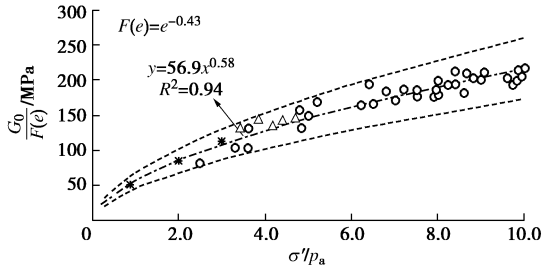


图 3 上海砂土 G_0 值的室内试验统计结果

Fig. 3 Values of G_0 of Shanghai sand from laboratory tests

2 现场波速试验

本文分析了上海中心大厦、苏州河深隧项目和硬 X 射线激光装置项目共计 12 个钻孔的现场波速测试结果。波速测试点的孔隙比根据钻孔资料确定，而平均有效应力根据上覆有效应力和水平有效应力确定，其中水平有效应力按静止土压力系数 0.5 时确定。

图 4～6 分别给出了现场波速试验测定的上海黏土、粉土、砂土孔隙比归一化的 G_0 值与平均有效应力之间的关系，离散性总体较室内试验的大。

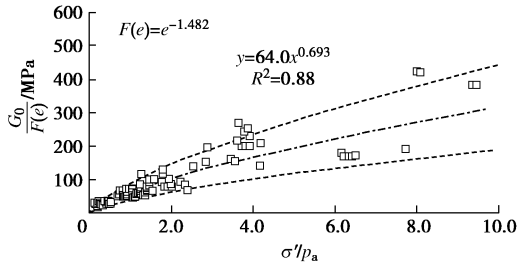


图 4 上海黏性土 G_0 值的现场试验统计结果

Fig. 4 Values of G_0 of Shanghai clay from field tests

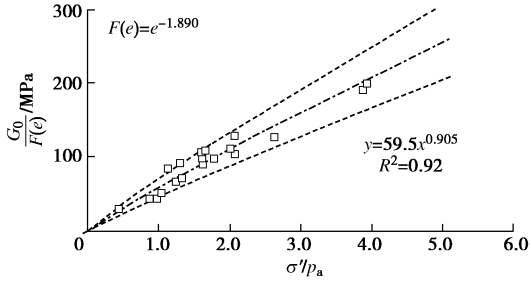


图 5 上海粉土 G_0 值的现场试验统计结果

Fig. 5 Values of G_0 of Shanghai slit from field tests

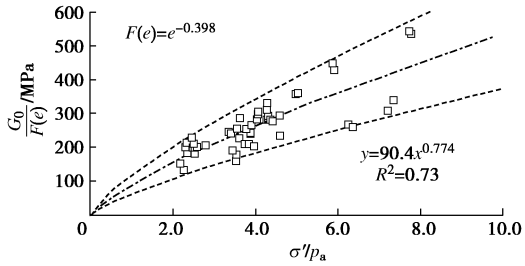
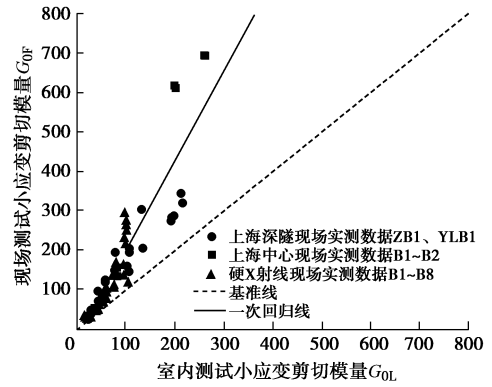


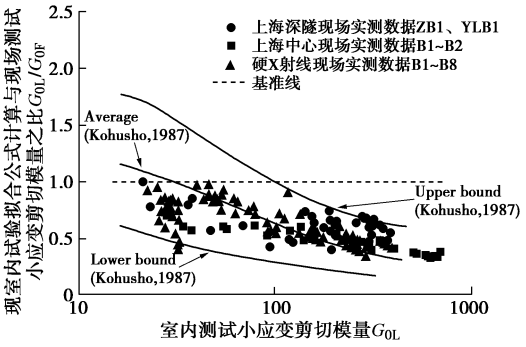
图 6 上海砂土 G_0 值的现场试验统计结果

Fig. 6 Values of G_0 of Shanghai sand from field tests

由于取样过程中由于应力释放和运输储藏等会造成土样受到不同程度的扰动，导致室内试验所得到的 G_0 值则偏小。图 7 所示对比了现场试验测得小应变剪切模量 G_{0F} 和室内试验测得的小应变剪切模量 G_{0L}。由图 7（a）可知，室内试验测得的小应变剪切模量 G_{0L} 约为现场测试测得的 G_{0F} 的 0.32～0.99 倍，平均约为 0.65 倍。为了进一步定量评价扰动，图 7（b）给出了现场试验和室内试验值之比 G_{0L}/G_{0F} 随着 G_{0F} 值的变化。由图可见随着 G_{0F} 的增大而降低，表明现场模量（深度）越大，取样扰动越大。这个现象可解释为深度越大，试样应力释放越严重，土体结构、时间老化效应等损伤越严重，导致 G_0 值的降低。图 7（b）也表明本文结果和 Kokusho[7]研究结果的平均值很一致。因此，以后必须要慎重考虑室内试验与现场试验测定 G_0 的差别。



（a）G_{0F}随G_{0L}的关系



（b）G_{0L}/G_{0F}随G_{0F}的关系

图 7 现场试验 G_{0F} 和室内试验 G_{0L} 的对比

Fig. 7 Comparison of values of G_0 from laboratory and field tests

3　在基坑工程中的应用

3.1　工程概况

上海新金桥广场工程基坑分为东西两区，围护结构采用 SMW 工法桩，即三轴水泥土搅拌桩 Φ850@600，内插 H700×300 的型钢。地表下 1.6 m 处设置一道水平钢管支撑。基坑分两步开挖，第一步和第二步分别开挖至地表以下 1.65 m 和 6.9 m。

3.2　计算参数

土体的 HS 刚度模量取值参考[8-10]对 HS 刚度模量比例关系的研究，根据地勘报告所给出的 $E_{s1\text{-}2}$ 取值。土体的小应变剪切模量取值根据本文统计所得到的室内实验经验公式和现场原位测试经验公式计算。模型的具体参数见表 1。

表 1 HSS 模型参数取值

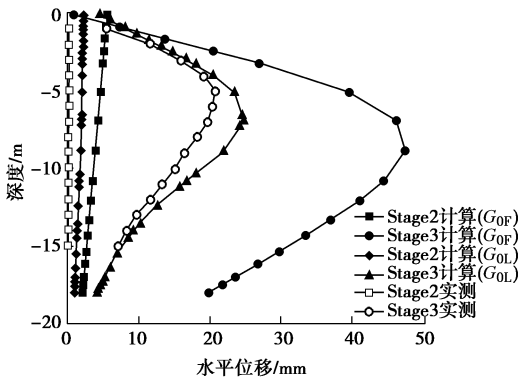
Table 1 Parameters of HSS model

土层号	②	③	④	⑤
E_{oed}^{ref} /MPa	3.9	3.0	1.9	3.1
E_{50}^{ref} /MPa	4.5	3.5	2.2	3.6
E_{ur}^{ref} /MPa	26.6	20.7	13	21.3
c' /kPa	7	1	8	6
φ' /(°)	29	29	28	28
ψ/(°)	0	0	0	0
ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2
m	0.61	0.61	0.61	0.61
R_f	0.96	0.58	0.54	0.95
$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	3.6	3.9	3.6	3.4
G_{oL}/MPa	57.7	44.5	35.9	48.2
G_{oF}/MPa	98.0	71.3	54.8	78.7

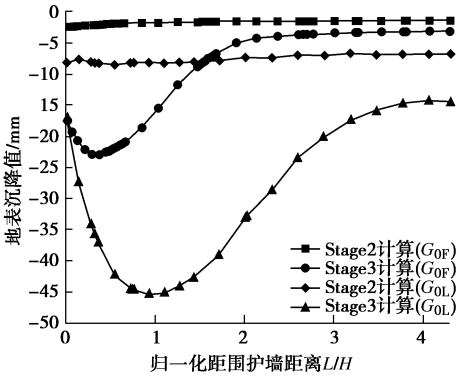
3.3　计算结果分析

图 8（a）给出了不同开挖步下基坑围护墙变形的计算和实测值。在第一步开挖时围护墙最大变形处在地表面，采用 G_{oL} 计算和 G_{oF} 计算得到的最大变形值分别为 5.5 mm 和 2.2 mm，而实测最大变形值为 2.6 mm。第二步开挖完成后，最大变形发生在开挖面附近，采用 G_{oL} 和 G_{oF} 计算得到的最大变形值分别为 47.3 mm 和采用得到的最大变形值为 26.7 mm，而实测最大变形值为 15 mm。可见，采用 G_{oL} 计算得的最大变形约为实测值的 3.2 倍，采用 G_{oF} 计算得的变形与实测值接近很多且变形模式很接近。需要说明的是，数值模拟的变形较实测还偏大，可能是由于没有考虑基坑底部土体卸载路径的影响。

图 8（b）给出了墙后地表沉降随离围护墙的距离的分布图。从图可知，第一步开挖完成后，围护墙处



（a）围护结构水平侧移



（b）地表沉降分布图

图 8 围护结构水平向侧移与地表沉降图

Fig. 8 Horizontal displacements of retaining structures and settlements of ground surface behind walls

地表沉降最大。第二步开挖完成后，坑后地表沉降基本呈三角形分布，采用 G_{oL} 计算得的最大沉降为 44.9 mm，最大沉降位置距围护墙 7.6 m，约为 1.10H，采用 G_{oF} 计算得的最大沉降为 22.8 mm，最大沉降位置距围护墙 2.5 m，约为 0.36H。

4 结 论

本文统计分析了室内共振柱实验和现场波速试验测得的上海典型土层的小应变剪切模量，并通过对上海新金桥广场基坑的变形计算验证两种参数在预测基坑开挖变形问题中的适用性。主要得出以下结论：

（1）室内共振柱实验和现场波速测试得到的小应变剪切模量主要取决于土的种类、孔隙比和平均有效围压，并提出了相应的经验公式。

（2）通过对比分析表明，室内共振柱实验测定的 G_{oL} 远低于现场波速测试的小应变剪切模量 G_{oF}。试样扰动程度的表征系数 G_{0L}/G_{0F} 随 G_{oF} 的增大而减小，表明试样模量越大（深度越深），取样扰动越大。

（3）通过数值模拟表明，土体的小应变剪切模量对基坑开挖变形影响显著，同时采用 G_{oF} 分析的基坑开挖变形量及变形模式与实际较为接近。建议在今后类似的变形分析中采用现场试验的 G_{oF} 值。

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 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Balkema, Rotterdam. Netherlands, 1991: 915 – 956.

[2] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2007.

[3] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 258 – 264. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 258 – 264. (in Chinese))

[4] 王浩然. 上海软土地区深基坑变形与环境影响预测方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2012. (WANG Hao-ran. Prediction of deformation and response of adjacent environment of deep excavation in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))

[5] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**(7): 667 – 692.

[6] HARDIN B O. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. J of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1968, **94**(2): 353 – 370.

[7] KOKUSHO T. In-situ dynamic soil properties and their evaluations[C]// Proc 8th Asian Regional Conf on SMFE. Kyoto, 1987, **2**: 215 – 240.

[8] 顾晓强, 陆路通, 李雄威, 等. 土体小应变刚度特性的试验研究[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2018, **46**(3): 312 – 317. (GU Xiao-qiang, LU Lu-tong, LI Xiong-wei, et al. Experimental study on the small strain stiffness properties of soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, **46**(3): 312 – 317. (in Chinese))

[9] GU X, LU L, YANG J, WU X. Laboratory measurements of the dynamic properties of Shanghai clay[C]// Environmental Vibrations and Transportation Geodynamics, ISEV 2016. Springer, Singapore, 2016: 585 – 592.

[10] 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 parameters of HSS model for soft soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(2): 269 – 278. (in Chinese))

（责编：黄贤沙）