

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.027

上海典型黏土小应变剪切模量现场和室内试验研究

李 青^{1,2}, 徐中华^{1,2}, 王卫东^{1,2}, 张 娇³

(1. 华建集团 地下空间与工程设计研究院 地基基础与地下工程设计研究中心, 上海 200002;
2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002; 3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 土体小应变剪切模量在基坑、隧道等地下工程的计算分析中有着重要作用, 越来越受到人们的关注。虽然上海地区地下工程项目的建设规模不断扩大, 但关于上海典型黏土层的小应变剪切模量的研究相对较少。分别采用现场波速测试和室内弯曲元试验对上海典型黏土层的初始剪切模量进行了研究。试验结果表明: 在减小土样扰动、保持土样应力状态与原位土体等效的基础上, 弯曲元试验得到的初始剪切模量与现场波速测试相一致; 考虑了土体应力状态和孔隙比的经验公式能够合理地描述上海典型黏土层初始剪切模量的变化规律, 并给出了各土层的经验参数。试验结果可为上海地区地下工程计算分析中小应变剪切模量的估算提供参考。

关 键 词: 上海典型黏土层; 小应变; 剪切模量; 现场波速测试; 弯曲元试验

中图分类号: TU 46

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 11-3263-07

Field and laboratory measurements on shear modulus of typical Shanghai clay at small strain

LI Qing^{1,2}, XU Zhong-hua^{1,2}, WANG Wei-dong^{1,2}, ZHANG Jiao³

(1. Department of Underground Structure and Geotechnical Engineering, Underground Space Engineering Design and Research Institute, Arcplus Group PLC, Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200002, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Small-strain shear modulus plays a crucial role in numerical analyses of underground geotechnical Engineering issues such as excavations and tunnels. The research on small strain shear modulus of typical clay layers has rarely been reported, despite the fact that many large-scale underground construction projects have been ongoing in Shanghai. In this study, the initial shear moduli of typical clay layers at small strains in Shanghai have been investigated on spot by the field acoustic wave measurement and indoor bending element test. The experimental results show that the initial shear modulus obtained from the bending element test is consistent with that obtained from the in-situ wave velocity test if the soil disturbance is minimized and the soil stress state adopted in the indoor experiment is equivalent to the in-situ soil. It is shown that the proposed empirical formulation with considering the stress state and the void ratio of the soil can reasonably describe the variation of the initial shear modulus of the typical clay layer in Shanghai, and the empirical parameters of each soil layer are given. The experimental results can provide reference for calculating and analyzing the shear modulus of soft clay at small to medium strain.

Keywords: typical Shanghai clay; small strain; shear modulus; field acoustic wave measurement; bending element test

1 引 言

近年来, 上海地区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至关重要。岩土试验方法、监测技术和数值计算方法的不断发展, 使人们对于地下工程建设对周边土体

影响的认识有了长足的进步。Atkinson 等^[1]将土体应变划分为非常小应变 ($<0.001\%$)、小应变 ($0.001\% \sim 1\%$) 和大应变 ($>1\%$) 3 部分 (如图 1 所示)。土体刚度与应变水平密切相关, 在非常小应变范围内, 土体刚度较大; 在小应变范围内, 土体剪切刚度随着应变增加发生剧烈的衰减。在浅基础、桩基础、基坑和隧道周围除了局部土体发生屈服,

收稿日期: 2016-06-14

基金项目: 上海市浦江人才计划资助项目 (No.15PJ1433500)。

This work was supported by Shanghai Pujang Program (15PJ1433500).

第一作者简介: 李青, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事软土特性研究及深基坑工程的设计与理论分析工作。E-mail: qing_li@ecadi.com

其他区域的应变相对较小,通常处于 0.01%~0.50% 的范围内^[2-3]。有限元分析中考虑土体的小应变特性能够较好地模拟基坑、隧道周边的地表沉降^[4-5]。因此,研究土体小应变特性对于基坑、隧道等地下工程的分析和设计至关重要。

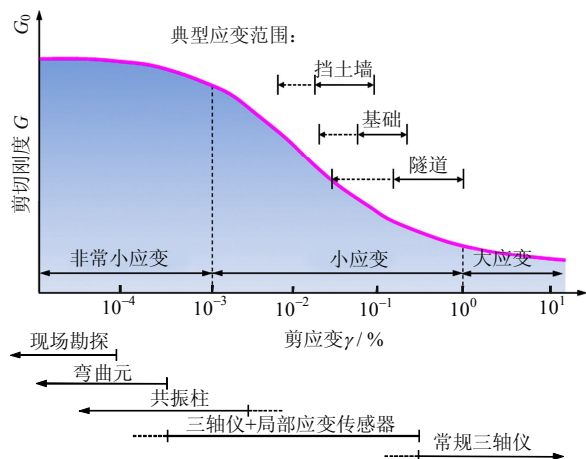


图 1 各种类型岩土工程周边土体的应变范围
Fig.1 Strain range of surrounding soil in various geotechnical engineering applications

初始剪切模量 G_0 以及小应变范围内土体剪切模量的变化规律是描述土体小应变特性的主要参数,可以通过现场原位测试和室内试验获得相关参数。现场测试一般采用地震波速测试方法测定剪切波速 v_s , 根据 $G_0 = \rho v_s^2$ (其中 ρ 为土体密度) 计算初始剪切模量 G_0 。常用的原位测试方法包括: 下孔法、跨孔法和表面波法等。Clayton^[6]通过在伦敦黏土中的试验发现,跨孔法与下孔法得到的剪切模量相近;而 Pinches 等^[7]的试验结果表明,跨孔法得到的剪切波速大于下孔法。试验室中可以借助装有弯曲元的固结仪、共振柱和三轴仪等测量土样的 G_0 。弯曲元作为一项无损技术,因原理明确、使用简单、价格低廉等特点已被广泛用于确定土体的剪切模量。姬美秀等^[8]对黏土、粉土和干砂进行了弯曲元试验,指出正弦激发信号适用土体范围广,选择合

适的激发频率能够减小剪切波速的弥散性;陈云敏等^[9]利用弯曲元测量了不同应力状态下饱和 Toyoura 砂的 G_0 值,发现弯曲元的试验结果与三轴试验具有较好的可比性。

上海地区地表以下 30 m 范围内普遍存在②~⑥层黏土,与地下工程建设密切相关。唐有职等^[10]同时采用原位测试和室内试验对上海某地地表下 14 m 深度范围内土体的剪切模量进行了研究。林枫^[11]采用动三轴试验,确定了上海第④层淤泥质黏土以及第⑤层粉质黏土的初始小变形模量。吴宏伟等^[12]和李青^[13]利用弯曲元试验得出了第③层淤泥质黏土层的 G_0 和应力状态之间的经验关系。上述研究往往针对某些特定土层,报道上海典型黏土层小应变特性,并获得各土层初始剪切模量参数的研究相对较少。

本文对上海典型黏土层(②~⑥层)的小应变剪切模量进行了现场及室内试验研究。采用悬挂式波速测试仪测定了不同深度黏土的剪切波速;基于利用薄壁取土器采集的原状土样,进行了弯曲元试验。比较并分析了现场测试和室内试验得到的剪切波速和 G_0 ;确定了 G_0 与常规地质勘察报告中岩土参数的经验关系。

2 试验场地及试验内容

试验场地位于上海浦东某工地,如表 1 所示,地面以下 30 m 围内的土层主要包括:①填土层、②粉质黏土层、③淤泥质粉质黏土层、④淤泥质黏土层、⑤粉质黏土层、⑥黏土层,场地内各土层分布相对均匀。其中③、④层淤泥质土十字板抗剪强度 $s_u < 40$ kPa,属于软黏土,孔隙比较大,天然含水率 w_n 均大于其液限含水率 w_L 。

在场地不同位置进行了 3 组波速测试,测定不同深度土层的剪切波速。利用钻探结合薄壁取土器压入的方法,采集原状土样,将土样固结至等效原位应力后进行弯曲元试验,测定 G_0 。

表 1 试验场地土层参数
Table 1 Soil parameters in test site

土层	厚度/m	重度 (kN/m^3)	孔隙比 e	含水率/%			s_u /kPa	
				w_n	w_L	w_p	峰值	残余
① 填土	2.3	19.0~19.5	0.81~0.89	29.4	32.8	19.4		
② 粉质黏土	2.0	18.0~18.7	0.92~0.95	32.4	35.1	21.7		
③ 淤泥质粉质黏土	4.7	18.1~19.0	0.86~1.08	34.1	33.0	20.0	36.5	12.3
④ 淤泥质黏土	9.4	17.1~17.3	1.33~1.39	48.2	42.5	22.6	37.1	12.3
⑤ 粉质黏土层	6.0	18.2~18.4	1.00~1.05	36.0	39.0	21.5	52.6	17.4
⑥ 黏土层	5.6	19.6~20.1	0.69~0.75	24.1	32.1	19.0		

3 现场波速测试

3.1 悬挂式波速测试系统

现场波速测试采用悬挂式波速测试系统, 悬挂式探头包括一个振源和两个检波器, 振源和检波器距离为 2 m, 两检波器之间间隔 1 m。测量时振源在井液中产生压力波, 碰到井壁后在土层中转化为压缩波 (P 波) 和剪切波 (S 波)。P 波和 S 波在地层中传播, 在井液中再一次转化成压力波, 被振源下方的检波器检测并接收。可以根据 S 波在上、下两个检波器之间传播的时间差 Δt_2 , 以及两检波器之间的距离 l_2 , 采用下列公式计算剪切波的传播速度 v_s 及相应土层的原位初始剪切刚度 G_0 值。

$$v_s = l_2 / \Delta t_2 \quad (1)$$

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (2)$$

式中: ρ 为土体密度。

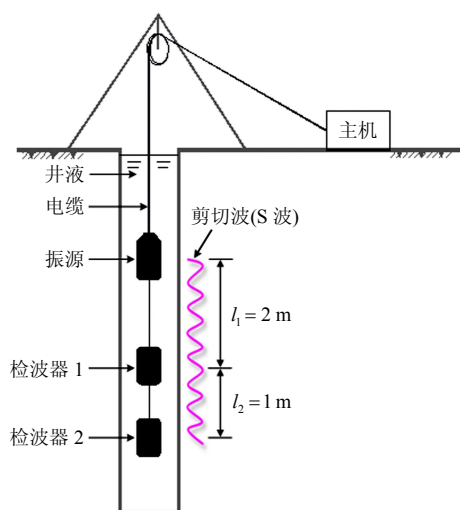


图 2 悬挂式波速测试系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of suspension shear wave velocity testing system

成孔后将探头匀速放至孔底, 并在下放过程中观察是否有迟滞现象, 从而确定成孔的缩颈位置, 达到指定深度后触发激振开关, 采集并记录波形, 确认无误后, 电缆上提 1 m, 待电缆稳定后继续测试直至孔顶附近。悬挂式波速测试仪探头不接触井壁土体, 避免了对周边土体产生较大扰动; 该方法测量 v_s 时具有较高的精度 ($\pm 5\%$) [14], 同时在土中引起的剪应变小于 0.001%, 得到的剪切模量可近似认为是 G_0 [15]。

3.2 波速测试结果

图 3 为场地内 3 个不同钻孔内的剪切波速随深度的变化曲线。3 个钻孔的实测数据具有很好的一

致性, 剪切波速大致随深度的增大而增加。采用最小二乘法对实测数据进行拟合求出平均波速, 以及 95% 的置信区间和预测区间, 具体数据如图 3 所示。在钻孔过程中在孔顶附近采用钢护筒定位和保护孔口, 地表以下 5 m 的剪切波速可能因钢护筒的存在而失真, 在进行拟合时不考虑 5 m 范围内的数据。可以看出虽然平均剪切模量随深度增加, 但实测数据还是较为离散的, 这与土层本身的离散性以及钻孔过程产生的土体扰动有关。高飞等 [16] 统计了上海地区剪切波速的数据, 得到了平均波速 $v_s = 71.6H^{0.32}$ 的经验公式, 可以看出该经验公式能够较好的描述该场地③、④层土剪切波速; 对于⑤、⑥层土, 由经验公式得到的平均波速小于 95% 的置信区间。土的剪切波速与其原位应力、孔隙比、超固结比等多种因素密切相关, 而高飞和孙小刚的经验公式仅考虑土体深度 H , 并不能完全涵盖上述因素的影响。例如, 两场地相同深度处分别为④层淤泥质黏土和⑥层黏土, 根据上述经验公式, 两处的剪切波速相近, 但⑥层黏土具有一定的超固结度 [17], 剪切波速往往比淤泥质黏土大。因此, 该经验公式对剪切波速的估计不够合理, 在地质条件差异较大的其他场地应用该公式可能会有较大误差。

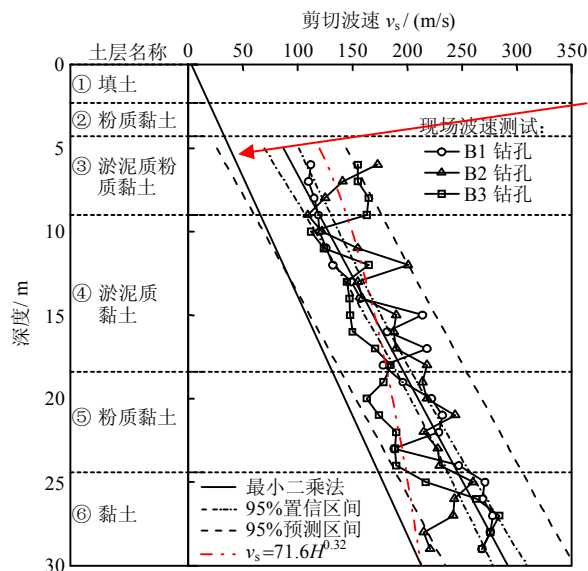


图 3 剪切波速随深度的变化曲线

Fig.3 Variations of shear wave velocity with depth

4 室内弯曲元试验

试验采用的是 GDS 共振柱 (如图 4 所示), 将一对弯曲元安装在底座和顶帽上, 分别作为发射源和接收源, 当给发射端的弯曲元施加电压激励后, 弯曲元发生振动产生剪切波并在土样中传播, 接收

弯曲元接收到振动后会转化成电压信号,通过两信号间的时间计算剪切波的传播时间,并求出剪切波速和初始剪切模量。

具体试验步骤如下:①制备土样:试验土样直径为 50 mm,高度为 100 mm;②土样饱和:无气水从土样底部进入,由顶部流出,排出试样中的气泡,随后进行反压饱和;③等向固结:饱和后每个土样依次固结至 50、100、200 和 400 kPa;④弯曲元试验:每级荷载下,待孔压消散完毕,轴向变形逐渐稳定后,记录土样变形,并进行弯曲元试验,测定各级压力下的剪切波速。

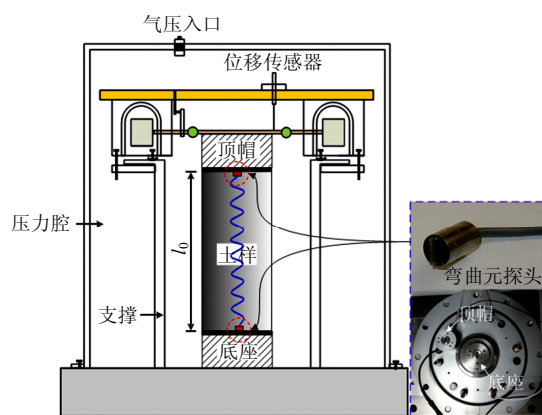


图 4 装有弯曲元的共振柱

Fig.4 Resonant column apparatus equipped with bending elements

弯曲元试验采用频率 $f=5$ kHz 的正弦信号作为输入信号。图 5 为有效应力 $p'=100$ kPa 时,不同土层的激发和接收信号,③、④层土试验结果相似,文中仅给出前者的弯曲元信号。弯曲元试验中确定剪切波传播时间是确定 v_s 和 G_0 的关键,常用的方法包括初达波法和特征点法。初达波法是将剪切波信号中第 1 个清晰的与激发信号同方向的畸变点视为剪切波的到达点,而特征点法则以激发和接收信号特征点之间(波峰或波谷)的时间差作为剪切波的传播时间。表 2 比较了 100 kPa 围压下两种方法得出的波速和剪切模量。从表中可以看出,由初达波法得到的 v_s 和 G_0 普遍大于峰值法。这种差异主要是因为信号在土样传播过程中发生了衰减,接收信号较之激发信号发生了脉冲展宽现象,此时由峰值法确定的传播时间较大,相应的剪切波速则会偏小^[18]。初达波法直观明了,文献中也大都采用该方法^[8-9],因此,文中采用初达波法得到的结果进行相关分析讨论。

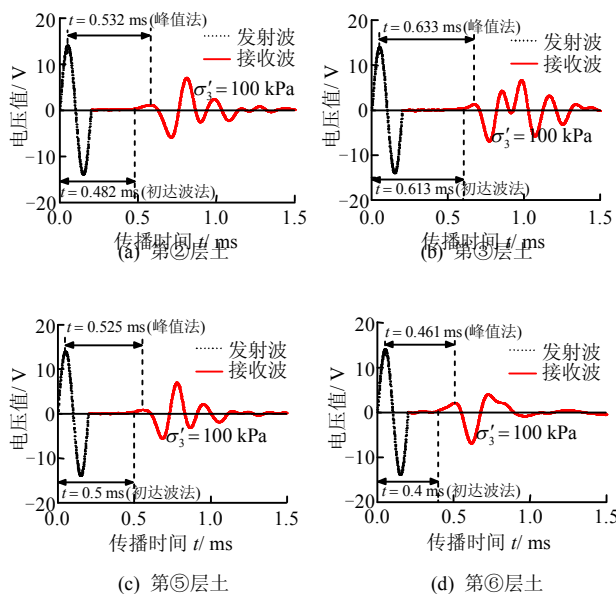


图 5 不同土层典型弯曲元发射和接收信号

Fig.5 Typical input and output signals by using bending elements

表 2 初达波法与峰值法确定的 v_s 和 G_0 对比

Table 2 Comparisons between v_s and G_0 determined by first arrival time method and peak-to-peak method

土层	v_s / (m/s)			G_0 / MPa		
	初达波法	峰值法	初达波法/峰值法	初达波法	峰值法	初达波法/峰值法
②	211.9	192.0	1.10	82.6	67.8	1.21
③	172.5	167.0	1.03	51.8	48.5	1.27
⑤	196.8	187.4	1.05	68.9	62.5	1.10
⑥	265.7	230.5	1.15	137.0	103.1	1.32

相同固结压力下,③层土的剪切波传播时间明显大于其他土层,相应的剪切波速和剪切模量较小,这与勘察报告中反映的③、④层属于软弱黏土层相吻合。

5 试验结果分析

5.1 现场和室内试验结果对比

如图 6 所示,受到钻孔位置不同等因素的影响,现场波速测试得到土体剪切模量 G_0 有一定的离散性,但总体上 G_0 随着深度增加而增大。现场波速是在原位应力状态下测量原状土的剪切波速,得到的剪切模量最接近于真实值^[19]。从图中可以看出,弯曲元试验结果变化规律与现场波速测试基本一致,得到的剪切模量大小也较为接近,这在一定程度上验证了弯曲元试验结果的可靠性。

比较现场和室内试验获得的剪切模量应综合考虑试验应变大小、土体扰动、应力水平等因素的影响。唐有职等^[10]通过室内振动单剪试验得到的剪切

模量较小是因为单剪试验的应变范围约为 $10^{-2} \sim 10^{-1}\%$, 远大于现场波速测试的应变范围。而弯曲元振动在土样中产生的最大剪应变约为 $10^{-4}\% \sim 10^{-3}\%$ ^[20], 和现场波速测试在土层中产生的应变大小基本一致; 同时通过采用薄壁取土器采集土样、用排水固结将土样固结至原位应力等措施减小土样扰动和保持应力等效, 保证了原位测试和室内试验具有较好的可比性。

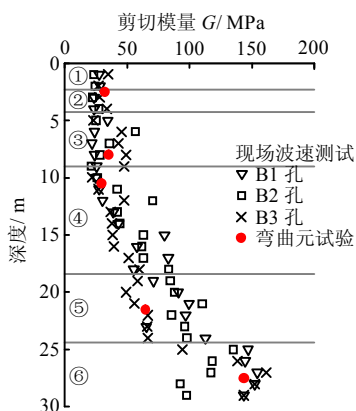


图 6 现场测试和弯曲元试验得出的剪切模量对比

Fig.6 Comparisons of shear moduli obtained by field test and bending element test in typical soil strata

5.2 小应变剪切模量预估

实际工程中由于各种因素, 往往无法进行现场波速测试。如果能够根据勘察报告中的常规参数指标合理地预估小应变剪切刚度, 将对地下工程的有限元分析起到积极的作用。天然土体初始剪切刚度不仅受到土体自身结构如颗粒大小及形状的影响, 还与土的应力状态、应力历史及化学变化等因素密切相关。Rampellp 等^[21]提出, 土体初始剪切刚度 G_0 可以采用下式表示:

$$\frac{G_0}{p_a} = S f(e) \left(\frac{p'}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

表 3 不同土体经验参数 S 和 n 对比

Table 3 Comparisons of empirical parameters of S and n for different soils

土体	试验方法	e	$f(e)$	S	n	参考文献
多种软黏土 ¹	震动触探试验	0.5~5.0	$(1+e)^{-2.4}$	18 000~30 000(24 000)	0.5	Shibuya 等 ^[22]
多种黏土 ²	三轴试验、共振柱试验	0.5~6.2	$(1+e)^{-2.4}$	15 000~50 000	0.5	Vardanega 和 Bolton ^[23]
②、③、④层	单孔波速测试	0.8~1.4	$(1+e)^{-2.4}$	24 000~30 000	0.5	本文
⑤、⑥层	单孔波速测试	0.7~1.1	$(1+e)^{-2.4}$	48 000	0.5	

注: 1. 均为正常固结和轻微超固结黏性土; 2. 包括淤泥、软黏土和超固结土等, $OCR = 1.0 \sim 6.8$ 。

6 结 论

(1) 在减小土样扰动、保持土样应力状态与

其中, $f(e)$ 为关于孔隙比 e 的经验关系, 本文采用 $f(e) = (1+e)^{-2.4}$ 。

式中: p' 为土的平均有效应力 ($p' = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$; σ'_v 为竖向有效应力; σ'_h 为水平向有效应力); p_a 为参考应力 (通常取 1 kPa); S 、 n 为与土的类型有关的经验参数, 其中文中取 $n = 0.5$ 。

根据现场波速测试的 3 组结果, 结合勘察报告中给出的地层分布和孔隙比 e , 采用式 (3) 对实测数据进行拟合。上海典型的⑤、⑥层土具有一定的超固结特性^[17], 而经验参数 S 与土的类型有关。因此, ②、③、④层和⑤、⑥两层分别采用不同的 S 值, 拟合结果如图 7 所示, 相应参数见表 3。

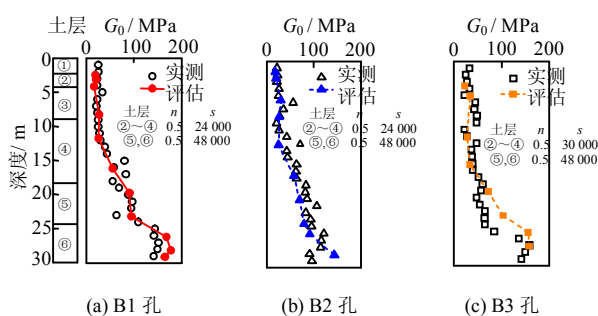


图 7 实测和预估初始剪切模量对比

Fig.7 Comparisons between measured and predicted G_0 of typical clay strata

对于②、③、④层土 $S = 24\ 000 \sim 30\ 000$, 而⑤、⑥层土的 S 值明显大于软黏土层, 达到了 48 000。Shibuya 等^[22]研究发现, 软黏土 S 取值分布在 18 000~30 000 之间; Vardanega 等^[23]对包括软黏土和超固结土等 21 种不同土体进行了统计分析, S 值分布在 15 000~50 000 的范围内。由此可见, ②、③、④层土的 S 值与 Shibuya 等对软黏土的研究结果基本一致; 而⑤、⑥层土的 S 值处于 Vardanega 和 Bolton 给出的区间上限, 这可能与这两层土具有一定程度的超固结度有关。

原位土体等效的基础上, 现场波速测试和室内弯曲元试验的结果具有较好的可比性。

(2) 采用式 (3) 能够有效描述上海典型黏土层

初始剪切模量 G_0 与土体应力状态、孔隙比 e 的相互关系。对于②、③、④层土 $S = 24\ 000 \sim 30\ 000$ ；而较深的⑤、⑥层土的 S 值明显大于软黏土层，达到了 48 000，较大的 S 值可能与土的超固结度有关。

(3) 利用勘察报告里的基本参数如土的密度和孔隙比，借助文中的经验公式和参数能够较为简单地预估不同土层的小应变剪切模量 G_0 ，便于开展考虑小应变特性的岩土工程计算和分析。

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. [S. l.]: [s. n.], 1991: 915—956.
- [2] MAIR R J. Unwin memorial lecture 1992: Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[C]//Proceedings of ICE: Civil Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1993, 97(1): 27—41.
- [3] JARDINE R J, POTTS D M, FOURIE A B, et al. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction[J]. *Géotechnique*, 1986, 36(3): 377—396.
- [4] KUNG G T C. Comparison of excavation-induced wall deflection using top-down and bottom-up construction methods in Taipei silty clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(3): 373—385.
- [5] ADDENBROOKE T I, POTTS D M, PUZBIN A M. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction[J]. *Géotechnique*, 1997, 47: 693—712.
- [6] CLAYTON C R I. Stiffness at small strain: Research and practice[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(1): 5—37.
- [7] PINCHES G M, THOMPSON R P. Crosshole and downhole seismic surveys in the UK Trias and Lias[M]. [S. l.]: Engineering Geology Special Publication, 1990, 6: 299—308.
- [8] 姬美秀, 陈云敏, 黄博. 弯曲元试验高精度测试土样剪切波速方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 732—736.
JI Mei-xiu, CHEN Yun-min, HUANG Bo. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(6): 732—736.
- [9] 陈云敏, 周燕国, 黄博. 利用弯曲元测试砂土剪切模量的国际平行试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 874—880.
CHEN Yun-min, ZHOU Yan-guo, HUANG Bo. International parallel test on the measurement of shear modulus of sand using bender elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 874—880.
- [10] 唐有职, 王守业. 上海地基土动剪切模量值的综合测定[J]. 工程勘察, 1982, 4: 72—75.
TANG You-zhi, WANG Shou-ye. Measurement of dynamic shear modulus of Shanghai subsoil[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 1982, 4: 72—75.
- [11] 林枫. 软土地铁区间隧道结构抗爆承载能力的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LIN Feng. Study on bearing capacity of subway tunnel in soft soil under shock wave[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [12] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 利用弯曲元测量上海原状软黏土各向异性剪切模量的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 150—156.
NG C W W, LI Qing, LIU Guo-bin. Measurements of small-strain inherent stiffness anisotropy of intact Shanghai soft clay using bender elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(1): 150—156.
- [13] 李青. 侧装式弯曲元测量软粘土剪切波速的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 413—416.
LI Qing. Determination of shear wave velocities of soft clay samples using side-mounted bender elements[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Supp.1): 413—416.
- [14] ISHIHARA K. Soil behaviour in earthquake geotechnics[M]. Clarendon, Oxford, England: [s. n.], 1996: 68—72.
- [15] IMAI T, TONOUCI K. Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus[C]//Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing. [S. l.]: [s. n.], 1982, 1: 68—72.
- [16] 高飞, 孙小刚. 上海地区场地剪切波速的特征分析[J]. 上海地质, 2005, 2: 27—29.
GAO Fei, SUN Xiao-gang. Characteristic analysis of shear wave velocity of foundation ground in Shanghai region[J]. *Shanghai Geology*, 2005, 2: 27—29.
- [17] 魏道堃, 胡中雄. 上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(4): 13—22.
WEI Dao-duo, HU Zhong-xiong. Experimental study of preconsolidation pressure and compressibility parameters of Shanghai subsoil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1980, 2(4): 13—22.
- [18] CLAYTON C R I, THERON M, BEST A I. The measurement of vertical shear-wave velocity using

side-mounted bender elements in the triaxial apparatus[J]. **Geotechnique**, 2004, 54(7): 495—498.

- [19] HEYMANN G. The stiffness of soils and weak rocks at very small strains[D]. UK: Department of Civil Engineering, University of Surrey, 1998.
- [20] PENNINGTON D S. The anisotropic small strain stiffness of Cambridge Gault clay[D]. UK: University of Bristol, 1999.
- [21] RAMPALL S, VIGGIANI G M, AMOROSI A. Small-strain stiffness of reconstituted clay compressed

along constant triaxial effective stress ratio paths[J]. **Geotechnique**, 1997, 47(3): 475—489.

- [22] SHIBUYA S, HWANG S C, MITACHI T. Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement[J]. **Geotechnique**, 1997, 47(3): 593—601.
- [23] VARDANEGA P J, BOLTON M D. Stiffness of clays and silts: Normalizing shear modulus and shear strain[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(9): 1575—1589.

上接第 3262 页

- [9] 梅国雄, 周峰, 黄广龙, 等. 补偿基础沉降机制分析[J]. 土木工程学报, 2006, 28(增刊): 1398—1400.
MEI Guo-xiong, ZHOU Feng, HUANG Guang-long, et al. Settlement analysis for compensated foundations[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 28(Supp.): 1398—1400.
- [10] 马忠政. 地基基础的新全能分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
MA Zhong-zheng. Research on the new almighty analysis method of ground and foundations[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [11] TANG Yong-jing, ZHAO Xi-hong. 121-story Shanghai Center Tower foundation re-analysis using a compensated pile foundation theory[J]. **Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings**, 2014, 23(11): 854—879.
- [12] TANG Yong-jing, ZHAO Xi-hong. Deformation of compensated piled raft foundations with deep embedment in super-tall buildings of Shanghai[J]. **Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings**, 2015, 24(7): 521—526.
- [13] MOHAMAD H, HUSSEIN J, BRIAN A, et al. Camp III. The art of foundation engineering practice[M]. ASCE: the American Society of Civil Engineering, 2012.
- [14] POULOS H G. Piled raft and compensated piled raft foundation for soft soil sites[J]. **Advances in Designing and Testing Deep Foundations**, 2005, (129): 214—234.
- [15] SALES M M, SMALL J C, POULOS H G. Compensated piled rafts in clayey soils: Behavior, measurements, and predictions[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47: 327—345.
- [16] ZHAO Xi-hong. Some problems on foundation engineering and multi-storey and tall buildings in China[R]. Australia: Department of Civil Engineering, University of New South Wales, 1983: 1—18
- [17] TANG Yong-jing, PEI Pie, ZHAO Xi-hong. Design and measurement of piled raft foundations Geotechnical

Engineering[J]. **GEI. Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, 2013, 166: 1—15.

- [18] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075—1082.
CHEN Kun, YAN Su-wang, SUN Li-xiang. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(4): 1075—1082.
- [19] 范庆国, 赵锡宏. 深基坑工程逆作法的理论与计算[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2169—2176.
FAN Qing-guo, ZHAO Xi-hong. Theory and analysis of up and down construction method in deep excavation engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2169—2176.
- [20] 赵锡宏, 陈志明, 胡中雄. 高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
ZHAO Xi-hong, CHEN Zhi-ming, HU Zhong-xiong. Practice and analysis of deep excavation engineering for tall buildings[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [21] ZHAO Xi-hong. Theory of design of piled raft and piled box foundations for tall buildings in Shanghai[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998.
- [22] ALFREDS R J. Mechanics of soils-fundamental for advanced study [M]. [S. l.]: D. Van Nostrand Company, Inc., 1964.
- [23] 赵锡宏. 带裙房的高层建筑与地基基础共同作用的设计理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
ZHAO Xi-hong. Theory and practice of tall building and foundation interaction with podium[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [24] 肖俊华, 赵锡宏. 软土地区深埋桩筏基础沉降实测与反分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1680—1688.
XIAO Jun-hua, ZHAO Xi-hong. Observation and back analysis of settlement of piled-raft foundation in soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1680—1688.