

DOI: 10.11779/CJGE202204021

上海地区软土旁压加卸载变形特性试验研究

张 晗^{1, 2, 4}, 杨石飞^{1, 4}, 王 琳^{*1, 2, 4}, 林天翔^{3, 4}

(1. 上海勘察设计研究院(集团)有限公司博士后科研工作站, 上海 200093; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 4. 上海岩土与地下空间综合测试工程技术研究中心, 上海 200093)

摘 要: 软土具有强度低、压缩性高的特点, 在不同应力状态、应力路径下其变形呈现明显不同的非线性特征, 研究软土的原位变形特性对各类地下工程土体变形的控制具有重要意义。通过对上海地区不同深度土体进行原位旁压加卸载试验, 从加载及卸载两个维度对原位土体的变形特性进行描述。通过旁压加载试验结合室内小应变三轴试验, 获取了土体剪切模量 G 随剪应变 γ 的变化规律; 通过旁压卸载试验研究软土原位卸荷回弹变形特性, 探讨了各层土不同卸载前载荷水平及卸载等级下, 土体模量比 E_v 与卸载比 R 之间的内在关系。研究结果揭示了软土在加载情况下的刚度衰减规律及卸荷条件下影响刚度特性的关键因素, 为控制地下空间开发中的土体变形问题提供借鉴。

关键词: 软土; 旁压加卸载试验; 刚度衰减; 卸载等级; 卸载前载荷水平

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)04-0769-09

作者简介: 张 晗(1992—), 男, 博士后, 工程师, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。E-mail: zhanghan@sgidi.com。

Experimental researches on in-situ loading and unloading deformation characteristics of soft soil based on pressuremeter tests in Shanghai area

ZHANG Han^{1, 2, 4}, YANG Shi-fei^{1, 4}, WANG Lin^{*1, 2, 4}, LIN Tian-xiang^{3, 4}

(1. Postdoctoral Programme, SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Shanghai Engineering Research Centre of Geotechnical Test for Underground Space, Shanghai 200093, China)

Abstract: The quality of the soft soil includes low strength and high compressibility, and the deformation shows obviously different nonlinear characteristics under different stress states and paths. It is of great significance to study the in-situ deformation characteristics of soft soil for controlling the deformation in various underground projects. In this study, such deformation characteristics are well described from two aspects of loading and unloading through PMT in Shanghai area. The relationship between shear modulus G and shear strain γ is obtained by the pressuremeter loading tests combined with laboratory small-strain tests. At the same time, the internal relationship between modulus ratio E_v and unloading ratio R is studied under different maximal unloading pressures and unloading levels by the pressuremeter unloading tests. The results reveal the stiffness degradation law for loading tests and the key factors determining the stiffness characteristics for unloading tests, which will provide the relevant reference for controlling soil deformation in the development of underground space.

Key words: soft soil; pressuremeter loading and unloading test; stiffness degradation; unloading level; maximal unloading pressure

0 引 言

近年来, 随着中国城市化进程的不断推进, 地下结构的开挖深度和面积不断增大^[1-2]。以上海地区为例, 由于地下空间开发影响范围内广泛分布高压缩性、低承载力的软土层, 工程建设存在一系列潜在的地质安全问题^[3-4]。研究各类工况下软土的变形规律, 对于控制工程风险以及减小对周围环境的影响都具有非常重要的意义。

目前, 学者们针对软土地区的土体强度及变形特性进行了较为深入的研究, 考虑了包括应力路径、载荷条件、蠕变等各类因素的作用, 取得了丰富的研究成果^[5-7]。例如, 王卫东等^[8]通过 GDS 的三轴固结排

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42002272); 上海市“超级博士后”激励计划项目(2019327)

收稿日期: 2021-06-20

*通信作者(E-mail: 17644017709@163.com)

水剪切试验、三轴固结排水卸载—再加载试验及标准固结试验确定了上海地区典型软土地层的 HS 模型参数；周秋娟等^[9]基于室内三轴试验，重点研究分析了不同条件下软土的流变特性，给出了土体应变率随时间发展的规律；李德宁等^[10]针对上海软土开展一系列 K_0 固结不排水三轴卸荷试验，总结了卸荷模量、回弹率等与土体的应力路径、预压荷载之间的关系，得到了不同深度土层典型卸荷应力路径下的变形特性。上述室内试验受限于试样尺寸、岩土体扰动及天然应力状态改变等问题，其测试结果仍存在一定的局限性。

旁压试验是一种有效获取土体原位力学特性的测试方法，国内、外诸多学者对旁压试验机理及应用进行了大量的研究工作。Gibson 等^[11]假设被测土体无体积变化，利用弹塑性理论求解扩张状态下的旁压试验问题；Baguelin^[12]结合自钻式旁压试验，提出了无体积变化的等容剪切理论，对由扰动造成的孔周应力—应变场变化做出了评价，并对旁压探头周边土的膨胀效应作了详细的分析；Collins 等^[13]针对自钻式旁压试验，首次采用包括剑桥黏土模型、修正剑桥模型和剑桥黏土—伏斯列夫屈服面的组合模型等在内的几种临界状态模型进行分析，给出了考虑大应变情况下正常固结土和超固结黏土中不排水圆孔扩张的解析解；Yu^[14]利用旁压试验结果来推求砂土的状态参数方程，相关研究结果具有较大的应用价值。国内的赵善锐等^[15]分析了砂性土地基变形模量和旁压测试结果之间的内在联系；刘小生等^[16]提出了一种基于旁压试验的土体本构参数反分析方法。近些年，也有不少学者提出利用旁压试验获取原位土体刚度变化的方法，例如：Fahey 等^[17]提出了一种通过旁压卸载—再加载循环曲线获取土体加卸载剪切模量 G_{ur} 与 G_{max} 关系的方法；安然等^[18]在典型花岗岩残积土地层上开展自钻旁压试验和地震扁铲试验试验，同时结合室内共振柱试验提出获取原位剪切模量—剪应变衰减曲线的建议方法。以上专家、学者的精心研究，为旁压试验机理及应用做出了重要的贡献，但目前对原位剪切模量随剪应变衰减的研究开展较少，且鲜见从原位试验的角度对软土变形特性进行专门研究。

本文以上海地区典型软土为研究对象，进行了一系列的旁压试验，从加载及卸载两个维度对原位土体的变形特性进行分析，得到了原位土体加载情况下的刚度衰减规律及卸荷条件下影响刚度特性的关键因素。该问题的研究丰富了研究人员关于软土特性的认知，为控制地下空间开发中的土体变形问题提供了借鉴。

1 试验方案与分析方法

对上海地区软土开展原位旁压加卸载与室内小应变试验，2 个试验区地层的特性如下表 1 所示。其中浦东机场区域的旁压试验点分布在②₁ 层至⑤₃₋₁ 层之间；宝山试验区域的旁压试验点分布在③₁ 层至⑧₁ 层之间，测试地层均为典型的软土。对于加载部分，采用非线性分析方法，利用旁压加载试验数据获取土体的原位剪切刚度 G 随剪应变 γ 的变化规律，对比室内小应变测试结果，验证其原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线的合理性。对于卸载部分，考虑原位土体卸载过程中卸载模量的非线性，研究各类土层不同卸载等级条件下土体的回弹模量与加载模量之间的内在联系。

1.1 旁压加卸载试验方案

采用图 1 所示的法国梅纳 G 型预钻式旁压仪进行 PMT 试验。利用特制的钻头（钻头直径比旁压器直径大 6 mm）成孔，泥浆中加入膨润土进行护壁，保证成孔质量。测试前需要对旁压膜及仪器综合管路进行校订，测试时需要保证每个测试点位于同一土层中且测试点间距不小于 1.5 m。试验点的加压等级根据该土层的物理力学性质确定。

对于旁压卸载试验，首先按照旁压加载试验步骤加载至土体稳定扩张阶段，然后逐步卸载至加载前荷载水平，最后重新加载至土体破坏阶段，获取旁压卸载试验曲线。本次旁压卸载试验，其卸载等级根据土层性质及荷载水平取 25, 50, 75, 100 kPa。设定每次卸载之后的观测时间为 5 min 以保证土体与旁压膜受力达到完全平衡状态。

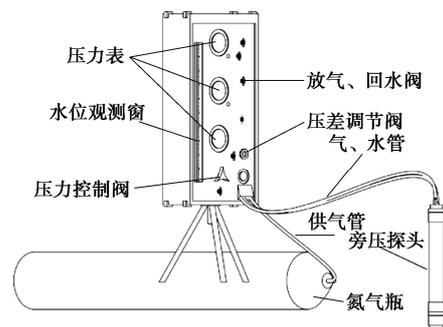


图 1 法国梅纳 G 型预钻式旁压仪组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-drilled pressuremeter (G type)

1.2 室内小应变试验方案

本文利用薄壁取样器，在旁压试验相同深度处钻取相应的土样进行室内 K_0 固结不排水剪切试验。试验采用轴向安装有高精度 LVDT 局部位移传感器的三轴仪，可准确记录取试验过程中测试土样的轴向位移，进而获取土体从小应变到大应变阶段剪切模量变化规

表 1 试验区域地层特性表

Table 1 Formation characteristics in test areas

试验区域	地质时代	土层层号	土层名称	层底深度/m	成因类型	土层描述
浦东 试验区	Q ₄ ³	① ₁₋₁	填土	1.8	人工	以黏性土为主, 含植物根茎、碎石等杂质, 结构松散
		② ₁	粉质黏土	3.3	滨海—河口	含氧化铁条纹及铁锰质结核
		② ₃	砂质粉土	6.8	滨海—河口	含云母, 夹层状黏性土, 土质不均匀
		③ ₁	淤泥质粉质黏土	8.5	滨海—浅海	含云母、有机质, 夹薄层粉性土, 土质不均匀
	Q ₄ ²	③ ₂	砂质粉土	10.9	滨海—浅海	含云母, 夹粉砂、细砂及层状黏性土, 土质不均匀
		④	淤泥质黏土	20.0	滨海—浅海	含云母、有机质、贝壳碎屑, 夹薄层粉砂
	Q ₄ ¹	⑤ ₁	黏土	31.0	滨海、沼泽	含云母、有机质, 夹薄层粉性土, 局部为粉质黏土
		⑤ ₃₋₁	粉质黏土	40.9	溺谷	含云母、有机质, 土质不均
	Q ₃ ²	⑤ ₄	粉质黏土	44.4	溺谷	含氧化铁条纹及铁锰质结核, 夹粉性土
		⑦ ₂₋₂	粉砂	75.0	滨海—河口	含云母, 颗粒组成成分主要以石英、长石等为主, 夹粉性土、细砂
宝山 试验区	Q ₄ ³	① ₁	杂填土	4.0	人工	上部夹植物根茎, 含少量氧化铁斑纹, 结构松散
		② ₁	粉质黏土	5.5	滨海—河口	含铁锰质结核及氧化铁锈斑, 夹少量粉土条带, 土质不均
		③ ₁	淤泥质粉质黏土	8.6	滨海—浅海	含云母及少量有机质斑丝, 夹微薄层状粉土, 土质不均
	Q ₄ ²	④	淤泥质黏土	18.3	滨海—浅海	含云母及少量有机质斑丝, 切面光滑, 土质均匀
		⑤ ₁	黏土	22.0	滨海、沼泽	含云母, 有机质, 见腐植物及半腐植物根茎, 下部为粉质黏土, 土质不均
	Q ₄ ¹	⑤ ₃	粉质黏土	31.5	溺谷	含云母, 有机质, 见腐植物及半腐植物根茎, 局部为黏质粉土或砂质粉土, 土质不均
		⑧ ₁	粉质黏土	46.7	滨海—浅海	含云母, 夹粉砂薄层, 土质不均
	Q ₃ ²	⑧ ₂	粉质黏土与粉砂互层	72.0	滨海—浅海	含云母, 有机质, 氧化铁条文, 夹薄层粉性土, 土质不均

律。小应变三轴仪的详细介绍以及具体试验步骤可参照有关文献[19, 20]。

1.3 分析方法

(1) 基于旁压加载试验的软土剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减分析

众多研究表明, 在一定的剪应变 γ 区间内 ($\gamma=10^{-5} \sim 10^{-1}$), 土体的原位剪切模量 G 与剪应变 γ 之间存在非线性关系^[21-22]。对于旁压试验而言, 根据柱孔扩张理论, 由于旁压探头的总长度与直径的比值大于 6, 可将问题视为平面应变问题, 则剪应变 γ 的表达方式为

$$\gamma = \frac{\Delta S}{S} = \frac{r^2 - r_0^2}{r^2} = \frac{V - V_0}{V} \quad (1)$$

式中 S , ΔS 分别为旁压加载过程中, 探头接触到土体开始扩张时的横截面积以及后续的横截面积变化量; r , r_0 分别为旁压加载过程中, 探头接触到土体开始扩张时的半径以及初始半径; V_0 , V 分别为旁压加载过程中, 探头接触到土体开始扩张时的体积以及当前体积。

已有研究表明^[21], 在旁压扩孔过程中, 其扩孔压

力 P 与剪应变 γ 之间满足幂律函数关系:

$$P = \eta \gamma^\beta \quad (2)$$

将其进行对数转化可得

$$\ln P = \ln \eta + \beta \ln \gamma \quad (3)$$

式中, η 和 β 为待定系数, β 为弹性指数。

进一步地, 根据 Bolton 提出的理论可以得出表征土体刚度特性的割线剪切模量 G_s 与切线剪切模量 G_t :

$$G_s = \alpha \gamma^{\beta-1} \quad (4)$$

$$G_t = \alpha \beta \gamma^{\beta-1} \quad (5)$$

式中, α 为刚度常数, $\alpha = \beta \eta$ 。

通过现场测试可获取各土层扩孔压力 P 与体积 V 变化关系的旁压加载试验曲线, 通过选取合适的拟合方程, 该曲线可通过上述分析过程转换成土体的原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线。同时, 利用室内小应变三轴仪的试验结果获取轴向应力和轴向位移, 计算出试样的变形模量, 进一步推导得出试样的剪切模量 G , 试样的剪应变 γ 取轴向应变的 1.5 倍^[20]。由此获得原位与室内试验分别测得的土体剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线, 两者可进行相互验证。

(2) 基于旁压卸载试验的软土回弹分析

土体在卸荷条件下的回弹呈非线性变化，本次分析采用曲线斜率比值的方法来研究旁压加卸载阶段的模量变化规律，具体为

(1) 按照规范^[23]，根据旁压加载曲线确定试验点土体的旁压模量，计算公式如下：

$$E_m = 2(1+\nu) \left(V_c + \frac{V_0 + V_f}{2} \right) \frac{\nabla P}{\nabla V} \quad (6)$$

式中 ν 为土体的泊松比； V_c 为旁压测试腔的固有体积； P_0 和 P_f 分别为原位侧向应力及临塑压力； V_0 和 V_f 分别为原位侧向应力及临塑压力对应的体积。

(2) 为了对比旁压加卸载两种情况下曲线斜率的变化，在旁压加载点相同深度的邻近钻孔实施旁压卸载。由上述公式可知，同一土层相同深度处的土体参数 ν ， V_c ， V_0 和 V_f 是固定的，因此 $\nabla P / \nabla V$ 是影响旁压模量 E_m 的决定性因素。此时旁压加卸载曲线上加载段与卸载段的切线斜率的比值（如图 2， K_1/K_2 ）可以一定程度上代表旁压加载模量与卸载模量内在联系。根据相关规范^[23]，旁压模量 E_m 可以通过经验系数的换算公式得到该处土体的压缩模量 E_s ，当假定旁压加卸载试验推算的卸载模量与回弹模量之间存在相同的关系到时，下式恒成立：

$$E_v = E_{mur} / E_m = E_{ur} / E_s \quad (7)$$

式中， E_v 为模量比， E_{mur} 为根据旁压试验得到的当前卸载模量， E_m 为当前旁压模量， E_s 和 E_{ur} 分别为由旁压试验得出的压缩模量与卸载模量。

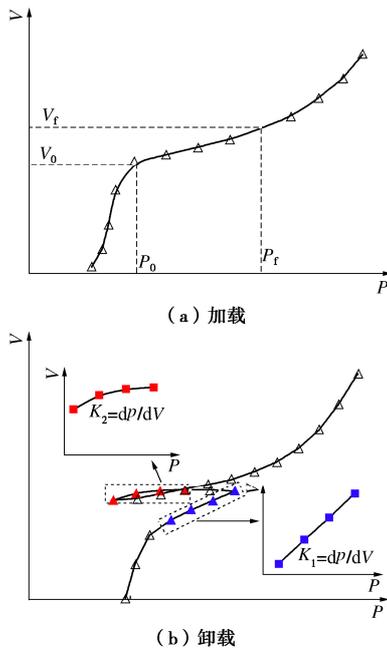


图 2 某深度处典型旁压加载及卸载试验曲线

Fig. 2 Typical curves of pressuremeter tests at a certain depth

(3) 按照有关研究^[12]，定义卸载比 R ：

$$R = (P_{max} - P_i) / P_{max} \quad (8)$$

式中， P_{max} 为卸载前的最大加载压力， P_i 为当前压力。

此时综合式 (2)，(3)，将卸载比 R 定义为自变量，模量比 E_v 定义为因变量，可以得到不同卸载条件下，土体卸载模量随着卸载比的变化规律。

2 试验结果分析

2.1 旁压加载试验结果分析

(1) 上海地区软土原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线

在上海浦东机场与宝山两个区域共进行 14 组旁压加载试验，曲线如图 3 所示。利用 1.3 节中 (1) 部分章节中提及的数据处理方式，得到了各试验点扩孔压力 P 与剪应变 γ 之间双对数曲线，如图 4 所示。

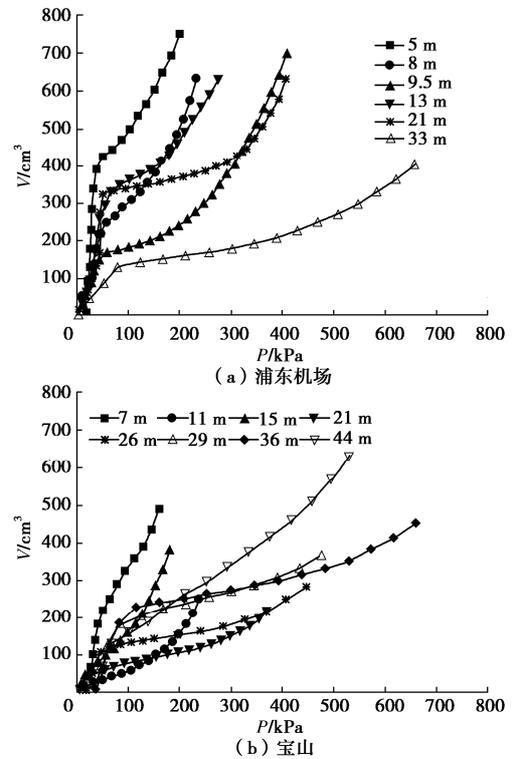
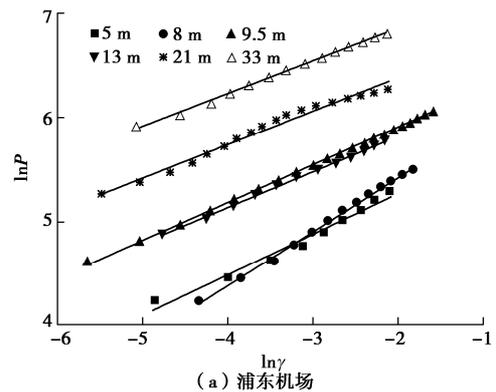


图 3 试验区域各试验点旁压加载曲线

Fig. 3 Results of pressuremeter tests at a certain depth



(a) 浦东机场

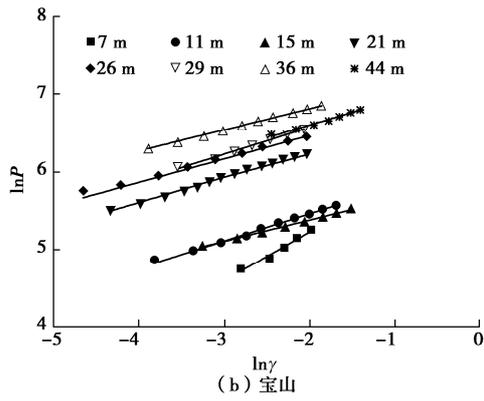


图 4 试验区各试验点 $P-\gamma$ 双对数曲线

Fig. 4 Double logarithmic curves of $P-\gamma$ at a certain depth

由图 4 可知, 旁压试验成果换算的 $P-\gamma$ 双对数曲线呈直线, 采用线性拟合的方式可得各曲线拟合参数, 见表 2。

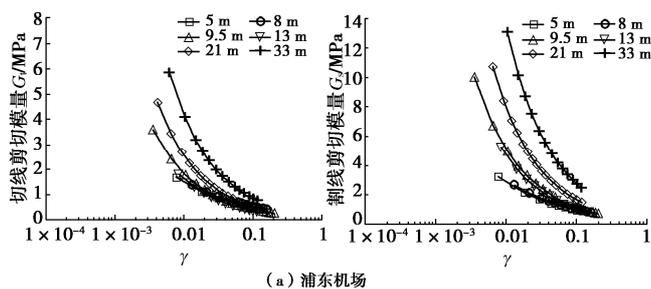
表 2 试验区各试验点 $P-\gamma$ 双对数曲线拟合方程参数表

Table 2 Fitting parameters for double-logarithmic curve of $P-\gamma$

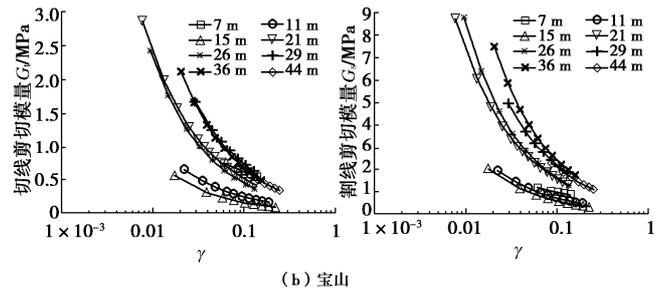
at each test site

试验区	深度/m	β	$\ln \eta$	α /MPa	$\alpha\beta$
浦东机场	5.0	0.410	5.90	0.15	0.062
	8.0	0.550	6.23	0.28	0.154
	9.5	0.380	6.45	0.24	0.091
	13.0	0.350	6.34	0.20	0.070
	21.0	0.330	6.87	0.32	0.106
	33.0	0.330	7.30	0.49	0.162
宝山	7.0	0.630	6.50	0.42	0.264
	11.0	0.338	6.13	0.16	0.052
	15.0	0.277	5.90	0.10	0.028
	21.0	0.330	6.90	0.33	0.108
	26.0	0.277	7.00	0.30	0.084
	29.0	0.338	7.23	0.47	0.158
	36.0	0.283	7.40	0.46	0.131
	44.0	0.310	7.20	0.42	0.129

进一步地, 在 $P-\gamma$ 双对数曲线线性拟合的基础上, 可以获取表征土体刚度特性的割线剪切模量 G_s 与切线剪切模量 G_t 随剪应变 γ 的变化关系, 如图 5 所示。



(a) 浦东机场



(b) 宝山

图 5 试验区各深度 G_t 与 G_s 随剪应变 γ 的变化关系图

Fig. 5 Changing curves of G_t and G_s with γ

若干研究表明^[20, 22], 当采用剪切模量与剪应变方式来描述土体非线性变化时, Stokoe 方程及 Hardin-Drnevich 方程可以很好地表示土体剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减的整个过程。本文通过比选, 采用 Stokoe 方程来拟合原位测试数据, 其方程的基本表达式如下式所示:

$$G = \frac{G_{\max}}{\left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_f}\right)^c}, \quad (9)$$

式中, G_{\max} 为土体小应变初始剪切模量, γ_f 为参考剪应变, c 为特定参数, 决定了曲线弯曲程度。

利用试验区各深度 G_t 随剪应变 γ 的变化数据反演得出 Stokoe 方程描述原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线各参数取值, 如表 3 所示。

表 3 Stokoe 方程描述原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线参数表

Table 3 Fitting parameters of $G-\gamma$ curve at each test site

试验区	深度/m	G_{\max} /MPa	γ_f /(10^{-5})	c
浦东机场	5.0	13.7	11.0	0.590
	8.0	22.7	1.5	0.450
	9.5	48.0	4.1	0.620
	13.0	23.8	13.0	0.650
	21.0	68.5	6.0	0.670
	33.0	54.2	17.6	0.674
宝山	7.0	7.4	12.7	0.372
	11.0	20.0	12.9	0.664
	15.0	22.7	11.0	0.725
	21.0	77.0	5.8	0.670
	26.0	75.3	8.5	0.726
	29.0	57.6	14.0	0.664
	36.0	54.4	23.0	0.720
	44.0	10.6	182.0	0.700

Stokoe 方程描述的试验区各深度原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 利用 Stokoe 方程能够合理描述旁压试验结果, 但需指出, 利用 G 型预钻式旁压仪获取的试验数据其土体剪应变测量精度只能达到 10^{-3} 数量级。为了进一步验证该拟合的合理性, 在同一土层相同或相近深度钻取土样, 进行室内小应变测试。

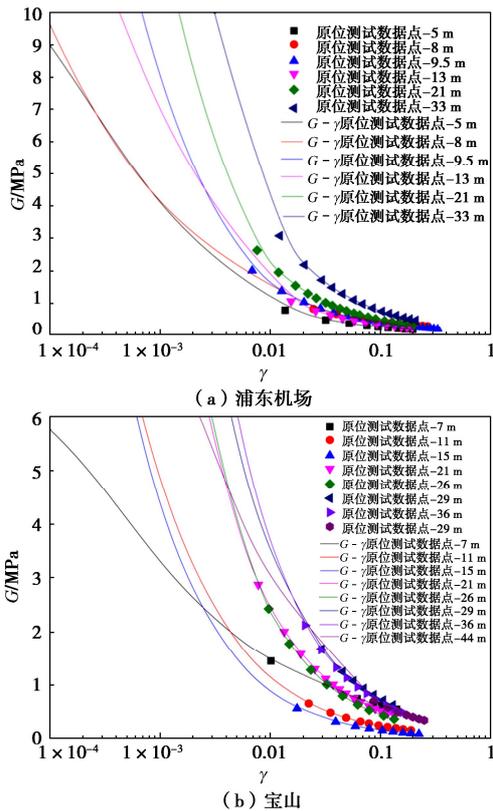


图6 浦东机场及宝山试验区各深度剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减拟合曲线

Fig. 6 Fitted curves of $G - \gamma$ at a certain depth in Pudong Airport and Baoshan plot

(2) 室内小应变与原位测试结果对比分析

为了验证利用旁压加载试验数据推得土体剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减的合理性, 在试验区若干对应深度取样并进行室内小应变测试, 试验结果如图 7 所示。其中, 浦东机场试验区土体的取样深度为 13.5, 21.0, 33.5 m, 分别对应浦东机场试验区旁压试验深度 13.0, 21.0, 33.0; 宝山试验区土体的取样深度为 15.5, 28.0, 34.5 m, 分别对应宝山试验区旁压试验深度 15.0, 29.0, 36.0 m。

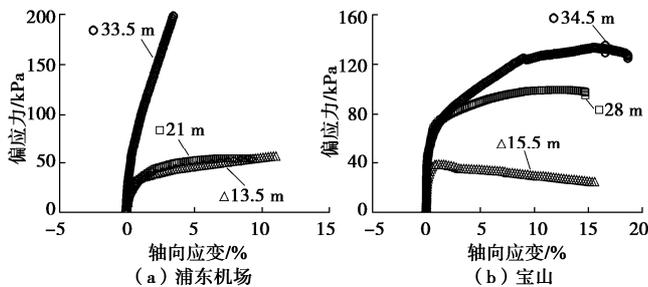


图7 浦东机场及宝山试验区小应变三轴剪切试验应力 - 应变关系曲线

Fig. 7 Strain-stress curves of triaxial CD tests in Pudong Airport and Baoshan plot

通过 Stokoe 方程拟合的旁压测试曲线与室内试

验小应变测试结果在本次研究中表现出较好的一致性, 如图 8, 9 所示。拟合曲线基本上能够对应小应变刚度随着剪应变的变化规律, 推求的初始剪切刚度也与室内测试结果大致相当。两种方式的对比结果基本上验证了针对上海地区软土, 利用旁压试验推求土体原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减规律的合理性。

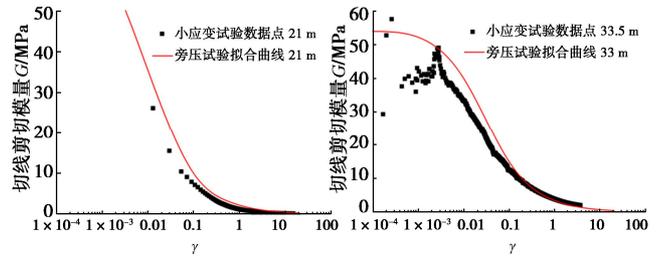


图8 浦东机场深度 21 m 及 33/33.5 m 原位旁压试验拟合曲线与小应变数据对比

Fig. 8 Comparison of PMT fitted curves of $G - \gamma$ at depth of 21 m and 33/33.5 m with small-strain test data in Pudong Airport plot

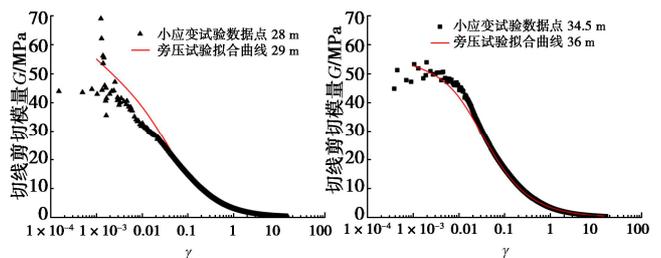


图9 宝山深度 28/29 m 及 34.5/36 m 原位旁压试验拟合曲线与小应变数据对比

Fig. 9 Comparison of PMT fitted curves of $G - \gamma$ at depth of 28/29 m and 34.5/36 m with small-strain test data in Baoshan plot

与此同时, 需要注意到, 浦东机场试验区 13 m 及宝山试验区 15 m 两个测试点的拟合曲线与小应变测试结果具有较大的差异, 如图 10 所示。其中浦东机场原位拟合曲线在土体小应变 $\gamma > 0.001$ 的范围内与室内测试结果较为吻合, 但在更小的剪应变区间逐步产生差异, 原位拟合曲线明显大于室内小应变测试结果, 两者初始剪切模量相差近 1 倍, 分析认为: 造成该试验点曲线差异的主要原因是室内试验取样过程中土样受到一定程度的扰动, 扰动对土样小应变阶段刚度特性影响明显。宝山试验区原位拟合曲线其初始剪切模量与室内测试结果相当, 但刚度随剪应变的衰减过程明显不同: 旁压拟合曲线的衰减趋势更加明显, 整个剪应变阶段对应的剪切模量均小于室内测试结果。曲线出现这种趋势差异的主要原因是孔壁钻探扰动程度相较于室内样品扰动要更大。总的来说, 浦东机场及宝山两地该试验点土层属于④层淤泥质土, 无论是原位钻探或薄壁取样, 土体易受到一定程度的扰

动, 扰动因素对土体在小应变阶段刚度特性有显著影响。

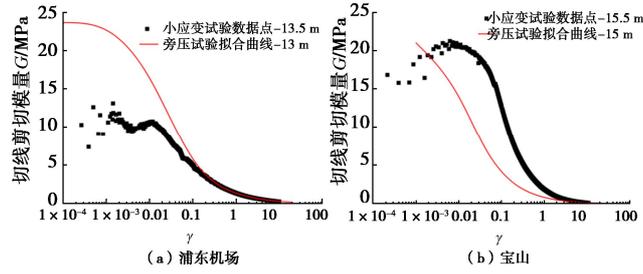


图 10 原位旁压试验拟合曲线与小应变数据对比
Fig. 10 Comparison of PMT fitted curves of $G - \gamma$ with small-strain test data

综上所述, 通过旁压试验能够合理地获取上海软土原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减规律。同时, 由于软土是一种结构性土, 扰动对于土体刚度特性的影响不可忽视, 相对而言其刚度特性在剪应变较大条件下预测更为准确。

2.2 旁压卸载试验结果分析

为了研究土体原位卸荷回弹变形特性, 在若干地块进行旁压卸载试验, 详细的试验参数见表 4。

采用本文提出的关于旁压卸载数据的处理方式, 获得了上海几个典型软土地层 $R - \lg E_v$ 关系曲线, 如图 11 所示。由图 11 可知, ④层、⑤₁层、⑤₂层及⑤₃层土体模量比 E_v 的对数与卸载比 R 之间呈明显的线性变化关系, 且随着卸载比的增大, 土体的模量比逐渐减小, 即随着卸载的增大, 土体的回弹模量逐渐减小, 土体的回弹变形更大。

表 4 旁压卸载试验参数取值表

Table 4 Parameters setting for unloading pressuremeter tests

土层	浦东机场		御桥		提篮桥		前滩	
	测试深度/m	卸载等级/kPa	测试深度/m	卸载等级/kPa	测试深度/m	卸载等级/kPa	测试深度/m	卸载等级/kPa
④层淤泥质黏土	11.0	25			16.0	25		
	15.3	50	16	50	17.5	75	—	—
	18.0	50			—	—		
⑤ ₁ 层粉质黏土	24.2	50			22.0	75		
	27.0	50	21	25	22.5	50	—	—
	27.4	25			23.5	100		
⑤ ₂ 层砂质粉土夹粉质黏土	—	—	24.8	50	—	—	24	100
⑤ ₃ 层粉质黏土	38.0	50			32	50		
	37.1	100	—	—	33	75	—	—
	—	—			34	100		

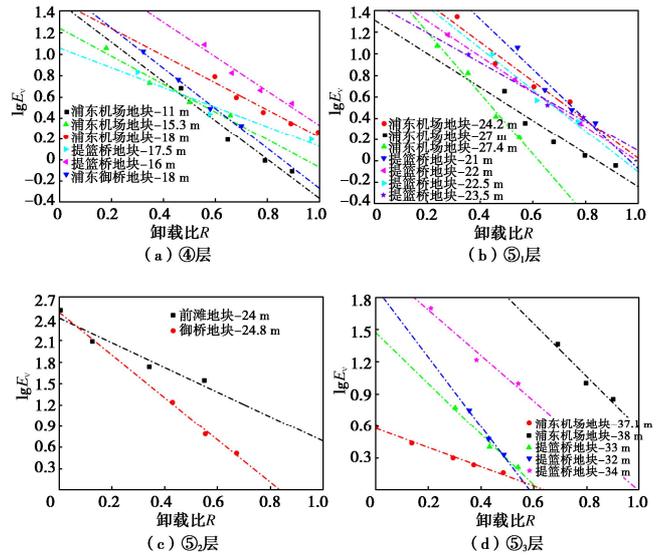


图 11 基于旁压卸载试验的上海软土 $R - \lg E_v$ 关系曲线

Fig. 11 Fitted curves of $R - \lg E_v$ based on unloading pressuremeter tests

由于每层土的旁压试验深度及卸载等级均有所不同, 获取的同一土层的 $R - \lg E_v$ 关系曲线也各有差异, 但均可用下式进行描述:

$$\lg E_v = m \times R + n \quad (10)$$

即

$$E_v = 10^n \times 10^{m \cdot R} \quad (11)$$

式中, m 为卸载等级指数, n 为载荷指数。

根据式 (10), 对 $R - \lg E_v$ 关系曲线进行拟合, 得到若干典型深度的曲线拟合参数, 见表 5。由表 5 可知, 对于同一土层相同卸载等级, $R - \lg E_v$ 关系曲线表征斜率的 m 值大致相当, 例如: 浦东机场④层试

验深度 15.3 m 与 18 m 两组试验, m 值相差 2.3%; ⑤₁ 层试验深度 24.2 m 与 27 m 两组试验, n 值相差 3.6%。有理由确定旁压试验的卸载等级决定了 $R - \lg E_v$ 关系曲线的斜率。上述两组试验曲线截距 n 值并没有表现出明显的关联性(浦东机场④层试验深度 18 m 处的拟合曲线 n 值较 15.3 m 更大,而在⑤₁层试验深度 27 m 处数值较 24.2 m 却更小)。根据试验记录:④层深度 18 m 处土体卸载前的最大载荷为 222 kPa, 15.3 m 处对应的载荷为 280 kPa; ⑤₁层深度 27 m 处土体卸载前的最大载荷为 406 kPa, 24.2 m 处对应的载荷为 327 kPa。由此可推测,截距 n 值与试验点深度无直接关联,主要受卸载前的载荷水平影响且载荷越大, $R - \lg E_v$ 拟合曲线截距越小。

对于同一土层近似深度的拟合数据(提篮桥地块⑤₁层及⑤₃层试验数据)可知:随着卸载等级的增大, m 的绝对值逐级减小,拟合曲线趋向于平缓,这也从侧面证明了土体回弹模量的减小。

表 5 $R - \lg E_v$ 关系曲线拟合参数表

Table 5 Fitting parameters of $R - \lg E_v$ curve at each test depth					
试验区域	土层	试验深度/m	卸载等级/kPa	m	n
浦东机场	④层	15.3	50	-1.31	1.25
		18	50	-1.28	1.5
	⑤ ₁ 层	24.2	50	-1.71	1.83
		27	50	-1.65	1.3
提篮桥	⑤ ₁ 层	21	25	-2.33	2.25
		22	75	-1.64	1.63
	⑤ ₃ 层	22.5	50	-1.92	1.82
		32	50	-3.23	1.89
	⑤ ₃ 层	33	75	-2.37	1.47
		34	100	-2.01	2.10

总的来说,对于土体卸载而言,可依据原位测试结果,参照本文的推荐方法(结合式(7),(11)),在确定某深度处土体压缩模量 E_s 的基础上,大致确定该处土体回弹模量 E_{ur} 的大小。

3 结 论

针对上海地区典型软土地层开展一系列旁压加卸载试验,得到了关于原位土体变形特性的 3 点结论,可为实际工程设计与施工提供相关依据:

(1) 可利用旁压加载试验获取土体剪切模量 G 与剪应变 γ 之间的非线性变化关系,采用 Stokoe 方程能够很好的描述软土剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减过程。但本次原位测试结果,其土体剪应变 γ 测量精度只能达到 10^{-3} 数量级。

(2) 与室内小应变测试结果的对比分析表明了原位剪切模量 G 随剪应变 γ 衰减曲线的合理性,但对于④层淤泥质土,无论是原位钻探或薄壁取样,土体易受到一定程度的扰动,扰动因素对土体在小应变阶段

刚度特性有显著影响。

(3) 上海地区软土的旁压卸载试验表明:对于同一土层,随着卸载的增大,土体的回弹模量逐渐减小。土体 $R - \lg E_v$ 拟合曲线呈线性关系,曲线的斜率与截距分别与土体卸载等级和卸载前载荷水平有关,具体关系还需后续研究加以揭示。

参考文献:

- [1] 高峰. 深基坑开挖对相邻建筑结构内力影响的研究[D]. 北京:北京工业大学,2007. (GAO Feng. Study of the Effect on Inner Force of Adjacent Building Caused by Deep Excavation Engineering[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [2] 汪小兵,贾坚. 深基坑开挖对既有地铁隧道的影响分析及控制措施[J]. 城市轨道交通研究,2009,12(5): 52-57. (WANG Xiao-bing, JIA Jian. The influence of deep foundation pit excavation on nearby metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(5): 52-57. (in Chinese))
- [3] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(6): 1092-1101. (WANG Ru-lu, ZHANG Dong-mei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092-1101. (in Chinese))
- [4] 徐中华,宗露丹,沈健,等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊1): 41-44. (XU Zhong-hua, ZONG Lu-dan, SHEN Jian, et al. Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 41-44. (in Chinese))
- [5] 王学营,岳夏冰,惠冰. 轴向循环加载卸载条件下饱和软土变形特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5): 230-235. (WANG Xue-ying, YUE Xia-bing, HUI Bing. Study of deformation of saturated soft soil under axial cyclic loading and unloading[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 230-235. (in Chinese))
- [6] 何程铃,刘红军. 珠三角西部软土变形特性试验研究[J]. 五邑大学学报(自然科学版),2019,33(4): 29-34. (HE Cheng-ling, LIU Hong-jun. An experimental study of deformation characteristics of soft soil in the western Pearl River Delta[J]. Journal of Wuyi University (Natural Science Edition), 2019, 33(4): 29-34. (in Chinese))
- [7] 罗智斌. 基于有限特征比理论的软土变形特性研究[D]. 广州:广东工业大学,2015. (LUO Zhi-bin. Finite Characteristic

- Ratio Theory Study on the Deformation Behavior of Soft Soil[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [8] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2283 - 2290. (WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2283 - 2290. (in Chinese))
- [9] 周秋娟, 陈晓平. 典型基坑开挖卸荷路径下软土三轴流变特性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1299 - 1305. (ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Research on rheological properties of soft clay under typical pit unloading paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1299 - 1305. (in Chinese))
- [10] 李德宁, 楼晓明, 杨 敏. 上海地区基坑开挖卸荷土体回弹变形试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 244 - 249. (LI De-ning, LOU Xiao-ming, YANG Min. Experimental researches on unloading resilient deformation properties during excavations in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 244 - 249. (in Chinese))
- [11] GIBSON R E, ANDERSON W F. In situ measurement of soil properties with the pressuremeter[J]. Civil Engineering Public Works Review, 1961, **56**: 615 - 618.
- [12] BAGUELIN F. The pressuremeter and foundation engineering[J]. Engineering Geology, 1978, **17**(1): 67 - 69.
- [13] COLLINS I F, YU H S. Undrained cavity expansions in critical state soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, **20**(7): 489 - 516.
- [14] YU H S. Interpretation of pressuremeter unloading tests in sands[J]. Géotechnique, 1996, **46**(1): 17 - 31.
- [15] 赵善锐, 楚华栋. 用旁压剪切模量推算砂性土地基的变形模量[J]. 西南交通大学学报, 1993, **28**(3): 10 - 14. (ZHAO Shan-ru, CHU Hua-dong. Estimation of the deformation-modulus in sandy soils by the shear-modulus of pressuremeter test[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993, **28**(3): 10 - 14. (in Chinese))
- [16] 刘小生, 汪小刚, 马怀发, 等. 旁压试验反演邓肯-张模型参数方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(5): 601 - 606. (LIU Xiao-sheng, WANG Xiao-gang, MA Huai-fa, et al. Study on back-analysis method of constitutive parameters for Duncan-Chang model based on in situ pressuremeter tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 601 - 606. (in Chinese))
- [17] FAHEY M, SCHNEIDER J A, LEHANE B M. Self-boring pressuremeter testing in spearwood dune sands[J]. Australian Geomechanics, 2007, **42**(4): 57 - 71.
- [18] 安 然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 确定残积土原位 $G-\gamma$ 衰减曲线的建议方法与适宜性分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(12): 4429 - 4436. (AN Ran, KONG Ling-wei, LI Cheng-sheng, et al. A proposed method to determine in situ shear modulus and its degradation for granite residual soil and the suitability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(12): 4429 - 4436. (in Chinese))
- [19] 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, **37**(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, **37**(S2): 37 - 40. (in Chinese))
- [20] 杨同帅, 叶冠林, 顾琳琳. 上海软土小应变三轴试验及本构模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1930 - 1935. (YANG Tong-shuai, YE Guan-lin, GU Lin-lin. Small-strain triaxial tests and constitutive modeling of Shanghai soft clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1930 - 1935. (in Chinese))
- [21] BOLTON M D, WHITTLE R W. A non-linear elastic/perfectly plastic analysis for plane strain undrained expansion tests[J]. Géotechnique, 1999, **49**(1): 133 - 141.
- [22] 安 然, 黎澄生, 孔令伟, 等. 花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 109 - 116. (AN Ran, LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, et al. Effects of drilling disturbance and unloading lag on in situ mechanical characteristics of granite residual soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 109 - 116. (in Chinese))
- [23] 地基旁压试验技术标准: JGJ/T 69—2019[S]. 2019. (Technical Standard for Foundation Pressuremeter Test: JGJ/T 69—2019[S]. 2019. (in Chinese))