

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.023

海相沉积软土的自钻式旁压试验及原位力学特性

王进^{1,2,3}, 朱泽奇¹, 陈健¹, 付晓东¹, 房强^{1,4}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430071; 2. 四川高速公路建设开发总公司, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 四川省交通运输厅 公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 海相沉积软土广泛分布于我国沿海地区, 是典型的结构性土, 具有灵敏度高、承载能力低等特点。通过自钻式旁压试验调查软土场地的原位力学特性, 获得了 29.0 m 深度范围软土层的原位水平应力、临塑压力、不排水抗剪强度、剪切模量等力学指标。结果表明, 软土的旁压试验曲线可分为应力平衡阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段 4 个阶段; 破坏阶段之前软土的卸载会造成有效应力的显著降低, 在工程实践中对软土卸载过程的稳定性应予以关注; 软土的剪切模量具有明显的非线性特征, 采用非线性分析法得到的剪切模量较为合理。通过对试验结果的拟合, 建立了原位水平应力和临塑压力随深度变化的经验公式, 可为工程中该两类参数的确定提供参考依据。

关键词: 软土; 自钻式旁压试验; 原位水平应力; 临塑压力; 不排水抗剪强度; 剪切模量

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0195 - 08

Study of in-situ mechanical properties of littoral deposit soft soil by self-boring pressuremeter

WANG Jin^{1,2,3}, ZHU Ze-qi¹, CHEN Jian¹, FU Xiao-dong¹, FANG Qiang^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Sichuan Expressway Construction & Development Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Department of Transportation, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Marine sediment soft soil is one kind of typical structure soil with high sensitivity and low bearing capacity, widely distributed in the coast area of China. The In-situ mechanical properties of soft soil site are tested in the depth range of 29 meters through self-boring pressuremeter test. The in situ horizontal stress, critical plastic stress, undrained shear strength and shear modulus, etc. are obtained. The curves of pressuremeter test show four stages of soil, including stress balance stage, elastic stage, plastic stage and failure stage. Unloading reduces the effective stress of soft soil significantly before the last stage; much attention should be paid to the stability of soft soil during unloading process in engineering practice. Based on the obvious nonlinear characteristic of soft soil's shear modulus, it is more reasonable to get shear modulus by using nonlinear analysis method. On the basis of the experimental results, using fitting methods to set up empirical formulas of in situ mechanical properties and critical plastic stress varying with depth, so as to provide a reference instruction for the determination of the parameters in engineering.

Keywords: soft soil; self-boring pressuremeter test; in-situ horizontal stress; critical plastic stress; undrained shear strength; shear modulus

1 引言

深厚海相沉积软土地层在我国沿海城市分布较广, 对沿海城市的工程建设造成了不利影响。海积软土是在近代海水环境中缓慢沉积并经长期生物化学作用形成的, 沉积颗粒以黏粒为主, 是典型的结构性土。海积软土工程性质独特, 对于其力学参

数的获取一直是关注的重点。目前主要采用室内试验的方法获取其力学参数用于生产实践和科学研究, 然而室内试验对这种结构性土的扰动是不可忽略的。沈珠江^[1]认为原位测试是获得可靠土性参数的有效手段。原位测试具有不需取样、连续测试等优点, 通过对基本保持天然结构、天然含水率以及天然应力状态的原位岩土体进行相关试验, 测定其

收稿日期: 2016-10-13;

基金项目: NSFC-云南联合基金重点项目(No.U1402231); 国家自然科学基金资助项目(No.41102200)。

This work was supported by the Key Program of Joint Found of Yunnan Province(U1402231) and The General Program of National Natural Science Foundation of China(41102200).

第一作者简介: 王进, 男, 1990年生, 博士研究生, 主要从事岩土原位测试方面的研究工作。E-mail: wangjin6878@qq.com

通讯作者: 朱泽奇, 男, 1980年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊岩土体力学性质方面的研究工作。E-mail: zqzhu@whrsm.ac.cn

的工程力学特性指标, 有效地避免取样过程中应力释放的问题, 得到的结果更符合实际^[2-3]。近些年来, 随着原位测试仪器技术及相关理论方法的发展, 原位测试在获取土体力学参数的工作中获得广泛的应用^[4], 针对软土地层已开展了静力触探 (CPT)、扁铲侧胀 (DMT)、预钻式旁压 (PMT) 试验^[5-7], 但 CPT 和 DMT 得到的土性参数有限, 无法直接获得表征土的抗剪强度指标。PMT 测试需进行先期预钻, 获得的结果易受成孔质量的影响。20 世纪 70 年代剑桥大学 Hughes 和 Wroth 研制出自钻式旁压试验系统 (SBPT), 最大的优点就是钻进后不用提钻直接测试, 有效地降低了对土体的扰动, 在加载控制系统和数据采集系统的精度上都有较优越的性能。国内对自钻式旁压仪的应用较少, 仅开展了针对黏土^[8]和残积土^[9]力学特性的试验, 均获得了有益的成果。

本次对典型的深厚淤泥软土层开展了自钻式旁压测试, 利用圆孔膨胀理论的成果, 获得不同深度下软土的应力-应变关系、原位水平应力、不排水抗剪强度和剪切模量等结果, 分析了上述指标随深度的变化规律, 可为软土地区相关工程建设参数的选取提供依据。

2 仪器简介

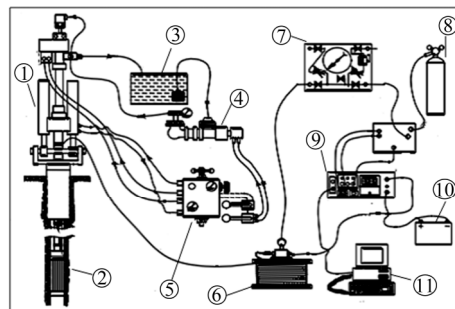
本次试验采用剑桥大学研制委托英国 Cambridge Insitu 公司生产的剑桥三臂自钻式旁压仪 (MKVIII d 型)。仪器相关参数见表 1, 包括自钻系统、测试系统、加载控制系统、动力系统和数据采集系统, 如图 1 所示。

表 1 仪器指标参数

参数	量值
最大压力/MPa	4
初始腔直径/mm	88.5
最大膨胀径程/mm	8
变形测量精度/ μm	1
加载压力控制精度/kPa	1

杨超^[5]进行预钻式旁压试验时发现, 淤泥质黏土等软土在自然状态下处于软塑或流塑状态, 由于水平应力的作用, 常出现缩孔现象。缩孔是导致旁压试验误差的主要原因, 由于必须采用先期钻孔的试验方法, 但预钻式旁压仪难以解决缩孔现象。试验探头是加载和数据测量的元件, 自钻式旁压仪是将探头设置在钻头后部, 实现不提钻直接测量。如

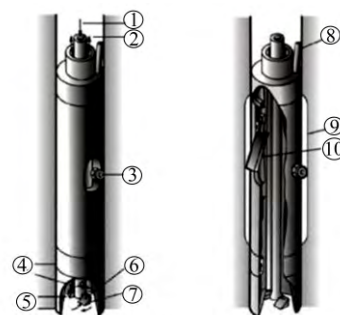
图 2 所示, 探头被 2 层膜所覆盖, 内膜由封闭的聚氨酯材料制成, 形成压力舱室。外部设有一套不锈钢条, 兼具保护膨胀膜和减小钻进阻力的作用。膜上装有 2 个对称分布的孔隙水压力传感器, 试验过程中始终与土体保持接触, 用于孔隙水压力的测量。膜内均匀分布着 3 个微米级的触壁式电测传感器, 用于测量膨胀膜的径向位移。



1-自钻系统; 2-测试探头; 3-水源; 4-水泵; 5-动力系统; 6-线圈; 7-加载控制系统; 8-氮气瓶; 9-数据采集系统; 10-36V 供电电瓶; 11-数据接收存储系统

图 1 剑桥自钻旁压仪系统示意图

Fig.1 Sketch of Cambridge self-boring pressuremeter system



1-4 钻进液; 2-进水管路; 3-孔隙水压力传感器; 5-靴端; 6-排出土体; 7-切削刀头; 8-多芯线缆; 9-膨胀膜; 10-位移臂传感器

图 2 测试探头示意图

Fig.2 Sketch of configuration of test probe

3 测试与分析

3.1 操作流程

试验流程包含以下步骤:

钻进。通过仪器的自钻功能, 将钻头钻进至测试点位, 静置 30 min, 使钻进造成的超孔隙水压力得以消散。

加载。根据软土的应力、应变特点, 在初始阶段, 采用应力控制的加载方式, 当土体进入屈服阶段后, 迅速改为应变控制的加载方式。这样做的目的是使初始和塑性变形阶段采集到的数据均匀。另外, 为了使整个试验过程中土体处于不排水的状态, 将应变速率控制在 1%/min。

循环加卸载。为了获得不排水剪切模量,

需要在变形的不同阶段进行卸载再加载操作，以 2 次循环为宜。卸载值应与被测土体的剪切强度相当，以确保循环过程中土的变形处于弹性范围。

结束。以土体进入破坏阶段或径向应变不超过 10% 为标准，达到上述条件之一即可终止加载，进行完全卸载。当显示膨胀腔内压力降至零以下时保存数据，并继续按照步骤进行下一个深度的试验。

3.2 试验结果分析

本次试验位于我国沿海某深厚软土地区，根据相关现场资料给出钻孔柱状图如图 3 所示，软土的物理力学指标见表 2，将试验区划分为 3 套地层。本次试验共进行了 2~29 m 共 13 个测点的旁压试

文重点研究 6~29 m 深度内各测点的测试结果（共 11 个测点），以揭示淤泥软土的原位力学特性。由于本次只进行了单孔试验，仅用于对软土旁压试验曲线特征和原位力学参数一般规律的研究。

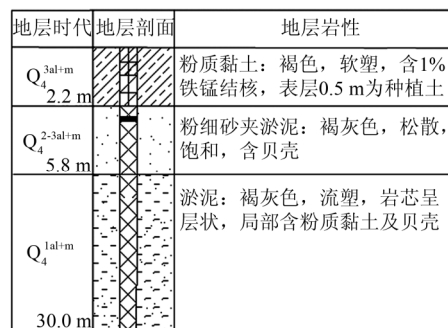


图 3 钻孔柱状图

Fig.3 Bore hole columnar section

表 2 海相沉积软土的物理力学特性指标

Table 2 Physico-mechanical properties of marine sediment soft soil

深度 /m	天然含水率 w /%	天然密度 ρ / (g/cm ³)	干密度 ρ _d / (g/cm ³)	天然孔隙比 e ₀	液限 w _L /%	塑限 w _p /%	塑性指数 I _p /%	液性指数 I _L
1.2~2.5	46.4	1.69	2.74	1.374	46.2	26.3	19.9	1.01
7.2~7.5	49.0	1.68	2.73	1.421	39.8	24.9	14.9	1.62
12.2~12.5	43.0	1.66	2.70	1.326	32.4	23.6	8.8	2.20
17.7~18.0	53.9	1.68	2.75	1.519	50.9	27.4	23.5	1.13
22.9~23.2	54.1	1.63	2.75	1.600	48.5	27.4	21.1	1.27
28.0~28.3	43.6	1.75	2.73	1.240	43.3	27.6	15.7	1.02

验，

3.2.1 应力-应变曲线

图 4 为具有代表性的应力-应变关系曲线，根据曲线形状可将软土的旁压应力-应变曲线划分为应力平衡阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段 4 个阶段。第一阶段为无变形阶段，后 3 个阶段为有变形阶段。应力平衡阶段腔内压力从 0 增加到该处初始应力值，径向应变始终为 0，曲线形状为一条

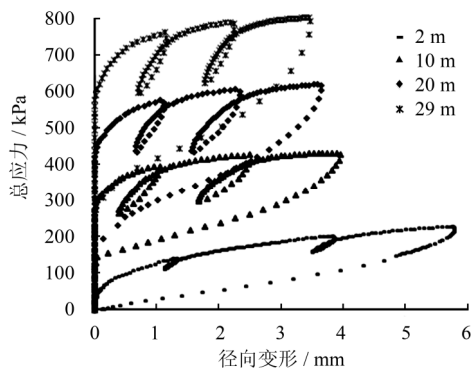


图 4 径向总应力-变形关系

Fig.4 Relationships between of total pressure and radial deformation

竖直向上的直线。弹性阶段应力-应变的线性变化，曲线形状为向上倾斜的直线，发现软土的弹性阶段非常短，径向应变在 0.5 mm 以下。塑性阶段应力-应变曲线斜率逐渐减小到 0，曲线形状为上凸的弧线。破坏阶段表现为随着应变的增加，应力不再增加的水平直线。

图 5 为不同深度下软土的总应力、有效应力、孔隙水应力与径向变形的对比。从图中可以看出，应力平衡阶段有效应力和孔隙水应力均开始产生，应力平衡阶段结束时试验所激发的孔隙水应力大小随深度的增加而增大。径向变形进入弹性阶段后，孔隙水应力的增速表现为快速衰减。进入塑性阶段后，孔压的增速经过弹性阶段的衰减已经变得十分缓慢，增加到一定程度后则开始缓慢降低，开始下降的位置与破坏阶段的起点基本一致，说明软土的破坏会伴随着孔隙水应力的降低。加卸载循环阶段软土的孔隙水应力表现为较低的变化幅值，有效应力显著降低，可能是由于软土的低渗透性造成。

为了更好地表示孔隙水应力随总应力的变化规律，删除加卸载循环和完全卸载段数据点后的曲线如图 6 所示。分析可知，加载过程中孔隙水应力

有随总应力先增大后减小的趋势，峰值的大小随深度的增加而增加。孔隙水应力的增速随着总应力的增加不断提高，8 m 处的土体孔隙水应力的增速变化较小，12 m 深处的土体表现为 3 段斜率逐渐增加的直线，18 m 处的土体的孔隙水应力的变化在总应力 375 kPa 左右的位置发生了快速升高。

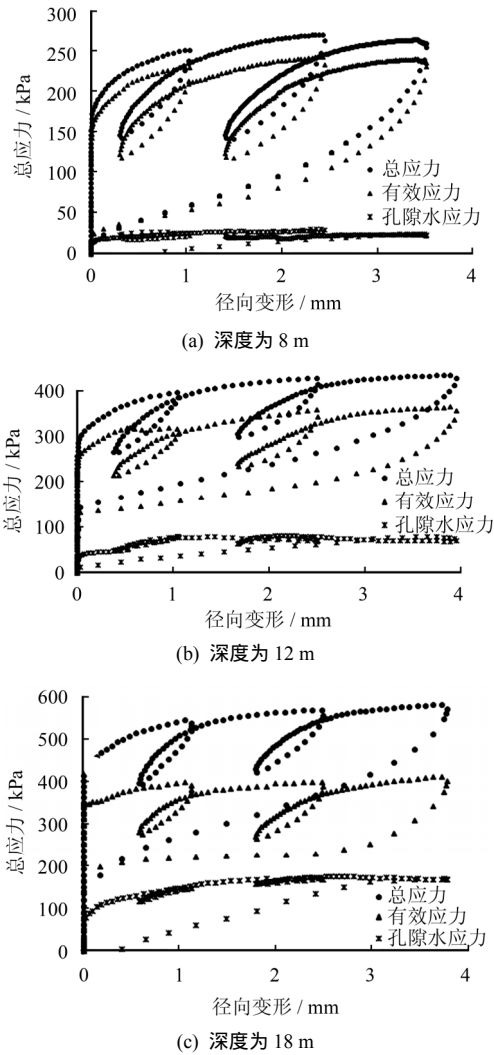


图 5 总应力、有效应力和孔隙水应力-径向变形关系
Fig.5 Relationships among total pressure, effective pressure, pore water pressure and radial deformation

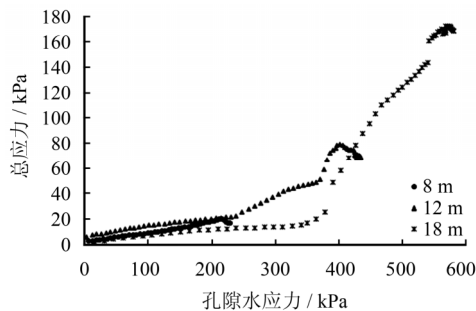


图 6 不同深度孔隙水应力与总应力的关系
Fig.6 Relationships between pore water pressure and total pressure under different depths

3.2.2 原位水平应力 P_0

土体的原位水平应力是指土体在某一深度下稳定平衡时在水平方向受到的应力值，确定自钻式旁压试验原位水平应力的方法有观察法 (Lift-off 法) 和迭代法 (Marsland-Randolph 法^[10], M-R) 等。观察法基于自钻式旁压为无扰动的理想情况认为，当应力-应变曲线开始出现偏离应力轴时的应力即为原位水平应力。迭代法 (见图 7) 是基于对土体呈简单弹性变形的假设，根据 Hawkins^[11]提出的等量关系建立的，见式 (1)。

$$P_f = P_0 + \tau_f \tag{1}$$

式中： P_f 为临塑压力，通过弹性和塑性阶段的转折点或两条曲线的切线获得； τ_f 为土体发生塑性变形时对应的剪应力，依据 Palmer^[12]对黏土不排水圆孔膨胀的理论推导 (见式 (2)) 得到。

$$\tau_f = 0.5(1 + \varepsilon_c)(2 + \varepsilon_c)dP / d\varepsilon_c \tag{2}$$

式中： ε_c 为腔应变，由于弹性阶段的膨胀属于小应变范围，所以， $1 + \varepsilon_c \approx 1 + \varepsilon_c / 2 = 1$ 。

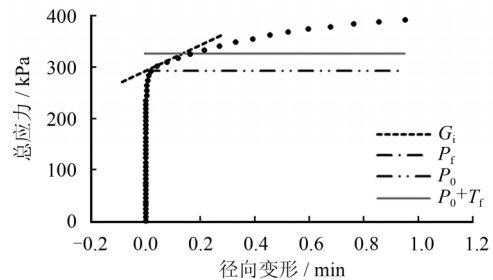


图 7 迭代法求解原位水平应力示意图
Fig.7 Sketch of iterative method to solve in-situ horizontal stress

分别采用上述两种方法获得原位水平应力随深度的变化情况，如图 8 所示。两种方法得到的数据在浅部基本重合，在 23、26、29 m 的位置差值分别为 54.5、56.9、69.7 kPa，除了 2 m 处外 M-R 法所获得的应力值均比 Lift-off 法的大，差别可能是钻孔过程中的轻微扰动造成的。由于 Lift-off 法的判断标准为曲线离开纵坐标轴时的应力，在钻孔轻微的扰动下降低了原位水平应力，造成曲线的早剥离现象，表明软土具有结构性和高灵敏度的特点。两种方法得到的 6 m 深度处的原位水平应力都与拟合曲线相差较远，在现场时发现此处钻进回水里明显有砂土颗粒。砂土易产生塌孔，会造成水平应力的降低。通过线性拟合技术，对 M-R 法得到的曲线进行拟合，得到软土原位水平应力随深度线性变化的关系式，见式 (3)， R^2 值为 0.981。

$$P_0 = 24.04h - 31.276 \tag{3}$$

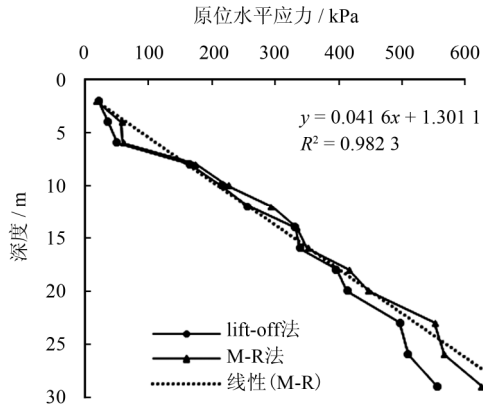


图 8 不同深度处的原位水平应力
Fig.8 In-situ horizontal stress in different depths

式中： P_0 为原位水平应力(kPa)； h 为深度(m)。

利用式 (3) 可以快速地估算该区域内不同深度软土所具有的水平应力的数值。

3.2.3 不排水抗剪强度

本文基于 Gibson 等^[13]利用孔扩张理论从旁压试验曲线推求土体工程参数的方法，计算软土的不排水剪切强度。基于柱孔膨胀理论，视土体为理想弹塑性 Tresca 材料，Gibson 等获得了总膨胀应力 P 与原位水平应力和不排水剪切强度的解析关系式为

$$P = \sigma_{h0} + c_u [1 + \ln(G/c_u)] + c_u \ln(\Delta V/V) \quad (4)$$

式中： P 为主控内壁的膨胀压力； σ_{h0} 为初始原位水平应力； $\Delta V/V$ 为体应变 ϵ_v 。

根据式 (4)，若将总应力与其对应的体应变绘制在半对数坐标中，塑性部分的斜率即为土体的不排水剪切强度 c_u ，如图 9 所示。

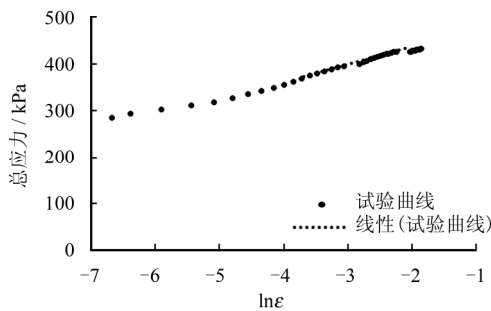


图 9 总应力-剪应变关系曲线
Fig.9 Relationship between total pressure and shear strain

根据孔压的变化曲线 (见图 5) 可以发现，软土在试验过程中属于不排水条件，因此自钻式旁压试验获得的抗剪强度为固结不排水抗剪强度。图 10 为软土原位不排水抗剪强度与室内试验结果随深度的变化曲线。从图中可以看出，软土的原位和室内试验结果均随深度增加而增长。实际情况中随着深度的增加，土的固结度提高，具有不排水抗剪强度

也较大，对比发现自钻试验获得的不排水抗剪强度值比室内试验的结果大，推测可能是自钻式旁压试验对土扰动小的缘故。从图中还可以看出，不排水抗剪强度随深度的变化具有一定的波动性，用线性和非线性拟合的效果都不佳，说明不排水抗剪强度不仅与深度有关，还受到其他因素的影响。

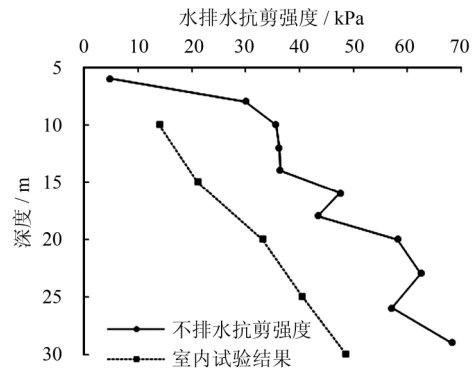


图 10 c_u 沿深度变化曲线
Fig.10 Curves of c_u with depth

3.2.4 临塑压力

临塑压力 P_f 的获取方法有两种，一种是既利用迭代法求原位水平应力过程，通过弹性和塑性阶段的转折点或 2 条曲线的切线获得，见图 7。另一种称为 Bolton and Whittle 模型^[14]拟合方法，即把土的剪应力-剪应变的关系用幂指数的形式表达，见式 (5)。通过拟合获得相关参数，基于圆孔在小应变下的膨胀理论得到临塑压力与不排水抗剪强度的关系式：

$$\tau = \alpha \gamma^\beta \quad (5)$$

式中： τ 为剪应力； γ 为剪应变； α 为刚度常数； β 为弹性指数。

$$P_f = P_0 + c_u / \beta \quad (6)$$

式中： c_u 为加载阶段的不排水抗剪强度； P_0 为原位水平应力。

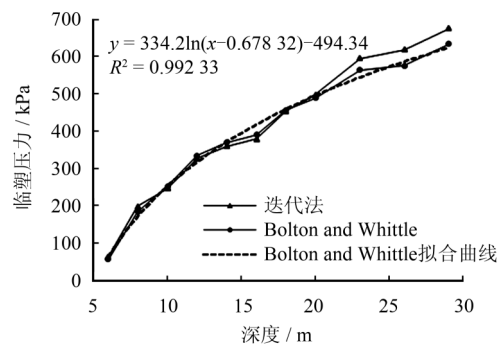


图 11 P_f 随深度变化关系曲线
Fig.11 Curves of P_f with depth

图 11 为临塑压力在不同深度的数值。从图中可以看出，随着深度的增加，软土的临塑压力具有增大的趋势。两种方法得到的结果在浅层十分接近，在 23、26、29 m 处 Bolton and Whittle 法得到的临塑压力明显比迭代法的结果小，最大差值为 43.3 kPa。在实际工程应用当中宜使用 Bolton and Whittle 法推求软土的临塑压力，偏于安全。本文采用非线性拟合对 Bolton and Whittle 法的数据进行拟合，得到软土的临塑压力随深度的经验关系式见式 (7)， R^2 为 0.99。

$$P_f = 334.2 \ln(x - 0.67832) - 494.34 \quad (7)$$

式中： x 为土体深度。

3.2.5 剪切模量 G

(1) 线性分析

基于线弹塑性模型的柱形孔扩张理论表明，卸载曲线与再加载曲线近似重合，卸载-再加载循环圈的斜率为 2 倍土体线性剪切模量^[15]。本文对 2 次加卸载滞回圈得到的线性割线模量求平均值，确定为软土的线性割线模量，如图 12 所示，原位 G_{ur} 值有随着深度增大的趋势。

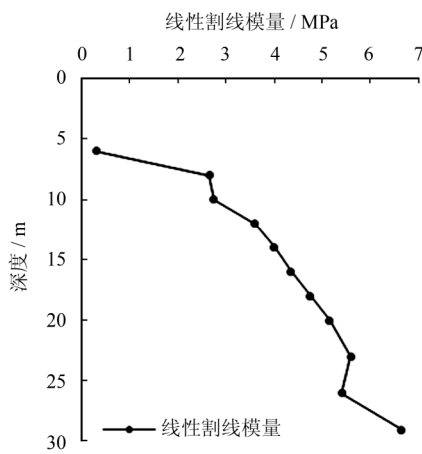


图 12 G_{ur} 随深度变化关系曲线
Fig.12 Curves of G_{ur} with depth

(2) 非线性分析

国外许多学者^[14, 16]在对自钻式旁压试验进行理论分析时发现，采用幂律函数（见式 (5)）可以很好地描述加压过程中弹性阶段土的刚度随应变的变化。

旁压试验加压过程中加荷、卸荷形成的滞回圈提供了与应力应变状态相关的刚度信息，将两个滞回圈加荷部分的试验数据整理到径向总应力和剪应变的双自然对数坐标系中，可见在弹性阶段的滞回圈在双对数坐标系中呈明显的线性分布，如图 13 所示，得到总压力和剪应变关系：

$$\ln p_c = \ln \eta + \beta \ln \gamma_c \quad (8)$$

式中： $\ln \eta$ 、 β 分别为图 13 中拟合直线的截距和斜率。

根据 Palmer^[12]的对黏土在不排水条件下圆孔平面扩张的推导：

$$\alpha = \eta \beta \quad (9)$$

根据割线剪切模量的定义可知，

$$G_s = \tau_c / \gamma_c \quad (10)$$

将式 (5) 代入式 (10) 得到割线剪切模量 G_s 的表达式：

$$G_s = \alpha \gamma_c^{\beta-1} \quad (11)$$

根据 Wood^[17]给出的切线模量的定义，

$$G_t = G_s + \gamma_c [dG_s / d\gamma_c] \quad (12)$$

将式 (11) 代入式 (12) 得到切线剪切模量 G_t 的表达式：

$$G_t = \alpha \beta \gamma_c^{\beta-1} \quad (13)$$

基于上述理论推导，通过对旁压试验曲线的处理，得到不同深度下刚度常数 α 和弹性指数 β ，见表 3。

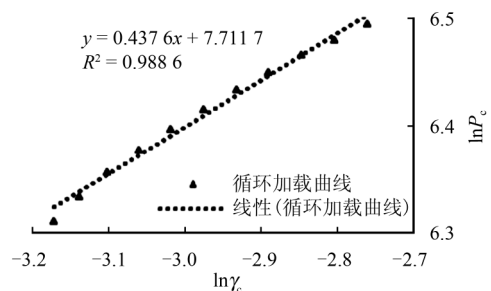


图 13 刚度参数分析法
Fig.13 Analytical approach of stiffness parameters

表 3 软土刚度参数值
Table 3 Stiffness parameters of soft soil

拟合参数	深度 /m										
	6	8	10	12	14	16	18	20	23	26	29
α /kPa	34.8	169.5	162.0	405.2	447.9	764.4	683.4	844.5	710.7	977.7	838.4
β	0.282	0.354	0.251	0.353	0.352	0.441	0.400	0.422	0.365	0.438	0.374

为了给出非线性剪切模量的衰减规律，并与线性剪切模量的大小进行比较，根据表 3 及式 (11)、(12)，绘制 8、14、20、29 m 处剪切模量随应变的变化曲线，如图 14 所示。

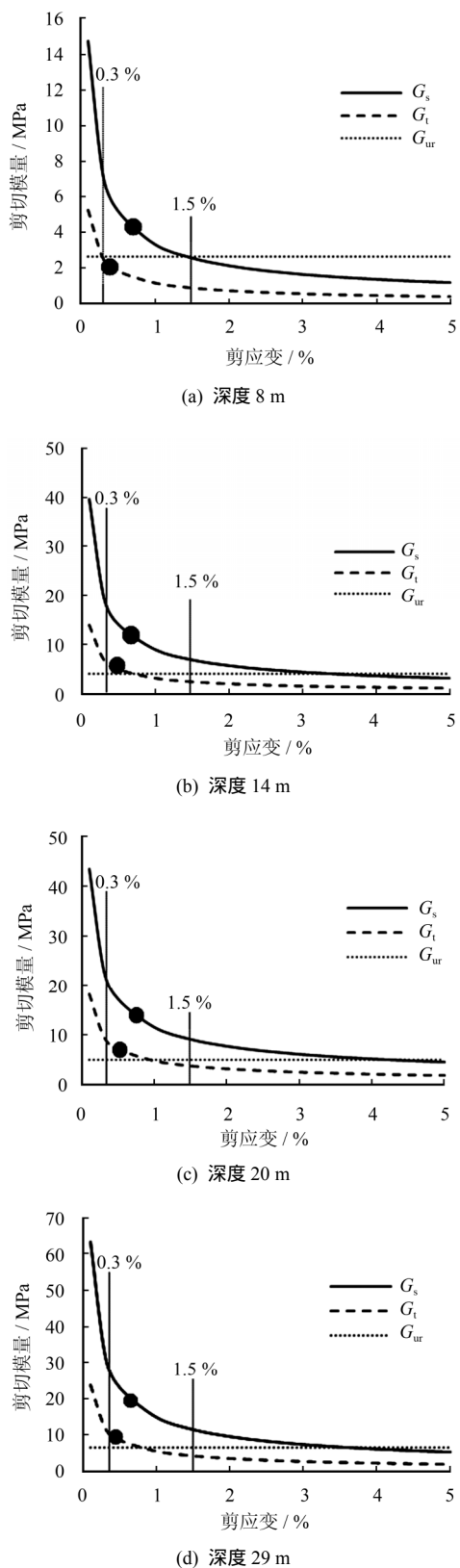


图 14 不同深度处剪切模量与剪应变的关系曲线
Fig.14 Relationships between shear modulus and shear strain under different depths

从图 14 中可以发现，不同深度下，非线性剪切模量随应变的增加而衰减的规律。小应变 γ_c 0.3%范围内， G_s 、 G_t 的衰减较快，衰减的速度逐渐降低。当应变达到 1.5%时，非线性剪切模量的变化缓慢，最终曲线趋于定值。另外，通过线性剪切模量与非线性剪切模量的对比可以发现，线性割线模量 G_{ur} 的大小与切线剪切模量 G_t 的拐点(图中红点)值相近。线性割线模量 G_{ur} 低于割线剪切模量 G_s 的拐点值。由此可见，软土具有较强的非线性特征。采用线性割线模量 G_{ur} 或者割线剪切模量 G_s 都会高估大应变阶段的取值，在实际工程应用中可能存在一定的风险。建议通过测试得到刚度常数 α 和弹性指数 β 后，用切线剪切模量的定义来建立剪切模量随应变的关系。

4 结 论

(1) 软土工程性质特殊，通过原位测试方法获得的相关力学特性指标真实、可靠，自钻式旁压试验对软土的扰动较小，适用于这种高灵敏度土体的参数测试。

(2) 软土的不排水抗剪强度、临塑应力、剪切模量随深度变化较大，工程实践中对于此类地层的力学参数确定应考虑随深度的变化。

(3) 在破坏阶段之前，软土的卸载会造成有效应力的显著降低。软土的破坏会伴随着孔隙水应力的降低。在工程实践中对软土卸载过程的稳定性应予关注。

(4) 软土的剪切模量具有明显的非线性特征，在小应变 γ_c 0.3%范围内，剪切强度衰减较快，当应变达到 1.5%时，非线性剪切模量的变化趋缓。对比发现，采用线性割线模量 G_{ur} 或者割线剪切模量 G_s 表示软土的剪切模量都会高估大变形阶段的取值，可能在工程应用中存在一定的风险，建议用非线性切线模量作为软土的剪切模量值。

参 考 文 献

[1] 沈珠江. 原状取土还是原位测试——土质参数测试技术发展方向刍议[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 94 - 95.
SHEN Zhu-jiang. Soil sampling on site or in-situ testing —Apreliminary research on development of soil parameters testing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 94 - 95.

[2] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 强结构性对湛江黏土地区 CPTU 原位测定结果的影响[J]. 工程力学, 2013,

- 30(2): 118 - 124.
ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Effect of strong structure on CPTU test results of Zhanjiang clay area[J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(2): 118 - 124.
- [3] DA Fonseca A V, SILVA S R, CRUZ N. Geotechnical characterization by in situ and lab tests to the back-analysis of a supported excavation in Metro do Porto[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2010, 28(3): 251 - 264.
- [4] 刘松玉, 蔡正银. 土工测试技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 151 - 165.
LIU Song-yu, CAI Zhen-yin. Review of the geotechnical testing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(3): 151 - 165.
- [5] 杨超, 汪稔, 孟庆山. 滨海沉积软土中旁压试验成果分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 275 - 279.
YANG Chao, WANG Ren, MENG Qing-shan. Analysis of pressuremeter test result in littoral deposit soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 275 - 279.
- [6] 简文彬, 吴振祥, 刘慧明, 等. 闽东南沿海地区软土静力触探参数相关分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 733 - 738.
JIAN Wen-bin, WU Zhen-xiang, LIU Hui-ming, et al. Correlation analysis of static sounding parameter of soft soil along coastal area of Southeast Fujian province[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 733 - 738.
- [7] 徐超, 罗松, 董天林, 等. 扁铲侧胀试验在软土地基评价中的应用研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 112 - 115.
XU Chao, LUO Song, DONG Tian-lin, et al. Application of dilatometer test to evaluation of soft foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 112 - 115.
- [8] 曹权, 柴寿喜, 施建勇, 等. 基于自钻式旁压试验的黏性土孔压变化研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(7): 29 - 32.
CAO Quan, CHAI Shou-xi, SHI Jian-yong, et al. Study on Changes in porewater pressure of clays based on self-boring pressuremeter test[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, 26(7): 29 - 32.
- [9] 尹松, 孔令伟, 张先伟, 等. 基于自钻式旁压仪的残积土原位力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 688 - 695.
YIN Song, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, et al. Experimental study on the in-situ properties of residual soil by self-boring pressuremeter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 688 - 695.
- [10] MARSLAND A, RANDOLPH M F. Comparisons of the results from pressuremeter test sand large in-situ plate tests in London clay[J]. **Geotechnique**, 1977, 27(2): 217 - 243.
- [11] HAWKINS. Pressuremeter measurement of total horizontal stress in stiff clay[Z]. Oxford : British Geotechnical Society, 1990: 321 - 330.
- [12] PALMER A C. Undrained plane strain expansion of a cylindrical cavity in clay: A simply interpretation of the pressuremeter test[J]. **Geotechnique**, 1972, 22(3): 451 - 457.
- [13] GIBSON R E, ANDERSON W F. In-situ measurement of soil properties with the pressuremeter[J]. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, 1975, 18(4): 4 - 7.
- [14] BOLTON M D, WHITTLE R W. A non-linear elastic/perfectly plastic analysis for plane strain undrained expansion tests[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(1): 133 - 141.
- [15] 郝冬雪, 陈榕, 栾茂田, 等. 自钻式旁压试验推求土性参数的研究进展[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 452 - 460.
HAO Dong-xue, CHEN Rong, LUAN Mao-tian, et al. Research development of estimation for soil properties from SBPT[J]. **Computational Mechanics**, 2011, 28(3): 452 - 460.
- [16] 曹权, 施建勇, 柴寿喜, 等. 小应变下土体刚度非线性分析的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 699 - 703.
CAO Quan, SHI Jian-yong, CHAI Shou-xi, et al. Non-linear analysis of stiffness of soils under small strain[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(5): 699 - 703.
- [17] MUIR W D. Strain-dependent moduli and pressuremeter tests[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 509 - 512.