

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0432

确定残积土原位 G - γ 衰减曲线的建议方法与适宜性分析

安 然^{1,2}, 孔令伟^{1,2}, 黎澄生^{1,2}, 郭爱国^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于结构性土易受扰动的特点, 在典型花岗岩残积土地层上开展自钻旁压试验 (SBPT) 和地震扁铲试验 (SDMT), 以此提出获取原位剪切模量-剪应变 (G - γ) 衰减曲线的建议方法。为了分析建议方法的适宜性, 开展共振柱试验 (RCT) 获得常规的室内 G - γ 衰减曲线, 同时结合 RCT 与 SDMT 数据推求近似原位 G - γ 曲线。结果表明, 利用 SBPT 与 SDMT 可以直接获得完整的土体原位 G - γ 衰减曲线, 采用 Stokeo 模型能很好地描述该曲线; 基于对比分析, 发现在相同应力条件下室内试验的剪切模量低于原位试验值, 证明取样、运输和制样等扰动因素对花岗岩残积土造成不可恢复的结构损伤; 用 RCT 结合 SDMT 结果拟合得到的近似原位 G - γ 曲线的初始阶段与建议方法一致, 但曲线衰减速率明显偏高。综合比较 3 种方法, 认为建议方法在残积土以及其他结构性土体的刚度分析中具有更好的适宜性, 可为相关工程参数的选取提供参考。

关 键 词: 花岗岩残积土; G - γ 衰减曲线; 自钻旁压; 地震扁铲侧胀; 适宜性

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)12-4429-08

A proposed method to determine in-situ shear modulus and its degradation for granite residual soil and the suitability analysis

AN Ran^{1,2}, KONG Ling-wei^{1,2}, LI Cheng-sheng^{1,2}, GUO Ai-guo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The self-boring pressure meter tests (SBPT) and seismic dilatometer tests (SDMT) are conducted in the granite residual soil to obtain the in-situ shear modulus and shear modulus degradation. The shear modulus decay by shear strain was measured by resonant column tests (RCT), and the approximate in-situ shear modulus decay curves were deduced from the data of RCT and SDMT to analyze the suitability of the proposed approach. The results show that complete in-situ shear modulus degradation curves can be directly derived using 'Stokeo model' from the combination of initial shear modulus G_0 measured by SDMT and G - γ decay curve measured by SBPT. By comparing the results of resonant column tests under different stress states, a deduction is found in laboratory process of sampling, transporting and preparing of soil, causing unrecoverable damage in the soil. By comparing the results of the forecasting method by RCT and SDMT, the initial stage of the G - γ decay curves are found consistent with the proposed method. However, the stiffness attenuation rates of the proposed method are lower. After a comprehensive comparison of the three methods, the proposed approach proved to show a good suitability in the stiffness analysis of structural soil. The result provides an important reference for the selection of engineering parameters in relative soil layers.

Keywords: granite residual soil; G - γ decay curves; self-boring pressure meter test; seismic dilatometer test; suitability

1 引 言

土工原位试验作为一种研究岩土体力学性质的

重要工具, 在易受扰动影响的结构性土中显得尤为重要。原位试验是指在工程现场直接获取天然结构和应力状态下土体的工程力学指标, 其结果较室内

收稿日期: 2018-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.11672320)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11672320).

第一作者简介: 安然, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事特殊土的力学特性与基坑工程方面的研究工作。E-mail: arwhrsm@163.com

通讯作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术方面的研究工作。

E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

试验更真实可靠^[1]。影响现场和实验室测试土体参数差异的因素有很多,包括取样和运输的扰动、室内制样的扰动、土的各向异性和不均匀性、土层应力历史的影响等。这些扰动因素导致室内试验的真实性和准确性受到了不同程度的影响,对结构性土的影响尤其显著^[2-3]。因此,沈珠江^[4]院士指出:要取得可靠的土质参数,只有通过原位测试。作为一种典型的特殊结构性土,花岗岩残积土在热带和亚热带地区分布广泛。在我国华南地区的闽、粤两省分布面积占其总土地面积的 40% 以上。因为特殊的物理化学成因,花岗岩残积土相对于一般黏性土具有独特的结构性,其颗粒组成特点为砂砾土和黏粒土所占比例较大,级配曲线呈两头多,中间少的分布特点^[5]。由于母岩风化不完全,导致土粒间存在大量胶结物质,原状残积土呈现较差物理性质和较强力学性质的异常组合。特殊的结构性使花岗岩残积土在取样、运输和制样过程中受扰动的影响效果特别突出,采用原位技术手段分析花岗岩残积土工程性质是不可或缺的研究内容。

刚度分析是岩土体工程特性研究的重要内容之一,而研究小变形下动剪切模量的变化规律是土动力学中长期关注的重要课题^[6]。小应变剪切模量 $G_{\max}$ 作为一个重要的刚度参数,被广泛用于土层和地基的地震反应分析、基础设计和场地安全评价的工作中,具有重要工程意义。Jardine 等^[7]认为,土体的小应变一般是指剪切应变 $\gamma < 10^{-5} \sim 10^{-6}$ 的变形范围,土体在小应变条件下的变形为弹性变形,并将小应变变形阶段的剪切模量上限值 ($G_{\max}$) 作为表征土体刚度特性的重要参数。在实际工程中,土体的变形往往超过小应变的范围,使剪切模量随着变形发展出现衰减的现象。故为了更加合理地预测土体的变形和沉降,必须采用剪切模量-剪应变的关系曲线 ($G-\gamma$ 衰减曲线) 描述土体刚度的变化规律^[8]。目前,土体 $G-\gamma$ 衰减曲线主要依靠室内共振柱试验 (RCT) 获得,其稳定性和可靠性在大量实践中已经得到了充分证明^[9]。然而 RCT 无法避免由于取样扰动和应力释放等因素对土样造成的影响,很难真实反映土体的原位应力状态,利用 RCT 获取 $G-\gamma$ 衰减曲线能否反映真实的土性存在一定疑问。因此,利用现场试验求取 $G-\gamma$ 衰减曲线来分析土体的刚度特性具有重要价值^[10]。基于此,不少学者用原位试验设备获得了原位小应变剪切模量 $G_{\max}$,还有一些研究尝试性地结合由 RCT 获得的衰减曲线和原位试验得到的剪切波速预测原位 $G-\gamma$ 衰减曲线的近似曲线。例如, Sa'don 等^[11]利用激振波刚

度法、表面波谱分析法和地震静力触探法 3 种原位试验法研究土的小应变刚度特性; Mayne 等^[12]利用地震波扁铲试验、地震静力触探试验和旁压试验得到不同变形阶段的剪切模量及其对应的剪应变,并结合室内 $G-\gamma$ 衰减曲线,通过改进双曲线模型拟合得到黏土的近似原位 $G-\gamma$ 衰减曲线; 李晶晶等^[13]利用地震波扁铲试验数据结合共振柱试验对膨胀土的原位 $G-\gamma$ 衰减曲线进行拟合求解。以上方法本质上都是对原位 $G-\gamma$ 衰减曲线的预测,需要参考室内试验的曲线,存在一定的拟合误差。目前直接用原位试验获取完整 $G-\gamma$ 衰减曲线的方法还鲜有相关报道。

根据前人的研究,土体 $G-\gamma$ 衰减曲线可划分为两个阶段,即小应变阶段 ($\gamma < 10^{-5}$) 和主要衰减阶段 ($\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-2}$)。本试验采用先进的土体原位测试技术,即地震波扁铲试验 (SDMT) 和自钻旁压试验 (SBPT) 对完整的 $G-\gamma$ 衰减曲线进行试探性研究,并结合室内试验和预测法的结果分析其适宜性,力求提出获取真实、完整原位 $G-\gamma$ 衰减曲线的建议方法。

2 试验方法与结果

2.1 试验场地

开展原位试验的场地位于广东省深圳市的后海地铁站附近的一处基坑工程场地 (试验点纬度: 北纬 $22^{\circ}32'25''$, 经度: 东经 $113^{\circ}53'35''$)。该场地地层条件较复杂,根据钻探显示,场地地层自上到下分布为: 第四系全新统填土 (石) 层 ($0 \sim 5.7$ m); 海相沉积层 ($5.7 \sim 7.9$ m); 第四系全新统冲洪积层 ($7.9 \sim 9.3$ m); 残积土层 ($9.3 \sim 20.8$ m) 以及燕山期花岗岩 (20.8 m 以下)。试验以花岗岩残积土层为研究对象进行原位试验,探讨其物理力学性质。采用钻机结合厚壁取土器进行取样,土样各深度处的物理特性指标如表 1 所示。从表中看出花岗岩残积土的颗粒级配呈两头多,中间少的特点,粒径大于 2 mm 的颗粒和小于 0.005 mm 含量较高,中间粒径的颗粒含量相对较少。土体的塑性指数较高且渗透系数较大,兼具高液限土和砂性土的特点。另外,由于地下水位较浅,在 $12 \sim 20$ m 深度范围内的原状土含水率达到了 $24.4\% \sim 26.7\%$ 。

2.2 试验方法与结果

2.2.1 自钻旁压试验与结果

试验采用英国剑桥 MKV IIIId 型三臂自钻式旁压仪。相比传统的预钻式梅纳旁压仪,自钻旁压仪不仅精度更高,而且无需预先钻孔,依靠自身的液

表 1 深圳花岗岩残积土基本物理性质
Table 1 The basic physical properties of granite residual soil in Shenzhen

深度 /m	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	土粒相对密度 G_s	孔隙比 e_0	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	渗透系数 /(cm/s)	颗粒组成/%			
									>2 mm	0.075~2 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
12~13	1.94	2.65	0.71	26.2	56.2	22.6	33.6	1.95×10^{-4}	30.9	21.8	8.9	38.4
15~16	1.98	2.66	0.74	26.7	58.9	27.3	31.6	1.79×10^{-4}	32.4	20.4	18.1	29.1
19~20	2.00	2.66	0.62	24.4	60.5	24.7	35.8	2.42×10^{-4}	31.2	22.0	19.8	27.0

压贯入系统就可以自行进入土层进行试验，大大减少了钻孔造成土体应力释放带来的误差，在分析中认为 SBPT 不对周围土体造成钻孔扰动^[14-15]。

由于试验场地上覆人工填土和海积软土等地层，残积层在地表 10 m 以下，试验从埋深 12 m 的土层开始进行，直到埋深 20 m 的土层结束，共获得 9 个点的试验数据。偶数米（12、14、16、18、20 m）试验点直接加载到土体破坏，再卸载至 0 点。奇数米（13、15、17、19 m）试验点在每次加载过程中施加 4 个加卸载滞回圈直到土体破坏，再卸荷至 0，目的是为了在一次试验中获得土体不同变形阶段的强度和刚度信息。试验步骤如下：

（1）准备工作：试验前对探头进行标定，再将 SBPT 的钻进系统、测定系统、加载系统和数据采集系统按规定连接好，检验系统是否完好无误。

（2）液压钻进：将钻头连接好相应长度的探杆，打开液压自钻系统开始钻进，待钻头到达试验位置停止钻进并静置 30 min，使超孔隙水压稳定。

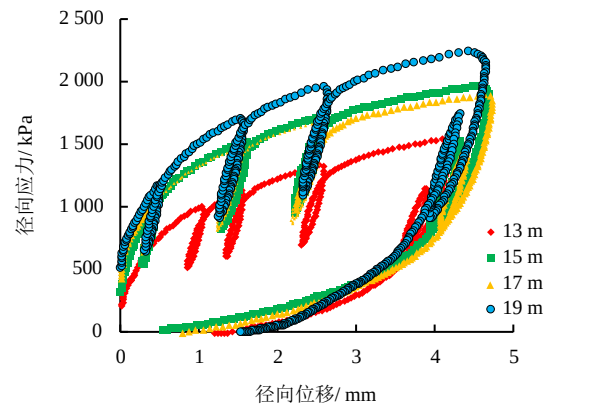
（3）加载：采用加载系统对土体施加膨胀力，用操作台精确控制加载力，控制加载速率为 4 kPa/s。并在变形过程中控制加卸载滞回圈的施加。

（4）卸荷：为防止旁压探头的压力腔变形过大而损坏，在旁压腔接近极限径向变形（约为 5 mm）时停止加载并进行卸荷，当卸荷至腔内压力为 0 时取出探头，连接探杆进行下一深度的试验。

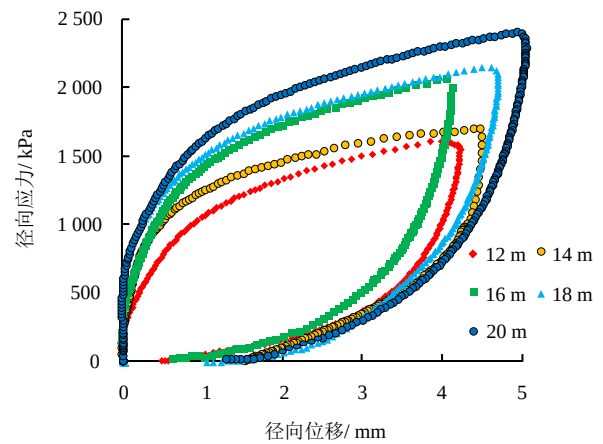
图 1 所示的曲线是由 SBPT 得到的土体径向应力-径向变形曲线，将曲线分为 4 个阶段，①初始阶段：加载开始后应力呈直线段上升，径向位移几乎为 0；②弹性阶段：应力随径向位移发展呈现线性增长；③塑性变形阶段：径向位移继续发展，而应力增长速度变缓；④卸荷阶段：径向位移达到 5 mm 左右时开始卸荷，直至应力为 0。

2.2.2 地震扁铲试验与结果

地震扁铲试验（SDMT）是在扁铲侧胀仪的基础上配置一个地震波波速测试模块组成的联合试验。由 SDMT 可以得到土体的剪切波波速 v_s 、水平应力指数 K_D 、扁铲侧胀模量 E_D 和土性指数 I_D 等参数。试验中扁铲探头通过探杆与钻机相连接，并不断垂



(a)



(b)

图 1 SBPT 应力-变形曲线
Fig.1 Stress-deformation curves of SBPT

直契入土中。通过现场激振出的地震波，测试地震波脉冲电流传送到接收器的时间差计算剪切波波速 v_s 。由于初始剪切模量 G_0 对应的剪切应变 $\gamma_0 \leq 10^{-5}$ ，此阶段为小应变弹性变形，Marchetti 等^[16-17]以弹性理论为基础，建立 G_0 和 v_s 之间的可靠关系式：

$$G_0 = \rho_0 v_s^2 \quad (1)$$

式中： ρ_0 为土体天然密度，由室内密度试验获得； v_s 为地震剪切波波速。

Marchetti 等^[16-17]的大量试验研究表面利用

SDMT 得到各种类型土体的剪切波波速的变异系数仅为 1%~2%，说明公式具有相当高的准确性和适用性。从图 2 可以看出，由 SDMT 试验测试到的波速 v_s 和初始剪切模量 G_0 总体上沿深度变化呈明显递增的趋势，说明土体埋深对于不同土层的刚度特性有显著影响。埋深越大，土体的地震剪切波波速 v_s 和初始剪切模量 G_0 也越大。

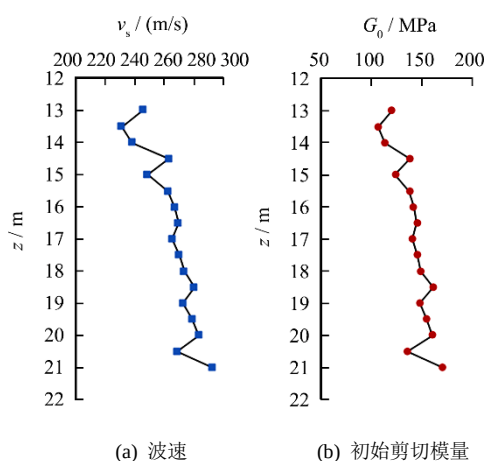


图 2 地震波波速与初始剪切模量随深度的变化
Fig.2 Variation of shear wave velocity and initial shear modulus with depth

2.2.3 室内共振柱试验及结果

利用英国 GDS 公司的共振柱试验系统（简称 RCT）获取室内 $G-\gamma$ 衰减曲线。选取 11~12、15~16 m 以及 19~20 m 3 个深度的原状土试样进行不同围压下的共振柱试验。由自 SBPT 得到该场地 10~20 m 的静止土压力系数 K_0 在 0.7~1.2 之间，本文取 $K_0 = 1$ ，故对 3 组土样分别施加 200、300、400 kPa 的固结围压以模拟各深度土体在上覆土重压力下的应力状态。参考现场地质勘查的情况，该场地的残积土层均处于地下水位以下，为饱和土，故对试样进行抽真空饱和和处理。通过饱和、固结、

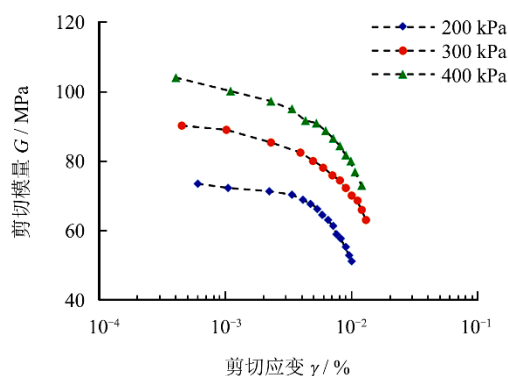


图 3 共振柱试验 $G-\gamma$ 曲线
Fig.3 The $G-\gamma$ decay curves of resonant column test

激振和数据处理后得到室内共振柱 $G-\gamma$ 衰减曲线。从图中不难看出，不同围压状态下，土体的刚度特性变化有相同的趋势：当 $\gamma \leq 10^{-5}$ 时， G 值基本保持不变，当 $\gamma > 10^{-5}$ 时， G 值随 γ 增加开始衰减。不同深度 $G-\gamma$ 曲线的剪切应变 γ 相同时， G 值随围压的提升而增大，说明残积土的刚度特性对土体应力状态差异具有一定的敏感性。

3 原位 $G-\gamma$ 曲线的建议方法与讨论

3.1 确定原位 $G-\gamma$ 衰减曲线的建议方法

SBPT 可以准确得到小变形过程中，土体在主要衰减阶段（ $\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ ）下的原位剪切模量 G [18]。利用 SBPT 求解剪切模量的方法包括线性割线法和非线性分析法。线性割线法假定土体是理想线性弹性材料，故所得到的剪切模量与不同变形阶段无关。然而大部分土体为非线性的弹塑性材料，发生塑性变形的剪应变 γ 大多在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 之间，在此区间内，由非线性法得到的剪切模量值远远超过了线性模量值 [19-20]。在实际工程中，采用线性模量值作为设计参数会低估土体的持力特性。因此，本文采用 Bolton 等 [21] 建议的非线性分析法，该法基于小孔扩张理论，采用能量法则来确定土体在弹性和弹塑性变形过程中刚度的衰减规律。其推导过程不做赘述，求解过程可以在 SBPT 自带的分析软件中完成，方法如下：

利用图 1(a)所示的应力-变形曲线中滞回圈的加载段径向应力和位移数据，整理为径向应力 P_c 和剪应变 γ_c 的双对数坐标，结果如图 4 所示，其中 Loop1、Loop2、Loop3 和 Loop4 表示 1~4 次加卸载滞回圈。不难看出，加卸载滞回圈中的 P_c 和 γ_c 在双对数坐标系中呈明显的线性关系，采用下式进行描述。

$$\ln P_c = \ln \eta + \beta \ln \gamma_c \quad (2)$$

式中： P_c 为土体径向应力； η 为待定系数； $\ln \eta$ 和弹性指数 β 为拟合直线的截距和斜率； γ_c 为土体剪应变。由 Palmer [22] 的研究求解截距参数 α ：

$$\alpha = \eta \beta \quad (3)$$

由于在花岗岩残积土地层进行的 SBPT 为不排水加荷，根据 Muir [23] 求解切线剪切模量 G_t 的方法确定剪切模量的值：

$$G_t = \alpha \beta \gamma_c^{\beta-1} \quad (4)$$

式中： G_t 为切线剪切模量； α 和 β 被称为截距参数和弹性指数，通过线性拟合得到，各试验点的拟合

结果如表 2 所示。

表 2 SBPT 刚度指标计算参数
Table 2 Parameters for calculating stiffness index

加卸载 滞回圈	13 m		15 m		17 m		19 m	
	α /MPa	β	α /MPa	β	α /MPa	β	α /MPa	β
Loop1	12.1	0.74	17.1	0.75	12.1	0.73	12.2	0.72
Loop2	14.6	0.74	18.1	0.72	15.2	0.74	16.5	0.74
Loop3	15.2	0.69	13.5	0.70	12.2	0.67	10.1	0.65
Loop4	9.1	0.66	14.8	0.67	10.4	0.65	9.9	0.66

由于在第 1 个滞回圈 (Loop1) 中土体处于弹性变形阶段, 认为该段的 G - γ 衰减曲线是原状土从初始状态开始变形的阶段, 可作为未扰动土研究。图 5 所示的是由 SBPT 获得的 $\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-1}$ 范围内的 G - γ 衰减曲线, 不同深度处曲线总体趋势均呈指数型下降, 并且曲线开始阶段的剪切模量 G 随深度的增加而变大。

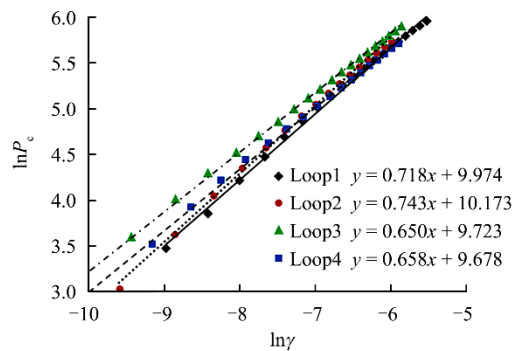


图 4 试验曲线反演剪切模量示意图

Fig.4 Schematic of shear modulus inversion by test curves

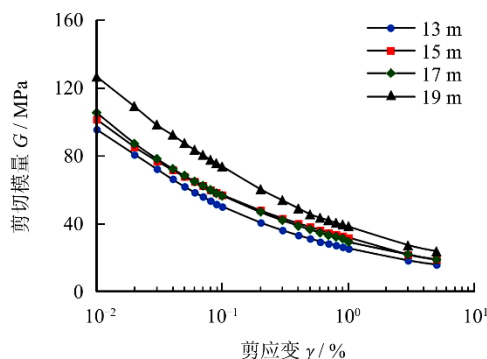


图 5 第 1 个滞回圈不同深度的自钻旁压 G - γ 衰减曲线
Fig.5 SBPT G - γ decay curves for various depths of Loop1

土体小应变剪切模量 $G_{\max}$ 是指土体剪应变 $\gamma \leq 10^{-5}$ 时的剪切模量, 将 SDMT 得到的初始剪切模量 G_0 引入原位 G - γ 衰减曲线的求解中。参照室内

G - γ 曲线, 横坐标 γ 的区间取为 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 。由弹性理论, 当 $\gamma \leq 10^{-5}$ 时剪切模量几乎不变, 故 $\gamma \leq 10^{-5}$ 段的剪切模量为 G_0 , 再将点 (γ_0, G_0) 与 SBPT 的 G - γ 曲线以平滑的曲线相连以得到完整的衰减曲线。结果如图 6 所示, 原位 G - γ 曲线随深度的增加沿纵坐标升高, 说明埋深越大, 土体的刚度越高。

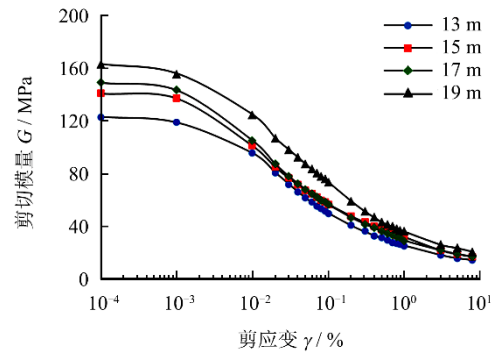


图 6 不同深度的原位 G - γ 衰减曲线

Fig.6 In-situ G - γ decay curves at various depths

3.2 土体 G - γ 衰减曲线的数学模型描述

3.2.1 RCT 曲线的数学模型

在土动力学中, 描述 RCT 剪切模量 G 和剪应变 γ 关系的数学模型包括: Hardin-Drnevich 方程、Ramber-Osgood 方程以及基于 Hardin-Drnevich 方程改进的 Stokoe 公式等^[13]。对本文共振柱试验结果进行拟合后, 发现简单有效的 Stokoe 方程可以较好地拟合残积土的共振柱 G - γ 衰减曲线, 公式如下:

$$G / G_{\max} = \frac{1}{1 + (\gamma / \gamma_r)^c} \quad (5)$$

或

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + (\gamma / \gamma_r)^c} \quad (6)$$

式中: γ_r 为 $G/G_{\max} = 0.5$ 时的参考剪应变; c 为拟合的曲率参数。

3.2.2 近似原位 G - γ 曲线的数学模型

按照 Amoroso^[1]和李晶晶^[13]等方法, 在参考 RCT 的 G - γ 曲线的基础上, 结合 SDMT 结果可以推求出花岗岩残积土的近似原位 G - γ 衰减曲线。该法通过 SDMT 求出控制近似原位 G - γ 衰减曲线形态的 3 个关键点: (γ_0, G_0) 、 $(\gamma_{\text{DMT}}, D_{\text{DMT}})$ 和 $(\gamma_{\text{DV}}, D_{\text{DV}})$, 再以 RCT 的 G - γ 曲线为参照确定近似原位 G - γ 曲线。其中 G_0 和 γ_0 的确定方法与本文建议方法一致, 采用地震波 v_s 计算。 D_{DMT} 和 D_{DV} 被称为工作应变模量和操作应变模量, 由 SDMT 的结果按照相关的经验公式计算得到。

将 SDMT 获得的 D_{DMT}/G_0 和 D_{DV}/G_0 值代入 RCT 的数学模型, 即式 (5), 通过反演得到工作应变 γ_{DMT} 和操作应变 γ_{DV} 。将 3 个控制点代入式 (5) 的方程, 反演出曲线的曲率参数 c 和参考剪应变 γ_r , 再采用 Stokeo 方程描述近似原位 $G-\gamma$ 曲线的变化规律。本文分析了 15 m 和 19 m 两个试验点的近似原位 $G-\gamma$ 衰减曲线, 由图 7 所示, 拟合结果表明, 用 Stokeo 模型很好地描述了两种方法得到的 $G-\gamma$ 衰减曲线。

3.2.3 原位 $G-\gamma$ 衰减曲线的数学模型

从图 6 可以看出, 由本文建议方法得到的原位 $G-\gamma$ 衰减曲线呈指数形下降, 用 Stokeo 方程对其数学模型进行描述同样取得了较好的效果, 见式 (7)。

$$G = \frac{G_0}{1 + (\gamma/\gamma_r)^c} \quad (7)$$

式中: c 为原位 $G-\gamma$ 曲线的曲率参数; γ_r 为参考剪应变; γ_r 为拟合参数, 根据具体试验曲线确定; G_0 为原位初始剪切模量。

由建议方法获得的 $G-\gamma$ 衰减曲线及其拟合曲线如图 8 所示, 结果表明, Stokeo 模型也可以较好地描述花岗岩残积土的原位剪切模量 G 随剪应变 γ

发展的变化趋势, 满足对原位刚度特性的衰减规律进行描述的适用性条件, 也表明 Stokeo 模型在描述由不同方法获得的 $G-\gamma$ 衰减曲线时有较强的适用性。

3.3 建议方法的适宜性分析

利用 Stokeo 模型得到 3 种方法的曲线特征参数如表 3 所示, 将 3 种曲线同时绘制在图 9 中加以比较。结果表明, 不同测试方法对 $G-\gamma$ 衰减曲线的获取会造成明显差异。采用 RCT 得到的小应变剪切模量 G_{max} 明显小于用 SDMT 得到的初始剪切模量 G_0 。从表 3 的曲线拟合参数 D_{max}/G_0 可以看出, 19 m 试验点的差值达到了 52.9 MPa, 15 m 试验点差值为 47.1 MPa, 原位初始剪切模量 G_0 比室内初始剪切模量 G_{max} 提高了约 40%。反映了土体在取样、运输和制样的过程中发生了不可恢复的结构损伤, 由 RCT 获取的剪切模量较原位试验偏小, 这种现象在易受扰动影响的结构土中表现的更加显著。因此, 在类似花岗岩残积土的结构土体的场地设计参数选取中, 若只依赖室内试验数据会不可避免地造成经济浪费。

在土动力学研究中, 剪切模量随剪应变的衰减程度通常由归一化处理方法反映, 归一化 $G-\gamma$ 曲线可以更直接地反映曲线的变化特点以及衰减速率。图 10 所示的是 19 m 试验点 3 种方法的归一化曲线, RCT 与近似原位曲线的归一化曲线形态总体比较相近, 而原位试验的归一化曲线与另外两条曲线的形态差异较大, 原因主要是 3 种曲线的拟合参数取值方法的不同。在 Stokeo 模型中, γ_r 值是决定刚度衰减速率快慢的主要因素, γ_r 值越小曲线越陡, 表示刚度衰减速率越快。 c 值决定了曲线的弯曲程度, 也在一定程度上影响衰减速率。建议方法直接由原位试验得到的 γ_r 值明显大于另外两种曲线的 γ_r 值, 故其归一化曲线刚度衰减速率明显低于另外两种方法。对比结果也说明, 近似原位 $G-\gamma$ 曲线的刚度衰减速率较真实的原位 $G-\gamma$ 曲线有较大偏差。

综合 3 种方法得到的 $G-\gamma$ 衰减曲线及其归一化曲线表明, 不同测试方法对 $G-\gamma$ 衰减曲线的影响主要表现在初始剪切模量 G_0 和曲线衰减速率两个方面。建议方法获得的 $G-\gamma$ 衰减曲线不仅消除了进行室内试验所带来的取样、运输和制样的误差, 也避免了近似原位曲线无法准确获取原位刚度衰减速率的不足。相对于前人方法, 建议方法获取的原位 $G-\gamma$ 曲线更加真实准确, 具有更好的适宜性, 可以为工程中土体刚度参数的选取提供重要参考。

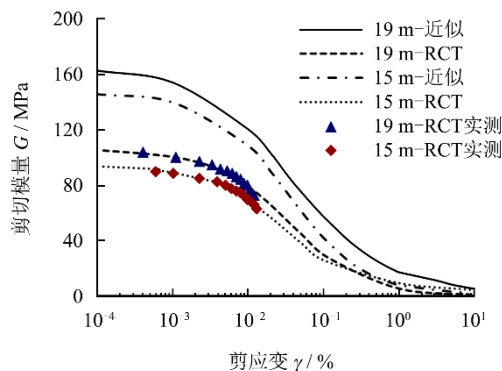


图 7 共振柱试验和近似原位曲线及其拟合曲线
Fig.7 RCT and forecasting curves and fitting curves

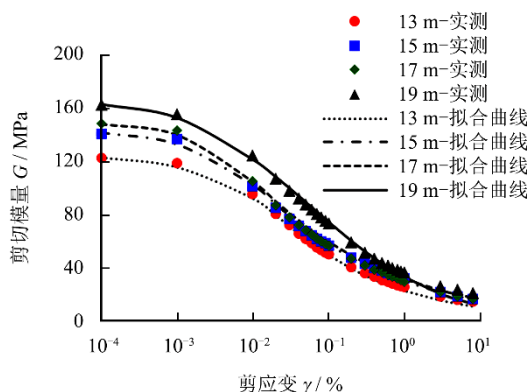


图 8 原位 $G-\gamma$ 衰减曲线及其拟合曲线
Fig.8 In-situ $G-\gamma$ decay curves and its fitting curves

表 3 曲线特征参数

Table 3 The characteristic parameters of curves

方法	$G_0 / G_{\max}$		c		$\gamma_r / 10^{-3}$	
	15 m	19 m	15 m	19 m	15 m	19 m
RCT	96.2	109.3	0.89	0.86	0.303	0.361
近似	143.3	162.2	0.84	0.75	0.342	0.378
原位	143.3	162.2	0.55	0.51	0.784	0.838

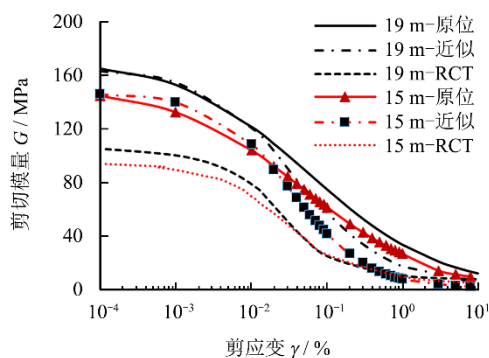


图 9 共振柱与原位试验结果的比较

Fig.9 Comparison between RCT and in situ results

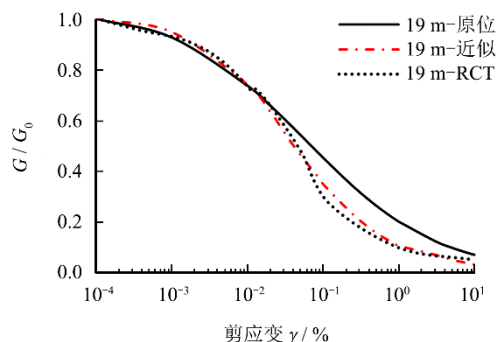


图 10 三种方法的归一化曲线

Fig.10 Normalized G - γ curves of the three methods

4 结 论

(1) 土工原位试验是获取土体，尤其是结构性土体力学特性的重要方法，结合自钻式剑桥旁压仪 (SBPT) 和地震波扁铲侧胀仪 (SDMT) 开展试验，利用试验结果提出了获取土体原位 G - γ 衰减曲线的建议方法。

(2) 开展考虑应力状态的饱和土样共振柱试验 (RCT)，得到基于室内试验的 G - γ 曲线，发现在相同剪应变 γ 下，本文建议方法获得的原位剪切模量 G 明显比室内试验的数据大；与结合 RCT 和 SDMT 得到的近似原位 G - γ 曲线进行对比，发现建议方法获得的曲线衰减速率明显比近似原位 G - γ 曲线的衰减速率小。

(3) Stokoe 模型不仅可以描述花岗岩残积土的共振柱试验 G - γ 曲线，也可以很好地反映其原位剪切模量 G 随剪应变 γ 发展的变化趋势，满足对原位刚度衰减规律进行预测的适用性条件。

(4) 通过对 3 种研究方法的对比，证明在花岗岩残积土等结构性土体的小变形刚度衰减规律的研究中，建议的方法很好地规避了前人方法的缺陷，具有更好的适宜性，可为土体刚度参数的选取提供合理的参考。

参 考 文 献

- [1] AMOROSO S. G - γ decay curves by seismic dilatometer (SDMT) [D]. [S. l.]: University of L'Aquila, 2011.
- [2] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065—1073.
KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065—1073.
- [3] 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: Florence: [s. n.], 1991: 915—956.
- [4] 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): 90—91.
SHEN Zhu-jiang. Soil sampling on site or in-situ testing—A preliminary research on development of soil parameters testing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 90—91.
- [5] QIAN Z, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Variability in unsaturated hydraulic properties of residual soil in Singapore[J]. Engineering Geology, 2016, 209: 21—29.
- [6] 孔令伟, 臧濛, 郭爱国. 湛江黏土动剪切模量的结构损伤效应与定量表征[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2149—2157.
KONG Ling-wei, ZANG Meng, GUO Ai-guo. Structural damage effect on dynamic shear modulus of Zhanjiang clay and quantitative characterization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2149—2157.
- [7] 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]. **Geotechnique**, 1986, 36(3): 377—396.
- [8] FAHEY M, LEHANE B, STEWART D. Soil stiffness for shallow foundation design in the Perth CBD[J]. **Australian Geomechanics**, 2003, 38(3): 61—89.
- [9] 陈树峰, 孔令伟, 黎澄生. 低幅应变条件下粉质黏土泊松比的非线性特征[J]. **岩土力学**, 2018, 39(2): 580—588.
- CHEN Shu-feng, KONG Ling-wei, LI Cheng-sheng. Nonlinear characteristics of Poisson's ratio of silty clay under low amplitude strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 580—588.
- [10] 孙静, 袁晓铭, 陶夏新. 室内和现场测试最大动剪切模量差别的试验研究[J]. **土木工程学报**, 2012, 45(增刊 1): 258—262.
- SUN Jing, YUAN Xiao-ming, TAO Xia-xin. Comparative study on laboratory and field test of maximum dynamic shear modulus[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(Supp.1): 258—262.
- [11] SA'DON N M, MICHAEL J P, KARIM A R A. Dynamic soil stiffness between WAK, SASW and SCPT tests[M]// InCIEC 2013. Singapore: Springer, 2014: 461—475.
- [12] MAYNE P W, SCHNEIDER J A, MARTIN G K. Small-and large-strain soil properties from seismic flat dilatometer tests[C]//Proceedings of the International Symposia on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials. Rotterdam: A A Balkema, 1999: 419—426.
- [13] 李晶晶, 孔令伟, 金磊. 膨胀土原位剪切模量-剪应变衰减曲线与特征分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(4): 1032—1039.
- LI Jing-jing, KONG Ling-wei, JIN Lei. In situ shear modulus and shear strain decay curves in expansive soils and analysis of its characteristics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(4): 1032—1039.
- [14] MANASSERO M. Stress-strain relationships from drained self-boring pressuremeter tests in sands[J]. **Géotechnique**, 1989, 39(2): 293—307.
- [15] 王进, 朱泽奇, 陈健, 等. 海相沉积软土的自钻式旁压试验及原位力学特性[J]. **岩土力学**, 2017, 38(增刊 1): 195—202.
- WANG Jin, ZHU Ze-qi, CHEN Jian, et al. Study of in-situ mechanical properties of littoral deposit soft soil by self-boring pressuremeter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Supp.1): 195—202.
- [16] MARCHETTI S. In situ tests by flat dilatometer[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1980, 106(3): 299—321.
- [17] MARCHETTI S, MONACO P, CALABRESE M, et al. Comparison of moduli determined by DMT and backfigured from local strain measurements under a 40 m diameter circular test load in the Venice area[C]//Proceedings of 2nd International Conference on the Flat Dilatometer. Washington D.C.: R.A. Failmezger & J.B. Anderson, 2006: 220—230.
- [18] 王沛, 丁克胜, 杨宝珠. 自钻式旁压仪测定土的侧压力试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(增刊): 452—460.
- WANG Pei, DING Ke-sheng, YANG Bao-zhu. Lateral pressure of soil by self-boring pressuremeter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(Supp.): 452—460.
- [19] 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.
- [20] 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 in-situ properties of residual soil by self-boring pressuremeter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 688—695.
- [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] PALMER A C. Undrained plane strain expansion of a cylindrical cavity in clay: A simply interpretation of the pressuremeter test[J]. **Géotechnique**, 1972, 22(3): 451—457.
- [23] MUIR WOOD D. Strain-dependent moduli and pressuremeter tests[J]. **Géotechnique**, 1990, 40(3): 509—512.