

DOI: 10.11779/CJGE202001012

# 花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应

安然<sup>1, 2</sup>, 黎澄生<sup>1, 2</sup>, 孔令伟<sup>\*1, 2</sup>, 郭爱国<sup>1, 2</sup>

(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:** 花岗岩残积土作为一类同时具有黏性土、粗粒土组构特征与工程特性的特殊土, 力学性能普遍易受施工扰动和开挖卸荷影响而诱发灾害。从钻探扰动和成孔后应力释放对土体力学性质的影响出发, 通过对试验场地内花岗岩残积土开展自钻式旁压试验(SBPT)和预钻式旁压试验(PMT)在不同成孔时间后的对比分析, 研究了土体原位强度指标、承载力特征值和刚度衰减性状的响应特征。结果表明: 钻探扰动对花岗岩残积土的强度、承载力和刚度特征的弱化影响十分明显, 且弱化程度随卸荷过程中应力释放时间的增长不断加深; 提出扰动系数  $R(u)$  对不同试验条件下土体性质的扰动程度进行评价, 发现刚度参数  $G_f$  受钻探扰动和卸荷滞时效应的影响最大, 不排水剪切强度强度  $c_u$  次之, 承载力特征值  $f_{ak}$  受影响最小; 采用土体刚度非线性分析法获取了基于 SBPT 与 PMT 试验的原位剪切模量—剪应变衰减曲线( $G-\gamma$  曲线), 用 Stokoe 方程描述  $G-\gamma$  曲线的形态特征有较好的拟合效果。研究结果可为花岗岩残积土分布地区的工程设计与施工提供参考。

**关键词:** 花岗岩残积土; 原位力学特性; 自钻旁压; 预钻旁压; 钻探扰动; 卸荷滞时

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)01-0109-08

作者简介: 安然(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事特殊土的力学特性与基坑工程研究。E-mail: arwhrsm@163.com。

## Effects of drilling disturbance and unloading lag on in-situ mechanical characteristics of granite residual soil

AN Ran<sup>1, 2</sup>, LI Cheng-sheng<sup>1, 2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1, 2</sup>, GUO Ai-guo<sup>1, 2</sup>

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

**Abstract:** The granite residual soil is a kind of special structural soil with both engineering and fabric characteristics of clay and coarse grained soil. Its engineering performance is generally susceptible to disturbance damage and excavation unloading, which may lead to engineering disasters. Through the comparison tests of SBPT and PMT in different predrilling unloading lag time in a typical layer of granite residual soil, the response characteristics of in-situ stiffness attenuation characteristics, strength indexes and bearing capacity of granite residual soil are analyzed. The results show that the weakening effect of drilling disturbance on the strength, bearing capacity and stiffness of granite residual soil is obvious, and the weakening degree increases with the increase of stress release time during unloading period. The order of influence degree of drilling disturbance and unloading delay on each parameter is evaluated by disturbance factor  $R(u)$ : the effect on stiffness parameter  $G_s$  is the largest, followed by undrained shear strength  $C_u$  and bearing capacity  $f_{ak}$ . The in-situ  $G-\gamma$  curves of SBPT and PMT tests are obtained by nonlinear stiffness analysis and effectively fitted by the equation proposed by Ken Stokoe. The research results may provide the reference for engineering design and construction in the granite residual soil area.

**Key words:** granite residual soil; in-situ mechanical property; SBPT; PMT; drilling disturbance; unloading lag

## 0 引言

风化花岗岩地层在中国东南沿海地区分布广泛, 是广东、福建等省份在基础建设过程中遇到的主要地层之一<sup>[1]</sup>。花岗岩残积土是母岩经过化学物理风化形成的未经搬运的产物, 兼具黏性土和粗粒土的组构特征与工程特性<sup>[2]</sup>。由于特殊的成土环境、物质成分及结构特征, 花岗岩残积土普遍具有易受场地施工扰动、

开挖卸荷与遇水软化影响诱发灾害的特点。因此, 相关地层受施工扰动和开挖卸荷诱发的安全事故屡见不鲜<sup>[3-8]</sup>。

由于对花岗岩残积土受施工扰动和卸荷诱发滑坡

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672320)

收稿日期: 2019-03-18

\*通信作者 (E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

表 1 试验场地地层特征

Table 1 Elementary characteristics of layers of test sites

地层名称	标贯击数/击	层顶埋深/m	平均层厚/m	地层描述
填土层	4.9~9.0	0~0.5	2.75	不均质, 多为黏土与砾石混合, 有少量水泥块
填石层	10.2~25.4	2.5~4.5	4.91	不均质, 成分主要为砂岩块石和水泥块
淤泥	0.8~3.3	8.5~12.5	2.54	深灰色, 饱和, 软塑状态, 含少量粉细砂及贝壳
含黏性土砾砂	4.8~13.7	10.0~14.5	2.62	灰白色, 中密状态, 次棱角一次圆状, 含少量卵石
残积土层	18.6~28.6	11.5~16.5	9.25	褐红色, 饱和, 可塑状态, 含 19.6%~48.6% 的细砂及角砾
花岗岩风化层	>30.6	<23.5	—	块状构造, 主要由长石、石英和云母等矿物组成, 按风化程度划分为全、强、中、微风化四个带

等工程问题的危害性认识不深入, 在进行基坑设计、施工和质量监管过程中, 花岗岩残积土的易扰动性往往未得到足够重视。而在城市建筑密集区内, 地铁线路建设与基坑开挖都容易对地层造成扰动, 使临近的施工场地发生不均匀沉降和开裂现象, 危及周边建筑物的安全<sup>[9]</sup>。因此, 深入认识花岗岩残积土受施工扰动和开挖卸荷的影响对于基坑边坡的设计与施工十分必要。近年来, 一些学者通过室内试验对花岗岩残积土强度的卸荷效应开展研究, 结果表明卸荷对其力学性质的影响较为显著<sup>[10~12]</sup>。然而, 花岗岩残积土不同于一般黏性土和砂性土, 在取样、运输和制样过程中存在结构强度的损失, 室内试验难以全面反映真实的土体工程特性<sup>[13]</sup>。相比室内试验, 原位试验在一定程度上保持了土体的原始结构和应力状态<sup>[14]</sup>, 但目前利用原位试验评价土体性质受扰动和卸荷影响的研究还不多, 采用原位试验对花岗岩残积土受施工和开挖卸荷影响的研究更是少见。

钻探扰动效应是指在工程现场进行原位测试时, 采用钻机进行钻孔引起孔壁土体内部结构的力学损伤, 钻探扰动的影响效应可以模拟土体受到的施工扰动<sup>[15]</sup>; 卸荷滞时效应是指在钻孔完成后, 因卸荷引发应力释放的持续时间对力学性质的影响效应, 卸荷滞时效应反映了开挖卸荷对土体工程特性的影响<sup>[16]</sup>。本文通过在花岗岩残积土地层开展自钻式旁压试验 (SBPT) 和预钻式旁压试验 (PMT) 在不同成孔时间后的对比分析, 获得了土体原位强度指标、承载力和刚度衰减性状受钻探扰动和卸荷滞时的影响特征, 旨在为花岗岩残积土分布地区的工程设计与施工提供借鉴与参考。

## 1 场地工程地质特点

### 1.1 场地地层

开展原位试验和钻孔取样的场地位于深圳市南山区一处建筑深基坑施工现场。根据钻探和标准贯入试验的结果将场地的地层自上到下分为: 第四系全新统

的人工填土、填石层; 海相淤泥层; 第四系全新统冲积层(含黏性土砾砂); 花岗岩残积土层以及燕山期风化花岗岩层(见表1)。从表1可以看出该场地的土层沿深度的变异情况很明显, 花岗岩残积土埋深位于10 m以下, 场地的水位线为地下4.4~6.0 m, 表明该场地内花岗岩残积土处于饱和状态。因此, 在试验分析时暂不考虑非饱和花岗岩残积土浸水后软化崩解对土体的影响。

### 1.2 土体基本性质

利用钻机沿深度对残积土进行取样, 取样后立即腊封保存并精细运输至实验室。XRD 衍射试验结果表明该场地花岗岩残积土基本矿物成分为: 石英含量为48.2%, 高岭石含量为31.2%, 伊利石含量为20.6%。由图1可以看出土体级配曲线呈明显的“台阶状”<sup>[17]</sup>, 粒径  $d>0.075$  mm 的颗粒质量约占总质量的50%,  $d<0.0002$  mm 的颗粒质量约占总质量的40%, 表明花岗岩残积土的黏粒、粉粒和粗粒组占比较大, 中间粒组占比较小。由室内土工试验得到土体物理、力学指标如表2所示, 可以看出该场地花岗岩残积土的塑性指数具有黏性土的特点, 渗透系数具有砂性土的特点。结构性是花岗岩残积土一个显著特点<sup>[18]</sup>, 其抗剪强度指标在扰动后发生明显弱化, 由固结不排水三轴剪切试验获得重塑土的黏聚力  $c_u$  相对原状土的降幅约为28.2%, 内摩擦角降幅约为3.6%, 表明特殊的物理性质和组构特征使花岗岩残积土力学特性具有易受扰动影响的特点。

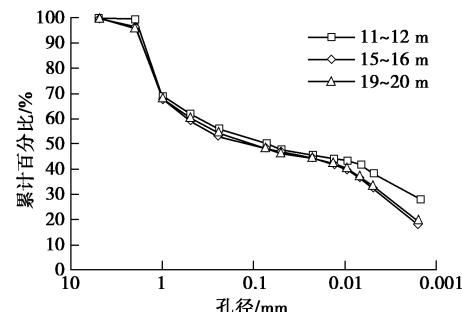


图1 花岗岩残积土的典型级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of granite residual soil

表 2 花岗岩残积土基本物理力学性质  
Table 2 Elementary physical and mechanical properties of granite residual soil

深度 /m	密度 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒相 对密度 $G_s$	孔隙 比 $e$	天然含水 率 $w$ /%	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%	塑性指 数 $I_p$	渗透系数 $k$ /(cm·s <sup>-1</sup> )	黏聚力 $c_{cu}$ /kPa		内摩擦角 $\phi_{cu}$ (°)	
									原状土	扰动土	原状土	扰动土
12~14	1.94	2.65	0.71	26.2	55.2	22.0	33.2	$1.85 \times 10^{-4}$	49.1	35.8	22.7	21.7
15~16	1.98	2.66	0.74	26.7	59.1	28.3	30.8	$1.72 \times 10^{-4}$	52.8	39.2	23.4	21.5
18~20	2.00	2.66	0.62	24.4	60.3	28.8	31.5	$2.53 \times 10^{-4}$	55.9	38.2	21.5	22.1

## 2 试验方案与分析方法

### 2.1 试验方案

对试验场地的花岗岩残积土开展 SBPT 和 PMT 试验, 通过比较 SBPT 和 PMT 试验结果分析了钻探扰动效应对土性的影响程度; 通过对成孔后在无降水条件下静置 0, 3, 6 d 的土层平行开展 PMT 试验分析了卸荷滞时增加对土性的影响程度。为减小土体不均匀性对试验结果造成的误差, 对保持不同试验点位间距小于 2 m。

#### (1) PMT 试验

采用 PY-3 型法国梅纳旁压仪开展 PMT 试验, 进行 PMT 试验前预先钻探试验孔。开始试验后, 先用钻机将 PMT 探头放置到钻孔中的预定深度; 再通过控制箱经由管路向探头的旁压腔内注水, 使探头的橡胶膜向外膨胀, 从而对孔壁土体施加侧向压力; 采用分级加载的方式对土体逐级加压, 并通过测量装置获得土体的压力值  $P$  及相应的探头体积变形量  $V$ ; 最后根据试验过程中记录的压力值和变形量绘制  $P$ - $V$  曲线。对钻孔内 12~20 m 的土层, 每隔 2 m 开展 1 次试验, 图 2 所示为埋深为 15 m 土层的 PMT 测试结果。图中 PMT0d、PMT3d 和 PMT6d 对应 0, 3 和 6 d 钻孔滞后的试验曲线, 可以看出土体径向压力-体积变化量曲线 ( $P$ - $V$  曲线) 分为  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  三段, 分别对应加载过程中土体经历的初始、弹性和弹塑性变形阶段<sup>[19]</sup>。

#### (2) SBPT 试验

采用英国剑桥公司生产的 MKV IIId 型三臂自钻式旁压仪进行 SBPT 试验。首先利用液压系统将标定好的探头贯入预定深度的土层, 并静置 30 min 使超孔隙水压稳定; 然后通过圆柱体旁压腔对周围土体施加水平向的膨胀力; 待土体破坏后停止加载, 并卸载至旁压腔内的压力为零。在加载过程中, 径向应力  $P_c$  和侧向位移值  $s$  由数据采集系统自动记录。由图 3 所示, SBPT 试验获取 4 个深度土体的径向应力-径向位移 ( $P_c$ - $s$ ) 曲线可分为 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, 应力随径向位移增长呈线性上升; ③弹塑性阶段, 应力随位移发展的增速变缓, 直至达到屈服应力; ④卸荷阶段, 应力结束增长后开始卸荷, 直至应力为零。

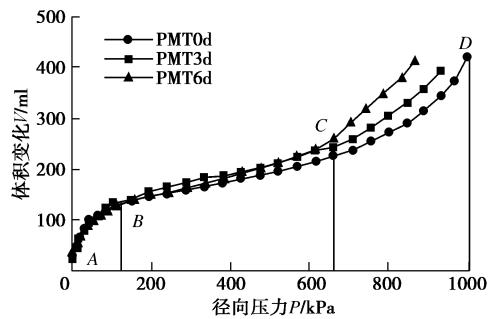


图 2 PMT 试验的  $P$ - $V$  曲线

Fig. 2 The  $P$ - $V$  curve of PMTs

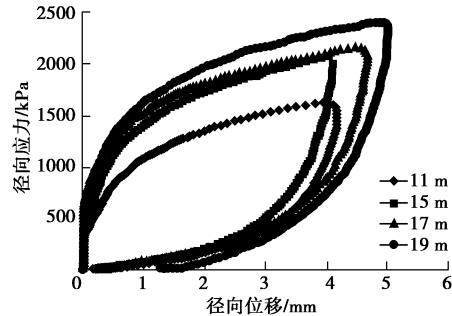


图 3 SBPT 基本试验结果

Fig. 3 Basic test results of SBPT

### 2.2 分析方法

#### (1) 刚度参数的求解方法

前人的研究表明在剪应变  $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-1}$  范围内, 土体原位剪切模量  $G$  与剪应变  $\gamma$  之间存在非线性关系<sup>[20]</sup>。采用非线性分析法对 SBPT 和 PMT 获得的数据进行分析, 以获取土体的原位刚度参数。在分析时, 首先要获取土体的应力和剪应变关系曲线 ( $P_c$ - $\gamma$  曲线)。由于 PMT 和 SBPT 的探头总长度与直径比值大于 6, 认为土体变形为平面应变问题<sup>[21]</sup>。根据柱形孔扩张理论, 在 PMT 试验的平面应变问题中, 剪应变  $\gamma$  的表达式为

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

式中  $\Delta A$  为 PMT 探头橡皮膜在膨胀时的截面积变化

值;  $A$  为探头的初始截面积;  $r$  和  $r_0$  为旁压腔的当前和初始半径;  $V$  和  $V_0$  为加载过程中旁压腔的当前和初始体积。

在 PMT 试验中, 旁压探头的加载压力  $P$  即为孔壁土体受到的径向应力  $P_c$ 。而 SBPT 试验中土体的径向应力和剪应变均由数据采集系统获得。利用非线性分析法进行刚度参数确定时, 采取 PMT 和 SBPT 试验的弹性和弹塑性变形阶段的数据。以 15 m 深度的土体测试结果为例, 由计算得到不同试验条件下的径向应力 - 剪应变 ( $P_c - \gamma$ ) 曲线, 如图 4 所示。由图 4 可以看出 PMT 试验获得的  $P_c - \gamma$  曲线明显在 SBPT 试验获得的  $P_c - \gamma$  曲线的下方, 且随卸荷滞时增加而逐渐下降。由 PMT 和 SBPT 得到的花岗岩残积土原位应力 - 应变关系曲线的形状相似, 但数值上存在较大差异。究其原因, 主要是因为相对于 PMT 试验, SBPT 试验无须钻孔, 避免了钻孔过程中孔壁土体受到的钻探损伤, SBPT 更好地保持了土体的原位力学状态。

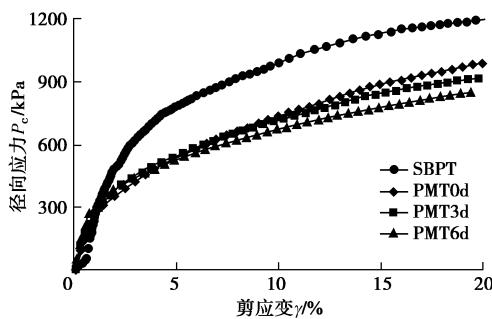


图 4 PMT 和 SBPT 的应力 - 应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of PMT and SBPT

一般地, 认为土体在变形过程中的径向应力  $P_c$  和剪应变  $\gamma$  之间的关系满足幂律函数<sup>[22]</sup>:

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

将式 (2) 转化成对数形式:

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

式中,  $\beta$  和  $\eta$  为待定系数,  $\beta$  为弹性指数。

式 (3) 表明在双对数坐标系中, 土体所受的径向压力和剪应变之间为线性关系。利用  $P_c - \gamma$  的线性关系可以对刚度参数进行反演分析, 进而求取待定系数  $\beta$  和  $\eta$ 。由 SPMT 和 PMT 获得花岗岩残积土的  $\ln P_c - \ln \gamma$  曲线如图 5 所示, 通过对曲线进行线性拟合获取待定系数  $\eta$  和  $\beta$  的值。

根据所求取的拟合参数  $\eta$  和  $\beta$ , 采用 Muir Wood<sup>[23]</sup> 求解切线剪切模量  $G_t$  的方法确定表征土体刚度特性的剪切模量:

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

式中,  $\alpha$  为刚度常数,

$$\alpha = \beta \cdot \eta \quad (5)$$

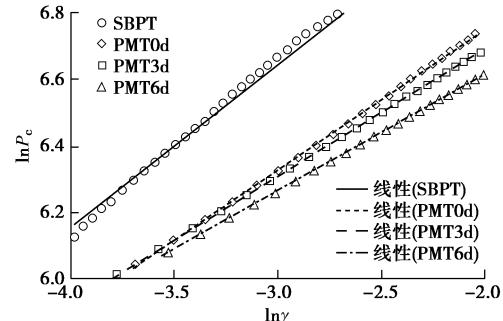


图 5 由反演分析获取刚度参数的示意图

Fig. 5 Inversion curves of calculating stiffness parameters

(2) 不排水剪切强度的求解方法

Gibson 等<sup>[24]</sup>根据柱形孔扩张模型认为旁压试验中的土体剪应力 - 剪应变 ( $\tau - \gamma$ ) 关系可为

$$\tau = dP_c/d(\ln \gamma) \quad (6)$$

Palmer<sup>[25]</sup>认为在柱形孔扩张模型中, 土体处于弹塑性阶段时, 剪应力与不排水剪切强度的关系满足

$$\tau' = c_u \quad (7)$$

式中  $\tau'$  为土体处于弹塑性阶段的剪应力,  $c_u$  为土体不排水抗剪强度。

处于弹塑性变形阶段的土体, 其径向应力  $P_c$  与剪应变对数  $\ln \gamma$  满足

$$P_c = P_l + c_u \ln \gamma \quad (8)$$

式中,  $P_l$  为极限压力,  $P_l$  对应的剪应变  $\gamma = 1$ 。

将 SBPT 或 PMT 试验曲线在弹塑性变形阶段获取的  $P_c$  与  $\ln \gamma$  绘制于坐标系中, 如图 6 所示。由曲线反演得到不排水剪切强度  $c_u$ , 图中拟合直线的截距为极限压力  $P_l$ , 斜率为不排水剪切强度  $c_u$ <sup>[25]</sup>。

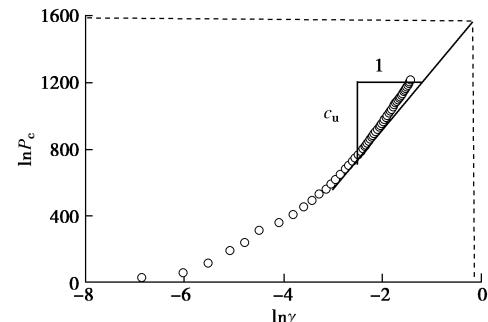


图 6 由曲线反演获得不排水剪切强度示意图

Fig. 6 Inversion curves of calculating  $c_u$

(3) 承载力特征值分析方法

前人的研究结果证明采用 PMT 和 SBPT 试验得到的临塑压力  $p_f$  与初始压力  $p_0$  之差可以表征地基承载力大小, 其结果与平板载荷试验获得的承载力特征值保持较好的一致性<sup>[26-27]</sup>。按照临塑压力法确定承载力特征值  $f_{ak}$ :

$$f_{ak} = p_f - p_0 \quad , \quad (9)$$

式中,  $f_{ak}$  为土体地基承载力特征值,  $p_0$  和  $p_f$  为土体的初始压力和临塑压力。

对于 PMT 试验, 初始压力  $p_0$ 、临塑压力  $p_f$  分别对应  $P-V$  曲线中初始阶段与弹性阶段、弹性阶段与塑性阶段之间分界点的压力值<sup>[28]</sup>。对于 SBPT 试验, 以  $P_c-s$  曲线中初始阶段与弹性阶段分界点的压力值为初始压力  $p_0$ ; 以弹性阶段与非线性塑性阶段分界点的压力值为临塑压力  $p_f$ <sup>[29]</sup>。采用上述方法分别获取 SBPT 和 PMT 试验的临塑压力  $p_f$  和初始压力  $p_0$ , 再代入式 (9) 计算出花岗岩残积土的承载力特征值  $f_{ak}$ 。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 原位测试的结果

根据对不同试验条件下 SBPT 和 PMT 试验结果进行分析, 得到了临塑压力  $p_f$ 、极限压力  $p_l$ 、承载力特征值  $f_{ak}$  和不排水剪切强度参数  $c_u$ , 取  $\gamma=10^{-4}$  对应的剪切模量为参考剪切模量  $G_f$ , 所得结果如表 3 和图 7 所示。可以看出残积土各工程参数随试验条件的变化存在较大差异, 由 PMT 试验获取的  $p_f$ ,  $p_l$ ,  $f_{ak}$ ,  $c_u$  和  $G_f$  的数值相对于 SBPT 试验结果分别下降了 27.9%, 36.1%, 33.7%, 35.5% 和 52.0%, 表明钻探扰动对土体力学性质造成了不可恢复的损伤。另外, 由 PMT 试验获取的各项土体参数随卸荷滞时增加均呈衰减趋势, 表明卸荷效应对土体力学性质的影响程度随应力释放时间增加逐渐提高。

表 3 原位试验的力学参数

Table 3 Basic mechanical parameters from in-situ tests

试验类型	临塑压力 $P_f/kPa$	极限压力 $P_l/kPa$	地基承载力 $f_{ak}/kPa$	不排水剪切强度 $c_u/kPa$	参考剪切模量 $G_f/MPa$
SBPT	912.1	1625	834.7	306.5	63.9
PMT0d	657.8	1037.6	553.2	196.9	30.6
PMT3d	629.0	957.0	521.8	185.4	26.2
PMT6d	597.0	894.0	510.0	178.7	24.8

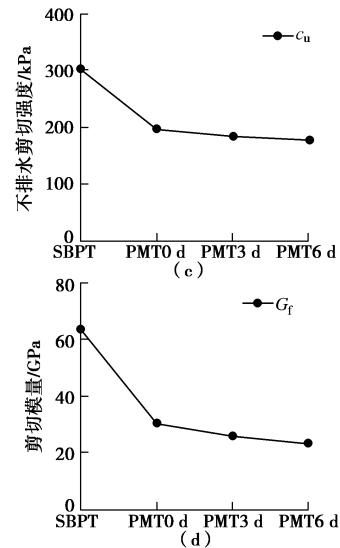
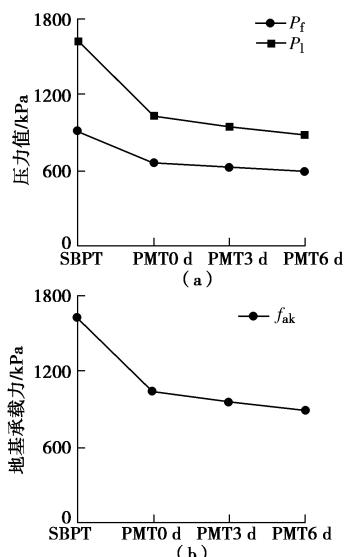


图 7 不同条件下的原位试验结果

Fig. 7 In-situ test results under different conditions

#### 3.2 钻探和卸荷的扰动程度分析

##### (1) 扰动系数

提出扰动系数  $R(u)$  以定量评价钻探扰动和卸荷滞时对土体的弱化效应:

$$R(u) = \frac{u_s - u_p}{u_s} \quad , \quad (10)$$

式中,  $R(u)$  为扰动系数, 本研究中的  $u$  代表参考剪切模量  $G_s$ 、不排水剪切强度  $c_u$  和地基承载力特征值  $f_k$ ,  $u_s$  和  $u_p$  分别表示由 SBPT 和 PMT 测试得到的参数指标。

扰动系数  $R(u)$  以最接近土体原位应力状态的 SBPT 试验结果为基准, 表征了在不同卸荷滞时下, PMT 试验结果相对于 SBPT 试验结果的衰减比例,  $R(u)$  值越大, 土体性质受扰动影响的弱化程度越大。

##### (2) 钻探扰动效应对 $R(u)$ 的影响

通过计算得到了刚度、强度和承载力指标的扰动系数  $R(u)$  随卸荷滞时增加的变化曲线, 如图 8 所示。卸荷滞时为 0 d 的扰动系数  $R(u)$  反映了钻探扰动的影响程度, 其中  $R(G_f)=0.525$ ,  $R(f_k)=0.322$ ,  $R(c_u)=0.362$ , 说明钻探扰动引起参考剪切模量、不排水剪切强和承载力特征值下降了 52.5%, 36.2% 和 32.2%。显然, 钻探扰动对花岗岩残积土刚度特性的影响明显强于对强度指标和承载力特征值的影响。

##### (3) 卸荷滞时效应对 $R(u)$ 的影响

不同卸荷滞后时间下的土体工程参数的扰动系数大小揭示了土体性质随应力释放时间的变化规律。从图 8 可以看出花岗岩残积土各项参数指标的扰动系数随应力释放时间增长呈上升趋势, 且增长速率逐渐减小, 说明土体原位力学性质随卸荷滞时的增加而衰减, 且衰减速度逐渐减小。与钻探扰动的特点相似, 不同卸荷滞时下的刚度扰动系数远大于强度和承载力指标, 进一步说明刚度特性更容易受到钻探扰动和卸荷

效应的影响。

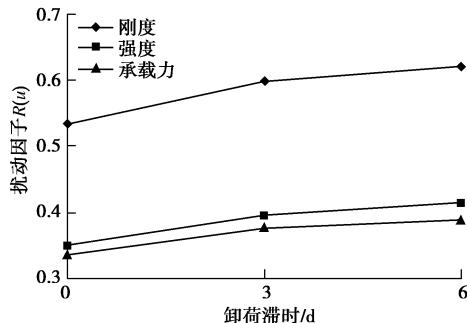


图 8 工程参数的扰动系数曲线

Fig. 8 Curves of disturbance factors

### 3.3 原位 $G - \gamma$ 曲线的衰减规律

从 3.2 节得知花岗岩残积土的刚度特性对钻探和卸荷扰动的响应程度均强于强度和承载力。在土力学研究中, 通常采用  $G - \gamma$  衰减曲线描述刚度特性随变形增加的衰减关系<sup>[21]</sup>。由非线性方法分析可以得到 SBPT 和 PMT 在  $\gamma = 0.0001 \sim 0.1$  区间内的  $G - \gamma$  实测曲线, 如图 9 所示。在剪应变  $\gamma$  增长过程中, 由 SBPT 得到的剪切模量值始终高于 PMT 获得的剪切模量值, 且由 PMT 获得的衰减曲线随卸荷滞后时间增加沿纵轴下移。

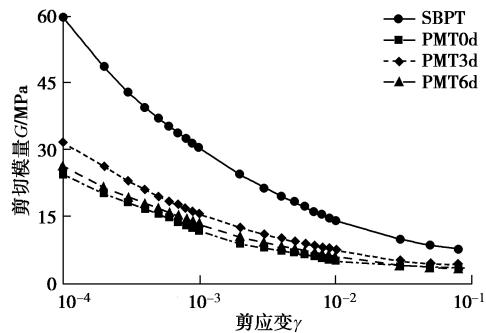


图 9 剪切模量 - 剪应变实测曲线

Fig. 9 Measured  $G - \gamma$  curves

在描述剪切模量和剪应变关系时, 通常采用 Hardin-Drnevich 方程、Ramber-Osgood 方程及 Stokoe 方程等数学模型, 由下式所示的 Stokoe 方程在描述花岗岩残积土原位  $G - \gamma$  衰减曲线时有较好的适宜性<sup>[31]</sup>:

$$G = \frac{G_{\max}}{(1 + \gamma_c / \gamma_f)^c} \quad (11)$$

式中  $G_{\max}$  为土体小应变剪切模量, 即在  $\gamma < 10^{-5}$  时保持不变的剪切模量值<sup>[31]</sup>;  $\gamma_f$  是参考剪应变, 为  $G/G_{\max}$  等于 0.5 时对应的剪应变值;  $c$  是曲率参数, 表征衰减曲线的弯曲程度。

本研究得到了不同试验条件下花岗岩残积土的原位  $G - \gamma$  衰减曲线, 通过 Stokoe 方程对实测结果进行数据拟合, 拟合参数如表 4 所示。

为了评价钻探扰动对  $G - \gamma$  曲线的影响, 用 Stokoe 数学模型对 SBPT 试验和卸荷 0 d 的 PMT 试验

结果进行拟合, 结果表明 Stokoe 方程对两种试验的实测  $G - \gamma$  曲线均有很好的拟合效果。由图 10 发现在剪应变  $\gamma$  增大到 0.01 后, 由 SBPT 和 PMT 获得的  $G - \gamma$  曲线逐渐靠近, 说明在土体剪应变  $\gamma > 0.001$  的条件下, 钻探扰动对刚度特性的影响程度并不明显, 即钻探扰动只对土体剪应变  $\gamma$  为 0.0001~0.01 变形阶段的刚度性质有显著影响。

表 4  $G - \gamma$  曲线的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of  $G - \gamma$  curves

组别	$G_{\max}$ /MPa	$\gamma_f$ /%	$c$
SBPT	78.5	0.0164	0.458
PMT0d	37.9	0.0124	0.418
PMT3d	34.1	0.0131	0.401
PMT6d	31.4	0.0148	0.427

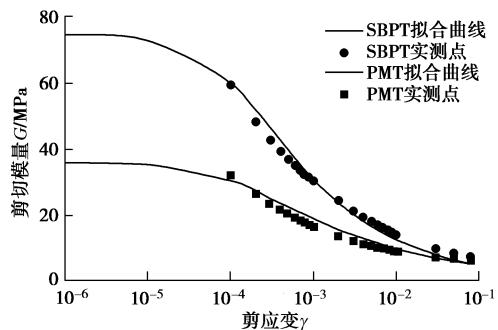


图 10 钻探扰动对  $G - \gamma$  曲线的影响

Fig. 10 Influences of drilling disturbance on  $G - \gamma$  curves

为了评价卸荷滞后对  $G - \gamma$  曲线的影响, 对不同卸荷滞后时间下的实测  $G - \gamma$  曲线及其拟合曲线进行对比分析。从图 11 可以看出, 卸荷滞后增加对原位  $G - \gamma$  衰减曲线影响特点与钻探扰动的影响特点类似, 即当  $\gamma$  在 0.0001~0.01 阶段时, 原位  $G - \gamma$  曲线随卸荷滞后增加有明显衰减趋势, 而  $\gamma > 0.01$  时, 曲线段接近重合。说明在小变形量下, 刚度特性随卸荷滞后增加有衰减趋势, 但在变形量较大时, 刚度参数几乎不受卸荷滞后增加的影响。

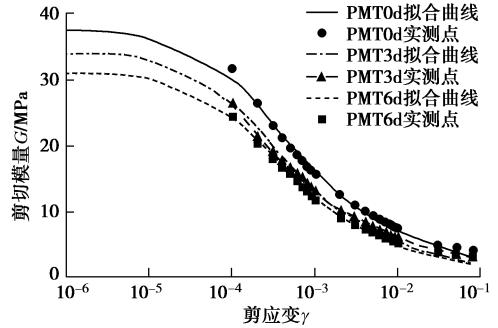


图 11 卸荷滞后对  $G - \gamma$  曲线的影响

Fig. 11 The unloading lag influence on  $G - \gamma$  curves

综上, 在剪应变较大的条件下, 钻探扰动和卸荷滞后对土体剪切模量影响较小。这主要是由于花岗岩残积土是一种结构性较强的土体, 当土体发生破坏进入残余变形阶段后, 其原生结构受到严重破坏, 此时的刚度性质主要受破坏程度, 即变形量的影响, 几乎

不受钻探扰动和卸荷滞时的影响。

## 4 结 论

(1) 通过对 SBPT 与 PMT 测试结果进行分析, 发现花岗岩残积土的原位强度指标、承载力特征值和刚度衰减特征受钻孔扰动的弱化影响十分明显。

(2) 通过对成孔后静置 0, 3, 6 d 的土层平行开展 PMT 试验, 发现花岗岩残积土原位强度指标、承载力特征值和刚度衰减特征的弱化程度随卸荷滞后时间增长而逐渐加剧。

(3) 扰动系数的提出为评价钻探扰动和卸荷滞时效应的影响程度提供了定量表征方法, 通过比较不同试验条件下强度、承载力和刚度参数的扰动系数, 发现花岗岩残积土的刚度特性更容易受到钻探扰动和卸荷效应的影响。

(4) 基于土体刚度特征的非线性分析方法, 得到了不同测试条件下花岗岩残积土原位  $G - \gamma$  衰减曲线, 用 Stokoe 提出的模型描述  $G - \gamma$  衰减曲线有较好的拟合效果。钻探扰动和卸荷滞时效应在  $\gamma = 0.0001 \sim 0.01$  条件下对剪切模量影响较显著; 而在土体剪应变  $\gamma > 0.01$  条件下, 剪切模量的衰减程度主要受土体结构性破坏程度的影响, 钻探扰动和卸荷滞时效应对土体刚度特性影响较小。

## 参考文献:

- [1] 吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005. (WU Neng-sen. A Study on Characteristics and Some Engineering Problems of Granite Residual Soil with Structural[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2005. (in Chinese))
- [2] QIAN Z, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Variability in unsaturated hydraulic properties of residual soil in Singapore[J]. Engineering Geology, 2016, **209**: 21 - 29.
- [3] 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(1): 2276 - 2284. (YAN Guang-hua. Development and new challenges of deep excavation supporting engineering in Guangdong province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 2276 - 2284.)
- [4] 竺维彬, 鞠世健, 张 弥, 等. 广州地铁二号线盾构穿越珠江的工程难题及对策[J]. 土木工程学报, 2004, **37**(1): 56 - 60. (ZHU Wei-bin, JU Shi-jian, ZHANG Mi, et al. On the engineering poser and countermeasures of driving and crossing the pearl river with two used TBMs in Guangzhou metro line of No.2[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, **37**(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [5] 许旭堂, 简文彬, 吴能森, 等. 降雨诱发残积土坡失稳的模
- [6] 型试验[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(2): 270 - 279. (XU Xu-tang, JIAN Wen-bin, WU Neng-sen, et al. Model test of rainfall-induced residual soil slope failure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(2): 270 - 279. (in Chinese))
- [7] 高建国. 花岗岩风化土中地铁基坑施工风险和对策[J]. 铁道勘察, 2010, **36**(3): 117 - 121. (GAO Jian-guo. Risks in construction of foundation pits for subway in weathering soil of granite as well as its countermeasures[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010, **36**(3): 117 - 121. (in Chinese))
- [8] 邱路阳, 刘毓氚, 李大勇. 高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2161 - 2166. (QIU Lu-yang, LIU Yu-chuan, LI Da-yong. A case study of failure mechanism of residual soil filled embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2161 - 2166. (in Chinese))
- [9] 郑敏洲, 简文彬, 吴茂明. 花岗岩残积土边坡稳定性可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **34**(增刊 2): 5337 - 5340. (ZHENG Min-zhou, JIAN Wen-bin, WU Mao-ming. Reliability analysis of stability of granite residual soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **34**(S2): 5337 - 5340. (in Chinese))
- [10] 庞小朝, 黄俊杰, 苏 栋, 等. 深圳地区原状花岗岩残积土硬化土模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(11): 4079 - 4085. (PANG Xiao-chao, HUANG Jun-jie, SU Dong, et al. Experimental study on parameters of the hardening soil model for undisturbed granite residual soil in Shenzhen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(11): 4079 - 4085. (in Chinese))
- [11] NG C W W, CHIU A C F. Laboratory study of loose saturated and unsaturated decomposed granitic soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(6): 550 - 559.
- [12] ZHANG Wen-gang, WANG Wei, ZHOU Dong, et al. Influence of groundwater drawdown on excavation responses: a case history in Bukit Timah granitic residual soils[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, **10**(5): 856 - 864.
- [13] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 残积土特殊应力路径的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(6): 932 - 936. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Test study on residual soil under special stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(6): 932 - 936. (in Chinese))
- [14] 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**(S1): 258 - 262. (in Chinese))
- [14] 张先伟, 李仁耿, 郑永民, 等. 顺德强风化岩层预应力管桩桩端土软化的现场试验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, **46**(9): 975 - 986. (ZHANG Xian-wei, LI Ren-geng, ZHENG Yong-min, et al. Field experimental study on prestressed concrete tube-pile bearing stratum softening in strong weathered rock formation of Shunde area[J]. *Scientia Sinica Technological*, 2016, **46**(9): 975 - 986. (in Chinese))
- [15] 胡 琦, 许四法, 陈仁朋, 等. 深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 537 - 541. (HU Qi, XU Si-fa, CHEN Ren-peng, et al. Influence of soil disturbance on metro tunnel in soft clay due to excavation of deep foundation pit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(S2): 537 - 541. (in Chinese))
- [16] 杨 科, 贾 坚. 上海软土基坑变形土体扰动机理及室内试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(6): 1266 - 1270, 1282. (YANG Ke, JIA Jian. Experimental and theoretical research on deformation mechanism of disturbed soil outside excavation pit in Shanghai clay[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, **9**(6): 1266 - 1270, 1282. (in Chinese))
- [17] 郭林坪, 孔令伟, 徐 超, 等. 厦门花岗岩残积土物理力学指标关联性定量表征初探[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 1): 175 - 180. (GUO Lin-ping, KONG Ling-wei, XU Chao, et al. Preliminary study of quantitative relationships between physical and mechanical indices of granite residual soil in Xiamen[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(S1): 175 - 180. (in Chinese))
- [18] 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.
- [19] 石祥锋, 汪 稔, 张家铭, 等. 旁压试验在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(增刊 1): 4442 - 4445. (SHI Xiang-feng, WANG Ren, ZHANG Jia-ming, et al. Application of pressuremeter tests in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(S1): 4442 - 4445. (in Chinese))
- [20] SA'DON N M, MICHAEL J P, KARIM A R A. Dynamic soil stiffness between WAK, SASW and SCPT tests[M]// InCIEC. Singapore: Springer, 2014: 461 - 475.
- [21] 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.
- [22] CAO L F, THE C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified cam clay: I theoretical analysis[J]. *Géotechnique*, 2001, **51**(4): 323 - 334.
- [23] MUIR WOOD D. Strain-dependent moduli and pressuremeter tests[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 509 - 512.
- [24] GIBSON R E, ANDERSON W F. In-situ measurement of soil properties with the pressuremeter[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2007, **18**(4): 4 - 7.
- [25] 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.
- [26] 汪明元, 单治钢, 王汉武, 等. 一种基于旁压试验确定海洋洋地层力学参数的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 2): 4302 - 4309. (WANG Ming-yuan, SHAN Zhi-gang, WANG Han-wu. A method for determining the mechanical parameters of marine layers using pressuremeter test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(S2): 4302 - 4309. (in Chinese))
- [27] ALZUBAIDI R M. Different results in pressuremeter theories[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, **32**(4): 965 - 972.
- [28] RANDOLPH M F, FAHEY M. Effect of disturbance on parameters derived from self-boring pressuremeter tests in sand[J]. *Géotechnique*, 1984, **34**(1): 81 - 97.
- [29] 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.
- [30] 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 shear strain decay curves of granite residual soil and its suitability analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(12): 4429 - 4436. (in Chinese))
- [31] 孔令伟, 蔡 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. (in Chinese))