

剪切应变速率对淤泥土力学性状影响试验研究^{*}

刘勇健,杨鑫,李彰明,黄承泽,张佳乐

(广东工业大学 岩土工程研究所,广州 510006)

摘要:为研究剪切应变速率对高含水量淤泥土力学性状的影响,运用 SPAX-2000 真三轴测试系统进行了不同周围压力 and 不同应变速率的固结不排水剪切试验,分析了淤泥土不排水抗剪强度和孔隙水压力随应变速率的变化规律。试验结果表明,高含水量淤泥具有“应变速率软化”现象。在剪切过程中(应变速率为 $10^{-6}/s \sim 10^{-2}/s$),淤泥土不排水抗剪强度随剪切应变速率增长而增长,符合指数变化规律;根据试验数据,建立了经验方程式,并求得其应变速率参数 η_{e1} 为 0.130 5, η_{e2} 为 0.131 9;当变率增长 10 倍时,淤泥土的不排水抗剪强度增长率为 13.12%。不同于强结构性黏土,淤泥土的强度随剪切应变速率呈渐进性变化,未出现明显临界速率转折点。在加载初期,孔隙水压力增长和最大孔隙水压力受应变速率影响较明显;在试验过程中,孔隙水压力变化具有一定波动性和滞后性。

关键词:淤泥土;剪切应变速率;不排水抗剪强度;真三轴试验;应变速率软化

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0068-08

Experimental Study on Effects of Shear Strain Rate on Mechanical Behavior of Muck Soil

Liu Yongjian, Yang Xin, Li Zhangming, Huang Chengze, Zhang Jiale

(Institute of Geotechnical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510060, P.R. China)

Abstract: In order to investigate the effects of shear strain rate on mechanical behavior of high water content muck soil based on SPAX-2000 test system, a series of true triaxial consolidation undrained shear tests were carried out under different confining pressures and different strain rates, variation rules of undrained shear strength of muck soil and the pore water pressure with strain rate were analyzed. The experimental results indicate that strain rate softening exists in muck soil. Under the experimental conditions (the strain rate ranges from $10^{-6}/s$ to $10^{-2}/s$), the undrained shear strength of muck soil increases with the increase of strain rate, the exponential rate equation can reflect relationship between the undrained strength and strain rate of muck soil. The empirical equations were established based on test data, the rate parameters η_{e1} is 0.130 5 and η_{e2} is 0.1319. When the strain rate increases 10 times, the growth rate of undrained shear strength is 13.12%. Different from strong structural clay, the shear strength gradually increases with the strain rate of muck soil without significant critical rate. The initial pore water pressure increase and the maximum pore water pressure are greatly affected by the strain rate. Another obvious feature of the pore water pressure is fluctuating and lagging.

Keywords: muck soil; shear strain rate; undrained shear strength; true triaxial test; strain rate softening

^{*} 收稿日期: 2018-08-16(修改稿)

作者简介: 刘勇健(1968-), 女, 湖南安化人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程教学与研究工作。

E-mail: liu-yongjian@163.com

通讯作者: 杨鑫(1986-), 女, 辽宁沈阳人, 博士后, 主要从事岩土力学与高速渗流力学研究工作。

E-mail: yxin861016@163.com

基金项目: 获国家自然科学基金(51178122); 广东省自然科学基金(2016A030313692); 广东省高教厅质量工程项目(粤教高函[2017]214号, 粤教高函[2018]1号)

0 引言

由于软土具有高孔隙比、高含水量、高黏粒含量、低渗透性和流变性,使得软土的强度与变形和时间相关,在荷载作用下表现出一定的加载速率力学效应^[1-2]。早在20世纪30年代,Buisman^[3]就曾指出在研究软土本构关系和强度特性过程中不能忽视加载速率的影响。然而,实际工程的加载速率与室内试验加载速率常存在较大差异,若不考虑加载速率影响,可能会使某些软土地基存在施工期失稳或工后沉过大沉降的隐患^[4-5]。

国内外学者对加载速率及其对土力学响应特性进行了一系列探索性研究^[5-12]。如Diaz Rodrigues等^[6]研究了Mexico黏性土强度与应变速率关系,表明应力-应变曲线峰值随应变速率提高而提高,并发现存在“应变速率软化”现象。蔡羽等^[7]通过对湛江黏土应变速率研究,证实了土结构性对土力学性质的影响。朱启银等^[8]对一维和三轴应力条件下软土加载速率效应归一化问题进行了系统研究。Graham^[11]研究了15种黏土,得出不排水抗剪强度增长率平均为10%;高彦斌^[5]利用各向异性弹塑性本构模型计算出应变速率参数 ρ 为7.2%~12.2%,而国外试验结果 ρ 为5%~23%^[12-19],平均为12%。文献大多为某特定条件下(某种固结状态、应力历史和试验方法)的加载速率研究;研究土性涉及结构性黏土、结构性黄土、一般含水量软黏土和重塑土;从试验手段上,主要采用常规三轴仪、直接剪切仪和环剪仪试验;而真三轴试验研究报道仍较少,鲜见高含水量淤泥土应变速率研究成果^[20-25]。以往研究表明,应变速率对土的不排水强度、先期固结压力、孔隙水压力、屈服压力、剪缩(剪胀)特性等影响规律,不同性状的黏土应变速率效应差异较大。因此,不同地区的软土仍需进行深入研究。

本文以广州南沙地区高含水量淤泥土为研究对象,进行了不同周围压力 and 不同应变速率的真三轴固结不排水剪切试验,在对比文献中其他土黏性土基础上,分析不排水抗剪强度和孔隙水压力随应变速率的变化规律,旨在为淤泥土工程特性及本构模型研究提供一定依据。

1 试验土样与试验方案

1.1 试验仪器

运用美国GCTS公司生产的SPAX-2000改进

型真三轴试验仪进行淤泥土三轴固结不排水剪切试验,该测试系统的主要功能和参数如表1。

表1 SPAX-2000 主要功能及指标

主要功能	性能指标
静态和动态竖向加载功能	静态最大轴压 25 kN, 静态最大轴压 20 kN, 最大频率 20 Hz, 最大速率 100 mm/s
三向同时动态功能	三个方向力可以独立控制, 最大主应力 5 MPa, 最大 k 中主应力 5 MPa, 最小主应力 2 MPa
应力/应变控制可任意切换功能	利用控制与后处理软件, 自动控制土样饱和、固结、静态及动态加载等
P/q 路径控制功能	最大动态频率 20 Hz, 围压动态频率 10 Hz, 双向耦合加载频率 10 Hz

1.2 试验土样

试验土样取自广州市南沙区某软土地基处理工程现场,为高含水量海相淤泥土。由于南沙地处珠江入海口,因其独特的地理环境和地质条件,形成深厚软土沉积层。该批土样埋深约为6.0~8.0 m,淤泥孔隙比为1.94,天然含水率为74.72%,重度为15.61 kN/m³,液限67.23%,塑限37.98%,小于0.005 mm的黏粒含量为41.0%。取样及蜡封均按土工试验要求在原位进行。

1.3 试验方案

本次试验对原状淤泥土试样进行3种周围压力(100 kPa、150 kPa、300 kPa),3种中主应力(120 kPa、175 kPa和230 kPa),3种孔隙水压力(30 kPa、60 kPa和90 kPa),相同固结应力比 $k_c = 1.28$ 条件下,5种剪切速率($10^{-6}/s$ 、 $0.8 \times 10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $0.5 \times 10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$)的三轴固结不排水剪切试验。以第2组试验条件(围压 σ_3 为150 kPa、中主应力 σ_2 为175 kPa、轴向应变为10%)下不同应变速率的真三轴固结不排水剪切试验为主,以其他试验条件结果对比为辅,共完成38个试样的CU试验,以期获得应变速率对高含水量海相淤泥土力学特性影响规律。

试验步骤:制备试样(长方体试样尺寸为50 mm×50 mm×120 mm)→抽真空饱和→反压饱和(孔隙水压力系数 $B \geq 0.95$)→试样固结(由GCTS-CATS软件设置固结程序:经等压固结和偏

压固结)→按设定应变速率进行 CU 试验,直到土样达到轴向应变设定值或试件破坏为止。

2 试验结果与分析

2.1 不同应变速率下应力-应变关系曲线特征

由于淤泥的结构性和流变性,使得土的应力-应变-强度关系与加载速率有明显相关性。为研究剪切应变速率对应力-应变关系曲线的影响,分别将淤泥试样在相同固结比($k_c = 1.28$),不同围压(100 kPa、150 kPa 和 200 kPa),不同中主应力(120 kPa、175 kPa 和 230 kPa),经 3 种固结压力条件固结后,分别以不同剪切应变速率($10^{-6}/s$ 、 $0.8 \times 10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $0.5 \times 10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$)竖向剪切至轴向应变达到 10%,得到其应力-应变关系曲线如图 1 和图 2 所示。

图 1 为 3 种固结条件:第 1 组($\sigma_3 = 100$ kPa, $\sigma_2 = 120$ kPa)、第 2 组($\sigma_3 = 150$ kPa, $\sigma_2 = 175$ kPa)和第 3 组($\sigma_3 = 200$ kPa, $\sigma_2 = 230$ kPa)不同应变速率下试样的偏应力-轴向应变关系曲线。图 2 为不同竖向应变速率条件下的偏应力-轴向应变关系曲线。从图中可知,当应变小于 1% 时,CU 试验过程中各试样偏应力均急剧增加,且应变速率越快,其增长速率越快;当在 1%~8% 时,偏应力仍增长较快;当应变大于 8% 时,各土样偏应力变化趋势出现差异,部分试样保持继续增长趋势,部分试样出现应变软化现象;应力峰值随着应变速率增大而增大。在相同围压下,土的剪切强度随着剪切应变速率增大而提高,应变软化具有应变速率效应,在相同围压下,剪切速率越快,应变软化现象就越明显。低中主应力应变软化现象要比高中主应力下的应变软化现象明显。

对比文献[7],湛江强结构性黏土(含水率为 48.6%,灵敏度为 5~7)的常规三轴 CU 试验应力-应变关系曲线有两个显著特征:①强结构性土“应变速率软化”现象显著;②在围压相同下 CU 剪偏应力峰值随剪切应变速率增大而呈现先减小后增大特征,存在明显临界速率转折点。文献[10]由常规三轴 CU 和 UU 试验,发现大连饱和重塑土(含水量为 29%)在低剪切速率下发生应变强化,高剪切速率下应变软化。天津滨海新区软土(含水量为 50.6%)^[22]在低围压条件下存在临界剪切速率,在高围压条件下临界剪切速率消失。试验结果表明,南沙淤泥土具一般黏土基本特性,但淤泥应变速率效应又不同于强结构性土和重塑土。强

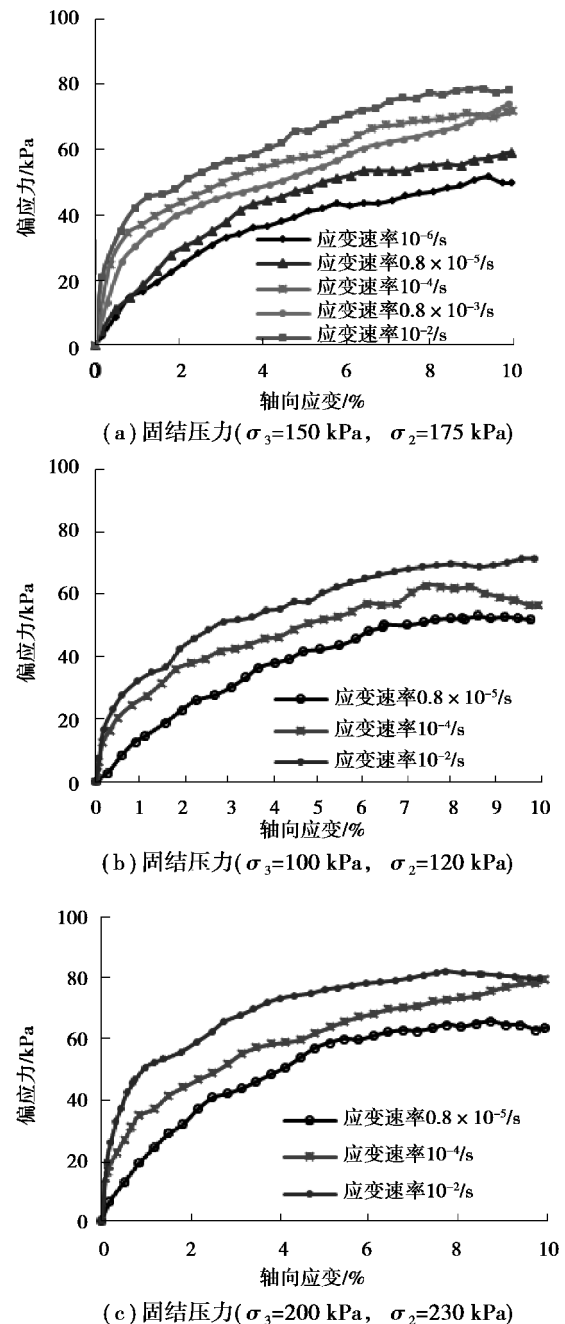


图 1 偏应力-应变速率-轴向应变关系曲线

Fig. 1 Relationship curves of deviation stress relationship curves of strain rate-axial strain

结构性软土有明显的临界速率转折点^[7-8],而淤泥土强度随剪切应变速率渐进性变化,未出现明显临界速率转折点。其应变速率效应差异性与淤泥土的成因、高含水量、低渗透和结构性等因素相关^[21-24]。

综上所述,室内试验中的“应变软化”是指土试样在达到峰值强度后,随着应变增加,应力减小,而应变软化过程中,随着应力的加大,应变增长的

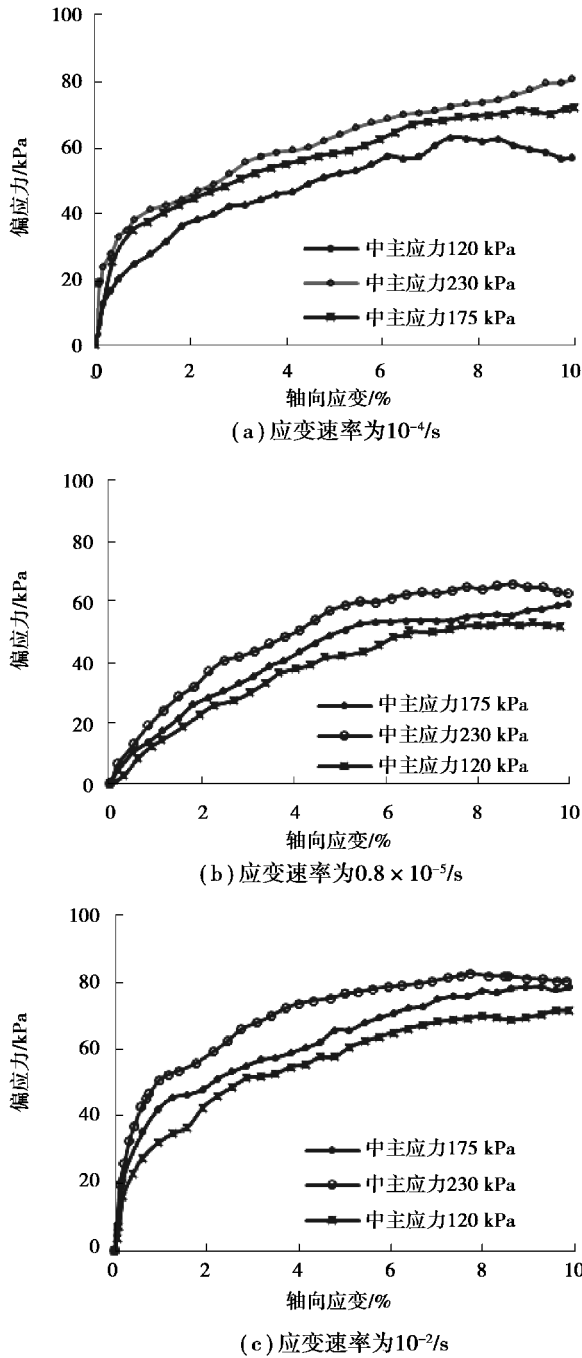


图2 偏应力-中主应力-轴向应变关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of deviation stress-second principal stress-axial strain

速率加快的现象。通过本次试验和土性对比表明,上述现象主要有三方面原因:①试验过程中的硬化或软化现象,首先取决于土的物理性质,如与某种含水量、内部结构和物理状态的软黏土软化现象极明显;②其次与土样的应力状态和试验条件密切相关,当周围压力、中主应力小时,由于侧向约束小、竖向变形大,则表现出应变增长速率加快,荷载增长速率相对减小,软化现象越明显;③淤泥土应变

软化具有应变速率效应。当应变速率较大时,由于淤泥土的渗透性差,试样中出现应力叠加,软化现象越明显。

2.2 剪切应变速率对不排水强度的影响

不排水抗剪强度是工程设计的重要指标。本文的淤泥土不排水强度 S_u 取值方法,当应力-应变曲线呈应变硬化土样,即不出现峰值时,取 10% 轴向应变 ε_1 对应的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的一半;当应力-应变曲线呈软化形式时,取峰值主应力差 q_k 的一半。

为了定量分析应变速率对不排水剪切强度的影响,分别在半对数坐标中作三组试验条件(第 1 组($\sigma_3 = 100$ kPa, $\sigma_2 = 120$ kPa)、第 2 组($\sigma_3 = 150$ kPa, $\sigma_2 = 175$ kPa)和第 3 组($\sigma_3 = 200$ kPa, $\sigma_2 = 230$ kPa)下的峰值(或最大)剪应力 q_k 与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 关系曲线。如图 3 所示,可知 $q_k - \dot{\varepsilon}$ 点据在半对数坐标中呈线性分布,3 组试验条件下淤泥强度-应变速率的回归方程式依次为式(1)、式(2)和式(3)

$$q_k = 3.390 \ln(\dot{\varepsilon}) + 94.101 \quad (1)$$

$$q_k = 3.062 \ln(\dot{\varepsilon}) + 96.476 \quad (2)$$

$$q_k = 2.236 \ln(\dot{\varepsilon}) + 90.825 \quad (3)$$

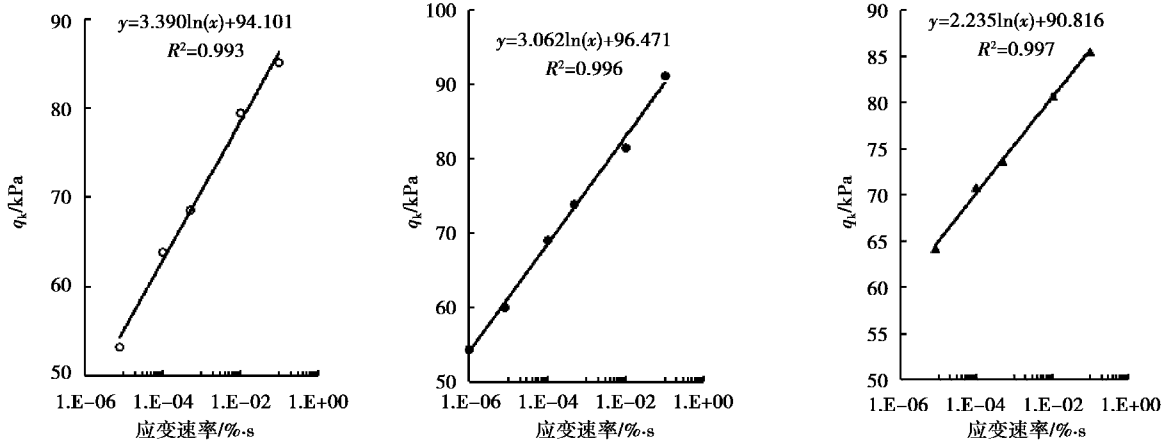
式中回归线的斜率可反映应剪强度随应变速率的变化快慢;斜率越大时,不排水抗剪强度随速率增长越快。如图 3 所示,土的不排水抗剪强度为应变速率的单调增函数,在相同固结比时,第 1 组(围压 120 kPa)斜率最大($k = 3.390$),强度随应变速率增长最快。3 组试验强度增长快慢依次为:第 1 组 > 第 2 组 > 第 3 组,表明低围压下应变速率对强度影响更明显。

剪切应变速率对不排水强度影响程度用应变速率参数 η 来表示,取应变速率提高 10 倍(1 个数量级)时的不排水抗剪强度增长率^[4],定义如下:

$$\eta = [\Delta S_u / S_{u0}] / \Delta \lg \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: ΔS_u 为强度增量; S_{u0} 为相同固结条件下某参考不排水强度,本次试验每组中应变速率最小试样作为参考强度值; $\Delta \lg \dot{\varepsilon}$ 为轴向应变速率。

关于抗剪强度随加载速率变化特征, Fodil^[12] 在 Graham 基础上提出了指数形式的应变速率方程,还有学者提出了对数方程^[4,7,14]。以第 2 组试验为例,对比分析指数和对数速率方程对南沙高含水量淤泥的适应性。



(a) 第1组($\sigma_3=100$ kPa, $\sigma_2=120$ kPa) (b) 第2组($\sigma_3=150$ kPa, $\sigma_2=175$ kPa) (c) 第3组($\sigma_3=200$ kPa, $\sigma_2=230$ kPa)

图 3 峰值(最大)剪应力与应变速率($q_k - \dot{\varepsilon}$)曲线

Fig. 3 The peak (maximum) shear stress-strain rate ($q_k - \dot{\varepsilon}$) curves

指数形式速率方程:

$$\eta_{s1} = \frac{q_{ik}/q_0 - 1}{\lg(\dot{\varepsilon}_1/\dot{\varepsilon})} \quad (5)$$

$$\eta_{e2} = \frac{q_{ik}/q_0 - 1}{\lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} + 1\right)} \quad (6)$$

对数形式速率方程:

$$\eta_{L1} = \frac{\lg(q_{ik}/q_0)}{\lg(\dot{\varepsilon}_1/\dot{\varepsilon})} \quad (7)$$

$$\eta_{L2} = \frac{\lg\left(\frac{q_{ik}}{q_0}\right)}{\lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\varepsilon} + 1\right)} \quad (8)$$

式中: η_{e1} 、 η_{e2} 为指数形式速率方程参数; η_{L1} 、 η_{L2} 为对数形式速率方程参数; $\dot{\varepsilon}_1$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为应变速率和该组参考样的应变速率; q_{ik} 、 q_0 分别为某试样峰值剪应力和参考峰值剪应力。

在半对数坐标中的点据拟合较好,回归方程式的回归系数 R^2 均较高。其中,两个对数方程与点据的拟合程度略差, R^2 低于 0.920;两个指数形式速率方程回归系数 R^2 均大于 0.956,表明指数方程能更好地反映淤泥土不排水强度随剪切应变速率变化特征,并且(5)式表达更简洁。如图 4 所示,南沙淤泥土速率参数 $\eta_{e1}=0.1305$, $\eta_{e2}=0.1319$,应变率增长 10 倍时,不排水抗剪强度增长率为 13.12%。

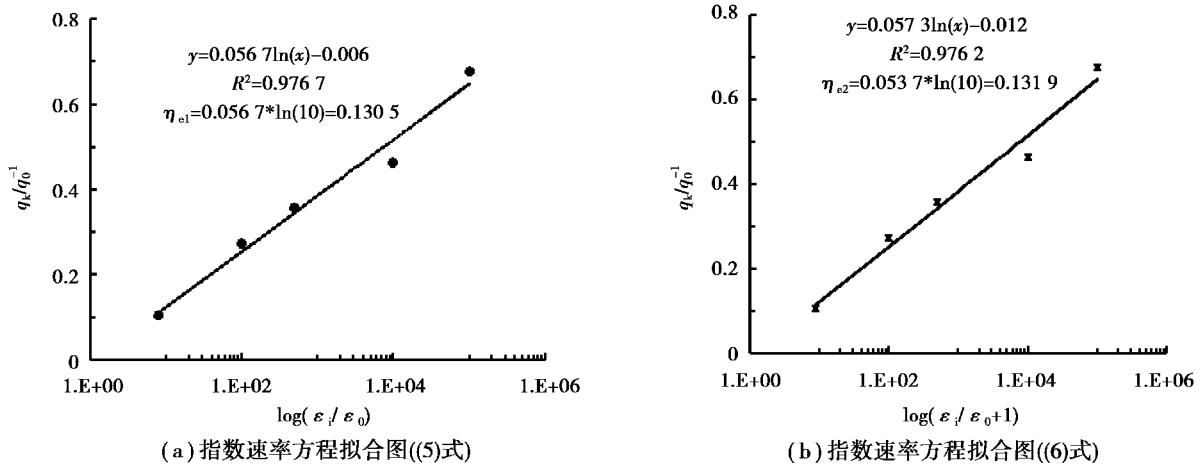


图 4 淤泥不排水强度应变指数速率方程曲线

Fig. 4 Comparison curves of exponential strain rate formulation for undrained shear strength of muck soil

研究表明,在相同固结条件下,抗剪强度相对增长率是剪切应变速率对数的单调增函数,且中主应力越小时,剪切应变速率对抗剪强度影响越明显。此外,由于原状淤泥土具有一定结构强度,在屈服应力水平附近,测试结果有小幅离散。速率参数大小与土的成因、物质组成、结构和物理性质等内因密切相关,另外受固结状态、应力历史和试验方法等因素影响。

2.3 剪切应变速率对孔隙水压力的影响

如图5所示,3种固结条件、不同剪切速率下超静孔隙水压力 μ -应变速率 $\dot{\varepsilon}$ -轴向应变 ε_1 关系曲线,在加载初期应变速率影响明显,后期对孔水压力影响不明显。在剪切初期,应变速率较低($10^{-6}/s$ 和 $0.8 \times 10^{-5}/s$)试样有较高孔隙水压力增长速率,超静孔隙水压力上升快,而这种变化趋势随着应变增长逐渐消失;当达到一定轴向应变(约3%~7%)后,剪切速率大的试样孔隙水压力逐渐高于剪切速率较低的试样。在本次试验条件下(试验终止轴向应变 $\varepsilon_1 \leq 10\%$),最终超静孔隙水压力各自稳定于一定值。此外,中主应力对土强度影响明显,而对孔隙水压力影响并不明显。

另一值得注意的现象是孔隙水压力的波动和滞后性,这是由于淤泥为絮凝结构,颗粒多为片状或柱状,在荷载作用下土性状与结构调整,使土中黏粒由“边-边”接触、“边-面”接触向“面-面”接触形式过渡,结构趋于均一化,土体结构状态逐渐向重塑土性状过渡。在施加荷载初期,土体内部应力集中应力,非均匀分布的应力使试样内孔隙水由中部向两端流动;加之黏粒的胶结作用和竖向渗透性差,对孔隙水流动产生一定抑制作用,位于试件底部的孔压传感器测得的孔隙水压力偏低,时间滞后。此外,由于孔隙水压力因受众多因素影响,孔压变化与应变速率非增函数关系,出现小幅波动。

根据文献[7],湛江强结构性黏土在低围压下不同剪切速率得到的孔隙水压力峰值基本相等;在高围压下,剪切速率对孔隙水压力的影响才逐渐显示。Crawford^[14]对Leda黏土试验研究中发现剪切速率对孔隙水压力影响十分显著,而Guy Lefebvre对Quebec黏土研究发现,在三轴试验过程中孔隙水压力大小与剪切速率大小无关。对比结果表明,黏性土性状和试验条件不同,三轴固结不排水剪切

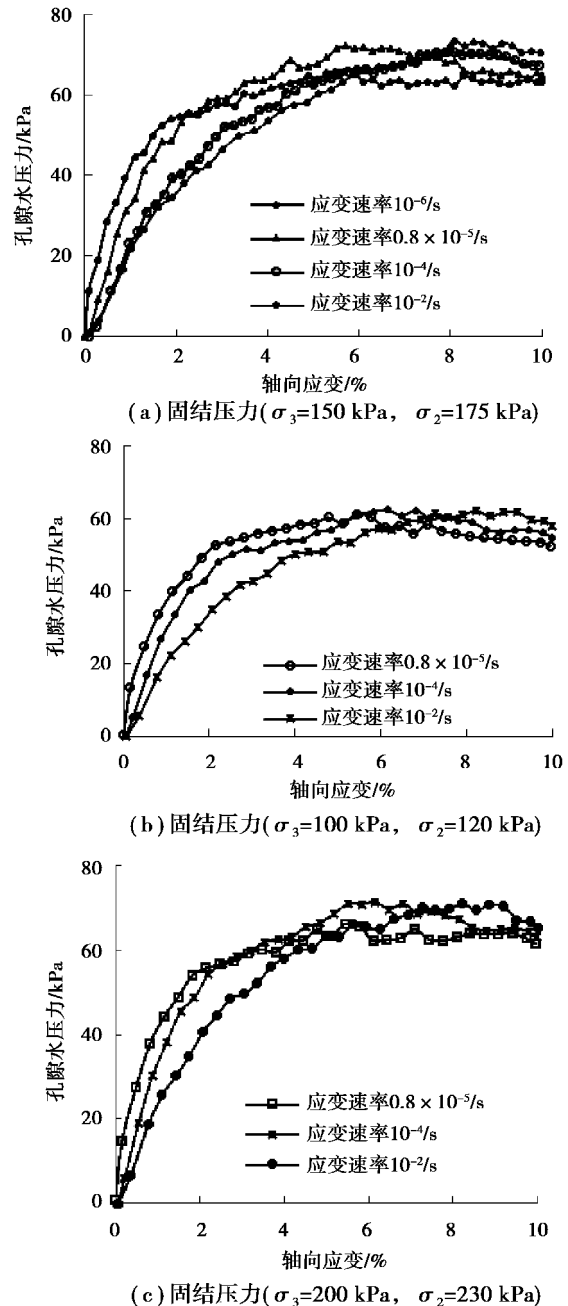


图5 不同应变速率下固结状态土的 u 与 ε_1 关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of pore pressure u -axial strain ε_1 under different strain rate

试验过程中剪切速率对孔隙水压力影响差异较大。

综上所述,我们通过对淤泥剪切应变速率力学效应的真三轴试验研究,得到与以往黏土速率效应研究成果相似结论,但也有新认识。高含水量淤泥土不排水抗剪强度随剪切应变速率增长性状及速率参数大小,孔隙水压力变化规律与文献中的强结构性黏土、重塑土和一般低含水量黏土等土类仍存在较大差异。这与淤泥的成因、高含水量、高黏粒

含量、高液限、中灵敏度,具絮凝结构、流变性和真三轴试验条件等因素相关,有别于前人研究成果,具有一定的代表性。

3 结论

(1) 本次试验条件下,南沙淤泥不排水抗剪强度随应变速率变化符合指数方程,指数速率参数 $\eta_{e1}=0.130\ 5$, $\eta_{e2}=0.131\ 9$, 应变率增长 10 倍时不排水抗剪强度增长率为 13.12%。

(2) 相同固结条件下,在剪切初期,应变速率较低,试样超静孔隙水压力上升快,随着应变增长,这种变化趋势逐渐消失;超静孔隙水压力受众多因素影响,与应变速率并非增函数关系。

(3) 高含水量淤泥具有一般黏土的基本特性,但又区别于强结构性黏土和重塑土,淤泥强度随应变速率渐进性变化,未出现明显临界速率转折点。其应变速率效应的差异性与淤泥高含水量、低渗透和结构性等因素相关。

(4) 淤泥土应变软化具有应变速率效应;在相同围压下,剪切速率越快,应变软化现象就越明显。随着固结压力的增大,应变速率对土的不排水抗剪强度影响逐渐减弱。低中主应力应变软化现象要比高中主应力下应变软化现象明显。

(5) 本文结论适合于与本次试验用土物理性质指标相似、试验条件(荷载条件和剪切应变速率)相同的淤泥土,而对于土样天然含水率远大于或远小于 74.72% 的其他土,如经暴晒后土样含水率下降明显,由于土物理性质的明显变化,必然引起土的力学特性(剪切特征)相应变化。因此,软土工程建设需合理控制加载速率,并密切关注剪应变速率的力学效应等相关问题,以确保工程建筑物的安全稳定,经济合理。

参考文献(References)

- [1] 李彰明. 软土地基加固与质量控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Li Zhangming. Reinforcement and quality control of soft soil foundation [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 刘勇健, 符纳, 钱晓敏, 等. 冲击荷载下软土的动力响应及结合水变化试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 322-329. (Liu Yongjian, Fu Na, Qian Xiaomin, et al. Experiment study on dynamic response and variation of bound water of soft clay under impact loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 322-329. (in Chinese))
- [3] Buisman A S. Results of long duration settlement tests [A]//Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. Cambridge, 1936: 103-107.
- [4] 高彦斌, 汪中为. 应变速率对黏土非排水抗剪强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5779-5783. (Gao Yanbin, Wang Zhongwei. Effect of strain rate on undrained shear strength of clays [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5779-5783. (in Chinese))
- [5] 刘勇健, 李彰明, 梁仕华. 软土工程性质与微观结构关系的神经网络模型[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 777-782. (Liu Yongjian, Li Zhangming, Liang Shihua. Neural network model on the relationship between engineering properties and microstructure of soft soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 777-782. (in Chinese))
- [6] Abraham Díaz Rodríguez J, José Martínez Vasquez J, Carlos Santamarina J. Strain-rate effects in Mexico city soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(2): 300-305.
- [7] 蔡羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变速率对湛江结构性黏土力学性状的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1235-1240. (Cai Yu, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1235-1240. (in Chinese))
- [8] 朱启银, 尹振宇, 朱俊高, 等. 软黏土加载速率效应特性试验研究: 进展与趋势[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 7-19. (Zhu Qiyin, Yin Zhenyu, Zhu Jungao, et al. Progress and trend of experimental investigation on rate-dependent behavior of soft clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 7-19. (in Chinese))
- [9] 齐剑峰, 栾茂田, 聂影. 饱和黏土剪切变形与强度特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(4): 551-556. (Qi Jianfeng, Luan Maotian, Nie Ying. Experimental study of shear and strength behavior of saturated clay [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(4): 551-556. (in Chinese))
- [10] 史卜涛, 张云, 胡磊. 剪切速率对重塑饱和黏土强度

- 影响试验[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(2): 90-95. (Shi Butao, Zhang Yun, Hu Lei. The saturated remolded clay strength under different direct shear rates [J]. Coal Geology and Exploration, 2017, 45(2): 90-95. (in Chinese))
- [11] Graham J, Crooks J H A, Bell A L. Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays [J]. Geotechnique, 1983, 33(3): 327-340.
- [12] Fodil A, Aloulou W, Hicher P Y. Viscoplastic behavior of soft clay[J]. Geotechnique, 1997, 47(3): 581-591.
- [13] Rower R, Hinchberger S D. The significance of rate effects in modelling the Sackville test embankment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 500-516.
- [14] Crawford C B. The influence of rate of strain of effective stresses in sensitive clay [A]//Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing [C]. ASTM Special Technical Publication, 1959: 36-48.
- [15] Yin J H, Cheng C. Comparison of strain-rate dependent stress-strain behavior from K₀-consolidated compression and extension tests on natural Hong Kong marine deposits[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2006, 24(2): 119-147.
- [16] Yin Z Y, Chang C S, Karstunen M, et al. Anisotropic elastic-viscoplastic model for soft clays [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(5): 665-677.
- [17] Vaid Y P, Campanella R G. Time-dependent behavior of undisturbed clay [J]. Journal of the Geo-technical Engineering Division, 1977, 103(7): 693-709.
- [18] Hinchberger S D, Rowe R K. Evaluation of the predictive ability of two elastic-viscoplastic constitutive models[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6): 1675-1694.
- [19] Sheahan T C, Ladd C C, Germaine J T. Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(2): 99-108.
- [20] 但汉波, 王立忠. K₀固结软黏土的应变率效应研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 718-725. (Dan Hanbo, Wang Lizhong. Strain-rate dependent behaviors of K₀ consolidated clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 718-725. (in Chinese))
- [21] 陈铁林, 周成, 沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31-35. (Chen Tielin, Zhou Cheng, Shen Zhujiang. Compression and shear test of structured clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 31-35. (in Chinese))
- [22] 杨爱武, 雷博. 剪切速率对结构性吹填软土力学特性影响试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 7-12. (Yang Aiwu, Lei Bo. Experiment study on effect of shearing rate on mechanical behavior of structured soft dredger fill [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 7-12. (in Chinese))
- [23] 党进谦, 蒋仓兰, 吉中亮. 剪切速率对结构性黄土力学性状的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 459-464. (Dang Jinqian, Jiang Canglan, Ji Zhongliang. Effect of shear rate on mechanical properties of structural Loess [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 459-464. (in Chinese))
- [24] 吕宾林, 王金文, 蔡德钧. 剪切速率对重塑饱和黏土强度影响试验[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 73-75. (Lu Binlin, Wang Jinwen, Cai Degou. Experimental study of influence of shear rate on clay undrained strength [J]. Railway Engineering, 2013, 35(1): 73-75. (in Chinese))
- [25] 张驰, 王文松, 曹冠森. 不同应力下剪切速率对尾矿砂强度特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增2): 463-469. (Zhang Chi, Wang Wensong, Cao Guansen. Analysis on the influence of shear velocity on tailing sand shear strength under different stress [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Supp.2): 463-469. (in Chinese))