

DOI : 10.11779/CJGE2017S2004

海积软黏土的强度特性与桩土界面剪切速率效应

孔令伟¹, 熊春发^{1,2}, 郭爱国¹, 杨爱武^{1,3}

(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. 广西交通科学研究院广西道路结构与材料重点实验室, 广西 南宁 530007; 3. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘要: 针对中等结构性的海积软黏土, 开展了剪切速率影响下原状土的三轴 CU 试验与软黏土-钢管桩环剪试验, 分析了其抗剪强度与桩土界面特性的演化规律, 并对桩周土剪切后再固结的界面性状进行了模拟试验。结果表明, 该土样的抗剪强度与内摩擦角均随剪切速率的增大而单调增大, 而黏聚力则相反; 发现在不排水条件下, 桩土接触界面的峰值强度与摩擦角随着剪切速率的增大也随之增大, 应变软化现象更加明显, 但相应的残余强度与摩擦角变化甚微; 桩周软黏土历经剪切大变形重新固结后, 桩土界面的强度性状呈现出峰值强度降低与残余强度增大的特征。

关键词: 软黏土; 剪切速率; 环剪试验; 强度特性; 桩土界面

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0013-04

作者简介: 孔令伟(1967-), 男, 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研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn.

Effects of shear rate on strength properties and pile-soil interface of marine soft clay

KONG Ling-wei¹, XIONG Chun-fa^{1,2}, GUO Ai-guo¹, YANG Ai-wu^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071 China; 2. Guangxi Key Laboratory of Road Structure and Materials, Guangxi Transportation Research Institute, Nanning, Guangxi, 530007 China; 3. Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chenjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The CU triaxial tests and ring shear tests on interface between steel pipe pile and soil of a kind of intact marine soft clay with medium structure are carried out under influence of shear strain rate, and the variations of strength properties and pile-soil interface properties of the tested soil with shear strain rate are analyzed. Moreover, simulation tests on the reconsolidated soft clay around the pile after shearing are also conducted to analyze the strength behaviors of pile-soil interface. The results show that the shear strength and internal friction angle of the tested soil increase with the increasing shear strain rate monotonously, while the variation characteristics of the cohesion are opposite. Under the undrained condition, it is also found that the peak shear strength and internal friction angle of the pile-soil interface increase with the increasing shear strain rate, and the strain softening phenomenon becomes more obvious, however, the corresponding variations of residual shear strength and internal friction angle are very small. Although the peak shear strength of reconsolidated soil around the pile after large shear deformation tends to decrease, the residual shear strength increases, which shows the strength recovery characteristics of pile-soil interface.

Key words: soft clay; shear rate; ring shear test; strength property; pile-soil interface

0 引言

软黏土均具有不同程度的结构强度, 其力学性能受控于结构性的强弱, 且具有显著加载速率效应。朱启银等^[1]总结了软黏土加载速率效应, 但涉及不同强弱结构性土体影响差异性分析不多。陈铁林等^[2]开展了人工结构性黏土在不同速率下的压缩和剪切特性试验, 发现高应变速率下软化特性影响显著, 且低围压下应变速率影响更大; 蔡羽等^[3]针对湛江强结构性黏

土, 分析了剪应变率对其力学性状的影响, 发现其固结不排水剪切强度、黏聚力与内摩擦角随剪切速率增大呈现先减小后增大的特征, 存在拐点效应的临界速率现象。但工程实践中遇到的大多为中等结构性软黏土, 是否普遍存在临界速率效应, 有待深入探究。

在软黏土地区桩基工程中, 存在反映成桩快慢的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186, 41372291)

收稿日期: 2017-08-02

表 1 天津软黏土物理力学性质平均指标

Table 1 Physical and mechanical indices of Tianjin soft clay

天然含水率 $w/\%$	天然重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3})$	颗粒相对密度 G	孔隙比 e	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	渗透系数 $K/(10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	压缩系数 $a_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	结构屈服应力 σ_k/kPa
39.0	17.7	2.75	1.10	41.8	23.4	18.4	0.85	3.0	0.45	110.0

剪应变速率与承受上覆荷载快慢的加载速率问题，如何判识其桩土界面效应，对选取桩周土强度参数与计算桩侧摩阻力具有参考价值。此外，成桩过程都会引起桩周土的扰动损伤，界面处土体会发生大变形与结构强度丧失，但受扰动的桩周土在上覆地层自重下随时间的递移而重新固结，强度有不同程度恢复，如何模拟该种过程的桩土界面强度性状，进入分析桩土界面相互作用的长期性能，少见文献报道，而环剪仪常用来探讨不同材料接触面的剪切特性，将其应用于研究软黏土的桩土界面力学效应，值得尝试。

本文以天津海积软黏土为对象，通过开展不同剪切速率下软黏土 CU 试验、钢管桩-软黏土环剪试验以及软黏土历经剪切再固结的强度恢复模拟试验，探讨该软黏土的强度特性与桩土界面剪切速率效应。

1 试验土样及试验方案

1.1 试验土样

土样来自天津滨海新区某地，薄壁取土器取土深度 13.5~16.5 m，其物理力学特性平均指标见表 1，具有中等压缩性。土样灵敏度为 4.2，按灵敏度来判断其结构性强弱，该软黏土属中等结构性土^[4]。

1.2 试验方案

采用 GDS 三轴仪开展不同固结压力下剪切速率为 0.05, 0.50, 5.0 kPa/min 原状土 CU 试验，试样尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 38\text{ mm}$ ，用于分析剪切速率对天津海积软黏土强度特性的影响，固结压力分别为 50, 100, 150 kPa，剪切速度分别为 0.05, 0.5, 5.0 kPa/min。

原状土与钢桩界面环剪试验在 DTA-138 型环剪仪上完成，剪切速率为 0.05, 0.50, 5.0 mm/min，固结压力分别为 90, 180, 270 kPa。放在上剪切盒的环状土样外径、内径与高度为 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10$

mm，置入下剪切盒模拟钢桩的钢环尺寸与土样相同；固结后开始剪切，剪切时上盒固定、下盒转动，当剪切位移达 30 mm 时停止试验。

历经剪切大变形重新固结后桩土界面强度特性试验与上述环剪试验类似。不同之处在于当剪切位移达到 30 mm 停止试验后，保持固结压力不变重新固结 24 h，以同样剪切速率 0.05 mm/min 再次剪切至位移达 30 mm 时终止（见表 2），以此再现历经大变形重新固结后的软黏土与钢桩相互作用特征。

表 2 软黏土历经剪切大变形再固结后桩土界面环剪试验

Table 2 Ring shear tests on interface between pile and reconsolidated soft clay after large shear deformation

再固结桩土界面环剪试验	设置固结压力 σ_c/kPa			剪切速率 $/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	剪切位移/mm
	90	180	270		
				0.05	30

表 3 不同剪切速率下软黏土强度指标

Table 3 Strength indices of soft clay under different shear rates

剪切速率 $/(\text{kPa}\cdot\text{min}^{-1})$	总应力指标		有效应力指标	
	c/kPa	$\phi/(\text{°})$	c'/kPa	$\phi'/(\text{°})$
0.05	23.5	9.6	9.8	22.4
0.5	22.2	11.9	7.4	26.3
5.0	19.5	14.4	3.6	30.8

2 试验结果与分析

2.1 剪切速率对海积软黏土强度特性的影响

原状软黏土在不同剪切速率下 CU 试验应力-应变及孔隙水压力-应变曲线见图 1, 2，表 3 为其强度指标。发现在剪切速率 0.05~5.0 kPa/min 内，其抗剪强度、内摩擦角随剪切速率增大而增大，黏聚力则略有减小。以往研究表明，软黏土不排水抗剪强度在应变率增加 10 倍时，强度增长幅度为 5%~20%，且与土体物理力学性质的差异密切相关^[2, 4]，图 1 与表 3

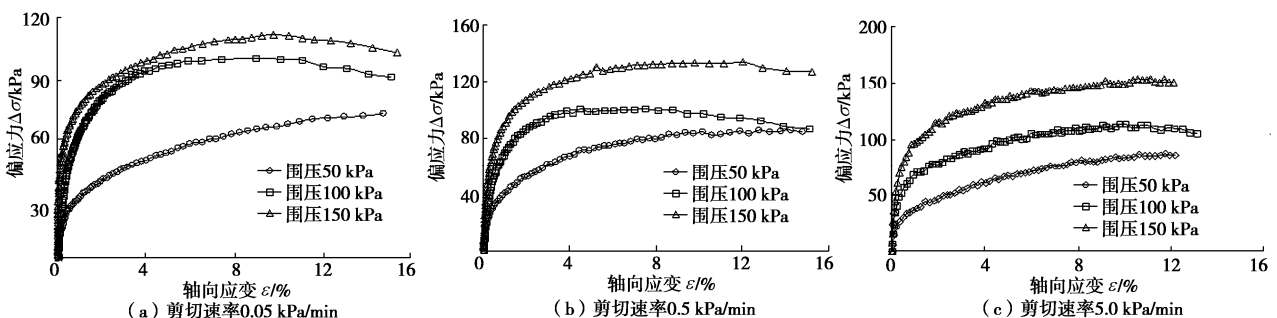


图 1 不同剪切速率下结构性软黏土软黏土应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain relation curves of structured soft clay under different shear rates

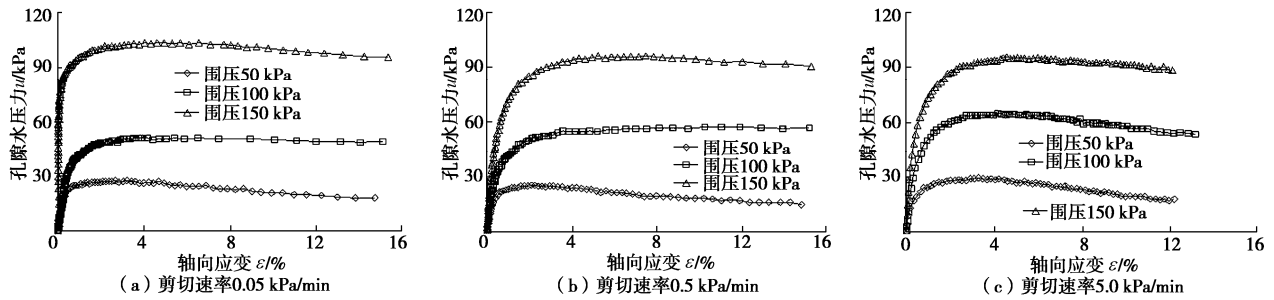


图 2 不同剪切速率下结构性软黏土软黏土孔隙水压力-应变关系曲线

Fig. 2 Pore water pressure-strain relation curves of structured soft clay under different shear rates

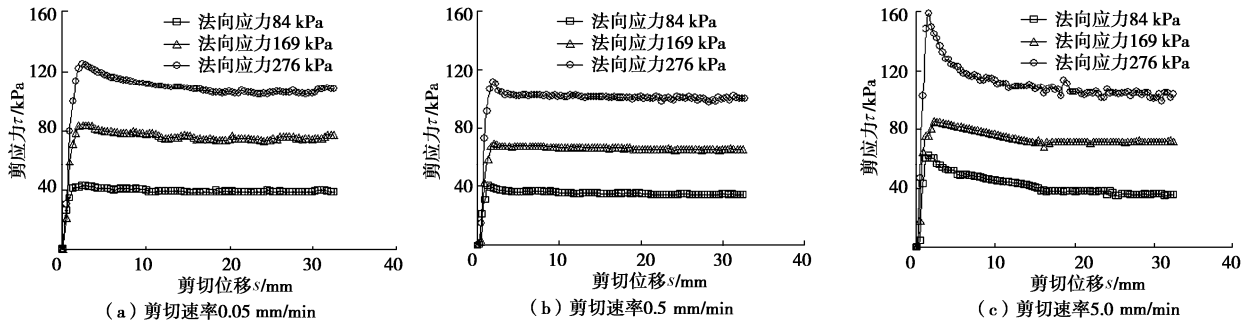


图 3 不同剪切速率下桩土界面剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 3 Shear stress-deformation relation curves of pile-soil interface under different shear rates

表 4 不同剪切速率下桩土界面的强度指标

Table 4 Strength indices of pile-soil interface under different shear rates

剪切速率 (mm·min ⁻¹)	强度指标					
	c_p /kPa	φ_p (°)	相关系数 R^2	c_r /kPa	φ_r (°)	相关系数 R^2
0.05	9.1	23.0	0.9958	12.8	18.9	0.9912
0.5	7.1	20.7	0.9995	5.5	19.3	0.9986
5.0	8.8	27.8	0.9569	7.8	19.6	0.9894

表 5 历经剪切大变形再固结后桩土界面的强度指标变化特性

Table 5 Variation of strength indices of interface between pile and reconsolidated soft clay after large shear deformation

土体状态	强度指标					
	c_p /kPa	φ_p (°)	相关系数 R^2	c_r /kPa	φ_r (°)	相关系数 R^2
再固结前	9.1	23.0	0.9958	12.8	18.9	0.9912
再固结后	11.3	21.8	0.9929	8.9	21.4	0.9881

的结果与上述结论相吻合,对于大多数软黏土,其结构屈服应力通常较小,其剪切速率效应更接近于重塑土^[4],不存在强结构性黏土的独特临界速率现象^[3]。

2.2 钢管桩与软黏土界面力学特性的剪切速率效应

桩土界面环剪试验结果见图 3,4,峰值与残余强度指标如表 4 所示。在 0.05~5.0 mm/min 剪切速率内,抗剪强度及黏聚力与内摩擦角总体呈现先减小后增大演化规律。剪切速率为 0.05 mm/min 时,可认为剪切过程中基本处于排水条件,剪切速度达到 0.5 mm/min 可近似认为处于不排水条件;当剪切速率由 0.05 mm/min 增大至 0.5 mm/min 时,剪切过程因孔隙水压力增加使其强度降低,其强度略有弱化趋势。

在剪切速率 0.5~5 mm/min 不排水条件下,其强度随剪切速率增大而增长与以往软黏土的剪切速率效

应类似,但峰值强度增长达 21%~52%,主要体现峰值内摩擦角增加上;而残余强度增长幅度为 2%~8%,内摩擦角与黏聚力变化均较小。原因是随剪切速率增大需达到更大位移与克服更大阻力才可使峰值强度降至残余强度(见图 3),当剪应力达到峰值强度时,黏土基本单元体处无序排列状态;达到残余强度时,趋向有序定向状态,而当变形超过一定值后,则处于相对稳定状态,此时受剪切速率影响很小,这也是桩基宜控制适当施工速率的缘故。

2.3 历经大变形再固结软黏土的桩土界面强度特征

历经剪切大变形重新固结后桩土界面环剪试验结果见图 5,6(剪切速率 0.05 mm/min),表 4 为峰值与残余强度指标。类比图 5,3(a)与表 5,再固结前后桩土界面剪应力-位移关系及强度指标,发现再固结

后峰值强度在固结应力较低时基本不变,反之则有所降低,致使峰值摩擦角略有降低,且剪应力达到峰值强度时剪切位移更小,由固结前 2.3 ~ 2.7 mm 减小到 0.4 ~ 0.8 mm,这说明在较小变形下就可破坏再生重组的结构恢复强度;但残余强度与残余内摩擦角因固结压密略有增大。

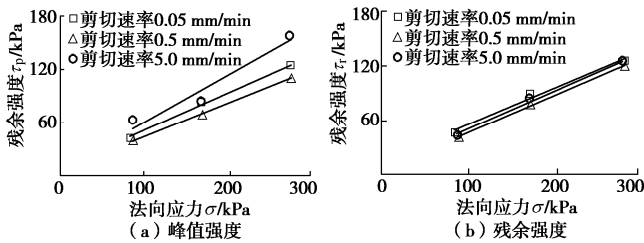


图 4 不同剪切速率下桩土界面的剪切强度与法向应力关系

Fig. 4 Shear strength-normal stress relations of pile-soil interface under different shear rates

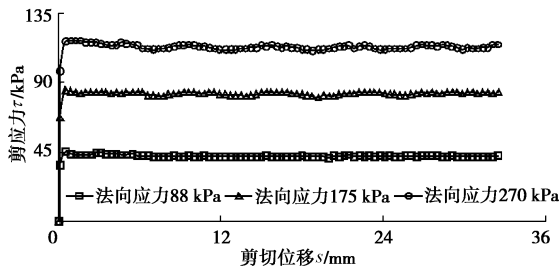


图 5 历经剪切大变形再固结桩土界面剪应力-剪切位移关系

Fig. 5 Shear stress-deformation relations of interface between pile and reconsolidated soft clay after large shear deformation

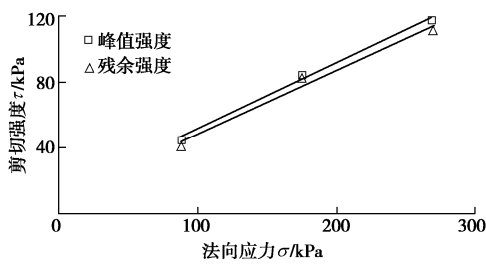


图 6 历经剪切大变形再固结桩土界面剪切强度与法向应力关系

Fig. 6 Shear strength-normal stress relations of interface between pile and reconsolidated soft clay after large shear deformation

对于历经大变形后再固结软黏土而言,重新固结前土体就呈定向排列,强度降至残余强度,重新固结使土体颗粒相互嵌合,且随时间推移,因固结与触变性形成再生结构,但历经大变形后的结构状态并不可逆,再次固结使孔隙比有所减小与干密度有所增大,导致桩土界面峰值强度略有降低而残余强度有所提

高。因此,确定桩基承载力应充分考虑软黏土桩侧摩阻力随成桩休止时间增长而增大的有利因素,成桩后间隔一定时间方可进行检测,否则提出的设计参数偏于保守与安全。

3 结 论

(1) 中等结构性海积软黏土在不排水剪切条件下,其抗剪强度与内摩擦角随剪切速率增大而呈单调增大,而黏聚力则相反,不存在临界剪切速率效应。

(2) 不排水条件下,桩土界面的峰值强度随剪切速率增大而有较大幅度增长,主要表现为峰值内摩擦角增加与应变软化更加明显,对残余强度影响甚微。

(3) 桩周软黏土历经大变形重新固结后,桩土界面峰值强度与内摩擦角有所降低,达到峰值强度的剪切位移更小,但残余强度与相应内摩擦角则略有增大。

参考文献:

[1] 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 - 24. (ZHU Qi-yin, YIN Zhen-yu, ZHU Jun-gao, et al. Progress and trend of experimental investigation on rate-dependent behavior of soft clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 7 - 24. (in Chinese))

[2] 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 Tie-lin, ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang. Compression and shear test of structured clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 31 - 35. (in Chinese))

[3] 蔡 羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变率对湛江强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 Ling-wei, GUO Ai-guo, 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))

[4] 熊春发. 不同加荷模式下软黏土的力学响应与结构损伤特征[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013. (XIONG Chun-fa. Characteristic of mechanical response and structural damage of soft clay under different loading mode[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)