

DOI: 10.11779/CJGE2017S1018

基于流变仪测试超软土强度的试验方法

鲁 双¹, 范 宁¹, 年廷凯^{*1, 2, 3}, 赵 维¹, 吴 昊¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘 要: 随着中国港口工程建设与海洋资源开发的快速发展, 遇到了许多涉及超软土的工程问题。对这类具有一定流动性的超软土, 常规土工测试方法难以有效地测量其强度。引入流体测试中的流变仪, 开展了多组超软土试样的强度和流变特性试验研究, 在对试验结果深入分析的基础上, 系统探讨了转子尺寸、剪切速率增量和转子轴杆摩擦力对测试结果的影响, 提出了一种使用流变仪进行超软土强度测试的有效方法。通过与前人测试结果进行对比分析, 验证了该仪器和测试方法的可靠性, 从而为超软土不排水剪切强度的有效测量提供了新的途径。

关键词: 超软土; 流变仪; 剪切速率; 不排水剪切强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0091-05

作者简介: 鲁 双(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事超软土强度分析方面研究。E-mail: Lushuang91@126.com。

Experimental approach for strength of ultra-soft clay by using rheometer

LU Shuang¹, FAN Ning¹, NIAN Ting-kai^{1, 2, 3}, ZHAO Wei¹, WU Hao¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China)

Abstract: The actual engineering problems induced by super low-strength soft clay are paid more and more attention with the rapid development of port and ocean engineering. However, the routine geotechnical experimental method can not test the strength of this kind of soft clay effectively. A RST rheometer used in fluid tests is introduced here to carry out some experiments on the strength and rheological characteristics of the ultra-soft clay. Based on the comprehensive analysis of the experimental results, the quantitative effects of spindles size, strain rate increment and shaft friction are systematically discussed, and an effective experimental approach to test the strength of the ultra-soft clay is offered. Compared with those of the conventional rheometer, the accuracy and the reliability of this apparatus are verified. The new device provides a new way to test the undrained shear strength of ultra-soft clay in submarine engineering.

Key words: ultra-soft clay; rheometer; shear rate; undrained shear strength

0 引 言

随着港口工程建设和海洋资源开发的快速发展, 涌现了大量的围海造陆工程和能源开采工程, 其中涉及疏浚吹填土、海底碎屑流等超软土问题。吹填土颗粒较细, 具有高含水率、高压缩性、抗剪强度低和渗透性差等特点, 是典型的超软土^[1-2], 给地基处理造成极大的困难。另一方面, 海底滑坡演变成的碎屑流, 也表现出超软土的特性^[3], 其流速快、冲击力强, 对海底管线和海洋结构物基础造成严重威胁^[4-5]。因此有必要对超软土的物理力学特性, 特别是该类超软土的强度和流变特性开展深入研究。

由于超软土强度较低, 往往低于传统土工强度测

试仪器量程的下限, 含水率过高也存在着制样困难等问题, 使得常规室内强度测试仪器无法满足其强度测试要求。随着测试仪器的发展和研究的深入, 在 20 世纪 90 年代, 有些学者尝试将流体测试中的流变仪应用于泥浆测试, 近年来该仪器进一步应用于海洋软土中, 对高含水率、低强度的海底流态土进行分析^[6-9]。然而应用流变仪进行强度测试还未广泛推广于超软土的相关研究中, 其测试方法还很不完善, 很少有学者

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579032); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室基金项目 (MRE201304); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金项目 (SKLGDUEK1307)

收稿日期: 2016-11-28

***通讯作者** (E-mail: tknian@dlut.edu.cn)

开展深入细致的影响因素分析, 更少有学者提出有效合理的强度测试方法。

本文引入流体测试中的流变仪, 开展了多组超软土试样的强度和流变特性试验研究; 在对试验结果深入分析的基础上, 系统探讨了转子尺寸、剪切速率增量、转子轴杆摩阻力等参数对测试结果的定量化影响, 提出了上述参数合理组合的超软土强度测试方法。通过与 Boukpeti 等使用流变仪测得强度结果^[7]的对比分析, 证明了本文测试方法的有效性和适用性。

1 试验设备和原理

1.1 试验设备

本文采用 Brookfield 公司的 RST 流变仪进行测试, 该仪器同时具有剪切速率和剪切应力两种控制模式, 可以实现样品黏度测定、温度-黏度曲线和剪切力-剪切速率曲线的绘制、屈服力测试和触变性分析等, 特别适用于复杂的流变学研究工作^[10]。该流变仪配套智能控制软件—Rheo3000, 能够实现程序智能控制与试样测量。此外, 流变仪的测试需配有转子才能工作, 本文使用 V30-15 和 V60-30 两种型号的转子(转子尺寸分别为 30 mm×15 mm 和 60 mm×30 mm), 其强度测试区间分别为 120~4000 Pa 和 15~505 Pa。仪器外观及转子尺寸见图 1。

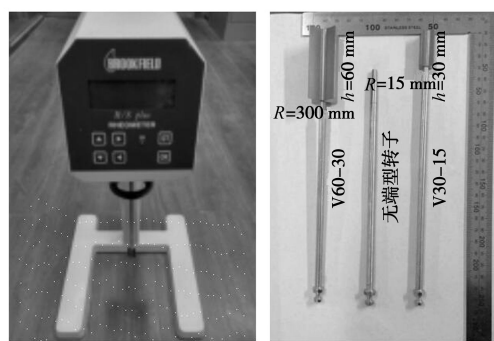


图 1 RST 流变仪和转子

Fig. 1 RST rheometer and spindles

1.2 测试原理

(1) 不排水剪切强度的测量

利用流变仪进行强度测试, 其原理与十字板剪切仪基本一致, 见式 (1)。具体操作时, 先将转子插入土体中至目标深度, 通过控制软件输入试验参数, 控制转子发生旋转使土体剪切破坏, 得到不排水剪切强度。不同之处在于, 用流变仪进行测试时, 可通过智能程序直接获得强度数值, 而用十字板剪切仪需要对所得参数进行换算。

$$\tau \approx S_u = \frac{2M}{\pi D^2 (H + D/3)} \quad (1)$$

式中, τ 为剪切力 (kPa), S_u 为不排水剪切强度 (kPa), M 为扭力 (N·m), H 和 D 分别为转子的高度和直径 (mm), 对于饱和软黏土而言, 不排水剪切强度与剪切力近似相等。

(2) 剪切速率的测量

十字板剪切试验中, 由于圆柱状剪损面的柱面和水平面的速度不连续, 故剪切速率难以确定。Einav 等^[11]通过研究认为, 十字板剪切试验中, 旋转速度 0.1°/s 时所对应的最大剪切速率约为 0.05 s⁻¹。而流变仪测试剪切速率的理论更为严格, 其测量一般在一个圆柱形容容器内, 转子旋转之后, 试样在内外两个同心圆柱体内剪切, 如图 2 所示, 剪切速率为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\gamma} &= \frac{r}{R-r} \omega, \\ \omega &= \frac{2\pi N}{60} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, r 和 R 分别为转子的直径和圆柱形容器的直径 (mm), ω 为角速度 (1/s)。

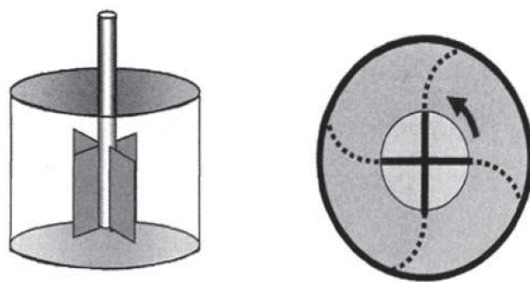


图 2 转子在护筒中剪切示意图^[12]

Fig. 2 Shear of rotor in cylinder^[12]

国内外学者并未对使用流变仪的测试方法进行系统研究, 考虑到土体与常见流体的差异, 有必要对下列因素进行研究:

a) 转子尺寸

不同尺寸的转子插入土中, 对土体的扰动程度不同, 且转子所测强度为板头高度范围内强度平均值, 不同尺寸转子所测得强度取值区间也不同, 因此需要比较不同尺寸转子所测得强度差异。

b) 剪切速率增量

剪切速率增量指单位时间内剪切速率的变化值, 以往流变仪多为恒速旋转模式, 无需考虑剪切速率增量不同产生的差异。而 RST 流变仪增加了变速旋转模式, 剪切速率增量的不同将导致相同时间内试样受剪程度的不同。因此, 需要对此参数进行分析。

c) 转子轴杆摩阻力

在流体测试中, 保证试样液面没过转子即可, 未对转子插入深度进行严格要求, 无需考虑轴杆摩阻力

的影响。而在土样测试中，由于土样的强度具有沿深度变化的特点，故转子插入不同深度直接影响最终的强度测试结果，有必要分析因深度加大而产生的转子轴杆侧摩阻力对结果影响程度的大小。

此外，试验所得数据还受测试温度和土样排水的影响，但由于所有试验均是在室温条件下进行，且测试较快，故忽略其影响。

2 试验方案

2.1 测试用土

选用英国高岭土作为海洋软黏土的模拟材料，土体参数见表 1。土样制备方法如下：首先配置初始含水率为 155%（约 3 倍液限）的土样，用真空搅拌釜在 0.2 MPa 压力下搅拌 2 h，制备出混合充分的饱和软土试样；然后，缓慢将高岭土滑入模型箱中（箱底铺有约 8 mm 厚砂层及滤纸，便于排水），以减少空气的混入，直至土样高度达到 120 mm，然后在 0.56 kPa 压力下等压固结，达到所需含水率。

表 1 土体参数

Table 1 Soil parameters

土体参数	液限/%	塑限/%	塑性指数
英国高岭土	53.8	25.6	28.2
澳洲高岭土	58.4	28.0	30.4

2.2 试验测点布置和方法

试验所用模型箱尺寸为 310 mm（长）×290 mm（宽）×210 mm（高），试验测点布置如图 3 所示。结合该仪器的测量原理，需在圆柱形容器内进行测试，因此插入 4 个直径相等的圆筒作为测量容器。模型试验的边界效应主要来自模型箱边壁对模型的约束作用，当测点与侧壁相对较近时，边界效应影响会比较显著，因此在布点时要在试样的中心部位均匀布置。



图 3 试验点分布图

Fig. 3 Distribution of sites

转子插入深度为距土样表面 30 mm 处，由于转子插入土中会产生轻微扰动，故每次将转子插入土中后，都需要静置一段时间，以恢复扰动^[7]，本试验中静止

时间取为 2 min。

3 试验结果与分析

3.1 转子尺寸的影响研究

本文试验中采用 4 叶片桨式转子，不同型号转子产生差异性的原因包括转子插入试样产生的扰动和强度取值区域不同两个方面。对比 V60-30 和 V30-15 两种型号转子的测试结果，见图 4。

从图中可知，随着剪切速率的增大，剪切力和表观黏度分别增大和减小，符合剪切稀化流体的流变特征，故超软土可被看作为“具有剪切稀化特征的非牛顿流体”；对比两种型号转子的测试结果，无论是剪切力 - 剪切速率曲线，还是表观黏度 - 剪切速率曲线，曲线的上升段都基本重合，而下降段相差较大，这是因为随着转子旋转，土样发生扰动重塑，V30-15 型转子尺寸比 V60-30 型小，相同剪切程度下表现出的重塑程度大，故其下降段曲线低于 V60-30 型转子，此外，上升段和下降段包围的面积一般用来表示触变程度的大小，V30-15 型转子的触变面积大于 V60-30 型，这也再次验证了转子尺寸越小，在相同剪切程度下，重塑程度越大。

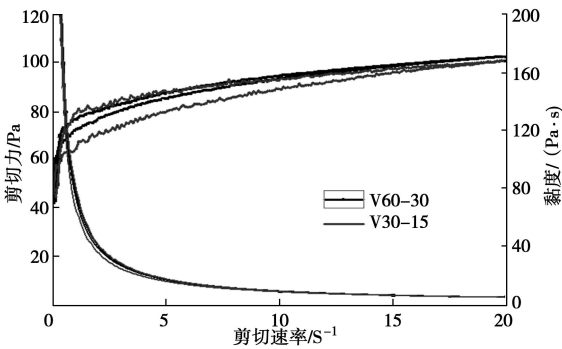


图 4 不同转子尺寸条件下的剪切力和黏度曲线图

Fig. 4 Curves of shear stress and viscosity under different rotor sizes

通过该结论可以得知，对于单次循环试验而言，转子尺寸对测试结果有显著的影响，应该根据试验要求和目的进行选择；而对于多次循环试验而言，最终均会达到完全重塑状态，故采用任何型号的转子都不会对测试结果产生影响。值得一提的是，不同型号的转子测力量程也不同，可根据强度测试需要选择相应的转子型号，详细情况请参考 Brookfield 公司的技术文件^[13]。在后续研究中，均采用 V30-15 型号转子进行土体强度测试。

3.2 剪切速率增量的影响研究

以往很少有学者关注该问题，但随着测试仪器智能化和精密化的发展，测试时需要严格控制该参数。

由于天然状态下,超软土一般达不到很高的剪切速率,故设定剪切速率最大值为 20 s^{-1} ,用时分别为 50, 100, 200 s, 并作应力控制对比分析,见图 5。其中,应力控制模式下,剪切力从 0 逐渐增至目标强度的变化过程,符合抗剪强度的定义,因此在此模式下所测得剪切力即为土样初始不排水剪切强度。

从图 5 可以看出:测得剪切力随着剪切速率增量增大而缓慢增大。虽然不同剪切速率增量条件下强度结果的差值不大(小于 50 Pa),但是由于土体强度较低,这种偏差依然会影响测量值的准确性。 $0.2 \text{ s}^{-1}/\text{s}$ 曲线与应力控制曲线基本重合,即该剪切速率增量下测得的强度最能反应土体初始强度。因此,在后续试验研究中,剪切速率增量都选用 $0.2 \text{ s}^{-1}/\text{s}$ 。

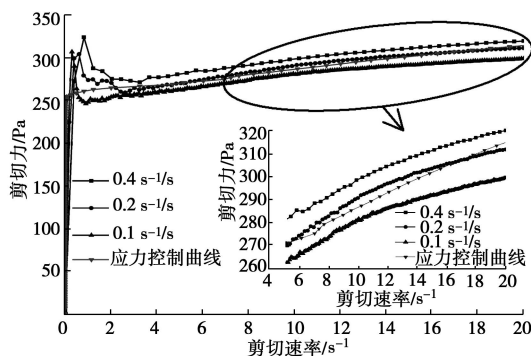


图 5 不同剪切速率增量条件下的剪切力曲线图

Fig. 5 Curves of shear stress under different shear rate accelerations

3.3 转子轴杆摩阻力的影响

为了探讨转子轴杆摩阻力对测试结果的影响程度,采用两种形式的转子:有端型和无端型,无端型即去除转子端部的轴杆部分,以此单独测试转子轴杆产生的摩阻力,尺寸和形状如图 1 所示。在其它试验条件均相同的条件下,得到不同含水率条件下转子轴杆摩阻力所占转子剪切力比值的曲线关系,如图 6 所示。

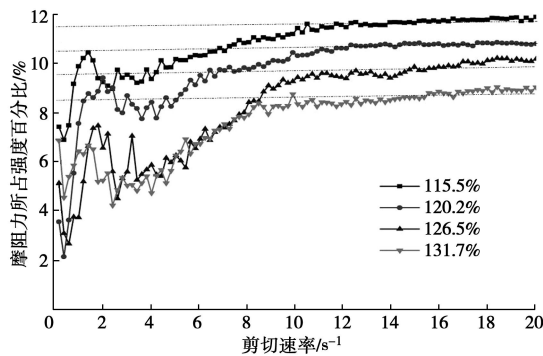


图 6 不同含水率下摩阻力所占剪切力比例曲线

Fig. 6 Proportion of resistance under different water contents

由图 6 可见,在 $0 \sim 20 \text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围内,不同

含水率下轴杆摩阻力所占强度百分比表现出相似的规律,即随着剪切速率的增大,摩阻力所占强度百分比逐渐增大,至 8 s^{-1} 左右基本稳定;试验初期,由于转子开始加速时会有一定的惯性,因此试验数据会产生波动,当转子转速平稳增加时,波动消失;随着含水率的下降,轴杆摩阻力所占比重增加,说明土样强度越高,产生的摩阻力越大,含水率 120.2% 时摩阻力所占比例已超过 10%,还有进一步加大的趋势。可以认为,轴杆摩阻力的存在会使所测强度值偏高,且在高应变率、低含水率条件下影响显著。

由于转子轴杆摩阻力使测试结果偏大,因此需要进行修正,推荐修正方法为:用有端型测试结果减去无端型测试结果,消除摩阻力部分影响。

3.4 多参数组合的合理测试方法

由上述分析可知,采用 V30-15 型号转子可以满足强度测试要求,且能够使测试土样快速达到完全重塑状态;在剪切速率增量为 $0.2 \text{ s}^{-1}/\text{s}$ 时,测得的强度最能反映土体初始强度;轴杆摩阻力的存在会使测试结果偏大,需在试验中对其进行修正,此外,不同土样测试时应变率增量的取值应根据应力控制和应变控制两种模式的对比结果选择。因此,在超软高岭土的强度和流变性测试中,剪切速率增量在 $0.2 \text{ s}^{-1}/\text{s}$ 条件下,使用 V30-15 型号转子进行测量,并对轴杆摩阻力进行修正是最为合理的测试方法。

4 实例验证

基于超软土的上述特点,很难借助常规土工测试仪器和方法验证 RST 流变仪测试结果的可信性。采用英制高岭土作为试验土体,使用本文 3.4 节的参数组合方法进行测试,将所测强度值与 Boukpeti 使用 Haake-VT550 黏度仪测得西澳高岭土的不排水剪切强度结果进行对比^[7],见图 7。本文高岭土与 Boukpeti 使用的高岭土物理指标见表 1。

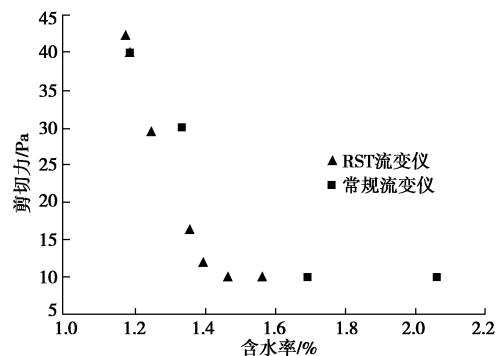


图 7 本文测试与 Boukpeti 测量数据对比图

Fig. 7 Comparison between test and Boukpeti's observed data

由图可知,本文强度测试结果与 Boukpeti 测试结

果的规律一致,均随着含水率的增大而呈现幂律降低的趋势,至含水率达到 3 倍液限附近趋于稳定。Boukpeti 所测得强度值略高于本文测量值,笔者认为其原因主要有两方面:一方面是 Boukpeti 并未对轴杆摩阻力进行修正,由 3.3 节分析可知,轴杆摩阻力的存在会导致土体不排水剪切强度偏高,因此 Boukpeti 所测值偏高;另一方面是测试仪器上的差别(仪器生产厂家不同)。

通过试验对比,证实了使用本文试验操作方法进行强度测试时,测试结果比较可靠,适用于超软土的强度测试。

5 结 论

(1) 两种不同尺寸的转子测试结果对比表明,对于单次循环试验而言,转子尺寸对测试结果有显著影响,应根据具体试验要求进行合理选择。

(2) 剪切速率增量对测试结果有明显影响,增量越大,强度值越高;通过与应力控制模式比较分析,剪切速率增量为 $0.2 \text{ s}^{-1}/\text{s}$ 测得剪切力值可作为初始不排水剪切强度值。

(3) 超软土不同含水率试样的强度测试结果表明,转子轴杆摩阻力对超软土强度影响超过 10%,应用时必须进行修正。

(4) 基于超软土流变试验结果及转子轴杆摩阻力、转子尺寸和剪切速率增量的深入探讨,提出了一种使用流变仪进行超软土强度测试方法,并验证了其有效性和可靠性。

参考文献:

- [1] 叶国良, 郭述军, 朱耀庭. 超软土的工程性质分析[J]. 中国港湾建设, 2010(5): 1 - 9. (YE Guo-liang, GUO Shu-jun, ZHU Yao-ting. Analysis of the engineering properties of super soft soil[J]. China Harbor Engineering, 2010(5): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] 曹永华, 李 卫, 刘天韵. 浅层超软土地基真空预压加固技术[J]. 岩土工程学报, 2011(增刊 1): 241 - 245. (CAO Yong-hua, LI Wei, LIU Tian-yun. Vacuum preloading technique for shallow super soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(S1): 241 - 245. (in Chinese))
- [3] 雷华阳, 张文振, 韩 鹏, 等. 吹填超软土浅层真空预压加固处理前后的固结特性[J]. 岩土工程学报, 2013(12): 2328 - 2333. (LEI Hua-yang, ZHANG Wen-zhen, HAN Peng, et al. Consolidation characteristics of super soft soil before and after vacuum preloading treatment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(12): 2328 - 2333. (in Chinese))
- [4] 李家钢, 修宗祥, 申 宏, 等. 海底滑坡块体运动研究综述[J]. 海岸工程, 2012, 31(4): 67 - 78. (LI Jia-gang, XIU Zong-xiang, SHEN Hong, et al. Review of the research on the motion of submarine landslide[J]. Coastal Engineering, 2012, 31(4): 67 - 78. (in Chinese))
- [5] RANDOLPH M F, WHITE D J. Interaction forces between pipelines and submarine slides-A geotechnical viewpoint[J]. Ocean Engineering, 2002, 48(7): 32 - 37.
- [6] ZAKERI A, HØEG K, NADIM F. Submarine debris flow impact on pipelines—Part I: Experimental investigation[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1209 - 1218.
- [7] BOUKPETI N, WHITE D J, RANDOLPH M F, et al. Strength of fine-grained soils at the solid-fluid transition[J]. Géotechnique, 2012, 62: 213 - 226.
- [8] FAKHER A, JONES C J F P, CLARKE B G. Yield stress of super soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(6): 499 - 509.
- [9] LOCAT J, DEMERS D. Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays[J]. Can Geotech J, 1988, 25(4): 799 - 806.
- [10] 刘 媛. 添加超细粉碎盐焗鸡骨泥的肉糜制品研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (LIU Yuan. Study on minced meat produce added superfine-smashed salt-baked chicken bone paste[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [11] EINAV I, RANDOLPH M F. Effect of strain rate on mobilised strength and thickness of curved shear bands[J]. Géotechnique, 2006, 56(7): 501 - 504.
- [12] 赵青林, 何 涛, 陶方元, 等. 温轮胶对高性能灌浆料流变性能的影响[C]// 高强与高性能混凝土及其应用—第七届全国高强与高性能混凝土学术交流会论文集. 沈阳, 2010. (ZHAO Qing-lin, HE Tao, TAO Fang-yuan, et al. The effect of warm round glue on rheological properties of high performance grouting material[C]// National High Strength and Performance Concrete and its Application -Symposium of the Seventh Academic Seminar on High Strength and Performance Concrete. Shenyang, 2010. (in Chinese))
- [13] Brookfield engineering labs. Brookfield-More solutions to sticky problems[Z]. America. Brookfield Inc.

(本文责编 胡海霞)