

文章编号:1005-9865(2022)06-0097-08

基于流变仪测试海底浅表层软黏土不排水强度研究

缪栋杰^{1,2}, 宋丙辉², 宋玉鹏², 孙永福^{2,3}, 苏志明², 刘绍文¹

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237)

摘要: 鉴于海底浅表层软黏土强度测试精细化程度不足的现状, 引入流体测试中的流变仪, 对青岛海域海底浅表层软黏土开展多组原状和重塑试样的不排水剪切强度试验, 通过对比静力触探和微型十字板测试结果, 验证了流变仪测试方法的有效性。基于流变仪试验结果, 揭示了海底软黏土原状和重塑状态下不排水剪切破坏模式, 探讨了海底软黏土不排水剪切强度和灵敏度随埋深及液性指数的发展演变趋势, 评价了软黏土的结构特性。最后, 引入含水率与液限之比对海底浅表层软黏土重塑不排水剪切强度进行了归一化分析, 为近海海洋开发活动提供技术支撑。

关键词: 浅表层软黏土; 流变仪; 不排水剪切强度; 静力触探; 灵敏度

中图分类号: P754 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.06.010

Testing the undrained shear strength of shallow submarine soft clay by rheometer

MIAO Dongjie^{1,2}, SONG Binghui², SONG Yupeng², SUN Yongfu^{2,3}, SU Zhiming², LIU Shaowen¹

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China)

Abstract: In view of the insufficient refinement in strength testing of submarine shallow soft clay, the rheometer in the fluid test was introduced to measure the undrained shear strength of original and remolded submarine soft clay in the Qingdao sea area. Comparing the results of the piezocone penetration test and miniature vane test, the validity of the rheometer test method was verified. Based on the rheometer test results, the shear failure mode of submarine soft clay in its original and remolded states was revealed, the relationship between the undrained shear strength and sensitivity of the seabed soft clay and the buried depth and liquidity index was discussed, and the structural characteristics of submarine soft clay were evaluated. Finally, the ratio of water content to liquid limit was introduced to perform a normalized analysis on the undrained shear strength of remolded soft clay, providing reference for the construction of offshore geotechnical engineering.

Keywords: shallow soft clay; rheometer; undrained shear strength; CPT; sensitivity

软黏土在我国近海广泛分布, 具有含水率高、压缩性大、抗剪强度低以及渗透性差等特点^[1]。随着海洋强国战略的持续实施, 与海底软黏土相关的近海海洋开发活动蓬勃发展, 如海洋牧场、人工鱼礁、海底光缆及近海油气资源开采等^[2-4], 因此, 评估海底软黏土的工程特性, 尤其是强度性质具有重要的科学意义和应用价值。

当前软黏土的强度测试方法主要分为两大类, 一类是原位测试, 主要包括原位十字板剪切和静力触探等; 另一类是室内试验, 分为直接剪切试验、三轴剪切试验和无侧限抗压强度试验等。由于海底软黏土的强

收稿日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42007274, 41806079, 41876066)

作者简介: 缪栋杰(1997—), 男, 江苏无锡人, 主要从事海洋工程地质力学方面研究工作。E-mail: mg1927090@smail.nju.edu.cn

度极低^[1],常规的室内试验方法常常无法满足测试精度的要求,因此,新的软黏土不排水抗剪强度测试方法近年来逐渐兴起。Inoue 等^[5]研制出了薄板贯入试验装置,利用该装置测试了高含水率淤泥的不排水强度;后期 Tan 等^[6]对比了薄板贯入试验结果与旋转黏度计试验和落锥试验等测试结果,进一步验证了该方法的有效性;国内吉峰等^[7]通过引进薄板贯入试验对比研究了我国不同地区的 3 种疏浚淤泥的不排水强度,指出以含水率与液限之比作为参考变量可对 3 种淤泥的不排水强度进行归一化;王亮等^[8]采用自研的室内高精度微型十字板剪切仪研究了含水率对重塑淤泥不排水强度的影响,发现不同区域淤泥的不排水强度与含水率/液限之间存在幂函数相关关系;鲁双等^[9]基于多组超软土强度和流变特性试验提出了使用流变仪进行超软土强度测试的有效方法;年廷凯等^[1]研制出一种适用于低强度、高含水率土体强度测试的新型全流动贯入仪,通过测试南海北部陆坡区软黏土的不排水抗剪强度,建立了该区域软黏土不排水剪切强度归一化模型。

作为海底管缆、人工鱼礁等海工设施的潜在持力层,以往关于海底软黏土不排水抗剪强度的研究较多,但囿于测试手段和测试精度的限制,在海底浅表层软黏土不排水抗剪强度精细化测试方面成果比较有限。尤其是对于海上原位测试技术如原位十字板等,通常只能测试海底土的峰值和重塑强度,无法获知海底土剪切破坏的全过程特征,且限于测试环境和设备自身原因某些情况下对于海底超软土强度的测试精度也无法令人满意^[7]。本次采用 RST-SST 型软固体流变仪研究了青岛海域海底浅表层软黏土的不排水剪切强度特性,揭示了原状和重塑海底软黏土不排水剪切破坏过程,探讨了海底软黏土灵敏度与埋深及液性指数间的关系,建立了研究区海底软黏土不排水剪切强度归一化模型,为精细评估海底浅表层软黏土不排水强度特性提供了新的借鉴。

1 试验土样和方法

1.1 试验土样

研究区位于南黄海青岛周边海域,水深小于 50 m,海底发育有水下浅滩、现代水下三角洲及海冲蚀平原等海底地貌,海相地层形成于全新世海侵,其下为晚更新世的河流/沼泽相沉积或中生代地层^[10]。试验土样分别取自石门岩和千里岩附近海域,取样站点信息如表 1 所示,取样之前先进行孔压静力触探(CPTU)原位测试,后利用重力取样器采集海底沉积物,经现场分样密封后运回室内实验室开展土体物理力学性质测试。由于所取柱状样来自海底 4 m 以浅土层,根据有关工程经验可知属于浅表层海底沉积物^[11-12]。

柱状样土质较均一,呈灰—灰褐色,流—软塑状,局部夹杂少量生物贝壳碎屑(图 1)。

表 1 取样柱信息
Tab. 1 Location of soil sampling

重力柱	经度	纬度	取样长度/m
重力柱 02	120.93°E	36.26°N	约 4
重力柱 03	121.29°E	36.03°N	约 2



图 1 重力柱 02 土样(埋深 1.2~1.4 m)

Fig. 1 02# soil sample (burial depth 1.2~1.4 m)

为全面评估海底浅表层软黏土的工程性质,将柱状样按照长约 20 cm 进行分段截取,每段均开展一组基本物理指标试验。试验步骤按照《土工试验方法标准》(GB/T 5012—2019)^[13] 执行,其中塑限和液限采用 WX-2 光电液塑限联合测定仪进行测定,试验结果如表 2 所示。由表 2 可知,相比起重力柱 03,重力柱 02 土样的含水率更高,密度更小,液限指数更大,强度也更低,而二者的液塑限则比较接近。按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[14],重力柱 02 土样可归类为黏土,重力柱 03 除前 20 cm 以浅属粉质黏土外,其余土样也可归类为黏土。

表 2 土样物理性质指标
Tab. 2 Physical property indexes of soil

样品	深度/cm	含水率/ %	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	塑限/%	液限/%	塑性指数	液性指数	土体分类
重力柱 02	0~400	58.91~98.94	1.50~1.66	19.64~26.30	37.65~47.13	18.01~25.71	1.66~3.71	黏土
重力柱 03	0~20	55.92	1.81	19.49	32.80	13.31	2.74	粉质黏土
重力柱 03	20~200	37.32~57.28	1.70~1.88	21.35~25.30	39.61~45.14	18.26~20.60	1.0~1.89	黏土

注:液限为 76 g 圆锥下沉深度 10 mm 时的含水率

1.2 试验方法

使用美国 Brookfield 公司的 RST-SST 型软固体流变仪(图 2)测试海底浅表层软黏土的不排水剪切强度,该仪器操作简便,测试精度高,可获得土体全过程剪切破坏特征,近年来在高含水率、低强度的海底流态土强度测试中得到了越来越多的应用^[15-16]。

该流变仪的强度测试原理与十字板剪切试验相同,均为剪切柱体假设理论^[17]。将转子插入土体中至目标深度,短暂静置一段时间消除转子插入的扰动影响后,转动转子在土层中产生接近一个圆柱体的破坏状态,如图 3 所示。



图 2 RST-SST 流变仪

Fig. 2 RST-SST rheometer

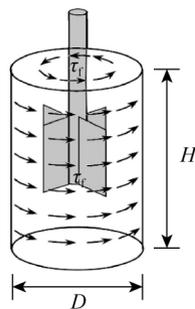


图 3 圆柱形破坏面强度分布示意

Fig. 3 Distribution of shear strength on cylindrical failure surface

根据外力施加于转子上的最大力矩 M_{\max} 来推求土体的抗剪强度:

$$M_{\max} = \tau_f \frac{\pi D^2}{2} H + \tau_f \frac{\pi D^2}{2} \frac{D}{3} \quad (1)$$

对于饱和软黏土 τ_f 等于其不排水剪切强度 s_u , 则有:

$$s_u = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi D^2}{2} \left(H + \frac{D}{3} \right)} \quad (2)$$

式中: τ_f 为转子在土体中产生的剪切应力, kPa; s_u 为土体不排水剪切强度, kPa; M_{\max} 为最大力矩, $N \cdot m$; D 为转子十字板直径, mm; H 为转子十字板高度, mm。

本次选用的转子直径 $D=20$ mm, 高度 $H=40$ mm, 最大量程约 3.5 kPa, 测试采用剪切速率控制模式, 前

人利用十字板剪切仪测试软黏土不排水剪切强度时多设定转子旋转速度为 $0.1^\circ/\text{s}$ ^[18], 参照《土工试验方法标准》(GB/T 5012—2019) 的要求^[13], 也设定转子转动速率为 $0.1^\circ/\text{s}$, 对应的转子圆周剪切速率约为 $1.05 \text{ mm}/\text{min}$, 接近于常规直剪快剪的剪切速率 ($0.8 \text{ mm}/\text{min}$)。测试开始前利用 Brookfield 黏度标准液对流变仪进行了校准检验, 以保证测试数据的准确性, 校准结果表明相同转子和扭矩值下测得的黏度读数在标准液真实值的 $\pm 3\%$ 之内, 符合校准要求。通过调节操作手柄使转子垂直贯入软黏土中 1 倍转子高度^[9, 14], 由于贯入深度有限, 钻杆直径较小 (5 mm), 故忽略了钻杆的摩擦阻力效应^[9], 间隔 5 min 后开始测试原状软黏土的不排水剪切强度 (初始强度), 而后快速转动转子六圈使土样充分扰动, 进而测试重塑土样的不排水剪切强度 (重塑强度)。

2 试验结果与分析

2.1 测试结果可靠性分析

对于原位静力触探测试, Kjekstad 等^[19] 总结多种试验及理论方法提出估算黏性土不排水剪切强度的公式:

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (3)$$

式中: s_u 为黏性土不排水剪切强度, kPa; q_t 为经孔压修正后的锥尖阻力, kPa; σ_{v0} 为上覆土体的总应力, kPa; N_{kt} 为经验圆锥系数, 多根据原位和室内强度试验结果反算得来。

本次将流变仪、微型十字板^[20] 测试结果与现场静力触探估算得到的软黏土不排水抗剪强度进行了汇总分析, 如图 4 所示, 其中限于转子测试量程, 重力柱 03 仅对埋深 65 cm 以浅样品开展了流变仪强度测试。

从图 4 可知, 不同测试手段得到的海底浅表层软黏土不排水剪切强度彼此吻合较好, 说明采用流变仪测试软黏土不排水剪切强度是可行的^[9]。值得注意的是根据静力触探锥尖阻力反算黏性土不排水剪切强度时采用的经验圆锥系数 $N_{kt} = 30$, 符合室内三轴不固结不排水剪切 ($N_{kt} = 18 \sim 35$) 和无侧限抗压强度 ($N_{kt} = 22 \sim 42$) 试验对应的经验圆锥系数范围值^[21]。

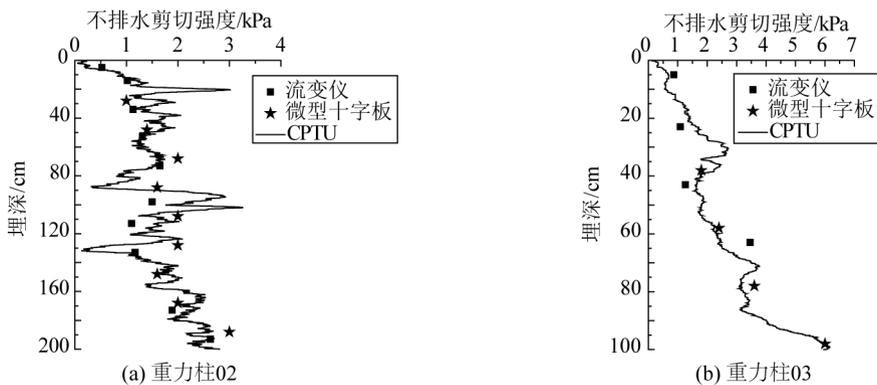


图 4 软黏土强度测试结果对比

Fig. 4 Comparison between different strength test results for soft clay

2.2 软黏土的不排水剪切强度

基于重力柱 02 不同埋深处土样流变强度测试结果, 图 5 描绘了海底浅表层软黏土不排水剪切强度随剪切位移的发展演变特征, 其中剪切位移为转子的圆周旋转位移。从图 5 可以看出, 在一定的剪切变形范围内, 埋深较浅海底软黏土 ($d = 5, 50, 100, 130 \text{ cm}$) 的初始不排水剪切强度—剪切位移关系呈现比较明显的应变软化破坏特征, 而随着软黏土埋深增大 ($d = 170, 190 \text{ cm}$), 剪切逐渐转变为弱应变硬化破坏。与初始强度不同, 重塑后海底软黏土不排水剪切强度随剪切位移均表现出良好的塑性破坏特征。不同的剪切破坏模式与软黏土本身性质、固结状态、施加的剪切速率以及应力路径等有关^[13], 这种现象对于以海底浅表层软黏土作为持力层的海工设施科学设计具有一定指导意义^[3-4]。

图 6 给出了两个重力柱土样流变仪初始强度和重塑强度对比结果。从图 6 可知,青岛海域海底浅表层软黏土初始不排水剪切强度介于 0.523~3.461 kPa 之间,重塑不排水剪切强度介于 0.068~1.158 kPa 之间。埋深 0~45 cm 范围内重力柱 02 和重力柱 03 土样的初始强度彼此接近,均随埋深的增加而逐渐增大,但随着埋深进一步增加,重力柱 03 土样的初始强度增大明显,几乎达到了流变仪的最大量程,这主要与此埋深处重力柱 03 土样含水率降低而密实度有所增大有关,而埋深 70 cm 以下重力柱 02 土样的初始强度呈先减小后增大的波动变化趋势。两个重力柱土样的重塑强度随埋深波动变化趋势类似于其初始强度,但幅值较初始强度明显减小。有学者在我国南海北部陆坡区开展了众多海底浅表层沉积物不排水剪切强度测试研究,在测试手段相近(微型十字板)和沉积物土性相同(软黏土)的基础上将南海北部陆坡某 B2 站位浅表层软黏土的初始强度^[22]绘于图 6 中,可以看出此次重力柱 02 土样的初始强度随埋深变化规律与之比较吻合,然而限于缺乏该站位软黏土的基本物理性质,潜在机理有待进一步的研究。

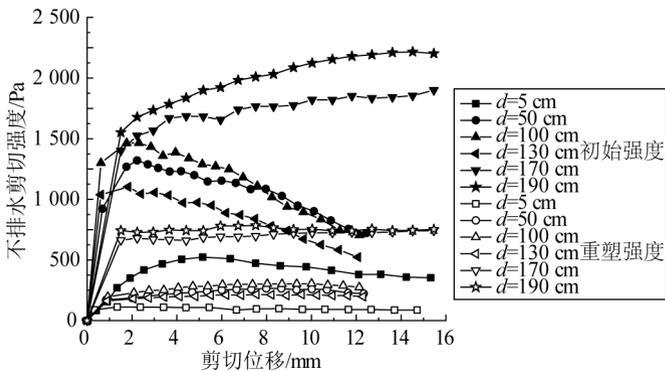


图 5 海底软黏土不排水剪切强度—剪切位移相关关系(重力柱 02)

Fig. 5 Relationships between undrained shear strength and shear displacement for soft clay (02# soil sample)

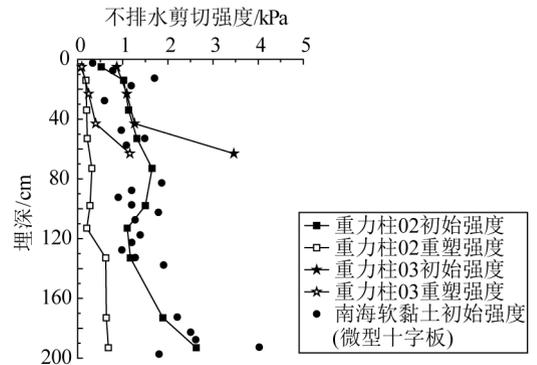


图 6 海底浅表层软黏土不排水剪切强度随埋深的变化情况

Fig. 6 Relationships between undrained shear strength and buried depth for shallow marine soft clay

2.3 软黏土的灵敏度

土体由原位状态到重塑状态后强度会降低,即表现出了土体的结构性和灵敏性。Terzaghi^[23]提出了一个评价土体灵敏性的指标,即灵敏度 S_t ,用来衡量黏性土结构性对其强度的影响,通常定义为原位不排水剪切强度 $s_{u,0}$ 与重塑后强度 $s_{u,rem}$ 的比值:

$$S_t = \frac{s_{u,0}}{s_{u,rem}} \quad (4)$$

图 7 描绘了青岛海域两个重力柱样品的灵敏度随埋深的变化情况,为了相互比较,前人利用全流动仪循环测试获得的南海软黏土灵敏度也一同绘于图中^[1]。从图 7 可以看出青岛海域海底浅表层软黏土的灵敏度介于 2~10 之间,属中—高灵敏性黏土,灵敏度平均值为 5.00,接近于江苏连云港海相软土的平均灵敏度 ($S_t = 4.47$)^[24],但明显小于南海北部陆坡海底软黏土的灵敏度。另外,海底浅表层软黏土灵敏度随埋深增加呈递减的趋势,表明表层软黏土的灵敏度一般大于浅层土的灵敏度。相比较而言,重力柱 02 软黏土的灵敏度一般稍大于重力柱 03 土样的灵敏度,说明重力柱 02 软黏土的结构性要相对更强一些。Bjerrum^[25]通过研究 Norwegian 海积软黏土发现土体灵敏度随液性指数增大而有所增高,本文重力柱 02 软黏土的液性指数比重力柱 03 土样的大(表 2),因此液性指数高应是重力柱 02 软黏土灵敏度相对更高的原因之一^[26]。

基于前人^[25, 27]研究成果,图 8 汇总了不同区域黏性土灵敏度随液性指数的变化情况。整体来看,在单对数坐标系中黏性土的灵敏度随液性指数的增大大致呈线性增长趋势,只不过相同液性指数下青岛和上海软黏土的灵敏度相对偏小一些。考虑到黏性土灵敏度受物质组成、取样扰动、重塑方式、测试手段、原位有效应力等多种因素的综合影响^[27],后续采用统一的标准来重新评估黏性土灵敏度与液性指数间相关关系是有必要的。

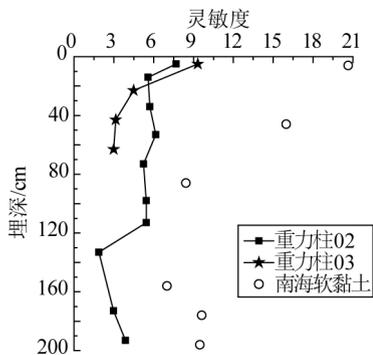


图7 土样灵敏度测试结果汇总

Fig. 7 Test results of the sensitivity of soft soil

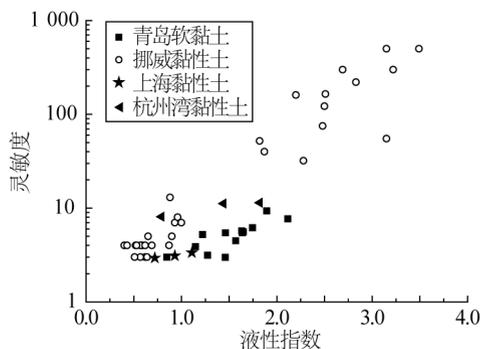


图8 液性指数和灵敏度的关系

Fig. 8 Relationships between liquidity index and sensitivity

2.4 软黏土的归一化强度模型

影响软黏土不排水剪切强度的因素有很多,但对于海底浅表层软黏土来说,含水率是主要的影响因素之一,不排水强度通常随含水率的增加而快速降低^[5-6]。吉锋等^[7]基于室内平板贯入试验发现不同种类淤泥的不排水剪切强度随含水率增大表现出相似的衰减特征,引入 w/w_L (含水率和液限之比) 对不同软黏土的不排水强度与含水率的关系进行归一化,如式(5)所示:

$$s_u = a \left(\frac{w}{w_L} \right)^b \tag{5}$$

式中: s_u 为软黏土不排水剪切强度, kPa; w 为土样含水率, %; w_L 为土的液限, %; a, b 为拟合参数, 随不同土样的性质而变化。

图9描绘了青岛海域海底软黏土不排水剪切强度与 w/w_L 间相关关系。

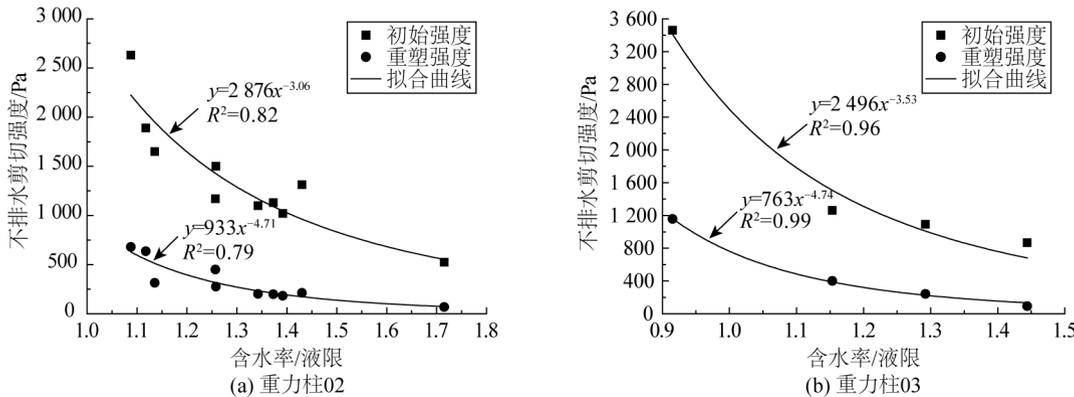


图9 软黏土不排水剪切强度与 w/w_L 相关关系

Fig. 9 Relationships between undrained shear strength and w/w_L for soft clay

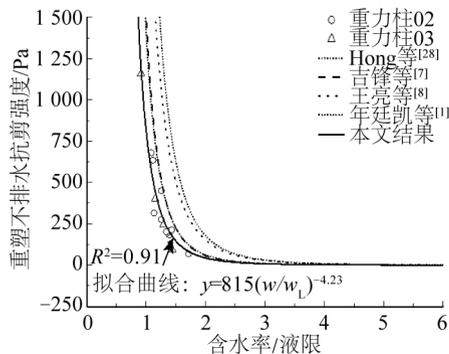


图10 软黏土归一化强度特性对比

Fig. 10 Comparison of different normalized strength models for soft clay

如图9所示,青岛海域海底软黏土的初始和重塑不排水强度均随 w/w_L 的增大呈幂律形式减小,符合前人提出的软黏土归一化强度模型。另外,随着 w/w_L 逐渐增大,海底浅表层软黏土的初始与重塑不排水剪切强度之间的差距逐渐缩小,表明软黏土的结构性随 w/w_L 的增加而有所减弱。

为了更全面地对比不同类别软黏土的归一化强度特性,将本文成果与前人有关发现^[7-8, 11, 28]进行了汇总分析,结果如图10和表3所示。

由图10可以看出本文采用流变仪测得的海底软黏土重塑不排水剪切强度随 w/w_L 变化趋势与前

人所得结果基本一致,只是强度模型拟合参数存在不同。相较而言,本文结果与 Hong 等^[28]和吉峰等^[7]的结果比较接近,小于王亮等^[8]和年廷凯等^[1]的试验结果。有关研究发现软黏土不排水剪切强度会随剪切速率的增大而增大^[9],本文采用的剪切速率为 $6^\circ/\text{min}$,而王亮等^[8]采用的剪切速率为 $60^\circ/\text{min}$,除了土的固有性质不同之外,剪切速率低可能是本文结果低于王亮等^[8]试验结果的一个重要原因。

表3 a 和 b 取值情况
Tab. 3 Values of a and b

文献来源	土样	试验方法	a	b
Hong 等 ^[28]	各类黏性土	微型十字板+薄板贯入+落锥法	1 400	-4.5
吉峰等 ^[7]	湖泊和海相淤泥	薄板贯入	1 500	-4.7
王亮等 ^[8]	湖泊和海相淤泥	电动十字板	2 732	-4.17
年廷凯等 ^[1]	南海陆坡软黏土	全流动贯入	3 677	-4.36
本文	青岛海域软黏土	流变仪	815	-4.23

3 结 语

基于室内软固体流变仪测试了青岛海域海底浅表层软黏土的不排水剪切强度,得出了如下结论:

1) 基于流变仪试验得到的软黏土不排水剪切强度与静力触探和微型十字板测试结果吻合良好,因此,采用流变仪测试软黏土不排水剪切强度是可行的。

2) 由表层至浅层原状海底软黏土不排水剪切破坏模式从应变软化逐渐转变为弱应变硬化,而重塑后海底软黏土不排水剪切破坏模式基本呈理想塑性破坏;青岛海底浅表层软黏土初始不排水剪切强度介于 $0.523 \sim 3.461$ kPa 之间,重塑后不排水剪切强度介于 $0.068 \sim 1.158$ kPa 之间。

3) 青岛海域海底浅表层软黏土的灵敏度介于 $2 \sim 10$ 之间,属中—高灵敏性黏土,软黏土灵敏度随埋深增加呈不断减小趋势,随液性指数增大而有所增大。

4) 青岛海域海底软黏土的初始和重塑不排水强度均随 w/w_L 的增大而快速减小,符合幂函数归一化强度模型。

参考文献:

- [1] 年廷凯, 范宁, 焦厚滨, 等. 南海北部陆坡软黏土全流动强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 602-611. (NIAN Tingkai, FAN Ning, JIAO Houbin, et al. Full-flow strength tests on soft clay in northern slope of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 602-611. (in Chinese))
- [2] 罗含思, 沈敏, 林军, 等. 马鞍列岛人工鱼礁区海底底质特征及其承载力[J]. 水产学报, 2019, 43(2): 441-453. (LUO Hansi, SHEN Min, LIN Jun, et al. Sediment characteristics and bearing capacity in an artificial reef area of Ma'an Archipelago [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(2): 441-453. (in Chinese))
- [3] 师玉敏, 高福平. 软黏土海床条件下的管道侧向失稳预测模型[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 141-147. (SHI Yumin, GAO Fuping. Analytical model for predicting lateral instability of a submarine pipeline on the soft clayey seabed[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 141-147. (in Chinese))
- [4] 宋玉鹏, 孙永福, 刘伟华. 海底管线稳定性影响因素分析[J]. 海岸工程, 2003(2): 78-84. (SONG Yupeng, SUN Yongfu, LIU Weihua. Analysis of factors affecting submarine pipeline stability[J]. Coastal Engineering, 2003(2): 78-84. (in Chinese))
- [5] INOUE T, TAN T S, LEE S L. An investigation of shear strength of slurry clay[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 1-10.
- [6] TAN T S, GOH T C, KARUNARATNE G P, et al. Yield stress measurement by a penetration method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(4): 517-522.
- [7] 吉峰, 徐桂中, 曹玉鹏, 等. 高含水率疏浚淤泥平板贯入剪切强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1753-1757. (JI Feng, XU Guizhong, CAO Yupeng, et al. Plate penetration tests on undrained strength behavior of dredged clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1753-1757. (in Chinese))
- [8] 王亮, 谢健, 张楠, 等. 含水率对重塑淤泥不排水强度性质的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2973-2978. (WANG Liang, XIE Jian, ZHANG Nan, et al. Influences of water content on undrained shear strength of remolded dredged materials[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2973-2978. (in Chinese))
- [9] 鲁双, 范宁, 年廷凯, 等. 基于流变仪测试超软土强度的试验方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 91-95. (LU Shuang, FAN Ning, NIAN Tingkai, et al. Experimental approach for strength of ultra-soft clay by using rheometer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 91-95. (in Chinese))
- [10] 肖菲, 尹延鸿. 青岛海岸带及邻近海域地形和沉积物类型研究[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(10): 1-4. (XIAO Fei, YIN Yanhong. Topography and sediment types of the Qingdao coast zone and the adjacent sea areas[J]. Marine Geology Frontiers, 2006, 22(10): 1-4. (in Chinese))
- [11] 祝贺, 孙志高, 衣华鹏, 等. 曹妃甸近岸表层沉积物粒度和粘土矿物分布特征研究[J]. 地球与环境, 2017, 45(3): 306-313. (ZHU He, SUN Zhigao, YI Huapeng, et al. Research on distribution characteristics of sediment grain size and clay mineral in Caofeidian inshore, China[J]. Earth and Environment, 2017, 45(3): 306-313. (in Chinese))
- [12] 张明. 填海工程中软土地基表层加固技术试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(2): 233-234. (ZHANG Ming. Experimental study on surface reinforcement technology of soft soil foundation in reclamation project[J]. China Water Transport, 2018, 18(2): 233-234. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press. 2019 (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国水利部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture Publishing, 2009. (in Chinese))
- [15] FAKHER A, JONES C, CLARKE B G. Yield stress of super soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(6): 499-509.
- [16] RANDOLPH M F, WHITE D J, BOUKPETI N, et al. Strength of fine-grained soils at the solid-fluid transition[J]. Géotechnique, 2012, 62(3): 213-226.
- [17] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997. (MENG Gaotou. In-situ test on soils mechanism, method and its engineering application[M]. Beijing: Geological Press, 1997. (in Chinese))
- [18] EINAV I, RANDOLPH M. Effect of strain rate on mobilised strength and thickness of curved shear bands[J]. Géotechnique, 2006, 56(7): 501-504.
- [19] KJEKSTAD O, LUNNE T, CLAUSEN C J F. Comparison between in situ cone resistance and laboratory strength for overconsolidated north sea clays[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1978, 3(1): 23-36.
- [20] 王振红, 张昆, 朱泓, 等. 微型十字板在海洋软土中的应用[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 205-208. (WANG Zhenhong, ZHANG Kun, ZHU Hong, et al. Application of miniature vane in seabed soft soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 205-208. (in Chinese))
- [21] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 东南大学. 水运工程静力触探技术规程: JTS/T 242—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (CCCC-FHDI Engineering CO., Ltd., Southeast University. Technical specification for piezocone penetration of water transportation engineering: JTS/T 242—2020[S]. Beijing: China Communications Publishing, 2020. (in Chinese))
- [22] 朱超祁, 贾永刚, 张民生, 等. 南海北部陆坡表层沉积物强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 863-870. (ZHU Chaoqi, JIA Yonggang, ZHANG Minsheng, et al. Surface sediment strength in bed-slope of northern South China Sea [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 863-870. (in Chinese))
- [23] TERZAGHI K. Ends and means in soil mechanics[J]. Engineering Journal, 1994, 27(12): 608.
- [24] 缪林昌, 经纬. 江苏海相敏感性软土特征研究[J]. 岩土力学, 2006(8): 1283-1286. (MIAO Linchang, JING Fei. Features research of Jiangsu marine sensitive soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(8): 1283-1286. (in Chinese))
- [25] BJERRUM L. Geotechnical properties of Norwegian marine clays[J]. Geotechnique, 1954, 4(2): 49-69.
- [26] 龙凡, 王立忠, 李凯, 等. 舟山黏土和温州黏土灵敏度差别成因[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 218-224. (LONG Fan, WANG Lizhong, LI Kai, et al. Cause of sensitivity difference of Zhoushan clay and Wenzhou clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(2): 218-224. (in Chinese))
- [27] 高彦斌. 原位十字板试验测得的软粘土灵敏度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016(9): 1356-1362. (GAO Yanbin. Sensitivity of soft clay obtained by field vane-shear test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016(9): 1356-1362. (in Chinese))
- [28] HONG Zhenshun, LIU Hanlong, NEGAMI T. Remolded undrained strength of soils[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(1): 133-142.