

DOI: 10.11779/CJGE201908022

典型深海软黏土全流动循环软化特性与微观结构探究

任玉宾, 王胤, 杨庆*

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 深海软黏土具有不同于陆相或近海软黏土的岩土工程性质。针对取自中国南海西部深水区 5 个典型站位的海床软黏土, 采用一种改进的全流动贯入装置对其强度特征进行测试, 并结合深海软黏土特殊的微观结构和生物硅矿物, 对其循环软化特性进行分析和探讨。研究结果表明: 南海西部深海软黏土普遍具有高含水率、高液性指数、高活性值、低不排水抗剪强度和高灵敏度等特点, 极慢的沉积速率和稳定的沉积环境是深海软黏土具有高灵敏度的主要原因。全流动循环软化过程中土体结构的变化主要体现在絮凝体的破坏和孔隙结构的改变两个方面。特殊的生物硅颗粒在循环作用下会发生破碎, 导致内部孔隙水释放, 从而加剧了土体循环软化的程度。

关键词: 深海软黏土; 全流动贯入; 循环软化; 微观结构; 生物硅矿物

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)08-1562-07

作者简介: 任玉宾(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋土力学性质和微观结构等方面的科研工作。E-mail: renyubin@mail.dlut.edu.cn。

Full-flow cyclic degradation and micro-structure of representative deep-sea soft clay

REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The geotechnical properties of deep-sea soft clay are quite different from those of terrestrial or offshore clay. For the representative deep-sea soft clay collected from the western region of South China Sea, an improved full-flow penetration device is used to measure its strength characteristics. Combined with (Focusing on) the special micro-structure and bio-silica minerals, the cyclic degradation characteristics are analyzed and discussed. The results show that the deep-sea soft clay in the western region of South China Sea generally has the characteristics of high water content, high liquidity index, high activity, low undrained shear strength and high sensitivity. The extremely slow deposition rate and stable deposition environment are the main reasons for the high sensitivity of deep-sea soft clay. The change of micro-structure of soils during the full-flow cyclic degradation process is mainly caused by the damage of flocculation and the change of pore structure. The bio-silica particles may break under the cyclic penetration, leading to the release of the internal pore water, which will aggravate the degree of degradation.

Key words: deep-sea soft clay; full-flow penetration; cyclic degradation; micro-structure; bio-silica mineral

0 引言

随着中国海洋工程的不断建设和发展, 南海海底尤其是深海软黏土的力学特性需要深入探索, 这对于评价海底滑坡、碎屑流等地质灾害和指导海上油气平台锚固系统、海底构筑物的施工建设等尤为重要。

全流动贯入 (full-flow penetration method) 是近几年来逐渐流行的针对软黏土工程力学性质评价的测试方法, 根据探头形状的不同, 主要分为 T-bar 和 Ball 两种。相比于传统的触探方法 (如静力触探 (CPTU) 和十字板剪切 (VST) 等) 具有以下几点优势: ①具有较为精确的塑性理论解; ②更加适用于测试强度很低的软黏土; ③既能得到连续的强度随深度变化曲线,

又可以在循环作用下得到灵敏度参数。国内外学者针对全流动贯入方法的适用性、阻力系数的取值和测试结果的解释等方面进行了深入的研究, 为该方法的工程应用积累了丰富的经验。郭绍曾等^[1]总结静力触探技术的发展历史, 从理论计算、试验研究、数值模拟和阻力系数的取值等方面对适用于深海软黏土的全流动贯入仪进行了详细的讨论。郭小青等^[2]采用 T-bar 方法对珠江口海洋软土的不排水抗剪强度及循环软化特性进行研究。彭鹏等^[3]较为全面地总结并介绍了 T 型全

基金项目: 国家自然科学基金项目(51639002, 41572252, 51711530229);
中央高校基本科研业务费科研专题项目(DUT17LK37)

收稿日期: 2018-07-13

*通讯作者 (E-mail: qyang@dlut.edu.cn)

流触探仪机理的分析以及在实际海洋工程建设中的应用。年廷凯等^[4]针对取自南海北部陆坡的软黏土, 采用全流动贯入方法测试其强度特性, 探讨阻力系数的取值范围, 并提出适用于该区域海床软黏土的不排水抗剪强度归一化模型。

深海软黏土所处的水深一般超过 2000 m, 由于其特殊的物质组成和复杂的沉积环境, 深海软黏土具有不同于陆相或近海软黏土的物理力学性质。吴鸿云等^[5]采用原位测试方法对东太平洋某矿区的深海稀软沉积物进行剪切强度和贯入阻力的测试。马雯波等^[6]针对取自太平洋 C-C 矿区的深海稀软底质土开展物理力学性能研究, 并分析其矿物组成和微观结构特征。任玉宾等^[7]针对取自南海西部海盆深海海床沉积物的物理性质进行了初步分析。然而, 由于离岸远、水深大、暗流强, 深海沉积物取样困难且成本很高, 目前关于深海海床软黏土(特别是中国南海海域)的力学性质, 尤其是工程上非常关心的循环软化特性及其微观机理方面的研究较少。

本研究以取自中国南海西部海域 5 个站位的典型深海软黏土为研究对象, 采用一种改进的全流动贯入装置对其强度特征进行测试, 并结合深海软黏土特殊的微观结构和物质组成(生物硅矿物), 对其循环软化特性进行分析和探讨, 为今后实际海洋工程设计和施工提供一定的参考和指导。

1 考察海域概况和土样信息

本研究中考察海域位于南海西部区域, 平均水深超过 2000 m, 取样站位共有 5 个, 如图 1 所示。其中, #1 和 #2 站位位于西沙群岛以南; #3 和 #4 站位靠近大陆架边缘; #5 站位位于南沙群岛以北。采用重力式取样方法, 最大取样深度约为 4 m, 实际取样深度受底质软硬程度和海流状况等方面影响。取样基本信息如表 1 所示。对样品进行分割、密封和包装, 并储存在 4°C 恒温(接近实际海底温度)和恒湿环境中。

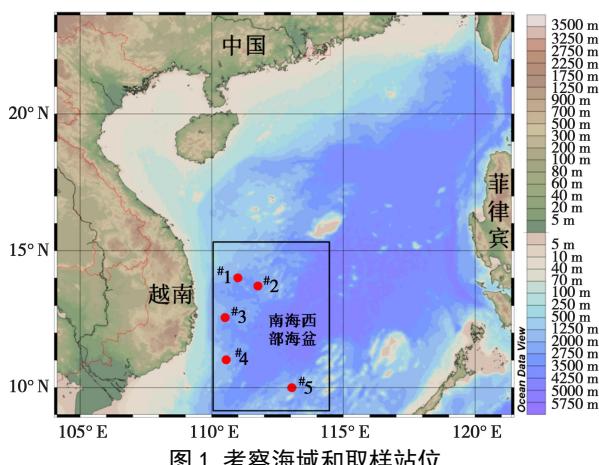


Fig. 1 Research sea area and sampling stations

表 1 取样基本信息

Table 1 Basic information of samples

样品编号	经度/(°)	纬度/(°)	水深/m	样品长度/m
1号	110.98 E	14.02 N	2564	2.25
2号	111.75 E	13.72 N	2335	3.90
3号	110.50 E	12.56 N	2535	2.25
4号	110.55 E	11.02 N	2005	4.00
5号	113.04 E	10.01 N	1982	4.00

2 试验仪器和过程

每根样品平均截成 0.5 m 的小段, 每段样品均开展一组试验, 包括基本物理参数、粒度分布、液塑性指标、全流动贯入试验和微观结构分析等。其中粒度分布采用激光粒度仪法(英国马尔文仪器公司生产, 型号 Mastersizer 2000)进行测试; 液塑性指标采用 GYS-2 数显式土壤液塑限联合测定仪测定; 全流动贯入试验采用一种改进的室内贯入装置进行测试; 微观结构和形貌采用电子扫描电镜(美国 FEI 公司生产, 型号 QUANTA 450)方法(SEM)进行观测, 扫描电镜的样品制备采用“液氮—真空冷冻升华法”, 可以最大程度保证样品的结构完整。

2.1 改进的室内全流动贯入装置

改进的室内全流动贯入装置的详细介绍, 及有效性和准确性详见文献[8], 试验布置如图 2 所示。

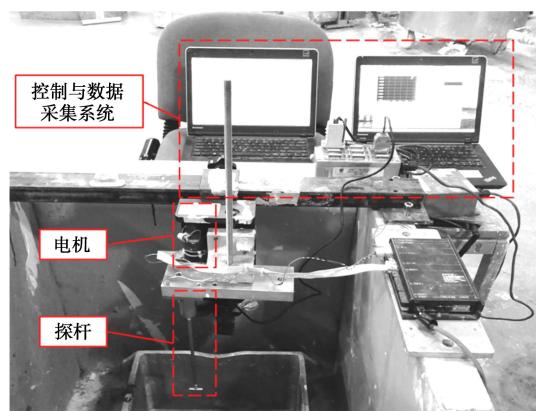


图 2 改进的室内全流动贯入仪

Fig. 2 Improved laboratory full-flow penetrometer

2.2 试验和数据处理过程

每次试验前对 S 型拉压传感器的线性度进行校核。根据 DeJong 等^[9]建议的全流动贯入规范试验方法, 探头贯入和上拔速率设为 2 mm/s, 一共作用 10 次循环, 每个土样做三次平行试验, 取平均值作为最终结果。

土体的不排水抗剪强度和灵敏度采用如下公式进行计算:

$$S_{u,0} = \frac{q_{in}}{N_C} \quad , \quad (1)$$

$$S_{u,rem} = \frac{q_{rem}}{N_C} \quad , \quad (2)$$

$$S_T = \frac{S_{u,0}}{S_{u,rem}} = \frac{q_{in}}{q_{rem}} \quad . \quad (3)$$

式中 $S_{u,0}$ 为初始不排水抗剪强度 (kPa); $S_{u,rem}$ 为完全扰动后重塑样的不排水抗剪强度 (kPa); q_{in} 为第一次贯入时探头阻力值 (kPa); q_{rem} 为探头残余阻力的均值 (kPa); N_C 为阻力系数, 本研究取经验值 10.5; S_T 为灵敏度。

3 试验结果和分析

在开展全流动贯入测试前, 采用 Lunne 等^[10]提出的方法对土样的扰动程度进行分析和评估, 如表 2 所示, 大部分样品属于一般—较好范围内, 剔除质量较

差的土样, 分别对 5 个站位的土样进行分段测试, 结果汇总于表 3。

表 2 样品扰动程度评价准则

Table 2 Criteria for evaluation of sample disturbance

OCR	$\Delta e/e_0$			
	非常好	一般—较好	较差	很差
1~2	<0.04	0.04~0.07	0.07~0.14	>0.14
2~4	<0.03	0.03~0.05	0.05~0.10	>0.10

注: Δe 为样土固结到原位应力时孔隙比的变化量, e_0 为土的初始孔隙比。

从表 3 可知, 南海西部深海海床以下 0~4 m 范围内浅层沉积物的天然含水率普遍较高, 并且液性指数均大于 1.0, 说明土的天然状态为流塑态。图 3, 4 分别为海床土的塑性图和活性图, 可见大部分土属于高液限粉土, 活性值处于正常范围。

表 3 不同站位土样测试结果汇总

Table 3 Summary of test results of samples at different stations

样品编号	泥面以下深度/m	含水率 $w/\%$	塑限 $w_L/\%$	液限 $w_p/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	黏粒含量/%	活性值 A	$S_{u,0}/\text{kPa}$	$S_{u,rem}/\text{kPa}$	S_T
1-1	0.15~0.25	131.19	42.24	80.21	37.97	2.3	38.43	0.99	6.88	1.59	4.3
1-2	0.50~0.60	135.18	30.80	70.96	40.16	2.6	39.47	1.02	10.18	1.29	7.9
1-3	1.00~1.10	136.56	35.62	72.97	37.35	2.7	41.86	0.89	11.24	0.83	13.5
1-4	1.50~1.60	157.80	34.23	73.37	39.14	3.2	42.39	0.92	4.81	0.10	48.1
1-5	2.00~2.10	147.82	35.92	70.38	34.46	3.2	36.81	0.94	4.53	—	—
2-1	0.15~0.25	135.18	31.78	83.34	51.56	2.0	28.20	1.83	1.60	0.42	3.5
2-2	0.50~0.60	136.56	35.70	63.76	28.06	3.6	35.88	0.78	4.87	0.31	15.5
2-3	1.00~1.10	157.80	38.64	71.35	32.71	3.6	38.36	0.85	4.37	0.23	19.0
2-4	1.50~1.60	165.00	38.64	71.35	32.71	3.9	34.58	0.97	15.51	0.18	84.0
2-5	2.00~2.10	147.82	36.77	76.10	39.33	2.8	32.21	1.22	10.65	0.41	25.8
2-6	2.65~2.75	151.76	38.99	73.63	34.64	3.3	41.41	0.84	11.5	0.30	38.5
2-7	3.15~3.25	149.17	35.66	67.27	31.61	3.6	39.24	0.81	4.59	0.39	11.9
2-8	3.75~3.85	133.64	36.22	75.21	38.99	2.5	32.48	1.20	7.48	0.46	16.2
3-1	0.15~0.25	84.70	17.75	32.63	14.88	4.5	24.08	0.62	—	—	—
3-2	0.50~0.60	49.65	23.27	48.73	25.46	1.0	31.34	0.81	—	—	—
3-3	1.00~1.10	59.61	23.41	35.41	12.00	3.0	32.19	0.37	12.80	0.31	41.3
3-4	1.75~1.85	91.57	33.83	59.52	25.69	2.2	38.52	0.67	13.29	3.07	4.3
3-5	2.10~2.20	112.66	32.99	60.64	27.65	2.9	39.38	0.70	13.9	1.42	9.8
4-1	0.15~0.25	137.02	38.45	78.83	40.38	2.4	36.80	1.10	2.17	0.35	6.3
4-2	0.50~0.60	145.26	37.25	74.52	37.27	2.9	33.49	1.11	12.15	0.86	14.1
4-3	1.00~1.10	172.18	42.43	67.48	25.05	5.2	40.84	0.61	5.10	0.09	54.3
4-4	1.50~1.60	147.51	38.05	73.05	35.00	3.1	33.04	1.06	6.87	0.20	34.0
4-5	2.00~2.10	138.73	36.79	71.86	35.07	2.9	31.53	1.11	6.59	0.25	25.9
4-6	2.65~2.75	151.76	37.01	68.29	31.28	3.7	44.29	0.71	3.83	0.26	14.7
4-7	3.15~3.25	149.17	37.80	69.16	31.36	3.6	33.57	0.93	8.48	0.47	17.9
4-8	3.75~3.85	147.65	38.26	71.54	33.28	3.3	29.91	1.11	8.89	0.35	25.7
5-1	0.15~0.25	165.04	46.13	87.91	41.78	2.8	25.72	1.62	7.02	1.28	5.5
5-2	0.50~0.60	158.46	44.54	81.76	37.22	3.1	25.32	1.47	17.74	0.99	18.0
5-3	1.00~1.10	162.23	44.13	75.66	31.53	3.7	34.57	0.91	8.02	0.98	8.2
5-4	1.50~1.60	188.03	44.12	82.04	37.92	3.8	30.51	1.24	5.29	0.54	9.8
5-5	2.00~2.10	176.08	35.91	88.07	52.16	2.7	32.57	1.60	7.60	0.81	9.4
5-6	2.65~2.75	170.95	36.54	84.94	48.40	2.8	33.97	1.42	6.69	0.63	10.6
5-7	3.15~3.25	165.06	42.21	77.21	35.00	3.5	33.47	1.05	7.20	0.49	14.6
5-8	3.75~3.85	157.66	47.90	82.51	34.61	3.2	30.20	1.15	10.49	1.22	8.6

注: “—”表示由于样品质量太差或者其他不可控因素导致试验失败, 数据缺失。

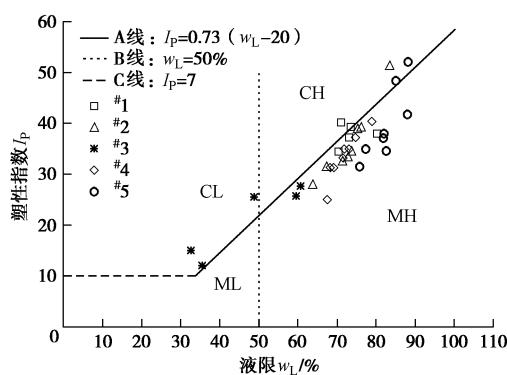


图 3 不同站位土样的塑性图

Fig. 3 Plasticity chart of samples at different stations

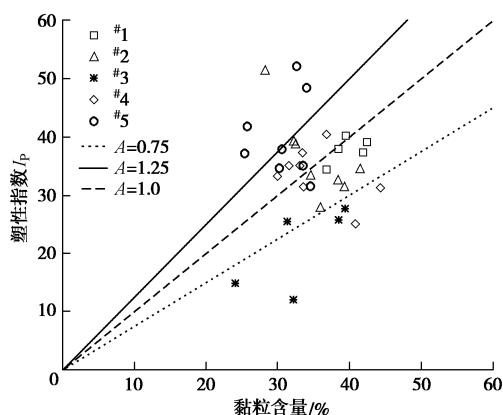


图 4 不同站位土样的活性图 (\$A\$ 为活性值)

Fig. 4 Activity diagram of samples at different stations (\$A\$, activity ratio)

3.1 不排水抗剪强度和灵敏度

5 个站位土样的初始和重塑不排水抗剪强度随深度的变化如图 5 所示。从图 5 可见, 各个站位土样的初始不排水抗剪强度均小于 20 kPa, 符合典型深海浅层软黏土的强度范围^[11]。同时, 从图 5 (a) 可见, 各个站位的初始不排水抗剪强度在浅层 1 m 以内均有先增加后减小的规律 (#3 站位数据缺失, 除外); 随着深度的增加, 除 #2 站位, 其他站位土样的初始不排水抗剪强度在一定范围内波动, 且呈现逐渐上升的趋势 (1~3 kPa/m)。同时, 从图 5 (b) 可见, 除了 #3 站位在 1.5~2.0 m 深度范围内, 其他土样的重塑不排水抗剪强度普遍极低, 绝大部分小于 1.5 kPa。

从表 3 可见, 绝大部分土样的灵敏度均超过 4.0, 属于高灵敏度软黏土。表层土样的灵敏度相对较低, 随深度的增加各站位土样的灵敏度波动显著, 除了 5 号, 其它站位在 1.0~2.0 m 深度范围内均有灵敏度很高的土层。深海土灵敏度较高主要与其极慢的沉积速率和稳定的沉积环境形成的“亚稳态”结构相关^[12]。

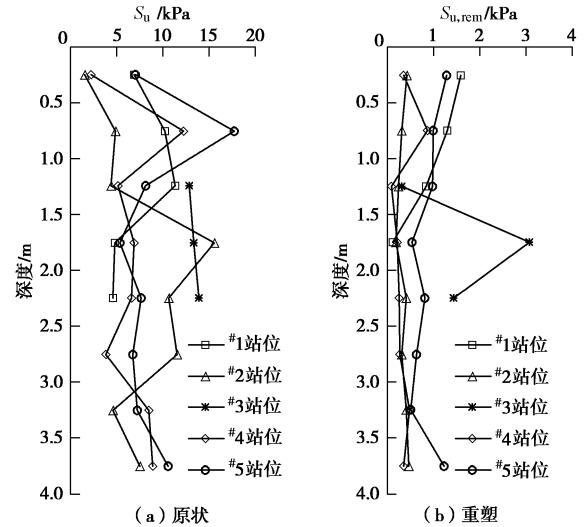


图 5 不同站位土样的不排水抗剪强度值

Fig. 5 Undrained shear strengths of samples at different stations

3.2 循环软化特性

当 T-bar 探头在一定深度范围内进行往复贯入和上拔作用时, 土体的内部结构不断被破坏, 土体强度逐渐衰减, 可以认为是一种循环作用下的土体强度渐进软化效应。采用 Randolph 等^[13]的建议, 将第一次贯入记为第 0.25 次循环, 第一次上拔记为第 0.75 次循环, 以此类推。将每一次贯入或者上拔的阻力的绝对值记为 q_n , 并与第一次贯入阻力 q_{in} 做比值, 可以得到归一化循环软化曲线, 选取 5 个不同站位相近深度范围的土样进行分析, 结果如图 6 所示。

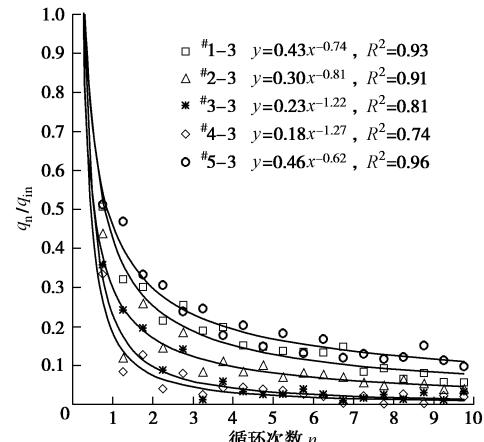


图 6 不同站位同一深度范围土样归一化循环软化曲线

Fig. 6 Normalized cyclic degradation curves of samples at different stations with same depth range

从图 6 中可以看到, 随着循环次数的增加, 各个土样的 T-bar 探头阻力迅速衰减, 在初次循环作用后, 各土样 T-bar 探头阻力值的衰减率均超过 50%, 后续每次循环的衰减率约为 5%~10%。另外, 在相同的循环次数下, #3-3 和 #4-3 土样的探头阻力衰减率均高于其他土样, 说明灵敏度越高, 土的结构性越不稳定, 在外力扰动下, 强度丧失的也就越多。归一化强度软

化曲线可采用幂函数的形式进行拟合:

$$q_n / q_{in} = bn^{-t} \quad , \quad (4)$$

式中, b 为相关常数, t 为循环软化指数, t 值越大, 表明土的强度软化程度越高, 南海西部海域软黏土的循环软化指数介于 0.45~1.33。

4 循环软化微观结构分析

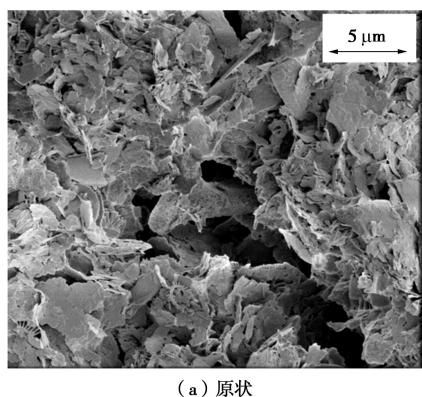
4.1 微观结构变化

取 T-bar 探头作用区域的土样, 采用扫描电镜方法, 分别对原状、初次循环后和完全重塑状态(10 次循环后)对应的微观结构及其变化进行观测和分析, 如图 7 所示。可以看到, 原始状态土样呈现出明显的“边-边”或“边-面”形式的絮凝结构(如图 7(a)), 絮凝体之间存在尺寸较大的孔隙。初次循环作用后(如图 7(b))土样微观结构的改变主要体现在两个方面, ①土样的絮凝结构被破坏, 大的絮凝体离散成几个小的絮凝体单元; ②絮凝体之间的孔隙结构被改变, 尺寸较大的孔隙变成若干个小孔隙, 但是孔隙的总体积基本保持不变。

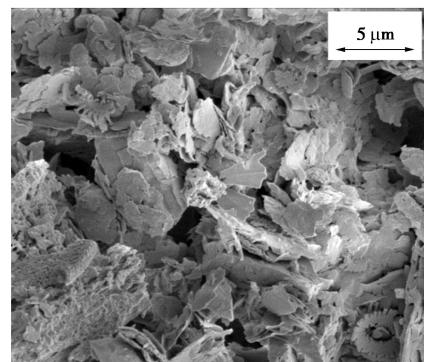
土样完全重塑后(如图 7(c)), 絯凝体结构几乎全部被破坏, 变成以颗粒聚合体为基本单元的小团簇^[14]。聚合体内部颗粒之间由于强结合水的作用, 即使在外力扰动作用下也很难被破坏, 对比压汞试验结果也发现原状土和重塑土的颗粒聚合体内部的孔隙结构和尺寸基本保持不变^[15]。同时可以看到, 土样完全重塑后, 颗粒聚合体之间的孔隙尺寸变得更小, 数量变得更多, 但是孔隙的总体积却减小, 主要是因为土样含水率很高, 在扫描电镜的制样过程中, 土样由于收缩作用而不可避免的导致孔隙体积减小。因此, 全流动循环软化实际上是一种土体中絮凝结构不断破坏、孔隙结构逐步演变的渐进过程。

4.2 生物硅的影响

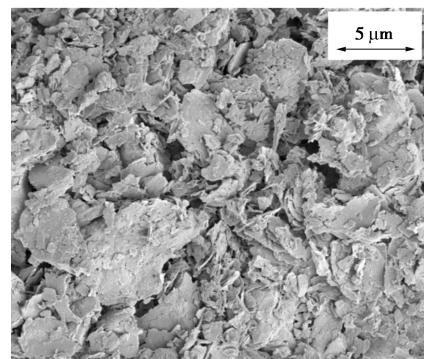
深海软黏土的物质组成很大一部分来源于硅质微生物残骸的沉积(一种生物成因的无定型二氧化硅, 简称为生物硅), 主要分为硅藻和放射虫^[16]。本研究中具有代表性的生物硅如图 8 所示。



(a) 原状



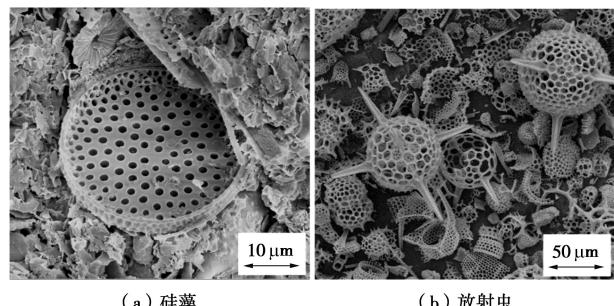
(b) 初次循环后



(c) 完全重塑

图 7 不同循环软化过程对应的土样微观结构

Fig. 7 Micro-structure of soils during different cyclic degradation processes



(a) 硅藻

(b) 放射虫

图 8 本研究中深海软黏土生物硅

Fig. 8 Biogenic silica in deep-sea soft clay in this study

生物硅具有孔隙发育、密度低、颗粒形状多变、吸附能力强和表面粗糙度高等特点, 它的存在会显著影响海洋软黏土的工程性质, 使得一些传统经验公式和规律不再适用^[17]。一般来说, 随着生物硅含量的增加, 软黏土的天然含水率、液塑限、活性值、孔隙比、渗透性、压缩性和不排水抗剪强度增大, 而密度却减小^[18]。生物硅丰富的内孔隙可以储存大量的水, 例如, 当硅藻残骸含量为 30%, 天然含水率为 43% 时, 硅藻残骸中储存的水超过总水量的 60%^[19]。采用一种“碱液提取法”测得中国南海深海软黏土中生物硅的含量约为 5%~10%^[20], 且大部分为孔隙率更高的放射虫

残骸。

生物硅的存在会显著影响深海软黏土的循环软化特性, 在 T-bar 循环作用下, 部分生物硅壳体发生破碎, 壳体中富存的水(大部分为自由水)逐渐被释放出, 增加黏土颗粒聚集体之间自由水的含量和土样的流动性^[21], 使得土体损失的强度相对更多, 从而加剧了土体循环软化的程度。

5 结论和展望

本文采用一种改进的室内全流动贯入装置, 对取自中国南海西部深海 5 个典型站位海床软黏土的强度特征进行测试, 着重探讨循环软化特性, 并结合特殊的微观结构和生物硅矿物进行分析, 主要得出以下 4 点结论。

(1) 南海西部深海软黏土具有高含水率、高液性指数、高活性值、低不排水抗剪强度和高灵敏度等特点, 深海土灵敏度较高主要与其极慢的沉积速率和稳定的沉积环境形成的“亚稳态”结构相关。

(2) 南海西部深海软黏土的循环软化程度很高, 初次贯入后土样的强度衰减率均超过 50%, 软化指数 t 介于 0.45~1.33。

(3) 全流动循环软化过程中土体结构的变化主要体现在两个方面: ①土体中絮凝体结构不断被破坏, 最终变成以颗粒聚集体为基本单元的小团簇; ②孔隙结构逐渐改变, 尺寸较大的孔隙变成若干个小孔隙, 但是孔隙的总体积基本保持不变。

(4) 深海软黏土中大量的生物硅颗粒在 T-bar 循环作用下会发生破碎, 导致内部储存的孔隙水释放, 从而加剧了土体循环软化的程度。生物硅矿物对深海土循环软化的微观影响机理还需要进一步的探究。

致谢: 感谢国家自然科学基金委员会共享航次对于本研究中样品采集的资助。

参考文献:

- [1] 郭绍曾, 刘润. 静力触探测试技术在海洋工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 1): 207~211. (GUO Shao-zeng, LIU Run. Application of cone penetration test in offshore engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 207~211. (in Chinese))
- [2] 郭小青, 朱斌, 刘晋超, 等. 珠江口海洋软土不排水抗剪强度及循环弱化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1005~1012. (GUO Xiao-qing, ZHU Bin, LIU Jin-chao, et al. Experimental study of undrained shear strength and cyclic degradation behaviors of marine clay in Pearl River Estuary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1005~1012. (in Chinese))
- [3] 彭鹏, 蔡国军, 刘松玉, 等. T型全流触探仪机理分析及海洋工程应用综述[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 151~155. (PENG Peng, CAI Guo-jun, LIU Song-yu, et al. Review of T-bar full-flow penetration testing in offshore engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 151~155. (in Chinese))
- [4] 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 Ting-kai, FAN Ning, JIAO Hou-bin, et al. Full-flow strength tests on the soft clay in the northern slope of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 602~611. (in Chinese))
- [5] 吴鸿云, 陈新明, 高宇清, 等. 西矿区深海稀软底质剪切强度和贯入阻力原位测试[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1801~1806. (WU Hong-yun, CHEN Xin-ming, GAO Yu-qing, et al. In-situ shearing strength and penetration resistance testing of soft seabed sediments in western mining area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5): 1801~1806. (in Chinese))
- [6] 马雯波, 饶秋华, 吴鸿云, 等. 深海稀软底质土宏观性能与显微结构分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1641~1646. (MA Wen-bo, RAO Qiu-hua, WU Hong-yun, et al. Macroscopic properties and microstructure analyses of deep-sea sediment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1641~1646. (in Chinese))
- [7] 任玉宾, 朱兴运, 周令新, 等. 南海西部海盆深海沉积物物理性质初探[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 14~20. (REN Yu-bin, ZHU Xing-yun, ZHOU Ling-xin, et al. Preliminary study on physical properties of deep-sea sediments in the western basin of South China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China (Science and Technology), 2017, 47(10): 14~20. (in Chinese))
- [8] 范宁, 赵维, 年廷凯, 等. 一种测试海底泥流强度的新型全流动贯入仪[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(4): 456~461. (FAN Ning, ZHAO Wei, NIANG Ting-kai, et al. A new full-flow penetrometer for strength test of submarine mud flow[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(4): 456~461. (in Chinese))
- [9] DEJONG J, YAFRATE N, DEGROOT D, et al. Recommended practice for full-flow penetrometer testing and analysis[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(2): 137~149.
- [10] LUNNE T, BERRE T, STRANDVIK S. Sample disturbance

- effects in soft low plastic Norwegian clay[C]// Proceedings of Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Rio de Janeiro, Brazil, 1997: 81 - 102.
- [11] LUNNE T, ANDERSEN K H, LOW H E, et al. Guidelines for offshore in situ testing and interpretation in deepwater[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(4): 543 - 556.
- [12] SKEMPTON A W, NORTHEY R D. The sensitivity of clays[J]. Géotechnique, 2015, **3**(1): 30 - 53.
- [13] RANDOLPH M F, HAN L, ZHOU H. In situ testing for design of pipeline and anchoring systems[C]// Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge. London, 2007: 177 - 186.
- [14] YIN Z Y, HATTAB M, HICHER P Y. Multiscale modeling of a sensitive marine clay[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2011, **35**(15): 1682 - 1702.
- [15] HAMMAD T, FLEUREAU J M, HATTAB M, et al. Behaviour of a sensitive marine sediment: microstructural investigation[J]. Géotechnique, 2013, **63**(1): 71 - 84.
- [16] NOORANY I. Classification of marine sediments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(1): 23 - 37.
- [17] WIEMER G, KOPF A. Influence of diatom microfossils on sediment shear strength and slope stability[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2017, **18**: 333 - 345.
- [18] SHIWAKOTI D R, LOCAT J. Influences of diatom microfossils on engineering properties of soils[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(3): 1 - 17.
- [19] LOCAT J, TANAKA H. A new class of soils: fossiliferous soils?[C]// Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul, 2001: 2295 - 2300.
- [20] MORTLOCK R A, FROELICH P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1989, **36**(9): 1415 - 1426.
- [21] WIEMER G, MOERNAUT J, STARK N, et al. The role of sediment composition and behavior under dynamic loading conditions on slope failure initiation: a study of a subaqueous landslide in earthquake-prone South-Central Chile[J]. International Journal of Earth Sciences, 2015, **104**(5): 1439 - 1457.

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 上海分元土木工程科技有限公司