

DOI: 10.11779/CJGE201804003

南海北部陆坡软黏土全流动强度试验研究

年廷凯^{1, 2, 3}, 范宁¹, 焦厚滨¹, 贾永刚³

(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. 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 鉴于海底软黏土强度测试困难和精度不足的现状, 研发了一种适用于低强度、高含水率土体强度测试的新型全流动贯入仪, 并进行了有效性校验。在此基础上, 针对南海北部陆坡区典型软黏土, 开展了多组原状试样的全流动强度试验, 分析了试验中初始阻力系数 N 与重塑阻力系数 N_{rem} 的取值范围, 给出了软黏土扰动前后不排水剪切强度沿深度的分布特征及变化趋势, 并结合微观孔隙面积比和宏观构造灵敏度, 探究了研究区土体的强结构特征。最后, 基于重塑不排水剪切强度与含水率/液限间的关联性分析, 提出了适用于研究区土体的不排水剪切强度归一化模型, 为南海北部陆坡区海底能源开发、海洋工程基础设计与地质灾害预测提供参考。

关键词: 南海北部陆坡; 全流动强度试验; 不排水剪切强度; 土体结构性; 归一化强度模型

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)04-0602-10

作者简介: 年廷凯(1971-), 教授, 博士生导师, 主要从事海洋岩土力学与能源岩土工程、地质灾害动力学与减灾技术方面的教学和科研工作。E-mail: tknian@dlut.edu.cn。

Full-flow strength tests on the soft clay in the northern slope of the South China Sea

NIAN Ting-kai^{1, 2, 3}, FAN Ning¹, JIAO Hou-bin¹, JIA Yong-gang³

(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. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In view of the difficulty in testing the strength of submarine soft clay and the lack of test accuracy, a new type of full-flow penetrometer is developed for testing the strength of soils with the high water content and low strength, and its test validity is verified. On this basis, a series of full-flow strength tests on the undisturbed samples, some typical soft clay from the northern slope of the South China Sea, are carried out. The range of values of the initial resistance coefficient N and the remolded resistance coefficient N_{rem} in the tests are analyzed, and the distribution characteristics and trends of the undrained shear strength of soft clay in the study area along the seabed depth direction are presented. Then the structural characteristics of soils are discussed combined with the macro structure sensitivity measured by the full-flow strength tests and the micro pore area ratio measured by the scanning electron microscope tests. Finally, a normalized undrained shear strength model suitable for soils in the study area is proposed based on the relationship between the remolded shear strength and water content / liquid limit. This research will provide a reference for the development of seafloor energy resources, the ocean engineering foundation design and the prediction of geological hazards in the northern slope areas of the South China Sea.

Key words: northern slope of the South China Sea; full-flow strength tests; undrained shear strength; soil structure; normalized strength model

0 引言

中国南海北部陆坡区域蕴含着丰富的石油、天然气、矿产等能源^[1], 开发潜力巨大, 逐渐成为中国海洋开发战略关注的焦点区域。勘探资料表明, 南海区域海底表层分布着一层厚度约 1~20 m 的软弱土层^[2], 通常表现为含水率高、强度低、有机质多、渗透性差等特点, 给海洋工程的基础设计带来了挑战; 同时, 在

外动力地质作用下, 也极易诱发软土层发生运动, 形成海底滑坡、碎屑流等地质灾害^[3], 严重威胁油气开采平台、海底管线等工程设施的稳定与安全^[4-5]。因此,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41427803, 51579032); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金项目(SKLGDEUK1307); 山东省海洋环境地质工程重点实验室基金项目(MEGE1603)

收稿日期: 2017-04-05

准确而高效地评价南海北部陆坡区软黏土的强度特性就显得十分紧迫和重要。

软黏土的强度测试, 通常采用静力触探试验、动力贯入试验、十字板剪切试验和室内单元试验等方法, 此外尚有许多新兴测试方法有待工程检验^[6]。近年来, 全流动贯入试验 (full-flow penetrometer) 发展迅速, 被认为是一种精度更高的强度测试技术^[7]。与传统的强度试验方法相比, 贯入阻力与土样强度之间具有比较严格的理论解; 全流动的测量机制减小了形状变化产生的超孔压影响; 探头投影面积较大, 可以得到更为精确的不排水抗剪强度值; 循环贯入与拔出测试可评价重塑强度、灵敏度等相关指标^[8-10]。该仪器目前已被广泛应用于海洋软土的工程现场和离心模型试验测试中, 积累了较为丰富的经验^[11-13]。然而, 针对海底表层软土, 这种常规全流动贯入试验仪的测量精度仍难以满足要求, 特别是含水率较高、强度极低, 扰动后重塑强度低于 1 kPa 的极软黏土, 测试其重塑强度和灵敏度更为困难, 精度难以保证; 而且结合中国深海区软黏土特点的全流动贯入试验应用和研究较少, 对于海底表层软黏土的结构性和原位不排水剪切强度的研究更少, 更缺乏含水率-不排水剪切强度的统一强度模型研究。

本文通过研制新型全流动贯入试验仪, 研究南海北部陆坡区海底软黏土的不排水剪切强度和灵敏度变化规律, 并结合微观电镜扫描测试揭示其结构性特征; 进而基于重塑不排水剪切强度和含水率/液限间的关联性, 建立不排水剪切强度归一化模型, 为中国南海地质灾害预测、海洋工程基础技术应用和海底能源开发提供支持。

1 研究区域土体性质

试验用土通过 2016 年共享航次计划, 在南海北部陆坡区取样, 各站点取样信息如表 1 所示, 地理位置见图 1。其中 S8-2 站点位于珠江海谷陆坡、S7A-3 站点位于珠江海谷陆坡与东沙陆坡交界处、D2-1 站点位于台湾浅滩陆坡^[14]。3 个站点处于陆架上、中陆坡区域, 坡度较大, 具有海底滑坡形成的地形条件^[15]。

土样获取采用重力式柱状取样方法, 该方法取样深度较大, 保持土体原状性能较好^[16]。由于天然海底软黏土层组构比较复杂, 局部常含有砂粒、生物残骸等成分, 难以用一组物理参数关系表示, 且考虑到其它相关试验的测试需求, 故每根柱状土样平均截为 10 段, 每段 (长 0.2 m, 直径 0.1 m) 均开展一组基本物理指标试验。液限和塑限采用 GYS-2 数显式土壤液塑限联合测定仪测定, 比重试验采用比重瓶法, 颗分试验采用 Hydro2000Mu 马尔文粒径分析仪进行测试, 所

取海底软黏土的基本物理性质如表 2 所示。

表 1 取样站点信息

| Table 1 Location of the soil sampling | | | | |
|---------------------------------------|----------|---------|------|--------|
| 站点名称 | 经度/(°) | 纬度/(°) | 水深/m | 取样长度/m |
| S8-2 | 115.17 E | 19.89 N | 1218 | ≈2 |
| S7A-3 | 115.99 E | 20.03 N | 1152 | ≈2 |
| D2-1 | 118.82 E | 21.83 N | 1885 | ≈2 |

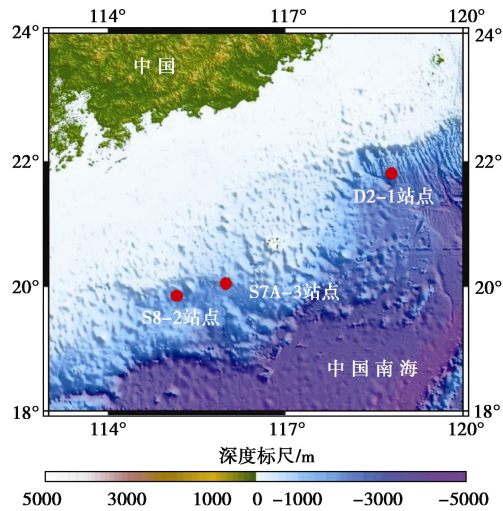


图 1 站点地理位置图示

Fig. 1 Geographical position of the soil sampling

由试验结果可知, 研究区域土体主要为高液限黏土, 液性指数范围在 1.37~3.39 之间, 处于流塑态; 土样中有机质含量较高, 其中 S8-2 站点高达 8.08%, 属有机土。取各站点有代表性的土颗粒级配曲线关系, 如图 2 所示, 土样中黏粒含量较高, 但必须指出的是, 土样顶部 (小于 0.5 m) 局部位置含有砂粒和海洋生物残骸, 导致表 2 中黏粒含量区间的下限值较低。

表 2 土样物理性质指标

| Table 2 Physical property indices of the soil samples | | | | | |
|-------------------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| 站点名称 | 土粒比重 | 塑限/% | 液限/% | 黏粒含量/% | 有机质含量/% |
| S8-2 | 2.54 ~2.68 | 29.79 ~33.50 | 57.81 ~63.10 | 15.60 ~38.85 | 8.08 |
| S7A-3 | 2.43 ~2.70 | 26.49 ~37.50 | 51.31 ~65.01 | 22.69 ~41.43 | 5.25 |
| D2-1 | 2.69 ~2.74 | 23.96 ~28.25 | 46.03 ~55.85 | 8.83 ~44.68 | 2.03 |

注: 有机质含量采用 Vario EL 型元素分析仪测得。

2 新型全流动贯入仪及校验

2.1 试验装置

为克服国际上常规全流动贯入仪的手工贴片抗干扰能力差、应变片难以根据测试需求更换、测力量程范围过大等影响测试精度的不足。基于全流动测量机

理, 通过改进仪器构造和测力元件, 研发了一种新型全流动贯入仪, 见图 3, 该仪器目前应用于室内测试。

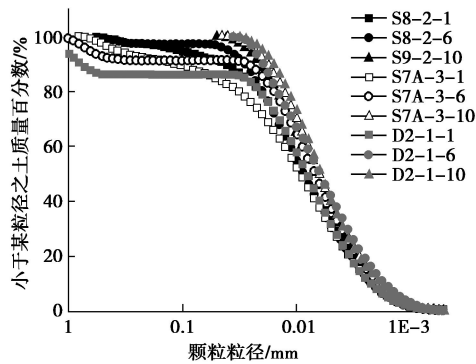


图 2 研究区内各站点代表性土样颗粒级配曲线

Fig. 2 Typical grading curves of the soils in the study area

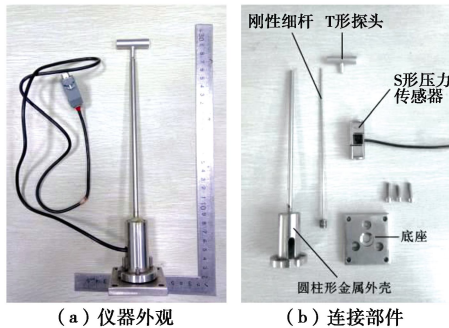


图 3 新型全流动贯入仪图示

Fig. 3 New full-flow penetrometer

新型全流动贯入仪由 5 部分组成, 包括: 探头 (本文选用 T 形)、刚性细杆、圆柱形金属外壳、S 形压力传感器和底座。新型全流动贯入仪具有如下优势: 以高精度 S 型压力传感器代替传统应变片, 抗电磁干扰能力强, 减小测试波动, 且无需精准的贴片技术, 便于加工制作; 传感器可根据不同的测试需求更换量程, 提高精度, 特别是选择小量程的传感器应用于强度较低的海底软黏土; 圆柱形金属外壳与底座相连接, 可以有效抵消测试过程中轴杆所受的侧摩阻力。

2.2 试验原理

新型全流动贯入仪基于全流动测量机制, 探头贯入过程中, 周围土体剪切破坏, 在探头附近形成塑性区, 并假定土体完全紧密地从探头表面流过, 可以求出比较精确的塑性理论解^[17-18]。进行结果分析时, 土体的不排水剪切强度与探头阻力间关系式如下:

$$S_u = q / N \quad (1)$$

式中 S_u 为土体的不排水剪切强度 (kPa); q 为探头的贯入阻力, 由 $q=Q/A$ 计算得出, 其中 Q 为测力元件测得的探头阻力荷载 (kN); A 为探头的投影面积 (m^2); N 为阻力系数, Randolph 等^[17]通过上限极限分析法给出了阻力系数 N 的取值范围为 9.1~11.9, 结合 Stewart 等^[19]的试验验证, 推荐 N 取 10.5。然而,

根据学者们近些年的大量应用和研究后发现, 推荐取值并不一定完全适用, Dejong 等^[20]认为对于某一研究区域的土体而言, 全流动强度试验的阻力系数应根据该地区以往的数值和试验结果选取或者由传统强度试验反算, 当无数据参考时, 可按理论解的推荐值计算。

2.3 仪器校验

为验证新型全流动贯入仪的可靠性和稳定性, 通过 100g 离心模型试验、1g 常规重力试验及传统强度试验方法, 对比分析新型全流动贯入仪与常规全流动贯入试验、静力触探试验、微型贯入试验、十字板剪切试验、三轴压缩试验、直剪试验的不排水剪切强度测试结果, 见图 4 和图 5, 其中微型贯入试验采用聂守智^[21]开发的袖珍触探仪。

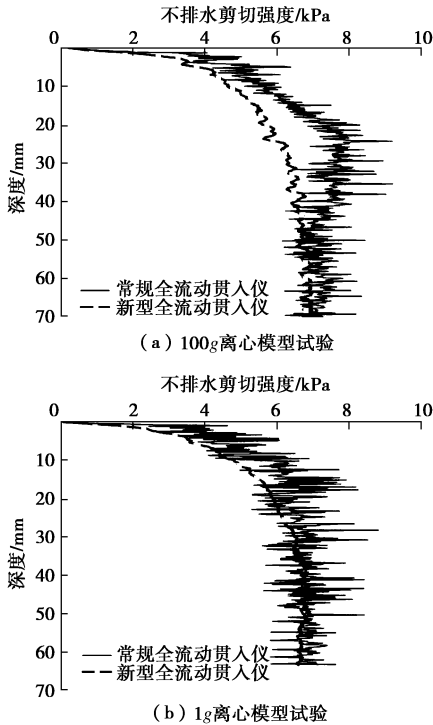


图 4 新型与常规全流动贯入仪测试结果比较

Fig. 4 Results of the new penetrometer and routine one

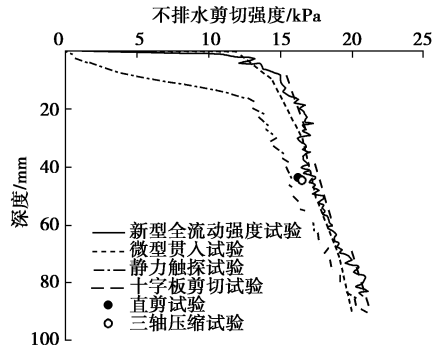


图 5 全流动贯入仪与其它强度测试结果对比^[22]

Fig. 5 Results of the new full-flow penetrometer and other traditional strength tests^[22]

由于传统强度试验方法难以直接测量高含水率、极低强度的海底表层软黏土,故仪器校验选用大连市金州湾地区海相软黏土(有效重度为 2.74 kN/m^3 ,液限为 42.1% ,塑性指数为 23.4),通过重塑、固结(固结压力为 35 kPa ,土样含水率为 43.4%)后应用于各项试验中。离心试验在大连理工大学 GT450/1.4 型鼓式离心机中进行,该离心机环形槽直径 1.4 m ,体积为 0.35 m^3 ,最大转速 875 RPM ,总容量 $450 \text{ g} \cdot \text{t}$ 。

由图 4 和图 5 可知:土样表层部分($0 \sim 20 \text{ mm}$),各种强度试验结果的差异性较大,尤其在离心环境下,主要原因在于全流动测量机理中土体在探头表面充分流动,通常需要 $2 \sim 3$ 倍探头直径的深度^[23],故表层未充分流动部分结果有所差异,全流动强度试验中不排水剪切强度一般在稳定段取值;强度稳定阶段(20 mm 以下),除静力触探试验结果偏低以外,新型全流动贯入仪与其它方法测得的不排水剪切强度基本一致,这是由于静力触探结果计算中锥尖阻力系数 N_c 的取值常依赖于经验,当 N_c 与超固结比 OCR 的关系不确定时取 12 ^[19],对本文测试用土而言, N_c 的取值偏大。

通过上述不同重力条件、不同强度试验方法的验证表明,新型全流动贯入仪的强度测试结果可靠,且新设备的测试波动较小。此外,还可以通过更换传感器量程,应用于不同强度特征的土样,精度较高。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

基于新型全流动贯入仪,采用分段测量的办法,对研究区域的海底软黏土进行循环强度测试,将所测探头阻力大小代入式(1),便可获得不排水剪切强度。循环测试是全流动强度试验常用的测试方法,以各站点第 10 段测试结果为例,见图 6,其中第 1 次贯入阻力可以评价原状土的初始强度;随着仪器在土体中的循环贯入与拔出,阻力曲线逐渐减小收缩,用以表明土样的剪切重塑过程;至贯入阻力不再变化后,得到充分扰动的重塑不排水剪切强度。可以看出, S7A-3 站点的初始强度最高, S8-2 站点的初始强度最低,且根据循环阻力曲线的收缩程度和重塑后的阻力大小发现, S7A-3 站点的灵敏度最高。

本文循环次数为 9.25 次,循环区间为每段试样的 $45 \sim 75 \text{ mm}$ 深度范围($4.5 \sim 7.5$ 倍探头直径范围),循环速度为 1 mm/s 。循环次数采用 Randolph 等^[24]提出的记数规则,即贯入过程记作 0.25 次循环,拔出过程记作 0.75 次循环,完成 1 次连续贯入与拔出记为 1 次循环。研究区域土样的测试结果汇总见表 3。

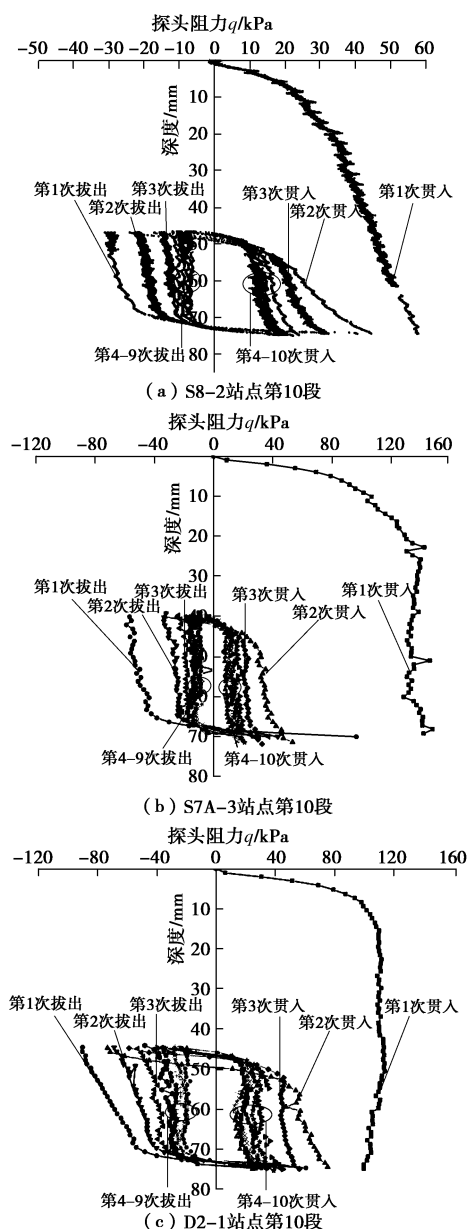


图 6 循环强度测试结果

Fig. 6 Results of the cyclic strength tests

3.2 土体结构性分析

灵敏度为原位不排水剪切强度与土样重塑强度的比值,通常用来衡量黏性土的结构对强度的影响,对于全流动强度试验而言,灵敏度可由式(2)计算,即初始不排水剪切强度 $S_{u,0}$ 与重塑强度 $S_{u,rem}$ 的比值。Yafrate 等^[25]在总结了大量的全流动强度试验资料后,发现灵敏度与探头阻力间相关性良好,提出了基于全流动强度试验结果的灵敏度计算公式,见公式(3)。

$$S_T = S_{u,0} / S_{u,rem} \quad (2)$$

$$S_T = \left(\frac{q_{in}}{q_{rem}} \right)^{1.4} \quad (3)$$

式中 S_T 为土体的灵敏度; q_{in} 为第 1 次贯入阻力(kPa); q_{rem} 为充分扰动后的重塑阻力(kPa)。另表 3 中

表 3 海底软黏土测试结果汇总
Table 3 Test results of the submarine soft soils

| 土样编号 | | 取值 深度/m | q_{in} /kPa | q_{ext} /kPa | q_{rem} /kPa | 理论初始强 度/kPa | 重塑强度 /kPa | 灵敏度 | 修正后初始 强度/kPa |
|-------------|------|------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------|-------|-----------------|
| S8-2 站点 | 1 段 | 0.06 | 24.96 | 10.36 | 2.87 | 2.38 | 0.16 | 20.66 | 3.31 |
| | 3 段 | 0.46 | 22.67 | 9.08 | 3.13 | 2.16 | 0.18 | 15.99 | 2.88 |
| | 5 段 | 0.86 | 42.01 | 22.56 | 9.16 | 4.0 | 0.59 | 8.43 | 4.97 |
| | 6 段 | 1.16 | 62.61 | 36.95 | — | 5.96 | — | — | 7.53* |
| | 8 段 | 1.56 | 27.74 | 14.46 | 6.91 | 2.64 | 0.42 | 7.00 | 2.94 |
| | 9 段 | 1.76 | 42.01 | 22.79 | 8.34 | 4.00 | 0.54 | 9.62 | 5.19 |
| | 10 段 | 1.96 | 52.48 | 26.93 | 10.53 | 5.00 | 0.64 | 9.48 | 6.07 |
| S7A-3 站点 | 1 段 | 0.06 | 87.13 | 44.89 | 14.64 | 8.30 | 0.89 | 12.15 | 10.81 |
| | 2 段 | 0.26 | 78.84 | 39.82 | 10.55 | 7.51 | 0.63 | 16.71 | 10.53 |
| | 3 段 | 0.46 | 104.51 | 52.48 | 12.86 | 9.95 | 0.76 | 18.79 | 14.28 |
| | 5 段 | 0.86 | 68.02 | 35.79 | 14.69 | 6.48 | 0.91 | 8.55 | 7.78 |
| | 6 段 | 1.06 | 79.42 | 43.84 | 14.7 | 7.56 | 0.98 | 10.61 | 10.40 |
| | 8 段 | 1.56 | 93.23 | 47.42 | 15.62 | 8.88 | 0.94 | 12.20 | 11.47 |
| | 10 段 | 1.96 | 141.57 | 43.74 | 15.31 | 13.48 | 0.87 | 22.51 | 19.58 |
| D2-1 站点 | 1 段 | 0.06 | 69.29 | 20.03 | 10.96 | 6.60 | 0.63 | 13.22 | 8.33 |
| | 2 段 | 0.26 | 106.81 | 48.11 | 12.99 | 10.17 | 0.75 | 19.10 | 14.33 |
| | 3 段 | 0.46 | 93.11 | 44.89 | 17.32 | 8.87 | 1.01 | 10.53 | 10.64 |
| | 5 段 | 0.86 | 117.4 | — | — | 11.18 | — | — | 14.99* |
| | 6 段 | 1.06 | 129.25 | 58.01 | 16.42 | 12.31 | 0.94 | 17.97 | 16.89 |
| | 8 段 | 1.56 | 64.68 | 34.71 | 11.85 | 6.16 | 0.76 | 10.76 | 8.18 |
| | 10 段 | 1.96 | 103.36 | 58.93 | 16.58 | 9.84 | 1.18 | 12.96 | 15.29 |

注：①表中“—”代表试验结果失效处，未做记录；②“*”为采用本文推荐的初始阻力系数计算得出；③“理论初始强度”采用理论阻力系数 $N=10.5$ 计算得出；④“重塑强度”计算时采用的重塑阻力系数由公式（5）得出；⑤“灵敏度”由式（3）获得；⑥“修正后初始强度”由公式(2)计算得出；⑦上述测试结果均在柱状样截取形成测试段内直接测出，测试段直径约为 0.1 m，不会对全流动测试产生边界效应影响。

q_{ext} 为第 1 次拔出阻力 (kPa)。上述阻力值可根据每次循环的探头阻力 q_n 与循环次数 n 的关系曲线获得，以图 7 所示研究区内各站点第 10 段强度试验结果为例，随着探头的循环贯入与拔出，阻力逐渐降低，至充分扰动后稳定，以此表示全流动强度试验中土样的剪切重塑过程。

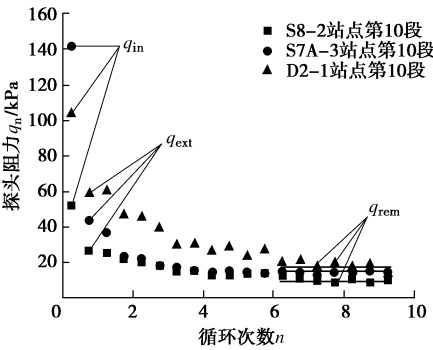


图 7 各站点第 10 段探头阻力与循环次数关系曲线

由式（3）对土样的灵敏度进行计算，结果见表 3。研究区域海底软黏土的灵敏度结果波动剧烈，在 0~0.5 m 深度范围内，灵敏度值明显偏高，均大于 10；

0.5 m 以下土样的灵敏度有一定降低趋势，其中 S8-2 站点最为明显。整体而言，各站点土样均属于高灵敏性土，结构性较强，灵敏度变化范围 7.00~22.51。

为充分说明研究区域海底表层软黏土的强结构性特征，利用电镜扫描 (SEM) 技术对土样试验前后的微观结构进行分析，如图 8 所示，其中试验前图片 8 (a) 和 (c) 的测试土样取自原状样试验段顶部中心，试验后图片 8 (b) 和 (d) 的测试土样取自试验段全流动测试结束后的中心部位。仪器采用美国 FEI 公司生产的 NOVA Nan450 型场发射扫描电镜，土样的放大倍数为 3000 倍，并通过 Image-Pro Plus 图像处理软件获取试验前后 SEM 图片的二值化图像，以获取微观参数面积比。面积比指颗粒与孔隙的面积比值，二值化图中黑色部分为土颗粒，白色部分为孔隙。

一般而言，描述土体的微观结构主要包括以下四个方面：结构单元特征、颗粒排列特征、孔隙性和结构连接情况^[26]。由图 8 可知，南海北部陆坡区软黏土在自然状态下，颗粒表现为松散排列的状态，土颗粒多为细碎的颗粒簇，定向性不明显；可见明显的海洋生物残骸，多呈碎片状或团粒状；孔隙率较高，且孔

隙尺寸较大。全流动强度试验前后, 面积比从 1.04 大幅度提高至 7.55, 因为原状海底软黏土经剪切破坏后, 原有土骨架被破坏, 强度降低; 大孔隙逐渐压破, 并被新形成的颗粒填充, 孔隙面积减小, 该过程遵循“大孔隙优先改变原则”^[26]; 土颗粒重新组合和定向排列, 结构单元体接触方式逐渐变为面一面的连接形式, 使土体变密, 颗粒的面积相应增大, 故微观参数面积比增加。

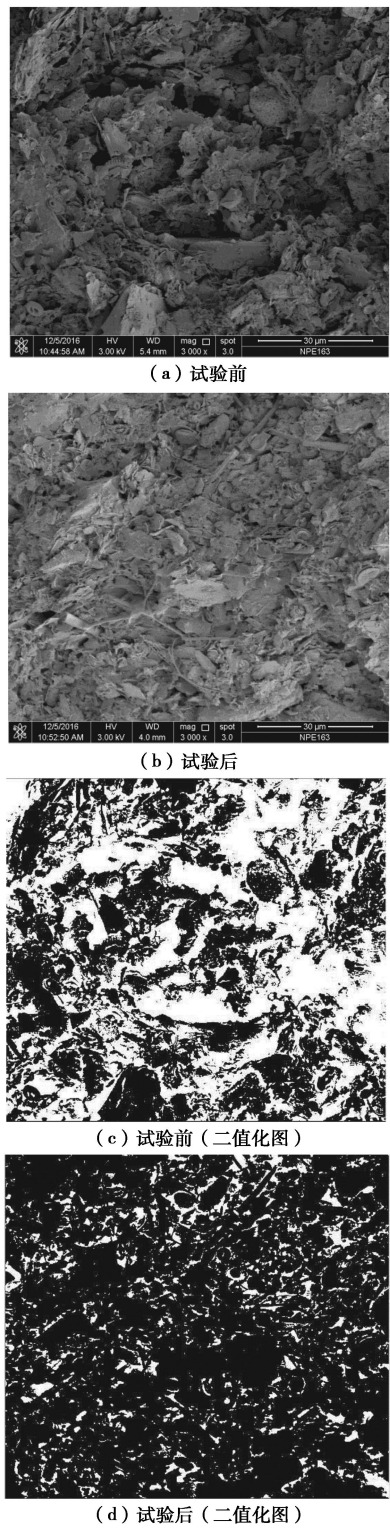


图 8 研究区域土样电子显微镜照片
Fig. 8 Electron microscope photos of the soil samples

从上述分析可知, 南海北部陆坡区软黏土的微观结构在全流动强度试验前后变化显著, 面积比增长幅度较大, 说明研究区土样具有强结构性特征, 与灵敏度分析的结果相呼应。

4 强度分析与归一化模型

4.1 重塑不排水剪切强度

重塑不排水剪切强度表示土样经充分扰动重塑后的最低强度值, 是反映土体力学性质的指标之一, 常用于分析天然土体的结构性差异。全流动强度试验中, 重塑不排水剪切强度的计算公式见式 (4)。由于试验过程中, 土体会发生软化, Yafrate 等^[25]认为阻力系数也应发生相应的变化, 不宜采用初始状态的阻力系数来计算土体充分扰动后的重塑强度, 应根据试验区域土体已有的传统强度试验、数值分析结果或者公式反算的方式获取重塑阻力系数 N_{rem} 。

试验土样取自南海北部陆坡区域, 以往研究中缺少与该区域土样全流动强度有关的数值和试验研究, 故采用 Yafrate 等^[25]推荐的经验公式反算, 见式 (5)。

$$S_{u,rem} = q_{rem} / N_{rem} \quad , \quad (4)$$

$$N_{rem} = 12 + \frac{5.5}{1 + \left(\frac{q_{in} / q_{ext}}{1.8} \right)^{-20}} \quad (\text{T 形探头}) \quad . \quad (5)$$

式中 $S_{u,rem}$ 为重塑不排水剪切强度 (kPa); N_{rem} 为重塑阻力系数。

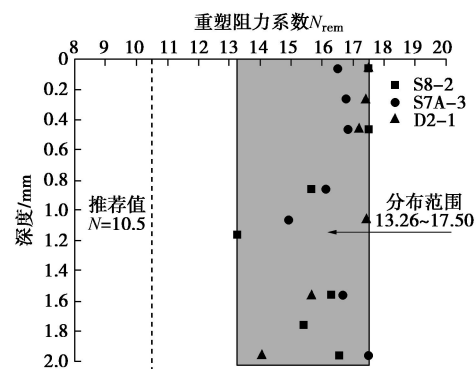


图 9 重塑阻力系数 N_{rem} 变化范围

Fig. 9 Range of the remolded resistance coefficient N_{rem}

研究区域土样的重塑阻力系数 N_{rem} 计算结果如图 9 所示。可见 N_{rem} 整体变化范围在 13.26~17.50 之间, 相较于未考虑循环剪切软化的理论推荐取值 10.5, 均有较大的增幅, 因此在计算重塑不排水剪切强度时, 应充分考虑土体的软化效应, 重新确定阻力系数的大小。对于 S8-2 站点附近区域海底表层软黏土的全流动强度测试, 当无实测数据参考时, 推荐重塑阻力系数

N_{rem} 取上述范围的中间值 16.02; 同理, S7A-3 站点附近区域推荐取 16.48; D2-1 站点附近区域推荐取 16.54。

4.2 初始不排水剪切强度

初始不排水剪切强度可以采用 Randolph 等^[17]依据理论分析提出的推荐阻力系数 10.5 进行计算, 但为获取精确的结果, 同样需要采用类似确定重塑阻力系数 N_{rem} 的方法反算。基于上述重塑不排水剪切强度和灵敏度结果, 可由式 (2) 得到原状土的初始不排水剪切强度, 再根据式 (1) 反算出实际的初始阻力系数 N , 重新修正由推荐阻力系数计算的初始不排水剪切强度, 见表 3。根据全流动强度试验结果, 推荐 S8-2 站点附近区域阻力系数 N 取 8.32; S7A-3 站点附近区域取 7.80; D2-1 站点附近区域取 7.83。

由于土体在探头表面充分流动, 通常需要 2~3 倍探头直径的深度范围, 故每段土样深度大于 20 mm 后的结果比较精确。考虑到循环区间为 45~75 mm, 本文取中间深度 60 mm 处的强度值代表每段土样的初始不排水剪切强度, 见表 3。

由修正后的初始不排水剪切强度可知, 研究区域表层软黏土的强度变化波动剧烈, 沿深度方向增长趋势不明显, 与仪器校验过程中制备的均匀土样有较大差异, 因为天然海底软黏土的组构条件复杂, 所取土样顶部 (小于 0.5 m) 局部位置混有砂粒和海洋生物残骸, 导致土样顶部的强度值偏高, 整体强度变化剧烈; 在 2 m 深度范围内, S8-2 站点的强度变化区间在 2.88~7.53 kPa 之间, S7A-3 站点为 7.78~19.58 kPa, D2-1 站点为 8.18~16.89 kPa, 其中 S8-2 站点测得的强度明显低于其余 2 个站点, S7A~3 站点与 D2-1 站点的强度结果较为接近, 可以认为南海北部陆坡中珠江海谷陆坡表层软黏土的强度相对较低; 此外, 在最上部的 0~0.2 m 深度范围内, 所测初始强度值均低于 11 kPa, 与朱超祁等^[16]采用十字板和微型贯入仪测试得出的结论类似。

4.3 归一化强度模型

研究区域海底软黏土的含水率较高, 天然含水率在 1~2 倍液限之间, 对土样的不排水剪切强度影响显著。为建立一个适用性广泛的含水率-不排水剪切强度归一化模型, 前人开展了许多研究工作, Inoue 等^[27]和 Tan 等^[28]使用薄板贯入剪切试验研究了高含水率重塑软黏土的不排水剪切强度; 王亮等^[29]通过十字板剪切试验分析了含水率对淤泥重塑不排水强度的影响; 吉锋等^[30]采用薄板贯入剪切试验对中国高含水率疏浚淤泥的含水率与重塑不排水强度间关系展开分析;

Hong 等^[31]在归纳整理了大量前人研究数据的基础上, 给出了重塑土样不排水剪切强度与含水率间的经验关系。然而, 上述研究多针对陆地湖泊区、滨海区土体的重塑不排水剪切强度, 通常未考虑土体天然结构性的影响; 薄板贯入剪切试验又难以对海底重力式柱状土样进行测试; 且十字板剪切试验测试影响范围大, 影响其它参数的测试, 获取数据量较少。

利用全流动强度试验对土样测试扰动小、获取数据量大等优势, 从重塑不排水剪切强度着手, 暂时忽略不同地区土体的结构性差异, 采用含水率/液限 (w/w_L) 表示土体的含水率综合指标, 建立重塑不排水剪切强度与含水率/液限的联系, 最后考虑结构性影响, 得到原状土的归一化强度模型。

从前人研究^[29-31]中发现, 重塑不排水剪切强度与含水率/液限间普遍具有如式 (6) 所示的幂律关系。

$$S_{u,rem} = a \left(\frac{w}{w_L} \right)^b \quad (6)$$

式中 $S_{u,rem}$ 为重塑不排水剪切强度, 此处便于与前人研究比较, 单位取 Pa; w 为土样含水率 (%); w_L 为土样液限 (%); a 和 b 为拟合系数, 前人研究中所获得拟合系数见表 4。

表 4 a 和 b 取值情况

Table 4 Values of a and b

| 文献来源 | 试验方法 | a | b |
|------------------------|--------|------|-------|
| Hong 等 ^[31] | 薄板贯入剪切 | 1400 | -4.5 |
| 吉锋等 ^[30] | 薄板贯入剪切 | 1500 | -4.7 |
| 王亮等 ^[29] | 十字板剪切 | 2732 | -4.17 |

综合全流动强度试验测得原状土的重塑强度及配置重塑土的重塑强度, 与前人得出的归一化强度模型进行比较, 见图 10。可以看出, 含水率对海底软黏土的不排水剪切强度影响显著, 重塑不排水剪切强度随含水率/液限 (w/w_L) 的增大而迅速降低, 至含水率达到 3 倍液限后趋于稳定, 重塑状态下的强度性质与陆地淤泥相似; S8-2 站点的测试结果偏低于其余 2 个站点, 可能是由于 S8-2 站点的有机质含量较高, 导致所测液塑限指标偏高, 故相应的含水率/液限偏低; 此外, 相较于 Hong 等^[31]和吉锋等^[30]使用的薄板贯入剪切试验而言, 全流动强度测试结果与王亮等^[29]采用十字板试验的结果相似, 均高于薄板贯入剪切试验的结果, 王亮等^[29]认为薄板贯入剪切试验测得的强度更应该为薄板和土体之间的强度, 故应小于土体自身强度。

通过与前人研究结果的比对表明, 基于含水率/

液限 (w/w_L) 的归一化强度模型对海底表层软黏土的适用性良好。在考虑结构性影响的基础上, 提出了适用于研究区域土体的归一化强度模型, 见下式:

$$S_{u,0} = 3677 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4.36} \cdot S_T, \quad (7)$$

式中, $S_{u,0}$ 为初始不排水剪切强度 (Pa)。

需要指出的是, 该模型是针对南海北部陆坡软黏土的全流动强度试验提出的, 不同地区土体的有机质含量、矿物成分以及不同测试方法等差异会导致拟合系数 a 和 b 有所不同。

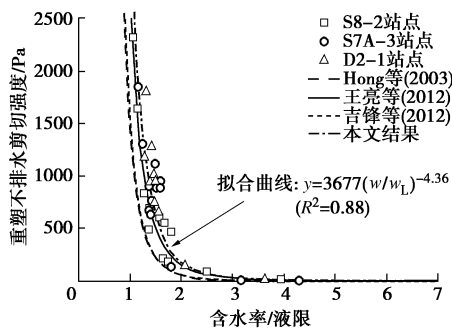


图 10 试验结果与归一化强度模型的对比

Fig. 10 Comparison between the normalized strength model and test results

5 结 论

(1) 由全流动强度试验和电镜扫描 (SEM) 试验得知, 南海北部陆坡软黏土的灵敏度变化范围在 7.00~22.51 之间, 属于高灵敏性土, 结构性较强, 天然状态下颗粒排列松散, 定向性不明显, 可见明显的海洋生物残骸, 孔隙率较高, 且孔隙尺寸较大。

(2) 通过对全流动强度试验中初始阻力系数 N 与重塑阻力系数 N_{rem} 取值范围的分析, 完善了全流动强度试验在研究区域的测试方法, 并推荐了适用于中国南海北部陆坡软黏土的阻力系数参考值。

(3) 南海北部陆坡软黏土结构较为复杂, 局部含有砂、生物残骸等成分, 导致强度波动剧烈, 沿深度方向增长趋势不明显, 其中 S8-2 站点的初始不排水剪切强度在 2.88~7.53 kPa 之间, S7A-3 站点为 7.78~19.58 kPa, D2-1 站点为 8.18~16.89 kPa。

(4) 基于重塑不排水剪切强度与含水率/液限间的幂律关系, 提出了适用于南海北部陆坡软黏土的不排水剪切强度归一化模型, 为该区域海洋工程基础设计、海底能源开发和地质灾害预测提供参考。

致 谢: 本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金委员

会共享航次计划 (航次编号: NORC2016-05) 的资助, 航次由中国海洋大学“东方红 2 号”科考船实施。鲁双、霍沿东、郭兴森、王学伍等参加了样品的室内试验, 朱超祁、王振豪等参加了样品的采集和运输, 赵维参加了仪器研发, 在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 沙志彬, 郭依群, 杨木壮, 等. 南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009(5): 89 - 98. (SHA Zhi-bin, GUO Yi-qun, YANG Mu-zhuang, et al. Relation between sedimentation and gas hydrate reservoirs in the northern slope of south China sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009(5): 89 - 98. (in Chinese))
- [2] 杨浩明. 典型南海软黏土的渗透特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012. (YANG Hao-ming. Test investigations of the permeability behavior of the soft clay in the south China sea[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [3] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3184 - 3195. (WU Shi-guo, QIN Zhi-liang, WANG Da-wei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the northern continental slope of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3184 - 3195. (in Chinese))
- [4] 王立忠, 缪成章. 慢速滑动泥流对海底管道的作用力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 982 - 987. (WANG Li-zhong, MIAO Cheng-zhang. Pressure on submarine pipelines under slowly sliding mud flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 982 - 987. (in Chinese))
- [5] JIA Yong-gang, ZHU Chao-qi, LIU Li-ping, et al. Marine geohazards: review and future perspective[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2016, 90(4): 1455 - 1470.
- [6] 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(增刊 1): 205 - 208. (WANG Zhen-hong, ZHANG Kun, ZHU Hong, et al. Application of miniature vane in seabed soft soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015(S1): 205 - 208. (in Chinese))
- [7] 季福东, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底沉积物工程力学性质原位测量方法[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016(3): 191 - 200. (JI Fu-dong, JIA Yong-gang, LIU Xiao-lei, et al. In situ measurement of the engineering mechanical properties of

- seafloor sediment[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016(3): 191 - 200. (in Chinese))
- [8] 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(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(S1): 207 - 211. (in Chinese))
- [9] BOYLAN N, LONG M, WARD D, et al. Full-flow penetrometer testing in bothkennar clay[J]. *Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge*. London, 2007.
- [10] 刘松玉, 蔡正银. 土工测试技术发展综述[J]. *土木工程学报*, 2012(3): 151 - 165. (LIU Song-yu, CAI Zheng-yin. Review of the geotechnical testing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012(3): 151 - 165. (in Chinese))
- [11] SAHDI F, GAUDIN C, WHITE D J, et al. Interpreting T-bar tests in ultra-soft clay[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2014, **14**(1): 13 - 19.
- [12] HANENG L, RANDOLPH M F. Strength measurement for near-seabed surface soft soil using manually operated miniature full-flow penetrometer[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2010, **136**(11): 1565 - 1573.
- [13] OSMAN A S, RANDOLPH M F. On the calculation of cumulative strain around full-flow penetrometers in steady-state conditions[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, **39**(4): 368 - 387.
- [14] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. *海洋学报*, 2008, **30**(2): 70 - 79. (WANG Hai-rong, WANG Ying-min, QIU Yan, et al. Geomorphology and its control of deep-water slope of the margin of the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, **30**(2): 70 - 79. (in Chinese))
- [15] 寇养琦. 南海北部大陆边缘海底滑坡的初步研究[J]. *南海地质研究*, 1993(5): 43 - 56. (KOU Yang-qi. Preliminary study on the submarine slides in northern South China Sea[J]. *Geological Research of South China Sea*, 1993(5): 43 - 56. (in Chinese))
- [16] 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 Chao-qi, JIA Yong-gang, ZHANG Min-sheng, 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))
- [17] RANDOLPH M F, HOULSBY G T. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil[J]. *Géotechnique*, 1984, **34**(4): 613 - 623.
- [18] MARTIN C M, RANDOLPH M F. Upper bound analysis of lateral pile capacity in cohesive soil[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(2): 141 - 145.
- [19] STEWART D P, RANDOLPH M F. A new site investigation tool for the centrifuge[C]// *Proceedings of the International Conference On Centrifuge Modelling*. Centrifuge'91. Rotterdam: A A Balkema, 1991: 531 - 538.
- [20] 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.
- [21] 聂守智. 用 XC-1 型袖珍触探仪测定液塑限的新方法[J]. *岩土工程学报*, 1995, **17**(5): 74 - 79. (NIE Shou-zhi. A new approach to the determination of the liquid limit and plastic limit of the soil by XC-1 pocket penetrometer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, **17**(5): 74 - 79. (in Chinese))
- [22] 王冉冉. 全流动贯入仪的室内和离心模型试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (WANG Ran-ran. Laboratory and centrifuge model tests study on full flow penetrometers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [23] ZHOU H, RANDOLPH M F. Numerical investigations into cycling of full-flow penetrometers in soft clay[J]. *Géotechnique*, 2015, **59**(10): 801 - 812.
- [24] 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.
- [25] YAFRATE N, DEJONG J, DEGROOT D, et al. Evaluation of remolded shear strength and sensitivity of soft clay using full-flow penetrometers[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(9): 1179 - 1189.
- [26] 周翠英, 牟春梅. 软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(10): 1136 - 1141. (ZHOU Cui-ying, MU Chun-mei. Relationship between micro-

- structural characters of fracture surface and strength of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1136 - 1141. (in Chinese))
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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))
- [30] 吉锋, 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 Gui-zhong, CAO Yu-peng, 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))
- [31] HONG Zhen-shun, LIU Han-long, NEGAMI T. Remolded undrained strength of soils[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(1): 133 - 142.

第十届全国基坑工程研讨会暨第一届全国可回收锚索技术研讨会 (第2号通知)

由中国建筑学会建筑施工分会主办, 兰州理工大学承办的“第十届全国基坑工程研讨会暨第一届全国可回收锚索技术研讨会”将于2018年9月14日~16日在甘肃省兰州市召开。为进一步加强论文征集, 现发出会议第2号征文通知。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会。

承办单位: 兰州理工大学。

协办单位(按拼音排名): 甘肃建研建设工程有限公司; 甘肃金恒建设有限公司; 甘肃土木工程科学研究院; 甘肃中建市政工程勘察设计院有限公司(原中国市政工程西北设计研究院有限公司); 兰州大学; 兰州交通大学; 上海智平基础工程有限公司; 西北民族大学; 《岩土工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部; 中国二冶集团有限公司; 中铁西北科学研究院; 中冶集团武汉勘察研究院有限公司(待增补)。

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的新技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥黄土、软弱土等特殊土地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦可回收锚杆(索)设计、施工与监测技术; ⑧深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑨超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑩基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑪重、大、特基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

论文投稿要求: ①论文要求尚未公开发表, 论点明确, 论据可靠, 数据准确, 文字精炼, 引用文献明确出处, 篇幅控制在A4纸6页以内。②论文内容务必实事求是, 不得侵犯他人著作权, 不涉及保密内容, 文责自负。③会议论文格式一律按照《岩土工程学报》期刊格式撰写。④务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及E-mail地址。

论文评审与出版: 对经学术委员会推荐、相关期刊编委会评审通过的论文将分别以《岩土工程学报》和《岩土力学》正刊或增刊等形式出版; 经学术委员会评审通过的所有论文将以论文集的形式出版。

重要日期安排: ①论文提交截止日期: 2018年4月30日前提供论文电子版一份, 发送至邮箱jikenghy2018@163.com。②论文录用通知日期: 论文将组织学术委员会专家评审, 录用通知及修改意见将在2018年5月31日前通知作者。③论文修改返回日期: 作者根据修改意见和排版要求定稿, 于2018年6月20日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会。

相关信息: ①正式代表会务费每人1200元, 研究生和家属代表每人600元; ②会议期间将设立岩土工程新仪器、新技术、新材料、新软件等方面的展览, 热烈欢迎相关公司和单位参加。

会议秘书处联系方式: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号, 兰州理工大学土木工程学院, 邮编730050。联系电话: 周勇13119308411, 叶帅华13893624445, 韦正德13639330876, 杨校辉15095338032。电子邮箱: jikenghy2018@163.com。

(大会组委会 供稿)