海底麻坑内外土体物理力学特性差异研究

何旭涛[1], 张秀峰[1], 舒　琪[1], 李世强[1], 宋　渥[2], 彭维龙[1]

(1. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为了研究海底麻坑内外土体物理力学特性的差异, 以杭州湾口外软土海底发现的大型麻坑为研究对象, 分别在麻坑内外进行了 4 站 15 m 孔压静力触探(CPTU)测试、2 口钻孔共 48 个柱状样样品的常规土工试验, 结果表明麻坑内土体相较麻坑外土体抗剪强度高、压缩模量大, 饱和度、孔隙率和含水量低, 而浅层气在海底土体中的赋存形式是造成这种差异的主要原因。

关键词: 孔压静力触探(CPTU); 海底麻坑; 土力学

中图分类号: P751　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2020)02-0131-07

DOI: 10.11759/hykx20190415001

海底麻坑一般是指海底面呈现如月球表面一般的坑洼地貌, 被普遍认为是由于深部流体通过流体通道在海底强烈快速喷逸或缓慢渗漏亦或是浅层气逸散剥蚀海底松散沉积物而形成的残留海底地貌[1]。自 1970 年被首次发现以来, 越来越多的海底麻坑在全球范围内特别是在大陆边缘海底被发现, 突显出其在指示海底流体活动和海洋地质灾害方面具有重要意义, 许多学者对此进行了大量有意义的研究[2-6]。

海底浅层气在东海近岸海域多有分布, 主要集中于长江水下三角洲和浙江近岸海域的第四纪沉积地层中, 如长江口南支沿岸、长江口外海域、杭州湾至舟山群岛地区海域等。第四纪沉积层土体粒径往往粗细相间、海相陆相交互, 其中淤泥质粉质黏土层和淤泥质黏土层富含有机质, 是常见烃源层, 且同时具有盖层作用, 粗颗粒砂质沉积物因孔隙度较大, 可形成储集层, 因此导致浅层气在第四纪地层中的分布常常具有多层性, 储集层一般与烃源层互相叠加, 高压气囊主要分布在古河道、河口湾和分支河道河口湾中部或边缘。浙江沿海第四系一般可分为第一含气层系(全新统)和第二含气层系(上更新统), 最浅埋深一般为 0~30 m。在长江水下三角洲, 浅层气主要分布在自岸滩至 25 m 水深范围内的三角洲前缘与前三角洲沉积区内, 在长江口东南可达 35m 水深或更深的陆架上。

随着海洋工程活动的大量增加, 作为常见的海底微地貌类型海底地貌, 海底麻坑不可避免地会与海洋工程活动产生区域重叠, 而海底麻坑的不均匀沉降等特征可能引起严重的工程危害 [7]。为了提高海洋工程的稳定性及安全性, 加强对海底麻坑土体物理力学特性的研究尤为重要。

现代静力触探技术(cone penetration testing, CPT)发展于 20 世纪 60 年代, 其作用是根据探头贯入时候的阻力(锥尖阻力 q_c、侧摩阻力 f_s)和贯入深度获得这些静力触探参数随深度的变化曲线图, 并以此对土体类型及物理力学性质进行判别[8-11]。其后又发展出了可进行孔隙水压力测量的孔压静力触探(CPTU), 相较于传统的钻探方法, CPTU 测试能够提供高分辨率连续的原位测试数据, 消除了取样过程中的干扰对测试分析的影响, 减少了取样及样品分析等工作量, 节约成本且大大提高了效率。在海洋工程勘察中, 由于取样的困难及取样方式的限制, 我们很难利用传统的取样实验的方式获得高精度的测试数据, 而 CPTU 测试技术可以很大程度上的克服这些困难, 使我们获得连续的海底土体原位数据[12-15]。近年来, 海洋孔压静力触探(CPTU)技术因其高效、准确的优势, 在海洋工程勘测及工程地质灾害调查中得到广泛应用: 梁文成等[16]在港珠澳大桥岛隧工程地质勘

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-06-03

基金项目: 浙江省电力有限公司基金资助项目(5211ZS16000C); 国家自然科学基金项目(5167090521); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(SZ1919)

[Foundation: Fund of Zhejiang Electric Power Co., Ltd., No. 5211ZS16000C; National Natural Science Foundation of China, No. 5167090521; Scientific Research Fund of the Second Institute of Oceanography, MNR, No.SZ1919]

作者简介: 何旭涛(1973-), 男, 浙江舟山人, 本科, 主要从事海洋输电技术研究, 电话: 0580-6257117, E-mail: hxt0580@ 163.com

察工作中成功利用 CPTU 技术进行了工程地质物理力学特性分析; 陈磊[17]利用 CPTU 技术对海上某井位进行准确的地质分层; 彭鹏等[18]采用 CPTU 方法对三亚新机场海洋软土工程特性进行评价, 均取得了良好的效果。可见静力触探技术在工程中的应用具有重要的意义, 可以对海底土的工程特性作比较全面的分析和评价。

本文利用在杭州湾口外软土海底采集的钻孔分析数据以及孔压静力触探(CPTU)分析数据, 研究杭州湾口外海域某大型海底麻坑内外的土体物理力学性质差异, 分析差异形成原因, 为提高海洋工程建设安全性提供支撑。

1 研究方法

1.1 研究区位置及声学地层特征

研究海域位于杭州湾口外现代长江水下三角洲南缘, 中街山列岛-东极镇北侧海域, 坐标范围东经约 122°41′23.7″~122°43′23.2″、北纬约 30°13′26.2″~30°14′34.6″之间(见图 1)。该区第四纪以来形成了浙东南陆相松散碎屑沉积及滨海海陆交互相、海相松散沉积, 平均水深约 28 m, 海底地形较为平坦, 主要物源来自长江及钱塘江携带的泥沙[19-20]。

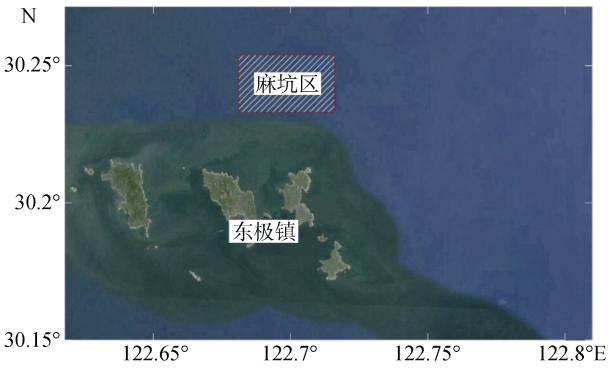


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

研究区浅地层剖面显示麻坑下方声学反射信号受到明显的干扰, 形成明显的声学屏蔽现象, 表明有浅层气存在于地层中[21], 屏蔽层的顶界面在麻坑区抵达海底面(见图 2); 形状为不规则椭圆形(见图 3), 南北向长度约 400 m, 东西向宽度约 150 m, 麻坑深度约 1 m, 属于大型麻坑[22]。

1.2 孔压静力触探测试

为了对比海底麻坑内外土体物理力学性质差异, 在麻坑内外不同位置分别布置了 4 个 CPTU 测试站位, 贯入深度 15 m, CPTU 站位分布图见图 3。

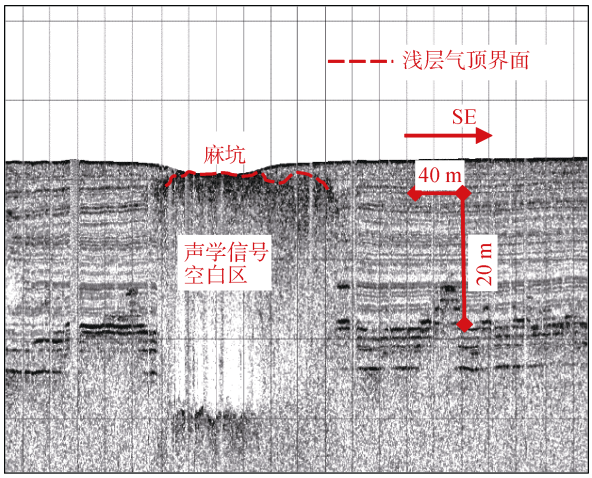


图 2 海底麻坑浅地层剖面图

Fig. 2 Sub-bottom profile of seabed pockmark

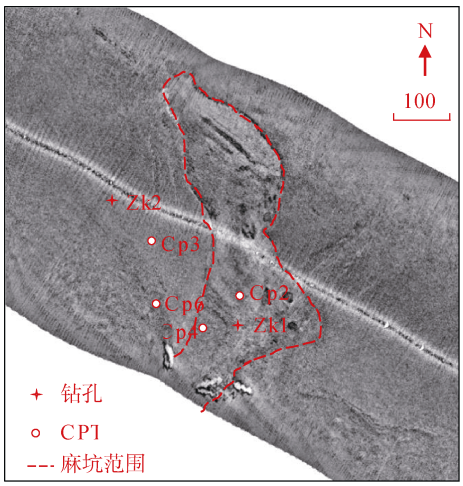


图 3 CPTU 及钻孔站位图

Fig. 3 Locations of CPTUs and drilling hole

1.3 钻孔及实验

为了进一步确定麻坑内外土体物理力学性质差异, 并与 CPTU 数据进行验证, 在麻坑内外设置两个钻孔, 分别为 Zk2(麻坑外)和 Zk1(麻坑内), 如图 3。

钻孔采用 XY-2 型液压岩心钻机配合 500 吨级锚固平台, 工艺采用上提活阀式单层双动岩心管内衬 PVC 管全深度取样, 每回次进尺控制在 2 m 左右, Zk1 孔位于麻坑南端中心, 完井深度 70 m, Zk2 孔位于 Zk1 孔西北向 300 m 处, 距离麻坑外缘约 150 m, 完井深度 50 m。由于 Zk2 孔的浅地层探测未发现浅层气的反射特征, 因此可以将其认为未受浅层气干扰的原始地层。

取回的钻孔柱状土样分段进行室内土工试验，海上钻探取样后，将钻孔柱状样密封运输至陆上室内实验室，以 3 m 为间隔分样，按《中华人民共和国行业标准：土工试验规程(SL237-1999)》分别测试土样抗剪强度、液塑限、含水率、密度、压缩系数等土体物理力学性质参数。

2 结果和讨论

2.1 CPTU 数据及分析

CPTU 的数据无法直接反映土体的物理力学特征，不过经过 30 多年的试验和应用，学者们建立了大量的两者之间的经验公式，使 CPTU 数据的 q_c 和 f_s 等参数与土体的物理力学性质参数产生了联系，因此根据这些经验公式来可以对土体的物理力学性质进行判断。

关于黏性土的不排水抗剪强度 C_u，探头在饱和黏性土中贯入时，土体处于不排水条件，C_u 可用下式估算[23]：

$$C_u = \frac{(q_c - \sigma_0)}{N_k}, \tag{1}$$

式中：q_c 表示锥头阻力；σ_0 表示原位总上覆应力；N_k 表示锥头系数(由经验取得)。

CPTU 测试结果见图 4，将所选的 4 个 CPTU 站位(CP2、CP4 位于麻坑内，CP3、CP6 位于麻坑外)的 q_c、f_s 曲线以及 C_u 进行对比，可以发现所有麻坑外站位的 q_c 均表现出随探入深度增加而增大的趋势，且近似呈线性增加，表明麻坑外站位的地层连续性较好，沉积过程稳定；麻坑内的站位 q_c 高于麻坑外的站位，这种现象可能是流体或气体释放后，土体孔隙度减小，密度增加形成的；f_s 曲线与 C_u 变化规律基本相同，麻坑内站位的侧摩阻力、不排水抗剪强度均高于麻坑外的站位；测得的土体孔隙水压力麻坑内外差异不明显。

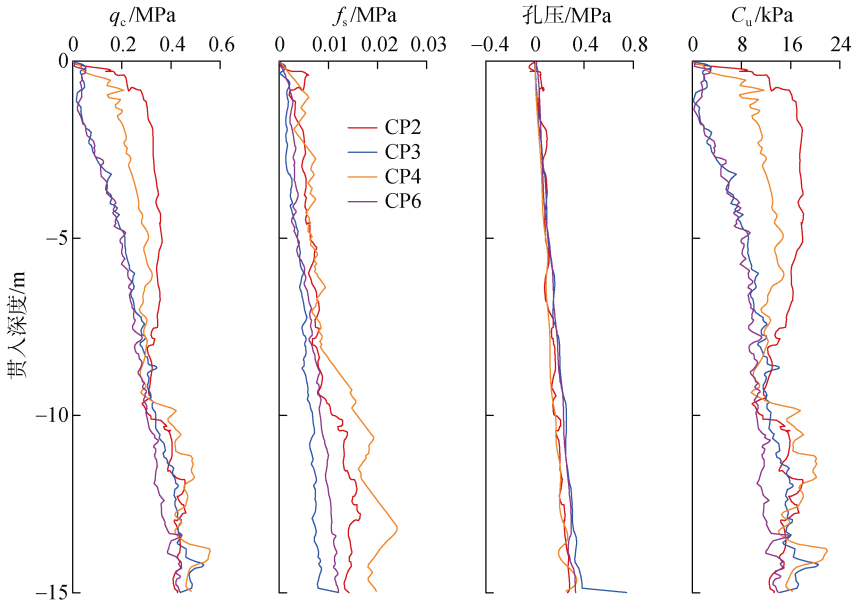


图 4 CPTU 测试结果

Fig. 4 Test results of CPTUs

关于黏性土的压缩模量 E_s，一般均表示为

$$E_s = aq_c, \tag{2}$$

式中：a 表示经验系数。

根据《工程地质手册》，地基土的承载力的确定可用经验公式：

$$f_0 = 112q_c + 5, \tag{3}$$

由此可知，f_0、E_s 两个参数均可由 q_c 推算，且与其呈一阶正相关，因此他们的变化态势与 q_c 相同，即 CPTU 数据反映出麻坑内 15 m 以内深度的土体承载力、压缩模量要高于麻坑外土体。

2.2 钻孔样实验结果

取样分析发现，研究区内海底面下 30 m 内的土样以黏土为主，将 Zk1、Zk2 钻孔的实验室土工测试结果进行对比，如图 5。

其中饱和度是根据土的三相比例换算公式得到的：

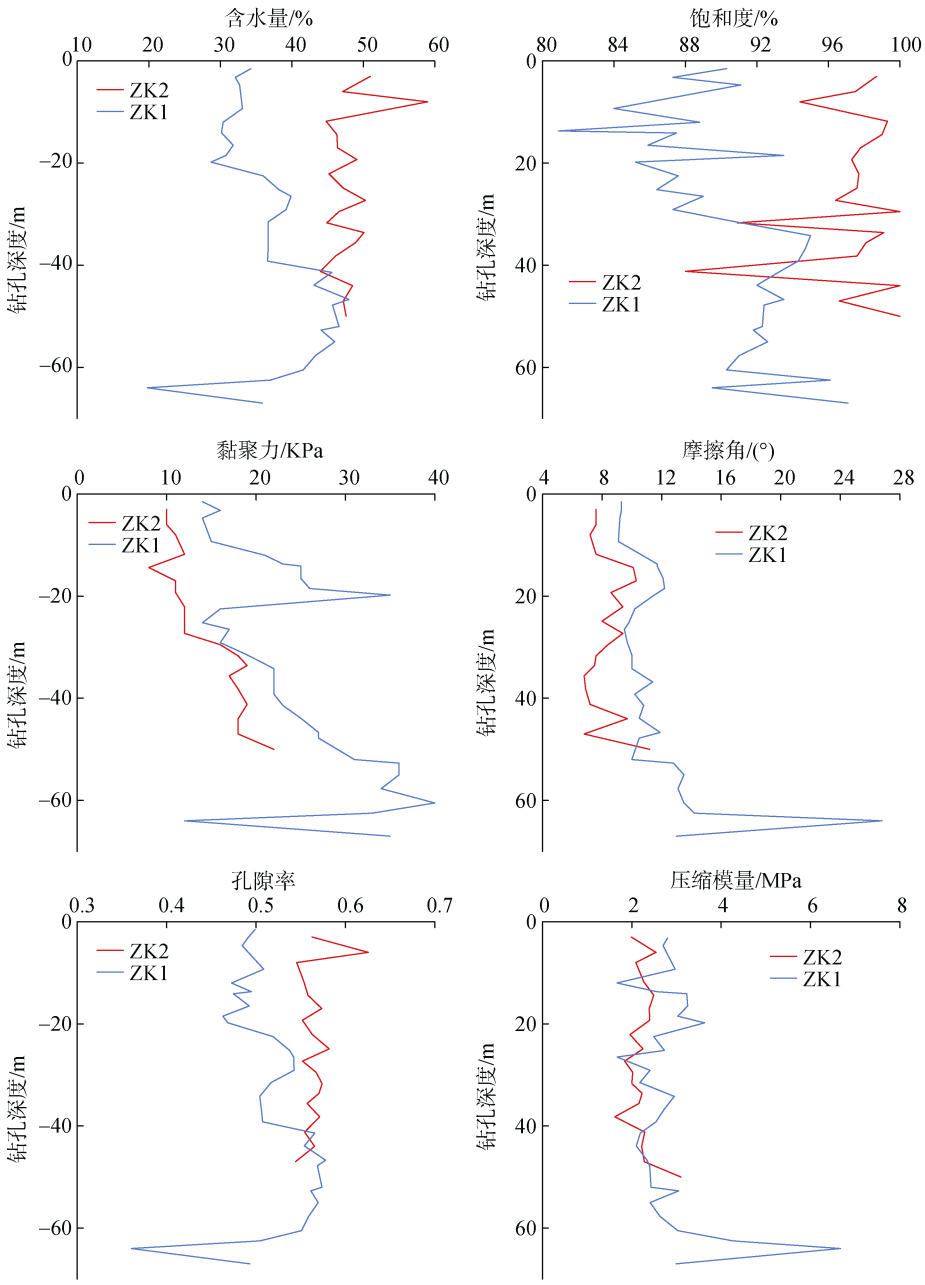


图 5　钻孔土工试验结果对比

Fig. 5　Geotechnical test results from the drill hole

$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s(1+\omega)}, \tag{4}$$

$$S_r = \frac{\omega G_s}{\varepsilon}, \tag{5}$$

式中：n 为孔隙率；ρ 为土的密度；ρ_s 为土粒比重，$\rho_s = G_s\rho_W^{4℃}$，$\rho_W^{4℃}$ 为 4℃时纯蒸馏水的密度；S_r 为土的饱和度。

对比两个钻孔土体的饱和度，麻坑外 Zk2 钻孔的土样饱和度多在 96%~100%之间，说明该孔的土体基本未受浅层气影响，保持未受扰动的原状态；麻坑内 Zk1 钻孔的土样在深度 30 m 以内饱和度多在 80%~90%，均为非饱和土，30 m 到 60 m 区间饱和度提升到 90%左右。对比 n 发现，在深度 40 m 以内麻坑外的 Zk2 钻孔的值明显大于麻坑内 Zk1 孔的值；结合饱和度和孔隙率的变化及对比，在钻孔 40 m 以内的深度，麻坑内土体较麻坑外稍显密实，同时 E_s 的对比也证明了这一点，在 40 m 以内 Zk1 孔的压缩模量明显大于 Zk2 孔。相同深度上 Zk1 孔黏聚力和

内摩擦角要大于 Zk2 孔，说明麻坑内土体的黏聚程度和摩擦强度均要强于麻坑外的土体。

值得注意的是，当钻孔深度达到 40 m 以后，两个钻孔几乎各项土样测试数据都有趋同的现象，这说明麻坑内外土性在 40 m 以深的范围接近相同，由此推测研究区麻坑浅层气对土性的影响主要是海底 40 m 以浅的土层。

2.3 麻坑内外土性差异分析

2.3.1 CPTU 及钻孔所反映的土性差异

对于 CPTU 数据主要参考 q_c、f_s 的差异和变化，从中可推断麻坑内外土体物理力学性质的差异，CPTU 测试数据反映出麻坑内的土体土性差异：麻坑内站位的原位测试结果 q_c 和 f_s 都大于麻坑外的站位；通过经验公式计算出的麻坑内土体的 f_0、E_s、C_u 都要高于麻坑外的土体。

钻孔实验参数所反映的土性差异与 CPTU 结果相同，在深度 40 m 以内，麻坑内土体的抗剪强度、压缩模量均要强于麻坑外的土体，而在饱和度、孔隙率、液塑性上要弱于麻坑外的土体，这说明相较于麻坑外的土体，麻坑内的土体具有高抗剪强度、更为压缩、不饱和、孔隙率低的特征，总的来看，麻坑内的土体强度要高于麻坑外的土体。

综合 CPTU 与钻孔实验结果，两者都反映出了麻坑内土体受浅层气溢出影响发生了承载力增加、抗剪强度增加、更为压缩的情况。这些变化主要发生在麻坑表层土体，随深度增加，麻坑内土体的物理力学性质与麻坑外相同深度土体特性逐渐趋同，但对比 CPTU 测试数据与钻孔实验数据发现两组记录数据发生趋同的深度不同，推测是与取样站位的位置有关，钻孔 ZK1 较麻坑内的 CPTU 站位更靠近麻坑中心，接近主要的浅层气溢出口，因此土体受浅层气溢出影响范围更大。

2.3.2 麻坑内外土性差异形成原因

从研究区的沉积地层结构及区位分析，该区的沉积环境稳定，沉积物特性横向变化不明显，因此位于麻坑内外土体的物理力学特性差异应该主要是由浅层气的存在造成的，前文已经说明，麻坑内土体为非饱和土，而麻坑外未受影响的土体为饱和土，两者的主要区别在于前者的孔隙中存在浅层气，包括游离气和溶解气，而后者的孔隙中基本不存在游离浅层气。

根据非饱和土的土力学原理，非饱和土结构复杂，其中固液气三相组成变化繁多，随着饱和度的改变，土体中的气相赋存形式也发生改变，这就会影响固液气三相的组合形式，使土体的物理力学性质发生变化。

海底麻坑是海底土层中浅层气溢出形成的，海底浅层沉积物中常含有丰富的有机质，这些有机质经过一系列复杂的生物化学作用，产生浅层气，少量的浅层气物质先以溶解状态赋存于孔隙水中，随着浓度的增大，逐渐从饱和溶液中析出，形成游离态的气体。如果游离态气体越来越多，产生的气体压力增大，会逐渐迁移和富集，在一定的条件下形成高压气囊，在压力达到上覆盖层承压极限时会突破盖层释放，导致储气土体的气压力快速下降，孔隙增大，而连续的海底流体流动会对浅层气喷逸土层产生强烈的渗流破坏，剧烈扰动储气土层和上覆沉积土层，带走大量的细土颗粒及水，引起流土及上覆盖层坍塌，期间土层的压缩性增大，抗剪强度指标明显降低，引起土固结沉降，产生较大的地表沉降。喷逸结束后，麻坑初步成型，麻坑内土体逐渐固结，土体孔隙减小、密度增加，重新固结的土体的强度将超过原始状态。需要注意的是，麻坑内浅层气的埋藏深度、气含量都是不确定的，常引起不均匀沉降，其破坏形式也不尽相同。

3 结论

本文分析了在研究区发现的大型麻坑内外布置的 4 个 CPTU 测试站位数据、2 个钻孔柱状样土工试验数据，对海底麻坑内外土体物理力学特性差异进行了研究，认为：

1) 麻坑内海底土体相较于麻坑外土体具有抗剪强度高、压缩模量大，饱和度、孔隙率和含水量低的特征。麻坑内土体工程地质特性好于麻坑外的土体。

2) CPTU 数据与钻孔实验数据均可体现出麻坑表层受浅层气溢出影响的土体特性的变化。相比于传统的钻孔实验，CPTU 数据具有快速、连续性、分辨率高的特点，因此更能细致的反映出这种变化。

3) 浅层气在海底土体中的赋存形态是造成土体工程地质特性差异的主要原因。

参考文献：

[1] 顾兆峰，张志珣，刘怀山. 南黄海西部地区浅层气地震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质，2006，26(3)：65-74.
Gu Zhaofeng, Zhang Zhixun, Liu Huaishan.Seismic features of shallow gas in the western area of the Yellow

sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 65-74.

[2] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
Chen Rongshu. Geology of Natural Gas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989.

[3] 叶银灿. 中国海洋灾害地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 298-305.
Ye Yincan. Marine Geo-Hazards in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 298-305.

[4] Judd A, Hovland M.Seabed Fluid Flow[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 163-165.

[5] 邸鹏飞, 黄华谷, 黄保家, 等. 莺歌海盆地海底麻坑的形成与泥底辟发育和流体活动的关系[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(5): 26-36.
Di Pengfei, Huang Huagu, Huang Baojia, et al.Seabed pockmark formation associated with mud diapir development and fluidactivities in the Yinggehai Basin of the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(5): 26-36.

[6] 宋海斌, 耿建华, Wang How-King, 等. 南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 687-695.
Song Haibin, Geng Jianhua, Wang How-King, et al. A preliminary study of gas hydrates in Dongsha region north of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 687-695.

[7] 叶银灿, 陈俊仁, 潘国富, 等. 海底浅层气的成因、赋存特征及其对工程的危害[J]. 东海海洋, 2003, 21(1): 27-36.
Ye Yincan, Chen Junren, Pan Guofu, et al. A study of formation cause, existing characteristics of the shallow gas and its danger to engineering[J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(1): 27-36.

[8] 陈培雄, 刘奎, 吕小飞, 等. 静力触探技术在东海陆架工程勘察中的应用研究[J]. 海洋学研究, 2011, 29(4): 71-76.
Chen Peixiong, Liu Kui, Lv Xiaofei, et al. Application of CPT in engineering survey of East China Sea continental shelf[J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(4): 71-76.

[9] 陆凤慈, 曲延大, 廖明辉. 海上静力触探(CPT)测试技术的发展现状和应用[J]. 海洋技术, 2004, 23(4): 32-36.
Lu Fengci, Qu Yanda, Liao Minghui. The development status and applications of in situ cone penetrati on test technology[J]. Ocean Technology, 2004, 23(4): 32-36.

[10] 王钟琦. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 17-52.
Wang Zhongqi. The China CPT and the prospect of penetration tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 17-52.

[11] 王钟琦. 再谈我国的静力触探及动静触探的发展前景: 兼答孟高头先生[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 384.
Wang Zhongqi. The China CPT and the prospect of penetration tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 384.

[12] De Ruiter J. The static cone penetration test state-of-the-art report. [C]//ISOPT-II. Proceeding of the 2nd European Symposium on Penetration Testing(2). Amsterdam: A. A.Balkema.1982: 389-405.

[13] Zuidberg, H M.Schaap, Beringen, F.L. A penetrometer for simultaneous measuring of cone resistance, sleeve friction and dynamic pore pressure[C]//ISOPT-II. Proceeding of the 2nd International Symposium on Penetration Testing(2). Amsterdam: A.A.Balkema.1982: 963-970.

[14] Lunne T. The Fourth James K. Mitchell Lecture: The CPT in offshore soil investigations - a historic perspective[J]. Geomechanics & Geoengineering, 2012, 7(2): 75-101.

[15] 郭爱国, 孔令伟, 陈建斌, 等. 孔压静力触探用于含浅层生物气砂土工程特性的试验研究[J] 岩土力学, 2007, 28(8): 1539-1543.
Guo Aiguo, Kong Lingwei, Chen Jianbin, et al. On engineering characteristics of sallow biogenetic gassy sand by piezocone test[J]. Rock and Soll Mechanics, 2007, 28(8): 1539-1543.

[16] 梁文成, 林吉兆, 杜宇. 海床式静力触探设备在海上工程勘察中的应用[J]. 水运工程, 2013(7): 19-21.
Liang Wencheng, Lin Jizhao, Du Yu. Application of seabed CPTU equipment in offshore investigation[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(7): 19-21.

[17] 陈磊. 基于 CPTU 技术海上某井位的地质分层[J]. 中国高新技术企业, 2014(25): 30-31.
Chen Lei. Geological stratification of a well location at sea based on CPTU technology[J]. China High- Tech Enterprises, 2014(25): 30-31.

[18] 彭鹏, 蔡国军, 刘松玉, 等. 基于 CPTU 的三亚新机场海洋软土工程特性评价[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(z2): 140-144.
Peng Peng, Cai Guojun, Liu Songyu, et al. Evaluation of soft soil engineering characteristics of Sanya New Airport from CPTU data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(z2): 140-144.

[19] 王雷, 李晓丽, 徐哲永. 近 50 年影响舟山的台风气候特征分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(5): 36-43.
Wang Lei, Li Xiaoli, Xu Zheyong. Analysis on climatic characteristics of typhoon over the past 50 years at Zhoushan[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(5): 36-43.

[20] 高金耀, 李家彪, 金翔龙, 等. 中国近海地球物理和

地质构造基本特征[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理2013: 第二十八分会场论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2013: 1242-1244.
Gao Jinyao, Li Jiabiao, Jin Xianglong, et al. Basic Characteristics of Geophysics and Geotectonics in China Offshore[C]//Chinese Geophysical Society. Geophysics of China 2013: Collected Papers of Chapter 28. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2013: 1242- 1244.

[21] Hornafius J S, Quigley D, Luyendyk B P. The world's most spectacular marine hydrocarbon seeps (Coal Oil Point, Santa Barbara Channel, California): Quantification of emission[J]. Journal of Geophysical Reaearch, 1999, 104: 20703-20711.

[22] 何生, 叶加仁, 徐思煌, 等. 石油及天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010: 7, 43, 175-182, 205-227.
He Sheng, Ye Jiaren, Xu Sihuang, et al. Geology of Oil and Gas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010: 7, 43, 175-182, 205-227.

[23] Campanella R G, Gillespie D, Robertson P K. Pore pressure during cone penetration testing[C]// ESOPT-II. Proceeding of the 2nd European Symposium on Penetration Testing(2). Amsterdam: A.A.Balkema. 1982: 507-512.

Study on the differences in physical and mechanical properties of soil inside and outside a seabed pockmark

HE Xu-tao[1], ZHANG Xiu-feng[1], SHU Qi[1], LI Shi-qiang[1], SONG Sheng[2], PENG Wei-long[1]

(1. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 316021, China; 2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Hangzhou 310012, China)

Received: Apr. 15, 2019
Key words: pore pressure cone penetration (CPTU); seabed pockmark; soil mechanics

Abstract: To analyze the differences in the physical and mechanical properties of soil inside and outside a pockmark, a 15-m pore pressure cone penetration test at four stations and the borehole column geotechnical test at two stations were conducted. The results showed that the soil phase in the pockmark had a higher shear strength, higher compressive modulus, lower saturation, porosity, and lower water content than those outside the pockmark. The occurrence of shallow gas in the subsea soil was the main reason for this difference.

(本文编辑: 刘珊珊)