

DOI: 10.11779/CJGE2017S1030

T型全流触探仪机理分析及海洋工程应用综述

彭 鹏^{1, 2}, 蔡国军^{1, 2}, 刘松玉^{*1, 2}, 杨 岩^{1, 2}

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 随着近年来中国海洋开发的不断深入发展, 海洋工程设计时对于海洋土承载能力及循环荷载效应的勘测提出了更高的要求。由于从深水地区回收土样进行室内试验的难度和成本过高, 海洋岩土工程设计参数的确定往往依赖于现场原位测试技术。回顾了海洋静力触探技术的发展历程, 介绍了一种适用于海相软土的全流触探仪。总结了国内外学者对全流触探仪的理论及试验研究, 包括贯入阻力与软土不排水抗剪强度之间的关系、循环贯入试验对重塑土特性的评价以及通过数值模拟得出T型全流触探仪的阻力系数等。最后, 对全流触探仪发展提出了展望。

关键词: 海洋工程; T型全流触探仪; 原位测试; 阻力系数

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0151-06

作者简介: 彭 鹏(1993-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事海洋静力触探方面的研究工作。E-mail: 2423542745@qq.com。

Review of T-bar full-flow penetration testing in offshore engineering

PENG Peng^{1, 2}, CAI Guo-jun^{1, 2}, LIU Song-yu^{1, 2}, YANG Yan^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety (Southeast University), Nanjing, 210096, China)

Abstract: With the further development of marine exploration in China in recent years, higher requirements are put forward for the capacity of the soil and cyclic loading effect for the offshore engineering. Due to the difficulty and high cost of laboratory tests which the samples are collected from the deep water, marine geotechnical engineering often relies on the in-situ testing technology. The development of offshore CPT technology is reviewed, and a kind of full-flow penetrometer is introduced for marine soft soil. The theoretical and experimental researches on the full-flow penetrometers of domestic and foreign scholars are summarized, including the relationship between penetration resistance and soft soil undrained shear, evaluation of the characteristics of remolded soil from cyclic penetration tests and numerical simulations of resistance coefficient of T-bar full-flow penetrometers. Finally, some suggestions are put forward for the development of full-flow penetrometers.

Key words: offshore engineering; T-bar full-flow penetrometer; in-situ testing; resistance factor

0 引言

随着近年来海洋工程开发的不断发展, 海洋工程逐渐由近海、浅海向远海、深海转变, 于此同时海洋工程的规模也不断增大。这对海洋工程设计时土的承载能力, 特别是循环荷载效应影响的勘测提出了更高的要求^[1]。通常, 深海沉积的软土有着抗剪强度低、灵敏度高、表面强度低(<20 kPa)和抗剪强度随着深度的增加而增加($1\sim2$ kPa/m)的特点^[2], 这使得取得低扰动海底土样的难度和成本非常高。这些因素使得设计参数的确定越来越多地依赖于现场原位测试, 海洋工程勘测往往采用孔压静力触探测试(CPTU)。

随着海洋工程对勘测要求的提高, CPTU设备也不断发展改进, 逐渐向远海深海作业发展。CPTU技术具有快速、经济、可靠的特点。既可用于准确划分

土层、进行土类判别, 又可用于估算土的不排水抗剪强度、超固结比、灵敏度、土的压缩模量、不排水杨氏模量、初始剪切模量、固结系数、渗透系数等特性, 广泛适用于软土工程^[3]。海洋CPTU技术在国外已经得到了广泛的应用, 具有大量试验资料并总结出了可靠经验公式, Randolph在1996年根据传统锥形探头在海底软土中所测数据精度随海水深度的增加而降低的问题, 提出了一种基于full-flow理论的全流触探仪。而国内海洋工程对于海洋CPTU技术的应用较少, 缺

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(201353); 江苏省杰出青年基金项目(BK20140027); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0118); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才计划项目(2015-ZBZZ-001)

收稿日期: 2016-11-28

*通讯作者(E-mail: liusy@seu.edu.cn)

少关于海洋 CPTU 技术应用机理的研究^[4]。因此,了解国外海洋 CPTU 设备的机理研究与工程应用的发展现状,对中国海洋工程领域中 CPTU 技术的发展应用有着举足轻重的作用。

1 海洋静力触探

1.1 发展历史

用于水上的静力触探装置最早出现于上世纪 60 年代。到现在已经发展出小型自升式平台、套管式平台、海床式、井下静力触探式和潜水舱式等多种海洋静力触探设备。荷兰在海洋静力触探装置领域发展最早,使用最广。国外海洋静力触探装置发展历史如表 1 所示。

表 1 国际先进的深海静力触探系统^[5]

Table 1 Advanced deepwater CPT systems in the world^[5]

生产公司	触探类型	设备型号	最大工作水深/m
荷兰 a.p.v.d Berg 公司	Downhole CPT	Wilson-APB 井下深海静力触探系统	3000
荷兰 a.p.v.d Berg 公司	Seabed CPT	Roson 海床深海静力触探系统	4000
荷兰 Geomil 公司	Seabed CPT	MANTA 系列海床静力触探系统	2000
英国 Datem 公司	Seabed CPT	Neptune 5000 型标准海洋 CPT	3000
荷兰辉固公司	Seabed CPT	SEACALF 海床式 CPT 系统	4000

相较于国外海上静力触探技术的研究与发展现状,国内研制的设备工作水深较浅,触探深度较小,且在实际工程中应用较少,理论研究缺乏足够试验数据资料。目前国内海上工程勘测应用的静力触探设备仍主要依靠由国外引进。

1.2 全流触探仪

传统海洋原位测试技术包括十字板剪切试验及 CPTU 测试。十字板剪切试验在海洋软土中会造成较大扰动从而影响测试的可靠性。而大量海上静力触探试验数据表明,在海相软土 CPTU 测试中所得数据的精度存在随海水深度的增加而降低的状况。造成这种情况的主要原因有:①测试贯入时由于软土强度低,相比于海底高压力环境,贯入阻力的增量过低导致测量精度下降;②由于不等面积效应修正的不确定性及上覆土层压力对贯入阻力的影响^[2]。Randolph 等通过增加触探仪投影面积,并基于 full-flow 理论提出一种新型的全流触探仪以解决上述问题。

全流触探仪如图 1 所示,主要包括 T 型、球型与

碟型触探仪^[6-8],目前已在许多国家与地区的海洋勘测中得到应用。在国际上,全流触探仪的试验数据解释及理论研究仍处于新兴领域。

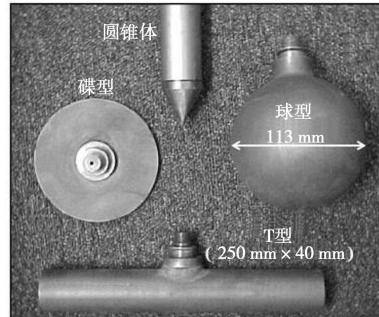


图 1 T 型、球型与碟型全流触探仪^[1]

Fig. 1 T-bar, ball and plate full-flow penetrometers^[1]

目前,国际通用的标准为挪威的 NORSOK G-001 (Standards Norway 2004) 规范。标准规定 T 型触探仪为钢制,直径 40 mm,长 250 mm,投影面积 10000 mm²(10 倍于标准锥形触探仪尺寸)。连接杆横截面积应不超过 T 型触探仪投影面积的 15%,直径不大于 T 型触探仪的直径,T 型触探仪表面轻度喷砂处理。

2 T 型全流触探仪的机理研究

T 型全流触探仪测量海底软土的原状与重塑不排水抗剪强度具有可靠性。Yafrate 等^[9]的试验研究指出全流触探仪可预测重塑土 S_u 和灵敏度 (S_t)。Randolph 于 1996 年提出了适用于海底软土的 T 型全流触探仪,并指出其可用于软土不排水抗剪强度测试^[5]。Low 等^[10]对澳大利亚地区软土的不排水抗剪强度试验测试结果进行了分析与理论解释。Randolph 等^[11]分析指出造成 $N_{T\text{-bar}}$ 的理论解与试验解之间发生差异的影响因素主要有灵敏度、应变软化和应变速率等。

2.1 理论研究

T 形触探仪的阻力系数($N_{T\text{-bar}}$),可利用全流理论塑性理论解通过测试所得修正后的贯入阻力($q_{T\text{-bar}}$)估算 S_u :

$$S_u = \frac{q_{T\text{-bar}}}{N_{T\text{-bar}}} \quad (1)$$

贯入阻力的孔压及上覆土重的修正公式为

$$q_{T\text{-bar}} = q_m - \frac{[\sigma_{v0} - u_0(1-\alpha)]A_s}{A_p} \quad (2)$$

式中, q_m 为实测锥尖阻力, u_0 为静孔隙水压力, α 为静面积比, A_s 为连接轴截面积, A_p 为触探仪水平轴向的投影面积。

Randolph 等^[11]最初基于塑性理论对 $N_{T\text{-bar}}$ 进行研究^[11-12],得出关于触探仪表面摩擦系数 α 的上限解及其线性拟合:

$$N_{T\text{-bar-ideal}} \sim 9.14 + 4.14\alpha - 1.34\alpha^2, \quad (3)$$

$$N_{T\text{-bar-ideal}} \sim 9 + 3\alpha. \quad (4)$$

该方法所得 $N_{T\text{-bar}}$ 的范围为 9.14 ($\alpha = 0$) ~ 11.86 ($\alpha = 1$), 建议触探仪表面轻度喷砂处理, α 为 0.4 , Low 给出 $N_{T\text{-bar}}$ 的建议值 10.5 。

2.2 数值模拟

Zhou 等^[13]认为贯入时软土会产生相对较高的应变率, 且软土流经 T 型触探仪表面时发生应变软化。因此全流触探仪在实际应用时应当考虑应变率相关性及应变软化两者对贯入阻力系数的影响, 进行相关的贯入阻力系数修正。

Einav 等^[14]结合塑性理论上限解与应变路径法 (UBSPM) 采用全流机理, 考虑应变软化得出阻力系数与剪切应变率 γ 和总的塑性剪切应变值 ξ 相关联:

$$N_u = N_{u,\text{ref}} \left[1 + \mu \lg \left(\frac{\gamma}{\gamma_{\text{ref}}} \right) \right], \quad (5)$$

式中, $N_{u,\text{ref}}$ 为应变速率 $\gamma_{\text{ref}} = 1\text{/hour}$ 时的阻力系数值。破坏系数 δ 可描述软土逐渐软化过程中的抗剪强度值与理想状态强度关系:

$$\delta(\xi) = \frac{S_{\text{us}}}{S_{u\text{-ideal}}} = \delta_{\text{rem}} + (1 - \delta_{\text{rem}}) e^{-3\xi/\zeta_{95}}, \quad (6)$$

式中, δ_{rem} 为完全重塑时所对应软土的破坏系数值, 是完全重塑土抗剪强度与去原状土抗剪强度比值, 与灵敏度 S_t 互为倒数; ζ_{95} 为破坏达到 95% 时重塑土对应的累计塑性剪应变。 $N_{T\text{-bar}} = \delta(\xi)N_{T\text{-bar-ideal}}$ 。

Zhou 等^[13]给出基于 LDPE 方法结合应变软化与应变速率相关性影响 (图 2), 得到的贯入系数的修正公式为

$$N_{T\text{-bar}} \approx (1 + 4.8\mu)(\delta_{\text{rem}} + (1 - \delta_{\text{rem}}) e^{-1.5\xi_{T\text{-bar}}/\zeta_{95}})N_{T\text{-bar-ideal}}, \quad (7)$$

式中, μ 为应变速率增大十倍相应的强度增加率。

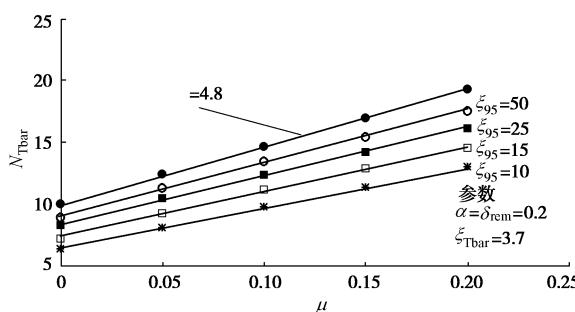


图 2 T 型触探仪结合应变速率相关性与应变软化影响的阻力系数 $N_{T\text{-bar}}$ 值^[11]

Fig. 2 Values of T-bar resistance factor after allowing for rate effects and strain softening^[11]

Zhou 等使用大变形有限元分析软件对 T 型触探仪的贯入机制进行了分析^[13], 如图 3 所示。分析了应变

软化对 T 型触探仪阻力系数的影响。

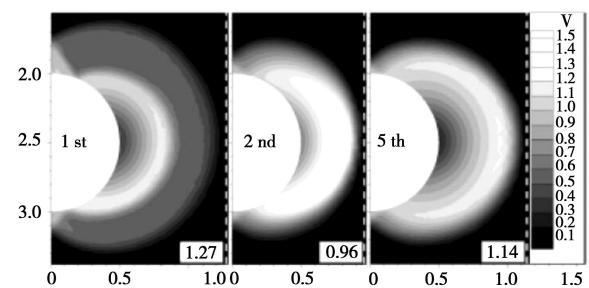


图 3 循环贯入次数对应变分布变化影响^[14]

Fig. 3 Evolution of cycle times of penetration in contours of incremental displacements^[14]

2.3 试验研究

对于 T 型触探仪在软土工程中的应用, Chung 等^[15]的离心模型试验以及 Weemees 等^[16]和 Yafrate 等^[17]的现场试验结果表明 T 型触探仪的长径比为 4~10 时对贯入阻力值没有影响, 因此 T 型触探仪的长径比一般不应小于 4。

Einav 等^[18]采用循环贯入测试方法, 得到 T 型触探仪循环贯入试验数据曲线如图 4。

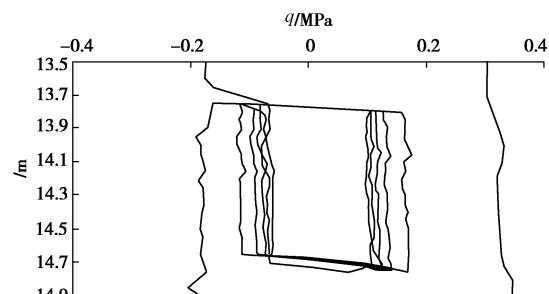


图 4 T 型触探仪循环贯入试验数据

Fig. 4 Cyclic T-bar tests

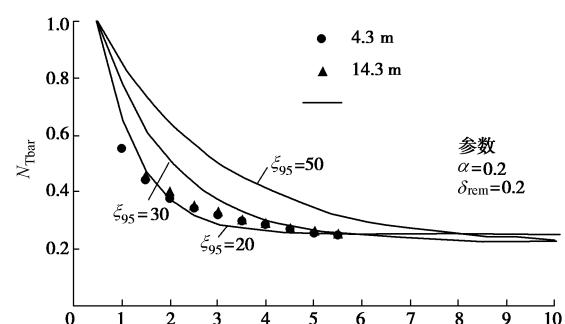


图 5 T 型循环贯入试验归一化贯入阻力

Fig. 5 Calibration of degradation model from cyclic T-bar tests

对计算曲线和实测数据进行对比分析, 并在此基础上利用参数 δ_{rem} 和 ξ_{95} 进行标定。在一个贯提循环后, 软土不排水抗剪强度产生约 10% 的下降, 一般经

过 5~10 个循环过程后软土达到完全重塑状态, 不排水抗剪强度稳定, 循环测试记录如图 5 所示。在推导循环阻力的过程中, 每个循环贯入阻力由初始阻力进行归一化修正。

循环测试的结果可用于评估在初始贯入过程中土体软化的程度, 从而得到恰当的阻力系数用于估计真实的抗剪强度峰值。

Chung 等^[19]研究排水和不排水两种加载路径下的抗剪强度, 联系贯入速率指出贯入速率影响剪切变形时的排水条件很大程度上影响贯入试验数据。House 等^[20]及 Randolph 等^[21]通过变速贯入试验研究二者之间的具体关系如图 6 所示。试验以不连续对数递减的贯入速率进行, 初始速率为 20 mm/s。

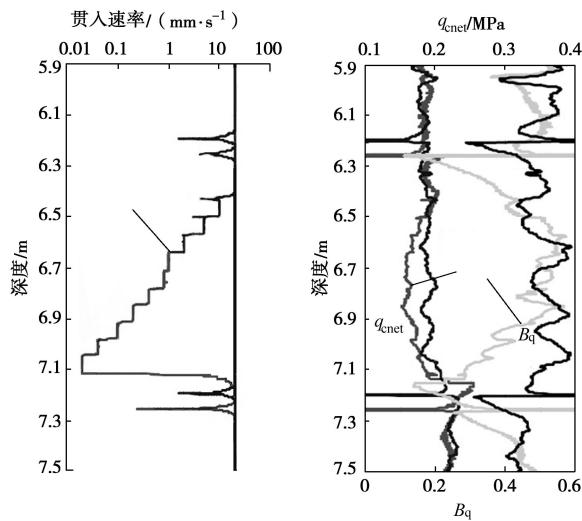


图 6 标准与变速率圆锥贯入试验 (Randolph 等^[21])

Fig. 6 Standards and "twitch" cone tests^[21]

贯入试验开始时软土处于不排水条件状态, 随着贯入速率的下降, 贯入阻力先因粘性效应的降低而减小, 后随着固结效应显著增大, 直至土体达到完全固结的状态。在此过程中, 贯入速率的变化范围在 2~3 个数量级之间。数据基本满足

$$\frac{q}{q_{\text{ref}}} = \left(a + \frac{b}{1 + cV^d} \right) \left\{ 1 + \frac{\mu}{\ln(10)} \sinh^{-1}(V/V_0) \right\}, \quad (8)$$

其中的归一化贯入速率 V 定义如下:

$$V = \frac{vd}{c_v} \frac{s_{\text{u-cyc}}}{s_{\text{u-mono}}}, \quad (9)$$

式中, v 和 d 为触探仪的贯入速率和直径, c_v 为土体的竖向固结系数。

House 提出可以通过归一化变速贯入试验推导出土体的固结系数^[20]。且归一化贯入速率达到的终值 (2~4) 所需时间为传统静力触探孔压消散试验时间的 50%, 采用此方法可有效降低消散试验测试时间。

3 海洋工程应用

近年来海洋工程开发不断深入发展, 对岩土勘察提出了更高的要求, 评估海洋沉积物的工程力学性能成为海洋工程发展的一大挑战。全流触探仪原位触探测试技术可以有效地提供海洋岩土工程设计参数。

近海静力触探测试, 通常包括井下系统 (以钻柱为基础) 和海床系统 (以位于海床的框架为基础), 如图 7 所示。对于深水区域, 测试通常以海床系统为主。

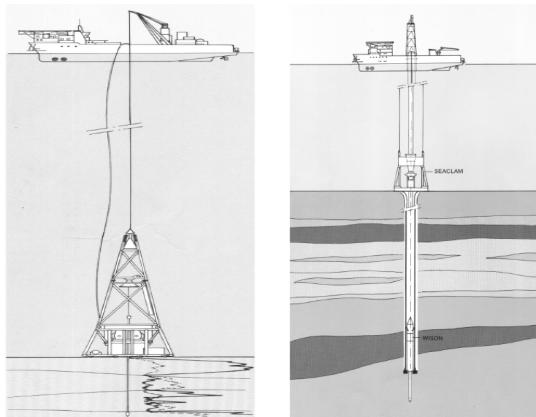


图 7 井下钻孔测试系统与海床测试系统^[22]

Fig. 7 Down-hole and seabase test systems^[22]

近海岩土工程设计不断提出更高的挑战, 如海底电缆、管道的铺设, 大型海洋工程基础, 加深拓宽航道等, 这对不同气候及海浪变化的情况下海床及海底边坡稳定性提出了更高的要求^[23]。全流触探仪在不排水抗剪强度测量方面较传统的锥形静力触探能够提供更加精确可靠的强度设计指标。同时可用于测试对于超固结比、灵敏度、压缩模量、初始剪切模量等。测试可以用于工程地质评价如地基承载力评价、单桩承载力评价等。循环测试结果能够得到大量连续的测试结果, 可有效评价软土动荷载影响下的物理力学性能。但值得注意的是全流触探仪对土分层时的参数变化不敏感, 不适合用于精确的土层划分。

4 结 论

(1) 本文总结了海洋静力触探技术的发展历程, 介绍了一种基于 full-flow 理论的 T 型全流触探仪及其贯入机理相关研究。利用触探仪穿过软土时产生类流体围绕触探仪流动获得超软土的不排水抗剪强度, 并减小上覆土层修正的影响。

(2) 随着工程规模的扩大, 测试精度要求的提高, 静力触探测试技术不断进步。T 型全流触探仪具有低成本、高效率、高精度的特点, 在海洋工程勘察中得到了广泛应用。更多新型传感器的使用有针对性地拓宽了静力触探测试的测试功能及精度。

(3) 全流触探仪的研究工作总体处于起步阶段。需要进行大量测试数据来验证和校核结合应变速率相关性、应变软化影响下贯入系数理论解的问题。目前国内海上工程勘测应用的静力触探设备主要依靠国外引进, 我国迫切需要设计研发出广泛适用于本国海底软土环境的测试设备。

参考文献:

- [1] RANDOLPH M F, CASSIDY M, GOURVENEC S, et al. Challenges of Offshore Geotechnical Engineering[C]// The 16th international conference of soil mechanics and geotechnology engineering. Osaka, London: Taylor & Francis, 2005: 123 - 176.
- [2] LUNNE T, ANDERSEN K H, ENG LOW H. Guidelines for offshore in situ testing and interpretation in deepwater soft clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(4): 543 - 556.
- [3] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能CPTU技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan. The theory and engineering application of modern multi function CPTU[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] CAI G J, LIU S Y, ANAND J P. Comparative performance of the international piezocone and China CPT in Jiangsu Quaternary clays of China[J]. Transportation Geotechnics, 2015, **3**: 1 - 14.
- [6] RANDOLPH M F, HEFER P A, GEISE J M, et al. Improved seabed strength profiling using T-bar penetrometer[C]// International Conference on Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour –“New Frontiers”, London. London: Society for Underwater Technology, 1998: 221 - 235.
- [7] KELLEHER P J, RANDOLPH M F. Seabed geotechnical characterisation with the portable remotely operated drill [C]// International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia. London: Taylor & Francis, 2005: 365 - 371.
- [8] PEUCHEN J, ADRICHEM J, HEFER P A. Practice notes on push-in penetrometers for offshore geotechnical investigation[C]// International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia. London: Taylor & Francis, 2005: 973 - 979.
- [9] YAFRATE N, DEJONG J, DEGROOT D. 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.
- [10] 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, 2014, **136**(11): 1565 - 1573.
- [11] RANDOLPH M F. Analytical contributions to offshore geotechnical engineering[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris. London: Taylor & Francis, 2013: 85 - 105.
- [12] MARTIN C M, RANDOLPH M F. Upper bound analysis of lateral pile capacity in cohesive soil[J]. Géotechnique, 2015, **56**(2): 141 - 145.
- [13] ZHOU H, RANDOLPH M F. Resistance of full-flow penetrometers in rate-dependent and strain-softening clay[J]. Géotechnique, 2009, **59**(2): 79-86.
- [14] ZHOU H, RANDOLPH M F. Numerical investigations into cycling of full-flow penetrometers in soft clay[J]. Géotechnique, 2009, **59**(10): 801-812.
- [15] CHUNG S F, RANDOLPH, M F. Penetration resistance in soft clay for different shaped penetrometers[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterisation, Porto, Portugal. Rotterdam: Millpress, 2004: 671 - 678.
- [16] YAFRATE N J, DEJONG J T. Interpretation of sensitivity and remolded undrained shear strength with full flow penetrometers[C]// Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, Calif. Cupertino: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006: 572 - 577.
- [17] YAFRATE N J, DEJONG J T, DEGROOT D J. The influence of full-flow penetrometer area ratio on penetration resistance and undrained and remoulded shear strength[C]// Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference, London. Society for Underwater Technology, 2007: 461 - 468.

(下转 58 页)