

DOI: 10.11779/CJGE2015S1039

# 静力触探测试技术在海洋工程中的应用

郭绍曾, 刘 润

(天津大学水利安全与仿真国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 随着海洋开发向深海发展, 静力触探技术(CPT)在国内外海洋工程领域的使用越来越普遍, 在海洋工程地质调查中起到越来越重要的作用。总结了静力触探技术的发展历程, 详细介绍了其在海洋工程中的应用和发展, 特别是介绍了一种适用于深海土体的全流动触探贯入仪。与传统的强度测试方法相比, 全流动贯入仪在测试软土的不排水抗剪强度时可忽略覆土压力及孔隙压力的影响; 探头的投影面积较大, 可以得到更为精确的不排水抗剪强度值; 贯入阻力与软土强度之间的关系具有比较严格的理论解; 循环贯入试验可评价重塑土的特性及相关指标等等。笔者也应用 CEL 法开展了全流动贯入仪的数值模拟研究, 发现 T-bar 贯入过程中土体的破坏模式与理论假设有较大差异, Ball 则与理论假设差异较小; 数值模拟得出的 T-bar 与 Ball 的承载力系数较 Randolph 的建议值偏小。

**关键词:** 深海; 静力触探; 全流动贯入仪; 承载力系数

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S1-0207-05

作者简介: 郭绍曾(1988-), 男, 博士, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: nicefish110@aliyun.com。

## Application of cone penetration test in offshore engineering

GUO Shao-zeng, LIU Run

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The cone penetration test, which is more and more important in geotechnical investigation, has been widely used in the offshore engineering at home and abroad as the deep sea is gradually developed. The history of the cone penetration test is summarized, especially in the offshore engineering. And the full-flow penetrometer is introduced, which is fairly suitable for geotechnical investigation in deep see. Compared with the conventional techniques, the full-flow penetrometer can ignore the soil weight and pore pressure in the test. A large projection area of the probe will get more accurate results. A strict theoretical solution is worked out about the relation between the penetration resistance and the undrained shear strength of soft clay. The cyclic penetration test can evaluate the remoulded shear strength and the sensitivity of soil. A numerical analysis by applying the CEL method is conducted for the penetration process of the full-flow penetrometer. The simulated results show that the flow mode of soil is quite different with that of the theoretical assumption as the T-bar penetrates but it is similar when the Ball penetrates. The bearing capacity factor calculated by the numerical results is smaller than that suggested by Randolph, both T-bar and Ball.

**Key words:** deep sea; CPT; full-flow penetrometer; bearing capacity factor

## 0 引言

随着 CPT 设备的不断改进和发展, 用于水上作业的静力触探设备不仅可在浅水作业, 同时也可在深水作业。CPT 数据不仅可用于土层划分、土类判分, 并可用于估算黏性土的不排水抗剪强度、超固结比、灵敏度, 砂土的相对密实度、内摩擦角、土的压缩模量、变形模量、饱和黏土不排水模量、砂土初始线弹性模量和初始切线剪切模量、地基承载力、单桩承载力以及砂土液化判别等<sup>[1]</sup>。

由于海洋工程地质的特殊性, 尤其是在深海中, 现场取样并保持原状土的应力状态十分困难, 所以海

上静力触探技术越来越多地应用到海洋工程地质勘查中, 在国外已得到广泛的应用, 积累了大量的实测资料和经验公式, 而在国内的应用则比较少<sup>[2]</sup>。因此, 了解国外海上 CPT 设备和应用情况, 探讨 CPT 技术在应用和解释中的问题, 对 CPT 技术在中国海洋工程领域的应用具有重要意义。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB046800); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51322904); 天津市自然科学基金面上项目(12JCYBJC4700)

收稿日期: 2015-03-26

## 1 静力触探测试技术发展历程

1965 年, 荷兰辉固公司联合荷兰国家研究中心( TNO )研制推出了一种电测试探头, 该探头的规格也是国际土力学与基础工程学会确立国际基准测试程序标准。1974 年, 由挪威土工研究所的 Janbu 和 Senneset 提出通过传统的电测式静力触探方式量测孔压。1975 年, 瑞典的 Torstensson 和美国的 Wissa 各自独立的研制了在触探过程中可专门量测孔隙水压力的探头<sup>[2]</sup>。1964 年, 王钟琦等<sup>[3]</sup>独立成功地研制出中国第一台电测式触探仪。中国在 1985 年开始引进孔压静探仪, 南京水利科学研究院、同济大学、中国地质大学、铁道科学研究院、铁道第四勘测设计院等单位都做出了较大的贡献, 蔡国军等<sup>[4-5]</sup>提出了适用于中国规范的 CPTU 解释方法, 为 CPTU 在中国的推广应用起到了重要作用。

## 2 深海静力触探

1966 年, 荷兰 Fugro 公司研制了名为“Seaball” 的海床式触探机以及名为“Wison” 型的绳索式井下静力触探。1972—1974 年, 荷兰 Fugro 公司又在“Seaball”的基础上增加了可以提供支承反力的海底盘, 改制成为“Seacalf”的海床式触探机(工作水深可达 300m, 触探深度 20~40 m), 同时对“Wison” I 型绳索式井中静力触探进行改进, 研制成为“Wison” MK 型绳索式井中静力触探设备(工作水深及触探深度总计 400 m)。

2003 年, 中国船舶工业勘察设计院结合 MJ-II 型顶压式静探机和静探平台研制出水域静力触探平台。2005 年, 吉林大学工程技术研究所开发出“浅海域海底静力触探测试系统”, 采用柔性卷绕探杆连续贯入方式, 最大工作水深 55 m, 最大测试深度 15 m。2001—2005 年, 广州海洋地质调查局主持的国家 863 项目“海底土体原位静动态探测技术”, 研制出了以管内液压推进系统为关键技术的海洋静力触探设备, 工作水深可达 100 m, 触探深度可达 120 m。

目前国际上较为知名的深海海床式 CPT 系统主要有: 荷兰范登堡公司开发的 ROSON 系列海床式 CPT 系统, 最大工作水深 4000 m; Geomil 公司开发的 MANTA 系列海床静力触探系统, 最大工作水深 2000 m; Datem 公司开发的 Neptune 5000 型标准海洋 CPT, 最大工作水深 3000 m; 以及荷兰辉固公司开发的 SEACALF 海床式 CPT 系统, 最大工作水深 4000 m。如图 1 所示。

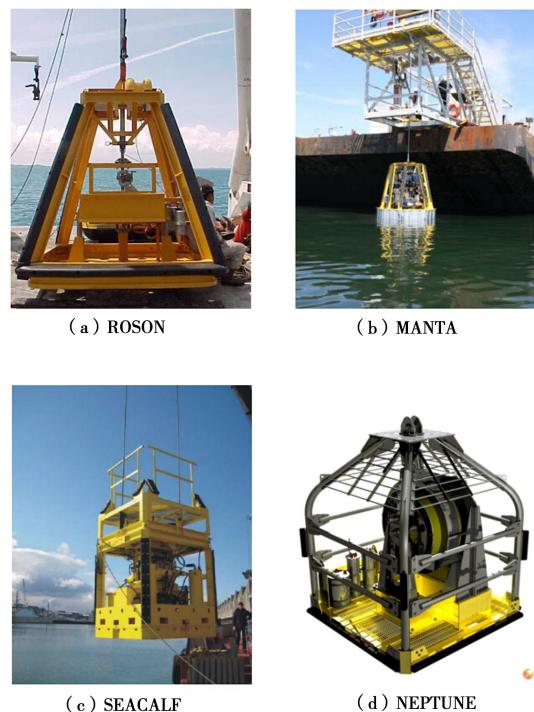


图 1 国际知名的海床 CPT 系统

Fig. 1 Well-known seabed CPT system in the world

## 3 适用于深海的全流动触探贯入仪

### 3.1 概述

随着海洋工程的发展, 迫切需要更精密的测试元件可靠地测量海底软土的不排水抗剪强度。国际上开发了一种新型的全流动贯入仪, 与传统的强度测试方法相比, 全流动贯入仪测试软土的不排水抗剪强度有如下优点: 投影面积较大, 可以得到更为精确的不排水抗剪强度值, 这一点在海洋软土中尤为明显; 贯入阻力与软土强度之间的关系具有比较严格的理论解; 循环贯入试验可评价重塑土的特性及相关指标等。全流动贯入仪作为一种新型的强度测试元件, 在国外海洋软土的原位测试和离心模型试验中具有广泛的应用。图 2 为全流动贯入仪与圆锥贯入仪对比图。

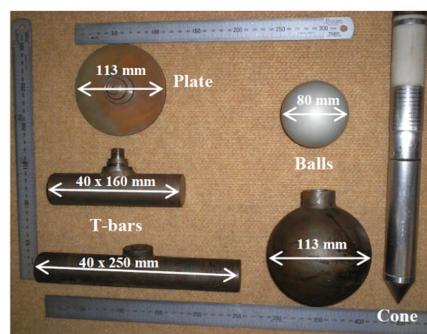


图 2 全流动贯入仪与圆锥贯入仪

Fig. 2 Full-flow penetrometer and cone

### 3.2 理论研究

Low 等<sup>[6]</sup>对西澳几个试验地点的土体强度测试结果进行理论分析, 强调 T-bar 以及 Ball-bar 等全流动贯入仪在测量原状土和重塑上的不排水抗剪强度方面的实用性, 尤其对海底沉积物。DeJong 等<sup>[7]</sup>结合过去 20 多年全流动贯入仪在工程应用和科学方面的成果, 提供全流动贯入仪在试验和数值等的规范做法。Yafrate 等<sup>[8]</sup>深入研究应用全流动贯入仪预测重塑土的不排水抗剪强度和土的灵敏度, 并且推导出一系列的公式, 可以在室内试验和原位试验数据不足的情况下, 用来估算土的相关性质。Low 等<sup>[9]</sup>对比分析多处典型软土地基的测试数据, 总结了强度各向异性对全流动贯入仪测得的强度的影响。

### 3.3 试验研究

近年来, 全流动贯入仪被广泛应用于工程现场和离心模型试验之中。Randolph 等<sup>[10]</sup>使用 T-bar 贯入仪和孔压静力触探仪对比研究高岭土的离心模型贯入试验。Low 等<sup>[11]</sup>应用 T-bar、Ball 等全流动贯入仪评价 Burswood 软黏土的工程性状。Low 等<sup>[12]</sup>分析 3 个陆上工程和 7 个海上工程勘察资料, 发现液性指数, 液限和塑性指数对全流动贯入仪贯入阻力有一定影响, 而剪应力, 灵敏度和屈服应力比则没有影响。

随着全流动贯入仪的推广和应用, 国内外学者对贯入速率等问题研究越来越多。Chung 等<sup>[13]</sup>系统而全面地分析贯入速率, 表面粗糙度和面积比(即探头尺寸)等对贯入阻力和软黏土不排水抗剪强度的影响。Chung 等<sup>[14]</sup>采用离心模型试验, 研究了软土中贯入速率对不同探头尺寸贯入仪贯入阻力的影响, 并讨论了贯入速率在部分排水和不排水区域对贯入阻力的影响。Bembem 等<sup>[15]</sup>对康乃狄克河的层状黏土进行原位贯入试验, 并控制贯入速率在 0.2 mm/s 和 200 mm/s 之间, 结果显示 2 mm/s 时贯入阻力最小, 速率大于或小于 2 mm/s 时贯入阻力都会增大。Roy 等<sup>[16]</sup>、Biscontin 等<sup>[17]</sup>和 Chung 等<sup>[18]</sup>也得到与之前研究类似的结论。Yafrate 等<sup>[19]</sup>对定速贯入、循环贯入、变速贯入 3 种贯入方式对比分析, 确定标准贯入速率为 205 mm/s。

### 3.4 数值分析

采用理想塑性模型, Randolph 等<sup>[20]</sup>、Martin 等<sup>[21]</sup>根据极限分析方法得到了 T 型探头阻力系数的解析解, 图 3 为下限法中假设的 T-bar 与 Ball 的应力特征线。Einav 等<sup>[22]</sup>将极限分析上限解法与应变路径方法相结合, 考察了土体应变软化和应变速率对 T 型探头阻力系数的影响。

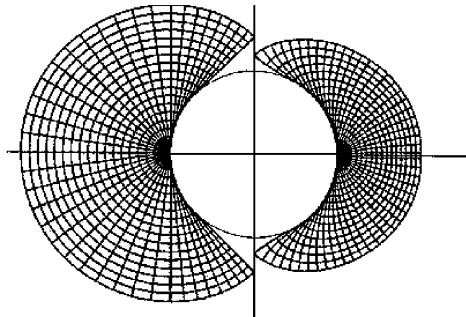


图 3 理论假设的 T-bar 与 Ball 的应力特征线

Fig. 3 Stress characteristic fields for T-bar and Ball

Randolph 等<sup>[23]</sup>采用 PLAXIS 软件对 T-bar 贯入试验进行了有限元模拟, Randolph 等<sup>[24]</sup>应用上下界法在有限元软件中计算 Ball-bar 贯入阻力的塑性解, 并和 T-bar 及 Ball-bar 贯入仪的测量结果对比。Zhou 等<sup>[25]</sup>应用大变形有限元软件对球形贯入仪探杆对阻力的影响进行分析。在国内, 范庆来等<sup>[26]</sup>通过 ABAQUS 有限元软件分析 T-bar 的贯入机制, 并探讨贯入速率、强度各向异性与应变软化对 T-bar 阻力系数的影响。

### 3.5 全流动贯入仪阻力系数

T 形贯入仪的阻力系数,  $N_{T\text{-bar}}$ , 最初是基于塑性理论解得到的<sup>[27]</sup>。该方法考虑圆柱探头表面的粗糙程度得出  $N_{T\text{-bar}}$  的范围为 9.1(完全光滑)~11.9(完全粗糙), 一般情况下可取  $N_{T\text{-bar}}=10.5$  来分析探头表面磨砂处理的 T 形贯入仪测试结果。由室内常规试验和原位十字板试验测得的强度值反推得到的  $N_{T\text{-bar}}$  值分别为 10.8~13.2 和 7.8~13.6。球形贯入仪的阻力系数  $N_{\text{Ball}}$  经 Randolph 理论分析的上下界分别为 15.3 和 11.9; 应用原位十字板试验测得强度反算的  $N_{\text{Ball}}$ , 取值在 5.4~12 之间。 $N_{\text{Ball}}$  的理论解比相应的  $N_{T\text{-bar}}$  大 19%~29%, 试验解与相应的  $N_{T\text{-bar}}$  基本一致。与圆锥阻力系数不同的是, 刚度指数  $I_r$  对全流动贯入仪的  $N$  值没有影响, 但是达到极限阻力时的位移量会随  $I_r$  的增大而减小。

笔者应用 ABAQUS 中的 CEL 法模拟了全流动贯入仪的触探过程。模型采用了直径 40 mm, 长度 250 mm 的标准 T-bar 探头与直径 113 mm 的 Ball-bar 探头建模, 触探深度 0.4 m, 贯入速度为 20 mm/s。土体按不排水强度为 5 kPa 的均质软黏土建立欧拉体模型。图 4 为全流动贯入仪触探过程土体等效塑形应变云图。

土体的塑形等效应变表征了全流动贯入仪触探过程中土体的流动状态与破坏形态。由图可知, T-bar 的破坏模式与图 4 所示的理论假设差异较大, 这主要是理论假设中忽略了触探过程中对土体的扰动和破坏作用, 依然将 T-bar 上部土体视为原状土; Ball 在触

探过程中的土体破坏模式与 T-bar 类似, 也存在与理论假设不一致的地方, 但由于 Ball 的直径更大, 土体的流场更加平滑, 与理论假设的差异较小。

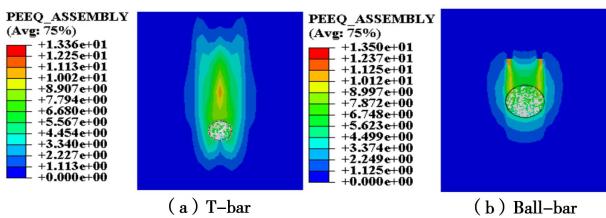


图 4 全流动贯入仪触探过程土体等效塑形应变云图

Fig. 4 PEEQ of soil while full-flow penetrometer penetrating

由于建立的土体模型是不排水抗剪强度为 5 kPa 的均质软黏土模型, 根据得到的全流动贯入仪在触探过程中的贯入阻力, 可反算出承载力系数。图 5 为全流动贯入仪的承载力系数和触探深度的关系图。

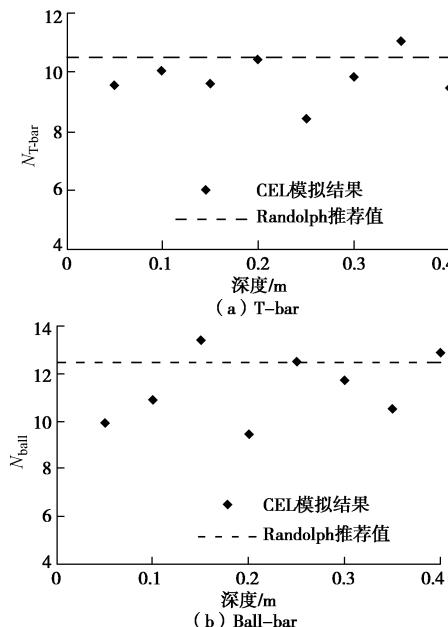


图 5 全流动贯入仪触探过程中承载力系数随深度的变化图

Fig. 5 Bearing capacity factor of T-bar and Ball varying with penetration depth

由图可知, 数值模拟得出的 T-bar 与 Ball 的承载力系数较 Randolph 的建议值偏小, 这与图 5 得到的结论具有较好的一致性, 即触探过程会对探头上部土体产生扰动和破坏, 使得贯入阻力较理论预测的值要小, 得到的承载力系数也较低。

## 4 展望

本文总结了静力触探技术的发展历程, 阐述了其在海洋工程中的应用情况, 特别关注了适用于深海土体的全流动触探贯入仪的研究现状。由于深海海洋环境的复杂性, 深海静力触探方面的很多问题尚未得到充分的研究。主要体现在以下 3 个方面。

(1) 基于理论解的静力触探数据分析方法研究。

目前对静力触探数据的解释特别是在获得土体强度方面主要依赖于经验, 由于深海土体本身的特殊性, 在没有大量数据验证的基础上使用陆路或近海的经验方法评价深海土体的强度存在较大风险。因此, 应用理论方法推求静力触探数据的理论解, 可较好地解决由于经验不足造成的对静力触探数据解释的偏差。

(2) 现有全流动测试探头的数据积累与在中国深海的适用性研究。全流动贯入仪虽有较好的理论支撑, 但需要综合考虑应变速率、应变软化和强度各向异性等对测试结果的影响, 因此应用大量而准确的测试数据来验证和校核其理论解是十分必要的。目前此项技术在国外的应用推广较好, 数据积累与对比也较为充分, 但在国内该项技术还处于起步阶段, 几乎没有实际的工程应用, 因此其在中国深海的适用性还需要进一步的研究论证。

(3) 满足深水结构物建设需求的新型测试技术与探头研发。海上油气管线、管汇基础以及其他深海海洋工程建设需要较为精确的海床表面土体的原位参数和土体的水平向强度指标。但深海表层土体一般为软黏土, 强度低, 触变性大, 目前的原位测试技术很难精确测量, 对土体水平向强度的测试方法还有待研究。此外, 目前我国对海床 CPT 测试系统研究较多, 但由于海床 CPT 测试系统本身条件的限制, 测试深度都不超过 60 m; 钻孔 CPT 系统可测试更深的土层, 但国内研究几乎是空白, 因此研发适用于我国深海的新型测试技术迫在眉睫。

## 参考文献:

- [1] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. Oxford: Chapman & Hall, 1997.
- [2] 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): 517–522. (WAND Zhong-qi. The Chinese CPT and the prospect of penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 517–522. (in Chinese))
- [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. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan. The theory and application of modern digital multifunctional CPTU technology[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [4] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 现代数字式多功能 CPTU 与中国 CPT 对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 914–928. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Comparative Study of modern digital

- multifunctional CPTU and China's CPT tests[J]. Chinese Journal of rock mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 914 - 928. (in Chinese))
- [5] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于聚类分析理论的 CPTU 土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 416 - 424. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Soil classification using CPTU data based upon cluster analysis theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 416 - 424. (in Chinese))
- [6] LOW H E, RANDOLPH M F. Strength measurement for near-seabed surface soft soil using manually operated miniature full-flow penetrometer[J]. Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(11): 1565 - 1573.
- [7] DEJONG J, YAFRATE F, DEGROOT D, et al. Recommended practice for full-flow penetrometer testing and analysis[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(2): 137 - 149.
- [8] 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 and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(9): 1179 - 1189.
- [9] LOW H E, LUNNE T, ANDERSEN K, et al. Estimation of intact and remoulded undrained shear strengths from penetration tests in soft clays[J]. Géotechnique, 2010, **60**(11): 843 - 859.
- [10] RANDOLPH M F, HOPE S. Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures[C]// Proc of Int Symp on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits. Yodagawa, 2004: 147 - 152.
- [11] LOW H E, LANDON M, RANDOLPH M F, et al. Geotechnical characterisation and engineering properties of Burswood clay[J]. Géotechnique, 2011, **61**(7): 575 - 591.
- [12] LOW H E, RANDOLPH M F, LUNNE T, et al. Effect of soil characteristics on relative values of piezocone, T-bar and ball penetration resistances[J]. Géotechnique, 2011, **61**(8): 651 - 664.
- [13] CHUNG F, RANDOLPH M. Penetration resistance in soft clay for different shaped penetrometers[C]// Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. 2004: 671 - 677.
- [14] CHUNG S F, RANDOLPH M F, SCHNEIDER J A. Effect of penetration rate on penetrometer resistance in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(9): 1188 - 1196.
- [15] BEMBEM S M, MYERS D A. The influence of rate of penetration on static cone resistance values in Connecticut River Valley varved clay[C]// ESOPT, Stockholm, 1974, **2**(2): 33 - 34.
- [16] ROY M, LEBLANC A. Factors affecting the measurements and interpretation of the vane strength in soft sensitive clays[C]// Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies. ASTM STP, 1988: 117 - 128.
- [17] BISCONTIN G, PESTANA J M. Influence of peripheral velocity on vane shear strength of an artificial clay[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2001, **24**(4): 423 - 429.
- [18] CHUNG S F, RANDOLPH M F, SCHNEIDER A. Effect of penetration rate on penetrometer resistance in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **32**(9): 1188 - 1196.
- [19] YAFRATE N J, DEJONG J T. Influence of penetration rate on measured resistance with full flow penetrometers in soft clay[C]// Geo Denver. Denver, 2007.
- [20] RANDOLPH M F, HOULSBY G T. Limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil[J]. Géotechnique, 1984, **34**(4): 613 - 623.
- [21] MARTIN C M, RANDOLPH M F. Upper-bound analysis of lateral pile capacity in cohesive soil[J]. Géotechnique, 2006, **56**(2): 141 - 146.
- [22] EINAV I, RANDOLPH M F. Combining upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, **63**(14): 1991 - 2016.
- [23] RANDOLPH M F, ANDERSEN K H. Numerical analysis of T-bar penetration in soft clay[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, **6**(6): 411 - 420.
- [24] RANDOLPH M F, MARTIN C M, HU Y. Limiting resistance of a spherical penetrometer in cohesive material[J]. Géotechnique, 2000, **50** (5): 573 - 582.
- [25] ZHOU H, RANDOLPH M F. Effect of shaft on resistance of a ball penetrometer[J]. Géotechnique, 2011, **61**(11): 973 - 981.
- [26] 范庆来, 奕茂田, 刘占阁. 软土中 T 型触探仪贯入阻力的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2850 - 2854. (FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian, LIU Zhan-ge. Numerical simulation of penetration resistance of T bar penetrometer in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(9): 2850 - 2854. (in Chinese))
- [27] RANDOLPH M F, MARTIN C M, HU Y. Limiting resistance of spherical penetrometer in cohesive material[J]. Géotechnique, 2000, **50**(5): 573 - 582.