

DOI: 10.11779/CJGE2015S1018

# 基于大变形有限元的 CPTU 尺寸效应与贯入速率研究

耿功巧<sup>1, 2</sup>, 蔡国军<sup>1, 2</sup>, 段伟宏<sup>1, 2</sup>, 邹海峰<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>1, 2</sup>

(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:** 孔压静力触探 (CPTU) 技术是目前运用最为广泛的原位测试方法之一, 但其贯入机理的研究尚未成熟, 实测结果分析往往通过经验公式进行推算, 准确性不够。通过 ABAQUS 数值模拟软件对探头在黏土中的贯入进行有限元模拟, 分别取半径为 0.9, 1.8, 3.6, 4.8 cm 的探头对尺寸效应展开研究, 同时分别以 0.1, 1, 2, 3, 4 cm/s 的贯入速率进行贯入, 进而就贯入速率对贯入阻力的影响进行探讨。研究表明: 随着探头尺寸的增加, 锥尖与探杆区域附近的塑性区面积都增加, 锥尖阻力会发生一定程度的降低, 贯入应力影响的最大归一化水平距离也相应减小。不考虑超孔隙压影响的情况下, 随着贯入速率的增加, 稳定状态下的锥尖阻力基本不变, 但贯入越容易达到稳定状态。

**关键词:** 孔压静力触探; 数值模拟; 贯入速率; 尺寸效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0089-05

**作者简介:** 耿功巧(1990-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事土工原位测试等方面的研究。E-mail: genggq@126.com。

## Size effect and penetration rate of CPTU based on ABAQUS

GENG Gong-qiao<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-jun<sup>1, 2</sup>, DUAN Wei-hong<sup>1, 2</sup>, ZOU Hai-feng<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>

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

Engineering & Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The piezocone penetration test is one of the most widely used in-situ tests, but the research on the penetration mechanism has not been mature, which results in that empirical equations are always used to assess the behavior of soils with less accuracy. The ABAQUS is used to simulate the penetration process of the cone. The radius of cone is valued as 0.9, 1.8, 3.8 and 4.8 cm respectively to study the “size effect”. The rate of penetration is valued as 0.1, 1, 2, 3 and 4 cm/s to investigate its effect on the cone tip resistance. It is summarized that as the cone radius increases, the plastic zone area around the shaft and cone expands, the cone tip resistance decreases, and the maximum normalized horizontal affected distance decreases. Meanwhile, the steady-state cone resistance keeps constant with the increase of penetration rate without considering the excess pore pressure, but the steady-state condition is more easily reached.

**Key words:** piezocone penetration test; numerical simulation; rate of penetration; size effect

## 0 引言

孔压静力触探技术 (piezocone penetration test, 简称 CPTU) 是 20 世纪 80 年代国际上兴起的新型原位测试技术, 在发达国家取得了大量工程推广应用, 但是在实际工程中, 该技术大多根据经验或半经验方法解释静力触探成果, 所以研究静力触探的贯入机理对于更好的解释静力触探成果, 提高成果的准确性和可靠性, 具有非常重要的实际意义<sup>[1-3]</sup>。

多位学者利用理论解析法对贯入过程展开了分析, 包括承载力理论 (如 Meyerhof<sup>[4]</sup>、Janbu 等<sup>[5]</sup>、Durgunoglu 等<sup>[6]</sup>)、孔穴扩张理论 (如 Vesic<sup>[7]</sup>、Baligh<sup>[8]</sup>)、应变路径法 (如 Baligh<sup>[9]</sup>), 但是理论解析法存在较多局限性, 如承载力理论中的极限平衡法只

考虑了破坏土体的整体平衡, 并不满足每点处力的平衡; 孔穴扩张理论讲探头的贯入近似为空洞的膨胀, 实际上是对边界条件做出了近似, 所以理论解析法很难准确分析贯入全过程。

除了理论解析法, 国内外的学者和研究机构也进行了一系列的模型试验, 也确实得到了不错的成效。Robertson 等<sup>[10]</sup>利用标定罐试验研究了锥尖阻力与砂土的相对密度及可压缩性之间的关系。Kerisel 等<sup>[11]</sup>

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41202203); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目 (2012BAJ01B02); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目 (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); 中央高校基本科研业务费资助项目 (2242013R30014)

收稿日期: 2015-03-26

通过在大型标定罐中对砂土进行静力触探试验,发现当贯入到一定深度时锥尖阻力将不再增加或缓慢增加。但是,模型试验存在无法忽略的边界效应与扰动影响的问题,且研究成本较高。

随着电子计算机技术的发展,越来越多的学者用数值模拟技术对探头的贯入过程进行了分析研究。De 等<sup>[12]</sup>是最早将小应变分析用于静力触探的学者,他们先将探头置于一个预设孔中,进行增量塑性破坏计算,但是由于贯入过程中引起的位移比探头的直径大的多,所以小变形模拟法不够准确,需采用大变形模拟法。2004 年, Lu 等<sup>[13]</sup>将传统的小变形法与频繁的网格重划分进行结合,研究了土体刚度、初始应力状态对锥尖阻力的影响,得出探头表面的摩擦系数对锥尖阻力几乎无影响的结论。Walker 等<sup>[14]</sup>在 2006 年用 ABAQUS 软件,运用自校式划分网格技术,在保证高质量网格的同时分析了贯入过程,分析结果显示,侧壁摩擦对探头系数没有影响,探头系数对竖向应力更为敏感; Wei 等<sup>[15]</sup>利用 ABAQUS 软件对倾斜贯入进行三维模拟,结果发现锥尖阻力、摩阻力、孔压与倾角无关; 2013 年, Sheng 等<sup>[16]</sup>运用修正的剑桥模型研究了探头系数与不排水抗剪强度的关系。

本文将运用 ABAQUS 软件,采用大变形有限元法,就黏土中的贯入进行模拟分析,旨在研究贯入速率与探头尺寸对贯入过程中土体行为的影响。

## 1 大变形数值模拟

本文是通过 ABAQUS 模拟软件对探头在黏土中的贯入过程进行模拟分析,为了利于模型运算,将探头的贯入简化成轴对称问题。文中,土体被模拟成完全不排水的黏土,采用弹塑性模型,遵循米塞斯屈服准则和相关流动法则,弹性模量恒定为 2980 kPa,泊松比为 0.49。Endra<sup>[17]</sup>经分析比较,当土体元素尺寸小于或等于探头直径的 1/5 时,模拟结果更加精确,所以文中的元素尺寸从对称轴处的 0.005 线性增长到右边界的 0.02,既提高了运算的准确性,同时也减少了运算量。土体尺寸取 1.5 m×1.2 m,越靠近对称轴网格越发紧密,如图 1 所示。鉴于网格中存在的大量自由度、材料的非线性,模拟结果的运算将占用大量的 CPU 时间,为解决这一问题,在土体表面施加一垂直的上覆压力来平衡应力场。

由于土体在探头贯入的过程中发生大变形,探头自身的变形可以忽略不计,所以模拟过程中假设探头是绝对刚体,不发生形变,且探头尺寸采用标准尺寸(横截面积为 1000 mm<sup>2</sup>,锥角为 60°)。

数值模拟中除了部件模拟之外,接触问题是影响

试验结果成功与否的最重要因素。本文中锥体与土体之间的接触选择的是面与面接触法,通过 ABAQUS 中特有的主控面和从属面进行定义,将探头设为主控面,土体左侧表面为从属面。接触的法向模型采用硬接触模型,该模型只有在两物体处于压紧状态时方能传递法向应力  $p$ ,若物体之间存在间隙时不传递法向压力,压力与间隙之间的关系如图 2 所示。

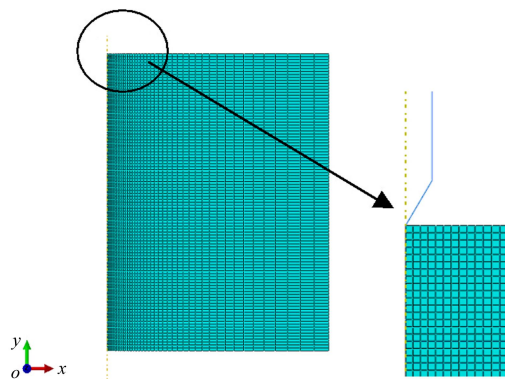


图 1 土体模型网格

Fig. 1 Finite element mesh of soil

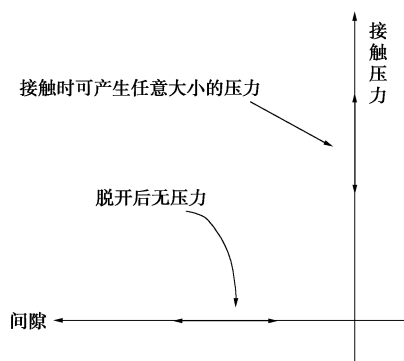


图 2 硬接触中压力和间隙的关系

Fig. 2 Relationship between clearance and pressure in hard contact

为了将土体划分为高质量的网格,采用 ALE 任意拉格朗日-欧拉法自适应网格划分法。该方法结合了纯拉格朗日分析和纯欧拉分析的优点,可以有效地防止变形前、后几何形状差异所导致的网格畸变。除了需要对 ALE 网格划分的频率与强度进行控制外,还必须选择 ALE 网格光滑化的方法,本文选取的是体积光滑法,该方法首先计算围绕节点的周边单元中心点的体积加权平均值,以此为依据对节点进行移动,如图 3 所示,  $M$  点的新位置由周边 4 个单元中心点  $C$  的体积加权平均值确定。加权量会试图将  $M$  点朝远离  $C1$  指向  $C3$  的方向推动,从而减少单元的扭曲<sup>[18]</sup>。

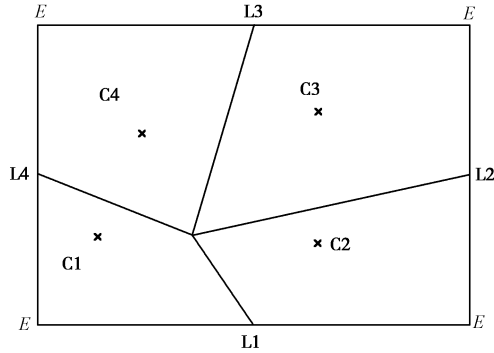


图 3 网格光滑方法示意图

Fig. 3 Schematic of smoothing mesh

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 尺寸效应

#### (1) 塑性区的变化

探头的尺寸是影响测试结果的主要因素之一, 现场 CPTU 测试结果显示, 锥尖阻力随着探杆界面面积的增大而减小。本文分别取探头半径为 9, 18 mm (标准尺寸)、36, 48 mm 进行模拟分析。图 4 为探头贯入到 5D 时的等效塑性应变等值线云图, 图中可以看出, 贯入过程中, 探杆处塑性区最大的水平影响范围刚好与探头的半径同等大小, 且塑性区外轮廓线对称轴即探杆方向近似相互平行。锥尖处的塑性区外轮廓线近似为圆弧状, 半径约为探头直径的 2 倍。通过对 4 种不同尺寸探头贯入全过程的分析, 发现一个共同的规律: 当探头刚开始贯入时, 探杆附近的塑性区大小基本无变化; 锥尖附近的塑性区半径随着贯入深度的增加持续增大, 直到达到稳定状态, 塑性区半径趋于稳定。

#### (2) 锥尖阻力

为研究探头尺寸对锥尖阻力的影响, 本文对不同尺寸下的锥尖阻力模拟结果进行分析。图 5 为探头锥尖阻力与贯入深度的关系图, 虚线表示探头开始达到稳定状态, 由图 5 可以看出, 不同尺寸下的锥尖阻力变化趋势基本一致, 锥尖阻力随着贯入深度的增大而增大, 直到达到稳定状态, 这个动态过程完全与上一节的塑性区变化特征相一致, 探头开始贯入时, 锥尖阻力增大, 塑性区扩大; 当达到稳定状态时, 锥尖阻力恒定, 塑性区也趋于稳定。半径为 0.009 m 的探头各个位置下的锥尖阻力均大于半径为 0.018, 0.036, 0.048 m 的锥尖阻力, 可以得出结论: 探头的锥尖阻力随着探头的半径增大而减少; 另外, 半径为 0.009, 0.018 m 的探头达到稳定状态下所需的贯入深度为 0.18 m, 而半径为 0.036, 0.048 m 的探头达到稳定状

态下所需的深度分别为 0.22, 0.33 m, 这表明探头达到稳定状态下的贯入深度随探头尺寸的增大而提高, 并且达到稳定状态时的锥尖阻力随着半径的增大而减小。

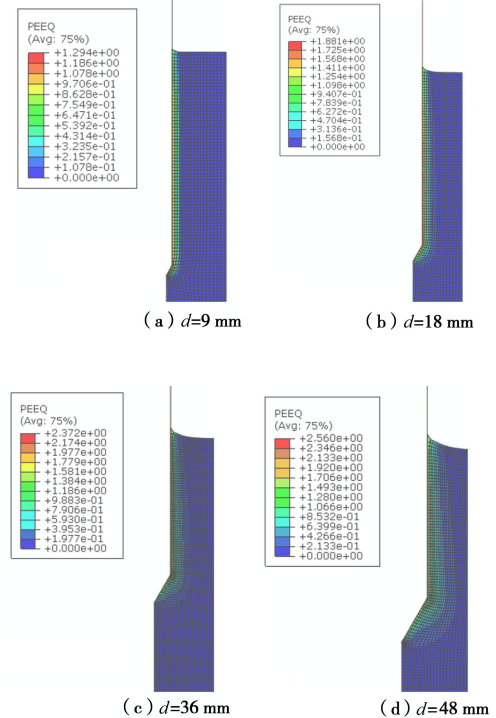


图 4 等效塑性应变等值线云图

Fig. 4 Equivalent plastic zones

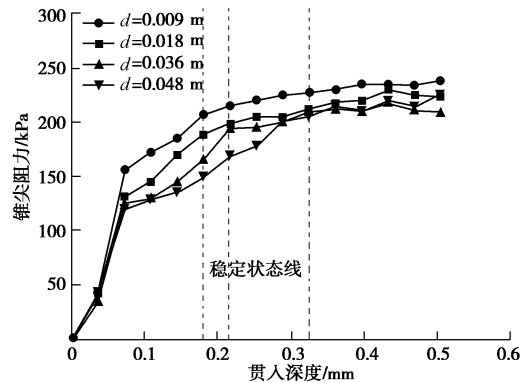


图 5 锥尖阻力与贯入深度的关系图

Fig. 5 Relationship between cone tip resistance and penetration depth

#### (3) 应力影响范围

CPTU 现场操作为了避免已钻孔对下一个钻孔的影响, 一般选择钻孔之间的距离大于或等于 1 m。本文也就探头尺寸对钻孔影响范围的影响进行探讨, 主要研究贯入过程中应力影响范围与探头尺寸的关系。图 6 为探头半径为 0.018 m 条件下, 贯入深度为 3D, 5D, 10D, 20D 时的应力影响范围随贯入深度的变化

图 ( $D$  为探头的直径)。贯入深度从  $3D$  贯入到  $5D$  时, 水平方向和竖直方向的应力影响范围均产生一定程度的增大, 当贯入深度达到稳定状态时 (即  $5D$ ), 随着贯入深度的增大, 应力水平影响范围基本维持不变, 而竖直方向上的影响范围依旧稳步增加, 这种现象可以理解为当探头进入稳定状态时, 竖直方向的应力由于探头的持续贯入挤压产生变化, 而水平方向上的应力不再受到力作用影响, 达到稳定状态。继续对结果进行分析, 做出不同探头半径下, 归一化深度与归一化水平影响距离的关系图 (图 7), 该图也可以侧面证明图 5 的稳定状态线的准确性。并且, 由图 7 可以得出, 随着探头半径的增大, 归一化应力水平影响范围逐渐减少。

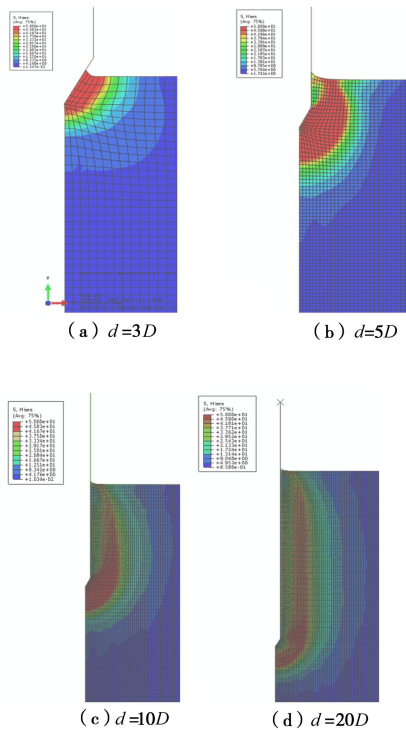


图 6 不同贯入深度下的应力图

Fig. 6 Stress conditions at different depths

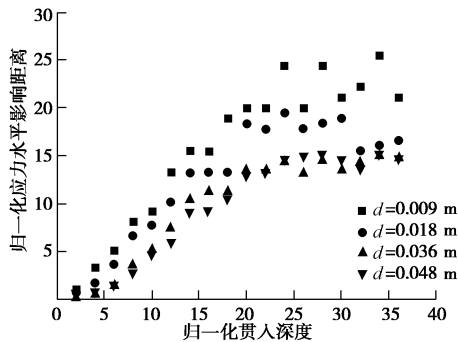


图 7 归一化深度与归一化水平影响距离的关系图

Fig. 7 Relationship between normalized depth and horizontal effected distance

2.2 贯入速率

CPTU 探头向土中的贯入速率对贯入阻力的测试结果有明显影响, 这主要是由孔隙水压力和土结构的变化程度引起的。现场 CPTU 试验结果表明, 锥尖阻力随着贯入速率的增大而减小, 而超孔压随着贯入速率的增大而增大, 且近期的离心模型试验结果表明: 锥尖阻力的增大是由于排水条件的变化引起的<sup>[19]</sup>。本文暂不讨论超孔隙水压力对测试结果的影响, 而就贯入速率对土结构变化所造成的锥尖阻力测试结果差异进行讨论, 即土体被模拟成完全不排水条件。

分别取贯入速率为 0.1, 1, 2, 3, 4 cm/s, 在完全不排水的条件下对贯入过程进行模拟, 锥尖阻力的变化图如图 8 所示, 虚线代表的是各类情况下的稳定状态线。当贯入速率为 0.1 cm/s 时, 稳定状态下的锥尖阻力值约为 170 kPa, 而贯入速率为 1, 2, 3, 4 cm/s 状态下, 锥尖阻力基本维持不变, 大小为 215 kPa 左右, 说明在不考虑孔压的条件下, 贯入速率对锥尖阻力的值影响不大, 除非贯入速率足够小, 这在实际现场操作中也是不可能出现的。同时发现, 探头在 0.1, 1, 2, 3, 4 cm/s 的贯入速率下, 达到稳定状态下的深度分别为  $15.7d$ ,  $14d$ ,  $13d$ ,  $12d$ ,  $10d$ , 表明随着贯入速率的增加, 探头达到稳定状态下的深度也逐渐减小, 即探头越容易达到稳定状态。除此之外, 探头在达到稳定状态前, 锥尖阻力的变化速率也是随着贯入速率的增加而有所差异, 从图 8 中就可以明显反映出, 贯入速率的增大会增加锥尖阻力的变化速率。故在不考虑超孔压消散的条件下, 探头的贯入速率对锥尖阻力的影响依旧不容忽视。

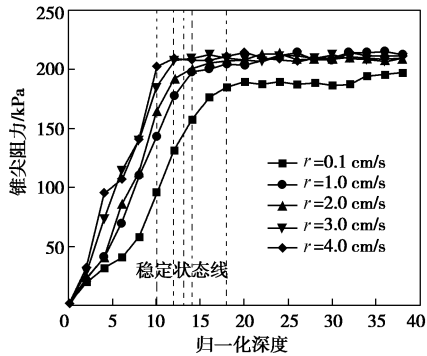


图 8 锥尖阻力与贯入深度的关系图

Fig. 8 Relationship between cone tip resistance and depth

3 结 论

本文运用数值模拟 ABAQUS 软件对探头的贯入过程进行了分析, 模拟过程中分别选取探头半径为 9, 18, 36, 以及 48 mm 进行对比分析; 并以不同的贯入速率进行贯入, 得出以下结论:



(1) 探头尺寸对贯入过程中的塑性区产生影响, 稳定状态下, 探杆附近的塑性区水平延伸距离与半径相同, 锥尖附件的塑性区半径约为探头半径的 2 倍。

(2) 随着探头半径的增大, 稳定状态下的锥尖阻力发生一定程度的降低且达到稳定状态时的深度增加, 同时应力水平影响距离也随着探头半径的增大而减小。

(3) 在不考虑孔压变化的情况下, 贯入速率对稳定状态下的锥尖阻力值的影响不大, 但达到稳定状态下所需的深度减小, 且锥尖阻力变化速率却相应增大, 所以现场试验操作必须控制好贯入速率。

### 参考文献:

- [1] 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 digital multifunctional piezocone penetration test (CPTU) [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 现代数字式多功 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. Study on the comparison of digital multifunctional piezocone penetration test (CPTU) with Chinese CPT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 914 - 928. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] MEYERHOF G G. The ultimate bearing capacity of wedge-shaped of foundation[C]// Proc 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundations. Paris, 1961: 103 - 109.
- [5] JANBU N, SENNESET K. Effective stress interpretation of in situ static penetration tests[C]// Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing. Stockholm, 1974: 181 - 93.
- [6] DURGUNOGLU H T, MITCHELL J K. Static penetration resistance of soils. I-II[C]// Proceedings of the ASCE Spec Conference on In Situ Measurement of Soil Properties. New York, 1975: 51 - 89.
- [7] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1972, **98**: 265 - 290.
- [8] BALIGH M M. Cavity expansion in sands with curved envelopes[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, **11**: 1131 - 1146.
- [9] BALIGH M M. Strain path method[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1985, **111**(9): 1108 - 1136.
- [10] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Interpretation of cone penetration tests: sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(4): 719 - 733.
- [11] KERISEL J. Foundations profondes[J]. Ann.ITBTP, 1962, **179**(3): 32 - 43.
- [12] DE Borst R, VERMEER P A. Finite element analysis of static penetration tests[J]. Géotechnique, 1984, **34**(2): 199 - 210.
- [13] LU Q, RANDOLPH M F, HU Y, et al. A numerical study of cone penetration in clay[J]. Géotechnique, 2004, **54**(4): 257 - 267.
- [14] WALKER J, YU H S. Adaptive finite element analysis of cone penetration in clay[J]. Acta Geotech, 2004, **1**: 43 - 57.
- [15] WEI L. Numerical simulation and field verification of inclined piezocone penetration test in cohesive soils[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2004.
- [16] SHENG Daichao, CUI Lijie, ANSARI Yousef. Interpretation of cone factor in undrained soils via full-penetration finite-element analysis[J]. Int J Geomech, 2013, **13**: 745 - 753.
- [17] ENDRA S. Finite element simulation of the cone penetration test in uniform and stratified sand[D]. Michigan: The University of Michigan, 2005.
- [18] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. The application of ABAQUS in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))
- [19] 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.

(本文责编 黄贤沙)