静力触探试验的离散元数值模拟研究

周 健[1,2]，崔积弘[1]，贾敏才[1,2]，史旦达[1]

(1. 同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092)

摘 要：由于静力触探试验的可重复性及可靠性，它在现场试验中被广泛应用。对静力触探试验进行颗粒流模拟，有助于从细观上了解静力触探试验机理，使之更好地服务于工程实际。颗粒流方法在模拟土体大变形方面具有一定的优势，本文利用颗粒流理论及其程序，首先在双轴试验的基础上确定了土样细观参数，然后建立静力触探的数值模型，模拟研究了贯入过程及锥尖土体的细观力学特征，重点分析了静力触探过程中砂土的位移运动规律，砂土的水平和垂直应力场及主应力的偏转。通过施加不同的应力边界条件，分析了模型不同的应力条件及超固结比（OCR）对锥尖贯入阻力的影响。同时，分析了锥尖尺寸效应对锥尖贯入阻力的影响规律。数值模拟结果与已有的试验规律具有较好的一致性，从而验证了颗粒流方法模拟静力触探试验的可行性，所得结论具有一定的理论价值和工程意义。

关键词：静力触探实验；颗粒流；数值模拟；细观力学

中图分类号：TU411 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1604－07

作者简介：周 健(1957－)，男，教授，博士生导师，主要从事软土地基处理技术、土体细观力学模拟等方面的研究工作。E-mail: tjuzj@vip.163.com。

Numerical simulation of cone penetration test by discrete element method

ZHOU Jian[1,2], CUI Ji-hong[1], JIA Min-cai[1,2], SHI Dan-da[1]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The repeatability and reliability of the cone penetration test (CPT) have increased its acceptance as a predominant choice in in-situ test techniques. Using particle flow code in 2-dimension (PFC^{2D}) to study the meso-mechanics of cone penetration test is a good way, and it will be helpful to the service for practical engineering. The discrete element method (DEM) method is of some predominance in the simulation of soil large deformation. Thus PFC^{2D} program was applied here. The driving process of cone, the distribution of displacement and stress of adjacent soil were analyzed, and the isoline of displacement and stress field was drawn. At the same time, the rotation of principal stresses was analyzed. Especially, the stress boundary conditions were applied to different boundaries to obtain different stress states, and the emphasis was laid on the effect of different stress conditions and OCR on the cone tip resistance. The conclusions in this study would be useful to the model study of CPT and its engineering application.

Key words: cone penetration test; particle flow code; numerical simulation; meso-mechanics

0 引 言

静力触探试验被广泛地应用于现场试验测试，根据静力触探试验结果可进行现场分层划分、工程土质分类、地基承载力确定、液化场地判别等[1]。国内外学者对静力触探试验的机理进行了研究，研究方法大体可分为以下几种：①Durgunoglu和Mitchell[2]最早采用基于整体剪切破坏模式的承载力理论研究了黏土中静力触探的机理。但这种方法忽略了土的压缩性对静力触探结果的影响，分析中也没有考虑土体的应力应变特性。②针对承载力理论的缺陷，Vesic[3]、Yu和Houlsby[4]提出了孔穴扩张理论。Salgado等[5]和Shuttle和Jefferies[6]采用孔穴扩张理论研究了砂土中静力触探的作用机理。但孔穴扩张理论假定锥体以椭圆或者圆柱形向外扩张，这与实际情况并不相符。③此外，Baligh[7]提出了一种被称作应变路径方法，Teh和Houlsby[8]采用这种方法研究了黏质材料的静力触探结果。应变路径理论方法并不能完全满足平衡微分方程，因此只能得到近似解。同时，这种方法只用于分析不排水条件下的黏性土，在砂性土中的应用没有文

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50578122）

收稿日期：2007－01－15

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

献记载。④近几年较为常用的方法是有限单元法。van den Berg等[9]提出了一种欧拉大应变有限元方法分别对黏性土和砂性土的静力触探结果进行了分析。Kiousis等[10]采用一种弹塑性大应变方程来分析黏性土的触探结果。有限单元法是以连续介质力学为基础的，因此，从根本上也无法精确地模拟出静力触探的贯入机理。

离散单元法自Cundall[11]首次用于岩石边坡的渐进破坏分析以来，由于离散单元无需满足位移连续与变形协调条件，尤其适应于求解岩土体大变形及非线性问题。试验数据表明[12]，在静力触探过程中，锥头附近土体的平均应变常超过10%，有的剪应变甚至达到40%，因此，采用离散元方法来研究静力触探的机理更趋合理。Hiroaki和Masatoshi[13]和M J Jiang等[14]分别采用离散元方法对触探机理进行了研究，并分析了土性参数对试验结果的影响。

二维颗粒流方法（PFC^{2D}）属于离散单元法的一种。研究表明，该方法可以很好地模拟土的细观力学性质[15-16]。本文采用颗粒流方法对静力触探试验的贯入过程进行了数值模拟，从细观上研究了锥头贯入过程中，锥头周边位移场、应力场的演变发展规律，讨论了水平应力和垂直应力对贯入阻力的影响，分析了贯入阻力对锥头的尺寸效应的敏感性，并跟国外的试验结果进行了对比分析，得到了一些有益的结论。

1　静力触探模型介绍

无论是模型试验或是数值模拟试验，边界效应问题是必须要考虑的。国外许多学者对静力触探模型试验及数值模拟的结果表明[17-18]，当模型箱的尺寸与锥头直径的比值越大，边界效应的影响相应地减小。

数值模型以Tinino砂中的静力触探室内试验[19]为基础，模型箱的形状相同，都为圆柱形。为了减小边界效应对比贯入阻力的影响，柱直径为3 m，高2 m。由于整个计算模型是关于Y轴对称的，为了节约计算时间，取半径为1.5 m的一半作为研究对象，如图1所示。

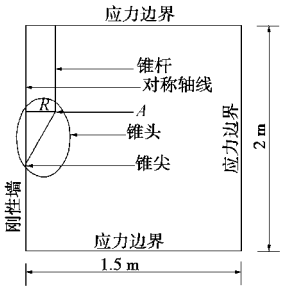


图 1 静力触探模型示意图

Fig. 1 Representation of cone penetration test model

静力触探的锥头用刚性墙体模拟，锥头的直径为35.7 mm，锥尖角取60°，静力触探的贯入速度为20 mm/s。

二维模型箱除左边界为刚性墙外，其余边界采用颗粒边界来代替初始的刚性墙，以便可以施加应力边界条件[20]。边界颗粒采用平行黏接（parallel-bond）进行连接，刚度设为10^{12} N/m，是内部土颗粒刚度的5倍，同时平行连接强度设为10^{10} N，从而与土体相比，让边界墙体表现出刚体的性质。

2　土样模型介绍

室内试验采用Tinino砂，其平均粒径d_{50}=0.7 mm，不均匀系数C_u=1.54，曲率系数C_c=1.06，内摩擦角为33°。在PFC^{2D}数值模拟中，由于计算机水平的限制，采用将实际砂土平均粒径适当放大的办法来减少颗粒的数量，同时通过对最大最小粒径比的控制使数值试样的级配（不均匀系数C_u、曲率系数C_c）接近于实际Tinino砂。

图2给出了数值试样和Tinino砂的级配曲线。从中可以看出，模拟砂土试样粒径范围为1～4 mm，平均粒径d_{50}=3.5 mm，不均匀系数C_u=1.51，曲率系数C_c=1.04。对数值试样进行不同围压下的双轴试验，其结果如图3所示。通过应力摩尔圆，确定砂土颗粒的内摩擦角为29°。与室内试验砂相比，数值试样除了d_{50}增大外，C_u，C_c值均与之接近。

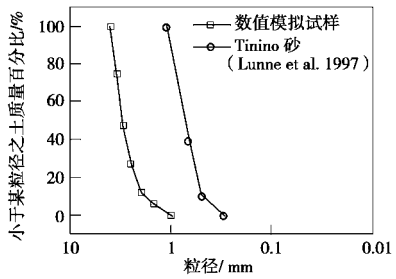


图 2 数值试样级配

Fig. 2 The grade curves of simulation samples

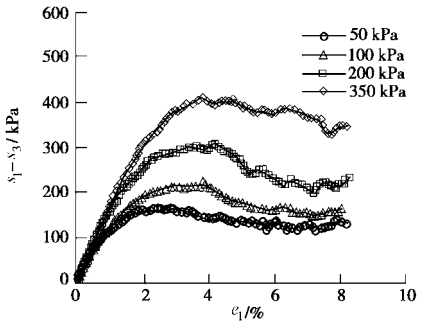


图 3 不同围压下的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different confined pressures

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数值模拟需要确定砂土的细观参数有：颗粒孔隙率e、法向接触刚度k_n、切向接触刚度k_s、颗粒摩擦系数f_c及颗粒密度ρ_s，其具体取值见表1。试验条件假定为排水条件，静力触探过程中并不产生超孔隙水压力。

表 1 数值试样细观参数值汇总表

Table 1 Values of micro parameters of numerical samples

细观参数	e	k_n /(N·m^{-1})	k_s /(N·m^{-1})	f_c	ρ_s /(kg·m^{-3})
数值大小	0.16	5×10^8	5×10^8	0.5	2100

3 数值模拟及结果分析

3.1 数值模拟步骤介绍

与室内试验一样，数值试验也可分制样和加荷两个过程。数值模拟过程具体可分以下几步：

（1）模型箱的建立。除了左墙采用刚性墙外，其余墙体采用平行粘结（parallel-bond）的颗粒来代替。而边界条件分为两种：一是初始K_0状态，即边界平行黏结颗粒不施加应力条件，用以研究锥头贯入过程的位移场、应力场、锥头尺寸效应对贯入阻力的影响；一是通过对边界颗粒施加不同的应力条件，来验证模型的正确性、研究水平应力和垂直应力对贯入阻力的影响。

（2）数值试样粒径按级配曲线分段生成，在每一段内土样级配服从均匀分布，再通过半径的放大使其处于初始密实状态。土粒的最小粒径1 mm，最大粒径4 mm，控制初始孔隙比为0.16；然后分步施加颗粒之间的摩擦系数和重力场，直到系统达到平衡稳定状态。

（3）给锥体施加一定的速度，使其贯入到土中。通过在锥体周围一定的区域内设置测量圈，记录土体的应力变化；通过编制位移捕捉程序，对具有不同位移的土颗粒着以不同颜色，来得到土颗粒的运动规律。

（4）改变不同的应力状态，通过在上下墙和右侧墙上施加不同的力边界条件，同时调用应力伺服程序，保证每一循环土体始终处于所设定应力状态下。

（5）改变锥头的几何尺寸及锥尖角度，考察锥尖贯入阻力对尺寸效应的敏感性。

3.2 数值模型的验证

为了验证所建的数值模型的正确性，对Lunne等[19]的模型试验进行了数值模拟。室内模型箱为圆柱形，直径为2.4 m，高1.5 m，静力触探直径为35.7 mm，与数值模型尺寸基本相同。数值模拟及室内试验中的应力边界条件均为：上下边σ_v=124 kPa，而左右边σ_h=124 kPa。图4给出了数值模拟跟室内模型试验的锥尖贯入阻力的对比。

图4表明，数值模拟得到的锥尖贯入阻力曲线在形状上与Lunne等[25]采用的Tinino砂室内试验得到的曲线基本上一致，二者的临界深度十分接近，都在0.2 m附近，数值曲线表现出一定的波动性。且超过临界深度以后的静力触探锥尖贯入阻力基本上在20 MPa左右，说明了颗粒流模拟可以很好地再现静力触探的贯入特性，从而验证了模型的正确性。

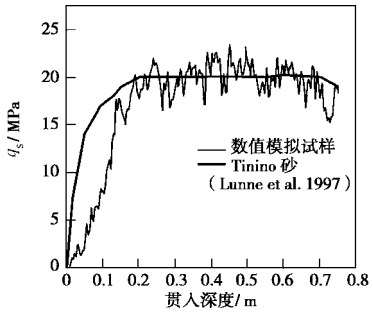


图 4 数值试验与 Tinino 砂模型试验结果对比

Fig. 4 Comparison of cone tip resistance between numerical test and lab test for Tinino sand

3.3 贯入过程的位移场分析

通常，静力触探试验在锥尖贯入过程中，锥头及锥侧的土体会发生剧烈的变形。为了分析在锥头贯入的过程中，砂土颗粒的位移场变化规律，分别绘出了水平位移和垂直位移的发展轨迹。数值模拟过程中追踪每个土颗粒的位移情况，并根据位移量的大小给颗粒着色，从细观上了解静力触探的机理。

首先计算每个时步下所有土颗粒的最大位移D_{max}，将最大位移D_{max}分为8区段，分别赋给绿、黄、红、蓝、粉、橙、浅蓝、棕8种颜色，如果某一颗粒的位移量位于其中的某一区段，则赋给颗粒不同颜色加以区分。图5给出了不同位移的颗粒的颜色的示意图。

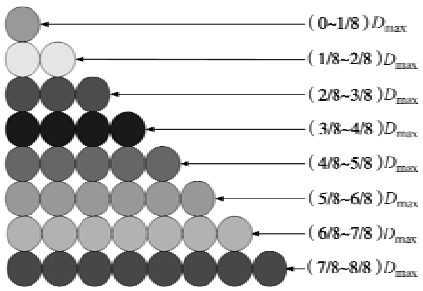


图 5 不同位移的球颜色示意图

Fig. 5 Representation of colours for different displacements

图6给出了静探贯入过程中，锥头周围土体的位移发展规律。当锥头刚进入土体时，由于土体处于临空面，所以此时的水平位移和垂直位移都比较大。随着锥头的贯入，锥下土体进一步的密实，土颗粒的垂直运动受到很大的限制，垂直位移的范围逐渐减少，而位移主要表现为水平方向的运动。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

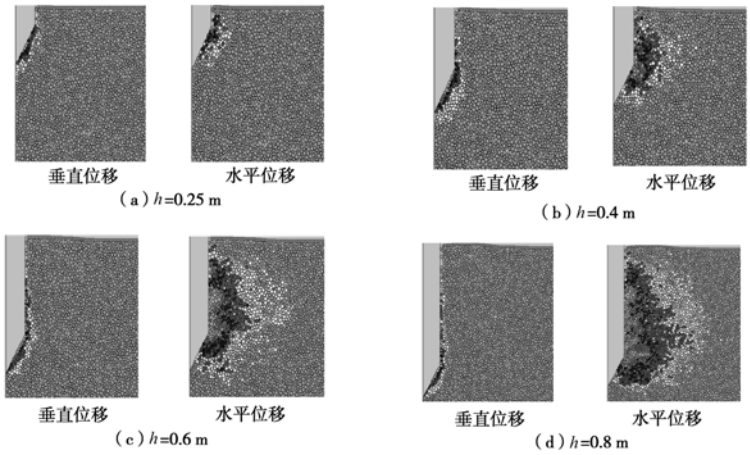


图 6 不同贯入深度垂直和水平位移场

Fig. 6 The horizontal and vertical displacement fields

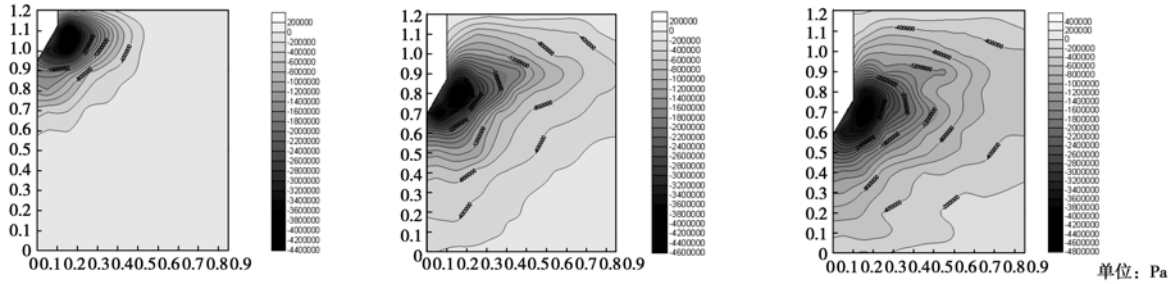


图 7 不同贯入深度水平应力等值线

Fig. 7 Contours of the horizontal stress at different depths

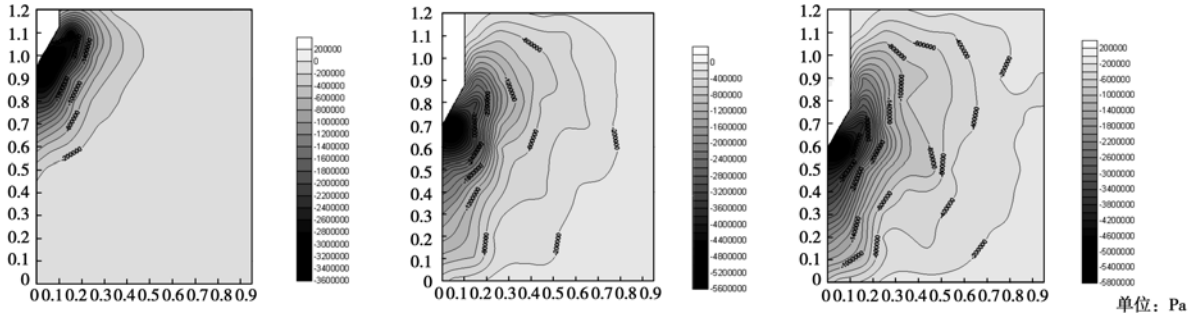


图 8 不同贯入深度垂直应力等值线

Fig. 8 Contours of the vertical stress at different depths

水平位移发展的范围，刚开始的时候，是以锥头和锥杆交接处*A*点（见图1）为中心，呈一种类似半圆弧的形状向外放射性发展。随着不断贯入，半圆弧的圆心逐渐上移，表现为锥体的横向挤压。

与水平位移相比，垂直位移发展的范围比较窄，仅仅分布在锥杆周围及锥头附近很小的一个区域。刚开始垂直位移较大的区域主要分布在锥头的下方，随着锥头的不断贯入，对土体的侧向挤压不断加剧，使得锥杆受到的径向应力增大，锥杆与土体接触面的剪应力也随之增大，从而带动土体发生垂直运动。这很好地再现了土颗粒垂直位移场的发展规律。

3.4　贯入过程的应力场分析

在静力触探试验数值模拟中，在锥头周围土体中布置测量圈，研究了土体的应力场。图7，8分别给出了不同贯入深度时，锥体附近土体的水平方向和垂直方向的应力场。

无论是水平应力还是垂直应力，都存在一个应力集中的果核状的区域，但位置不同，水平应力的“应力核”位于锥头与锥体相交接的部位，而垂直应力的“应力核”位于锥尖部位。“应力核”随着贯入不断向下发展。而锥头经过后的土体，垂直应力和水平应力都很快的减小，这表明在锥头和锥体之间存在着很大

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的应力梯度。土体在锥头刺入的过程中，先经历一个快速的加载过程，而后，当锥头的*A*点经过土体以后，锥头后的土体再经历一个卸载的过程。

从应力幅值上来看，当锥头刚贯入土体时，最大水平应力的幅值要大于垂直应力的最大值。而随着锥体不断贯入土体，后者逐渐大于前者。应力场的基本形状及应力幅值的变化规律与Ahmadi[21]应用FLAC程序计算所得结论一致。

3.5 主应力偏转角

由于静力触探在贯入过程中，锥头附近的土体发生剧烈的变形，其应力变化的过程较为复杂。为了详细考察这一规律，在土体中设置测量圈，测量分析了土体的主应力角的偏转规律。定义主应力角为

$$\theta=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\sigma_{12}}{\sigma_{11}-\sigma_{22}}\right)\ , \tag{1}$$

其中，σ_{12}是测量圈内土体的剪应力，σ_{11}和σ_{22}分别是土体的*X*方向和*Y*方向的正应力。分析中，假定主应力角的变化范围是（-90°，90°）。

图9给出了在锥头贯入的过程中，主应力角的变化发展规律。从中可以看出，当锥尖的位置还没有达到测量圈的水平高度时，土体的主应力角并没有显著的变化。当锥尖到达测量圈所在的位置时，主应力开始发生偏转。越靠近锥体，主应力偏转的开始时间越早，同时，偏转的角度也越大。当锥头经过测量圈布设深度时，这个阶段，应力发生不断的偏转。测量圈1的应力偏转表现最为明显，当锥头*A*点经过土体以后，主应力会再次发生一个大的偏转。而测量圈2的主应力偏转的幅度则小的多，测量圈3的主应力在整个锥头经过的时间内几乎不发生大的偏转。

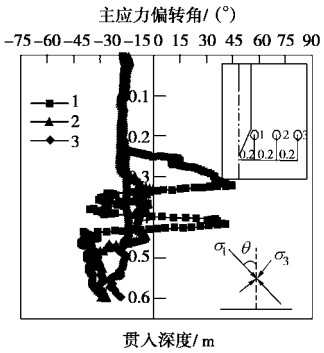


图 9 主应力角的偏转规律

Fig. 9 Rotation of principal stresses during penetration

3.6 不同应力条件对贯入阻力的影响

水平应力和垂直应力对贯入阻力的影响哪个较大，目前的研究结果还不一致。Houlsby和Hitchman[22]在试验的基础上认为，对于某一特定密度的砂土，贯入阻力主要取决于水平应力而不是垂直应力。本文采用数值模拟方法对这一问题进行了研究，采用上面提到的数值模型，通过对边界颗粒施加应力条件，同时调用应力伺服程序，来达到不同的应力水平。

数值模拟分为两种情况。第一种情况，假定垂直应力保持120 kPa不变,而水平应力的变化范围为40～220 kPa。图10给出了不同水平应力下的贯入阻力的变化，从中可以看出，随着水平应力的不断增大，贯入阻力显著的增大。

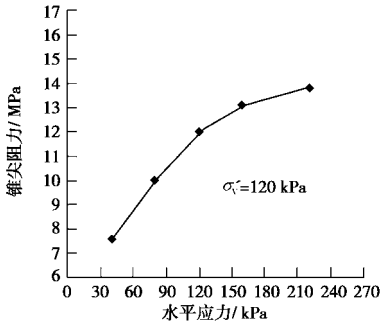


图 10 水平应力对贯入阻力的影响

Fig. 10 Effect of horizontal stress on tip resistance

第2种情况，假定水平应力保持120 kPa不变，而垂直应力的变化范围依然保持在40～220 kPa。图11给出了不同垂直应力下的贯入阻力的变化。从图中可以清楚的看出，垂直应力的变化对贯入阻力的影响很小。

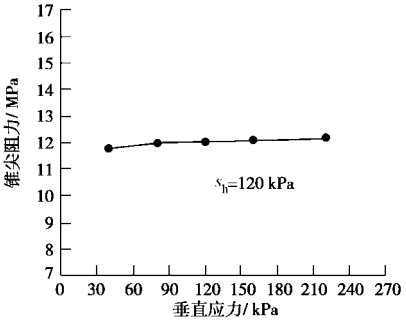


图 11 垂直应力对贯入阻力的影响

Fig. 11 Effect of vertical stress on tip resistance

从数值模拟结果可以看出，贯入阻力主要是由场地的水平应力决定的，而不是由垂直应力决定。这个结论跟Houlsby和Wroth[23]的试验结果也是一致的。

进一步分析数值模拟结果可知，场地的超固结比OCR基本上不影响砂土的贯入阻力。这表明对于两种给定相对密度相同而OCR不同的砂土，如果场地的水平应力相同，则可能获得相同的贯入阻力。数值模拟结论跟Salgado等[24]的试验结果吻合。

3.7 锥尖尺寸效应对贯入阻力的影响研究

图12给出了当锥体的半径一定，对于不同的锥尖角，锥尖贯入阻力的变化规律。数值模拟中，锥尖角

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从30°变化到90°，锥尖贯入阻力相应的从13.25 MPa变化到20.32 MPa。锥尖贯入阻力随着锥尖角的增大也呈增大的趋势，二者有一定的相关性。说明，随着锥尖角度的增大，锥尖刺入土体受到的阻力增大，锥头部分的土体逐渐由受侧向挤压为主逐渐转变成垂直竖向的挤压为主。

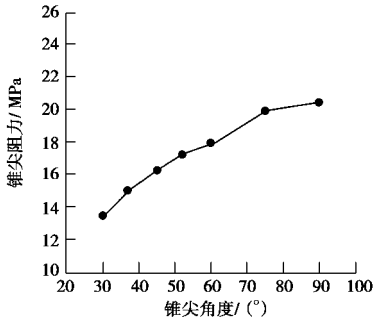


图 12 锥尖角度对贯入阻力的影响

Fig. 12 Effect of cone tip angle on tip resistance

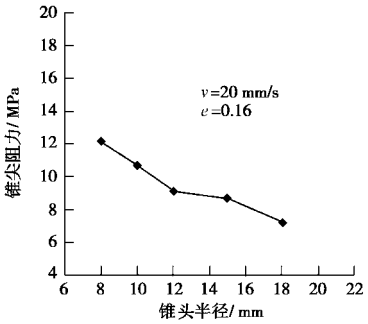


图 13 锥头半径对贯入阻力的影响

Fig. 13 Effect of cone tip radius on tip resistance

试验结果[25]表明，锥尖贯入阻力随着锥头截面积A_c的增大而减小。为了研究锥头面积对贯入阻力的影响规律，进行了5组数值试验，图13给出了贯入阻力随锥头半径的变化规律。模拟中保持锥尖角为60°不变，锥头半径由8 mm逐步增大到18 mm，锥尖贯入阻力由12.12 MPa减小到7.23 MPa，表明虽然锥头表面积增大会使得垂直力增大，但贯入阻力却随之减小。

4 结　　语

利用离散介质的二维颗粒流方法，通过建立可以施加不同应力边界条件的数值模型，对砂土地基中静力触探试验的细观机理进行了数值模拟研究，共得到以下主要结论：

（1）通过开发的位移追踪程序，研究了静力触探试验贯入过程中土颗粒的位移规律，与传统方法相比，颗粒流方法可以更明晰地再现土颗粒的运动轨迹。

（2）数值模拟分析了锥头周围土体的应力场，并从应力幅值、“应力核”的发展、锥头附近应力梯度等方面研究了水平应力及垂直应力的不同特性。

（3）数值模拟研究了锥头附近的土体在贯入过程中的主应力偏转。越靠近锥头的土体，其主应力角的偏转开始的越早，且偏转的角度也越大。

（4）数值模型结果表明，贯入阻力主要是由场地的水平应力决定的，而不是由垂直应力决定。这也意味着砂土场地的超固结比基本上不会影响静力触探试验的贯入阻力。

（5）分析了锥头尺寸效应对贯入阻力的影响规律。随着锥尖角度的增大，贯入阻力相应地增大；而随着锥头截面积的增大，贯入阻力相应地减小。

（6）与室内试验相比，PFC数值试验的优势在于得到静力触探试验的宏观现象的同时，可以通过分析土颗粒的运动规律，分析静力触探的细观演化规律，方便地改变应力边界条件，调节土的力学参数进行正交试验，因而是一种行之有效的方法。

参考文献：

[1] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术（CPT）现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 553－556. (LIU Song-yu, WU Yan-kai. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 55. － 556. (in Chinese))

[2] DURGUNOGLU H T, MITCHELL J K. Static penetration resistance of soils I: analysis[C]// Raleigh N C. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, New York. 1975: 151－171.

[3] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, **98**(GT3): 265－290.

[4] YU H S, HOULSBY G T. Finite cavity expansion in dilatant soil: loading analysis[J]. Géotechnique, 1991, **41**(2): 173－183.

[5] SALGADO R, MITCHELL J K, JAMIOLKOWSKI M. Cavity expansion and penetration resistance in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, **123**(4): 344－354.

[6] SHUTTLE D, JEFFERIES M. Dimensionless and nbiased CPT interpretation in sand[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, **22**: 351－391.

[7] BALIGH M M. Strain path method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(GT9): 1108－1136.

[8] TEH C I, HOULSBY G T. An analytical study of the cone

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

penetration test in clay[J]. Géotechnique, 1991, **41**(1): 17－34.

[9] VAN DEN BERG P, De Borst R, HUETINK H. An Eulerean finite element model for penetration in layered soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, **20**: 865－886.

[10] KIOUSIS P D, VOYIADJIS G Z, TUMAY M T. A large strain theory and its application in the analysis of the cone penetration mechanism[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1988, **12**: 45－60.

[11]CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]// Proceeding of Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Nancy, 1971: 8.

[12] 陈铁林, 沈珠江, 周 成. 用大变形有限元对土体静力触探的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2004, **2**: 1－6. (CHEN Tie-lin, SHEN Zhu-jiang, ZHOU Cheng. Numerical simulation of cone penetration process by large-strain finite element method[J]. Journal of Hydro-Science and Engineering, 2004, **2**: 1－6. (in Chinese))

[13] HIROAKI T, MASATOSHI M. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2000, **37**: 41－56.

[14] JIANG M J, YU H-S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomecanics, 2005, **473**:1－27.

[15] 王 浩, 周 健, 邓志辉. 砂土中桩端阻力与位移发挥的内在机理研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(5): 587－593. (WANG Hao, ZHOU Jian, DENG Zhi-hui. Mobilization of toe resistance of piles with local displacement in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 587－593.)

[16] 周 健, 池 永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及 PFC^{2D} 程序[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 271－274. (ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yu-wei, et al. The method of particle flow and PFC^{2D} code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 271－274.)

[17] BALDI S, BELLOTTI R. Design parameters for sands from CPT[C]// Proc 2nd Eruopean Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 1982: 425-432.

[18] AHMADI M M, ROBERTSON P K. Calibration chamber size and boundary effects for CPT q_c measurements[C]// 2nd International Conference on Site Characterization, ISC,02 Porto. 2002.

[19] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1997.

[20] Itasca Consulting Group INC. The manuals of particle flow code in 2-dimension. Version 3.1, Minneapolis, 2004.

[21] AHMADI M M. Analysis of cone tip resistance in sand[D]// Vancouver: University of British Columbia.

[22] HOULSBY G T, HITCHMAN R. Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand[J]. Géotechnique, **38**(1): 39－44.

[23] HOULSBY G T, WROTH C P. The influence of soil stiffness and lateral stress on the results of in-situ soil tests[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 13–18 August. 1989(1): 227－232.

[24] SALGADO R, MITCHELL J K, JAMIOLKOWSKI M. Cavity expansion and penetration resistance in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, **123**(4): 344－354.

[25] M Ro D. Michaud. The interpretation of static cone penetration tests in sensitive clays[C]// Proc of the European symposium on Penetration Testing, Stockholm: the Sweden Geotechnical Society, 1974: 323－330.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net