

上拔荷载作用下桩的颗粒流数值模拟

Numerical simulation of Particle Flow Code for pile under uplifting load

刘文白^{1,2}, 周 健²

(1. 上海海运学院 交通运输学院, 上海 200135; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 对桩进行了承受上拔荷载作用的数值模拟试验并与物理实物试验实测值作了对比。应用颗粒流理论及其 PFC2D 程序, 模拟研究了承受上拔荷载作用的桩及桩周土的细观力学特征, 桩的上拔位移和颗粒的分布和速度。随荷载增加土颗粒的受影响区由大到小, 且影响区边界逐渐明显, 颗粒排列发生变化, 形成了锥体状的受影响区域。根据土颗粒的分布、速度和位移的分布和变化, 确定土中滑裂面为锥体状; 数值模拟了上拔荷载、桩上拔位移与时步的关系, 并与宏观物理实物试验的实测结果作了对比分析; 综合确定了桩的极限上拔承载力。桩承受荷载过程中土颗粒细观结构变化的颗粒流仿真, 是关于土体的细观力学特征与宏观力学响应相关联的初步研究。

关键词: 上拔荷载; 桩; 颗粒流; 数值模拟; 细观力学

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0516-06

作者简介: 刘文白(1955-), 男, 上海海运学院教授, 博士, 主要从事岩土工程和港口结构工程方面的教学与研究工作。

LIU Wen-bai¹, ZHOU Jian²

(1. Department of Communications and Transportation, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Piles under uplifting load were tested with numerical simulation method, and the results of numerical simulation tests were compared with results of actual pile tests. Using PFC^{2D} (Particle Flow Code in 2 Dimensions), meso-mechanical characteristics of sand particles were simulated numerically, and distribution and velocity of sand particles as well as uplifting displacements of pile were studied. It was found that with increase of uplifting load the sizes of affected zone of particle decrease from large to small, the arrangements of particles were changed, the affected taper zone of particle was formed, and the corresponding taper fractured surface can be determined. The relations between uplifting load, displacement and time were simulated numerically and compared with the results of actual pile tests, and the ultimate uplifting bearing capacity was defined. The numerical simulation of particle flow for soil around piles under uplifting load is just an initial study on meso-mechanical characteristics and macro-mechanical response.

Key words: uplifting load; pile; Particle Flow Code; numerical simulation; meso-mechanics

0 引言*

关于承受上拔荷载的桩基础, 已经有了比较多的研究成果。Meyerhof(1968)根据试验得到的锥台形破坏体提出了基础的极限上拔承载力计算理论^[1], Lehane A. J. Bond 和 J. P. Omer(1993, 1995, 2003)研究了桩在高固结粘土中的位移性能、桩在砂土中摩擦机理以及进行了大规模的桩的试验^[2~4], G F António(2000) K. K. Hamouche(2000) 和 Hesham, (2000) 分别研究了粘土中锥形桩的承载性能及其上拔行为和桩的水平荷载与位移^[5~7]。但是对上拔荷载作用下桩土的细观力学特性研究较少。P. A. Cundall 在 1972 年提出了细观力学的颗粒流数值模拟分析方法, 颗粒流理论的 PFC^{2D} (Particle Flow Code in 2 Dimensions) 程序可以模拟颗粒(块体)单元的连接和破坏引起颗粒的分离, 模拟大变形问题和颗粒细观结构变化及其力学特性(Cundall, 1979, 1996, 1999, 1999)^[8~11]。Derr Jeng(2000) 和 R. G. Wan(2001) 研究了初始应力对砂土细观结构

的影响, 描述了砂土试样破坏时的孔隙率, 评价了砂土颗粒的方向性和砂土颗粒剪切范围的形成, 数值模拟结果与实验可视图像是一致的^[12, 13]。周健和池永(2000, 2001)用颗粒流理论及其 PFC2D 程序模拟分析了砂土试样的双轴试验和粘性土的平面应变试验^[14], 周健和刘文白(2003)应用颗粒流数值模拟试验了上拔荷载作用下扩展基础的工作过程, 研究了土颗粒的结构变化与分布^[15]。目前, 人们对上拔荷载作用下土体的细观结构变化及其与宏观力学特性的关联了解较少, 还没有用颗粒流方法对桩在上拔荷载作用下地基土的细观力学特性进行系统的细观力学特性研究。

对桩基础承受上拔荷载作用的能力及其细观力学特性进行分析研究。颗粒流数值模拟生成了砂土颗粒、桩基础和模型箱的墙体, 对模拟的桩分级施加了上

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59968001, 50178054); 上海教育委员会科学技术项目(03IK03)

收稿日期: 2003-08-18

表 1 砂土和桩的颗粒模型参数
Table 1 Parameters of particle model for sand and pile

颗粒类型	摩擦系数 μ	颗粒法向刚度 $k_n / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒剪切刚度 $k_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	重力加速度 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	颗粒直径 /m	半径放大系数	颗粒法向粘结强度 /N	颗粒切向粘结强度 /N
(土) 颗粒	7.0	1×10^7	1×10^7	10000	- 9. 81	0. 02~ 0. 03	1. 85		
(桩) 颗粒		1×10^{10}	1×10^{10}	2000	- 9. 81	0. 15		1×10^{10}	1×10^{10}

拔荷载, 模拟分析了桩的上拔位移和砂土颗粒的结构分布、速度和位移; 分析了加荷过程的颗粒排列变化、颗粒的位移和受荷载影响的区域; 确定了土中滑裂面、荷载位移关系。结果表明, 颗粒流数值模拟的土体细观结构的一些特性, 反应了土体的宏观力学响应特征, 表征了通过模拟土体细观结构变化反应土的强度和变形的可研究性。

1 颗粒流数值模拟试验

颗粒流方法从研究散体介质的细观力学特征出发, 使数值试样的力学响应逼近真实材料的力学性质。在分析中, 克服传统的连续介质力学模型的宏观连续性假设, 在土体承受上拔荷载增长过程的细观结构变化与宏观力学反应联系起来的研究中, 力图做出建立土体细观力学的强度、变形的初期探索和研究。为研究砂土颗粒的细观结构, 建立了合理地土颗粒模型。颗粒的模型必须有如下的特点: 能合理地反应土颗粒的基本几何特征, 如颗粒方向、棱角等; 必须有必要的简化, 能用不多的几类模型代表在真实试验中可能遇到的大部份土颗粒, 以减少计算量; PFC^{2D}的基本单元是球体和圆盘, 颗粒模型可以由这些基本单元构成。颗粒流数值模拟生成砂土颗粒、桩基础和模型箱的墙体, 对模拟的桩分级施加了上拔荷载。

首先定义墙体, 共有上、下、左、右 4 道墙, 墙体的接触刚度与土颗粒的法向接触刚度之比要适当。模型箱宽为 10 个单位, 箱高为 5.3 个单位。模型箱四壁(四道墙)的刚度, 左墙、右墙与下墙的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 均为 1×10^8 N/m, 上墙的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 均为 1×10^9 N/m。

接着 PFC^{2D}在上述给定的墙体范围内生成颗粒, 按随机位置将颗粒往区域内填充, 通过循环来消除试样内部非均匀应力。确定的砂土和桩的试样颗粒模型参数如表 1。表 1 中的颗粒指标仅仅是颗粒流数值模拟的介质颗粒的自定义指标, 与真实砂土颗粒的物理指标没有直接的定义关系。模拟试验桩由定义刚性重叠连接的大直径颗粒组成, 颗粒相互连接形成承受上拔荷载作用的桩。

由于颗粒流数值模拟的砂土颗粒、基础和模型箱

的墙体所定义参数指标之间的相关性, 各指标相互之间必须取得平衡, 才可以形成所模拟的试验条件, 图 1 所示为模拟的模型箱及箱内土体和基础经过自平衡后达到的模拟试验加荷前的状态, 图 1 中部的大颗粒的叠合为桩基础。

对模拟的桩基础施加竖直向上的上拔荷载, 上拔荷载 T 的量纲为“N”。经模拟试验观察, 首先估定极限上拔荷载 T_u , 然后根据估定的极限上拔荷载 T_u 将上拔荷载分级加荷。上拔荷载 T_0 至 T_7 分别为 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 440 kN。

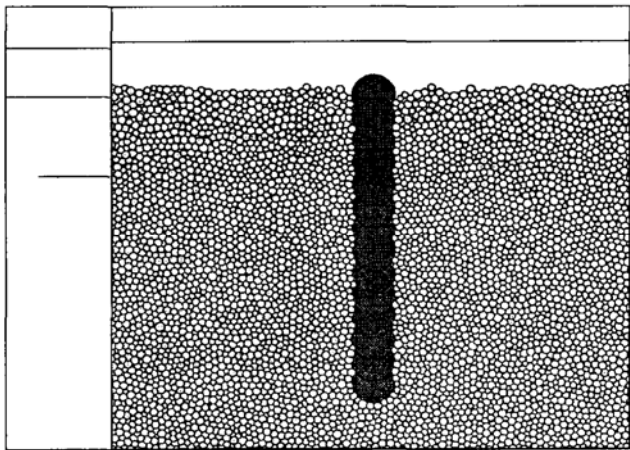


图 1 砂土、桩和模型箱的上拔试验模拟成型
Fig. 1 Numerical simulation on sand, pile and model box for uplifting tests

2 颗粒流数值模拟砂土地基桩基础的上拔试验

颗粒流数值模拟了砂土地基桩基础承受上拔荷载时的细观结构反应, 分析了颗粒的排列及其变化、速度及其变化和位移及其变化, 发现真实条件下砂土地基桩基础上拔试验的宏观力学现象与颗粒流理论的细观数值模拟的上拔试验中颗粒反应的相关联, 土的细观结构变化与土体的宏观强度和宏观变形相关联。通过分析土体所表现出来的各种变形和强度特性与其系统内部各种结构要素共同作用的影响和结果, 使数值模拟的细观结构反应逼近物理实物试验的定性和定量分析结果, 并建立了试验图像分析与数值计算的宏细观

仿真方法,对反应真实材料和环境条件的力学特性进行了初始阶段的研究工作。

在模拟试验过程中,记录每一级上拔荷载作用下基础的位移与时步的关系(上拔速率),在每一级荷载作用下达到平衡时的颗粒结构分布图、颗粒的速度图、颗粒的位移图,分析各级荷载作用下的颗粒分布及其细观结构变化。根据每一级荷载作用下达到平衡时的基础位移,可以得到荷载与位移关系曲线,根据荷载与位移关系曲线求得极限上拔荷载和极限上拔位移,研究细观结构的变化与真实条件下砂土试验宏观力学现象的联系与响应。图2~5为模拟桩基础在各级上拔荷载作用下的基础位移-时步图和土颗粒分布、速度、位移图。

2.1 上拔荷载与上拔位移关系的颗粒流数值模拟

图2表示各级上拔荷载-时步关系,时步可理解为在某级荷载下持续作用的时间增长。 $T_0 = 0$ 时,荷载-时步曲线末端为水平,表明在该级荷载下位移趋于稳定; $T_2 = 1.0 \times 10^5$ N时,曲线为凸曲线,表明在时步末段位移速率减小; $T_5 = 2.5 \times 10^5$ N时为斜直线,位移速率均匀; $T_6 = 3.0 \times 10^5$ N时为凹曲线,表明时步末段位移速率加速;以凸曲线和凹曲线之间的荷载为土体破坏荷载的判定值。考察每一级上拔荷载作用下相应的稳定位移,图8(a)表示了桩的分级荷载与位移的数值模拟曲线,图中横坐标为“2”所列各分级荷载,纵坐标为各分级荷载作用下相对应的最大位移。根据荷载与位移关系曲线、时步与荷载关系曲线、颗粒分布图分析,在荷载 $T \geq 2.5 \times 10^5$ N时,模拟桩上抬,致使土中有明显的颗粒松弛区域而形成了滑裂破坏面;对比图2中各图,时步-荷载曲线的形状发生改变,曲线形状由荷载较小的凸曲线型变化为荷载较大时的斜直线型,进而发展为荷载达到破坏的凹曲线型;速度图中的速度值分布有了明显的受影响区和未受影响区,而且区域边界界限分明。经对比及综合分析,确定桩极限上拔荷载 $T_u = 2.75 \times 10^5$ N,相应的极限上拔位移 $S_u = 0.625$ cm。图8(a)荷载位移的关系曲线的初始段,为直线段,表明土体的荷载-位移关系为直线变形关系,随荷载增加而位移的增加速率小;曲线的中间为过渡段,弯曲的曲线表明土体上拔位移速率增加,土体的抵抗上拔的能力逐渐增加到最大;曲线末端为下降段,位移速率增大,表明土体逐渐发生破坏。

2.2 加荷前后的颗粒结构排列变化

对比图3中上拔荷载作用下的颗粒分布图,随荷载的增加颗粒的排列会发生变化,在上拔荷载 $T_2 = 1.0 \times 10^5$ N 及其之前颗粒的排列未发生显著的变化,

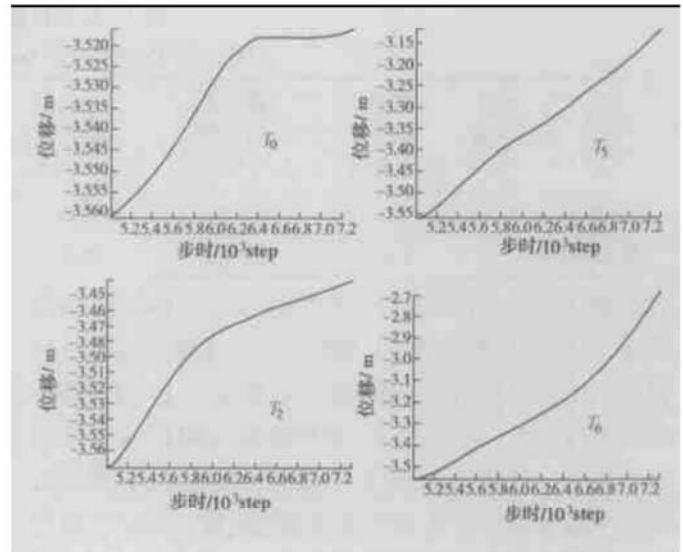


图2 颗粒流模拟的时步-基础位移

(T_0, T_2, T_5 和 T_6 分别为 0, 100, 250, 300 kN)

Fig. 2 Time- pile displacement of simulation tests using PFC^{2D}
土表面保持平面;荷载增加到 $T_3 = 1.5 \times 10^5$ N 桩端与土发生脱离;荷载增加到 $T_5 = 2.5 \times 10^5$ N 及其以后,颗粒的排列发生了显著变化,桩底脱离下部土体,土表面隆起,可以观察到土中出现滑裂面,滑裂面附近土颗粒的孔隙明显增大,土颗粒排列结构松弛。土体滑动破坏“面”,并非是一个数学定义厚度为零的“面”,而是有一定的厚度。在颗粒流数值模拟的二维平面图中,滑动破坏“面”,表现为有一定宽度的滑动破坏“带”,可以称其为“剪切带”,见图6的颗粒结构排列局部放大图,荷载 $T_5 = 3 \times 10^5$ N,颗粒的松弛区域沿桩端边缘至土表面是具有一定宽度的滑动区域。

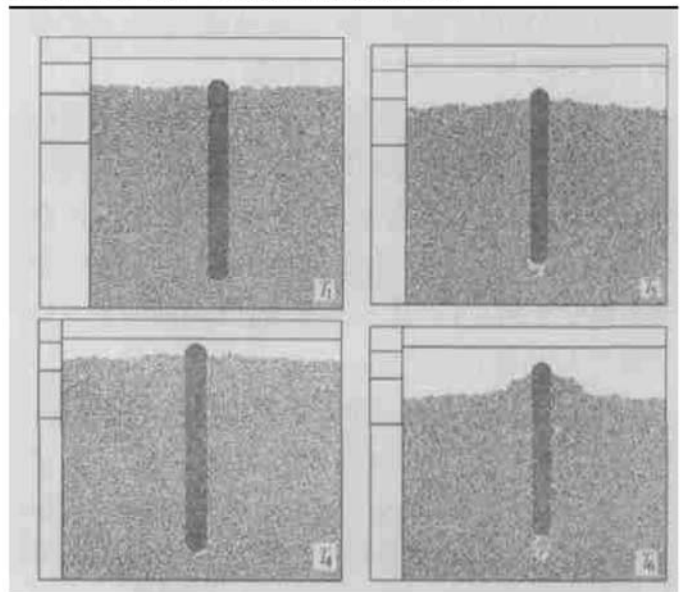


图3 颗粒流模拟的颗粒分布

(T_1, T_4, T_5 和 T_6 分别为 50, 200, 250, 300 kN)

Fig. 3 Particle distribution of simulation tests using PFC^{2D}

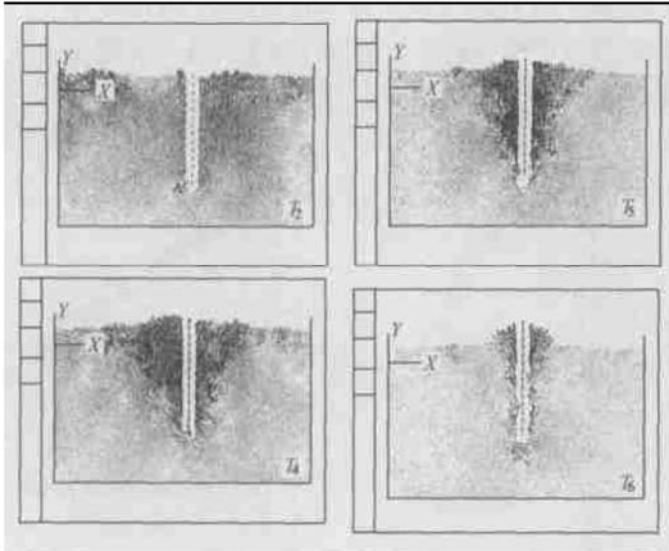


图4 颗粒流模拟的颗粒速度分布

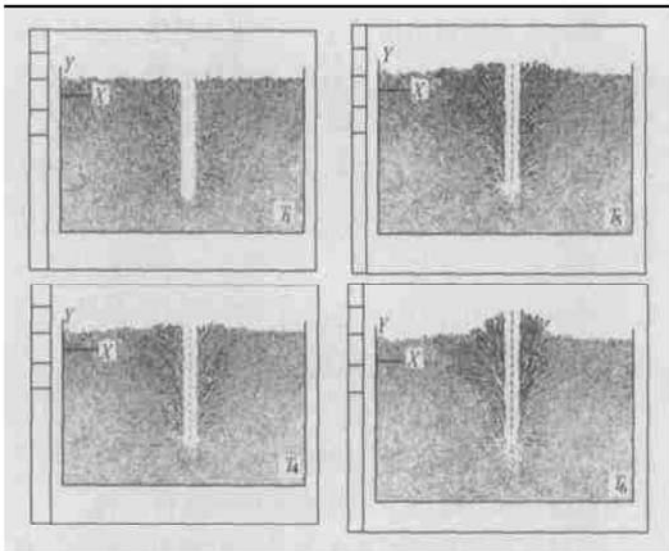
(T_2, T_4, T_5 和 T_6 分别为 100, 200, 250, 300 kN)Fig. 4 Particle velocity distribution of simulation tests using PFC^{2D}

图5 颗粒流模拟的颗粒位移分布

(T_1, T_4, T_5 和 T_6 分别为 100, 200, 250, 300 kN)Fig. 5 Particle displacement distribution of simulation tests using PFC^{2D}

2.3 颗粒位移和位移分析

从图4和图5的颗粒速度和颗粒位移图可以分析出,受上拔荷载影响的颗粒为一个比较固定的区域,沿桩长的范围有一倒锥台状的区域,该区域内颗粒的位移和速度与周围土体的位移和速度不同。随荷载的增加,受上拔荷载影响的倒锥台区域的范围逐渐减小,而区域的边界逐渐明显。随荷载的增加,这一倒锥台区域内的颗粒的位移量和速度值明显增大,与区域外的颗粒位移和速度有明显的区别。尤其以颗粒的速度更为明显,上拔荷载 $T_2 = 1.0 \times 10^5$ N 时,受荷载影响范围大,受影响区无明显边界; $T_4 = 2.0 \times 10^5$ N 时已经出现一倒锥台的速度较大的区域,区域边界明显;上拔

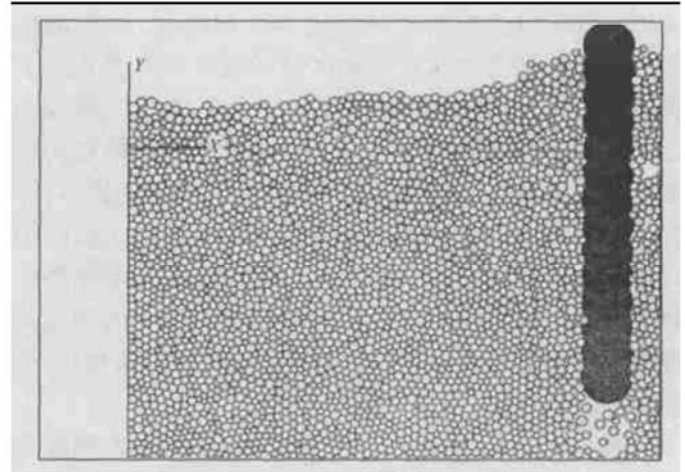
图6 颗粒流模拟的颗粒分布局部放大($T_6 = 3.0 \times 10^5$ N)

Fig. 6 Enlargement of particle distribution of simulation

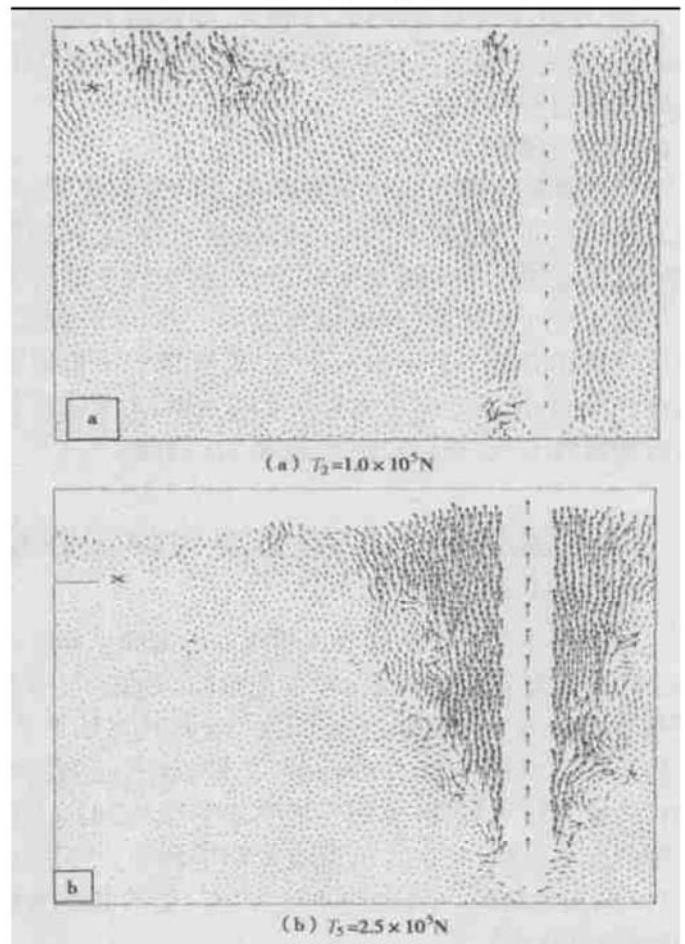
tests ($T_6 = 3.0 \times 10^5$ N) using PFC^{2D}

图7 颗粒速度变化

Fig. 7 Enlargement of distribution of particle velocity

荷载 $T_6 = 3.0 \times 10^5$ N 时的影响区域要小于 $T_5 = 2.5 \times 10^5$ N 时,倒锥台形状影响区域内的颗粒速度大,颗粒速度有统一的向上的方向性,而区域以外的颗粒速度为零,区域的分界面明显,倒锥台的土表面隆起。对比荷载等级较小($T \leq 2.0 \times 10^5$ N)时,受上拔荷载影响的区域要大于荷载等级较大时的影响区域,而且上

拔荷载较小时受影响区域的边界不很明显,颗粒的位移方向和速度方向在受影响区域的边缘不是竖直向上而是斜向向外,表明在荷载较小时由于粒间位移较小而颗粒的咬合摩擦起到了应力的扩散作用,颗粒的位移从基础的中心向四周逐渐扩散,没有明显的边界;在荷载较大时由于桩的上拔量较大,使受影响区域内的颗粒间位移较大,使影响区域边界的颗粒滑动摩擦达到极限而使得影响区域的边界很明显。图5的颗粒位移图有相同的分析结果;随上拔荷载增加,受影响区逐渐向桩周围收拢,形成明显的影响区。

图7(a),(b)分别表示了荷载等级较小和荷载等级接近破坏荷载时颗粒速度分布图,图中箭头的长短表示速度值的大小,图中的“点”为速度值为零或极小。相比较,荷载较小时存在速度的分布范围广,但速度值较小,受影响区域大;在破坏荷载下,受影响区域的边界明显,且受影响区域的速度值较大,该边界可作为判定破坏滑动面的条件。

2.4 土中滑裂面

通过对颗粒排列变化和颗粒速度的分析研究,受荷载作用一部分颗粒有明显的疏松状态,判定颗粒结构明显疏松的位置为滑动破坏面;判定颗粒速度的突变位置为滑动破坏面,判定结果是同一的。判定的土中滑裂破坏面是一个倒锥台形状,破坏体的下部宽度与桩径相同,地表处破坏面有一定的宽度,滑裂破坏体接近倒锥台形状,锥台的侧表面为二次曲线。

3 颗粒流数值模拟与物理实物试验结果对比分析

研究土体在上拔荷载增长过程中的细观结构反应与土体的宏观反应的联系,考察文献[16]的砂土地基桩基础模型的上拔试验,上拔荷载与上拔位移的关系。桩的上拔试验实测值有4种试验条件,桩表面为粗糙的打入桩和压入桩,桩表面为光滑的打入桩和压入桩的荷载位移曲线,依次表示为图8(b)中标注数字为1、2、3、4的光滑曲线。图8(b)中标注“桩”的曲线为桩的数值模拟曲线。

图8(a)为桩的颗粒流数值模拟荷载一位移曲线,该曲线具备了物理实物试验的荷载位移曲线的一般特征,曲线的初始段为直线段,位移速率较小;中间段为弯曲段,位移速率增加;末段为下降段,位移速率剧增,表征土体已破坏。图8(b)中桩的数值模拟曲线与文献[16]的实测值曲线的对比,横坐标为无量纲荷载,表示各分级荷载 T 与相应极限上拔荷载 T_u 的比值 T/T_u ,纵坐标为相对位移,为各分级荷载 T 对应的上

拔位移 S 与 T_u 对应的极限上拔位移 S_u 的比值 S/S_u 。颗粒流数值模拟的荷载一位移曲线特征与实测曲线基本一致。

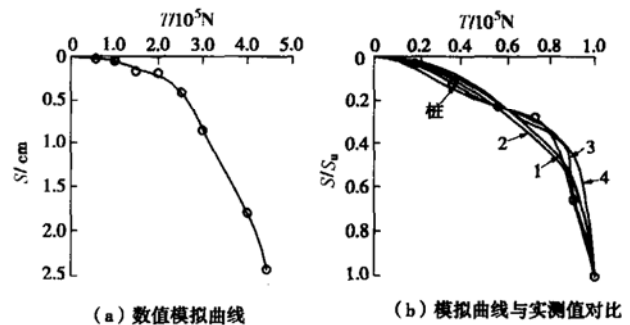


图8 上拔荷载一位移曲线

Fig. 8 Curves of uplifting load-displacement

4 结论

颗粒流理论数值模拟了砂土地基桩的上拔试验,对各级荷载下桩的上拔位移及土颗粒的分布、速度和位移进行了分析。

颗粒结构受上拔荷载的影响形成一个形状为倒锥台的区域。随荷载的增加,受影响区域范围渐小而边界渐明显而形成倒锥台区。受影响区内的颗粒位移与区域外相比而明显增大,在荷载增加到接近极限上拔荷载,土中出现颗粒排列疏松区,土表面隆起。

根据颗粒流数值模拟结果的颗粒排列疏松、速度值的突变位置,判定土中滑裂破坏面是同一的。判定土中滑裂破坏体是一个二次曲线的倒锥台形状。

根据颗粒流数值模拟的荷载一位移曲线确定了极限上拔荷载和极限上拔位移,其曲线特征与物理实物试验的荷载一位移曲线基本一致。

颗粒流数值模拟的上拔荷载、桩位移与颗粒分布、速度的细观力学特征的变化密切相关,与土体的一些宏观力学现象密切相关,可以通过颗粒流数值模拟土体细观结构变化对土的宏观强度、变形以及土与结构物的相互作用进行研究。

参考文献:

- [1] Meyerhof G G, Admas J I. The ultimate bearing capacity of foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4): 225 - 244.
- [2] Lehane B M, Jardine R J, Bond A J, et al. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests[J]. J Geotech Engng, 1993, 119(1): 19- 35.
- [3] Bond A J, Jardine R J. Shaft capacity of displacement piles in a high OCR clay[J]. Géotechnique, 1995, 45(1): 3- 23.

- [4] Omer J R, Robinson R B, Delpak R, et al. Large-scale pile tests in Mercia mudstone: Data analysis and evaluation of current design methods[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, **21** (3): 167–200.
- [5] António G F, de Sousa Coutinho. Prediction of the horizontal load–displacement curves of pile groups based on the results of single pile tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*. 2000. **37** (5): 951–962.
- [6] Hamouche K K, S Leroueil, Roy M. Tension tests on wedge piles in sensitive clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37** (4): 918–925.
- [7] Hesham M, El Naggar, Jin Qi Wei. Uplift behaviour of tapered piles established from model tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(1): 56–74.
- [8] Curellal P A, Sdraok O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, **29**: 47–65.
- [9] Cundall P A. Particle Flow Code in 2Dimensions[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 1996.
- [10] Cundall P A. Particle Flow Code in 2-Dimensions fish in pfc [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 1999.
- [11] Cundall P A. PFC^{2D} Users' Manual (version 2.0) [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 1999.
- [12] Jang Delr Jeng, Frost David J. Use of image analysis to study the microstructure of a failed sand specimen[J]. *Canadian Geotechnical Journal*. 2000. **37**(5): 1141–1149.
- [13] Wan R G, Guo P J. Effect of microstructure on undrained behaviour of sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, **38**(1): 16–28.
- [14] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. *岩土工程学报*, 2001, **22**(6): 701–704.
- [15] 周建, 刘文白. 扩展基础上拔试验的颗粒流数值模拟[A]. 首届全球华人岩土工程论坛论文集[C]. 上海: 同济大学, 2003. 208–221.
- [16] Ahmed Shlash Alawneh, Abdallah I, et al. Tension tests on smooth and rough model piles in dry sand[J]. *Canada Geotechnical*, 1999, **36**: 746–753.

《深基础工程特殊技术问题》一书已出版

史佩栋等编著、孙钧院士主审的《深基础工程特殊技术问题》一书已于2004年6月由人民交通出版社出版。

本书全面整合了近20余年来我国工程界对深基础工程领域的一系列热点难点问题通过艰苦探索所取得的主要研究成果,其中着重就深基础与环境保护、地下连续墙的逆法设计施工、特大沉井的设计施工、钻孔桩的后压浆技术、嵌岩桩的承载性状与设计施工、静压桩的技术特点、偏斜缺陷桩的分析与处理、大吨位及困难条件下桩的静载试验技术、超长水泥土搅拌桩的研究与应用、深大基坑施工变形的智能预测与控制 and 可

视化处理、深厚软基处理新技术、小桩新技术等10余个主要问题作了详细论述,并对深基础工程施工所产生的诸多土力学问题作出了深入的理论分析与诠释。因此,本书是对深基础工程学科既有内涵的较系统的发展与延伸。

本书由史佩栋及国内10余位著名深基础工程专家合作编著,可供建筑、桥梁、市政、港工等领域从事深基础工程科研、设计、施工、检测、监理等工作的科技人员,以及高校有关教师、研究生参考应用。全书共分19章,计85万5千字,16开,840页,每册人民币72元。

(史佩栋 供稿)