

静压沉桩全过程准静态分析

解子腾

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了提高静压沉桩模拟的计算效率,同时改善网格的形态提高计算精度,利用 ABAQUS/Explicit 和 ALE 方法实现了对静力压桩的全过程准静态分析。并且对沉桩的总阻力进行了敏感性分析,研究了桩土摩擦系数、土体的弹性模量和内摩擦角对不同贯入深度沉桩总阻力的影响。研究结果有助于增强对沉桩总阻力和桩基承载力的理解。

关键词:静压沉桩;准静态分析;敏感性分析;显式求解

中图分类号:TU441

文献标识码:A

Quasi - static analysis of penetrating jacked piles

XIE Ziteng

(1. College of civil and transportation engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the computing efficiency of the simulation for jacked piles and to improve the shape of the deformed mesh which has a significant influence on the calculation accuracy, ABAQUS/Explicit module and ALE adaptive meshing are used to achieve the quasi - static analysis of penetrating jacked piles. Meanwhile, a sensitivity analysis is performed on pile - soil friction, the elastic modulus and internal friction angle of the soil.

Key words: jacked pile; quasi - static analysis; sensitivity analysis; explicit integration

由于数值模拟可以获得静力压桩过程中完整数据,增强对施工过程中周围土体力学机制的理解,近年来其在静力压桩的研究中得到广泛应用。然而,土体行为非线性、土体大变形及桩土摩擦接触的非线性往往引起土体单元网格严重扭曲,使得计算很难收敛。以往的研究,大多是假设桩端已位于土体预定深度而忽略了预定深度前桩位贯入对周围土体应力的影响^[1-2]。近年,盛岱超^[3-5]利用大位移摩擦接触理论和更新的拉格朗日网格列式法实现了桩从地面开始贯入的全过程,但收敛需要非常小的增量步,计算相当慢,且网格的划分需要充分的经验,桩土的摩擦系数也只能取 0.4 以下范围。为了提高静力压桩模拟的效率、改善变形后的网格形态,本文采用 ABAQUS/Explicit 模块和 ALE 技术模拟了静力压桩从地面到预定深度的贯入全过程。考虑到静力压桩原是稳态的贯入过程,贯入速度只有 1 ~ 2 m/min,以实际的时间尺度计算将无法发挥显式

动力分析的优势,本文在保证加速度效应可以忽略的情况下尽可能的减小静力压桩的时间,实现了静力压桩的准静态分析;同时,利用文中数值模型,研究了土体的弹性模量、摩擦角等参数以及桩土摩擦系数对沉桩阻力的影响。

1 准静态分析简介

一般而言,准静态分析(Quasi - static analysis)是指用显式动力学近似求解静态问题的方法。显式求解方法最初是为了求解高速冲击问题,在这类问题的求解中惯性发挥了主导作用。对于静态问题,显式求解方法也已证明是有价值的,尤其是在解决复杂接触问题时,显式求解的优势更加明显。

然而,显式求解方法应用于静态问题的求解还需一些特殊考虑。静态问题是个长时间过程,在其固有时间尺度进行显式求解显然不合适。一般而言,可以假定,对一个准静态过程用其固有

间进行分析可以忽略其动力效应,得到整体变形即准确的静态结果;当分析时间过短(即加载速率过快)则会使惯性力占主导地位,出现局部变形而失真。那么一定存在一个可以忽略动态效应的尽可能短的时间尺度,以该时间尺度进行准静态分析则可以提高计算的效率,同时得到可接受的准静态结果^[6]。

在静态问题中,一般结构的响应由结构的最低阶模态控制。所以只要知道结构的最低阶频率和对应的周期,就可以估算出适当的静态响应所需的时间。本文在模拟静力压桩前,先对土层进行了频率分析,计算出土层的最低阶频率大概在 2 Hz 左右,对应的周期大概 0.5 s。为了却保能够获得准确的准静态计算结果,本研究中将分析时间取为最低阶频率对应周期的 10 倍,即 5 s。

2 有限元模型

2.1 模型尺寸及参数

一般认为静力沉桩受力是空间轴对称的,因此本文采用用轴对称有限元建立以桩轴线为对称中心的数值模型。桩长 25 m,桩径 0.5 m;土层的深度取 36 m,宽度取 20 m。桩土都采用四节点减缩积分单元(CAX4R),并设置沙漏控制。对称网格模型及尺寸如图 1 所示。考虑到计算的效率和收敛,假定桩端为 60°的尖角。同时,为了使模拟更接近桩端土体被向下和侧向压缩挤开的实际情况,在模型桩轴线处预留 10 mm 的间隙。相对于 0.5 m 的桩径,10 m 间隙的影响可以忽略不计。

土体的计算采用岩土工程中常用的摩尔库伦(Mohr - Coulomb)本构模型;由于预制混凝土桩弹性模量大概 30 GPa 以上,远大于周围土体的弹性模量,相对土体而言可考虑为刚体。具体的性质参数如表 1。

表 1 桩土模型参数

Tab. 1 Parameters of the pile and soil

	弹性模量 E_s/MPa	泊松比 μ	密度 kg/m^3	摩擦角 $\Phi/^\circ$	粘聚力 c/kPa
桩	40 000	0.25	2 500		
土	80	0.4	2 000	25	15

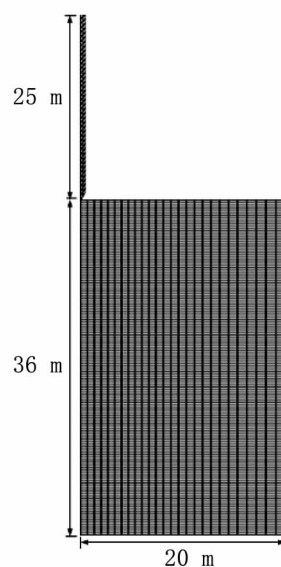


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

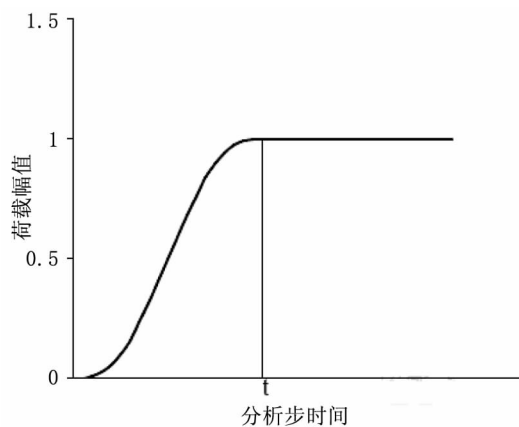


图2平滑分析步幅值曲线

Fig. 2 Smooth step amplitude

2.2 边界条件

土层的下端约束竖向位移,右端约束水平位移。在静力压桩之前先用 ABAQUS 的地应力分析步(Geostatic Step)建立土层的初始地应力场。考虑到预制混凝土桩的刚度相对于土大近 3 个数量级,对桩进行刚体约束,将桩的单元节点耦合至一参考点,整个桩的位移由参考点控制。整个贯入过程采用位移控制,参考点的水平与旋转自由度被约束以保证桩竖直贯入。由于静力压桩的实际情况是贯入起始和结束速度都为 0,为了保证模拟更接近实际情况,同时减小动力效应,位移加载采用平滑分析步幅值曲线(Smooth Step),如图 2。加载曲线的起始的速度与加速度都为 0。

2.3 桩土接触

ABAQUS/Explicit 中拥有比 ABAQUS/Standard 中更为完善的接触算法,接触作为一种约束被引入,可以在模拟运行的过程中随意引入或解除。因为一个接触面上的节点可能接触到对面接触面上的任意一个面,ABAQUS/Explicit 必须采用先进的搜寻算法来追随接触面的运动。在默认情况下,ABAQUS/Explicit 采用平衡的主控-从属算法,而法向的接触约束则采用能够获得一致接触条件的动态接触公式。平衡主控-从属接触比单纯主控-从属接触更费时,但是它最大程度的减少了接触物体间的相互侵入,从而,在多数情况下提供了更精确的结果^[6]。本文在桩和土之间建立一组采用平衡主控-从属算法的接触对,法向接触约束则采用默认的动态接触公式。

接触面的相互作用模型包括两个方面:一是接触面的法向作用,二是接触面的切向作用。对大部分接触问题来说,接触面的法向行为十分明确,即两物体只有在压紧状态时才能传递法向压力 p ,若两物体之间有间隙 (clearance) 时不传递法向压力,这种法向行为在 ABAQUS 中称为硬 (hard) 接触,避免了可能发生的穿透现象^[7]。

接触面的切向滑移受摩尔库伦 (Mohr - Coulomb) 摩擦准则控制。当接触面处于闭合状态 (即有法向接触力 p) 时,接触面可以传递切向应力,或称摩擦力。若摩擦力小于某一极限如 τ_{crit} 时,ABAQUS 认为界面处于粘结状态;若摩擦力大于在 τ_{crit} 之后,接触面开始出现相对滑动变形,称为滑移状态。其中,

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (1)$$

式中, μ 是摩擦系数,可以随剪切速率、温度或其他场变量变化; P 是法向接触力 p ; τ_{crit} 是极限剪应力。

Kulhawy (1991)^[8] 建议桩土之间的摩擦角取土体内摩擦角的 0.8 ~ 1.0。本文取值为土体内摩擦角的 0.8。

2.4 任意拉格朗日-欧拉方法

ALE 自适应网格划分方法允许网格和物质点分离,即便在进行桩位贯入分析这样的大变形问题也可以避免网格严重扭曲而获得高质量的网格。同时 ALE 自适应网格技术可以使分析比常规的拉格朗日网格法更加高效、精确可靠^[9]。

以往的研究表明^[10-11],在桩径向 1.5 ~ 2D 范围的可以发现土体明显的变形;超过 4D 的范围,桩贯入对土体的影响可以忽略。本文对桩径 6 倍范围内的土体采用 ALE 网格技术,在提高网格质量和计算精度的同时减小计算成本。

3 结果与分析

3.1 模型验证

图 3 是桩尖贯入 2、10、20 m 时土体网格变形图。从图中可以明显的看出网格的形态良好,并未出现类似隐式求解中严重扭曲的网格,且良好的网格形态可提高计算精度。

图 4 是桩尖贯入 8 m 时土体的应力云图。径向应力云图显示,在桩端附近径向应力 S11 达到最大值 3 600 kPa,在桩端附近大概 5D 范围的球状区域应力较大;而竖向应力 S22 则是在桩尖下某处达到最大值 5 000 kPa 左右,同样存在一处竖向应力较大的球状区域;土体的周向应力 S33 的最大值相比 S11, S22 而言最小大概为 2 400 kPa,但其影响范围较大;剪应力云图在桩端处呈 X 型,且交点位于桩端,剪应力最大值大概 2 000 kPa 左右,出现在桩端处。应力云图所呈现的规律和以往的文献^[1-3]一致。

3.2 沉桩总阻力

利用文中数值模型分别计算得到不同桩土摩擦系数、弹性模量、内摩擦角情况下沉桩总阻力随桩尖贯入深度变化规律如图 5 所示。假定桩土摩擦系数、弹性模量、内摩擦角独立于其他变量,计算中分别变化这三者,研究桩土摩擦系数、弹性模量、内摩擦角对沉桩总阻力的影响。(a) 的计算模型中,土的弹性模量 $E = 10$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$,其他参数与初始模型相同,分别按无摩擦,摩擦系数为 0.1、0.2、0.3、0.4 计算;(b) 的计算模型中土的内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$,桩土摩擦系数 $\mu = 0.36$,其他参数与初始模型相同,分别按土的弹性模量取 2、5、10、40、80 MPa 计算;(c) 的计算模型中桩土摩擦系数 $\mu = 0.4$,土的弹性模量 $E = 10$ MPa,其他参数与初始模型相同,分别按土的内摩擦角取 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 计算。

从图 5(a) 可以明显的发现,摩擦系数越大,沉桩总阻力越大,但是摩擦系数越大,沉桩总阻力增加的趋势却越小,摩擦系数在 0.3 ~ 0.4 时,沉桩

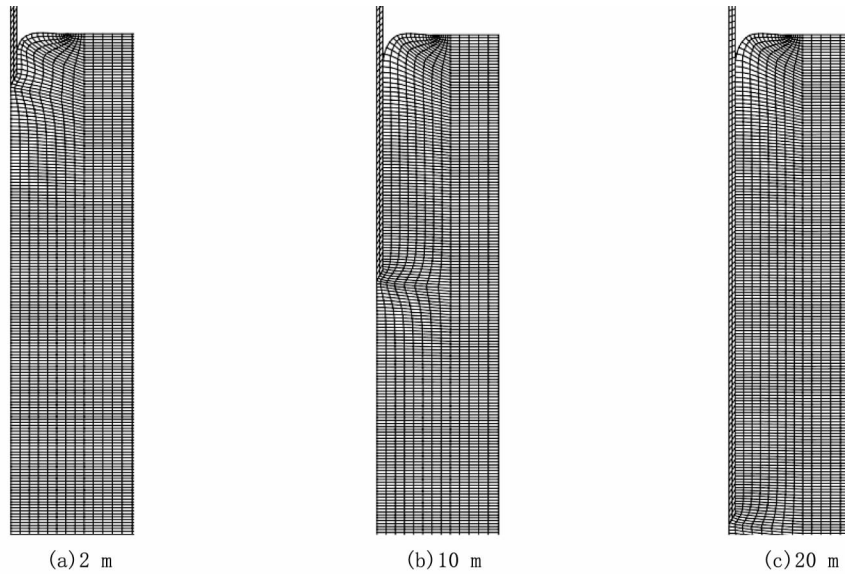


图3 桩尖不同贯入深度时网格变形图

Fig.3 Deformed mesh at various depths of the pile cone

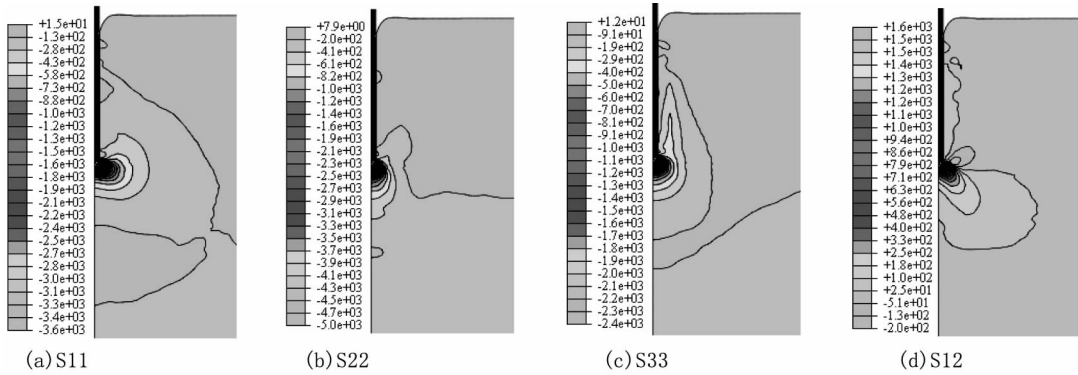


图4 桩尖贯入8 m 时的应力云图 (单位: kPa)

Fig.4 Stress contours at the depth of 8 m (kPa)

总阻力的增加已经很小;桩尖贯入深度越大,摩擦系数对沉桩总阻力的影响越明显。另发现,存在摩擦的情况下,沉桩总阻力随深度的变化曲线呈反 S 型即斜率先减小后增大;无摩擦的情况,沉桩总阻力在贯入后期随着深度减小可能是由于桩尖贯入导致周围土体弱化所致。

从图 5(b)、(c) 土体弹性模量和内摩擦角对沉桩总阻力的影响规律与摩擦系数对沉桩总阻力的影响规律相似,但对沉桩总阻力的影响程度有

些差异。以桩尖在地面下 15 m 处桩受到的总阻力计算发现,当内摩擦角增加 1 倍时,桩受到的总阻力增加 87.5 %;桩土摩擦系数增加 1 倍时,桩受到的总阻力增加 42.2 %;弹性模量增加 1 倍时,桩受到的总阻力只增加 4.4 %。尽管其他参数的差异可能会对计算的比例有影响,但可以粗略的认为,土体内摩擦角对沉桩总阻力的影响最大,桩土摩擦系数次之,土体的弹性模量对沉桩总阻力的影响最小。

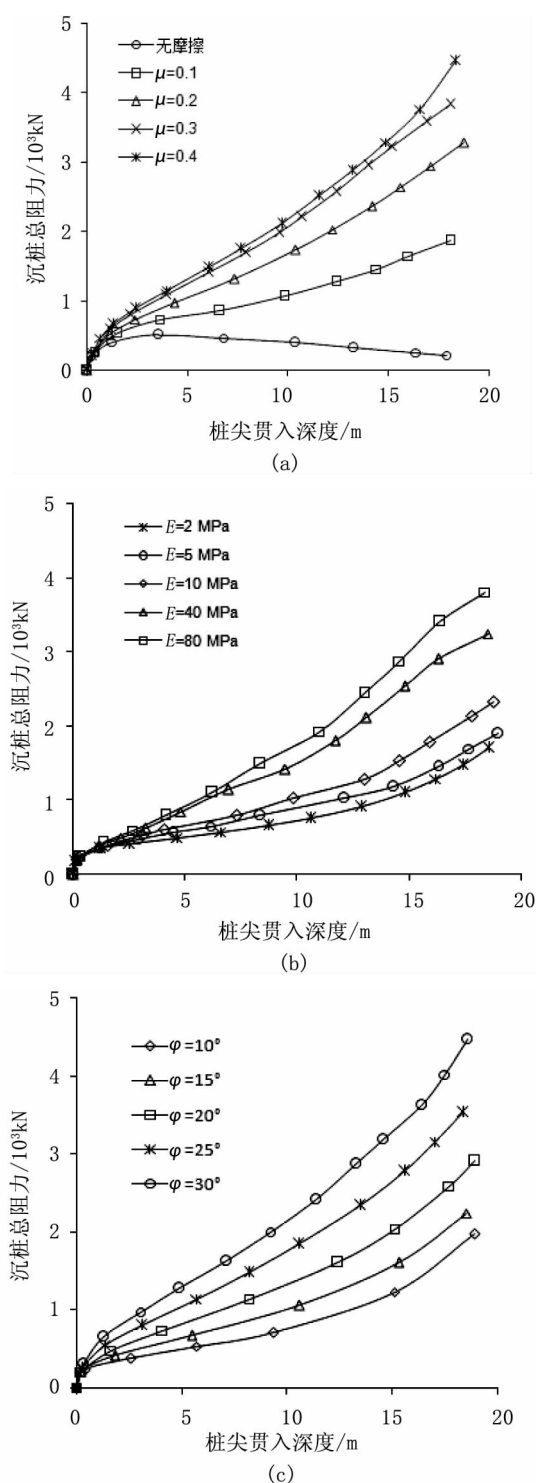


图5 沉桩总阻力随桩尖贯入深度变化曲线

Fig.5 Total pile resistance against the depth of the pile cone

4 结论

1) 土体的内摩擦角对沉桩总阻力的影响程度

最大,桩土的摩擦系数次之,土体弹性模量居末;

2) 桩尖贯入的深度越大,桩土摩擦系数、土体的弹性模量和内摩擦角对沉桩总阻力的影响越大;

3) 随着桩土摩擦系数、土体的弹性模量和内摩擦角的增大,其对沉桩总阻力的影响程度减弱。

参考文献:

- [1] 张明义, 邓安福, 干腾君. 静力压桩数值模拟的位移贯入法[J]. 岩土力学, 2003(1): 113-117.
- [2] 戚科骏, 张云军, 王旭东, 等. 考虑大变形的静力压桩数值模拟[J]. 岩土力学, 2005(Z1): 129-132.
- [3] SHENG D, EIGENBROD K D, WRIGGERS P. Finite element analysis of pile installation using large-slip frictional contact [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(1): 17-26.
- [4] SHENG D, WRIGGERS P, SLOAN S W. Improved numerical algorithms for frictional contact in pile penetration analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(6): 341-354.
- [5] KATHRIN A. FISCHER, DAICHAO SHENG, ANDREW J. ABBO. Modeling of pile installation using contact mechanics and quadratic elements [J]. Computers and Geotechnics, 2007, 346.
- [6] 庄茁等译. ABAQUS/Explicit 有限元软件入门指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [7] 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.
- [8] KULHAWY F H. Drilled shaft foundations [M]. Foundation engineering handbook. Springer US, 1991.
- [9] HIBBITT H, KARLSSON B, SORENSEN P. Abaqus Analysis User's Manual Version 6. 10 [J]. Dassault Systèmes Simulia Corp: Providence, RI, USA, 2011.
- [10] vAN DEN BERG P. Analysis of soil penetration [M]. TU Delft, Delft University of Technology, 1994.
- [11] AHMADI M M, BYRNE P M, CAMPANELLA R G. Cone tip resistance in sand: modeling, verification, and applications [J]. Canadian geotechnical journal, 2005, 42(4): 977-993.

(责任编辑 李军)