

桩靴贯入对固定平台基础扰动的数值模拟

吴永韧, 鲁晓兵

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 利用有限元软件 LS-DYNA 对桩靴贯入产生临近主平台基础的扰动问题进行了数值模拟。研究了桩靴贯入过程中土体和临近主平台桩基础的变形和应力变化, 从而分析主平台基础承载力的变化。结果表明, 土体表面沉陷区为失效区周围两倍半径区域; 桩靴压入到一定深度后, 上部土体发生回弹, 且由于桩基的影响, 桩靴左右两侧土体竖向和横向位移不对称, 埋有桩基侧的土体竖向位移略小。

关键词: 桩靴; 固定平台; 桩基础; 承载力

在维修固定式海洋工作平台时常常用到自升式或半潜式平台作为临时工作平台, 桩靴基础 (Spudcan) 又常常作为这种临时工作平台的基础。Spudcan 贯入土层将造成土体的扰动, 影响临近主平台基础的承载力, 带来安全隐患。

前人针对该问题进行了一些探索性研究, 通过理论分析和数值计算解决该问题困难较大且很难得到准确结果^[1~3]。原型观测和足尺模型实验时间长、费用高, 目前还没有见到这方面的结果。人们利用离心机实验进行了一些研究^[1,4,5], 由于该问题的复杂性和高实验成本, 实验数量少, 还不能获得普遍的规律。因此针对该问题, 还需要开展更进一步的研究。

桩靴压入对固定式平台基础的扰动是由于压入时周围土体受到扰动而产生大变形, 导致临近主平台基础承载力降低、平台破坏。

采用有限元软件 LS-DYNA 对桩靴贯入产生的临近主平台基础的扰动进行了动态数值模拟。首先将计算结果与离心机实验^[6,7]结果对照, 验证所采用的本构模型和数值模拟方法, 然后计算桩靴贯入过程中土体和临近主平台桩基础的变形和应力变化。

1 LS-DYNA 软件中算法的选择

由于桩靴压入挤压土体发生大变形, 土体单元网格发生畸变, 普通的隐式算法必然出现收敛问题, 而显式算法在计算收敛性方面优势明显, 所以选用显式有限元程序 LS-DYNA 进行数值模拟。

为了模拟桩靴压入土体的过程, 首先用下面三种方法进行试算以选定合适的方法。

1) 单元失效方法: 在桩靴压入过程中, 当单元应力(应变)超过一定值后, 令单元失效, 让桩靴穿透失效单元进一步压入土体。计算后发现这种方法有如下缺点: ①桩靴压入过程中单元突然失效使应力瞬间卸载, 土体中应力出现剧烈振荡, 从而桩基应力、变形也出现振荡, 与实际情况不符。②土体单元失效使应力卸载, 两侧土体、桩基向桩靴压入区倾斜, 这与实际情况相反。

2) 直接压入法: 土体采用理想弹塑性本构模型, 单元不允许发生失效, 即无断裂。当应力超过一定值后, 土体屈服, 可以发生任意大应变。计算后发现这种方法有如下缺点: 桩靴压入拉动土体表面向下凹陷, 由于桩靴与土体表面之间无法发生相对位移, 所以凹陷区的半径太大, 桩基也因凹陷区土体挤压发生极大变形, 与实验结果对比误差太大。

3) ALE (Arbitrary Lagrange and Euler) 算法: 首先, 材料网格以一个 lagrange 步变形, 然后 lagrange 单元的状态变量被映射或输送回到空间网格中。在计算过程中, 空间网格可以根据变形情况在空间任意调整运动。因此 ALE 在模拟大变形问题上优势明显, 而且在 LS-DYNA 中还可将 Euler 网格和 Lagrange 网格方便地耦合, 以处理不同物质之间在复杂载荷条件下的相互作用问题。

最后, 选用 ALE (Arbitrary Lagrange and Euler) 算法来模拟桩靴贯入土体过程及桩基-土-桩靴的相互作用。

2 模型及条件

2.1 计算域的选取

为方便对比, 计算中采用离心机实验原型数据, 地基土体尺寸为: 长×宽×高=50 m×50 m×26 m。单元为边长 3 m 的立方体。土体上方设置高 4 m 的真空网格 (void mesh)。真空网格与土体材料一致, 从而与土体共同组成 ALE 网格。桩靴、桩基采用 Lagrange 网格。桩基位于距离桩靴边缘一倍桩靴半径处, 见图 1。

联系方式: xblu@imech.ac.cn

2.2 接触及边界条件

桩靴、桩基和土体之间采用 DYN4 中的*CONstrained_LaGrange_in_Solid, (LS-DYNA 中用于描述 Lagrange 网格和 ALE 网格的相互作用的方法)。地基地部的边界设为固支, 即 $u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0$; 地基土体外侧边界为侧限边界条件, 即 $u_x = 0, u_y = 0$, 土体表面为自由面, 即 $\tau = 0, \sigma_x = 0, \sigma_y = 0$ 。

2.3 本构模型及加载方式

粘土修正的Cam-Clay模型, 应力应变曲线如图 2^[8]。砂土、桩靴及桩基采用弹性材料。具体土的本构参数见表 1。控制桩靴x、z方向位移, 保持桩靴在y方向以 0.5 m/s速度压入土体至 14.2 m处。

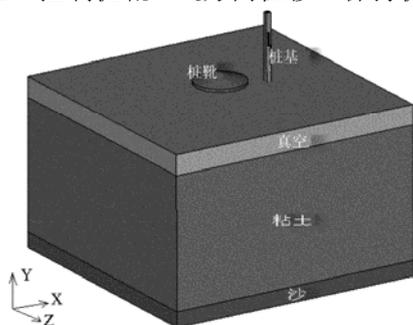


图 1 计算模型示意图

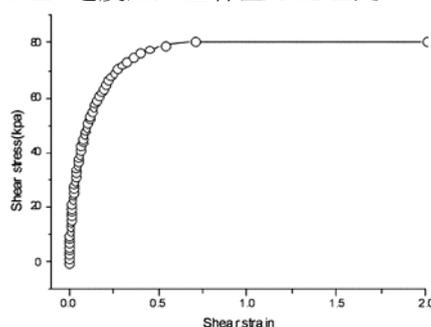


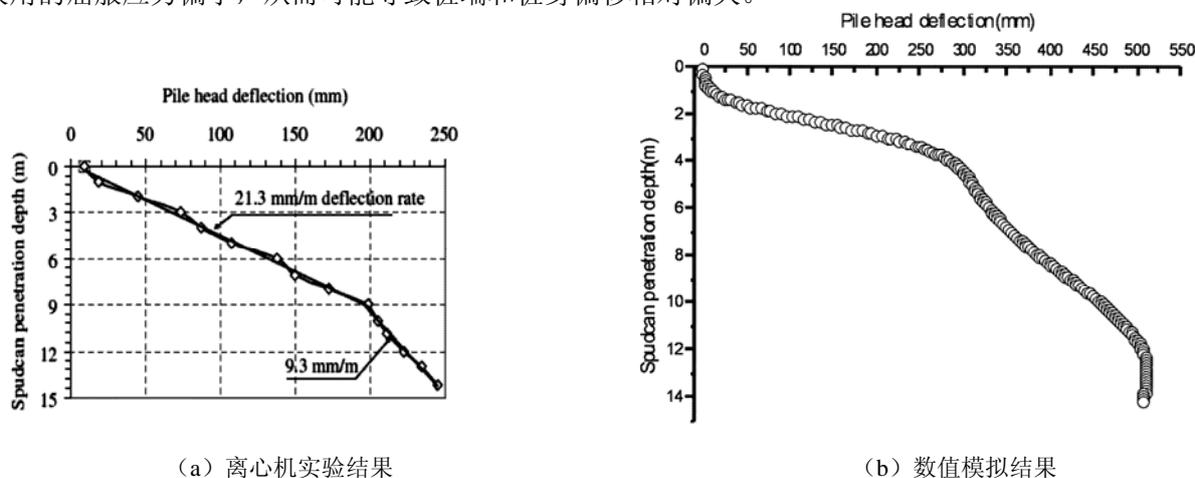
图 2 数值计算中土材料应力应变曲线

表 1 材料参数

本构参数	弹性模量 E/Pa	泊松比 ν	密度 / (g/cm^3)
砂土	0.10E+009	0.4	1.51
桩基	0.63E+011	0.3	7.8
桩靴	0.63E+011	0.3	7.8

2.4 数值计算结果与模型实验结果对比

桩靴压入深度—桩端偏移曲线如图 3。可以看出离心机实验和数值模拟结果在偏移趋势上较吻合。当桩靴压入到一定深度 (9 m) 后, 桩端偏移都明显变小。但是数值模拟结果要偏大一些。同样, 不同桩靴压入深度时桩身偏移如图 4。桩靴压深为 3 m、6 m 以及 9 m, 桩身偏移增量比较平均。当桩靴压深为 12 m、14.2 m 时, 桩身偏移增量较小。但是在数值上有一定差距。原因如下: ①根据离心机实验反推出原型中桩靴压入速度为 0.05 m/s。在数值模拟中, 为了减少计算时间, 将桩靴压入速度增大为 0.5 m/s, 由于惯性影响, 速度增大必然导致因桩靴压入引起的土体流动加速, 从而导致桩端和桩身偏移相对偏大; ②土体应力应变曲线采用拟合的修正剑桥模型应力应变曲线, 设围压恒等于一半桩靴压入深度处土层围压, 所以计算中采用的屈服应力偏小, 从而可能导致桩端和桩身偏移相对偏大。



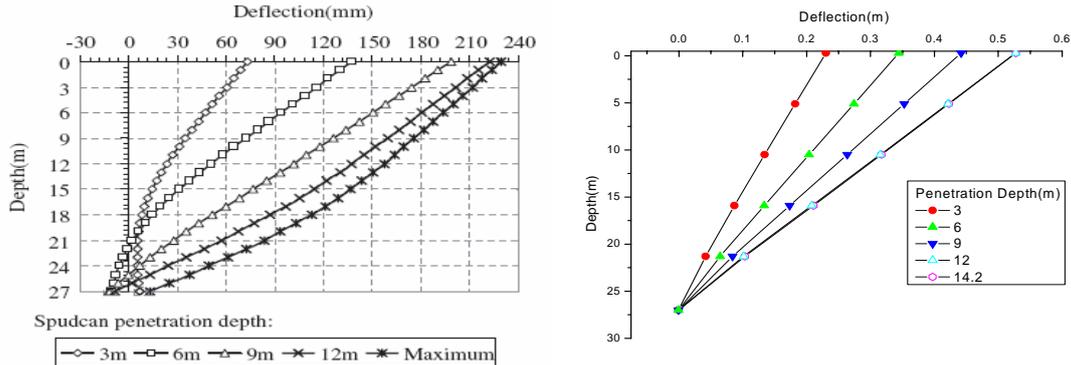
(a) 离心机实验结果

(b) 数值模拟结果

图 3 随桩靴压入深度变化的桩端偏移

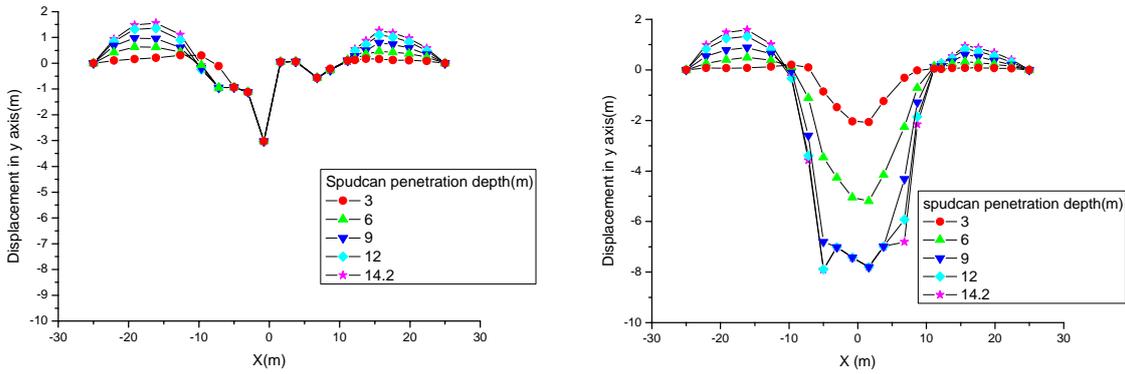
2.5 位移场分布

$Z=0$ 土体平面处竖向位移场如图 5，可以看出，竖向位移场受桩靴压入的主要影响区域为距离桩靴边缘一倍桩靴半径区域。在此区域内，土体竖向位移随桩靴压入深度变大而变大。13 m 深处土体竖向变形最大。在深 23.5 m 处，土体竖向变形较小，即在桩靴最大压深处土体竖向变形最大。最大桩靴压深下方约两倍桩靴半径深处土体受桩靴压入影响发生的竖向位移不大。距离桩靴边缘一倍桩靴半径外的土体发生向上竖向运动，随桩靴压入深度增大而增加。土体表面处向上竖向位移最大，且随土体深度变深而变小。在深 23.5 m 处，土体基本没有向上的竖向位移。同时可知，右侧土体（以 x 正方向为右，参照图 1）向上的竖向位移更小。造成两侧土体竖向位移不对称的原因是：桩基弹性模量较大，且在数值模型中与土体粘结在一起，所以桩基承载了大部分的竖向应力，其周围土体因桩靴挤压造成竖直向上的应力减小，相应的土体竖直向上的位移减小。

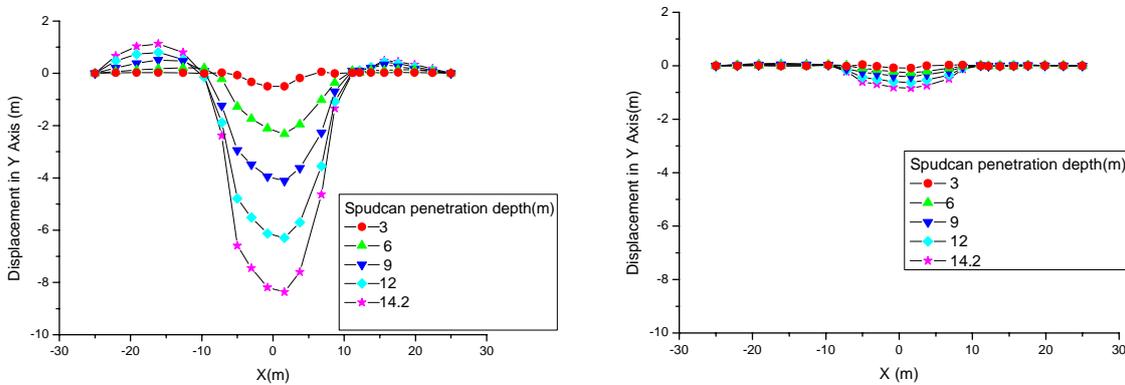


(a) 离心机实验结果 (b) 数值模拟结果

图 4 不同桩靴压入深度时桩身偏移



(a) 土体表面 (b) 6.5 m 处



(c) 13 m 处 (d) 23.5 m 处

图 5 不同桩靴压入深度下土体竖向位移

对 $Z=0$ 土体平面处横向位移场分别进行分析。如图 6 可知，在桩靴压入区左侧，土体发生的横向位移随与桩靴边缘距离增大而变小；22.1 m 处土体发生的横向位移很小。可得出：距离桩靴压入边缘一倍桩

靴直径外土体横向位移显著变小。同时可知，土体横向位移随桩靴压深增大而增大。当桩靴压深 9 m 以后，上层土体发生回弹。当桩靴压入一定深度时，桩靴下方土体受挤压向周围流动，促使其周围部分土体向桩靴上方的凹陷区回流，又由于粘土颗粒之间存在粘聚力，所以拉动其周围土体向凹陷区倾斜，从而形成回弹现象。对于桩靴压入区右侧，土体横向位移由于桩基的影响明显小于左侧土体的横向位移。桩基和桩靴压入区中间 ($x=7.1$ m) 在桩靴压深超过 9 m 后上方土体发生回弹。桩基右侧土体不存在土体回弹现象。其横向位移随桩靴压深增大而增大，随与桩靴压入区距离增大而变小。

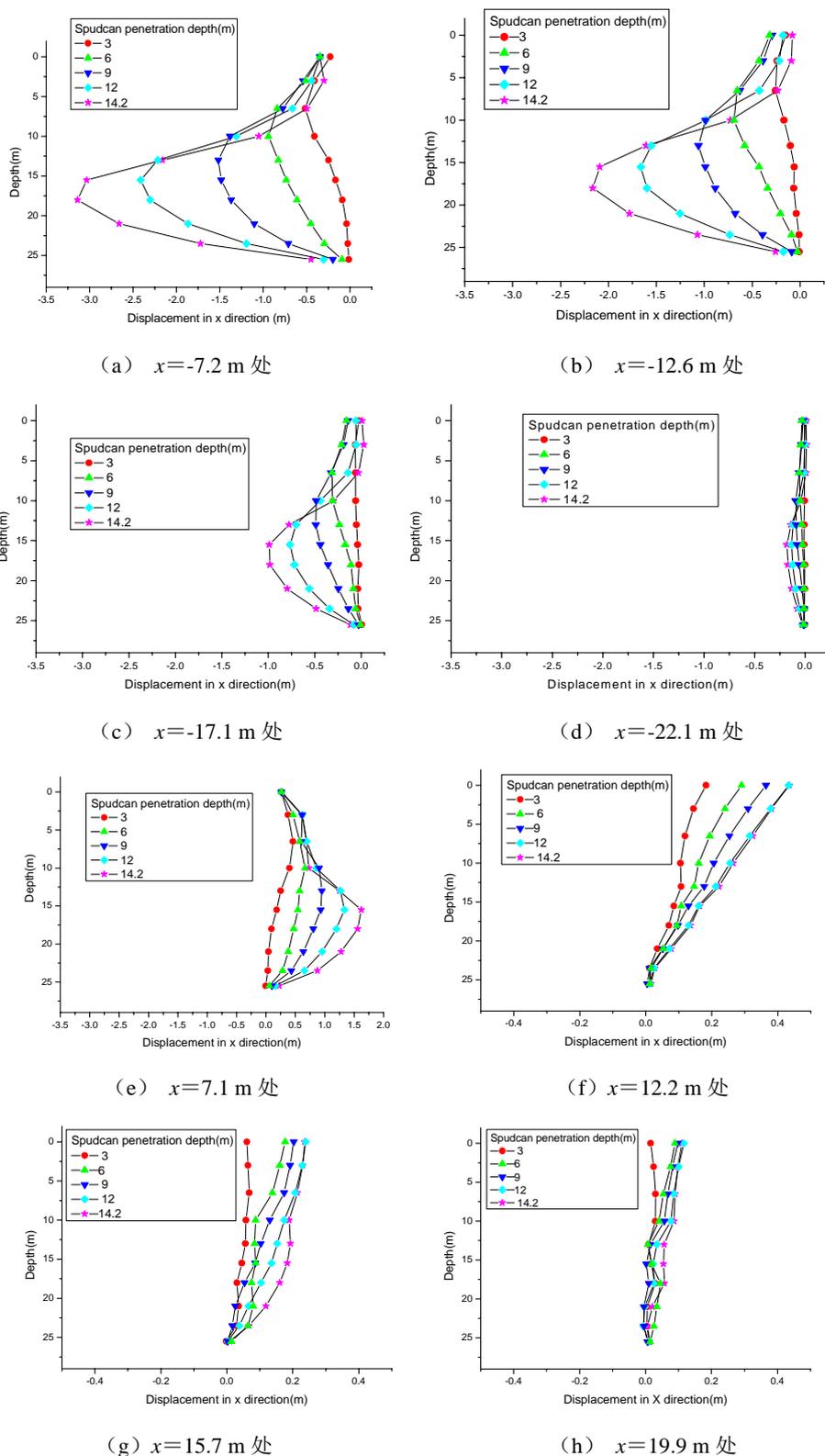


图 6 不同桩靴压入深度下土体横向位移

在桩靴压入区右侧,土体横向位移偏小及不存在土体回弹现象的原因如下:桩基弹性模量较大,且在数值模型中与土体粘结在一起,所以桩基承载了大部分的横向应力,其周围土体因桩靴挤压造成横向应力减小,相应的土体横向位移减小。同样,因为桩基承担了大部分的应力,桩靴右侧土体中很难形成回弹所需的应力,所以不存在土体回弹现象。

3 结 语

LS-DYNA 中的 ALE 算法可以克服土体大变形引起的网格严重畸变使计算无法进行的问题,从而可以动态模拟桩靴压入土体过程。计算结果表明:桩靴压入深度-桩端偏移及桩身偏移曲线和离心机实验结果在趋势上基本吻合,但在数值精度上有较大误差,这可以从减小桩靴压入速度到与实际接近的程度入手以减小误差。

土体表面沉陷区为失效区周围两倍半径区域;距离土面一倍桩靴半径处土体沉降区为失效区周围一倍半径区域;失效区正下方土面发生较大向上的纵向位移;失效区下方两倍半径处纵向位移较小。

桩靴压入到一定深度后,无桩基侧(桩靴左侧)、桩基和桩靴之间上层土体横向位移发生回弹现象。桩基右侧土体由于桩基影响无回弹现象。同样由于桩基的影响,桩靴左右两侧土体竖向位移不对称,且埋有桩基侧的土体竖向位移略小。

致谢: 得到中国科学院三期创新方向性项目(KJCX2-YW-L02)和国家自然科学基金项目(1077218)资助。

参考文献:

- [1] Amoco Corporation. Assessment of Jack-up Rig Soil Disturbance on Fixed Offshore Platform Foundations in the Gulf of Mexico[. 1987.
- [2] 刘占阁,王中栋,栾茂田. 钻井船基础压入对邻近平台桩基影响的有限元分析. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集,2003,1439-1442.
- [3] 丁红岩,刘建辉,张 超. 利用有限元法模拟较大桩靴拔出对筒型基础平台的影响. 中国海上油气,2004,16(5):353-356.
- [4] RJ Siciliano, JM Hamilton, JD. Murff, et al. Effect of jackup spud cans on piles. Offshore Technology Conference. OTC 6467, 1990,381-390.
- [5] YXie, CF Leung, Y K Chow. Effects of spudcan penetration on adjacent pile. 6th ICPMG '06, 2006, 701-706.
- [6] YXie, CF Leung, Y K Chow. Effects of spudcan penetration on adjacent pile. Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2006,530-535.
- [7] C FLeung, Y K Chow. Centrifuge Model Study of Spudcan-Pile Interaction. 6th ICPMG '06, 2006, 701-706.
- [8] 谭罗荣,孔令伟. 特殊岩土工程土质学. 北京:科学出版社,2006.