

桩靴连续贯入过程的动态模拟方法研究^①

周 龙¹, 刘 润^{1,2}, 郭绍曾¹, 彭碧瑶¹

(1.天津大学水利安全与仿真国家重点试验室,天津 300072; 2.港口岩土工程技术交通行业重点实验室,天津 300072)

摘要:采用 CEL 方法(耦合的欧拉-拉格朗日分析法)对比研究桩靴下沉速度不同对计算结果的影响,分析不同桩靴下沉速度下附近桩基础的响应,研究质量放大方法的适用性。结果表明:无桩时桩靴贯入速度不同对土体阻力影响较小,土体的破坏形态和剪应力水平略有不同;桩靴贯入速度对桩身水平位移影响较小,桩靴贯入速度越大,桩身最大应力越小;质量放大系数的增加对桩身最大位移的影响较小,但对桩身最大应力有较大影响,因此建议谨慎使用质量放大方法。

关键词: 桩靴; 桩基础; 贯入速度; 质量放大

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0460-007

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0460

A Dynamic Simulation Method for Continuous Spudcan Penetration

ZHOU Long¹, LIU Run^{1,2}, GUO Shao-zeng¹, PENG Bi-yao¹

(1.State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300072, China)

Abstract: The CEL method, which is widely used in the research on spudcan penetration, is a new simulation method. However, there are many questions which have not been answered, especially about the effect of penetration velocity and the mass scaling method. This paper firstly simulates two models with no piles which have different penetration speeds. Then, two models with square piles are also simulated with different penetration speeds. Additionally, the mass scaling method is verified. The simulation results show that the penetration speed has little effect on the soil resistance and more effect on the soil failure mode and shear stress. When the model has a pile, the horizontal displacement is relatively unaffected by the penetration speed, and the Mises stress of the pile increases with the penetration speed. The mass scaling factor also has little effect on the horizontal displacement of the pile. The Mises stress has an irregular relation to the mass scaling factor. Therefore, caution should be carefully taken when the mass scaling method is used.

Key words: spudcan; pile foundation; penetration speed; mass scaling

0 引言

随着海洋油气资源的不断开发,海洋钻井平台的应用日益增多。海洋钻井平台是海上油气资源勘察开发的主要设备,其主要作用是为钻井设备提供

一个能够正常工作的平台。在所有形式的海洋钻井平台中,自升式钻井平台因作业时自身稳定性好且浮运方便而获得了较多应用。自升式钻井平台的桩靴贯入深度大,贯入过程中对土体的破坏和扰动剧

^① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB046800);国家自然科学基金优秀青年基金(51322904);天津市自然科学基金面上项目(12JCYBJC4700)

作者简介:周 龙(1988—),男,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事海洋桩基础方面的研究。E-mail:zhoulonglmn@126.com

通讯作者:刘 润(1974—),女,天津人,教授、博士生导师,主要从事海洋岩土力学和土与海洋结构物相互作用方面的研究。

E-mail:liurun@tju.edu.cn

烈,可能发生穿刺破坏现象导致工程事故发生,同时对临近结构基础也可能产生不良影响。因此,准确模拟桩靴连续贯入的整个动态过程可为分析自升式钻井平台的安全性提供参考。

国内外学者已针对桩靴贯入过程进行了一系列试验研究。Hossain 等^[1-4]利用室内实验研究了桩靴贯入正常固结黏土和软黏土时的承载特性和土体破坏模式,并将实验数据与工程实测数据进行了对比,取得较好一致性。Xie 等^[5]开展了离心模型试验对桩靴贯入软黏土时的土体破坏过程进行模拟,并运用 PIV 图像识别技术精确反映了桩靴临近土体的运动机制,重点分析了桩靴附近的孔压变化,得到横向及纵向的土体位移情况。张浦阳等^[6]利用流固耦合模型对均质及非均质黏土中桩靴贯入深度与承载力关系进行研究,得到了桩靴上部孔穴高度未完全形成时不同土质对桩靴承载力的影响情况。

由于桩靴贯入过程的复杂性,目前的试验研究多采用室内小比尺模型试验,只能得出定性的结论。有限元模拟方法由于本身是基于连续体力学的,无法模拟出土体的破坏挤压过程,更难达到模拟整个动态过程的目的。因此,众多学者采用耦合的欧拉-拉格朗日分析法(CEL)对桩靴连续贯入过程进行了模拟。2010 年 Qiu 等^[7]采用亚塑性本构关系定义沙土,结合 CEL 法对桩靴贯入导致的沙土大变形过程进行数值模拟;2013 年 Zheng 等^[8-9]利用 CEL 法分析了三层黏土中桩靴贯入和静力触探的贯入过程;2014 年 Haydar 等^[10]利用 CEL 法模拟了桩靴贯入过程中土体及临近导管架桩基的变形响应规律,并与传统拉格朗日分析法结果进行比对,验证了 CEL 法的优越性。

以上研究多只针对自升式平台桩靴自身的插桩过程,而桩靴贯入位置通常距导管架平台较近,贯入引起的土体大幅破坏和扰动会对临近桩基的稳定性产生较大影响。1990 年 Siciliano 等^[11]开展离心机实验,针对软黏土中桩靴贯入对临近桩基横向位移影响展开研究;2009—2010 年吴永韧等^[12-14]利用模型实验、abaqus 非线性有限元法及 ALE 数值模拟法得到临近主平台基础承载力变化规律;2013 年 Tho 等^[15]采用欧拉有限元模拟对比室内实验方法得到桩靴贯入与邻近桩基间作用模式。

目前 CEL 方法在桩靴连续贯入问题的研究中方兴未艾,但在桩靴下沉速度的设定和质量放大方法的适用性等方面尚有很多疑问,需要进一步的研究验证。本文首先对比研究无桩时桩靴下沉速度不

同对计算结果的影响,然后对比分析不同桩靴下沉速度下附近桩基础的响应,最后研究质量放大方法的适用性。

1 耦合的欧拉-拉格朗日算法(CEL)

1.1 物质变形的描述方法

根据坐标系选取的不同,可以将物质运动的描述分为 Lagrange 描述(又称物质描述)和 Euler 描述(又称空间描述)两种方法。

物体在 $t=0$ 时刻所占据的空间区域称为初始构形,记为 V_0 。为了度量物体的运动,需要选取一个特定的构形作为基准,称为参考构型。一般取初始构形作为参考构形,如图 1 所示。

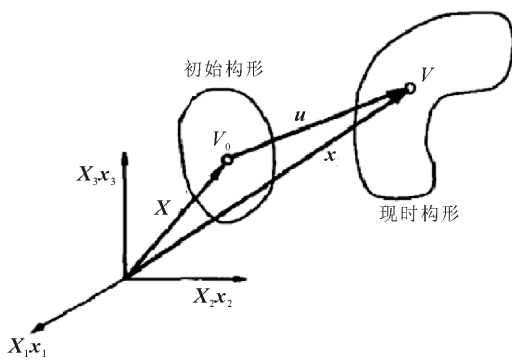


图 1 初始构形和现时构形

Fig.1 Initial configuration and current configuration

在参考构形中质点的矢径 $\mathbf{X}$ 为

$$\mathbf{X} = X_i \mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{e}_i$ 为直角坐标系的基矢量; X_i 为参考构形中质点的矢径 $\mathbf{X}$ 的分量。

质点的矢径 $\mathbf{X}$ 不随时间 t 变化。 X_i 称为物质坐标或拉格朗日坐标,它可以作为该质点的标记。

在现时构形中质点的矢径 $\mathbf{x}$ 为

$$\mathbf{x} = x_i \mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: x_i 为矢径 $\mathbf{x}$ 的分量,其余符号同式(1)。

坐标 x 给出了质点在空间中的位置,称为空间坐标系或欧拉坐标。

在 Lagrange 描述的方法中,取物质坐标 X_i 和时间 t 作为独立坐标,即借助于运动着的质点来考察物体的运动和变形。在这种描述中质点的位移为

$$u_i = x_i(\mathbf{X}, t) - X_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: u_i 为质点位移的分量;其余符号同式(1)和式(2)。

在 Euler 描述的方法中空间点在不同时刻被物质点取空间坐标 x_i 和时间 t 作为独立坐标,描述同一空间点在不同时刻被物质点占据的情况。在这种

描述中,质点的位移为

$$u_i = x_i - X_i(X, t), \quad i = 1, 2, 3 \tag{4}$$

式中:符号同式(4)。

1.2 ABAQUS 软件中的 CEL 算法

传统的拉格朗日分析中节点与材料相互绑定,材料随单元的变形而变形。该方法依赖于网格的变形,通过求解单元节点位移得到力学结果,但对于桩靴下沉这类大变形问题会存在极大的单元变形奇异,造成收敛困难,因而无法模拟。纯粹的欧拉分析方法主要应用于流体力学分析中,网格节点被固定在空间中,材料在不变形的网格内自由流动。一旦欧拉单元流出欧拉网格之外,它就从分析中彻底流失了。纯粹的欧拉分析方法通过求解速度场得到整个流场的流态,但无法求解结构准确的应力-应变响应,亦不能完全满足模拟桩靴下沉对附近桩基础影响的要求。

CEL 技术是 ABAQUS 软件中计算流固耦合的关键技术,吸取了欧拉网格和拉格朗日网格的优点,采用欧氏网格中网格固定而材料可在网格中自由流动的方式建立模型,有效地解决了有关大变形、材料破坏和流体材料等诸多问题;同时建立拉式网格与欧氏网格的接触算法,利用拉式网格得到结构准确的应力-应变响应。

CEL 技术应用强大简易的 Abaqus/Explicit 通用接触算法,可以较好地解决流体和固体结构的接触问题以及穿刺问题。桩靴的下沉问题就是穿刺问题的一个特例:桩靴在外力的作用下从外部逐渐侵入土中,将土体挤密推走,占据原有土体的位置。土看成可以自由流动的流体,采用欧拉网格进行模拟,解决土体的大变形问题;桩靴可以采用刚体模型,桩基础采用三维拉氏单元进行模拟,建立土与桩靴和桩之间的接触关系,利用 Explicit 动力学求解器得到桩靴下沉过程中对附近桩基础的影响。

1.3 质量放大方法

在 ABAQUS 有限元软件中,CEL 方法是基于中心差分的动态显式求解算法计算的。利用中心差分算法求解具体问题时,时间步长 Δt 必须限定在由该问题求解方程性质所决定的某个稳定极限值 Δt_{cr} 之内,否则算法不收敛。中心差分法解的稳定条件为:

$$\Delta t_{cr} = \frac{L^e}{C_d} \tag{5}$$

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{6}$$

式中: Δt_{cr} 为稳定极限值,又称为临界步长; L^e 为稳定单元长度,一般为最小单元尺寸; C_d 为材料波速,与材料的弹性模量 E 和密度 ρ 有关。

人为地将材料的密度 ρ 增加 f^2 倍,则波在该材料内的传播速度会降低 f 倍,从而将稳定时间增量提高 f 倍。这样进行同样的分析所需要的增量步就会减少,达到提高计算速度的目的。但是质量不能进行无限的放大,否则计算结果将不符合实际情况。

2 模型建立

某自升式钻井平台桩靴直径 18 m,最大预压载 10 000 t,贯入深度为 10 m。不考虑桩靴本身的变形与内力,将之视为刚体,使用离散刚体单元(R3D4)进行模拟。土体视为可以自由流动的液体,使用欧拉网格单元(EC3D8R)进行模拟,土体模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,具体参数如表 1 所示。

表 1 土体参数表

Table 1 Parameters of soil

土质描述	有效容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/kPa
粉质黏土	7.1	30	0.3	23	16

Qiu^[7] 和 Zheng 等^[8-9] 利用 CEL 法分析桩靴贯入问题时将贯入速度设定在米每秒的量级,这与桩靴的实际作业速度相去甚远。根据工程资料,桩靴的实际贯入速度大概在厘米每秒甚至毫米每秒的量级。为研究人为提高桩靴贯入速度对计算结果的影响,建立在桩靴贯入深度相同时贯入速度分别为 1 m/s 和 0.01 m/s 的两个无桩模型。有限元模型图如图 2 所示。

在使用 CEL 方法模拟时设定的桩靴贯入速度不同也有可能影响附近桩基础的响应结果。为分析这种影响,建立两个桩靴贯入速度分别为 1 m/s 和 0.25 m/s 的有桩模型。海洋工程中使用的桩基础一般为大直径钢管桩基础,由于圆形桩基础的壁厚较模型的整体几何尺度小几个数量级,且必须考虑桩体本身的内力和变形,不能将之简单地简化为刚体。根据式(5)和式(6)将大大降低求解所需的临界步长,增大计算时间。为提高计算速度,有学者提出可以对桩体进行质量放大。本文为验证质量放大方法的有效性,在保证其他条件都不变的前提下,建立质量放大系数分别为 1、10、100 和 1 000 的计算模型。为提高计算效率,将问题进行简化——圆形薄壁钢管桩基础简化为边长为 0.5 m 的实心方桩基

础,桩与桩靴的平面位置关系图如图 3 所示,桩的具体参数如表 2 所示。

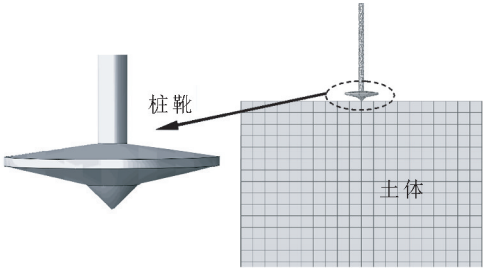


图 2 无桩时有限元模型图

Fig.2 FE model of the spudcan with no piles

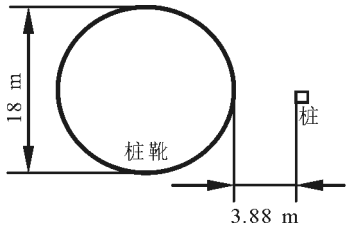


图 3 方桩基础与桩靴的平面位置示意图

Fig.3 Plan of the spuncan and pile foundation

表 2 方桩参数表

Table 2 Parameters of the square pile

截面长度/m	长度/m	入泥深度/m	弹性模量/GPa	泊松比
0.5	115	96	210	0.3

3 模拟结果

3.1 无桩时不同桩靴贯入速度结果对比

图 4 为桩靴贯入速度分别为 1 m/s 和 0.01 m/s 时土体阻力与贯入深度的关系曲线。由图可知,虽然桩靴贯入速度相差了 100 倍,但两种速度下的土体阻力与贯入深度曲线基本一致。在贯入深度小于 30 m 时,速度慢的土体阻力较大,当贯入深度大于 30 m 时,速度快的土体阻力较大。在相同深度处两者的土体阻力最大相差 20%,说明桩靴贯入速度不会影响土体阻力的大小。这是因为土体阻力主要由桩靴下部土体的力学属性决定,不会因桩靴贯入速度的不同发生变化。

图 5 为桩靴贯入速度分别为 1 m/s 和 0.01 m/s 时土体的等效塑性云图。等效塑性云图表征桩靴贯入过程中土体的扰动和破坏范围。由图可知贯入速度为 0.01 m/s 的土体扰动破坏范围较贯入速度 1 m/s 略大,且插桩速度较慢时土体回流现象明显,速度较大时土体基本没有回流。这说明桩靴贯入速度对土体的扰动和破坏范围影响不大,但贯入速度越大对土体的水平向挤压效应越明显,土体向四周排

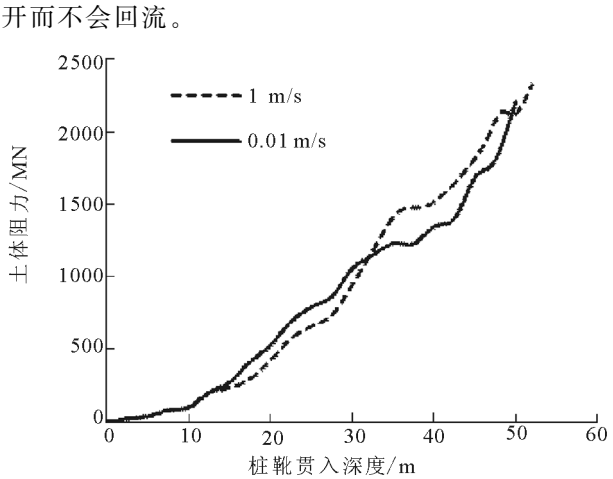


图 4 不同贯入速度下土体阻力与贯入深度的关系曲线

Fig.4 The soil resistance vs. penetration depth at different penetration speeds

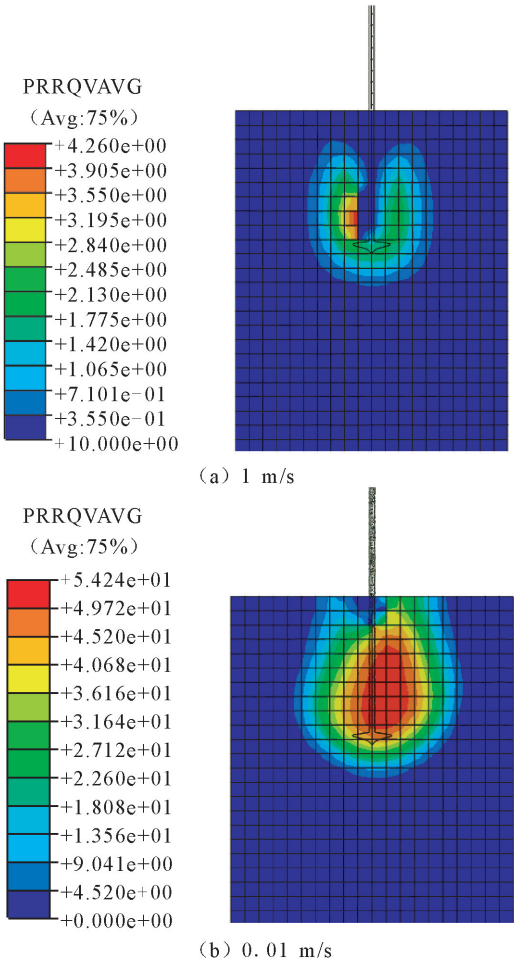


图 5 不同贯入速度下土体等效塑性云图

Fig.5 The equivalent plastic contours of soil at different penetration speeds

图 6 为桩靴贯入速度分别为 1 m/s 和 0.01 m/s 时土体的剪应力云图。由图可知,贯入速度不同时土体的剪应力分布形态基本一致,最大剪应力分布在桩靴下部,沿圆弧形向四周递减。贯入速度较快时土体的最大剪应力也较大,说明桩靴贯入速度越快,土体的剪应力水平越高。

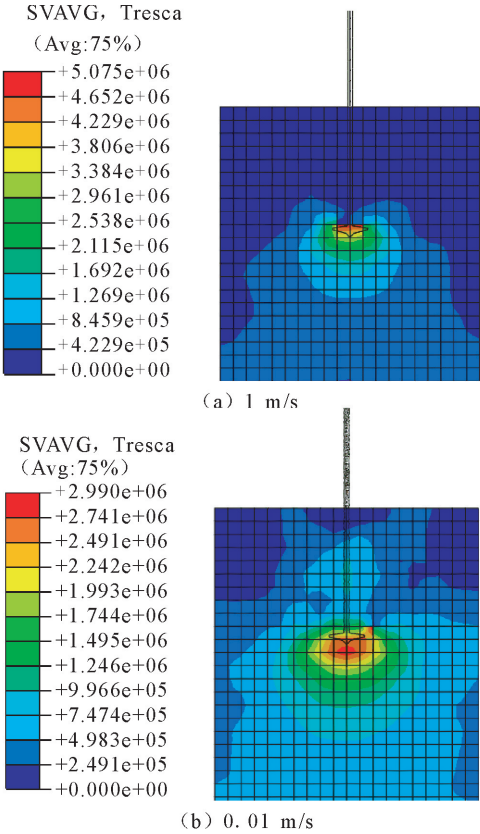


图 6 不同贯入速度下土体 Tresca 剪应力云图
(单位:Pa)

Fig.6 The Tresca shear stress contours of soil at different penetration speeds (unit:Pa)

虽然在不同的桩靴贯入速度情况下土体的破坏形态和剪应力水平有所区别,但实际工程中更加关注土体阻力沿深度的变化曲线,为提高计算效率,可以人为设定较高的桩靴贯入速度。

3.2 有桩时不同桩靴贯入速度结果对比

图 7 为桩靴贯入速度分别为 1 m/s 和 0.25 m/s 时桩身的水平位移云图。由图可知,当贯入速度为 1 m/s 时桩身的最大水平位移为 1.11 m,当贯入速度为 0.25 m/s 时为 0.99 m,两者相差不到 12%。可近似认为桩靴贯入速度对计算桩的水平变形影响较小。

图 8 为桩靴贯入速度分别为 1 m/s 和 0.25 m/s 时桩身的 Mises 应力云图。由图可知,桩身的最大

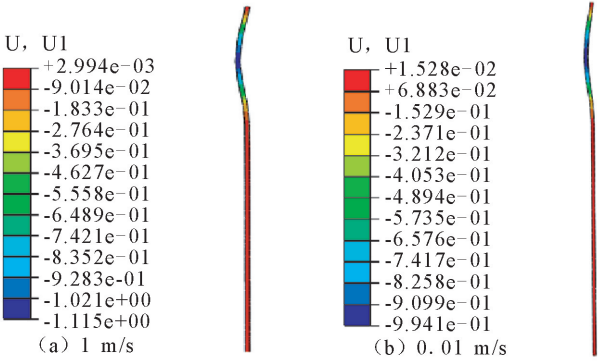


图 7 不同贯入速度下桩身的水平位移云图
(单位:m)

Fig.7 The horizontal displacement contours of the pile with different penetration speeds (unit:m)

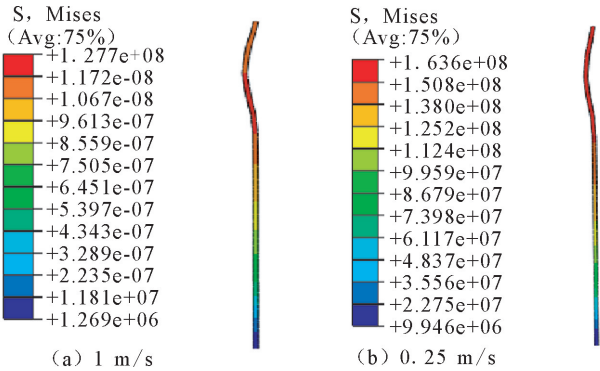


图 8 不同贯入速度下桩身的 Mises 应力云图
(单位:Pa)

Fig.8 The Mises stress contours of the pile with different penetration speeds (unit:Pa)

Mises 应力当贯入速度为 1 m/s 时为 128 MPa,当贯入速度为 0.25 m/s 时为 163 MPa,表明桩靴贯入速度越大,计算得到的桩身最大 Mises 应力越少。这是由于桩靴的贯入速度越大,在贯入相同深度处所需的时间越小,土的动能不能有效地转化为桩的应变能,使得桩身应力较小。

3.3 桩质量放大的影响

图 9 为其他条件相同,质量放大系数分别为 1 倍、10 倍、100 倍和 1 000 倍时桩身的水平位移云图。由图可知,当质量放大系数分别为 1 倍、10 倍、100 倍和 1 000 倍时桩身的最大水平位移分别为 9.9 m、9.7 m、1.19 m 和 1.18 m。说明随着桩的质量放大系数增加,桩身最大水平位移略有增大,最大增幅在 12%左右。可近似认为桩身最大水平位移对质量放大系数不敏感。

图 10 为其他条件都相同质量放大系数分别为 1 倍、10 倍、100 倍和 1 000 倍时桩身的 Mises 应力

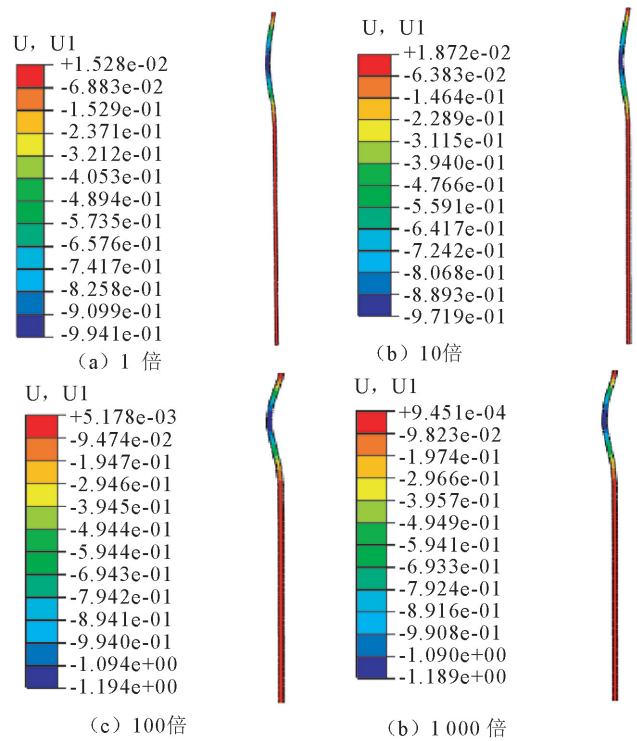


图 9 不同质量放大系数下桩身的水平位移云图
(单位:m)

Fig.9 The horizontal displacement contours of pile shaft with different mass scaling factors (unit:m)

云图。

由图可知当质量放大系数分别为 1 倍、10 倍、100 倍和 1 000 倍时桩身的最大 Mises 应力分别为 163 MPa、157 MPa、49 MPa 和 42 MPa。说明质量放大系数对桩身最大 Mises 应力有较大影响,且两者关系为非线性的。笔者还对质量放大系数为 30 倍、50 倍和 80 倍的模型进行模拟(限于篇幅不一列举),结果表明随着质量放大系数的增加,桩身最大 Mises 应力有下降的趋势,但无规律可循,因此很难找到不影响计算结果的合适的放大系数。

综上所述,质量放大方法虽然能显著提高计算速度,对桩身变形计算影响也较小,但在桩身应力的计算上缺乏准确性,并且很难评价质量放大系数的大小对计算结果的影响。因此在无可靠对照资料的情况下建议慎用质量放大方法。

4 结论与建议

CEL 动态模拟方法在桩靴连续贯入问题的研究中被广泛应用,但现有计算中设定的桩靴贯入速度与实际工程有较大差异。是否可以使用质量放大方法提高计算速度还有待进一步的研究。本文首先对比研究在无桩时不同桩靴贯入速度对计算结果的

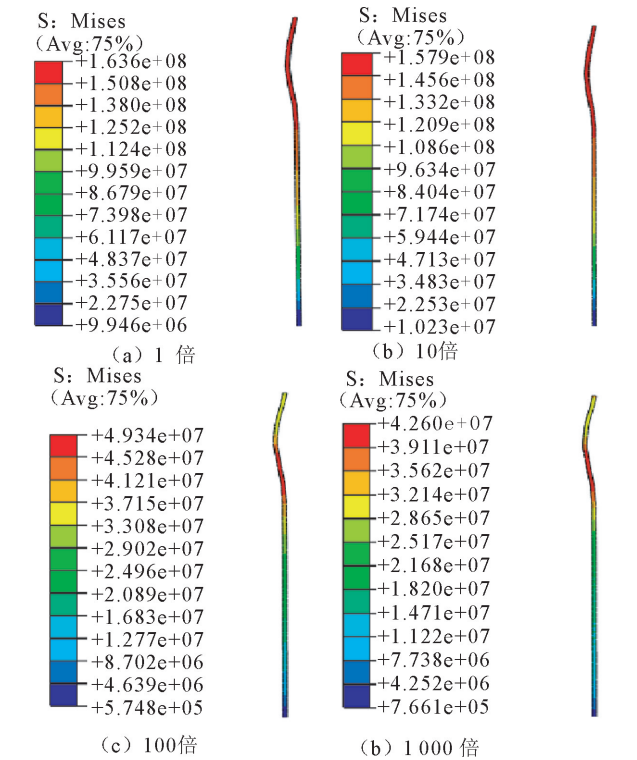


图 10 不同质量放大系数下桩身的 Mises 应力云图
(单位:Pa)

Fig.10 The Mises stress contours of the pile shaft different mass scaling factors (unit:Pa)

影响,然后对比分析不同桩靴贯入速度对附近桩基础响应的影响,最后研究使用质量放大方法对计算结果的影响。结果表明:

- (1) 无桩时不同桩靴贯入速度对土体阻力影响较小,土体的破坏形态和剪应力水平略有不同,因此为提高计算效率可设定较高的桩靴贯入速度。
- (2) 桩靴贯入速度对桩身水平位移影响较小,贯入速度为 1 m/s 时桩身的最大水平位移较贯入速度为 0.25 m/s 时大 12%;桩靴贯入速度越大,在贯入相同深度处所需的时间越短,土的动能转化为桩的应变能也越小,从而使得桩身最大应力越小。
- (3) 桩身最大位移对质量放大系数的增加不敏感。随着质量放大系数的增加,桩身最大 Mises 应力有下降的趋势,但并无规律可循,并且很难评价质量放大系数的大小对计算结果的影响,因此在无可靠对照资料的情况下建议慎用质量放大方法。

参考文献(References)

[1] Hossain M S,Randolph M F,White D T.Punch-through of Spudcan Foundations in Two-layer Clay[C]//Frontiers in Offshore Geotechnics,Taylor and Francis Balkema,The Netherlands,2005,535-540.

- [2] Hossain M S, Hu Y, Randolph M F. Limiting Cavity Depth for Spudcan Foundations Penetrating Clay[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(9): 679-690.
- [3] Hossain M S, Randolph M F. Experimental Investigation of Punch-through Potential for Spudcan Foundations [C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*, Zurich, Switzerland. 2010: 1025-1031.
- [4] Hossain M S, Zheng J, Menzies D, et al. Spudcan Penetration Analysis for Case Histories in Clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(7): 04014034.
- [5] Xie Y, Leung C F, Chow Y K. Study of Soil Responses Adjacent to Jack-up Spudcan Foundation [C]// *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, 2010: 1-7.
- [6] 张浦阳, 于晓洋, 丁红岩. 海上自升式钻井平台插桩阶段桩靴承载力计算[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 613-619.
ZHANG Pu-yang, YU Xiao-yang, DING Hong-yan. Spudcan Bearing Capacity Calculation of the Offshore Jack-up Drilling Platform During the Preloading Process[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 613-619. (in Chinese)
- [7] Qiu G, Henke S, Grabl J. 3D Analysis of the Installation Process of Spudcan Foundations [C]// *Proceedings of the Frontiers in Offshore Geotechnics II*. 2010: 685-690.
- [8] Zheng J B, Hossain M S, Wang D. 3D Large Deformation FE Analysis of Spudcan and Cone Penetration on Three-layer Clay [C]// *Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering*, Anchorage, Alaska, USA. 2013.
- [9] Zheng J B, Hossain M S, Wang D. 3D Large Deformation FE Analysis of Spudcan Foundations on Layered Clays Using CEL Approach[J]. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 2013: 803-810.
- [10] Arslan H, Wang P C. Advanced Continuum Modeling of Pile Response to Jack-up Spudcan Penetration [C]// *Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*. 2014: 506-513.
- [11] Siciliano R, Hanilton J, Murff J, et al. Effect of Jackup Spud Cans on Piles [C]// *Offshore Technology Conference*. 1990: OTC 6467.
- [12] 吴永韧, 鲁晓兵, 王淑云, 等. Spudcan 基础贯入对固定平台基础影响[J]. *中国海洋平台*, 2008, 23(1): 35-38.
WU Yong-ren, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. Effects Of Spuncan On Pile Foundations Of Fixed Platform[J]. *China Offshore Platform*, 2008, 23(1): 35-38 (in Chinese)
- [13] 吴永韧, 王淑云, 鲁晓兵. 桩靴压入对固定平台基础扰动的数值模拟 [C]// *第三届全国岩土与工程学术大会论文集*. 2009: 46-49.
WU Yong-ren, WANG Shu-yun, LU Xiao-bing. The Effects to the Fixed Platform Foundation by Spuncan Penetration [C]// *Proceedings of the 3rd National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of China*, 2009: 46-49. (in Chinese)
- [14] Wu Y R, Lu X, Zhang X. Effects of the Spudcan Penetration on the Adjacent Foundations [J]. *Open Ocean Engineering Journal*, 2010: 38-44.
- [15] Tho K K, Leung C F, Chow Y K, Swaddiwudhipong S. Eulerian Finite Element Simulation of Spudcan-pile Interaction [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(6): 595-608.