

离心机动态模拟中渗流相似的一种近似处理方法

An Approximate Method for Dealing with Similarity of Percolation in Dynamic Centrifuge Modeling

鲁晓兵 张旭辉 王淑云

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要: 本文从量纲分析、控制方程分析的角度分析了在动载下桶基响应的离心机模拟中的各种时间尺度。提出了砂土地基中惯性和渗流相似比尺冲突处理的办法, 即不换材料, 但是通过理论修正, 为类似问题的离心机实验模拟提供参考。

关键词: 动载 桶基 离心机实验 时间尺度

1 引言

桶形基础是近年来发展起来的新型平台基础, 由于多种优越性而受到广泛的重视。但是关于其承载力特性, 尤其是动载下的承载力特性仍然不清楚^[1-3]。动冰载是渤海地区海洋平台设计的控制载荷, 波浪载荷是南海地区的控制载荷, 在动冰载或波浪载荷作用下, 冰或波浪、结构与桶形基础之间会产生复杂的动力学耦合作用。为了能给今后在渤海地区或南海地区的桶形基础平台设计打下基础和提供基础参数, 就需要在这方面进行深入的研究。需要研究的具体内容主要包括动载下桶形承载力与变形、桶周土体液化条件及影响范围, 以及稳定性评价分析方法等。

该问题涉及复杂的流固土耦合效应, 国外在这方面的研究很少, 且因保密原因, 我们难以得到具体数据, 国内没有这方面的研究。鉴于此, 我们首先必须开展的工作是进行大量的实验以获得大量基础数据。现场原型实验是最能反映实际的, 但是由于花费巨大且实验周期长, 实验条件也难以控制, 因此一般不采用。小尺度模型实验能较快实施, 花费也小, 但是由于不能反映现场的实际应力水平, 即不能满足重力相似, 而土体的一个重要特性就是土性是依赖于应力水平的, 在本问题缺乏一手资料, 对基本特性完全不了解的情况下, 采用该类实验也是不合适的。离心机实验由于使模型处于高加速度场中, 能满足重力相似, 或者说, 能以小比尺模型模拟大比尺实际结构的效应, 因此离心机实验是模拟本问题的合适的选择。但是离心机实验中也存在较难处理的问题, 如存在渗流和惯性两个不同的时间比尺, 即渗流耗散特征时间是 $1/N^2$, 而惯性作用时间是 $1/N$, 而渗流效应和惯性效应在本问题中同等重要, 因此如何解决这两个时间尺度冲突就成了本问题离心机模拟的关键。以前类似问题中的解决办法是:

(1) 换液相材料, 如将孔隙液体换成硅油以增加黏性, 降低渗透性。该方法的主要缺点是增大介质的阻尼等性质, 同时对介质的剪胀性等也有影响, 且使实验操作困难。

(2) 换固相材料以直接降低渗透性。该方法的缺点是材料的性质一般会由于颗粒级配变化而发生明显变化。采用两种方法均需要对换材料后的两相饱和介质的力学性质进行大量土性实验以评估换前换后的差别, 增加更多的人力、物力和时间消耗。有没有更合适的既省事

又能获得满足要求结果的办法呢? 下面我们将从量纲分析和控制方程分析几方面进行阐述, 从而获得结论。

2 量纲分析

在该问题中, 需要考虑的主定量包括: 土体的参数、孔隙水的参数、桶本身的参数、载荷参数等四个方面。待定量有: 极限承载力 P_1 、桶基位移 U 、孔压变化 p 等。对各参数进行无量纲化处理, 得到

$$\left(\begin{array}{l} n, \frac{E_s}{\rho_s g D}, \nu_s, \frac{h_p}{\rho_s g D}, \lambda_p, \frac{c}{\rho_s D^{1.5} g^{0.5}}, \varphi, \\ \frac{P_1}{\rho_s g D^3 \tan \varphi}, \frac{\rho_w}{\rho_s}, \frac{k \rho_s \sqrt{g D}}{f \mu}, \frac{h_w}{D}, \frac{H}{D}, \\ \frac{U}{D} = f \left(\frac{E}{\rho_s g D}, \nu, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{F}{\rho_s g D^3 \tan \varphi}, \right. \\ \left. \frac{p}{\rho_s g D \tan \varphi}, \frac{f}{\sqrt{g/D}}, T \sqrt{g/D}, \frac{F_h}{\rho_s g D^3 \tan \varphi}, \right. \\ \left. \frac{F_v}{\rho_s g D^3 \tan \varphi}, \frac{M}{\rho_s g D^4} \right) \end{array} \right) \quad (1)$$

其中各参数的意义为: 土体的密度 ρ_s , 孔隙率 n , 初始弹性模量 E_s , 泊松比 ν_s , 塑性硬化指数 h_p , 塑性加载比例系数 λ_p , 内聚力 c , 内摩擦角 φ , 土层厚度 h , 渗透率 k ; 水的密度 ρ_w , 黏性系数 μ , 厚度 h_w ; 桶基的直径 D , 高度 H , 壁厚 d , 桶基材料的弹模 E , 泊松比 ν , 密度 ρ ; 动载荷的载荷幅值 F , 频率 f , 作用时间 T ; 静载荷的水平分量 F_h , 垂向分量 F_v , 弯矩 M ; 重力加速度 g 。

根据式(1), 我们可以看到, 如果在离心机实验中不换材料, 则在这 20 个无量纲自变量中, 除了 $k \rho_s \sqrt{g D} / (f \mu)$ 和 $c / (\rho_s D^{1.5} g^{0.5})$ 外, 均能满足相似比尺的要求。在这两个量中, 前者是惯性和渗透性之比, 后者是无量纲黏性系数。由于在对于砂土地基, 处理好前者, 即惯性和渗透性的模拟是关键。我们先对渗流、惯性和外载作用特征时间进行对比和分析:

渗流特征时间:

$$\frac{\mu H^2}{KE(1+e)} \sim 10^6$$

惯性特征时间:

$$\frac{1}{f} \sim 1.25$$

载荷作用时间:

$$T \sim 10^7$$

渗流与惯性作用时间之比:

$$\frac{KE(1+e)}{H^2 f \mu} \sim 10^6$$

载荷作用时间与渗流特征时间之比:

$$\frac{TKE(1+e)}{\mu H^2} \sim 10$$

载荷作用时间与惯性特征时间之比:

$$Ff \sim 10^7$$

原型尺度下: $K = 4 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $E = 5 \times 10^6 \text{ Pa}$, $H = 5 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $f = 0.8 \text{ Hz}$ 。

由以上分析,可以得到如下几点结论:

(1) 惯性作用时间相对渗流时间是小量,因此渗流和惯性运动可以解耦。

(2) 载荷作用时间相对渗流特征时间和惯性作用时间是大量,即外载作用时间较渗流和惯性响应时间长得多,因此渗流和惯性响应时间的差别对长期外载效应如最大变形、最大孔压和极限影响区的影响可忽略。如果需要考虑动力响应过程,也可以采用摄动方法进行逐次逼近的方法解决。

3 控制方程分析

动量守恒方程

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} = (1-\varepsilon)\rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \varepsilon\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\varepsilon\mu}{K} \left(v_i - \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (2)$$

质量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon\rho}{\partial t} + \varepsilon\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial(1-\varepsilon)\rho_s}{\partial t} + (1-\varepsilon)\rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t \partial x_i} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

本构关系

$$\sigma_{ij} = G \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \frac{2G\nu}{1-2\nu} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (4)$$

其中, ρ 为孔隙流体密度, ρ_s 为固相密度, u_i 为固相位移, v_i 为孔隙流体速度, p 为孔压, σ_{ij} 为有效应力, g 为重力加速度, G 为剪切模量, ν 为泊松比。

根据本问题的特点,将各变量分成快变和慢变两部分:

$$\begin{aligned} u_i &= u_i^{(1)} + u_i^{(2)}, \quad \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i dt = u_i^2, \quad v_i = v_i^{(1)} + v_i^{(2)} \\ p &= p^{(1)} + p^{(2)}, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中上标为(1)的部分为高频波动分量,上标为(2)的部分为低频缓变量, T 为周期。还有一个假设是:高频下,固相与液相间无相对位移,即

$$v_i - \frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

将这几个关系式带入式(2)~(4), 可以得到:

对 $u_i^{(1)}$ 有

$$G\nabla^2 u_i^{(1)} = (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho) \frac{\partial^2 u_i^{(1)}}{\partial t^2} \quad (7)$$

对 $u_i^{(2)}$ 有

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(G\nabla^2 u_i + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = -\frac{\mu}{K} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial t} \quad (8)$$

可以看出, 高频部分(惯性响应)是一个剪切波动过程, 即惯性响应是一个快过程, 介质中对应的只有剪切波传播, 反映的是外载荷在介质中的传播。而低频部分(渗流固结)是一个慢的扩散过程, 反映的是介质的渗流和变形。在载荷作用时间足够长时, 这两部分都有足够的响应时间, 也就是说, 如果我们只关心长期效应而不考虑中间过程, 则不需要严格满足渗流时间尺度和惯性作用时间尺度相似的满足, 这与量纲分析的结论是一致的。

4 实验验证

为检验以上分析, 我们将实验结果与上述分析进行对比。首先考察实验获得的超静孔压和桶基变形的随时间发展过程的特征; 然后将实验得到的达到稳态需要的时间的理论分析与实验值进行对比。

从图 1 和图 2 可以看出, 超静孔压在加载前期很快上升到最大值, 然后逐渐降低到一个稳态值, 桶基沉降则随时间逐渐发展到最大值。这就说明, 在载荷长期作用下, 桶基响应会达到一个稳态。图 3 和图 4 给出了实验后俯视照片和剖面视图。可看到, 在载荷长期作用后, 桶周土体中存在一个有限影响区, 区内有明显沉降, 密度增加。介质的渗透性只影响桶基及土体的动力过程, 不影响最后状态。

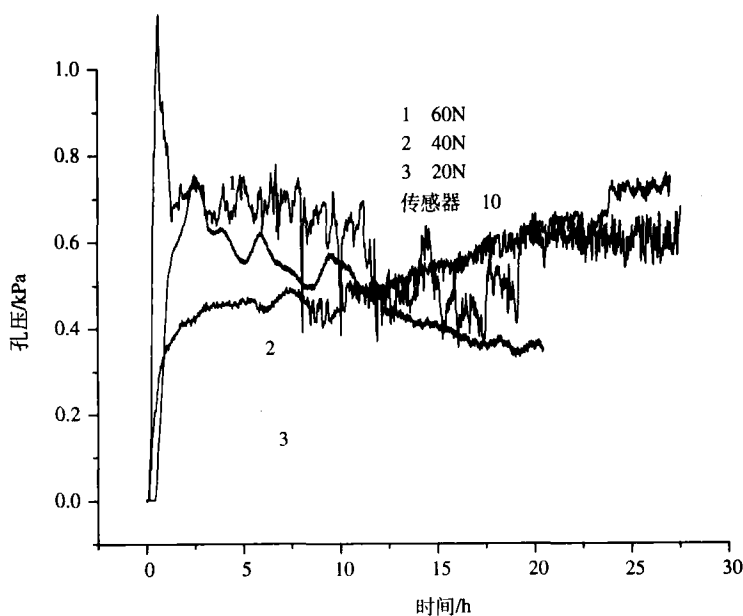


图 1 不同载荷幅值下孔压发展

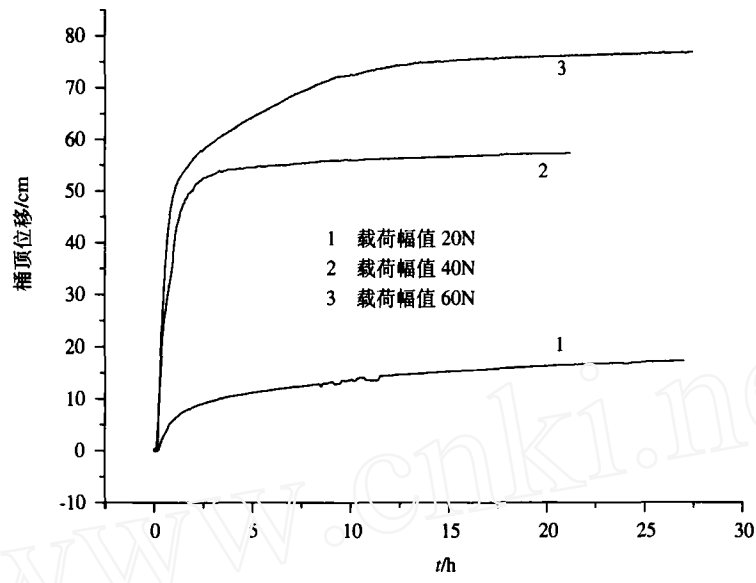


图2 不同载荷幅值下桶基沉降的发展

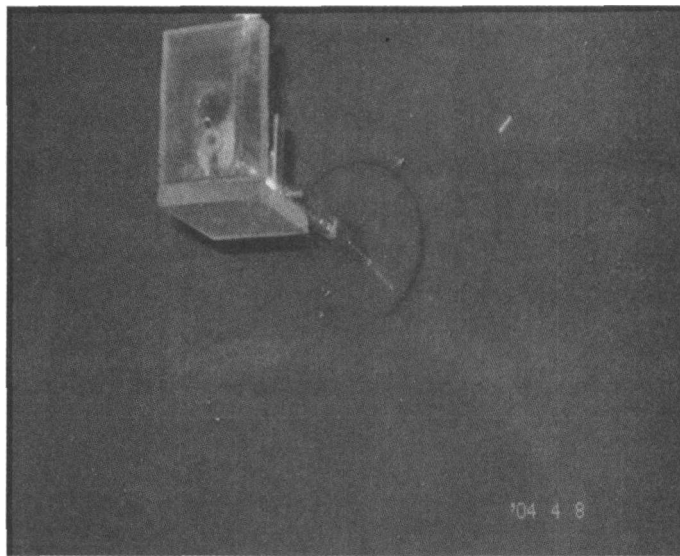


图3 实验结束后俯视照片

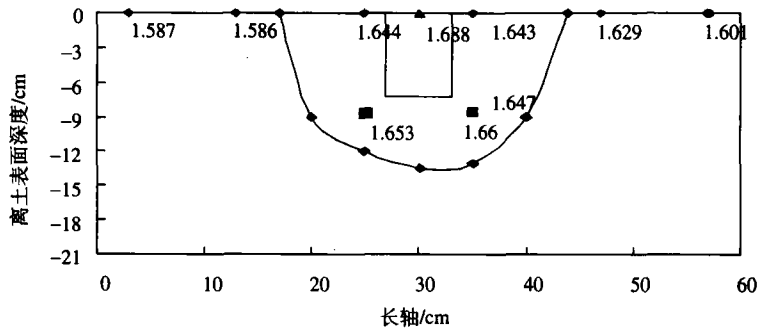


图4 实验结束后影响区剖面

影响区和达到稳态时间估算^[5,6]: 由理论分析, 我们可以得到动冰载下桶基响应达到稳态需要的时间为 $t_c \sim \frac{\mu L^2}{E_k}$ 。

图 5 给出了实验中孔压和桶基沉降时间发展过程的对比, 可以看到, 在孔压上升到最大值的阶段, 桶基沉降小, 约为总沉降的 20%, 在孔压逐渐降到稳态值的过程中, 即后期排水固结过程中, 桶基沉降发展到最大值。因此, 只要外载作用时间足够长, 桶基沉降将逐渐发展到最大值, 该值不随渗透大小而变化。

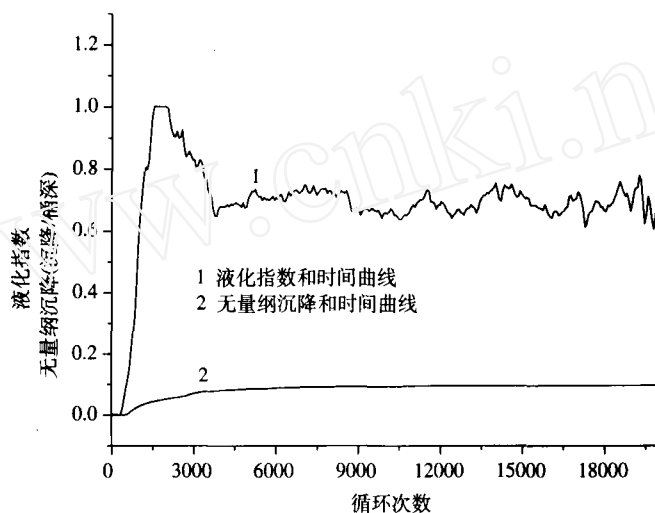


图 5 孔压和沉降发展过程对比

5 小结

动冰载作用下, 惯性作用时间相对渗流时间是少量; 载荷作用时间相对惯性作用时间和渗流作用时间是大量, 即惯性响应是一个快过程, 介质中对应的只有剪切波传播。渗流是一个慢的扩散过程。因此渗流和惯性运动可以解耦, 在载荷作用时间足够长时, 如果我们只关心长期效应而不考虑中间过程, 则不需要严格满足渗流时间尺度和惯性作用时间尺度相似的满足。

参 考 文 献

- 1 鲁晓兵, 张金来. 海洋平台桶型基础的研究与进展. 力学进展, 2003, 33(1): 27-40
- 2 Andersen K H, Jostad H P. Foundation design of skirted foundations and anchors in clay. OTC 10824, Proc. Offshore Tech. Conf., Houston, Texas, 1999: 1-10
- 3 Byrne B W, Housley G T. Experimental investigations of the responses of suction caissons to transient combined loading. ASCE J. Geotech. And Geoenviron. Engrg., 2004, 130(3): 240-253
- 4 Taylor R N. Geotechnical centrifuge technology. Blackie Academic & Professional, London, 1995
- 5 Lu X B, Liu Cheng, Wang S Y. On the bearing capacity of bucket foundations in saturated sands. Int. J. Offshore Polar Engrg., 2006, 1: 300-304
- 6 Lu Xiaobing, Zhang Jianhong, Shuyun Wang et al. Experimental study of the pore pressure and deformation of suction bucket foundations under horizontal dynamic loading. Chinese Ocean Engrg. 2006, 1