

文章编号: 1000-4750(2010)02-0193-11

# 钙质砂地基中桶形基础水平动载响应实验研究

\*王 丽<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>1</sup>, 时忠民<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

**摘 要:** 针对钙质砂地基中桶形基础动态响应问题进行了实验研究。首先进行了水平静极限承载力实验, 获得了水平载荷位移曲线, 并为确定水平动载荷幅值的选择提供参考; 然后针对主要因素, 包括桶形基础尺寸、载荷幅值和频率、土体密度、压重等, 进行了系列的室内小模型实验, 并对结果进行了分析, 获得了水平动载下桶形基础在钙质砂地基中的响应特点。结果表明: 载荷幅值、频率、土体密度、桶形基础尺寸对动态响应有明显影响; 动载下桶形基础周围钙质砂中孔压上升, 但是较其他类砂土中的慢; 在结构重量小时, 桶形基础上升; 有上覆较硬粘土层时, 桶形基础和地基的响应减弱。

**关键词:** 钙质砂; 桶形基础; 水平动载荷; 承载力; 动态响应

中图分类号: TU441; TU411.8 文献标识码: A

## EXPERIMENTAL STUDY ON BUCKET FOUNDATIONS' RESPONSES IN CALCAREOUS SAND UNDER DYNAMIC LOAD

\*WANG Li<sup>1</sup>, LU Xiao-bing<sup>1</sup>, SHI Zhong-min<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese of Academy, Beijing 100190, China; 2. Research Center, COONC, Beijing 100027, China)

**Abstract:** This paper performs experimental study on responses of the bucket foundations in calcareous sand layers under dynamic loading. Experiments to determine the horizontal static bearing capacity are carried out first. The obtained static loading-displacement curves can be referred to for determining the amplitudes of dynamic loads. Then a series of experiments are conducted to study the influences of some factors including the size of bucket, the amplitude and frequency of load, the density of soils, pressing load etc.. Analyzing experimental results, the responses' characteristics of bucket foundations in calcareous sand under horizontal dynamic loads are obtained. It is shown that 1) the amplitude and frequency of loading, the soil density and the size of bucket foundation influences the dynamic responses of the bucket foundation obviously; 2) the pore pressure increases under dynamic loading, but the rate is smaller than that in other type of sand; 3) the bucket foundation would rise if the structure's weight is small; 4) the dynamic responses of the bucket foundation and the soil layer decreases with an overlayer of stiff clay covering.

**Key words:** calcareous sand; bucket foundation; horizontal dynamic load; bearing capacity; dynamic responses

目前随着油气开采的发展, 出现了新型海洋平台基础——桶形基础(这种基础因为外形像一个倒扣的圆桶, 它采用一种底端敞开、上端封闭的结构

而得名)。这种基础较常见的桩基具有节省而且安装方便等优点<sup>[1]</sup>, 具有广泛的应用前景。在热带海洋, 如南海广泛分布着钙质砂, 这种砂具有特殊的特

收稿日期: 2008-08-19; 修改日期: 2008-09-24

基金项目: 国家重点基础研究专项基金项目(2001CB409603); 中科院、中海油联合重大项目(KJ CX2-SW-L03-01)

作者简介: \*王 丽(1984—), 女, 江西人, 工程师, 硕士, 从事岩土力学问题研究(E-mail: zaowang2008123@163.com);

鲁晓兵(1968—), 男, 湖北人, 副研, 博士, 从事岩土力学和水合物相关问题研究(E-mail: xblu@imech.ac.cn);

时忠民(1960—), 男, 辽宁人, 高工, 博士, 从事海洋工程研究(E-mail: shizhm@cnooc.com.cn).

性<sup>[2]</sup>, 针对桶形基础在砂土和粘土中的承载力特性已开展了研究, 并取得了系列的成果<sup>[3-8]</sup>。而桶形基础在钙质砂地基中的承载特性还不清楚。Randolph 等人<sup>[9]</sup>在 1998 年利用离心机实验研究了 Timor 海(在澳大利亚和印度尼西亚之间)地区细颗粒钙质砂中吸力桩基础在静载、动载作用下的承载特性。Dyson<sup>[10]</sup>、Harry G Poulos<sup>[11-13]</sup>等人针对澳大利亚西北大陆架的钙质砂进行了桩基础水平荷载作用下的承载特性研究。Watson 和 Randolph<sup>[14]</sup>针对处于澳大利亚西北部大陆架的钙质粉土中的吸力式沉箱进行了排水和不排水条件下的垂直拉拔及承压离心机模型实验。Coop<sup>[15]</sup>、Cassidy<sup>[16-17]</sup>等人针对钙质砂地基中桩基的承载力进行了研究。初晓锋、汪稔<sup>[18-19]</sup>等进行了钙质砂地基中锚固物基础的静载模型实验, 获得了一些相关的承载特性。

总之, 目前对钙质砂中桩基的静承载、动承载特性研究还有一些, 对吸力式桶形基础承载特性研究少, 针对我国南海钙质砂的研究更少。在世界石油日益紧张的今天, 我国对南海海域的开发将进一步发展; 桶形基础在这些地区将是非常有应用价值的一种基础。因此针对南海钙质砂地层进行桶形基础承载特性的研究有着重要的工程意义。本文重点模拟桶形基础在水平动荷载下的响应。

## 1 实验系统介绍

### 1.1 实验用土

本文中实验采用的是由武汉岩土所于南海永暑礁取得的松散钙质砂。在实验中首先筛去大于 5mm 粗颗粒, 进行颗分实验, 颗粒级配曲线见图 1。实验砂的相对密度为 0.5-0.6, 物性参数见表 1。

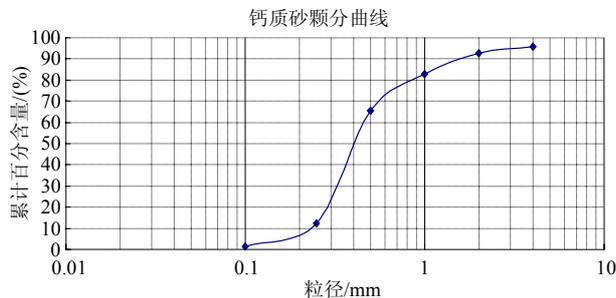


图 1 颗粒级配曲线

Fig.1 The curve of grain series

表 1 钙质砂的物性参数

Table 1 Physical parameters of calcareous sand used in experiments

C	$\phi$ (°)	渗透系数 $k$ /(cm/s)	$d_{10}$ /mm	$D_{60}$ /mm	$D_r$
0	47.7	$5 \times 10^{-2}$	0.24	0.46	0.5-0.6

### 1.2 模型槽

实验所用的模型槽净内尺寸为 50cm×50cm×45cm, 由有机玻璃制成, 模型槽中心部位安置钢圆桶模拟桶形基础。为了便于控制模型地基的制备, 按 1cm/层的厚度在玻璃槽外设置分层标识线。

### 1.3 电液伺服加载系统

系统的加载系统见图 2。电液伺服器输出激振力通过连接件作用于桶形基础模型上。它能实现位移控制和力控制两种加载方式。加载器可以输出的载荷幅值为 0N-1000N 或位移幅值 0mm-50mm, 频率为 0.1Hz-20Hz。本次动载实验采用位移控制方式。实验前布置力传感器和孔隙水压力传感器, 实验过程中分别测量桶形基础反力、桶的位移和土体的孔隙水压力, 并手工测量桶顶垂向位移。



图 2 实验布置示意图

Fig.2 Sketch of the experimental layout

### 1.4 传感器及数据采集系统

实验中主要使用了拉压传感器(测量土体反力), 孔隙水压力传感器(PPT)。拉压力传感器由 701 所研制, 采用的两个传感器的量程分别为 150N、800N。孔隙水压力采用英国 Druck 公司生产的 PDCR81 型孔隙水压力传感器(PPT)测量, 直径为 6.4mm, 长度为 11.4mm, 最大测量压力值为 35kPa、7.5kPa 等几种。所有的 PPT 在进行测量以前都在真空作用下进行饱和, 并对孔隙水压力传感器进行标定, 以防有损坏的。采集系统为阿尔泰公司的 USB2005 16 位采集板, 采样频率为 10kHz。

### 1.5 实验流程简介

#### 1) 模型制备。

制样采用分层击实法, 分 9 层击实, 整个试样高度是 27cm。击实过程中, 控制模型地基的干密度为 1.26g/cm<sup>3</sup>。在模型箱中铺每一层砂时, 尽量保证撒砂的均匀性, 在击实前砂层齐平, 击实后刮毛。土样制备完成之后, 将模型桶压入土样中, 桶的顶面与土样表面齐平。为了防止传感器在击实过程中

损坏, 本实验在模型桶贯入完成后, 再将桶周围土体开一道细槽, 将传感器埋入。完成之后, 对模型进行饱和; 在模型箱底部预留进水孔供制作饱和和土体地基时进水用, 为了在对试样进行饱和时使水能均匀上渗, 以防止渗流不均匀或管涌的出现, 在模型箱底部预先铺设 1.0cm 左右的均质细砂层, 然后在砂层表面铺设透水布。由于钙质砂渗透性能良好, 本文中直接采用水头饱和法, 经过测试, 这种方法能使土样的饱和度达到 98% 以上。

在实验过程中, 传感器的位置会随着土体的变形而变化, 因而实验完成后对传感器位置重新进行测量。模型实验开始之前, 保证模型地基表面水超过土面 2.0cm 的状态超过 24 小时。

## 2) 实验步骤。

① 制备模型。模型地基制备完成后, 打开激励油泵及采集系统, 检查传感器是否有损坏。

② 将加载设备与模型桶杆之间连接起来。

③ 测量桶、土初始状态(包括加载高度、土面以上水深、桶土初始位移)。启动动载激励, 计算机采集土体反力及孔隙水压力变化, 同时, 人工记录桶基中心点的垂向位移值。

④ 观察并记录实验过程中的现象, 当桶基垂向位移不变时, 停止加载。

## 2 水平静载实验

为了获得桶形基础在钙质砂地基中的静水平承载特性, 同时为后来的水平动载实验幅值确定提供参考, 首先针对不同长径比桶基进行了水平静承载特性实验。实验模型地基制备按照上一节所述要求完成; 整体设备布置见图 2。采用载荷控制方式, 每级加载量根据实际情况而定, 开始每级 10N, 后期每级 1N—5N。在每次加载后, 等待足够长的时间, 待位移完全稳定时记录数据。当被测点位移超过 10mm 或模型整体失稳时终止实验。

模型桶为 3 个钢制圆桶, 桶直径均为 10cm, 桶内净高分别为 10cm、7.5cm 和 5cm。桶上端封闭, 底部敞口, 顶盖厚 1cm, 桶壁厚 2mm, 上端预留小孔为桶形基础下沉过程中排水提供通道, 下沉完毕后密封。加载开始前, 用螺丝将桶顶小孔堵住, 用真空泥密封, 静置半个小时后开始进行实验。

图 3 给出了不同桶长径比下水平力与水平位移的曲线。可以看出, 水平承载力与位移曲线存在明显的拐点(破坏点); 桶高 10cm 的基础水平承载力曲

线拐点约出现在水平位移为 6mm 处, 桶高 5cm 和 7.5cm 的基础水平承载力曲线拐点约出现在水平位移为 4mm 处; 随着桶高的增加, 桶形基础的水平承载力有所提高, 按照桶高大小依次约为 7N、10N、13N。

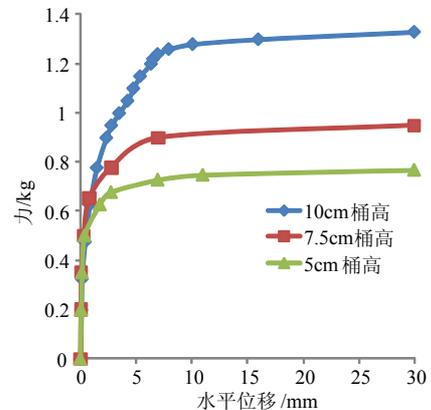


图 3 水平静载荷-位移曲线

Fig.3 Curves of horizontal static load-displacement

## 3 水平动载下桶基承载特性模型实验

小模型实验不能模拟重力效应, 不能进行与原型的相似关系实验。由于条件限制, 我们利用小模型实验获得小尺度下的水平动载下钙质砂地基中桶形基础的动力响应规律, 可为实践提供一些参考, 为数值模拟提供验证数据。

在低频荷载下(加载方式为位移控制), 我们关心的有桶形基础的位移, 周围土体的变形及范围, 土体反力以及地基中孔隙水压力的变化。为了得到地基中孔隙水压力沿垂向和水平方向的变化, 孔压传感器布置见图 4 所示两种形式。

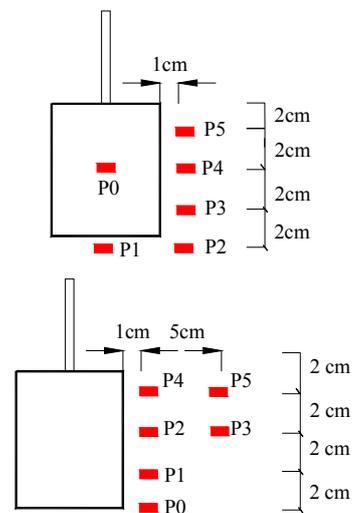


图 4 孔压传感器的布置形式

Fig.4 Layout of pore pressure transducers

### 3.1 实验重复性

为保证实验的可靠性，我们首先进行了重复实验，图 5 为 3 次重复实验桶顶的位移以及桶周围土体变形的曲线。可以看到，3 次实验结果较吻合。

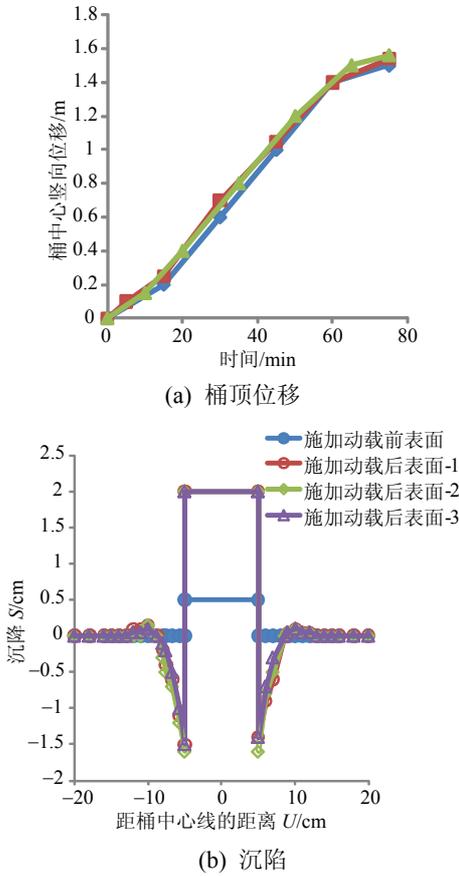


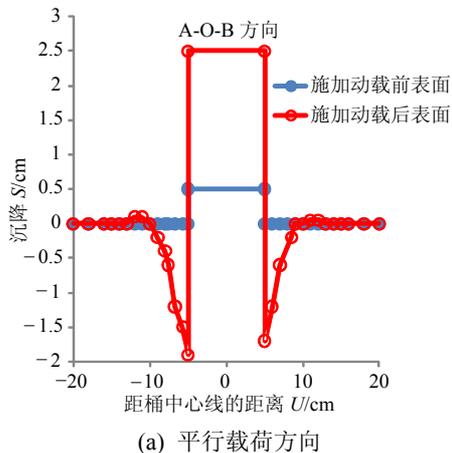
图 5 重复性实验  
Fig.5 Repeated experiments

### 3.2 各响应量随时间变化的结果及分析

下面以位移荷载幅值 3.0mm，频率为 0.15Hz，桶形基础高度为 10.0cm，直径为 10.0cm 工况下的结果说明各响应量随时间的变化特点。

#### 1) 土体表面沉降随时间的变化。

图 6 给出了振动结束后土体表面的状况。可以



(a) 平行载荷方向

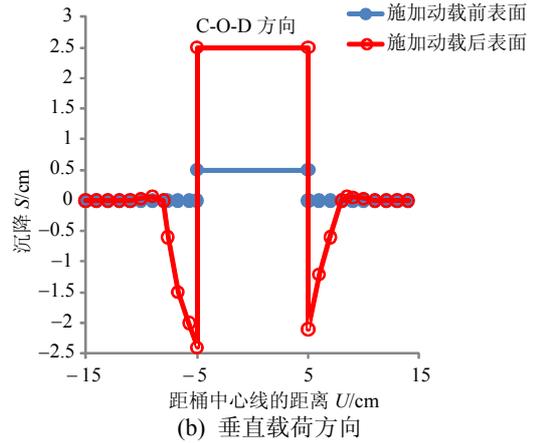


图 6 实验后桶土位置

Fig.6 Positions of bucket and soils after experiments

看到从桶形基础中心向外约一倍桶径左右范围内，土体产生了大的沉降，沉降随着离桶壁的距离增加而减小，在沉降区域外有一小范围的土体隆起；靠近桶壁的沉降区域底部，附着大量粗砂颗粒；沿激振方向沉降的范围较垂直激振方向的略大。

在加载过程中，可以明显观察到沿加载方向的土体随着加载的循环往复而隆起、陷落；随着加载时间的增加，桶壁周围土体开始沉降，桶基同时逐渐向上运动。桶壁与周围土体产生缝隙的同时，可以观察到周围土体向桶壁滑动，形成一个坡角，随着时间的增加，沉降边缘的土颗粒随着荷载的往复作用滚入沉降区深处，其中粗颗粒更容易滚入沉降区深处，故激振完成后沉降区底部附着大量粗颗粒。沿激振方向的沉降深度和宽度大于垂直激振方向的沉降深度和宽度。

出现这种土体表面沉降特性的原因是桶形基础在水平动载下，与桶外壁接触的土体受到挤压并把压力向远处传播，压力在传播过程中由于阻尼而逐渐减小，远处土体受到的扰动相对减小，距离桶壁最近处受到的扰动最大，变形也越严重。由于钙质砂颗粒较粗，渗透性好，且颗粒之间的棱角大，咬合作用很强，因此流动性较差，桶底部土体受力较小，软化较少；在土颗粒下滑至桶底部后，再被桶基挤出的很少，大部分沉在桶底，同时土体在载荷作用下发生剪胀，于是桶基向上运动，造成承载力的大幅降低。

#### 2) 桶形基础位移随时间的变化。

图 7 给出了桶形基础垂向位移随时间变化的曲线。可以看出，随着时间的增加，桶形基础发生向上的累积垂向位移，其向上运动的速度逐渐减小。这是因为本次工况中荷载幅值较大，在加载前期，

桶基对周围土体的扰动破坏了原始土体的骨架结构,破坏了原有的平衡状态,周围土体向桶壁底部滑动而向上挤压桶体,同时土体发生剪胀,于是桶基向上运动,承载力大幅降低,底部砂土也固结沉降,密度增加。桶基的运动难以引起周围土体的塑性变形了,于是达到一个新的稳态。本次工况下,桶基最后向上移动约 2.0cm,为桶高的 1/5。

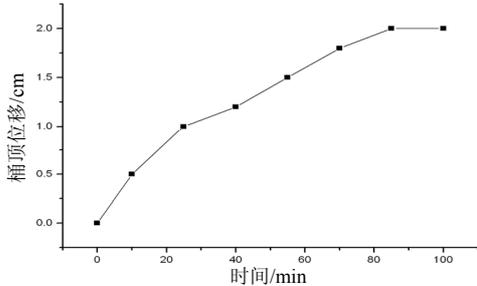
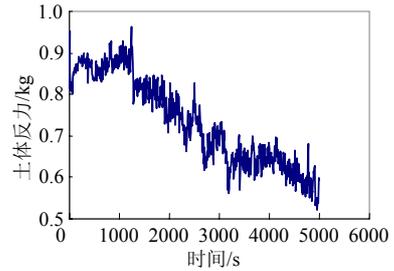


图 7 桶垂向位移

Fig.7 The vertical displacement of bucket

3) 土体反力随时间的变化。

图 8 给出了土体反力随时间变化的曲线。为使图清晰,这里给出的是土体反力-时间曲线的最大值包络线。可以看出,在加载初期,土体反力最大,之后逐渐降低,土体反力降低的速度在加载后期有



(c) 土体反力包络线

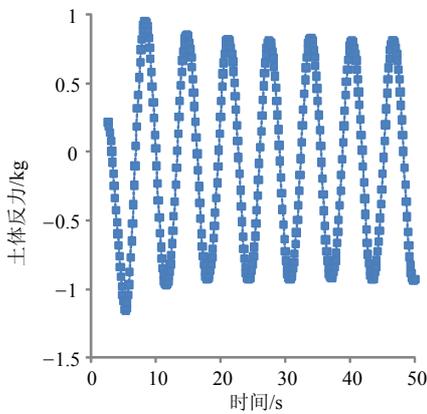
图 8 土体反力随时间变化的曲线

Fig.8 The curves of counterforce of soils with time 所减缓,直至最后趋于一个稳定值,在这种工况下,土体反力降低约 50%。

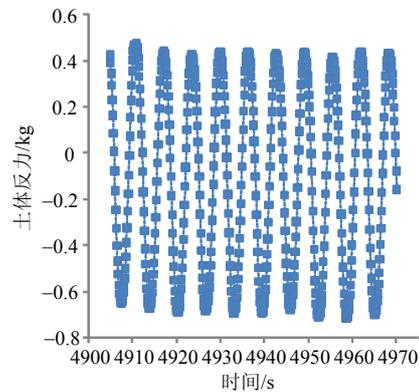
土体反力产生这种变化趋势的原因是土体水平反力主要与桶及桶内土重量、桶外壁与土之间的摩擦力,桶周围土压力、桶底土体的水平摩擦力和垂向反力以及水平位移加载点的位置有关。当加载一段时间后,桶基周围土体形成沉陷区域,桶基向上运动,导致桶外壁与土之间接触面积减少,使桶壁周围的土压力以及侧壁摩擦力减小,导致水平反力减小;桶壁周围土体产生的孔隙水压力逐渐消散,桶底部的土体密度增加,强度增加;桶基向上运动停止,因而土体反力在加载一段时间后趋于一个较稳定的值。

4) 孔隙水压力变化。

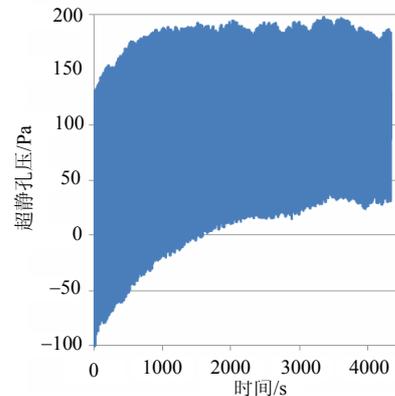
图 9(a)一图 9(h)给出了表面有 3.0cm 粘土层时,孔压传感器测得的孔压随时间的变化曲线。图 9(a)给出的是 P1 处超静孔压随时间变化的曲线,图 9(b)一图 9(g)给出的是超静孔压平均值(相当于累积孔压变化)随时间变化的曲线。可以看到,孔隙水压力得到了一定的累积。在加载初期,孔压迅速上升,之后缓慢增长,逐渐趋于一个稳定值,这与文献[20]中的试验结果在趋势上是一致的(图 9(h))。从同一深度的孔压传感器 P1、P5、P6 孔压增长曲线来看(其中 P1 距桶壁最近),距离桶壁越近,超静孔



(a) 加载开始阶段



(b) 激振 80min 后



(a) P1 孔压

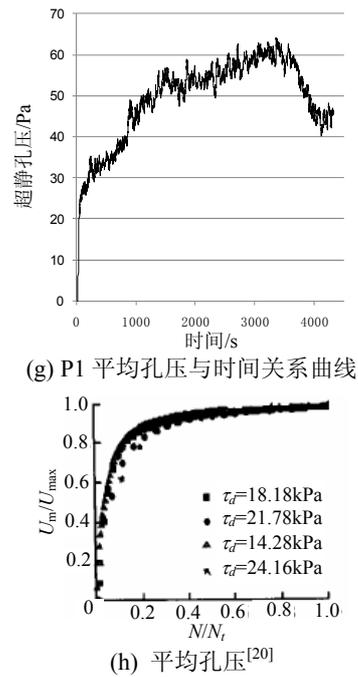
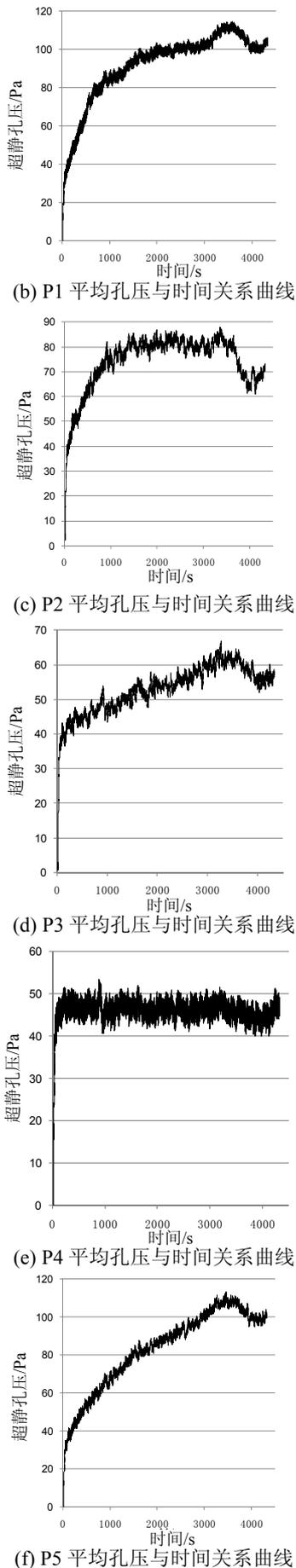


图9 孔隙水压力随时间变化的曲线

Fig.9 Pore pressure versus time

压累积越大。从距离桶壁同样距离，但不同深度的P1、P4、P3、P2孔压增长曲线来看，孔压的增长随着深度的增加而减小。总的来说，地基中的孔压在动载下的上升速度和幅值较其他类砂土如粉土中的小<sup>[8]</sup>。

这是因为，加载点在桶顶，因而桶上部土体受到的扰动较大，产生的超静孔隙水压也较大，本次工况中表面有3.0cm粘土层，导致孔压消散很慢，于是上部土体孔压得到累积。相应地，距离桶壁越远的土体受到的荷载扰动越小，产生的超静孔压也更小，因此出现了同一深度沿水平方向孔压逐渐减小的趋势。

本次实验中，激振60min后停机，测量孔压消散情况，从图9(a)—图9(h)中3600s后孔隙水压力下落的趋势来看，深度越浅的位置可明显观察到超静孔压曲线下降，而在桶底的传感器则基本无变化，因为深部孔压本身增长小，且深部渗透性稍差。

5) 土体影响区及密度变化。

实验后桶周围有一个明显的沉陷区域，在沉陷区外，土体微微有隆起，沉陷区域的坡角约为20°左右。沉陷区域靠近桶底处有粗砂颗粒。实验后测量不同位置的土体密度，发现桶附近一定范围内土体变密实(图10)。由于桶基在没有压重的情况下向上运动，故桶内土体的干密度并没有增加；周围土体由于反复挤压密实，干密度略微增加；桶底土体干密度增加最多，这是因为一方面桶基扰动发生塑

性变形,使土体向桶底滑动,另一方面,孔隙水压力的消散引起固结,导致桶底干密度的增加。

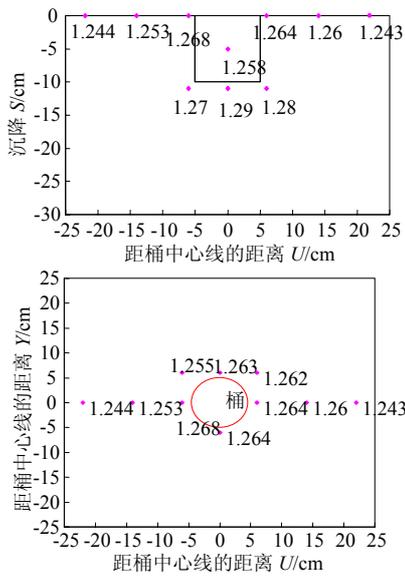


图 10 实验后的土体密度分布

Fig.10 Density distribution of soils after experiments

### 3.3 主要因素变化对桶形基础动力响应的影响

#### 1) 粒径的影响。

在实验中,我们发现钙质砂地基中桶基在水平循环荷载作用下有向上运动的趋势,这是因为钙质砂颗粒有棱角,故难产生相对运动,同时颗粒较粗,渗透性好,土体软化较小及存在剪胀性。为此做了如下的实验:将实验中钙质砂颗粒筛细,均用0.5mm的筛,筛细后作为地基,本节标注为地基A;同时,选取颗粒粒径类似、但颗粒圆滑的蒙古砂为地基,本文标注为地基B;原地基即不筛的钙质砂标注为地基C;将实验结果进行对比(注:三种地基采用相同的相对密度)。

实验发现,桶形基础在地基A和地基C中(图11),垂向向上位移的变化趋势并未改变。在0.1Hz,2mm幅值的情况下,两种地基中桶基都向上运动,地基A中桶基上升的速度和最终位移较小,当幅值增加至5mm时,地基A中桶基向上运动的速度比2mm幅值时明显加快;而地基B的情况则不相同,在0.1Hz,5mm幅值的情况下,桶基有向上运动的趋势,当频率增加至1Hz时,地基B中桶基发生较大的竖直向下的位移。这说明上述分析的原因是正确的。

由于钙质砂有棱角,导致其孔隙比及摩擦角远高于内蒙砂,相应地流动性也较差。在幅值及频率较小时,荷载对土体的扰动较小,产生的超静孔压不大,土体软化程度低,钙质砂与内蒙砂中的桶基

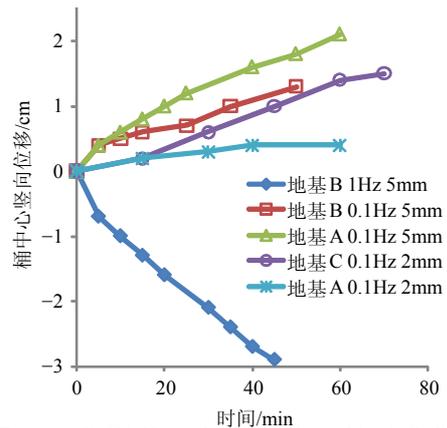


图 11 不同地基中桶垂向位移随时间变化曲线

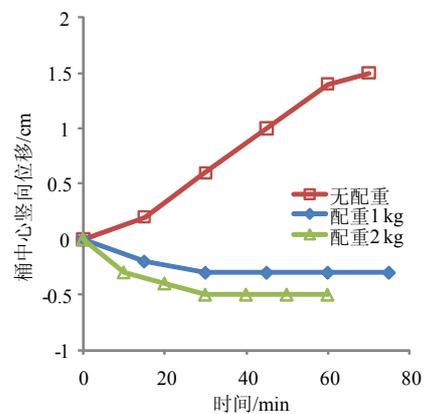
Fig.11 The vertical displacements of buckets with time in different soil layers

都因砂颗粒向桶底滑落(钙质砂还发生剪胀)而向上运动;而幅值及频率增加之后,渗透性差的内蒙砂可能产生较大的累积孔压,土体软化,桶在自重下可能发生沉降。而钙质砂流动性较差,渗透性较好,产生的累积孔压较小,土体软化的程度也小,桶不容易产生沉降,反而由于幅值增加引起更大的塑性变形而使桶向上的位移增加。这些实验现象表明,钙质砂地基的粒径分布对桶形基础在水平循环荷载下的承载特性没有根本的改变,起重要作用的是钙质砂颗粒的棱角和大孔隙特性。

#### 2) 压重的影响。

本节中,将不同压重的实验结果进行比较,分析压重对桶基承载性能的影响。

实验中,压重采用砝码并将其固定在桶顶。从图12(a)可以看出,压重增加,桶中心垂向位移的变化趋势发生了改变,当压重分别为1kg、2kg时(桶基重1kg),桶产生向下的垂向位移分别为0.3cm、0.5cm,且在激振30min后趋于稳定。从图12(b)看出,在压重增加的情况下,土体反力的数值也增加。



(a) 桶垂向位移

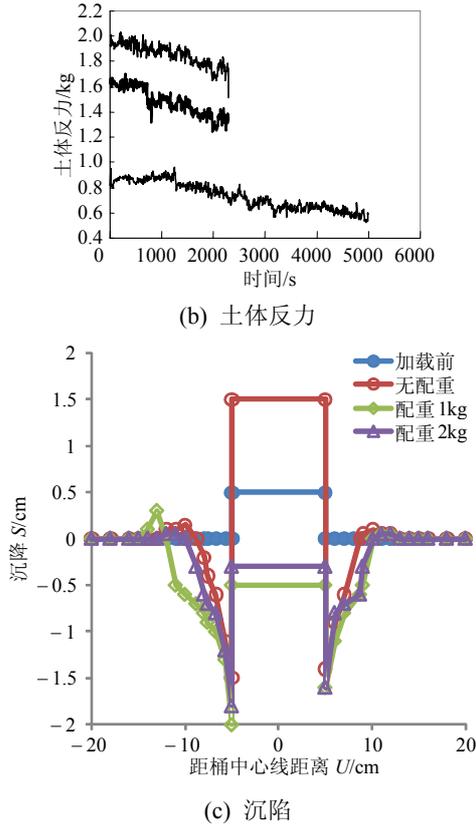


图 12 不同压重下实验对比

Fig.12 Comparison of the results under different pressure loads 尽管压重增加之后, 桶中心向下沉陷, 但周围土体的变形与无压重时情况类似(图 12(c)); 在激振结束之后, 压重 2kg、1kg、无压重 3 种情况下, 桶外壁与土体接触面积分别减少了约 10%、20%、30%, 土体反力分别减少了 15%、25%、50%。

桶底以及桶内土体的干密度随着压重的增加都有所增加, 压重越大, 增加得越大, 在动载作用下易破坏钙质砂的结构性而下沉。这是因为桶基周围土体发生塑性变形, 桶底土颗粒增加, 压重较大的情况下, 桶自重较大, 在自重作用下桶下沉, 会将桶底土体进一步压密, 导致干密度增加。压重为 2kg 时桶底土体干密度为  $1.31\text{g}/\text{cm}^3$ , 而无压重时仅为  $1.29\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 3) 频率的影响。

图 13 给出了不同荷载频率时, 桶中心垂向位移随时间变化的曲线以及激振结束后桶土沉陷状态。具体工况是: 位移荷载幅值 2.0mm, 桶形基础高度为 10cm, 桶形基础直径为 10cm, 频率分别为 0.1Hz、0.2Hz、1Hz。从图 13(a)可以看到, 荷载频率的增加对桶中心垂向位移影响很大。当频率增加至 1Hz 时, 桶向上运动了约 4.0cm, 约为桶高度的

40%; 从图 13(b)看到, 频率的增加使得桶周围土体的沉陷深度以及影响范围增加, 土表面土体与桶壁形成的裂缝宽达 5.0cm, 沉陷深度达 3.0cm。在荷载频率为 1Hz 的情况下, 当加载结束后, 周围仅有底部 3.0cm 左右高度的土体与桶外壁紧密连接在一起, 这将大大地削弱桶基的水平承载力。

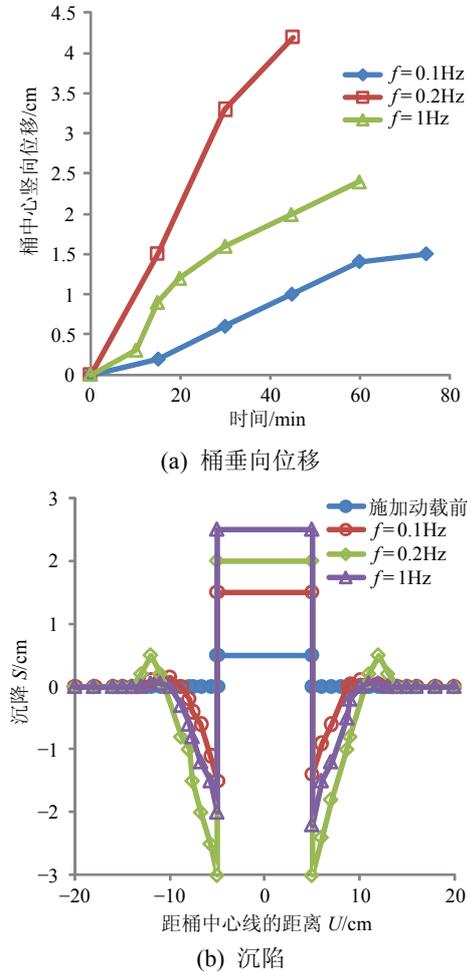


图 13 不同荷载频率下实验结果对比

Fig.13 Comparison of results under different frequencies

### 4) 位移幅值的影响。

图 14 给出了不同荷载幅值时, 桶中心垂向位移随时间变化的曲线以及激振结束后桶土沉陷状态。具体工况是: 荷载频率 0.1Hz, 桶形基础高度为 10cm, 桶形基础直径为 10cm, 位移荷载幅值分别为 2.0mm、3.0mm、4.0mm。从图 14(a)看到, 荷载幅值的增加对桶中心垂向位移影响较大, 当位移幅值增加至 4.0mm 时, 桶向上运动了约 2.5cm, 约为桶高度的 25%; 从图 14(b)看到, 位移幅值的增加使得桶周围土体的沉陷深度以及影响范围增加。幅值增加至 4.0mm 时, 土表面土体与桶壁形成的裂缝宽达 5.0cm, 沉陷深度达 3.2cm。

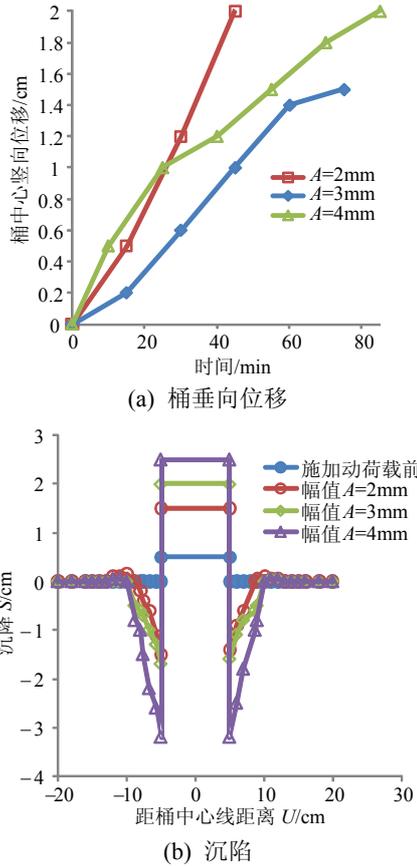
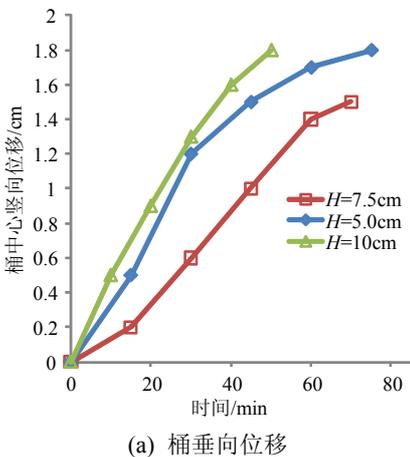


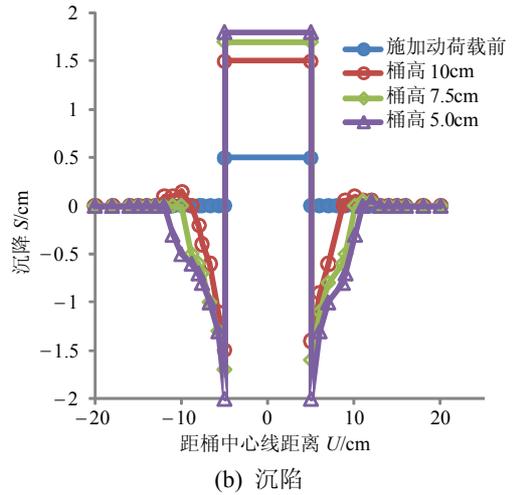
图 14 不同荷载幅值下实验结果对比  
Fig.14 Comparison of results under different load amplitudes

5) 桶高的影响。

图 15 给出了不同桶高时在加载结束后桶及周围土体的位移曲线。可以看出，桶高的减小不利于桶的稳定，桶高小的情况下，桶向上的位移较大，周围土体沉陷区域也较大。桶高不仅影响着桶的长径比  $H/D$ ，同时还体现在无量纲数  $A_h/H$  (载荷幅值与桶高之比)上。在其他参数不变的情况下，桶高度减小，对应的水平静极限承载位移也减小，土体受到的相对扰动就大，引起的土体塑性变形也越大，周围土体受影响范围也增加。



(a) 桶垂直向位移

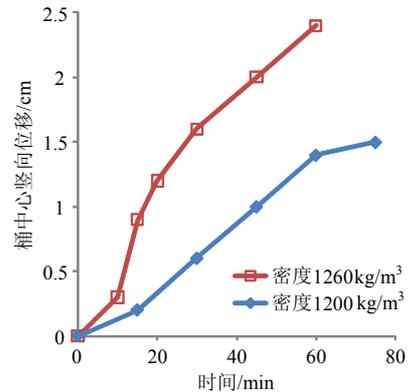


(b) 沉陷

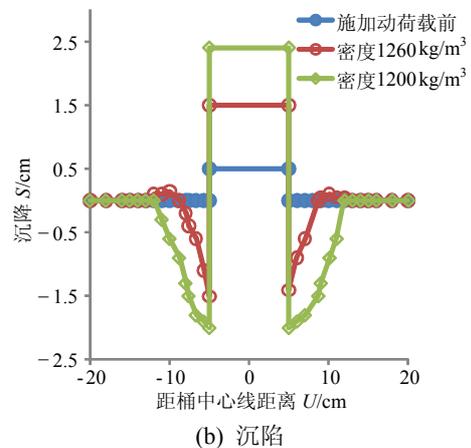
图 15 不同桶高下实验结果对比  
Fig.15 Comparison of results under different bucket's heights

6) 土体初始密度的影响。

本次实验中完成了两种干密度下的实验。两种密度分别为  $1.26\text{g/cm}^3$  和  $1.20\text{g/cm}^3$ 。结果表明：初始密度较大的土体在相同的荷载下产生的动力响应较小。如图 16 所示：密度较大的情况下，桶向上运动的最终位移减小，沉陷区域也更小。这是因



(a) 桶垂直向位移



(b) 沉陷

图 16 不同密度下实验结果对比  
Fig.16 Comparison of results under different soil densities

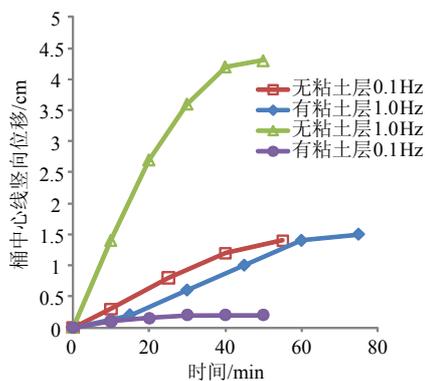
为初始密度增加,对于土的强度以及模量都有一定的提高,在相同的荷载下,强度高的土更不容易发生塑性变形,周围土体的响应减弱,即桶垂向位移减小及沉陷区域深度减小,测得的土体反力也减小。

#### 7) 分层土地基情况下的结果。

进行了表面有 3cm 粘土覆盖层的模型实验(采用的是桶顶与粘土层平齐的布置方式)。当表面有粘土层时,可以观察到随着加载时间的增加,粘土层表面产生环状裂纹,桶周围土体产生沉陷。表面有粘土层时,在频率为 0.1Hz,幅值为 2.0mm 时,桶在实验 60min 后仅上升了 0.2cm,表面观察到的土体沉陷也较无粘土层时小了很多。当频率增加至 1.0Hz 时,桶上升的速度有所增加,实验 60min 后约上升了 1.4cm,与无粘土层时地基相比,有大幅减小(见图 17(a))。



(a) 上覆粘土层实验结束后照片



(b) 桶垂向位移随时间变化

图 17 分层土的实验结果

Fig.17 Experimental results of layered soils

本次实验中采用的粘土固结后干密度为  $1.65\text{g/cm}^3$ ,比钙质砂层密度更高,在循环荷载下,粘土层吸收更多的能量,减小了下部砂层受到的扰动;另外,采用桶与粘土层平齐的布置方式(见图 17(b)),加载点与砂层的距离较无粘土层时增加了(增加的距离为粘土层厚度),在相同的荷载幅值和

频率下,对砂层的扰动相对较小;桶周围砂土层发生的变形较小,桶向上运动的最终位移及周围土体的沉陷也减小。

## 4 结论

(1) 进行了水平静载下桶形基础承载力实验,得到不同桶高的水平静承载力。结果表明:在实验开始的前一段,随着荷载的增加,模型桶的位移很小,在砂土地基的受压区表面也没有明显的变形迹象;当实验进行到后半段时,随着模型桶产生一个小的转角后,基础瞬间失稳倾覆。

(2) 进行了水平动载下桶形基础动力响应实验,获得了各响应量随时间变化结果和各因素的影响。结果表明:在荷载作用下,桶基周围一定范围内土体发生塑性变形,形成坡角约为  $20^\circ$  的沉陷区域;沉陷区内土体向桶底滑动,在没有压重的情况下,桶基向上运动;桶外壁与土体间形成缝隙,接触面积减少,土体反力大幅减小;当荷载幅值在一定范围内,加载一段时间后,孔压消散,桶底土体密度增加,荷载再难引起塑性变形,动力响应趋于稳定。随着荷载频率、荷载位移幅值的增加,桶基向上运动最终位移越大,土体反力减小得也越明显;当在桶顶配置压重时,桶基产生向下的竖直位移,周围土体影响圈变化不大,这种情况下,土体反力减小的幅度较无压重时减小。

## 参考文献:

- [1] 鲁晓兵, 郑哲敏, 张金来. 海洋平台吸力式基础的研究与进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 27-40.  
Lu Xiaobing, Zheng Zhemin, Zhang Jinlai. Progress in the study on the bucket foundations of offshore platform [J]. Advance in Mechanics, 2003, 33(1): 27-40. (in Chinese)
- [2] 孙吉主, 黄明利, 汪稔. 内孔隙与各向异性对钙质砂液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 166-169.  
Sun Jizhu, Huang Mingli, Wang Ren. Influence of inner pore and anisotropy on liquefaction characteristics of calcareous sand [J]. Soil Mechanics, 2002, 23(2): 166-169. (in Chinese)
- [3] 鲁晓兵, 张建红, 王淑云. 水平动载下桶形基础周围土体软化的离心机模拟[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(6): 7-11.  
Lu Xiaobing, Zhang Jianhong, Wang Shuyun. Experimental study of centrifuge on the softening of sand around bucket foundation under ice-induced vibration loading [J]. China Offshore Platform, 2004, 19(6): 7-11. (in Chinese)
- [4] 施晓春, 龚晓南, 徐日庆. 水平荷载作用下桶形基础

- 性状的数值分析[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 49—52.
- Shi Xiaochun, Gong Xiaonan, Xu Riqing. Numerical analysis of properties of bucket foundation under horizontal forces [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(4): 49—52. (in Chinese)
- [5] 孙大鹏, 袁中立, 朱其敏. 滩海平台桶形基础承载力试验研究[J]. 石油工程建设, 1999, 2: 12—20.
- Sun Dapeng, Yuan Zhongli, Zhu Qimin. Experimental study of bearing force of bucket foundation in shallow offshore ocean [J]. Petroleum Engineering Construction, 1999, 2: 12—20. (in Chinese)
- [6] 李向东, 王建华, 杨海明. 软土地基中单桶基础承载力的模型试验研究[J]. 勘察科学基础, 2007, 3: 3—6.
- Li Xiangdong, Wang Jianhua, Yang Haiming. Study of model test on bearing capacity of bucket foundation in soft soil foundation [J]. Foundation of Site Investigation Science, 2007, 3: 3—6. (in Chinese)
- [7] 李驰, 王建华, 刘振纹. 软土地基单桶基础循环承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1040—1044.
- Li Chi, Wang Jianhua, Liu Zhenwen. Cyclic bearing capacity of single bucket foundation on soft clay strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1040—1044. (in Chinese)
- [8] Wang Yihua, Lu Xiaobing. The responses of the bucket foundation under horizontal dynamic loading [J]. Ocean Engineering, 2006, 33: 964—973.
- [9] Randolph M F, O'Neill M P, Stewart D P, Erblich C. Performance of suction anchors in fine-grained calcareous soil [J]. OTC8831, 1998: 521—529.
- [10] Dyson G J, Randolph M F. Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(4): 346—352.
- [11] Riadh H Al-douri, Harry G Poulos. Predicted and observed cyclic performance of piles in calcareous sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(1): 1—16.
- [12] Riadh H Al-douri, Harry G Poulos. Static and direct shear tests on carbonate sands [J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, 19(2): 138—155.
- [13] Jhin T Chin, Harry G Poulos. Tests on model jacked piles in calcareous sand [J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, 19(2): 164—179.
- [14] Waston P G, Randolph M F. Vertical capacity of caisson foundations in calcareous sediments [C]. Proceedings of the seventh (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, May 25—30, 1997: 784—790.
- [15] Coop M R, Klotz E U, Clinton L. The influence of the in situ state of sands on the load-deflection behaviour of driven piles [J]. Geotechnique, 2005, 55(10): 721—730.
- [16] Cassidy M J, Airey D W, Carter J P. Numerical modeling of circular footings subjected to monotonic inclined loading on uncemented and cemented calcareous sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, 131(1): 52—63.
- [17] Cassidy M J, Byrne B W, Houlsby G T. Modeling the behaviour of circular footings under combined loading on loose carbonate sand [J]. Geotechnique, 2002, 52(10): 705—712.
- [18] 初晓锋, 汪稔. 钙质砂中锚定物锚固性能的实验研究[J]. 岩土力学, 2002, 2(3): 368—371.
- Chu Xiaofeng, Wang Ren. The test research of anchor's uplift behavior in calcareous sand [J]. Soil Mechanics, 2002, 2(3): 368—371. (in Chinese)
- [19] 单华刚, 汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展评述[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 299—304.
- Shan Huagang, Wang Ren. Development of study on pile in calcareous sand [J]. Soil Mechanics, 2000, 21(3): 299—304. (in Chinese)
- [20] 虞海珍, 汪稔, 赵文光. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(11): 86—89.
- Yu Haizhen, Wang Ren, Zhao Wenguang. Experimental research on development pattern of pore water pressure of carbonate sand under wave loads [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(11): 86—89. (in Chinese)

(上接第 192 页)

- [11] Johnson K L. Contact mechanics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [12] Thornton C. A theoretical model for the stick/bounce behavior of adhesive, elastic-plastic spheres [J]. Powder Technology, 1998, 99: 154—162.
- [13] 陈万祥, 郭志昆, 钱七虎. 基于接触理论的弹体偏航机理[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, 7(5): 458—466.
- Chen Wanxiang, Guo Zhikun, Qian Qihu. Yawing mechanism of projectile based on contact theory [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 7(5): 458—466. (in Chinese)