

冰载荷作用下海洋平台桶基的离心模拟

张建红¹, 鲁晓兵²

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要

吸力式基础从20世纪70年代开始应用于港口、防波堤和海岸灯塔等的建设上,从1994年开始被用于海洋平台基础。这种基础形式同样应用于我国渤海油田开发中。渤海湾每年冬季有三个月的冰期,海冰不仅使平台受到很大的水平静压力,而且海冰破碎撞击平台会引起平台结构强烈的振动。已测定的平台结构的振动频率是0.8Hz~1.0Hz。为了模拟在这种水平动载荷作用下基础的承载特性,清华大学开展了离心模型试验研究。本文介绍了动冰载荷作用下吸力式基础离心模型试验的结果,并进行了相应分析。

关键词: 海冰; 振动; 吸力式基础; 动加载设备; 离心机模拟; 孔隙水压力

1 引 言

吸力式基础越来越普遍地应用于各种近海的结构,这种类型的基础不仅在安装和施工时有优势,而且适用于较大的水平载荷和弯矩作用下的结构。它应用于我国渤海油田开发中。渤海湾每年冬季有三个月的冰期,海冰不仅使平台受到很大的水平静压力,而且海冰破碎撞击平台会引起平台结构强烈的振动。已测定的平台结构的振动频率是0.8 Hz~1.0Hz。为了研究吸力式基础及周围土体的承载特性,清华大学与中国科学院力学研究所合作进行海洋平台吸力式基础的离心模型试验研究^[1-7],本文选择性地介绍了动冰载荷作用下吸力式基础离心模型试验的结果,并进行了相应分析。

2 离心模型试验系统

中国科学院力学所和清华大学共同研制开发了电磁式激振器,用于模拟冰载荷^[1,4]。图1为离心机和模型系统的示意图。铝制的模型箱的内部尺寸是600mm×350mm,高350mm。粉砂土的厚度是210mm,下设20mm的粗砂。粉砂土表面以上有20mm深的自由水。激振器由螺杆和两个固定梁固定,两根支撑杆使激振器的后部顶在外层的模型箱上。在模型箱的边缘上附着了一个微型电视摄像机,用于监控桶基模型的变化。桶基模型是一个钢质圆筒,外径60mm,壁厚2mm,高72mm。一根直径8mm的空心钢管与桶相连。平台的重量由设置在桶杆上的质量块模拟。模型桶的运动由两个位移传感器监控。当在80g离心加速度下对模型桶基进行加载时,桶基所表现出来的特性对应于直径4.8m的原型桶基的特性。

目前主要采用两种方法来解决动离心模型试验中的时间比尺的矛盾^[8]。本文中采用福建漳州中砂混合粉质粘土得到一种低渗透性的土来模拟原型土,混合土的粘粒含量为3.2%,渗透性比原型降低约40倍,但是比相似比尺80小。因此试验中孔隙水压力消散过程要比增长过程快,所测得的累积孔隙水压力偏低。粉砂分五层击实,控制干密度为1.52 g/cm³。在离心机固结后,粉砂的干密度增加到1.60 g/cm³,在这一干密度下进行的固结排水三轴试验获得的土的抗剪强度参数为 $C=0$, $\phi=35^\circ$ 。孔

收稿日期: 2005-07-15

压传感器在制样过程中埋在土中，传感器不固定。制样完成后，模型采用真空抽气法饱和，饱和度达到 97% 以上。

模型土在 80g 离心加速度下固结 40min，相当于原型土固结 6 个月。位移传感器测出 80cm 的原型固结沉降。固结后，对桶基施加 26.7 小时的水平周期载荷。激振器由载荷控制。从力传感器、位移传感器和孔压传感器输出的信号经过离心机滑环传给数据采集系统。在激振过程中，载荷函数的形状保持不变，载荷的幅值稍有降低，但不是很显著。

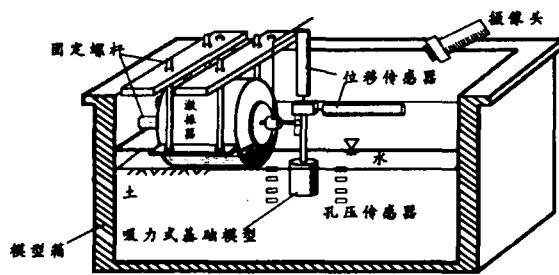


图1 离心模型布置图

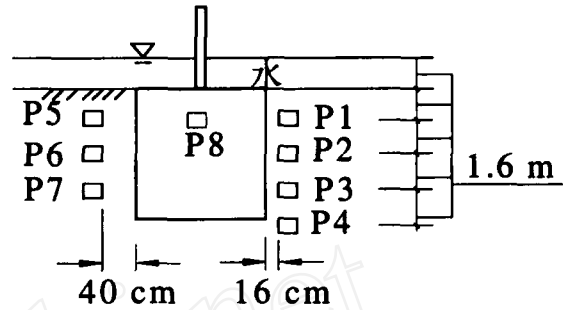


图2 孔隙水压力传感器布置图

3 离心试验的结果

本文给出离心模型试验的一个典型结果，并分析了桶基在水平周期加载下的特性，以及桶基的高度对基础响应的影响。所施加的周期载荷的峰值是 60N，频率是 64Hz，相当于给原型施加 4800N 和 0.8Hz 的周期载荷。试验中采用了直径为 4.8 m，高度 5.76 m 的桶基。

图 2 示出了模型中 8 个孔压传感器的布置，表示为 P1~P8。传感器的埋置深度将由模型经离心机试验后的实测结果进行校准，并转化为原型尺寸，如表 1 所示。本节中所有的描述均为原型单位。

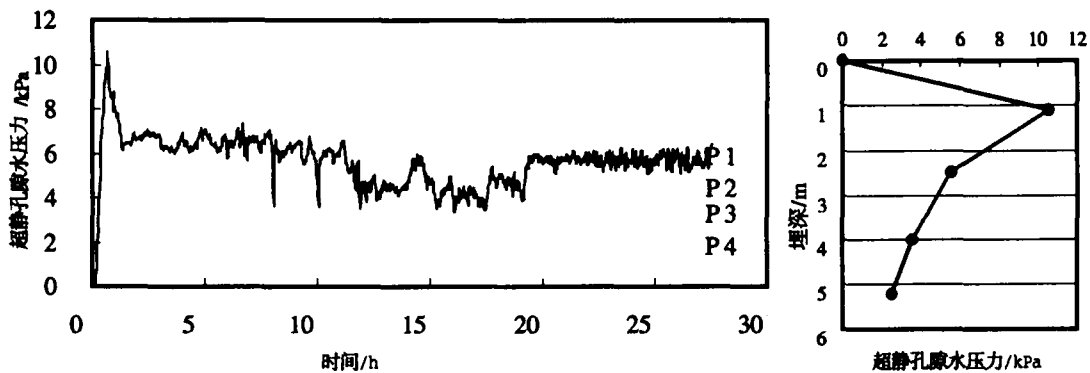


图3 P1~P4 的超静孔隙水压力随时间的变化和沿深度的分布

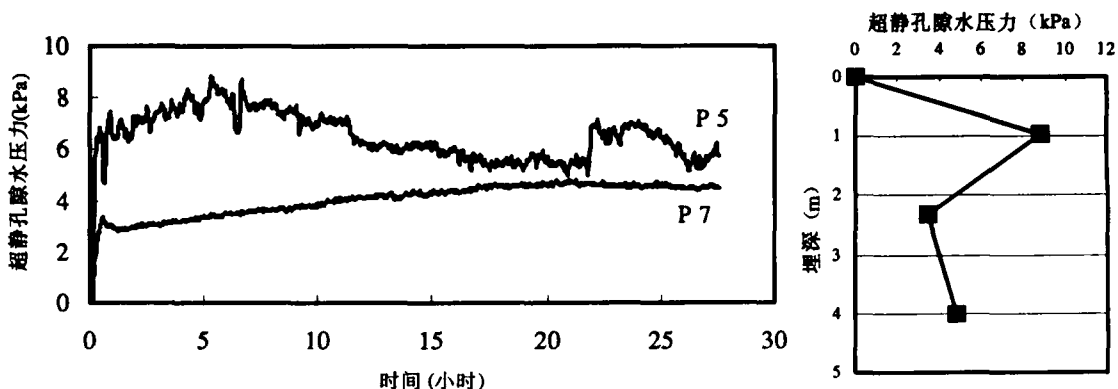


图4 P5~P7 的超静孔隙水压力随时间的变化和沿深度的分布

图 3~图 5 显示了在激振过程中模型 1 的超静孔隙水压力。图 3 示出了由 P1,P2,P3 和 P4 记录的超静孔隙水压力, 以及距模型桶基的侧壁 16 cm (水平方向) 处纵剖面上的孔压。P1 处出现了一段高孔压区, 此时 P1 处最大超静孔隙水压力 Δu_m 与初始有效上覆压力 σ_v' 的比值接近为 1, 如表 1 所示。在土层深度为 1.5m 内可能出现液化。并且当离心机停止时, 细的土颗粒出现在模型桶基边缘的土样表面。由于 P1 位于接近表层处, 它也出现了明显的变化, 表明了超静孔隙水压力的快速消散。但 P2,P3,P4 并未表现出明显的峰值, 它们在大约 5h 内达到稳定状态。如图 3 中所示, 最大和残余超静孔隙水压力 Δu_m 和 Δu_r 均随深度增加而减小。纵剖面曲线显示出 P1 处出现最大孔压, 又迅速衰减至 P2 处, 之后继续衰减至 P3 和 P4 处。

图 4 示出了 P5 和 P7 记录的超静孔隙水压力, P6 在实验中失效。这两个传感器安装在距模型桶基另一侧壁 40 cm 处。与 P1 类似,P5 处也出现了明显的峰值。P5 处 $\Delta u_m/\sigma_v'$ 值为 0.94, 非常接近 1, 但由于它位于距桶基相对较远处, 峰值出现较慢。P5 也经历了明显的变化而衰减到一个更低的值。这两个孔压传感器的孔压残余值随土层加深而减小。

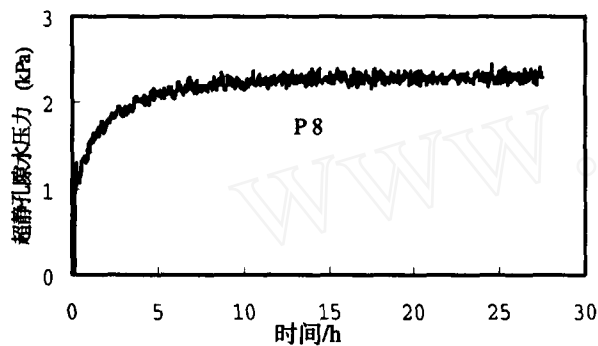


图 5 P8 的超静孔隙水压力随时间的变化

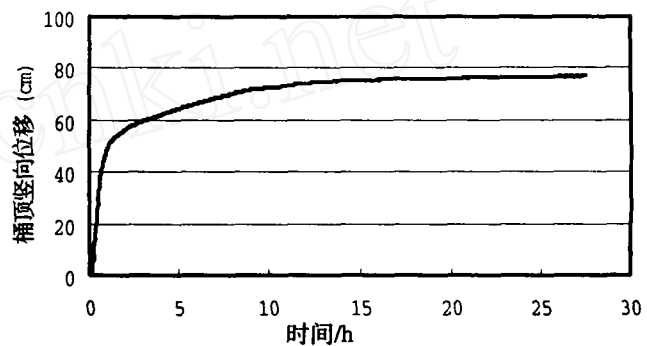


图 6 桶基竖向沉降

图 5 示出了模型桶基内部产生的超静孔隙水压力, 产生的是正孔隙水压力而非副孔隙水压力, 表明横向载荷导致了地基土内部主要是剪切压缩。

超静孔隙水压力使模型基础周围的地基土强度降低。如图 6 所示, 基础发生了 80cm 的沉降。在激振过程中, 61% 的沉降发生在 1h 之内, 这可能与地基中出现的最大超静孔隙水压力有关。持续的振动使粉土密实, 因此 80% 的沉降发生在 5h 之内, 这段时间内超静孔隙水压力趋于稳定。

表 1 激振过程中土体中的超静孔隙水压力

传感器编号	土体深度 (m)	初始竖向有效上覆压力 σ_v' (kPa)	最大超静孔压 Δu_m (kPa)	孔压比 $\frac{\Delta u_m}{\sigma_v'}$	残余孔压 Δu_r (kPa)	残余孔压比 $\frac{\Delta u_r}{\sigma_v'}$
P1	1.12	10.98	10.58	0.96	6.39	0.582
P2	2.48	24.3	5.53	0.23	4.68	0.193
P3	4	39.2	3.59	0.09	3.38	0.086
P4	5.2	50.96	2.48	0.049	2.35	0.046
P5	0.96	9.41	8.87	0.94	5.75	0.611
P7	4	39.2	4.8	0.12	4.51	0.115
P8	0.8	7.84	2.59	0.33	2.30	0.293

4 结论

中国科学院力学研究所和清华大学在清华大学联合进行了吸力式基础离心模型试验, 研究吸入式基础在水平循环载荷下, 长达 26.7h 内的动力响应。试验表明基础周围的粉土中产生了超静孔隙水压力

力, 在 1.2 长径比下, 最大超静孔隙水压力近似等于竖向有效应力。潜在的液化存在于 1.5m 的深度范围内。残余的孔隙水压力随深度递减。长时间的激振作用使地基强度减弱而出现了更大的沉降。

参 考 文 献

- 1 林小静, 张建红, 孙国亮, 鲁晓兵. 离心机中海洋平台吸力式基础水平动载荷加载设备[A]. 2003 年度海洋工程学术会议, 《中国造船》增刊[C], 2003, 44: 400~404.
- 2 张金来, 鲁晓兵, 王淑云, 时钟民, 张建红. 振动载荷下饱和砂土地基液化区域扩展分析[A]. 2003 年度海洋工程学术会议, 《中国造船》增刊[C], 2003 年, 44: 475~479.
- 3 鲁晓兵, 张建红, 王淑云, 孙国亮, 时忠民. 水平动载下桶型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.
- 4 张建红, 孙国亮, 鲁晓兵. 离心机中动冰载荷的模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (4): 474~477.
- 5 鲁晓兵, 王义华, 张建红, 孙国亮, 时忠民. 水平动载下桶型基础变形的离心机实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (7): 789~791.
- 6 Lu X B, Zhang, J H, Sun G L, and Chen Z Y. Simulation of dynamic loading in centrifuge for suction bucket foundations[A]. The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition[C]. Korea, 2005.
- 7 Zhang J H, Su C M, Sun, G L, Lu X B Centrifuge Modeling of Suction Bucket Foundation under Horizontal Dynamic Loading[A]. Sino-Japanese Symposium on Geotechnical Engineering[C]. Shanghai, 2005.
- 8 Kutter B L. & James R G. Dynamic centrifuge model tests on clay embankments[J]. Geotechnique, 39,(1):91~106.

Simulation of Suction Bucket Foundations under Ice Loadings in Centrifuge

ZHANG Jian-hong¹, LU Xiao-bin²

(1.Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Institute of Mechanics, China Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract

Application of suction foundation was initiated in 1970s, mainly in docks, breakwaters, etc. This foundation was first used for platform in 1994 in North Sea. Currently, suction bucket foundations are widely used in the offshore platform for the exploitation of the offshore petroleum and natural gas resources in the Bohai Bay of China. During winter season, ice sheets formed in Bohai Bay will impose strong impact and result in strong vibration on the platform. The measured frequency of the structural vibration of the platforms is 0.8Hz~1.0 Hz. This paper describes a dynamic loading device developed on the geotechnical centrifuge at Tsinghua University and its application in modeling suction bucket foundation under the equivalent ice-induced vibration loadings.

Key words: ice loading; vibration; suction bucket; dynamic loading device; centrifuge