

文章编号:1001-4500(2009)01-0040-06

钙质砂地基中桶形基础垂直动载响应实验研究

王 丽¹, 鲁晓兵¹, 时忠民²

(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: 首先进行了垂直静极限承载力实验,为确定垂直动载荷幅值的选择提供参考。然后重点针对载荷幅值和频率的影响进行了系列的室内小模型实验,并对结果进行了分析,获得了垂直动载下桶形基础在钙质砂地基中的响应特点。

关键词: 钙质砂;桶形基础;垂直动载荷

中图分类号: P751 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESPONSES OF BUCKET FOUNDATIONS IN CALCAREOUS SAND UNDER VERTICAL DYNAMIC LOADING

WANG Li¹, LU Xiao-bing¹, SHI Zhong-min²

(1. Institute of Mechanics, Chinese of Academy, Beijing 100080, China;

2. Research Center, COONC, Beijing 100027, China)

Abstract: Experiments to determine the vertical static bearing capacity are carried out a reference choosing of the dynamic load amplitudes. Then a series of experiments are made in laboratory to study the influences of the load amplitudes and frequencies. After we analyze the results, the respondent characteristics of bucket foundations in calcareous sand under vertical load are obtained.

Key words: calcareous sand; bucket foundation; vertical dynamic load

随着油气开采的发展,出现了新型海洋平台基础——桶形基础。这种基础较常见的桩基具有节省和安装方便等优点^[1],其应用前景广阔。在热带海洋(如南海),广泛分布着钙质砂,这种砂具某些特性^[2],桶形基础在钙质砂地基中的承载特性迄今还不清楚。Randolph 等人^[3]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、动载作用下的承载特性。Dyson^[4], Harry G. Poulos^[5~7]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^[8]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。初小锋、汪稔^[9,10]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、动承载特性有一些研究,但对吸力式桶形基础承载特性研究很少,针对我国南海钙质砂的研究则更少。在世界石油日益紧张的今天,我国对南海海域将进一步开发;桶形基础在这些海域颇有应用价值。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载荷下的响应。

收稿日期: 2008-08-20

基金项目: 国家高技术研究发展专项(863)和中科院三期创新项目“kgcx2-yw-L02”资助。

作者简介: 王 丽

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。

表 1 钙质砂的物性参数

C	渗透系数 k (cm/s)	d ₁₀ /mm	D ₆₀ /mm	D _r
0	47.7° 5 × 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 0~100kg 或位移幅值 0~50mm,频率为 0.1~20Hz。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。

1.4 传感器及数据采集系统

实验中主要使用了拉压力传感器(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 15kg,80kg。孔隙水压力由英国 Druck 公司生产的 PDCR81 型孔隙水压力传感器(PPT)进行测量,其直径为 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 在用于测量以前都在真空作用下进行饱和,并对它们进行标定,以防有损坏的。采集系统为阿尔泰公司的 USB2005 16 块采集板,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/cm³。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土体地基时进水用,为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。

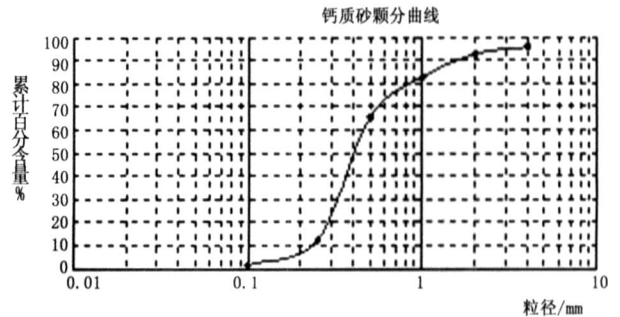


图 1 颗粒级配曲线

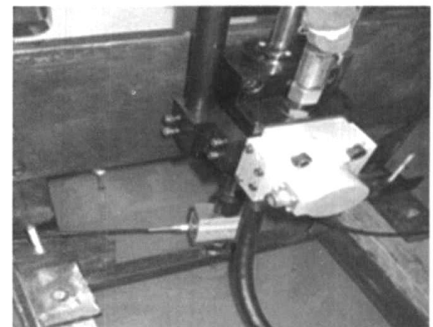


图 2 实验布置示意图

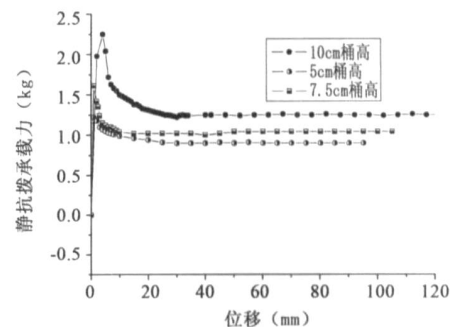


图 3 垂直静载荷~位移曲线

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) 在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,当桶基垂向位移基本停止时,停止加载。

2 垂向静载及垂向动载实验

2.1 垂向静载实验

针对桶高、加载速率两种影响因素变化情况进行实验,期望得到钙质砂地基中桶形基础静抗拔性质,为垂向动载实验方案的确定提供参考。

图 3 给出了不同加载速率、不同桶高下抗拔力与位移关系曲线。可以看出,随着桶高的增加,桶的垂向抗拔力也增加,对于同样高度的桶,加载速率的增加也使抗拔力的峰值增加。这是因为加载速率较快时,桶内顶部与土体之间来不及被水充满,产生负压,这就形成了所谓的被动吸力,产生了附加的抗拔能力,同时,桶内土体产生体胀,增加了侧壁摩阻力。桶高的增加,使桶壁与土体之间的接触面积增加,侧壁摩阻力也增加,故相应的抗拔力也相应增加。

2.2 垂向动载实验

海洋平台发生垂荡的频率一般为 0.2~0.1 Hz 左右。本文实验中取荷载频率 0.15 Hz,加载采用位移控制方式,即控制桶形基础上下振动的幅值。振动位移幅值为 2mm(另有注明时除外,这里振动位移幅值指半波峰值)。

实验中采用的桶形基础尺寸为:直径 10cm,高 7.5cm,壁厚 0.2cm,顶厚 1cm。为了量出土层中的孔隙水压力,将孔压传感器在制备土样过程中埋设在土中(不固定,可以随土体变形而变形),初始埋设的位置见图 4。两种形式的布置是为了能测出孔隙水压力沿深度和水平方向的变化。

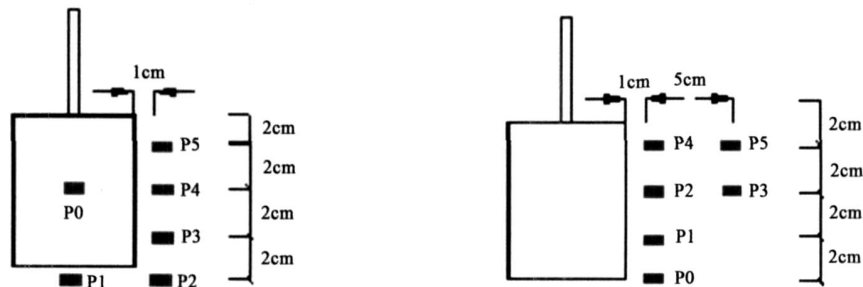


图 4 孔压传感器的布置形式

2.2.1 土体表面变化

图 5 和图 6 分别给出了桶形基础周围土体受扰动而产生垂向位移的土体表面变形区域(称为沉陷区)的形状和大小。具体工况为:荷载频率 1 Hz,桶形基础振动位移幅值 2mm。

可以看到,激振开始几周后立即在桶周围出现约 0.5cm 的环形影响圈,影响圈内略有沉陷(约为 0.2cm)。随后,沉陷区外的土体由于受到挤压,土体微微隆起;随着荷载时间增加,沉陷区域扩大,且沉陷深度增加。沉陷区的半径约为桶半径的两倍。

在垂向动载作用下,桶基周围发生的沉陷主要由两个因素造成:桶基振动引起周围土体发生塑性变形、振动引起的超静孔隙水压力消散时的固结沉降。振动一开始即出现的小范围沉陷是在振动下周围土体产生了塑性变形。在垂向动载荷作用下,桶形基础周围的土体受到扰动并产生超静孔压,这种扰动在土层中传递

过程时由于能量耗散,由近到远逐渐衰减。土体中的超静孔隙水压力累积随着离桶壁距离的增加而减小。随着加载时间的增加,土中超静孔隙水压力逐渐消散,土体逐渐固结密实,形成沿桶形基础周围一定范围的沉陷区域,距离桶形基础越近沉陷越大。

2.2.2 土体反力变化

图 7 给出了土体垂向反力的变化曲线。在垂向循环荷载下,桶压入时受到的力由端部阻力以及桶壁与土体的摩擦力组成,而桶拔出时受到的主要是桶壁与土体摩擦力以及少量吸力。钙质砂的渗透性较好,产生的吸力与其端部阻力相比较小,因此,垂向力曲线两个方向大小相差较多。可以看出,桶在垂向荷载作用下,压入时受到的阻力约为 80kg,而拔出时的力约为 2kg。在动载开始阶段,压入时垂向力迅速减小,约为刚开始几周的 70%,拔出时垂向力也略有减小;经过这段时间之后,压入时垂向力的变化趋势由减小变成增加,随着时间的增加,压入时垂向力逐步增加,在荷载作用约 20 分钟后,趋于一个稳定值;拔出时垂向力的变化趋势与压入时大致相同,首先减小,然后增加,最后趋于一个稳定值。

出现上述现象的原因是桶形基础在垂向动拉拔荷载作用的过程中,桶周围土体在动载的扰动下发生剪切压缩,产生超静孔隙水压力,降低了土的有效应力,致使强度降低,此时桶形基础压入及拔出时的垂向力也均降低,主要是因为钙质砂渗透性较好,排水较快,桶中下部基本没有超静累积孔压,使桶形基础仍有相当大承载力;随着加载时间的增加,桶壁周围土体中的孔隙水向表面渗透,土体发生固结密实,使压入时桶受到的垂向阻力增大;拔出时虽由于沉陷桶土接触面积减小,但桶下部土体更密实,对桶壁摩擦力较大,吸力也较大,故拔出时力有小幅增加。

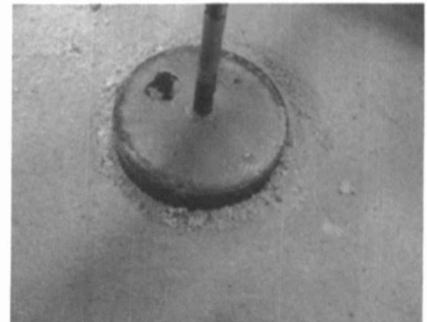


图 5 加载 60min 后的照片

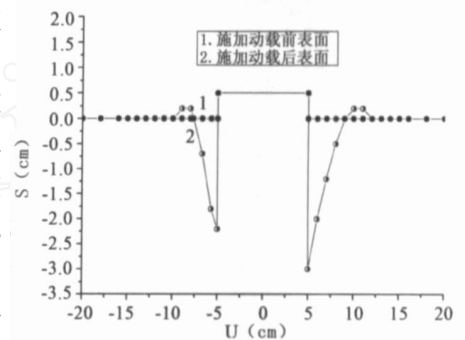


图 6 实验后桶一土面沿模型长边方向的位置

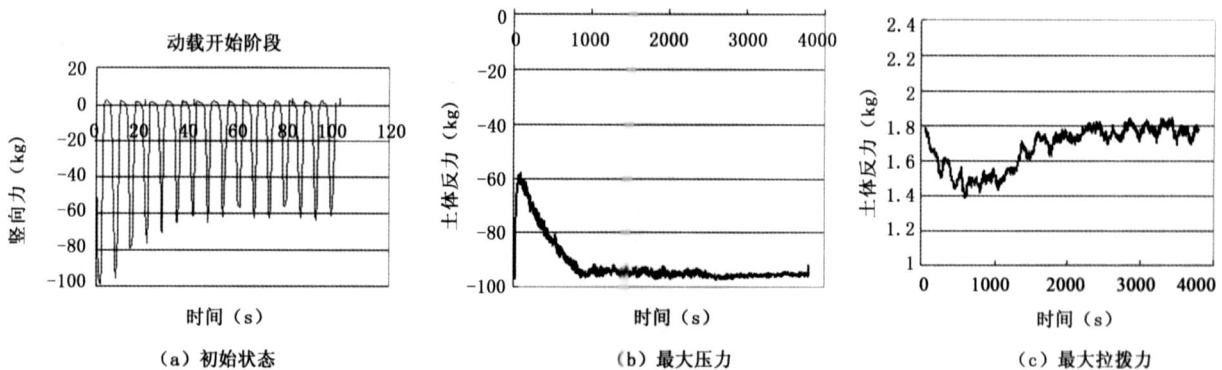


图 7 土体反力变化

2.2.3 密度变化

实验结束后,对土体的密度进行了测量。取一次实验后不同点处的土体密度用来说明其变化规律。土体初始干密度为 1.26g/cm^3 。实验后桶内土密度略有增加,为 1.288g/cm^3 ,桶底土体干密度增加至 1.305g/cm^3 ;沉陷区外的土体密度基本保持不变。

桶内土体干密度增加是由于桶顶密封,桶内产生的孔隙水压力向下渗流至桶外而固结密实;垂向动载的扰动作用使得桶周围土体产生塑性变形及孔隙水压力,塑性变形的结果是土体产生向桶底的滑移,使桶底密度增加;同时孔隙水压力消散固结,也使得桶底密度增加。

2.2.4 超静孔隙水压力变化

图 8 给出了桶形基础周围土体不同位置处超静孔隙水压力随加载时间变化的关系曲线。可以看出,孔压在前半个小时处于上升期,随后趋于平稳,孔压计 P2、P3 由于处在桶下部,排水比上部要慢,因此在半小时后孔压还略有增加,但增加的幅值也有所减小。从超静孔压数值来看,不同深度处超静孔隙水压力较接近,但底部稍大。这是由于桶形基础在垂向动载作用下对桶壁周围相同距离处的土体产生的扰动是一致的,沿深度变化不大,但土体表面的排水条件较桶下部要好,因此上部孔隙水压力累积较小,而下部略大。

总体来说,钙质砂中孔压累积较小。水平距离桶外壁 5.0cm 处超静孔压为零。尽管沿桶外壁不同深度有一定的孔压累积,但液化指数(超静孔压/有效应力)仅为 0.2 左右。这与钙质砂渗透性较好,内孔隙大,不易液化的特殊性质有关。

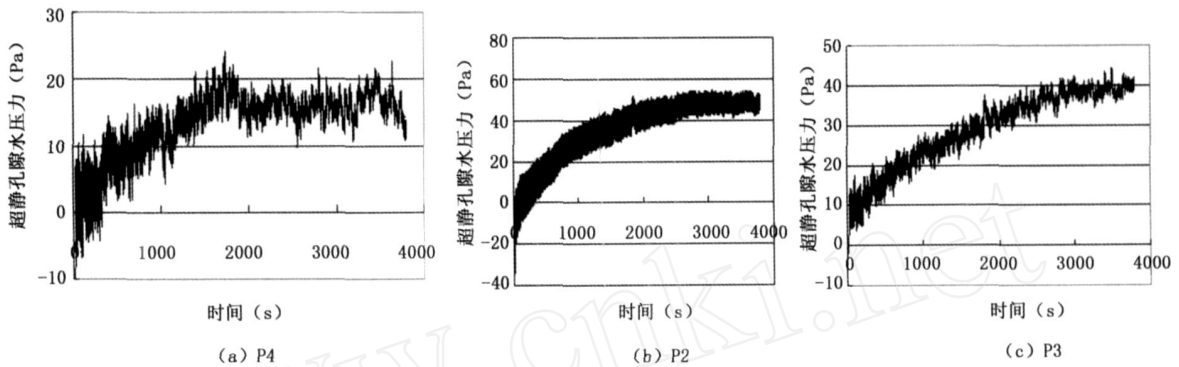


图 8 不同深度超静孔压变化曲线

3 载荷参数变化对桶形基础响应特性的影响

3.1 振动位移幅值变化的影响

为研究振动位移幅值对桶形基础动承载特性的影响,在载荷频率 0.15Hz 和其他条件不变情况下,施加振动位移幅值 2mm、5mm。图 9(a) 给出了不同动位移幅值下的土体沉陷范围及深度曲线。可以看出,随着幅值的增加,影响圈范围由幅值为 2mm 时的 3cm 增加到 5mm 时的 5cm。桶形基础周围土体沉陷并未随着幅值的增大而增加。在实验过程中,振动位移幅值为 5mm 时土体表面现象与振动位移幅值为 2mm 时也不相同,在幅值大的情况下,土体表面变化与高频率下类似,即在振动一段时间后,大量较细颗粒从桶壁周围析出,一部分上浮至水面,将水面搅浑,一部分则附着在沉陷区内,致使沉陷深度略有减小。

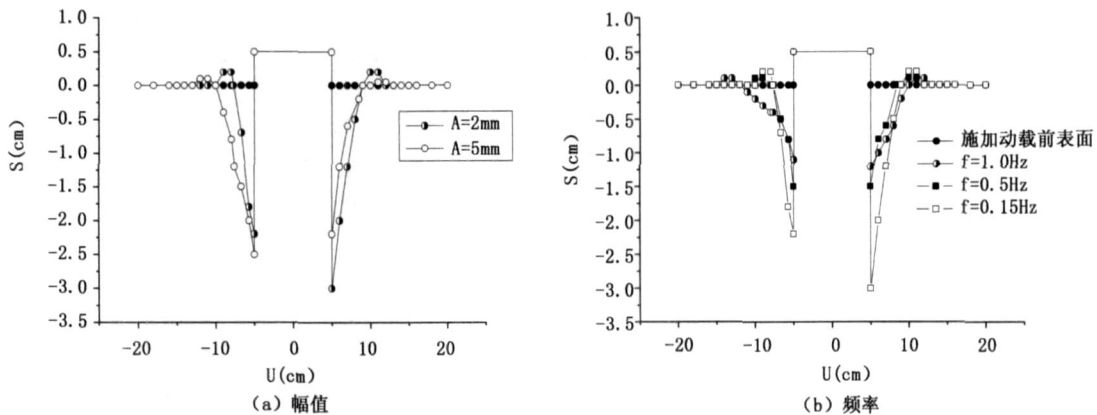


图 9 实验后桶 - 土位置

3.2 振动频率变化

图 9(b) 给出了不同频率下的土体沉陷范围及深度曲线。可以看出,随着频率的增加,影响圈半径由 0.

1 Hz 时的 3cm 增加到 1 Hz 时的 7cm,增加约 1 倍。桶形基础周围土体最大沉降量并未随着频率的增大而增加,反而减小。在实验过程中,振动频率大时,大量较细颗粒从桶壁周围析出,一部分上浮至水面,将水面搅浑,一部分则附着在沉陷区内,使沉陷深度减小。同时载荷频率增加,超静孔隙水压力累积和土体受影响的范围就增加,而孔隙水排出少,沉陷小。

4 小结

(1) 进行了垂向静载下桶形基础承载特性实验,得到不同桶高、不同加载速率下桶形基础抗拔力。实验结果表明:加载速率及桶高的增加,有利于抗拔力的增加。

(2) 进行了垂向动载下桶形基础承载特性实验,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:荷载作用下,周围土体发生变形,形成小范围沉陷区域,大量细颗粒析出;实验结束后桶底密度增加,桶外壁周围附着粗砂颗粒;桶基抗拔力在初期减小,之后逐渐增大,最后趋于一个稳定值。频率及振动位移幅值增加,系统动力响应更明显,影响区域响应扩大。

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
- [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
- [3] Randolph M F, O'Neill M P, Stewart D P and Erbrich C. Performance of suction anchors in fine-grained calcareous soil [A]. OTC8831, 1998:521-529
- [4] Dyson G J, Randolph M F. Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001:346-352
- [5] Riyadh 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
- [6] Riyadh H Al-douri, Harry G Poulos. Static and direct shear tests on carbonate sands[J]. Geotechnical testing journal, 1992:138-155
- [7] Jhin Thiam Chin, Harry George Poulos. Tests on model jacked piles in calcareous sand[J]. Geotechnical testing journal, 1996:164-179
- [8] Waston P G, Randolph M F. Vertical capacity of caisson foundations in calcareous sediments[A]. Proceedings of the seventh (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Honolulu, USA, May 25-30, 1997: 784-790
- [9] 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,2002,23(3):368~371
- [10] 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

(上接第 39 页)

放的话,务必符合《1973 年国际防止船舶造成污染公约及 1978 年议定书 I 防止油污规则》;(3) 当油船向 SPM 系统输油以后,禁止油船从 SPM 接受含油污水;(4) 当输油管线输完油以后,整根油管线用淡水来置换。

参考文献

- [1] Rogerc Maari : Single Point Mooring[M]. Printed and bound in the Principality of Monaco,1985.23-27;142-145.
- [2] 季振一. 茂名石化公司单点系泊装置[J]. 茂名石油化工,1996.
- [3] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD:Development of Mitsubishi Single Point Mooring (SPM) System for Open Sea Operation. TECHNICAL REVIEW[D]. Tokyo, Japan:1982, (4)
- [4] N. P. D. Barltrop Floating Structures:a guide for design and analysis[R]. Oilfield Publication Limited, Volume 2,1982. 55-91.