

文章编号: 1000 - 7598 - (2007) 09 - 1779 - 05

砂土地基中吸力式沉箱的极限沉贯深度分析

吴梦喜¹, 赵 京¹, 时忠民²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

提 要: 吸力式沉箱是广泛应用于离岸结构物中的新型基础形式, 贯入分析方法的研究是很重要的课题。分析了砂性土地基吸力贯入过程中的渗流状况, 得出了筒内壁的压降比率与贯入深径比的关系公式, 分析评估了抽吸作用对筒内壁压降比率的影响, 提出了砂土地基中吸力贯入阻力和地基极限吸力的简便计算方法, 给出了砂土地基中极限贯入深径比的计算公式, 分析了各种砂土地基中的吸力贯入极限深径比。不计筒体自重和抽吸效应影响时, 这一比值介于 2.1 ~ 2.5 之间。

关 键 词: 吸力式沉箱; 渗流; 沉贯阻力; 极限深径比

中图分类号: TU 413.5

文献标识码: A

Analysis of ultimate penetration depth of suction caissons in sand

WU Meng-xi¹, ZHAO Jing¹, SHI Zhong-ming²

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

2. China National Offshore oil Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: Suction caissons have been widely used in offshore structures. Method of installation analysis is very important research subject. This paper provides the characteristic of the seepage field of the foundation during suction installation, and gives relationship between the ratio of the suction descending on the inside wall to the overall suction versus penetration depth-diameter ratio (β_i). The pump effect on β_i is also analyzed and evaluated. A simple and convenient calculating method of both suction caisson penetration resistance and ultimate suction in sand ground is proposed. An equation of ultimate penetration depth-diameter ratio (UPDR) calculating of suction caisson in sand is proposed. The UPDR in sand with density from loose to extremely dense is analyzed; and it is about 2.1 to 2.5 while the effort to UPDR of the deadweight of the structure and the pumping effort to UPDR are not included in it.

Key words: suction caisson; seepage; penetration resistance; ultimate depth-diameter ratio

1 引 言

吸力式沉箱(桶形基础和吸力锚)是通过抽水产生吸力并安装于海床中的新型基础,一般由一个顶部封闭的钢或钢筋混凝土圆筒构成,已经有 20 多年的应用历史。作为常规桩锚基础的一种替代物,具有安装简便、经济可靠的特点。自 1980 年在北海 Gorm 油田首次安装^[1]以来,吸力式沉箱已广泛用于多种类型的离岸结构物中,如导管架平台、张力腿平台、重力式平台、深水海底结构、海底井口集管、单点系船浮筒和深水潜水平台^[2]。

吸力式沉箱的安装分为自重贯入和吸力贯入两个阶段。结构自重使筒裙贯入海床一定深度,在筒裙与海床之间形成一个密封圈;通过顶部抽水产生筒顶内外水压力差,与自重联合作用将筒体贯入到预定深度。吸力锚的可贯性分析是吸力锚设计的重要

内容,包含吸力贯入的阻力计算和地基最大容许吸力计算两个方面。本文通过分析砂土地基吸力贯入过程中的渗流与贯入阻力的情况,探讨了砂土地基中的吸力贯入分析方法和极限贯入深度。

2 贯入分析理论

试验研究与工程实践表明,吸力对黏性土地基中沉箱贯入的阻力影响不大,但能显著降低无黏性土地基中的沉贯阻力^[3-10]。无黏性土的贯入阻力与吸力的大小及其在基础内部的分布情况密切相关。地基土能承受的最大吸力也取决于筒内土体的渗透坡降,因而渗流分析是吸力贯入分析的重要内容。

2.1 贯入过程中的渗流

在吸力贯入过程中,抽水产生的筒顶内外水压力差使筒内外土体中形成了一个渗流场,改变了土

收稿日期: 2006-09-29

修改稿收到日期: 2006-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 10472122); 中海油与中科院重大合作项目(No. kjcx2-sw-L03-01) 联合资助。

作者简介: 吴梦喜, 男, 1967 年生, 博士, 高工, 主要从事土石坝与海洋地基基础方面的研究。E-mail: wumx@imech.ac.cn

体原来的有效应力状态，引起土体的孔隙率和渗透率变化，因而吸力贯入中的渗流过程是复杂的非稳定过程。由于砂性土地基渗透性大，土体含水率的变化对渗流场的变化影响较小，如果进一步忽略孔隙比变化对渗透率的影响，吸力贯入中每一瞬时的渗流状况都可当作是一个稳定渗流场。定义吸力贯入过程中，筒体贯入地基的深度 h 与筒直径 D 之比为贯入深径比，任意一点的静水压力与实际孔隙水压力差为该点的吸力。研究表明^[9]，筒体贯入深径比越大，沿筒内壁顶部吸力与底部吸力之差与筒顶吸力的比率（简称筒内壁压降比率）越大。本文采

用 ABAQUS 有限元软件，分析吸力贯入过程中筒内壁压降比率与贯入深径比之间的定量关系。吸力贯入过程中的渗流场按轴对称稳定渗流模式计算。实际的吸力锚的筒壁厚度与直径之比很小，筒壁厚度差异对渗流场的影响可以忽略。计算中筒壁的厚度与直径之比取为 1/160。不同贯入深径比时筒体在均质地基内的渗流等势线如图 1 所示。筒内等势线基本为间隔均匀的平行线，因而筒内壁吸力变化比率可以代表筒内土体上的吸力变化比率。筒底和筒外渗流等势线为逐步放大的圆弧包线，离筒底距离越远，包线越长也越稀疏。

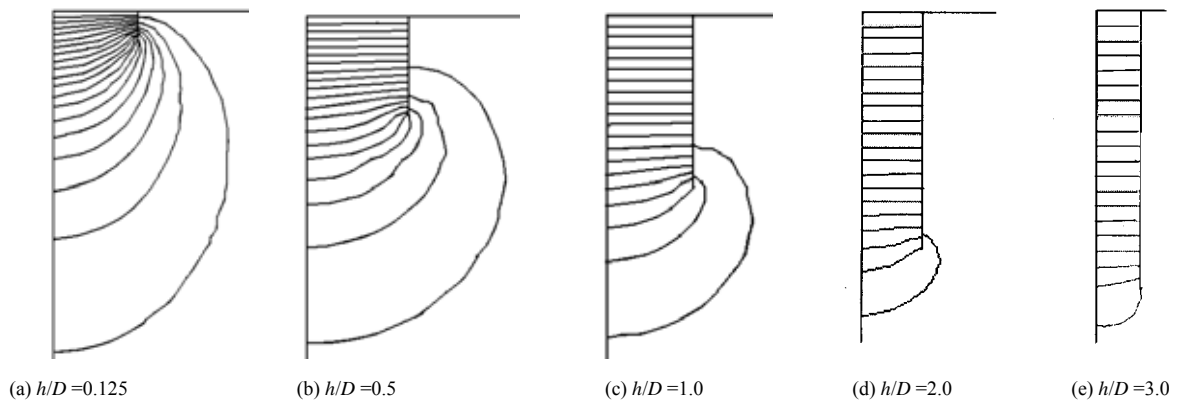


图 1 不同贯入深径比时地基渗流等势线（等势线间距为压差的 5 %）

Fig.1 Ground seepage equipotential lines (interval, 5 %) at various penetration depth-diameter ratios

图 2 为均质地基中筒内外壁的压降比率与贯入深径比关系拟合曲线，筒内壁的压降比率随着贯入深径比的增加而增大。当贯入深径比达到 3.0 时，内壁的压降比率达到 95 %，图中筒内壁压降比率 β_1 的拟合曲线由以下公式计算：

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 0.83 + 0.1034 \ln(h/D), 0.1 < h/D < 5 \\ \beta_1 &= 0.99, h/D \geq 5 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

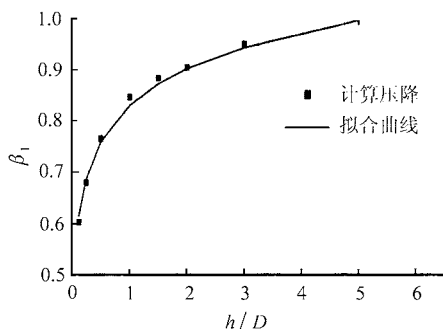


图 2 筒内壁的压降比拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of Suction difference along the inside wall over the total suction

由于沿着筒端部的压降在总的吸力中所占的比例很低，因而在计算贯入阻力时，筒外壁的压降比

率可近似按 $1 - \beta_1$ 计算。

在砂性土地基中，抽吸作用会导致筒内土体孔隙率增大，从而提高筒内土体渗透率，这将降低筒内壁压降比率 β_1 ，下面分析评估方法。

众所周知，渗流场和电场相似，可用分析电场电压的方法来分析筒内土塞水压力的情况。设筒顶内的吸力为 U ，筒内土塞上的压降为 U_1 ，其余部分土体上（筒端部和筒外壁）的压降为 U_2 ；筒内土塞上的阻抗为 R_1 ，其余部分土体上的阻抗为 R_2 ，则可以绘制图 3 所示的吸力贯入渗流计算的电模拟图。

从下文的分析可知，砂性土中的极限贯入深径比小于 5，因而只需讨论 $0.1 < h/D < 5$ 范围内的渗流情况。当筒内外渗透系数一致时，设 $R_1 = 0.83 + 0.1034 \ln(h/D)$ ， $R_2 = 0.17 - 0.1034 \ln(h/D)$ ， $U = 1$ 。筒内的压降比可表示为

$$\beta_1 = \frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

当筒外土体的渗透系数不变，筒内土体的渗透系数扩大 n 倍，相当于电阻 R_1 缩小 n 倍，则

$$\beta_1 = \frac{0.83 + 0.1034 \ln(h/D)}{0.83 + 0.1034 \ln(h/D) + n[0.17 - 0.1034 \ln(h/D)]} \quad (3)$$

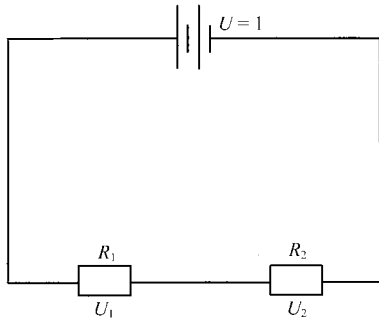
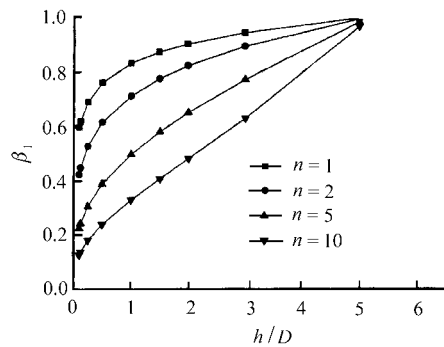
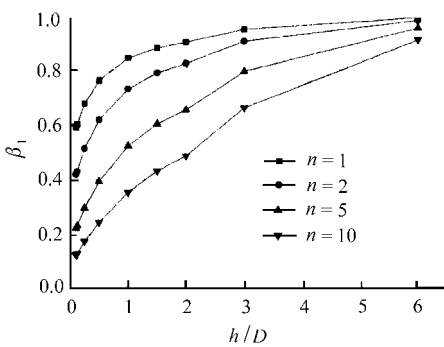


图 3 吸力贯入渗流计算的电模拟法
Fig.3 Electrical analog method of seepage calculation in suction penetration

图 4 为筒内渗透系数扩大 n 倍后筒内压降比率与贯入深径比关系，其中图 4 (a) 是由式 (1) 推算所得，图 4 (b) 是由有限元结果推算所得。深径比越小，抽吸作用对于降低筒内的压降比率作用越大。在推算筒内渗透系数扩大后的筒内压降比率时，式 (1) 的误差有所放大。



(a) 按式(1)推算



(b) 按有限元结果推算

图 4 筒内土体渗透系数扩大到 n 倍后筒内压降比率与贯入深径比的关系

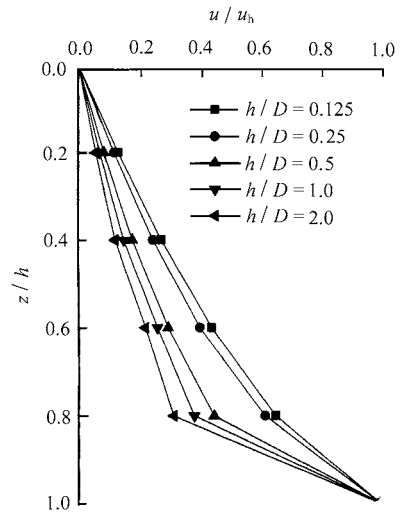
Fig.4 Suction difference along the inside wall to the total suction versus penetration depth-diameter ratio when the seepage coefficient inside the caisson increased n times

实际筒内土体受到抽吸变松从而渗透系数放大的效果也是不一样的，可能上部土体的渗透系数扩大得多，下部土体扩大得少，渗透系数的变化情况比较复杂，且与抽吸时的吸力大小有关，因而需要

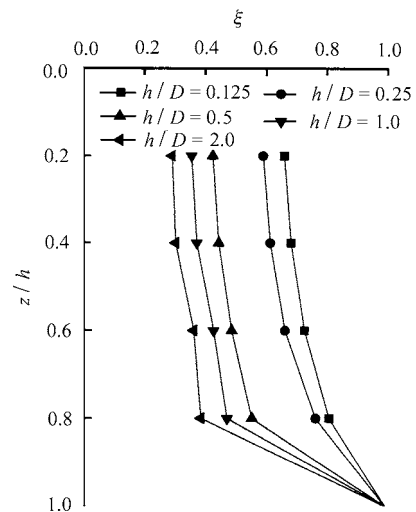
进一步的试验研究。

图 5 为几种贯入深径比时筒外壁吸力的变化情况，其中图 5(a) 为筒外壁吸力与筒底外壁吸力的比值沿筒身的变化情况，图 5(b)为筒外壁吸力不均匀变化系数 ξ 沿筒身的变化情况， $\xi = \frac{u}{u_h} \frac{h}{z}$ (其中 z

为外壁距泥面深度； u 为外壁深度 z 处吸力； u_h 为外壁筒底处吸力)，贯入深径比越大，不均匀变化系数就越小。



(a) 筒外壁吸力与筒底外壁吸力比值 u/u_h



(b) 筒外壁吸力变化不均匀系数 ξ

图 5 不同深径比筒外壁吸力的变化情况

Fig.5 Variation of suction along the outside caisson wall at various penetration depth-diameter ratio

2.2 贯入过程中的阻力

吸力锚贯入到泥面下深度 z 的总的贯入阻力 R_z 可参照沉桩贯入阻力公式由下式计算：

$$R_z = \int_0^z A_s(z) f_z(z) dz + A_p q_z \quad (4)$$

式中： $A_s(z)$ 为侧壁摩擦力作用的面积； $f_z(z)$ 为深度 z 处的单位面积上的侧壁摩擦力，筒内外侧壁不同； A_p 为桩端部的面积； q_z 为深度 z 处的单位面积承载力。

单位面积筒内壁摩阻力可由下式近似计算：

$$f_z(z) = k_0 \tan \delta z (\gamma' - \beta_1 \Delta u / h) \quad (5)$$

单位面积筒外壁摩阻力可由下式近似计算：

$$f_z(z) = k_0 \tan \delta z [\gamma' + (1 - \beta_1) \Delta u / h \xi (\frac{h}{D})] \quad (6)$$

式中： k_0 为土体的静止侧压力系数； δ 为地基土体与筒壁的外摩擦角； γ' 为土体的浮重度， Δu 为桶顶内吸力； ξ 为压降不均匀系数。

桶裙末端贯入阻力，可以参照桩基的端部承载力的有关公式给出近似估算公式：

$$q_z = N_q (\gamma' z - \beta_1 \Delta u) \quad (7)$$

式中： N_q 为桩的端部承载力系数，可以参照桩端部承载力中该系数取值的有关规定确定。

由于吸力式沉箱的筒壁很薄，其端环面积与侧壁面积相比是一个小值，因而端裙阻力在总的贯入阻力中所占的比重很小，往往可以忽略^[7,8]。

2.3 贯入过程中地基的允许吸力

沉箱贯入过程中的吸力应不导致筒内土体发生管涌破坏，因而允许吸力应满足出逸处渗透坡降小于允许渗透坡降的条件，则贯入深度 h 时的极限吸力 $\Delta u_{m,z}$ 可表示为

$$\Delta u_{m,z} = \gamma' h / \beta_1 \quad (8)$$

3 砂土地基中的极限贯入深度分析

吸力贯入的极限深度，是指吸力发挥到最大时，筒体能贯入到的极限深度，用无量纲参数 h/D 表示。单一的砂性土地基中，极限吸力时筒内土体处于管涌临界状态，吸力贯入时的端部阻力可以忽略，其阻力为内外侧壁阻力之和，单位筒圆周上的阻力可表示为

$$R_h = 2 \int_0^h k_0 \alpha_1 \gamma' z \tan \delta dz = k_0 \alpha_1 \gamma' h^2 \tan(\delta) \quad (9)$$

式中： α_1 为吸力贯入侧壁阻力折减系数， $0.5 < \alpha_1 < 1$ ，可由以下公式表示：

$$\alpha_1 = 1 - 0.5 \frac{\beta_1 \Delta u}{\gamma' h} + 0.5 \frac{\eta(1 - \beta_1) \Delta u}{\gamma' h} \quad (10)$$

式中： η 为小于 1 的筒外壁孔压不均匀降落折减系数，为图 5 (b)中对应深径比曲线与坐标轴围成的面

积， $\eta = \int_0^1 \xi(x) dx$ 。

极限吸力状态下 $\alpha_1 = 0.5 + 0.5 \eta(1 - \beta_1) / \beta_1$ 。

对于水下自重为 w 、直径为 D 的沉箱，砂性土地基中单位筒周长上的最大驱动力为

$$F = \frac{w}{\pi D} + \frac{D}{4} \Delta u_{m,z} = \frac{w}{\pi D} + \frac{D \gamma' h}{4 \beta_1} \quad (11)$$

根据驱动力大于阻力的原则，可推导出：

$$\frac{h}{D} \left(\frac{4w}{\pi D^2 \gamma' h} + \frac{1}{\beta_1} \right) \frac{1}{4k_0 \alpha_1 \tan(\delta)} \quad (12)$$

从式 (12) 可以看出，吸力贯入的极限深径比与侧压力系数和摩擦系数之积成反比。式 (12) 右端括号内第 1 项为自重贡献项，等于基础的浮重与其所包裹的土体浮重之比；第 2 项为吸力贡献项，等于筒内压降比率 β_1 的倒数，是一个大于 1 的系数。由于一般沉箱筒体的容积比较大，靠增加结构自重来增加贯入深径比是困难的，这就限制了砂性土地基中吸力式沉箱的极限贯入深度。假定砂土与筒壁的外摩擦角等于砂土的内摩擦角 φ 减去 5° ，按照公式 $k_0 = 1 - \sin(\varphi)$ 计算侧压力系数，可计算出驱动力中不计自重时基础的极限贯入深径比见表 1。可见不考虑抽吸作用对渗流影响时，砂土的极限吸力贯入深径比在 2.1 ~ 2.5 之间。水下自重为 500 kN、直径为 6 m 的沉箱吸力贯入极限深径比见表 2。与表 1 相比，自重对极限贯入深径比的贡献小于 0.3。

表 1 不考虑自重作用的无黏性土极限吸力贯入深径比
Table 1 Ultimate penetration depth-diameter ratios in cohesionless soils if deadweight penetration effects is excluded

砂土类型	砂筒外摩擦角 $\delta / (^\circ)$	侧压力系数 k_0	极限深径比 h/D	筒内土上压降比率 β_1	折减系数 η	侧阻折减系数 α_1
松砂	20	0.58	2.47	0.92	0.50	0.52
中密砂	25	0.50	2.24	0.91	0.50	0.52
密砂	30	0.43	2.13	0.91	0.50	0.53
极密砂	35	0.36	2.10	0.91	0.50	0.53

表 2 直径 6m，500kN 水下自重沉箱极限吸力贯入深径比
Table 2 The ultimate penetration depth-diameter ratios of a 6 meter diameter caisson with 500 kN submerged weight in cohesionless soils

砂土类型	砂筒外摩擦角 $\delta / (^\circ)$	侧压力系数 k_0	浮重度 $\gamma' / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	极限深径比 h/D	筒内土上压降比率 β_1	折减系数 η	侧阻折减系数 α_1
松砂	20	0.58	9	2.74	0.93	0.50	0.52
中密砂	25	0.50	10	2.47	0.92	0.50	0.52
密砂	30	0.43	11	2.34	0.92	0.50	0.52
极密砂	35	0.36	12	2.29	0.92	0.50	0.52

由于抽吸作用引起筒内土体渗透系数扩大，导致 β_1 降低，从而导致筒内土体的渗透坡降减小，这能增加筒体的极限贯入深度。在相对密度 35 % 的中砂地基的吸力贯入室内试验中，筒体的深径比 2.5，在整个贯入过程中测得的筒内压降比率 β_1 降低程度基本上介于 10 % ~ 20 % 之间，可见抽吸作用对吸力贯入的极限深度影响也是有限的。由于抽吸作用导致的土塞上升会减小筒体的有效高度，而吸力越接近土体能承受的极限吸力，土塞上升的程度越大，因而实际允许的筒体深径比应是极限贯入深径比除以一个安全系数，安全系数的大小需要根据工程经验确定，经验不足时可取较大值，如 1.5，这时的允许贯入深径比为 1.5 左右。

4 结 语

通过对砂性土地基吸力贯入中的渗流状况的分析，得到了筒内的压降比率与贯入深径比的关系，评估了抽吸作用对筒内压降比率的影响；发展了吸力贯入阻力和地基中的极限吸力分析方法，并提出了计算公式；提出了砂性土地基中的极限贯入深径比分析方法与计算公式，并研究了不同密度砂性土地基中吸力贯入极限贯入深径比，不考虑抽吸作用和结构自重影响时这一比值介于 2.1 ~ 2.5 之间。

参 考 文 献

- [1] Senpere D, and Auvergne G. A. Suction anchor piles—a proven alternative to driving or drilling [A]. **Proceedings of 1982 Offshore Technology Conference** [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 1982.483 - 489.
- [2] Huang Jun, Cao Jianchun, Audibert Jean M E. geotechnical design of suction caisson in Clay [A]. **Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference** [C]. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003. 770 - 779.
- [3] Cao J, Phillips R, Popescu R, et al. Penetration resistance of suction caissons in clay [A]. **Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference**[C]. Kitakyushu: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.
- [4] Senders M, and Kay S. Geotechnical suction pile anchor design in deep water soft clays [A]. **Conference Deepwater Risers, Moorings and Anchorings** [C]. London: Fugro Engineers B.V. Veurse Achterweg 10 2264 SG Leidschendam The Netherlands [s.n.], 2002.1 - 50.
- [5] 杨少丽, Lans Grande, 齐剑峰, 等. 桶基吸力沉贯下粉土中水力梯度的变化过程 [J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(6): 662 - 665.
YANG Shao-li, Lans Grande, QI Jian-feng, et al. Process of hydraulic gradient in silt during penetration of bucket by suction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6):662 - 665
- [6] 何生厚, 孙东昌. 桶形基础采油平台吸力沉贯阻力计算分析[J]. *中国采油平台*, 2000, 15(1): 16 - 23.
- [7] 孙东昌, 张士华, 徐松森, 等. 海上桶基平台吸力沉贯阻力与土体稳定数值计算研究[J]. *中国海洋平台*, 2000, 15(2): 20 - 23.
- [8] 杨树耕, 孟昭瑛, 许涛, 等. 海上筒基平台吸力沉贯阻力的数值计算研究[J]. *海洋学报*, 1999, 21(6):94 - 101.
YANG Shu-gen, MENG Zhao-ying, XU Tao, et al. Numerical study for penetrating resistance of offshore bucket foundation platform[J]. **ACTA Oceanologica Sinica**, 1999, 21(6):94 - 101.
- [9] Sparrevik P. Suction in Sand – new Foundation Technique for Offshore Structures [M]. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute Publication, 1996.
- [10] Tjelta T I. Geotechnical experience from the installation of the European Jacket with Bucket foundation [A]. **Proceedings of 1995 Offshore Technology Conference** [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 1995. 897 - 908.