

文章编号: 1006-2467(2011)04-0585-05+0596

基于海床吸力和刚度衰减模型的 深海钢悬链线立管动力响应分析

王坤鹏, 薛鸿祥, 唐文勇

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 运用 ABAQUS 创建触地单元, 将立管-海床作用的模拟简化为 3 种模型: 线性刚度、线性截断、线性截断并考虑海床吸力和刚度衰减. 将浮体垂向运动作为立管顶端边界输入, 并对 3 种简化模型进行了计算比较. 结果表明: 考虑立管-海床分离以及吸力效应对计算结果的影响很大; 考虑吸力效应时, 在立管和海床分离的阶段会有较多的疲劳应力循环. 第③类触地单元较好地反映了吸力的产生和释放过程, 其包含的海床刚度衰减模型也给出了令人满意的结果.

关键词: 钢悬链线立管; 立管-海床作用; 触地单元; 海床吸力; 刚度衰减

中图分类号: P 751 **文献标志码:** A

Dynamic Response Analysis of Deepwater Steel Catenary Riser Based on the Seabed-Suction and Stiffness-Degradation Model

WANG Kun-peng, XUE Hong-xiang, TANG Wen-yong

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A touch-seabed element was created in ABAQUS to simulate the soil-riser interaction which is reduced to three models: linear stiffness, linear stiffness with soil-riser's separateness, soil-riser's separateness and considering the suction and the degradation of the seabed. Considering the floater's z-motion at the riser's top boundary, the three models were analyzed and compared. The result shows that the soil-riser's separateness and suction have great effect on the computation result. If the model considers the suction, there will be many stress cycles at the soil-riser separateness stage. The third touch-seabed element well shows the generation and release of suction, and the seabed stiffness degradation model included in it also gives satisfactory results.

Key words: steel catenary riser; soil-riser interaction; touch-seabed element; seafloor suction; stiffness degradation

随着油气开采向深海发展, 钢悬链线立管 (SCR) 作为一种重要的立管结构形式, 越来越多地被应用于深海油气资源开发中. SCR 立管受力情况

复杂, 除了顶端平台运动的影响、波浪和流载荷的作用外, 其与海床的相互作用对立管的结构强度和疲劳寿命影响非常大, 尤其在触地点处特别明显, 因而

收稿日期: 2010-10-29

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2008ZX05026-005-04), 海洋工程国家重点实验室自主研究课题资助项目(GKZD010031)

作者简介: 王坤鹏(1986-), 男, 山东省青岛市人, 博士生. 主要从事海洋工程结构物的强度与疲劳寿命研究.

薛鸿祥(联系人), 男, 博士, 助理研究员, 电话(Tel.): 021-34205679; E-mail: hongxiangxue@sjtu.edu.cn.

对于 SCR 立管的触地研究一直受到海洋工程界的高度重视。

由于立管与海床的作用机理非常复杂,因而管土作用模型的提出大都建立在模型试验的基础上,其中比较有影响的是在英格兰的西部港口进行的 STRIDE JIP 项目,试验对立管的受力以及管土相互作用进行了综合分析,得到了许多有参考价值的数据.在数值模拟方面,Aubeny 等^[1]根据 Bridge 所提出的成沟机理和管土作用过程,提出了管土作用的 $P-y$ 曲线模型;Nakhaee 等^[2]根据 Aubeny 等提出的渠沟底部海床刚度具有衰减效应的模型改进了程序 CABLE3D,获得了比较理想的结果.Randolph 等^[3]对 Aubeny 提出的管土作用模型进行了修改,并将其整合到了商业立管分析程序中.在国内,杜金新等^[4]根据 $P-y$ 曲线利用线性弹簧单元模拟立管-海床的作用,并进行了静力分析,郭海燕等^[5]等应用 ANSYS 建立接触单元对立管-海床的作用进行了模拟,并与杜金新的计算结果进行对比,傅俊杰等^[6]利用非线性弹簧单元模拟立管-海床的作用,在考虑侧向作用的情况下进行了动力响应分析.

上述研究中运用接触单元来模拟立管-海床的作用,可较真实地考虑海床的非线性效应,但不能较好地模拟海床的吸力作用,同时在三维的动力响应分析中,计算将会非常耗时.本文提出的触地单元,可以根据需要设置相应的参数来模拟立管-海床的相互作用,不但可以考虑管土分离,还可以同时考虑吸力效应以及海床刚度的衰减.

1 触地单元与整体有限元模型

1.1 初始沟槽深度

SCR 立管经过数月的管土相互作用后,铺地段的最大深度可以达到 3~4 倍的立管直径,沟槽的深度并非立管的最大掩埋深度,因此,最大的管土分离位移也并非沟槽深度.文献[7]中给出了管土分离位移的计算公式,其中包含了一些由试验得到的参数.本文采用的初始 $P-y$ 曲线函数为

$$P = N_p D (S_0 + S_g y) \tag{1}$$

式中: P 为单位长度上管受到的海床作用力; S_0 为海床表面的剪切刚度; S_g 为海床的剪切刚度梯度; D 为立管外径; N_p 为无因次剪切因子,其与嵌入深度 y 和立管外径 D 有关,若不考虑沟槽宽度的影响,则

$$N_p = a (y/D)^b \tag{2}$$

式中, a 、 b 为实验系数.

立管的初始嵌入过程可以看作是梁与非线性弹

簧的作用,该非线性弹簧具有海床初始 $P-y$ 曲线的性质,立管与海床相互作用可用四阶微分方程表示为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = W - P \tag{3}$$

式中: E 为立管的弹性模量; I 为截面惯性矩; W 为单位长度立管的质量.

式(3)可通过有限差分法进行求解,初始边界条件为铺地段两端的挠度、转角,另外还需要铺地段的最大嵌入深度.通过求解,可获得各处的嵌入深度和该嵌入深度下的海床反力,从而确定立管铺地段不同位置处的海床刚度.本文模拟的是墨西哥湾海床性质^[8],采用中等强度海床,表面刚度为 2.6 kPa,刚度梯度为 1.25 kPa/m.

1.2 触地单元

在以往的研究中,对 SCR 立管做动力响应分析时,常采用弹簧单元来模拟立管和海床的相互作用,尽管非线性弹簧单元能较合理地模拟海床刚度的非线性,但是收敛性比较难保证,海床的吸力以及海床刚度的衰减效应也无法按照目前所掌握的规律进行模拟.如图 1 所示,在同一嵌入深度 y 处,立管速度方向不同,立管-海床的作用行为也有所差异,甚至表现出不同的作用力方向,这一特性在通用有限元分析软件采用弹簧单元是无法模拟的.随着触底循环的增加,沟槽底部由于立管的加载而导致刚度衰减,沟槽深度也将增加,Aubeny 等^[9]发现加载次数与累积下沉位移满足如下指数关系:

$$(\delta y/D)_{acc} = \beta (\ln N)^\gamma \tag{4}$$

式中: δy 为 N 次触底循环累积的下沉位移; γ 和 β 为通过实验得到的参数.

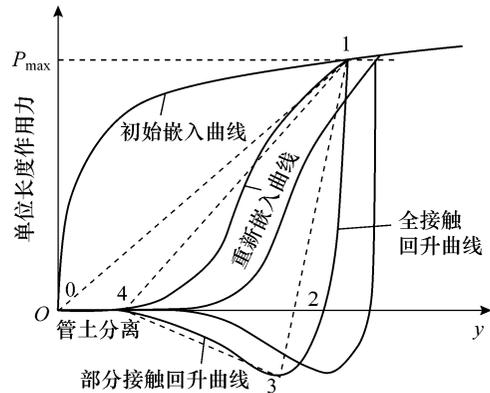


图 1 典型 $P-y$ 曲线类

Fig. 1 Typical $P-y$ curves

在 ABAQUS 软件中通过创建触地单元来模拟立管-海床的作用时,管土作用效应可通过单元参数反映,这些参数可以在每一增量步中根据对应位置

处节点的速度方向和挠度来确定. 因此, 本文定义的触底单元可完全反映 $P-y$ 曲线中的管土作用行为.

触地单元只关联 1 个节点, 并且该节点只激活 3 个线自由度, 其自身刚度矩阵为

$$[K] = \begin{bmatrix} k_x & & \\ & k_y & \\ & & k_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: k_x 为反映立管和海床摩擦的轴向刚度; k_y 为沟槽侧壁对立管的作用刚度; k_z 为海床的垂向刚度, 可以通过 $P-y$ 曲线来确定.

从与立管某一节点连接的触地单元的刚度变化来看, 本文所采用的触地单元可以分为 3 类: ① 线性刚度; ② 线性截断; ③ 线性截断并考虑海床吸力和刚度衰减. 图 2 所示为不同触地单元模拟的立管与海床的作用示意图.

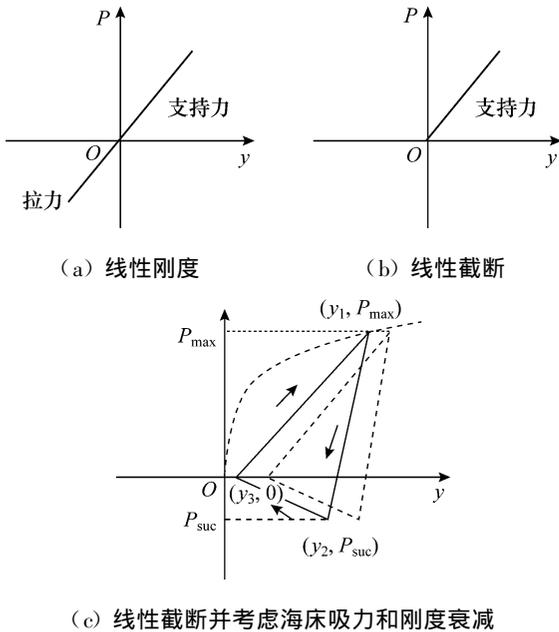


图 2 不同触地单元模拟的立管与海床的作用示意图

Fig. 2 The sketch of interaction between SCR and seafloor simulated by different touch-seabed elements

第①和②类触地单元与线性弹簧单元等效, 其中第②类触底单元考虑了立管和海床的分离, 其有效刚度等于图 1 中 1-4 虚直线的斜率; 第③类用户单元是根据图 1 的 $P-y$ 曲线进行的简化, 把每一段进行了线性化, 如图 1 中的闭合虚直线段 1-2-3-4-1. 为了反映海床在立管循环加载下产生的下陷, 触地单元也包括了式(4)给出的下陷模型, 在创建的单元中, 设置立管每循环加载 100 次更新立管对应处的最大嵌入深度.

1.3 计算模型

立管所在海域水深为 1.218 km, 水平跨度为

1.350 km, 立管相关参数: $D = 273$ mm, 壁厚 $t = 32$ mm, 总长 $L = 2.050$ km, 材料密度 $\rho = 7850$ kg/m³, 弹性模量 $E = 201$ GPa, 惯性力系数 $C_M = 1.20$, 拖曳力系数 $C_D = 1.35$.

本文采用的南海某海域 15 级风海况相关参数: 有义波高 $H_s = 13.3$ m, 谱峰周期 $T_z = 15.5$ s, 波流入射角 $\theta = 180^\circ$, 海水密度 $\rho_w = 1025$ kg/m³. 海流参数如表 1 所示.

表 1 南海某海域流参数

Tab. 1 Current parameters of South China Sea

距海床高度/km	流速/(m·s ⁻¹)
0	0
1.128	0.091
1.160	1.070
1.218	1.970

立管与海床的相互作用通过触地单元来模拟, 立管采用的梁单元类型为 B31H 中的 pipe 单元. 图 3 给出了包含触地单元的 SCR 示意图.

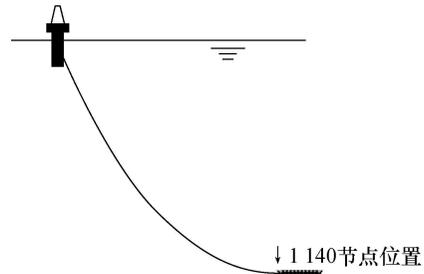


图 3 包含触地单元的 SCR 示意图

Fig. 3 The sketch of SCR connected with touch-seabed elements

2 计算结果与分析

由于平台的垂向运动对 SCR 立管触底端附近内力影响最大, 本次计算中仅考虑平台垂向运动的影响. 通过耦合动力分析软件 Deep C 计算了某 Spar 平台在南海 15 级风海况下 3 h 的运动响应, 并将平台垂向运动结果作为 SCR 立管的 z 向边界.

2.1 触地单元的可行性验证

鉴于目前已公开发表的文献中, 鲜有关于模型试验中立管-海床相互作用时历结果的报道, 本文通过第①类触地单元模拟具有较大刚度的海床, 并与 ABAQUS 自带的线性弹簧单元的模拟结果进行比较, 以此来说明该方法的可行性. 文中将所有触地单元设置为统一属性. 图 4 和 5 分别给出了 2 种方法下触地点区域编号为 1140 节点的挠度时历曲线和触地区域在初始状态下的弯矩.

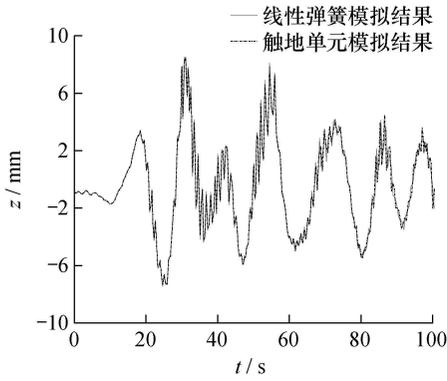


图 4 1140 节点的 z 向挠度时历曲线

Fig. 4 The z-deflection time-dominated curve at node 1140

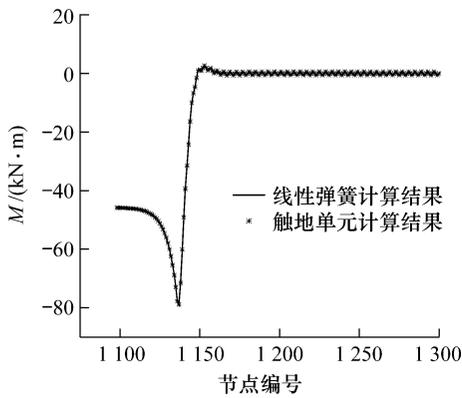


图 5 初始悬链线状态下触地区的弯矩

Fig. 5 The bending moment at TDP at initial catenary

由图 4 可见, 2 种方法得到的 1140 节点在 z 方向的位移吻合较好, 仅在局部峰值处有细微的差别. 由图 5 可见, 2 种方法通过静力分析得到的触底区域的弯矩曲线完全重合, 在触地点附近的最大嵌入深度处达到了最大值, 然后迅速降低, 最后保持在零附近. 由此可见, 如果触地单元切线刚度中的分量选取得当, 静力分析结果和线性弹簧模拟的结果可完全一致.

2.2 第③类触地单元特性分析

第③类触地单元除了能反映管土分离效应外, 还包括了海床的吸力效应和刚度衰减效应, 这些特征可以通过表 2 中的参数反映.

初始沟槽的形成采用了梁-弹簧模型和初始 P-y 曲线^[6]. 图 6 所示为 1140 节点处海床作用力随立管嵌入深度变化的包络线. 在一个完整的大循环中, 曲线完全反映吸力的产生和释放过程, 与第③类触地单元的 P-y 循环曲线基本吻合. 从最大的循环曲线可以看出, 最大吸力与最大海床反力的比值接近 0.33, 吸力曲线与循环线的交点 q 对应的吸力与设定的吸力值基本一致.

表 2 管土作用模型控制因子

Tab. 2 The control parameters of pipe-soil interaction model

参数	参数说明	数值
$y_{initial}$	通过初始 P-y 曲线确定的沟槽最大初始深度	0.147 m
μ_{sep}	管土分离的最大距离因子 ($y_1 - y_3$)/D	程序中最大取 0.6
λ_{suc}	最大吸力出现位置因子 ($y_2 - y_3$)/($y_1 - y_3$)	0.8
f_{suc}	最大吸力因子 - P_{suc}/P_{max}	0.203
γ	Dunlup 实验参数 ^[10]	2
β	Dunlup 实验参数 ^[10]	0.002

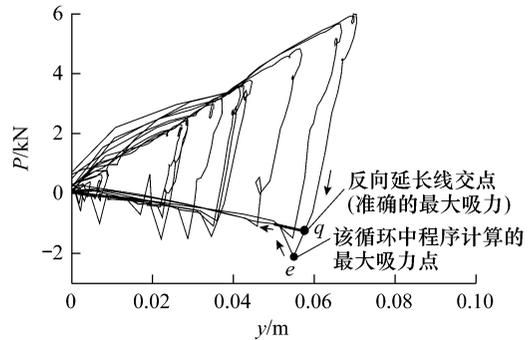


图 6 1140 节点处 P-y 循环曲线

Fig. 6 The cycle curve of seabed resistance traced with the penetration at node 1140

为了比较明显地观察沟槽的下陷过程, 本文采用了较小的最大初始嵌入深度, 进行了 3 h 的短期海况运动模拟, 提取了 3 300、6 600 和 10 800 s 时的嵌入深度. 从图 7 可以看出, 在立管的循环加载下, 立管的嵌入程度逐渐加大, 在初始较短时间内, 埋埋区域的前端和后端下陷速率较快, 之后就变得很慢, 这主要是由于沟槽形成一定深度后立管的若干循环没有接触沟底.

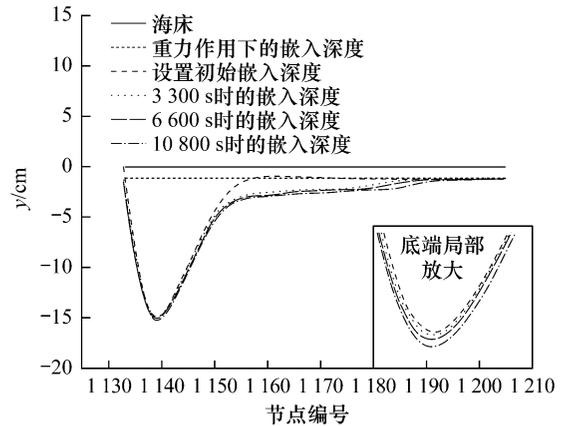


图 7 沟槽的变化

Fig. 7 The process of trench development

2.3 不同触地单元模拟结果比较

图 2 给出了 3 种类型的触地单元, 文中对模拟结果进行了比较分析, 第③类触地单元的参数同表 2. 在确定第①和②类触地单元的刚度时, 梁-弹簧模型中设置的最大嵌入深度等于第③类触地单元的 $y_{initial}$.

图 8 ~ 10 给出了触地点附近节点的垂向位移、某积分点的应力和弯矩曲线. 可以看出: 触地区域的垂向挠度受触地单元类型的影响较大, 第①类单元没有考虑管土分离, 因此上升的最大位移较小, 而第②和③类单元考虑了管土分离, 上升的最大位移比

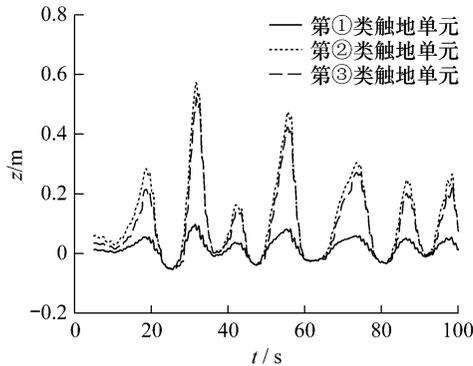


图 8 1140 节点处 z 向挠度的时历曲线
Fig. 8 The z-deflection at 1140 node

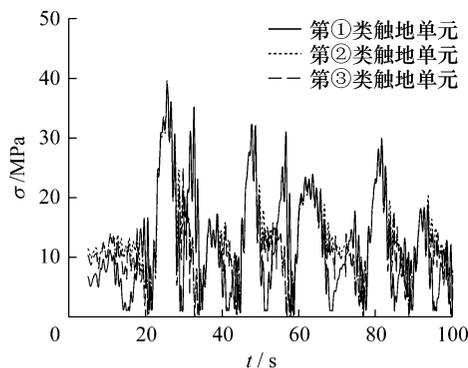


图 9 1140 节点应力时历曲线
Fig. 9 The stress at 1140 node

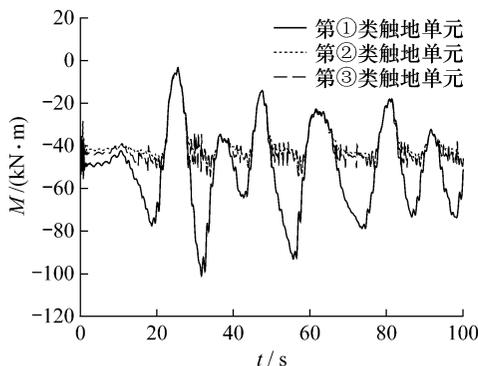


图 10 1140 节点处截面弯矩的时历曲线
Fig. 10 The bending moment at 1140 node

第①类单元大; 对于第③类触地单元, 由于海床的下陷是一个缓慢的过程, 海床的刚度衰减在较短的模拟时间内不会对结果产生明显的影响. 因此, 3 种类型模拟的下陷深度几乎相等. 第③类触地单元模拟的管土作用稍复杂一些, 除了管土分离之外还考虑了吸力效应, 这导致上升的幅值要比第②类触地单元稍小, 图 8 所示的结果说明了这一点.

由图 9 和 10 可见, 应力和弯矩大循环基本不受触地单元类型的影响, 在管土未分离部分 3 种类型的触地单元模拟的应力也几乎一致. 第①类触地单元由于没有考虑管土分离, 在其与海床分离后还受到向下的拉力, 该力在运动到峰值处达到了最大; 第②和③类单元模拟的应力和弯矩相对较小, 只是弯矩出现了许多小循环. 由图 11 可见, 触底区域的轴向力受触地单元类型的影响较小, 3 种类型的触地单元的计算结果基本一致, 这也说明应力的差异主要是由弯矩造成的.

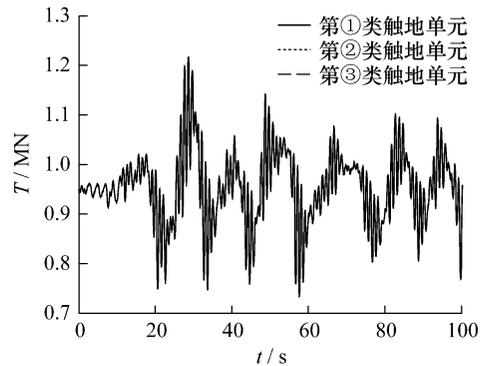


图 11 1140 节点处的轴向力的时历曲线
Fig. 11 The axis-force at 1140 node

3 结 语

本文提出了在 ABAQUS 中创建触地单元来模拟立管-海床的相互作用, 其刚度矩阵可以根据需要改变, 在模拟管土作用方面有诸多优势. 将立管-海床的作用简化成 3 种模型, 分别进行计算分析, 得到了比较合理的结论. 其中, 第③类模型采用分段线性化手段, 在一定程度上反映了吸力的产生和释过程, 计算结果也比较理想. 为了了解海床下陷的过程, 文中还进行了海床刚度衰减的特性分析, 通过 3 h 的模拟, 得到了令人满意的结果.

参考文献:

[1] Aubeny C P, Biscontin G, Zhang Jun. Seafloor interaction with Steel Catenary Risers[R]. Texas: Texas A & M University, 2006.

(下转第 596 页)

参考文献:

- [1] 曹颖, 朱军政. 长江口南汇东滩水动力条件变化的数值预测[J]. 水科学进展, 2005, 116(14): 581-585.
CAO Ying, ZHU Jun-zheng. Numeric prediction of hydrodynamic condition change at Nanhui east shore of the Yangtze River estuary[J]. **Advances in Water Science**, 2005, 116(14): 581-585.
- [2] 孔俊. 长江口、杭州湾水沙交换特性初步研究[D]. 南京: 河海大学海洋学院, 2005.
- [3] 堵盘军. 长江口及杭州湾泥沙输运研究[D]. 上海: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 2007.
- [4] 付桂. 南汇嘴岸滩及邻近海床冲淤演变过程研究[D]. 上海: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 2007.
- [5] 司广成, 周良明, 朱庆林, 等. 利用波浪折绕射模型和风浪成长公式计算临港重现期波要素[J]. 海洋湖沼通报, 2007(增刊): 15-22.
SI Guang-cheng, ZHOU Liang-min, ZHU Qing-lin, *et al.* Calculation of the designed wave elements of multi-year return periods in new urban area adjacent to harbour using refraction-diffraction combined numerical model and the formula of shallow-water wind wave growth[J]. **Transactions of Oceanology and Limnology**, 2007(Sup.): 15-22.
- [6] 陈斌. 长江口附近海域三维悬浮泥沙的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
- [7] 肖文军, 丁平兴, 胡克林. 潮汐和流影响下长江口波浪数值计算[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 45-52.
XIAO Wen-jun, DING Ping-xing, HU Ke-lin. Numerical calculation of wave fields with tide and currents in the Yangtze River estuary[J]. **The Ocean Engineering** 2008, 26(4): 45-52.
- [8] 朱志夏. 波浪、潮流联合作用下泥沙数学模型的理论研究及其应用[D]. 天津: 天津大学水资源与港湾工程系, 1997.
- [9] ZHU Zhixia, LI Bei. Modeling of coupled waves and tidal currents[J]. **Journal of Coastal Research** 2008, 52: 223-234.

(上接第 589 页)

- [2] Nakhaee Ali, Zhang Jun. Trenching effects on dynamic behavior of a steel catenary riser[J]. **Ocean Engineering** 2010, 37(2-3): 277-288.
- [3] Randolph Mark, Quiggin P. Non-linear hysteretic seabed model for catenary pipeline contact[C]// **Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean Offshore and Arctic Engineering**. Honolulu, Hawaii; ASME, 2009: 145-154.
- [4] 杜金新, Low Y M. 海洋立管-海床土体接触作用数值分析[J]. 工程地质计算机应用, 2008(4): 1-6.
DU Jin-xin, Low Y M. Numerical analysis of contact action between offshore riser and seabed[J]. **Computer Application of Engineering Geology**, 2008 (4): 1-6.
- [5] 郭海燕, 高秦岭, 王小东. 钢悬链线立管与海床土体接触问题的 ANSYS 有限元分析[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(3): 521-525.
GUO Hai-yan, GAO Qin-ling, WANG Xiao-dong. Finite element analysis of contact action between steel catenary riser and seafloor based on anasys[J]. **Journal of China Ocean University**, 2009, 39(3): 521-525.
- [6] 傅俊杰, 杨和振. 深海钢悬链线立管触地点动力响应分析[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 36-40.
FU Jun-jie, YANG He-zhen. Dynamic response analysis of a deepwater steel catenary riser at the touchdown point[J]. **China Ocean Engineering** 2009, 27(2): 36-40.
- [7] Bridge Christopher, Laver Katherine. Steel catenary riser touchdown point vertical interaction models [C]// **Offshore Technology Conference**. Houston, USA; SPE, 2004: 16628.
- [8] Willis N R T, West P T J. Interaction between deepwater steel catenary riser and a soft seabed; Large scale sea trials[C]// **Offshore Technology Conference**. Houston, USA; SPE, 2001: 13113.
- [9] Aubeny C P, Biscontin G. Interaction model for compliant riser on soft seabed[C]// **Offshore Technology Conference**. Houston, USA; SPE, 2008: 19493.
- [10] Dunlap W A, Bhoanala R P, Morris D V. Burial of vertically loaded offshore pipelines in wake sediments [C]// **Offshore Technology Conference**. Houston, USA; SPE, 1990: 6375.