

非线性波浪作用下海底管线-海床动力响应分析

栾茂田^{1,2}, 曲 鹏^{1,2}, 杨 庆^{1,2}, 郭 莹^{1,2}

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2.大连理工大学 土木水利学院岩土工程研究所, 大连 116024)

摘 要: 确定波浪荷载作用下海底埋置管线和海床的响应是海底管线设计中的关键问题。目前大多数研究只是考虑了管线、海床在线性推进波作用下的响应, 并没有考虑管线与海床之间的相互作用效应。采用接触摩擦理论, 考虑管线与海床之间的相互作用效应, 基于有限元方法研究了非线性波浪作用下海底埋置管线和多孔海床相互作用问题。数值计算结果表明, 在计算中如果忽略波浪非线性项, 既有可能低估海底管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力, 也有可能高估海底管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力。

关 键 词: 非线性波浪; 海底管线; 海床-管线相互作用; 孔隙水压力

中图分类号: P 731

文献标识码: A

Nonlinear wave-induced transient response of pipeline-seabed interaction

LUAN Mao-tian^{1,2}, QU Peng^{1,2}, YANG Qing^{1,2}, GUO Ying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: It is a key issue to define the transient responses of submarine pipeline and seabed under wave loading in the design of submarine pipeline. Most previous investigations were only concerned with the soil response due to linear progressive ocean waves, and the effect of pipeline-seabed interaction on internal stresses within the pipeline are not well recognized. The pipeline-seabed interaction under nonlinear wave loading is investigated by using friction contact theory and the finite element method. Numerical results demonstrate that if the effect of non-linear wave components is neglected, the internal stresses in the pipeline and pore pressure in the seabed may be underestimated or overestimated probably.

Key words: non-linear wave loading; submarine pipeline; seabed-pipeline interaction; pore pressure

1 引 言

海底管线是一种近海海岸工程常用的装置, 它被广泛应用于输送原油、天然气以及工业废水等工程中。海底管线的稳定性分析也越来越引起人们的重视; 如果管线失稳等因素引起管线内油气的泄漏, 不仅会造成经济损失, 更会对环境造成巨大污染^[1]。当海底管线埋置于多孔海床中时, 由波浪引起的管线周围振荡孔隙水压力的计算是非常复杂的。因此, 早期对土的力学性能的研究, 大多是把土骨架和孔隙流体区分开来, 假设土骨架和孔隙流体均是不可压缩的; 这样处理只需要在特定的边界条件下求解

一个描述土骨架中孔隙流体压力变化的偏微分方程 (Laplace 方程) 就能得到波浪引起的管线周围海床中孔隙水压力的分布。基于以上假设, MacPherson^[2]和 McDougal^[3]分别应用保角映射的方法, 提出无限厚海床中波浪引起的埋置管线上的水力升力的解析解; Monkmeyer 等^[4]应用假想管法提出了类似的解答, 其解法可以应用于有限厚度海床情形; Lennon^[5]应用边界积分法对管线上的水力升力进行数值计算, Spierenburg^[6]应用有限元法进行了类似的分析。以上研究方法的共同特征就是忽略了土骨架和孔隙流体的压缩性, 因此, 对于特定的土体和孔隙流体参数, 例如饱和度、变形模量、渗透系数和体积模

收稿日期: 2007-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (No. 50439010); 教育部科学技术研究项目重大项目 (No. 305003); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50579006)。

作者简介: 栾茂田, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学基本理论、海洋土力学理论与实验技术、非线性土动力学理论与计算等方面的教学与科研工作。E-mail: mltuan@dlut.edu.cn.

量等,并不能代入 Laplace 方程,这使得问题独立于这些参数,但这些参数可以代入更加复杂的 Biot 固结方程。基于 Biot 固结理论^[7], Cheng 和 Liu^[8]应用边界积分法对埋置于由两面不透水墙所包围区域中的管线上的水力升力进行了数值计算; Magda^[9]应用有限元法进一步考虑了不同饱和度的影响; Gao 和 Jeng^[10]研究了非线性波浪引起的管线周围孔隙水压力分布,但 Gao 和 Jeng 只针对很少的几种推进波浪荷载作用下的管线及其周围海床的响应进行了分析,其所得的计算结果和结论不够全面。为了得到波浪非线性对海底埋置管线及其周围海床响应的影响的一般性规律,必须应用更加广泛的波浪参数进行数值计算,并结合必要的解析计算结果进行综合分析。本文主要研究均质海床中由非线性波浪引起的管线周围孔隙水压力分布和管道内部应力分布,对非线性波浪荷载作用下的土体和管线响应结果与线性波浪荷载作用下的土体和管线响应结果进行比较。

2 边值问题

如图 1 所示,考虑厚度为 s 的孔隙海床、底面及侧面为不透水刚性基岩所包围、半径为 R 的管线埋置于海床中,埋置深度为 b 。波浪沿着垂直于管线轴线即 x 方向传播, z 坐标自不透水刚性基底起向上。

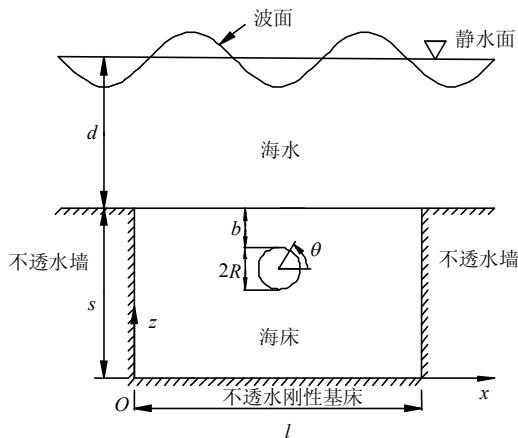


图 1 海床-管线相互作用系统

Fig.1 Sketch of seabed-pipeline interaction

2.1 控制方程

按照 Biot 动力固结理论^[7], 海床孔隙介质的物质守恒方程为

$$\frac{n}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_{ii}}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_f} \nabla^T (-K (\nabla p)) = 0 \quad (1)$$

式中: K 为土的渗透系数矩阵; ε_{ii} 为土骨架的体积应变; n 为孔隙率; K_f 为孔隙流体的体积模量; p 为孔隙水压力; γ_f 为孔隙流体的重度。当忽略孔隙流体相对于土骨架的相对加速度效应时, 海床的动力平衡方程为

$$\sigma'_{sij,j} + p'_{,j} \delta_{ij} + \rho'_s b'_{si} = \rho'_s \ddot{u}'_{si} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: σ'_{sij} 为海床有效应力; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; ρ'_s 与 b'_{si} 分别为海床土的密度和体积力加速度; $\ddot{u}'_{si}$ 为土骨架的加速度。

按照弹性动力学理论, 埋置管线的控制方程为

$$\sigma_{pij,j} + \rho_p b_{pi} = \rho_p \ddot{u}_{pi} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中: σ_{pij} 为管线内应力; ρ_p 为管线材料的质量密度; b_{pi} 为管线的体积力加速度; $\ddot{u}_{pi}$ 为管线的加速度。

2.2 波浪荷载

在海洋工程中, 波浪是作用在海洋工程结构上的最主要的外力之一。海洋表面传播的波浪在海床表面所施加的周期性振荡的压力引起了海床土中超静孔隙水压力和有效应力周期性的变化。波浪理论一般包括线性波浪理论和非线性波浪理论两大类。

根据 Airy 微幅波理论, 线性波浪作用于海床表面的波压力为

$$p_{1st} = m_{11} \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

式中: m_{11} 为海床表面线性波压力幅值, $m_{11} = p_0 = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(kd)}$; γ_w 为海水的重度; H 为波高; d 为水深; k 为波数, $k = \frac{2\pi}{L}$; ω 为波浪的频率, $\omega = \frac{2\pi}{T}$; L 与 T 分别为波浪的波长与周期。

根据 Stokes 二阶波浪理论^[11], 可以推导出二阶近似有限振幅推进波作用于海床表面的波压力为

$$p_{2nd} = m_{20} + m_{21} \cos(kx - \omega t) + m_{22} \cos 2(kx - \omega t) \quad (5)$$

其中:

$$m_{20} = -\frac{\pi \gamma_w H^2}{4L \sinh(2kd)} \quad (6)$$

$$m_{21} = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(kd)} \quad (7)$$

$$m_{22} = \frac{3\pi \gamma_w H^2}{4L \sinh(2kd)} \left[\frac{1}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right] \quad (8)$$

根据 Stokes 三阶波浪理论^[11], 可以推导出三阶近似有限振幅推进波作用于海床表面的波压力为

$$p_{3rd} = m_{30} + m_{31} \cos(kx - \omega t) + m_{32} \cos 2(kx - \omega t) + m_{33} \cos 3(kx - \omega t) \quad (9)$$

其中:

$$m_{30} = -\frac{\gamma_w k a^2}{2 \sinh(2kd)} \quad (10)$$

$$m_{31} = \frac{\gamma_w a}{\cosh(kd)} \cdot \left[1 + (ka)^2 \frac{12 + \cosh(2kd) + 2 \cosh(4kd)}{16 \sinh^4(kd)} \right] \quad (11)$$

$$m_{32} = \frac{\gamma_w k a^2}{2 \sinh(2kd)} \left[\frac{3}{\sinh^2(kd)} - 1 \right] \quad (12)$$

$$m_{33} = \frac{3 \gamma_w k^2 a^3 [11 - 2 \cosh(2kd)]}{32 \sinh(2kd) \sinh^5(kd)} \quad (13)$$

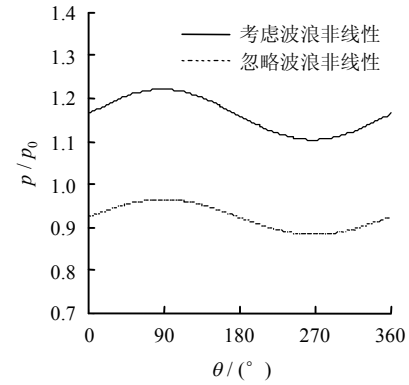
式中: a 的定义可参见文献[11]。

本文采用主从接触算法考虑土管之间的接触效应, 在选定的边界条件下, 应用 Galerkin 法分别对 Biot 动力固结方程和弹性动力学方程进行有限元离散化^[12], 得到海床和海底埋置管线的有限元方程; 并将高阶非线性波浪理论与有限元数值计算相结合, 在 ADINA 计算平台上根据不同的波浪理论编制相应的加载函数^[13], 实现了复杂非线性波浪荷载动力加载过程的数值模拟; 进一步联立海床和海底埋置管线的有限元方程, 并采用 Newmark- β 逐步积分格式对其进行数值求解^[14], 得到非线性波浪作用下海底管线及其周围海床动力响应结果。

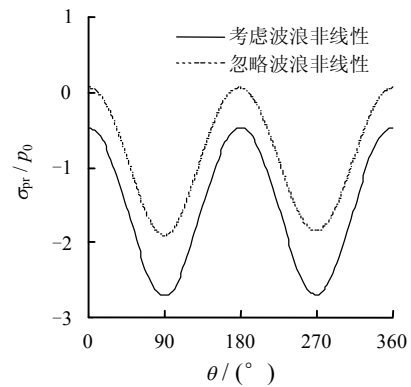
3 计算结果分析

本文主要考察波浪非线性项对波浪作用下海底埋置管线及其周围海床响应的影响。在计算中管线材料弹性模量、泊松比与密度分别为 $E_p = 3\,000\text{ MPa}$, $\nu_p = 0.2$, $\rho_p = 2.4\text{ g/cm}^3$; 均质海床厚度为 $s = 40\text{ m}$, 管沟宽度为 $l = 200\text{ m}$, 土的变形模量与密度分别为 $E_s = 100\text{ MPa}$, $\rho_s = 1.7\text{ g/cm}^3$, 土的泊松比与孔隙率分别为 $\nu_s = 0.33$, $n = 0.4$ 。二阶波浪周期与波长分别为 $T = 20.5\text{ s}$, $L = 200\text{ m}$, 水深为 $d = 10\text{ m}$; 三阶波浪周期与波长分别为 $T = 6\text{ s}$, $L = 49.3\text{ m}$, 水深为 $d = 10\text{ m}$ 。

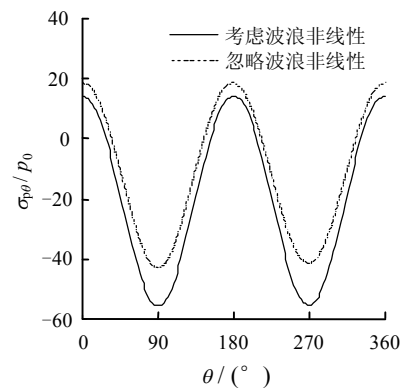
图 2 给出了波峰位于管线正上方时, 考虑波浪二阶非线性项及忽略波浪非线性项时由推进波所引起的管线外表面孔隙水压力比、管线外表面处径向正应力比、环向正应力比和剪应力比分布。由图可见, 波浪非线性项对在管线周边上由波浪所引起的



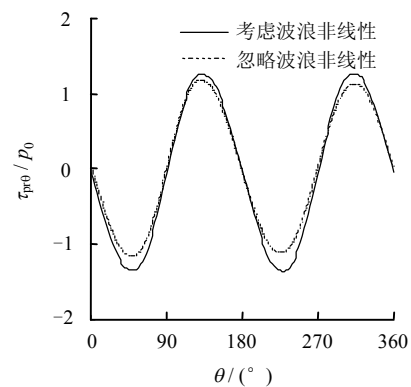
(a) 管线外表面孔隙水压力比 p/p_0 管线外表面处



(b) 径向正应力比 σ_{pr}/p_0



(c) 环向正应力比 $\sigma_{p\theta}/p_0$



(d) 剪应力比 τ_{prt}/p_0 分布

图 2 考虑及忽略波浪二阶非线性项应力比分布
Fig.2 Distributions of stress ratios along the pipeline outer surface for the cases with and without the nonlinearity of wave loading

孔隙水压力、管线内正应力和剪应力具有显著的影响。在本算例所取的波浪参数条件下,当考虑二阶波浪非线性项时得到的管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力要大于不考虑二阶波浪非线性项时得到的管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力。由图 2 还可以看出,波浪非线性项对于整个管线区域内 ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$) 的径向正应力、环向正应力和管线周围的孔隙水压力均有显著影响,对于 θ 分别为 45° , 135° , 225° , 315° 等处的管线内的剪应力影响比较显著。

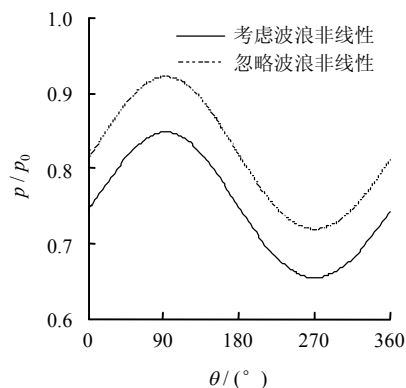
图 3 给出了波峰位于管线正上方时刻,考虑波浪二阶、三阶非线性项及忽略波浪非线性项时由推进波所引起的管线外表面孔隙水压力比、管线外表面处径向正应力比、环向正应力比和剪应力比分布。与图 2 所示的结果不同,在本算例所取的波浪参数条件下,当考虑二阶、三阶波浪非线性项时得到的管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力要小于忽略二阶、三阶波浪非线性项时得到的管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力。实际上在计算中如果忽略波浪非线性项,既有可能低估海底管线内应力以及管线周围海床中孔隙水压力,也有可能高估海底管线内应力以及管线周围海床中孔隙水压力,这取决于波数、水深、波长及波高等波浪要素。

本文将波浪对海床表面的作用分为两部分考虑:一是波浪在海床表面引起周期性的波压力;二是波浪在海床表面引起周期性的孔隙水压力,海床表面的波压力与孔隙水压力大小相等、周期相同。波浪引起的海床表面波压力及孔隙水压力分别是作为荷载和孔隙水压力边界条件施加在海床表面的。当其他条件不变时,随着海床表面波压力及孔隙水压力的增大,海底管线及其周围海床土体中的响应均增大;随着海床表面波压力及孔隙水压力的减小,海底管线及其周围海床土体中的响应均减小。下面以 Stokes 二阶非线性波浪理论为例,说明波浪非线性项对波峰顶断面处由波浪运动所产生的波压力的影响。当海底管线正上方的波面达波峰顶时,二阶近似有限振幅波作用于海床表面的波压力为

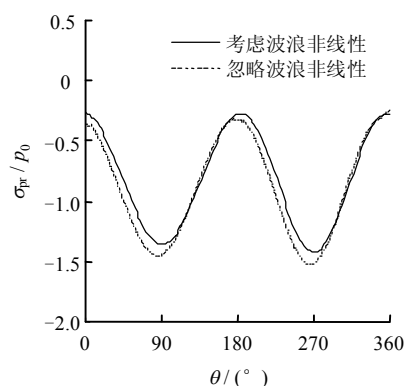
$$p_{2nd}^w = p_0 \left\{ 1 - \frac{kH}{8 \sinh(kd)} \left[2 - \frac{3}{\sinh^2(kd)} \right] \right\} \quad (14)$$

忽略波浪非线性项时,Stokes 二阶非线性波浪理论退化为 Ariy 微幅波理论,此时在波峰顶断面处海床表面的波压力为

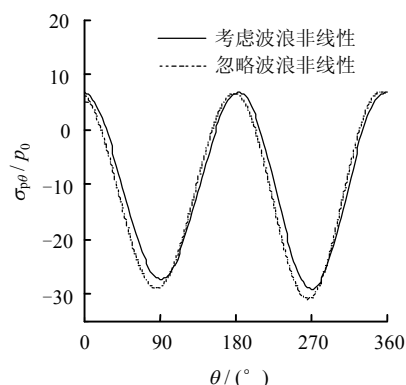
$$p_{1st}^w = p_0 \quad (15)$$



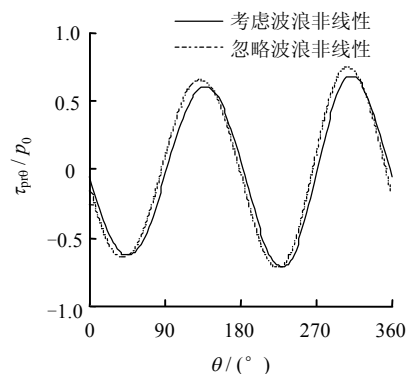
(a) 管线外表面孔隙水压力比 p/p_0 、管线外表面处



(b) 径向正应力比 σ_{pr}/p_0



(c) 环向正应力比 $\sigma_{p\theta}/p_0$



(d) 剪应力比 $\tau_{p\theta}/p_0$ 分布

图 3 考虑及忽略波浪二阶、三阶非线性项的应力比分布
Fig.3 Distributions of stress ratios along the pipeline outer surface for the cases with and without the nonlinearity of wave loading

于是可得波峰顶断面处海床表面考虑波浪非线性时波压力同忽略波浪非线性时波压力的比值为

$$\frac{p_{2nd}^w}{p_{1st}^w} = 1 - \frac{\pi \left(\frac{H}{L} \right)}{4 \sinh(kd)} \left[2 - \frac{3}{\sinh^2(kd)} \right] \quad (16)$$

对于不同相对水深 kd 及波陡 H/L 情况下的波压力的比值可用图 4 来计算。

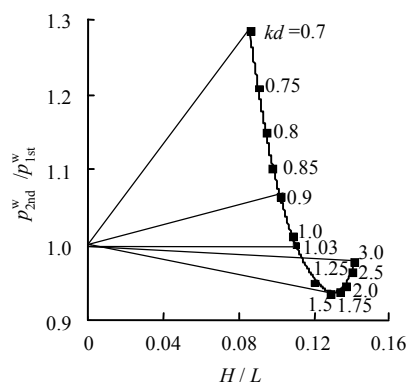


图 4 波峰顶断面处海床表面波压力比值

Fig.4 Wave pressure ratio at the surface of the seabed at wave crest cross section

由图可以看出,在相对水深不是很小的情况下,如 $kd > 0.9$ 时,忽略波浪非线性项对波浪所引起海床表面的波压力的影响不大,与考虑波浪非线性时计算结果相差不超过 $\pm 7\%$;但在相对水深较小、波陡较大的情况下,则波浪非线性的影响不可忽略。例如当相对水深 $kd = 0.7$ 、波陡 $H/L = 1.21$ 时,如果忽略波浪非线性的影响,则得到的海床表面的波压力将比考虑波浪非线性时得到的海床表面的波压力小 28%。由图还可以看出,当相对水深 $kd = 1.03$ 时, $p_{2nd}^w / p_{1st}^w = 1$,此时波浪非线性对于波峰顶断面处海床表面的波压力没有影响。当相对水深 $kd = 1.553$ 、极限波陡 $(H/L)_{max} = 0.13$ 时,波峰顶断面海床表面波压力比值 p_{2nd}^w / p_{1st}^w 对相对水深 kd 的导数为 0,此时波峰顶断面海床表面波压力比值有极小值 $(p_{2nd}^w / p_{1st}^w)_{min} = 0.936$,即图 4 中曲线最低点的坐标为 $(0.13, 0.936)$ 。当相对水深 $kd < 1.03$ 时,如果忽略波浪非线性项的影响将会低估波峰顶断面海床表面的波压力;在其他条件不变的情况下,随着相对水深 kd 的减小,考虑波浪非线性时与忽略波浪非线性时计算得到的波峰顶断面海床表面的波压力的差值将增大。当相对水深 $kd > 1.03$ 时,如果忽略波浪非线性项的影响将会高估波峰顶断面海床表面的波压力;当 $1.03 < kd \leq 1.553$ 时,随着相对水深 kd 的增大,忽略波浪非线性时与考虑波浪非线性时

计算得到的波峰顶断面海床表面的波压力的差值将增大;当 $kd > 1.553$ 时,随着相对水深 kd 的增大,忽略波浪非线性时与考虑波浪非线性时计算得到的波峰顶断面海床表面的波压力的差值将减小。由图 4 还可以看出,当 $kd \neq 1.03$ 时,随着波陡 H/L 的增大,忽略波浪非线性时与考虑波浪非线性时计算得到的波峰顶断面海床表面的波压力差值的绝对值将增大;即随着波陡的增大,波浪非线性对波峰顶断面海床表面的波压力的影响增大。

4 结 论

本文对于多孔介质海床和线弹性海底管线,分别采用 Biot 动力固结理论与弹性动力学理论,同时采用摩擦接触理论考虑两者之间的相互作用效应,并将高阶非线性波浪理论与有限元数值计算相结合,采用有限元方法建立了非线性波浪作用下海底-管线动力相互作用的二维计算模型,由此通过数值计算确定了波浪作用下海床中孔隙水压力和管线内应力等动力响应,并在数值计算的基础上,辅以一定的理论分析,系统地考察了波浪非线性项对海底管线内应力及周围海床孔隙水压力分布的影响。

基于数值计算及理论分析的结果,发现推进波波浪非线性项对在管线周边上由波浪所引起的孔隙水压力、管线内正应力和剪应力具有显著的影响。在计算中如果忽略波浪非线性项,既有可能低估海底管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力,也有可能高估海底管线内应力及管线周围海床中孔隙水压力,这取决于波数、水深、波长及波高等波浪要素。波浪非线性项对于整个管线区域内 $(0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ)$ 的径向正应力、环向正应力和管线周围海床中的孔隙水压力均有显著影响,对于 θ 分别为 45° , 135° , 225° , 315° 等处的管线内的剪应力影响显著。

参 考 文 献

- [1] Herbich J B. Wave-induced Scour around Offshore Pipelines[A]. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*[C]. Houston: [s. n.], 1977. 79—90.
- [2] MacPherson H. Wave forces on pipeline buried in permeable seabed[J]. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 1978, 104(4): 407—419.
- [3] McDough W G, Davidson S H, Monkmeyer P L, et al. Wave-induced forces on buried pipelines[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 1979, 114(2): 220—236.

- [4] Monkmeyer P L, Mantovani P, Vincent H. Wave-induced seepage effects on a buried pipeline[A]. **Proceedings of the Coastal Structures '83 Conference**[C]. [s. l.]: [s. n.], 1983. 519—531.
- [5] Lennon G P. Wave-induced forces on buried pipelines[A]. **Proceedings of the Coastal Structures**[C]. Arlington: [s. n.], 1983. 505—518.
- [6] Spierenburg S E J. Wave-induced pore pressures around submarine pipelines[J]. **Coastal Engineering**, 1986, 10: 33—48.
- [7] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. **Journal of Applied Physics**, 1941, 12(2): 155—164.
- [8] Cheng A H D, Liu P L F. Seepage force on a pipeline buried in a poroelastic seabed under wave loading[J]. **Applied Ocean Research**, 1986, 8(1): 22—32.
- [9] Magda W. Wave-induced uplift force on a submarine pipeline buried in a compressible seabed[J]. **Ocean Engineering**, 1997, 24(6): 551—576.
- [10] Gao F P, Jeng D S, Sekiguchi H. Numerical study of the interaction between nonlinear wave, buried pipeline and non-homogenous porous seabed[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30: 535—547.
- [11] De S C. Contributions to the theory of Stokes Waves[A]. **Proceedings of the Cambridge Philosophy Society**[C]. [s. l.]: [s. n.], 1955. 713—736.
- [12] Britto A M, Gunn M J. Critical State Soil Mechanics Via Finite Elements[M]. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1987.
- [13] Bathe K J. ADINA Users' Manual Version 8.2.2[M]. Watertown: ADINA R & D Inc, 2004.
- [14] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The Finite Element Method[M]. London: MacGrawHill, 1989.

上接第 708 页

- 1955, 26(2): 182—185.
- [5] Zienkiewicz OC. Basic formulation of static and dynamic behavior of soil and other porous material[A]. **Numerical Methods in Geomechanics**[C]. J. B. Martins, ed., London: [s. n.], 1982.
- [6] Zienkiewicz OC, Shiomi T. Dynamic behavior of saturated porous media: the generalized Biot formulation and its numerical solution[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1984, 8: 71—96.
- [7] Li X S. A sand model with state-dependent dilatancy[J]. **Géotechnique**. 2002, 52(3): 173—186.
- [8] Li X.S. and Dafalias Y.F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. **Géotechnique**, 2000, 50(4): 449—460.
- [9] 苏栋, 李相崧. 砂土自由场地震响应的离心机试验研究[J]. **地震工程与工程振动**, 2006, 26(2): 166—170.