

DOI: 10.11779/CJGE2015S2041

# 波浪荷载下海底单桩与土共同作用的数值分析

胡 翔<sup>1</sup>, 陈锦剑<sup>1, 2</sup>

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 国家海洋工程重点实验室, 上海 200240)

**摘要:**采用三维数值分析方法研究了波浪荷载作用下饱和海床与埋入单桩的相互作用特性, 考虑了海床饱和土体的流固耦合和桩土界面的接触特征, 并采用准静态方法模拟短峰波作用于海床的三维波压力分布与变化特征。根据数值分析结果, 研究了波浪荷载作用下海床土体内的孔压和应力变化规律、海底单桩的变形和内力分布情况, 探讨了桩土接触面不同处理方式的影响, 并与自由海床的结果进行比较。结果表明桩端附近土体的孔压出现局部放大现象, 桩身水平位移主要受土体位移影响。采用桩土耦合模型将夸大土体内的附加应力和孔压变化, 且桩身内力和桩底的应力集中现象也更为明显。

**关键词:**短峰波; 海床; 单桩; 耦合模型; 接触面; 共同作用

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0217-05

**作者简介:**胡 翔(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟等方面的学习和研究工作。E-mail: hxbksjtu@sina.com.

## Numerical analysis of interactive behavior between pile and seabed soil under wave load

HU Xiang<sup>1</sup>, CHEN Jing-jian<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** An FEM model for a single pile embedded in a saturated seabed is proposed to study the interactive behavior between pile and seabed soil. Fluid-soil coupling and contact behavior on interface is considered, and the quasi-static method is adopted to simulate the crested short wave-induced load on seabed surface. Based on the numerical results, responses of pore water pressure and stress seabed soils under the wave load are investigated, and the deformation and internal force of the single pile are discussed. Two different methods to simulate the pile-soil interface are discussed with a comparison to the greenfield seabed model. The results show that the pore water pressure increases obviously near the bottom of pile, and the lateral displacement of pile is mainly affected by soil. Moreover, the pore water pressure and stress are overestimated by the pile-soil coupled model, and the stress concentration at bottom of pile is more obvious than that by the pile-soil contact model.

**Key words:** short-crested wave; seabed; single pile; coupled model; interface; interaction

## 0 引言

海洋工程的发展日益迅速, 桩基础作为海洋结构的主要基础形式, 其工作性能也成为岩土工程研究中的关注焦点之一。海洋环境相对复杂, 风浪荷载作用下海洋结构物基础安全问题日益突出, 国内外相关事故屡见不鲜<sup>[1-2]</sup>。土质海床土体具有饱和土特征, 波浪荷载作用下海床中孔隙水压力的动态响应对海床和结构基础有显著影响<sup>[3]</sup>。因此, 研究波浪荷载作用下海床与桩基的相互作用及海底桩基工作性能必须考虑海床饱和土中的孔隙水压力响应特征。

波浪作用下饱和海床的孔压和变形响应分析已有不少的研究成果。Yamamoto<sup>[4]</sup>在 Boit 流固耦合理论基

础上运用解析法直接求解波浪作用下无限厚度海床的孔隙水压力。Jeng 等<sup>[5]</sup>对有限厚度海床中的超孔压特性进行了研究, 得出三维海床在波浪作用下的解析解, 由此也验证了数值模型用以计算的可行性。Jeng<sup>[6]</sup>对海洋构筑物周围土体的孔压变化进行了研究, 并提到同时考虑结构、海床、波浪三者共同作用的模型是新的方向。基于边界元方法, Lu 等<sup>[7]</sup>研究了动态波浪荷载作用下, 桩与土的相互影响, 模型在半空间多孔弹性

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372282); 上海市浦江人才计划项目(13PJD017)

收稿日期: 2015-03-26

性介质中建立，并将桩作为一维结构处理，简化了模型。Bhattacharya<sup>[8]</sup>将桩转化成有平移弹簧和旋转弹簧的欧拉伯努利梁结构，做自由振动分析，并分析了线性波与非线性波对于桩的作用力。Li 等<sup>[9]</sup>、Yang 等<sup>[10]</sup>采用数值模拟的方法讨论了桩周土的孔压响应和液化问题。由于桩土相互作用的复杂性，在已有研究中大多将桩土直接耦合处理，较少考虑桩土界面特性的影响。

本文采用设置桩土接触面和桩土直接耦合两种模拟方法，研究波浪荷载作用下海底单桩与海床的相互作用规律，探讨两种方式的主要区别与优劣，并将响应结果与纯海床的模型进行比较，用以探究桩的存在对于整个结构系统的影响。

## 1 分析方法与参数

如图 1 所示，饱和海床中一个完全埋置的圆形单桩，桩长  $l$  为 20 m，波浪沿  $y$  方向前进，海水深度  $h$  为 10 m，海床土体厚度  $h_s$  为 50 m 海床，底部为刚性不透水层。波浪对土层的作用主要体现在竖向的压力和孔隙水压力的周期性变化<sup>[6]</sup>。桩完全埋入土中，主要受到土层位移作用，由于海床为砂质的，所以本文仅考虑瞬时孔压。

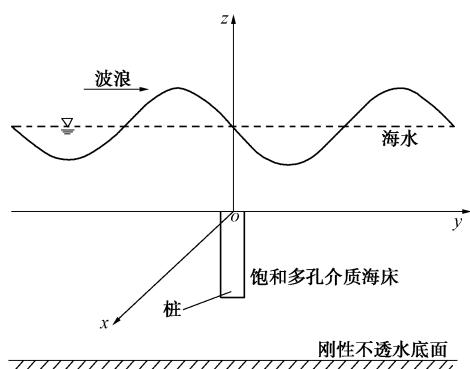


图 1 桩、海床、波浪相互作用的模型简图

Fig. 1 Definition of wave-seabed-pile interaction problem

### 1.1 数值分析模型

根据图 1 建立海底单桩的有限元模型，如图 2 所示，考虑到海床模型的尺寸和计算效率要求，有限元模型在靠近桩的部分网格局部加密，桩底部的土层网格随深度递减。数值分析采用有限元通用软件 Abaqus 开展研究，利用其并行计算功能提高计算效率。

### 1.2 波浪荷载模拟

相较于常用的经典二维波浪，三维波浪更为复杂，其难点在于：解析解的变量数大，控制方程相应增加，涉及多个变量及复杂公式推导，数值求解对计算机硬件的要求也大幅提高。而在考虑桩基础存在的海床力

学响应分析时，海床及波浪荷载必须考虑三维特征，本文用三维短峰波模拟波浪荷载输入。

对于三维海床在短峰波作用下的响应问题，国内外学者都有相关的研究。Hsu 等<sup>[11-12]</sup>对短峰波作用下海床响应进行研究，采用解析法讨论了无限厚海床和有限厚海床的响应，并采用半解析法分析了三维分层海床在短峰波作用下的响应问题。

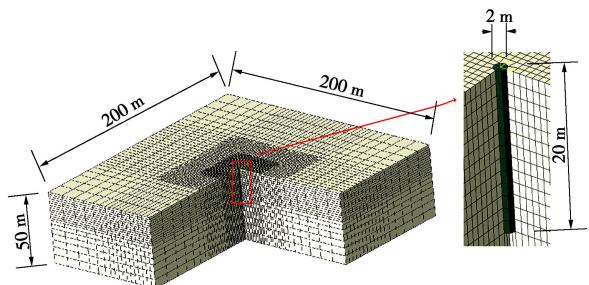


图 2 桩与海床三维网格模型

Fig. 2 3-D numerical model

Zienkiewicz 等<sup>[13]</sup>在分析波浪作用下饱和海床响应时，提出了准静态理论、部分动力理论和全动力理论。Jeng 等<sup>[14]</sup>进而讨论了 3 种方程在波浪作用下自由海床和防波堤附近海床中的应用范围，发现在低频波浪作用下，采用准静态模式进行计算误差很小，且有利于提高求解速度和稳定性。因此，本文在数值分析中采用三维短峰波的准静态模式，通过 30 个加载步骤，将动态的波浪荷载分化成时间较短的连续静态荷载。波浪对海床的作用，直接体现为作用在海床表面的同等大小的压应力和孔压，表达式如下<sup>[15]</sup>：

$$p = p_{w0} = p_0 \cos(nky) \cos(mkx - wt) , \quad (1)$$

$$p_0 = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(kd)} , \quad (2)$$

其中， $m = \sin \theta$ ， $n = \cos \theta$ ， $p$  为海床表面上的压应力， $p_{w0}$  为海床表面上的孔压，波浪参数满足色散关系。对于波浪参数为：周期  $T=10.0$  s，水深  $h=10.0$  m，波长  $L=92.32$  m，波高  $H=3.0$  m，入射角  $\theta=45^\circ$ ；桩参数为直径  $D=2.0$  m，埋置深度  $l=20.0$  m，密度  $\rho=18.0$  kN/m<sup>3</sup>，弹性模量为 3 GPa，泊松比为 0.2；海床参数为：海床厚度  $h_s=50.0$  m，水重度  $\gamma_w=10.0$  kN/m<sup>3</sup>，海床土浮重度  $\gamma=8.0$  kN/m<sup>3</sup>，泊松比  $\nu=0.3$ ，剪切模量  $G=1.5 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>，渗透系数  $k_s=1.0 \times 10^{-3}$  m/s，饱和度  $S_r=1.0$ ，孔隙比  $n=0.67$ ，侧向土压力  $K_0=0.5$ ，接触面，摩擦系数为 0.3。

### 1.3 土层和桩的计算参数

海床土体和单桩的几何及力学参数如前文所示。桩与土体在材料上有很大差异，两者接触面的相互作用较为复杂，通常采用桩土节点耦合的方法难以准确

地模拟桩土直接的相对滑动和脱开等现象。本文采用面面接触的库仑摩擦模型模拟桩土接触面特征, 并将其与桩土耦合模型及无桩海床模型进行比较, 探讨桩土界面面对海底单桩响应的影响。接触面的桩土摩擦系数为 0.3, 其极限摩阻力根据法向应力自动计算。

## 2 计算结果分析

### 2.1 海床孔压变化规律

孔隙水压力是海床响应的主要指标, 液化破坏可以通过孔隙水压力来判断。图 3 为波谷作用于桩顶部时不同深度桩周土的孔隙水压力分布, 可见桩对孔压的影响大概为桩周 4~5 m 范围, 且单桩对土体内孔压的影响随深度递减。由于桩土刚度差及桩身不透水的影响, 桩端附近土体的孔压出现明显的增大, 表现出局部应力集中特征。采用桩土界面耦合模型显著夸大单桩对土体孔压响应的影响, 耦合模型在桩端处的最大孔压是接触面模型的 1.7 倍。

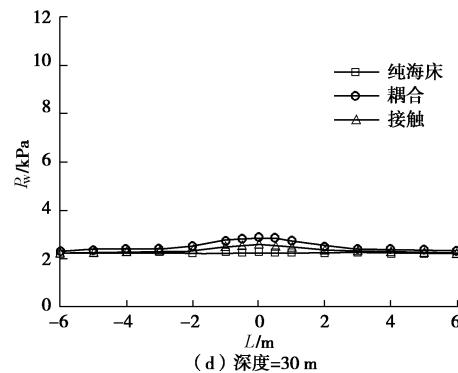
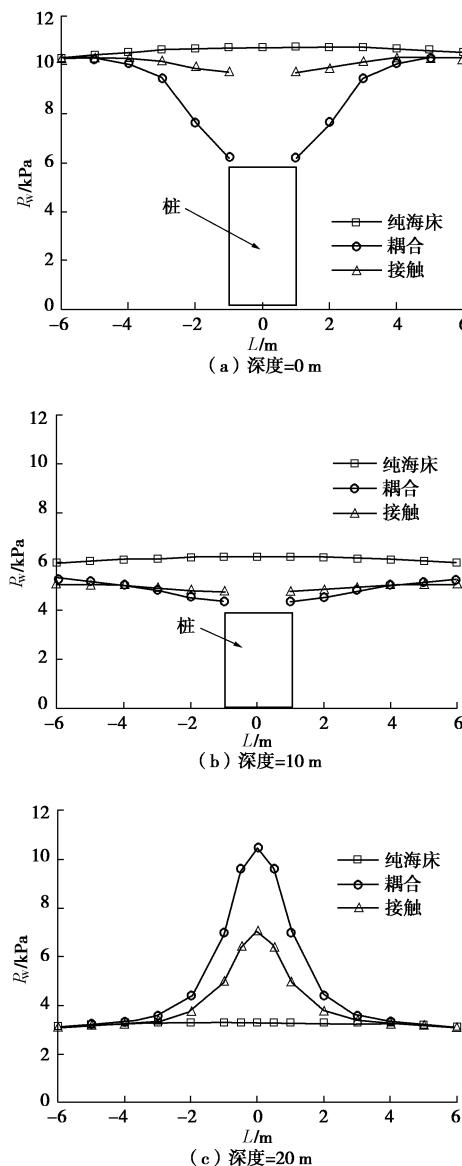


图 3 荷载作用初始阶段各深度的桩周土孔压

Fig. 3 Response of pore pressure to depth at the beginning of load

孔压在桩端附近的变化最为明显, 图 4 为一个完整周期内桩端土体孔压变化曲线。有桩情况下, 孔压更快地达到峰值。考虑到桩有更高的模量, 当波浪荷载作用到海床表面时, 桩端附近土体受到的荷载作用更直接迅速, 且没有土层的阻尼作用, 因此存在相位前移的现象。

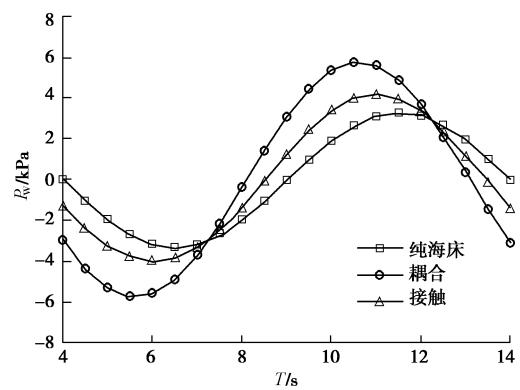


图 4 一个完整周期的桩底部孔压变化规律

Fig. 4 Development of pore pressures on center of bottom of pile in a whole period

### 2.2 桩和海床应力变化规律

图 5 为 3 种模型在  $t=14$  s 时桩轴心处的竖向应力。桩土界面接触面模型中桩的应力相对于纯海床模型更小, 耦合模型与纯海床模型在 0~18 m 之间应力状态相似, 在 18 m 处发生突变。耦合模型在深度为 20 m 时, 达到最大值约 300 kPa, 是另外两种模型的 2~3 倍。底部突变一方面是由网格不够精细, 更主要的原因是桩和土体共用节点, 产生应力集中现象。

图 6 为不同深度处海床土体竖向附加应力随时间发展的曲线, 15~20 m 处土体的竖向应力变化量最大, 由此可推断土体侧向应力最大变化量应出现在 15~20 m 处。

### 2.3 桩和海床水平位移

图 7 反映了 3 种模型中桩的侧向位移, 其曲线基本相似, 桩体与土体位移在海底泥线以下 15~20 m

处达到最大。Gatmiri<sup>[16]</sup>曾建立一个各向同性饱和海床的有限元模型分析波浪作用下的荷载响应问题，并指出在海床深度为 0.2 倍波浪长度处，土体有最大的横向位移。图 7 也符合 Gatmiri<sup>[16]</sup>的分析情况，说明桩体水平位移主要受土体影响，其分布特征与海床土体类似，但桩身刚度对位移量的大小有一定影响。

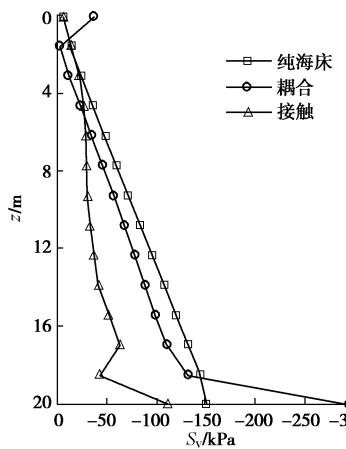


图 5 桩轴心处的竖向应力随深度变化曲线 ( $t=14$  s)

Fig. 5 Distribution of vertical stress soil of along pile at  $t=14$  s

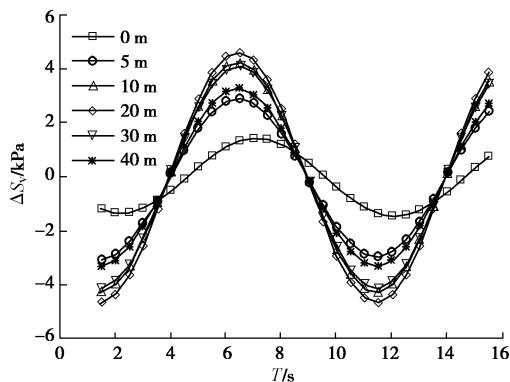


图 6 不同深度的竖向应力变化量随时间发展规律

Fig. 6 Variation of vertical stress of soil at different depths

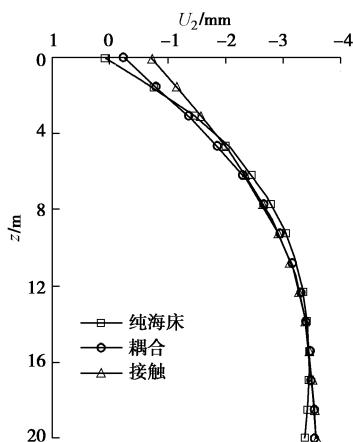


图 7 三种模型中桩的侧向位移

Fig. 7 Lateral displacement of pile in three models

## 2.4 桩的弯矩

图 8 所示为不同时刻的桩身弯矩分布图，桩土界

面耦合模型的弯矩值明显大于接触面模型。桩身弯矩在 5~8 m 处最大，最大弯矩出现在峰值 2 s 前后，该时刻土体的渗流的作用明显，桩两侧的应力差值较大，产生最大弯矩。

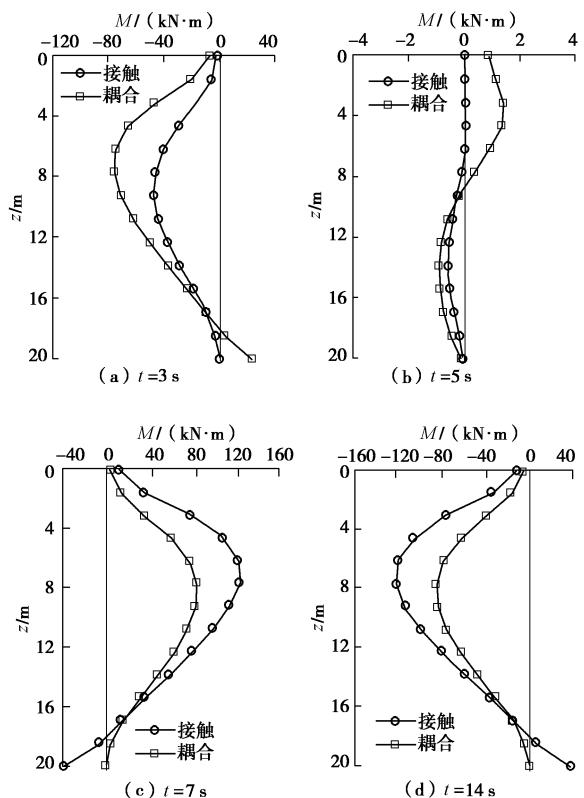


图 8 两种模型在不同时刻的桩弯矩

Fig. 8 Bending moments of pile by two models at different time

## 3 结 论

(1) 在波浪荷载作用下，桩体由于更高刚度使荷载传递更快，桩端附近土体因应力集中而导致孔压显著增大，并伴有相位前移的现象。

(2) 采用桩土界面耦合模型时，所得的孔压、应力和弯矩数值相较于接触面模型更大，且桩底部连接处有应力集中现象明显。

(3) 海床土体的附加应力应力变化量最大值出现在海底面以下 15~20 m 处，桩身弯矩在 5~8 m 处达到最大，弯矩极值出现在波浪峰值 2 s 前后，此时土体的渗流作用明显，桩两侧的应力变化迅速，差值较大。

(4) 桩体侧向位移的最大值出现在 15~20 m 处，约为波长的 0.2 倍，跟土体变形基本一致，说明桩的侧向位移主要受土体影响。

## 参 考 文 献：

- [1] BEA R G, WRIGHT S G. Wave-induced slides in south pass

- block 70, Mississippi Delta[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, **109**(4): 619 – 644.
- [2] 赵 刚. 胜利作业三号平台“9.7”倾斜事故分析[J]. 现代职业安全, 2011(7): 100 – 102. (ZHAO Gang. Case study about ‘9.7’ inclination of the Shengli No.3 work platform[J]. Mordern Occupation Safety, 2011(7): 100 – 102. (in Chinese))
- [3] 郑东生. 波浪和海床交互作用的多孔介质理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013. (JENG Dong-sheng. Porous Models for Wave-seabed Interactions[M]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University Press, 2013. (in Chinese))
- [4] YAMAMOTO. On the response of a pore-elastic bed to water waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, **87**(1): 193 – 206.
- [5] JENG D S, HSU J R C. Wave-induced soil response in a nearly saturated seabed of finite thickness[J]. *Géotechnique*, 1996, **46**(3): 427 – 440.
- [6] JENG D S. Wave-induced seafloor dynamics[J]. *Applied Mechanics Review*, 2003, **56**(4): 407 – 429.
- [7] LU J F, JENG D S. Poroelastic model for pile-soil interaction in a half-space porous medium due to seismic waves[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, **32**(1): 1 – 41.
- [8] BHATTACHARYA S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, **31**(5): 805 – 816
- [9] LI X J, GAO F P, YANG B. Wave-induced pore pressure and soil liquefaction around pile foundation[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2011, **21**(3): 233 – 239.
- [10] YANG B, GAO F P. Experimental study on vortex-induced vibrations of submarine pipeline near seabed boundary in ocean currents[J]. *China Ocean Engineering*, 2006, **20**(1): 113 – 121.
- [11] HSU J R C, JENG D S. Short-crested wave-induced soil response in a porous seabed of infinite thickness[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, **17**(8): 553 – 576.
- [12] HSU J R C, JENG D S. Oscillatory soil response and liquefaction in an unsaturated layered seabed[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1995, **19**(12): 825 – 849.
- [13] ZIENKIEWICZ O C. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 385 – 395.
- [14] JENG D S, CHA D H. Effects of dynamic soil behavior and save non-linearity on the wave-induced pore pressure and effective stresses in porous seabed[J]. *Ocean Engineering*, 2003, **30**: 2065 – 2089
- [15] HSU J R C. Third-order approximation to short-crested waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1979, **90**(1): 179 – 196.
- [16] GATMIRI B. A simplified finite element analysis of wave-induced effective stress and pore pressures in permeable sea beds[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(1): 15 – 30.

(本文责编 孙振远)