

文章编号:1006-2467(2016)11-1737-05

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.11.013

短峰波作用下饱和海床中的单桩响应分析

胡翔^a, 陈锦剑^{a,b}, 王建华^{a,b}

(上海交通大学 a. 土木工程系; b. 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 采用准静态三维数值分析方法直接模拟短峰波作用于海床表面与桩身的三维波压力分布, 在考虑了海床土体的流固耦合和桩土界面的接触特征的基础上, 研究了短峰波荷载作用下饱和砂质海床中的单桩响应问题. 根据数值分析结果, 研究了波浪荷载作用下土体的孔压变化规律、桩柱的位移和弯矩分布情况, 探讨了桩土接触面不同处理方式的影响, 并与自由海床和完全埋置单桩的模型结果进行比较. 结果表明: 泥线附近与桩端处土体的响应局部现象明显; 采用桩土耦合模型时, 孔压与弯矩响应相比于接触面模型有放大效应, 而位移响应则正好相反. 完全埋置桩在波浪作用下的响应主要受海床影响, 在桩柱伸出海面的模型中, 波浪荷载在桩柱上的影响起主导作用.

关键词: 短峰波; 饱和砂质海床; 单桩; 接触面; 相互作用; 桩土耦合

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

Analysis of a Single Pile Response in a Saturated Seabed Under Short-Crested Wave

HU Xiang^a, CHEN Jingjian^{a,b}, WANG Jianhua^{a,b}

(a. Department of Civil Engineering; b. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A 3D FEM model of a single pile in saturated sandy seabed was proposed to study the response of pile. Meanwhile, the quasi-static method and fluid-soil coupling and contact behavior on interface was considered. Based on numerical results, responses of the pore water pressure and stress of seabed soil under wave was studied, and the deformation and internal force of the single pile were discussed. Besides, two different methods to model the pile-soil interface were discussed with a comparison of the free field seabed model and seabed model with a totally embedded pile. The results show that the pore water pressure increases significantly near the mudline and bottom of pile. Responses of pore pressure and bending moment are evidently larger in the coupling model, but the displacement response is smaller. Moreover, the totally embedded pile model is mainly affected by seabed, as the wave dominatedly acts on the model with a pile out of the seabed.

Key words: short-crested wave; saturated sandy seabed; single pile; interface; interaction; pile and soil couple

收稿日期: 2015-12-14

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)

作者简介: 胡翔(1990-), 男, 湖北宜昌市人, 硕士生, 研究方向为岩土工程, E-mail: hxbksjtu@sjtu.edu.cn.

陈锦剑(联系人), 男, 博士, 副教授, E-mail: chenjj@sjtu.edu.cn.

近年来海洋工程发展迅速,桩基础作为海洋结构的重要基础形式,其工作性能成为工程设计与海洋岩土研究的核心内容.海洋环境复杂,波浪荷载作用下的基础安全问题是关注焦点之一,由此引发事故屡见不鲜^[1-2].究其可能原因,一方面是波浪对结构物及结构物基础周围的土体的影响显著,另一方面砂质海床中土体饱和,波浪作用下的孔隙水压力响应对海床与结构物的影响也不容忽视.因此,研究波浪荷载作用下结构物的安全问题必须考虑海床与桩基的相互作用和桩基自身的工作性能.

波浪作用下饱和砂质海床中的孔压、变形响应有不少的研究成果.Yamaoto^[3]基于Biot固结理论,提出了波浪作用下无限厚度海床的解析解.Jeng等^[4]对有限厚度海床中的超孔压特性进行了研究,得出了波浪作用下三维海床孔压响应的解析解.Tsai^[5]在此基础上,提出了部分反射的三维短峰波模型.Bhattacharya^[6]将桩转化成有平移弹簧的欧拉伯努利结构,Li等^[7]数值模拟了桩周土的孔压响应和液化问题,Jiang等^[8]对椭圆余弦波与竖向圆柱结构的相互作用进行模拟.Morison等^[9]总结研究了各种类型的波浪作用于海洋桩结构的响应问题.可见,已有研究大多只考虑波浪对海床土体或桩体的单独影响,对波浪荷载下桩土相互作用与耦合效应的研究较少.胡翔等^[10]考虑了桩土相互作用,并探讨了波浪作用下海底完全埋置单桩的响应,但实际工程中的海洋桩基有一部分高出海床而处于海水中.

本文在文献[10]研究的基础上,考虑了泥线以上桩身受波浪作用的影响,采用数值方法研究了波浪荷载作用下桩与海床土的相互作用规律,并与此前完全埋置的海底单桩模型与无结构物的自由海床模型进行比较,同时探讨了设置桩土接触面和直接耦合两种模拟方法对数值结果的影响,以研究桩的存在及其形式对整个结构系统的影响.

1 理论假设与分析方法

1.1 数值分析模型

如图1所示,饱和砂质海床中存在一根完全伸出海面的圆形截面单桩,桩长 $l=35\text{ m}$,泥线以上部分为 15 m ,埋置土中部分为 20 m .波浪沿 y 方向前进,海水深度 $h=10\text{ m}$,海床土体厚度 $h_s=50\text{ m}$,底部为刚性不透水层.

1.2 波浪荷载模拟

在海洋环境中,前进波遇到防波堤、海岸等海洋构筑物时会发生反射,入射波和反射波相互叠加形

成三维短峰波.短峰波是自然界中广泛存在的波浪形式,相对于波峰无限长的理想平面波而言更符合实际,存在于多种海洋工程环境中.

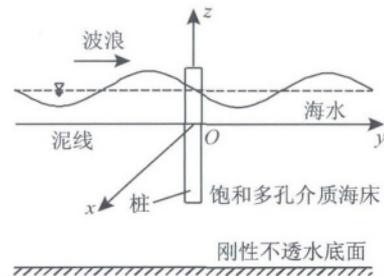


图1 桩、海床、波浪相互作用的模型简图

Fig. 1 Definition of wave-seabed-pile interaction

Jeng等^[11]研究表明在低频波浪作用下,采用准静态模式的误差可忽略,且有利于提高计算效率与稳定性.因此本文采用三维短峰波的准静态模式,将动态波浪荷载转化为单位时长较短的连续静态荷载.波浪对海床的作用可直接等同于海床表面所受的孔隙水压力和波压力,表达式如下^[12]:

$$p = p_{w0} = p_0 \cos nkyc \cos(mkx - \omega t) \quad (1)$$

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

式中: $m = \sin \theta$; $n = \cos \theta$; θ 为入射角; p 为海床表面上的压应力; p_{w0} 为海床表面的孔隙水压力; p_0 为孔隙水压力极值; k 为波数; ω 为角频率; H 为波高; γ 为水重度; d 为水深;波浪参数满足色散关系.

1.3 桩的受力假设

在泥线上方,桩身所受的波浪荷载参考海港水文规范^[13]的处理方式,受力示意图如图2所示.

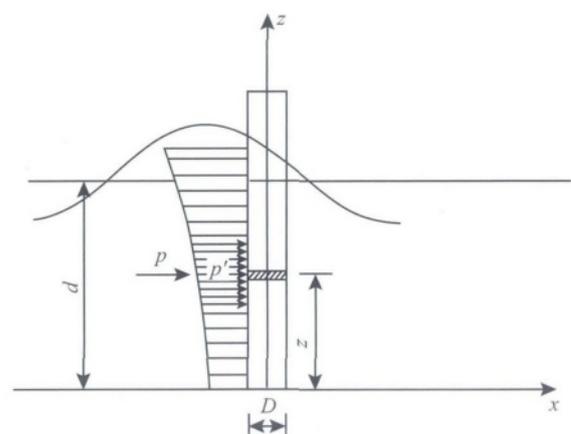


图2 桩受到行进波浪力作用的示意图

Fig. 2 Definition of wave force action on a pile

对于水底面以上高度 z 处,柱体全断面上与波向平行的正向力 p 由速度分力 p_D 和惯性分力 p_T 组成,可按下列公式计算:

$$p = p_D + p_T \quad (3)$$

$$p_D = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D D u |u| \quad (4)$$

$$p_I = \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\text{ch}(2\pi z/L)}{\text{sh}(2\pi d/L)} \cos \omega t \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\text{ch}(2\pi z/L)}{\text{sh}(2\pi d/L)} \sin \omega t \quad (7)$$

式中: p_D 为波浪力的速度分力; p_I 为波浪力的惯性分力; D 为柱体的直径; A 为柱体的断面积; C_D 为速度力系数,对圆形断面取 1.2; C_M 为惯性力系数,对圆形断面取 2.0; u 、 $\partial u/\partial t$ 分别为水质点轨道运动的水平速度和水平加速度; T 为波浪周期; L 为波长。

在泥线下方,通常的有限元方法对于桩土节点是耦合处理的,本文采用扩展的库伦摩擦模型处理接触面特性,与桩土界面耦合模型进行比对。

2 数值模型与计算参数

根据图 1 建立单桩海床的有限元模型如图 3 所示,考虑到海床模型的尺寸和计算效率限制,对网格进行局部优化处理,在靠近桩柱 20 m 的矩形部分进行加密,网格密度沿深度方向递减,模型共计 46 250 个网格。本模型采用有限元通用软件 Abaqus 进行计算研究,模型参数为:

(1) 波浪。波浪周期 $T=6.0$ s,水深 $h=10.0$ m,波长 $L=48$ m,波高 $H=3.0$ m,入射角 $\theta=45^\circ$ 。

(2) 桩。桩的直径 $D=2.0$ m,长度 $l=48$ m,埋置深度为 20.0 m,密度为 18.0 kN/m³,弹性模量 3 GPa,泊松比 0.2。

(3) 海床。海床厚度 $h=50.0$ m,水重度 $\gamma=10.0$ kN/m,海床土浮重度 $\gamma'=10.0$ kN/m³,泊松比 $\mu=0.3$,剪切模量 $G=15$ MPa,渗透系数为 1.0 mm/s,饱和度 $S=1.0$,孔隙比 $n=0.428$,侧向土压力系数 $K_0=0.5$ 桩土接触面摩擦系数 0.3。

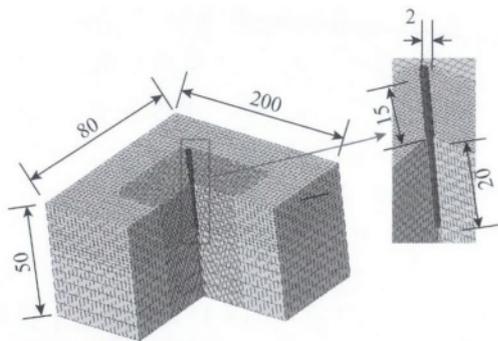


图 3 桩与海床三维网格模型(m)

Fig. 3 3-D numerical model (m)

3 饱和海床响应分析

波浪对海床土层的作用主要体现在竖向压力和孔隙水压力的周期性变化,由于海床为砂质,渗透系数较高,且土体为弹性,故本文仅考虑短周期内的瞬时孔压。

图 4 所示为不同深度条件下桩周土的孔压响应。由图可见,在海床表层迎波面的土体孔压比纯海床的大,而背波面的孔压呈对称减小;在 $z=-5$ m 处,迎波面的土体孔压减小,而背波面的土体孔压增大,与海床表层相比呈正好相反的趋势;在 $z=-10$ m 深度处,迎波面与背波面的土体孔压都呈现减小趋势;在桩端底部,孔压有明显增大。

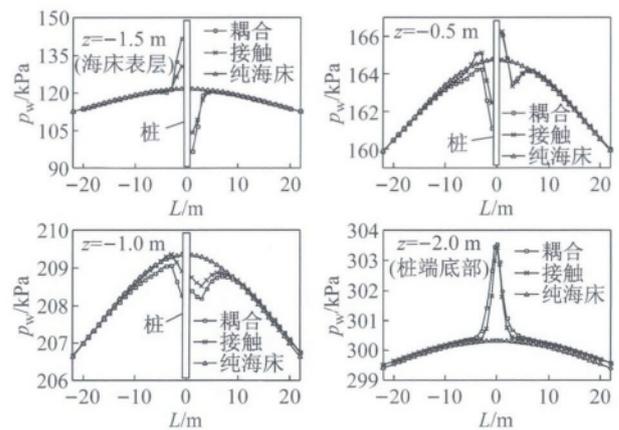


图 4 不同深度下桩周土的孔压响应

Fig. 4 Pore pressure response at different depths

耦合的处理方法有放大土体的孔压响应的效应,其原因在于,桩与海床土由于刚度差异产生较大的相互位移,而桩土节点耦合处理后,土体受到桩的影响更加明显,另一方面,波浪力对桩的直接作用通过桩传递到海床内部,土体的孔压产生放大效应。

桩底孔压随时间变化如图 5 所示。可见,纯海床模型的桩底孔压随时间变化基本可以忽略,有桩的模型的桩底孔压有较大的变化。鉴于桩周土孔压变化的复杂性,本文对桩体附近 2 m 处的孔压沿深度变化进行了研究,如图 6 所示。

从海床表面($z=0$)到 $z=-8$ m 深度处,孔压有明显变化,迎波面的孔压随深度增加先增大后减小,而在背波面的孔压分布正好相反,随深度增加先减小后增大,在 $z=-8$ m 下方土层孔压变化较小,完全埋置桩的孔压与纯海床的变化趋势近乎一致,说明完全埋置桩主要受海床土体影响。分析原因在于,泥线以上桩身受到波浪力的直接作用,进入土体后,表层土体产生明显响应,此时孔压随之增大,随

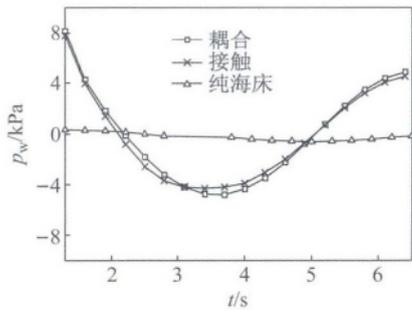


图 5 桩底孔压的随时间变化规律

Fig. 5 Pore pressure under pile versus time

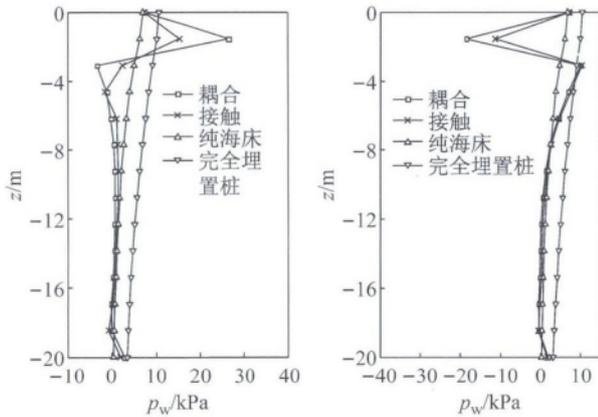


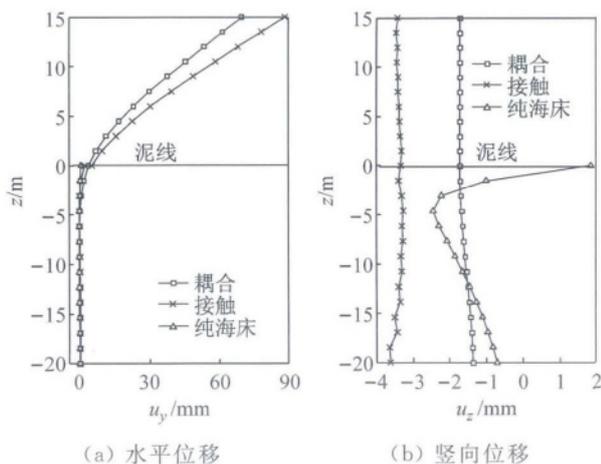
图 6 桩体附近的超孔压沿深度分布规律

Fig. 6 Exceeding pore pressure versus depths

随着深度增加, 桩土作用力方向发生变化, 由此孔压出现反向的增大, 当深度继续增大, 而桩所受波浪力在土中逐渐消散, 土层受力变小, 因此 $z = -8$ m 下方土体的孔压响应接近于 0.

4 单桩响应分析

桩的位移响应是考察桩的承载性能的重要指标, 图 7 所示为波峰时刻桩体的水平位移和竖向位移. 可见, 在桩顶部出现水平位移最大值, 且泥线以



(a) 水平位移

(b) 竖向位移

图 7 波峰时刻桩的水平与竖向位移

Fig. 7 Horizontal and vertical displacement of pile

上桩的水平位移较大, 进入土体后, 位移迅速变为 0; 在纯海床情况下, 土体的竖向位移在表层变化较大; 接触模型中的桩体竖向位移是耦合模型的 2.5 倍. 值得注意的是, 接触模型中桩的顶部位移比耦合模型的大, 而在其他响应中, 耦合模型相比于接触模型有放大效应. 如图 8 所示为波浪作用下出现最大弯矩时刻桩体上的弯矩分布.

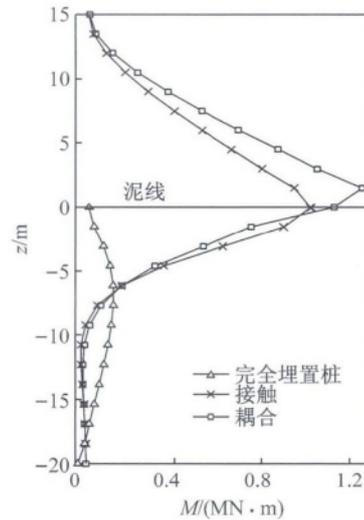


图 8 桩的弯矩分布

Fig. 8 Distribution of bending moment of pile

由图可见, 模型中桩的最大弯矩出现在泥线处, 而在泥线下部 $z = -10 \sim -20$ m 段桩体几乎无弯矩; 在完全埋置桩模型中, 桩的弯矩呈现完全不同的分布趋势, 受土体影响较大, 且数值相对于接触模型较小; 伸出海面的桩柱结构受波浪作用明显, 波浪作用在桩体上部, 桩身受横向的波浪作用力, 到泥线处, 土体的反力发挥作用, 弯矩分布曲线出现拐点.

5 结论

本文运用数值方法分析了短峰波作用下单桩海床相互作用, 并与自由海床模型、完全埋置海底单桩模型进行比较, 得出以下结论:

(1) 桩周土的孔压响应, 在桩上半部分 ($l/2$ 以上) 急剧变化. 桩周孔压分布的影响范围约为桩径的 2 倍. 桩的弯矩在桩的上半部分有明显响应; 桩的位移在进入海床土后迅速减小. 因此, 桩上半部分 ($l/2$ 以上) 各类响应明显, 主要是由于桩身上的波浪力在海床土层上部几乎完全消散. 因此, 在设计过程中应考虑对海床上部进行加固处理.

(2) 耦合模型中孔压与弯矩响应相比于接触面模型有放大效应, 而位移响应正好相反. 原因在于, 土体对桩柱的位移有阻碍作用, 而耦合处理时, 桩土共用节点放大了阻碍效应, 使桩的位移响应减小. 土

体孔压和桩弯矩由于耦合处理,土体产生更大变形,孔压受桩的作用更加明显,可见采用设置接触面的处理方法进行桩土界面设计更加合理.

(3) 对比纯海床与完全埋置的海底单桩模型,可以发现完全埋置桩在波浪作用下的响应主要受海床影响,因此在桩柱伸出海面的模型中,波浪作用在桩柱上的影响十分明显,起主导作用;值得注意的是,2 种模型中,桩端孔压均有明显的放大效应,这在工程设计中有参考意义.

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]. **Modern occupation safety**, 2011(7): 100-102.
- [3] YAMAMOTO T, KONING H L, SELLMER H, *et al.* On the response of a pore-elastic bed to water waves[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 1978, 87(1): 193-206.
- [4] JENG D S, HSU J R C. Wave-induced soil response in a nearly saturated seabed of finite thickness[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(3): 427-440.
- [5] TSAI C P. Wave-induced liquefaction potential in a porous seabed in front of a breakwater[J]. **Ocean Eng**, 1997, 24(10): 887-917.
- [6] BHATTACHARYA S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2011, 31(5): 805-816.
- [7] 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.
- [8] JIANG L, WANG K H. Hydrodynamic interactions of cnoidal waves with a vertical cylinder[J]. **Appl Ocean Res**, 1996, 17(5): 277-289.
- [9] MORISON J R, O'BRIEN M P, Johnson J W, *et al.* The forces exerted by surface waves on piles[J]. **Petroleum Technol Petroleum Trans AIME**, 1950, 2(5): 149-154.
- [10] 胡翔,陈锦剑. 波浪荷载下海底单桩与土共同作用的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(Z2): 217-221.
HU Xiang, CHEN Jingjian. Numerical analysis of interactive behavior between pile and seabed soil under wave load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(Z2): 217-221.
- [11] 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(16): 2065-2089.
- [12] HSU J R C. Third-order approximation to short-crested waves[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 1979, 90(90): 179-196.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 海港水文规范: JTJ213-98[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.