

# One Simplified Model of Seabed Instability and Its Engineering Application

Yongli Zhang<sup>1</sup> Beichen Zhao<sup>2</sup>

1.School of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan, 451191, China  
2.Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450001, China

## Abstract

Under the action of wave and sea current, the soft seabed may move laterally, which can cause the pile internal forces increase, and the pile damage risk will be increased. Therefore, the evaluation of wave-induced seabed stability is significant to the design of marine pile foundations. Inspired from the mechanical properties of seabed, the wave seabed interaction system is simplified into a simple mechanical model, and the lateral displacement distribution of two-dimensional sea floor soil under wave action is deduced, the simplified model is combined with the dynamic P-Y curve method. In ANSYS, modeling and analysis of offshore wind turbine single-pile foundations were carried out, and the influence of seabed instability on the bearing performance of marine pile foundations was evaluated, and some practical conclusions were obtained, which can provide references for the design and analysis of marine pile foundations.

## Keywords

ocean engineering; soil displacement; mechanical model; finite element; offshore wind turbine

## 一种海床失稳简化模型及其工程应用

张永利<sup>1</sup> 赵北辰<sup>2</sup>

1. 中原工学院建筑工程学院, 中国·河南·郑州 451191  
2. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 中国·河南·郑州 450001

## 摘要

在波浪、海流作用下, 松软的海床会发生水平位移, 水平位移施加于桩体, 使桩体内力增加, 桩体发生破坏的危险性增强。因此, 海洋桩基设计中有必要考虑海床失稳的影响。从海床的宏观力学性能方面出发, 将波浪海床相互作用系统简化为一简单的力学模型, 推导了波浪作用下二维海床土体的侧向位移分布, 并应用此简化模型与动力p-y曲线法相结合。在ANSYS中对近海风机单桩基础进行了建模分析, 评估了海床失稳对海洋桩基承载性能的影响, 得到了一些实用的结论, 可为海洋桩基的设计与分析提供参考。

## 关键词

海洋工程; 土体位移; 力学模型; 有限元; 近海风机

## 1 引言

波浪在海床上传播的过程中, 与海床发生相互作用, 一方面海床土体吸收波浪的能量, 使波浪发生衰减和变形, 另一方面波浪运动会海床上施加波压力和剪切力, 引起孔隙水压力和有效应力的变化, 使海床出现变形、软化、承载力下降以及液化等现象, 致使海床失稳, 进而引起海上建筑物的破坏。因此, 对于波浪作用下海床稳定性的研究具有很大的实际应用价值。

【作者简介】张永利(1982-), 男, 中国河南开封人, 博士, 讲师, 从事工程抗震加固改造、风机支撑结构设计与监测研究。

关于此类问题的研究, 国际上最早开始于20世纪40年代进行的。Putnam将海床视为各向同性的刚体, 研究了波能在海床上的衰减规律<sup>[1]</sup>。到了20世纪70年代, 随着欧洲国家对北海油田的开发建设, 波浪作用下海床失稳问题引起了众多学者的研究兴趣。其中, 日本学者Yamamoto(1978, 1981, 1983)在这方面做出了突出的贡献<sup>[2-4]</sup>, 他假定海床土体为饱和半无限多孔弹性介质, 孔隙水流动符合Darcy定律, 波浪为线性波情况下, 通过求解Biot固结方程<sup>[5]</sup>, 得出了波浪作用下, 海床土体的孔压、位移及有效应力的解析解。中国的研究人员多是参考Yamamoto的研究思路, 章根德、吴梦喜、栾茂田、冯辉和冯秀丽等人开展一些数值求解和实验研究<sup>[6-11]</sup>。此外, 在泥沙运动力学领域, 国内外的学者也开

展了类似的研究工作。Gade (1958) 最先利用泥—水两层流体模型研究了波浪在淤泥质底床的衰减特性, 研究发现波浪大幅衰减主要原因是泥层运动造成了波能损耗<sup>[12]</sup>。Dalrymple 和 Liu (1978) 将 Gade 模型进行了推广<sup>[13]</sup>。吴永胜、王兆印和胡世雄 (2000) 在波浪—淤泥相互作用数学模型的基础上, 引入淤泥床面上波浪边界层以及波浪紊动的变化特性分析了淤泥床面上波浪的衰减特性, 对海床稳定性的研究具有参考意义<sup>[14]</sup>。齐鹏、侯一筠建立了用于模拟波浪运动的水体引起底床软泥振荡并导致泥体输移的垂向二维数值模型, 通过求解 Navier-Stokes 方程, 得到了波高的衰减率和底床软泥体的输移速度<sup>[15]</sup>。

概括地说, 目前研究海床稳定性的理论研究思路主要有两类: 一类是以 Yamamoto 为代表; 一类是以 Gade 为代表。尽管都已取得了大量的研究成果, 但在实际的海洋建筑物的基础设计中应用的还很少, 尤其还没有形成具体的评价系统, 对于海岸岩土工程师比较关心的波浪对海床作用的影响深度、波浪—海床的相互作用对海洋桩基承载性能的影响等问题, 这两类研究思路难以给出便于工程应用的解答。论文拟从海床的宏观力学性能方面出发, 将波浪—海床相互作用系统简化为简单的力学模型, 推导波浪作用下, 二维海床土体的侧向位移分布, 并将其与动力  $p$ - $y$  曲线法相结合, 在 ANSYS 中对近海风机单桩基础模型进行了建模分析, 评估了海床失稳的影响, 得到了一些实用的结论。

## 2 波浪—海床相互作用的简化模型

波浪—海床相互作用的体系如图 1 (a) 所示, 波浪运动会对海床面施加波压力和剪切力的作用, 使海床土体产生变形。在仅考虑波浪单一传播方向的情况下, 从宏观力学性能出发, 图 1 (a) 所示的系统可简化为图 1 (b) 所示的力学系统。将海床土体视为一端固定, 一端自由的直杆, 假定海床深度为  $l$ , 杆长即为  $l$ , 杆截面抗弯刚度为  $EI$ ,  $I = 1/12bh^3$ ,  $b$  取为单位厚度,  $h$  取为单位波长。波浪对海床的作用力, 以轴向力  $P$  和水平力  $H$  的形式施加于直杆的顶端, 在  $P$  和  $H$  的作用下, 直杆顶端产生的水平位移为  $\delta$ 。下面根据材料力学里的挠度曲线方程推导杆的挠曲变形。

杆的弯矩方程为:

$$M(x) = P(\delta - y) + H(l - x) \quad (1)$$

其挠曲微分方程为:

$$EIy'' = P(\delta - y) + H(l - x) \quad (2)$$

令  $k^2 = \frac{P}{EI}$ , 则:

$$y'' + k^2y = k^2[\delta + \frac{H}{P}(l - x)] \quad (3)$$

其通解为:

$$y = A \sin kx + B \cos kx + \delta + \frac{H}{P}(l - x) \quad (4)$$

其一阶导为:

$$y' = Ak \cos kx - Bk \sin kx - \frac{H}{P} \quad (5)$$

由边界条件:  $x = 0$  时,  $y = 0$ ,  $y' = 0$ ;  $x = l$  时,  $y = \delta$ 。

可得:

$$A = \frac{H}{Pk}, B = -\frac{H}{P} \cdot \sqrt{\frac{EI}{P}} \cdot \tan \sqrt{\frac{Pl^2}{EI}}, \delta = \frac{H}{P} \sqrt{\frac{EI}{P}} \cdot \tan \sqrt{\frac{Pl^2}{EI}} - \frac{Hl}{P}。$$

因此, 杆的挠度曲线为:

$$y = \frac{H}{P} \sqrt{\frac{EI}{P}} [\sin \sqrt{\frac{P}{EI}}x - (\tan \sqrt{\frac{Pl^2}{EI}} \cdot \cos \sqrt{\frac{P}{EI}}x + \tan \sqrt{\frac{Pl^2}{EI}})] - \frac{Hx}{P} \quad (6)$$

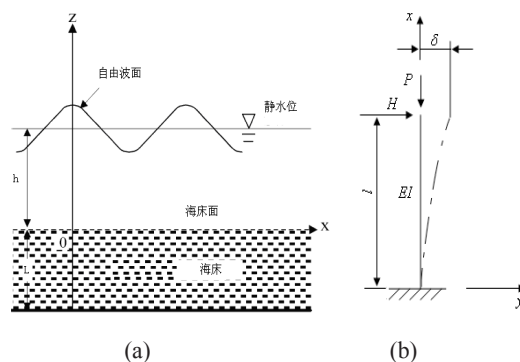


图 1 波浪—海床相互作用的简化模型

## 3 波浪对海床的作用力

波浪运动的理论有很多, 如艾里波理论、斯托克斯波理论、椭圆余弦波理论等, 其中工程上应用最多的是艾里波理论, 又称作小振幅波理论, 论文即采用小振幅波理论来分析波浪荷载对海床的作用力。根据小振幅波理论, 波面形态为余弦或正弦曲线, 若以平均水位 (即静水位) 为计算面,  $\eta$  为离开静水位的波面高程, 则波面方程可表示为:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \cos k(x - ct) \quad (7)$$

式中:  $\eta$  /m 为波面高度,  $k$  / $m^{-1}$  为波数,  $\omega$  / $s^{-1}$  为圆频率,  $H$  /m 为波高,  $x$  /m 为波传播方向上的位置点,  $c$  / (m/s) 为波浪传播速度,  $t$  /s 为时间。建立如图 2 所示的坐标系, 纵坐标  $z$  向上为正, 海面处为 0, 横坐标  $x$  向右为正。根据小振幅波理论, 流体内部任一点  $(x, z)$  处, 水质点运动的水平速度  $u$  和垂直速度  $w$  可分别表示为:

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

式中:  $h$  为水深;  $T$  为波浪周期; 其余参数同式 (7)。由式 (8) 和 (9) 可得, 某一瞬时波浪近底的水平速度  $u$  和垂直速度  $w$  分别为:

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)} \cdot \sin kx \quad (10)$$

$$w = 0 \quad (11)$$

用波浪底部流速  $u$  来计算波浪对海床的剪切作用, 海床床面切应力  $\tau$  的公式为:

$$\tau = \frac{1}{2} f_w \cdot \rho \cdot u^2 \quad (12)$$

式中:  $f_w$  为摩阻系数。

有限水深水面波动情况下, 流场中某一点  $z$  处的压力  $p_z$  可以表示为:

$$p_z = \rho g \eta K_p - \rho g z \quad (13)$$

式中:  $K_p$  为压力系数,  $K_p = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)}$ 。

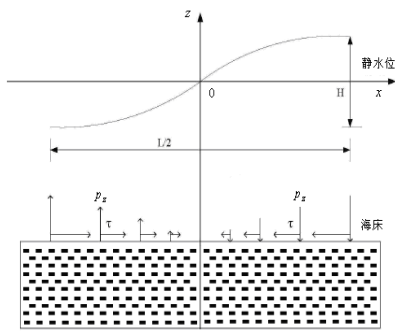


图 2 波浪对海床作用力的求解坐标系

由图 2 可知, 海床面处  $z = -h$ , 则波浪对海床面的压力为:

$$p_h = \rho g \eta \frac{1}{\cosh(kh)} + \rho g h \quad (14)$$

#### 4 简化模型的应用

根据东海大桥海上风电场的勘测资料, 结合 GL、DNV 等国际认可的近海风机设计规范及中国的港口工程桩基规范 (JTJ254—98)。近海风机单桩基础的设计结果如下: 钢管桩桩直径为 3.5m, 总长 55m, 伸出海床面长度为 19m, 海床面以下长度为 36m。建立坐标系,  $z$  坐标向上为正, 静水位处  $z=0$ , 则桩顶位于静水位以上 4m 处, 桩趾处  $z=-51m$ , 位于粉砂层顶部。钢管桩全长壁厚相同, 皆为 62mm。

利用大型通用有限元软件 ANSYS 进行建模, 采用 PIPE59 单元模拟单桩基础在水中的部分。对于泥面以下桩柱采用 PIPE16 单元模拟。埋入土壤的桩柱部分所受土壤非线性作用力通过非线性弹簧单元 COMBIN39 模拟。设置  $x$ 、 $y$  方向的非线性弹簧单元, 按  $p$ - $y$  曲线确定单元实常数, 以便模拟桩柱的横向承载变形; 设置  $z$  向非线性弹簧单元, 按  $t$ - $z$  曲线确定单元实常数, 以便模拟桩身的竖向承载变形, 因桩直径较大, 分析中忽略土塞效应及桩端土的支撑作用。

建模结果为: 桩土系统共有 168 个结点, 167 个单元, 其中泥面以上 PIPE59 单元 38 个, 泥面以下 PIPE16 单元 71 个, COMBIN39 非线性弹簧单元 57 个,  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  向各 19 个。假定桩为线弹性的, 弹性模量  $E=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ , 质量密度  $\rho=7850 \text{kg/m}^3$ , 泊松比  $\nu=0.3$ 。土体的侧向运动通过将水平位移施加于滑动土层中的弹簧支座上来模拟, 即应用支座位移加载法与动力  $p$ - $y$  曲线法相结合来模拟海床失稳对单桩基础的影响。假定土体滑移量单调增加, 40s 达到最大值, 而后维持此最大值不变, 总的分析时间取为 60s。滑移层深度取为 8m, 滑移层顶部位移最大值取为 0.2m。滑移层内其他点的土体运动幅值根据式 (6) 来确定。

图 3 为海床失稳对桩身剪力和弯矩的影响, 从图中可以看出, 海床失稳不仅对桩身内力的幅值影响显著, 而且会影响到桩身内力的分布。从图 3 (a) 可以看出, 海床失稳使得桩身下部剪力显著增大, 桩身发生剪切破坏的趋势增强。图 3 (b) 也显示, 桩身最大弯矩位置下移, 即处于更深土层的桩发生了较大的弯矩, 桩体发生屈曲破坏的危险也增强。总之, 海床失稳对桩身内力的影响十分显著, 应予以重视。

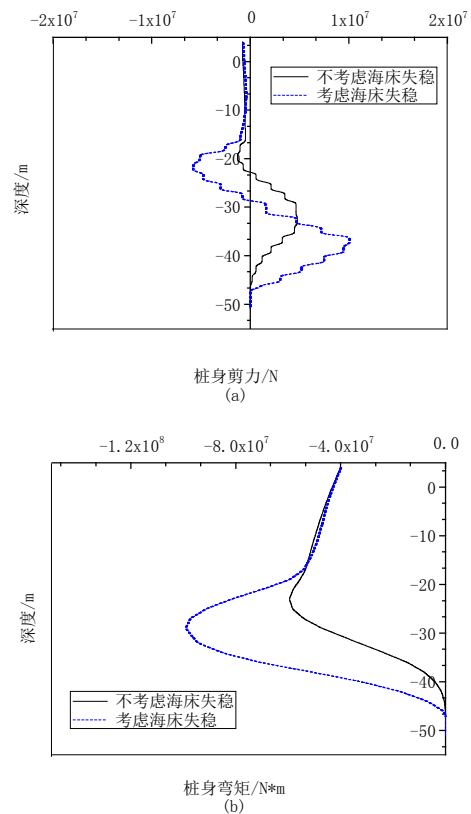


图 3 海床失稳对桩身内力的影响

#### 5 结语

与以往的研究不同, 论文从波浪—海床相互作用的宏观力学性能出发, 提出了一种波浪—海床相互作用体系的简化

(下转第 100 页)

能够在日益激烈的中国和国际中的竞争中取得优势,生产者需要不断提高工程机械的自动化程度,真正发挥自动化生产对生产的促进作用<sup>[1]</sup>。

#### 4.2 环保前景

工程机械行业的快速发展,一方面既能够带动人类文明的发展和国家实力的增强,另一方面也会给生态环境造成一定的影响。

例如,由于生产过快,使得企业从大自然中挖掘资源的速度过快,已经超过了自然恢复的速度。长此以往,资源枯竭就不只是一个假说,很有可能成为现实。因此,技术人员在优化自动化技术的同时,一定要遵循最小消耗资源、最小污染环境的原则,将技术对自然的损害降至最低。

## 5 结语

综上所述,在自动化技术出现的那一刻,工程机械行业的未来出现了新的发展点。尽管现阶段中国自动化水平仍然处于一个较低的阶段,但是随着国家、社会、企业对自动化技术的重视,对技术投入的增加,中国自动化技术一定会有一个更加光明的未来,中国工程机械行业的整体实力会更上一个台阶。

#### 参考文献

- [1] 王轶群.工程机械自动控制技术的发展[J].江西化工,2020(3):203-204.
- [2] 牟森,张宏生.浅析机械自动化技术及应用[J].科技创新与应用,2015(5):119-120.
- [3] 陈小云.人工智能技术在自动化控制中的应用探析[J].通讯世界,2014(6):106-107.

(上接第87页)

力学模型,推导了波浪作用下海床土体的侧向位移分布曲线。结合此简化模型,与动力 p-y 曲线法相结合,在 ANSYS 中对近海风机单桩基础模型进行了建模分析。结果显示,海床失稳对桩基的内力的幅值和分布均有显著的影响,会使桩基发生剪切破坏和屈曲破坏的危险性增强,在海洋桩基的设计中应合理估计海床失稳的影响。

#### 参考文献

- [1] Putnam J A. Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom[J]. Transaction of American Geophysical Union, 1949, 303(3):349-356.
- [2] Yamamoto, T. On the response of a poro-elastic bed to water waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 87(1):193-206.
- [3] Yamaoto T. Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations[J]. Ocean Engineering, 1981, 8(1):1-16.
- [4] Yamamoto T. On the response of a Coulomb-damped poro-plastic bed to water waves[J]. Marine Geotechnology, 1983, 5(2):93-130.
- [5] Biot, M.A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941(12):155-164.
- [6] 章根德,顾晓芸.有限厚度砂床对波浪荷载的响应[J].力学学

报,1993,25(1):56-68.

- [7] 吴梦喜,楼志刚.立波作用下海床的有效应力与液化分析[J].水利学报,2000(1):56-61.
- [8] 王栋,栾茂田.波浪作用下海床动力反应有限元数值模拟与液化分析[J].大连理工大学学报,2001,41(2):216-222.
- [9] 冯秀丽.海洋水动力条件下粉土响应模型[D].青岛:青岛海洋大学,2000.
- [10] 冯秀丽,叶银灿.动荷载作用下海底粉土的孔压响应及其动强度[J].青岛海洋大学学报,2002,32(3):429-433.
- [11] 许国辉,单红仙,贾永刚.黄河水下三角洲沉积物在循环荷载作用下土体中孔压变化实验研究[J].青岛海洋大学学报,2003,33(1):80-86.
- [12] Gade H G. Effects of a non rigid impermeable bottom on plane surface waves in shallow water[J]. Mar Res, 1958(16):61-82.
- [13] Dalrymple R A, Liu P L-F. Waves over soft mud: A two-layer fluid model[J]. Phys Oceanogr, 1978(8):1121-1131.
- [14] 吴永胜,王兆印,胡世雄.淤泥对波浪衰减作用的数值模拟[J].水利学报,2003(7):22-30.
- [15] 齐鹏,侯一筠.波浪作用下淤泥质底床泥体输移[J].水动力学研究与进展,2005,20(Z1):847-853.